

СОДЕРЖАНИЕ

Бондаренко М.Ф. К 90-летию со дня рождения Шифрина Якова Соломоновича	4
Поздравление Президента НАН Украины, академика НАН Украины Б.Е. Патона	5
Поздравление Директора 8-го Региона IEEE проф. Й. Модельского	6
О творческом пути Якова Соломоновича Шифрина	7
НАУЧНЫЕ СТАТЬИ	
Шифрин Я.С. Исследования дальнего тропосферного распространения в Харьковской радиотехнической академии им. Л.А. Говорова	10
Петров В.А. Из истории исследований дальнего тропосферного распространения радиоволн	17
Ганин С.А., Макота В.А., Шитиков А.М., Шишлов А.В., Шубов А.Г. Разработка антенных решеток в ОАО «Радиофизика»	23
Masashi Hayakawa. Seismo Electromagnetics as a frontier of Radio Science	35
Seyyed-Farhad Razavi and Yahya Rahmat-Samii. Phaseless Techniques in Antenna Near-Field Measurements: Algorithms, Simulations and Experiments	61
Kenichi Kagoshima, Hiromichi Teratake, Shigeki Obote. Synthesis method of an array pattern with maximum directivity and nulls at arbitrary angles	70
Минервин Н.Н. Предельные размеры апертуры антенны радиолокационной станции при компенсации воздействия внешней помехи	75
Карпенко В.И., Карпенко О.В., Збрицкий Р.А., Онищенко В.В. Статистика адаптивных оптоуправляемых антенн	78
Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Харламов Д.М. Оптимальная пространственная обработка многомодовых сигналов в условиях рассогласования	94
Леховицкий Д.И., Абрамович Ю.И., Жуга Г.А., Рачков Д.С. Lentочно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц гауссовых помех в алгоритмах адаптации антенных решеток	107
О ЮБИЛЕЕ	
Башук Е.Б., Лукьянчук А.Г. Севастопольские встречи	122
Гомозов В.И. К девятидесятилетию ученого и учителя, почетного профессора и доктора четырех университетов РФ и Украины Я.С. Шифрина	123
Горобец Н.Н. Vivat Professore (К 90-летию профессора Якова Соломоновича Шифрина)	129
Грабина В.А. Мой многолетний друг — Яков Соломонович Шифрин	131
Каплун В.А. С юбилеем, дорогой Яков Соломонович!	134
Катрич В.А., Колчигин Н.Н. Организатор антенной науки в независимой Украине (к юбилею Я. С. Шифрина)	135
Кашин В.А. Антеннщики «Алмаза» — Я.С. Шифрину	136
Корниенко Л.Г. Мой учитель	137
Курочкин А.П. Я.С. Шифрин и антенный отдел НИИ 17 — МНИИП — ОАО «Концерн «Вега»	141
Лобкова Л.М. Мои встречи с Я.С. Шифриным	143
Лучанинов А.И. Я.С. Шифрин и теория антенн с нелинейными элементами	144
Максимова Н.Г. Пятнадцать лет рядом с Я.С. Шифриным	146
Малеханов А.И. В поле притяжения	152
Минкович Б.М. Патриарх антенной науки	153
Обуховец В.А., Юханов Ю.В. Наш Яков Соломонович	155
Коллеги из ОАО «Радиофизика». От коллектива ОАО «Радиофизика» (к 90-летию Я.С. Шифрина)	157
Радиг Ю.Ю. Из Великого Новгорода	158
Седышев Ю.Н. Не только наукой славен юбилар	159
Тадаши Такано. Профессору Шифрину с благодарностью	162
Ткачев Г.Н. О кафедре Я.С. Шифрина в АРТА	163
Тырнов В. Четыре жизни Якова Шифрина	164
Хаякава М. Встречи с профессором Шифриным	169
Вен Шун Цан. От китайских друзей	170
Цыпин В. Жизнь, достойная подражания (к 90-летию Я.С. Шифрина)	172
Шубов А.Г. О встречах с юбиларом	174
Щеглов К.С. Вспоминая прошлое	175
Поклонники из Минска. Поздравление из Белоруссии	175
Яцук Л.П. Замечательный человек	176
ИЗ ЛИЧНОГО АРХИВА Я.С. ШИФРИНА	
Персоналии	178
Копии дипломов научных наград	179
Копия сертификата Соросовского профессора	179
Копия сертификата действительного члена IEEE	179
Копии дипломов почетного профессора и почетного доктора	180
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ВОСПОМИНАНИЙ	181

CONTENTS

Bondarenko, M. F. On the 90-th birthday anniversary of Yakov Solomonovich Shifrin	4
Greetings from President NAN Ukraine Academician NAN Ukraine B. E. Paton	5
Greetings from Region 8 IEEE Director Prof. J. Modelsky	6
On the scientific carrier of Yakov Solomonovich Shifrin	7
SCIENTIFIC ARTICLES	
Shifrin, Y. S. Investigations of far tropospheric propagation at the L. A. Govorov Kharkov Radio Engineering Academy.....	10
Petrov, V. A. From history of the investigations of far tropospheric propagation	17
Ganin, S. A., Makota, V. A., Shitikov, A. M., Shishlov, A. V., Shubov, A. G. Development of array antennas at JSC “Radiophysika”	23
Hayakawa, M. Seismo Electromagnetics as a frontier of Radio Science	35
Razavi, S.-F. and Rahmat-Samii, Y. Phaseless techniques in antenna near-field measurements: algorithms, simulations and experiments.....	61
Kagoshima, K., Teratake, H., Obote, S. Synthesis method of an array pattern with maximum directivity and nulls at arbitrary angles.....	70
Minervin, N. N. Limit of radar antenna aperture size at interference compensation.....	75
Karpenko, V. I., Karpenko, O. V., Zbritskiy, R. A., Onishchenko, V. V. Statistics of adaptive optically controlled antennas	78
Gorodetskaya, E. Y., Malekhanov, A. I., Kharlamov, D. M. Optimal array processing of multimode signals under their mismatch conditions	94
Lekhovitskiy, D. I., Abramovich, Y. I., Zhuga, G. A., Rachkov, D. S. Band-diagonal regularization of ML estimates of Gaussian interference correlation matrices in algorithms of antenna arrays adaptation	107
ABOUT PERSON WHOSE JUBILEE IS CELEBRATED	
Bashuk, E. B., Luk'yanchuk, A. G. Meetings in Sevastopol	122
Gomozov, V. I. To 90-th anniversary of Scientist and Teacher, Honorary Professor and Doctor of four Universities of Russia and Ukraine Y. S. Shifrin	123
Gorobets, N. N. Vivat Professore (To 90-th anniversary of Professor Yakov Solomonovich Shifrin)	129
Grabina, V. A. My many-year friend is Yakov Solomonovich Shifrin	131
Kaplun, V. A. Jubilee congratulations, dear Yakov Solomonovich!	134
Katrich, V. A., Kolchigin, N. N. Organizer of antenna science in the independent Ukraine (to Y. S. Shifrin's jubilee)	135
Kashin, V. A. Antenna specialists of “Almaz” to Yakov Shifrin	136
Kornienko, L. G. My teacher	137
Kurochkin, A. P. Y. S. Shifrin and the antenna department of the 17-th Research Institute – MNIIP – JSC «Concern «Vega»	141
Lobkova, L. M. My meetings with Y. S. Shifrin.....	143
Luchaninov, A. I. Y. S. Shifrin and the theory of antennas with nonlinear elements	144
Maksimova, N. G. Fifteen years of being nearby Y. S. Shifrin	146
Malekhanov, A. I. In the field of attraction.....	152
Minkovich, B. M. Patriarch of antenna science.....	153
Obukhovets, V. A., Yukhanov, Yu. V. Our Yakov Solomonovich	155
Colleagues from JSC «Radiophysika». From collective of JSC «Radiophysika» (to 90-th anniversary of Y. S. Shifrin)	157
Radtsig, Yu. Yu. From Velikiy Novgorod	158
Sedyshev, Yu. N. Not only by science is famous person whose jubilee is celebrated	159
Takano, T. To Professor Shifrin with gratitude	162
Tkachev, G. N. About Y. S. Shifrin's chair at ARTA	163
Tyrnov, V. F. Four lives of Yakov Shifrin	164
Hayakawa, M. Meetings with Professor Shifrin	169
Zhang, W. X. From Chinese friends.....	170
Tsy-pin, V. M. Life worthy to be followed (to 90-year jubilee of Y. S. Shifrin).....	172
Shubov, A. G. About meetings with the person celebrating jubilee	174
Shcheglov, K. S. Recalling the past	175
Admirers from Minsk. Congratulations from Belorussia.....	175
Yatsuk, L. P. Wonderful person	176
FROM PERSONAL ARCHIVE OF Y. S. SHIFRIN	
Personalia	178
Copies of scientific award diplomas	179
Copy of Soros Professor certificate	179
Copy of Fellow IEEE certificate	179
Copies of Honorary Professor and Honorary Doctor diplomas.....	180
INFORMATION ABOUT AUTHORS OF REMEMBRANCES	181



ЯКОВ СОЛОМОНОВИЧ ШИФРИН

Заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат премии им. А.С.Попова АН СССР, почетный профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники, Севастопольского национального технического университета, Таганрогского технологического института Южного Федерального университета, почетный доктор Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, президент Украинской национальной ассоциации «Антенны», пожизненный действительный член Международного общества радиоинженеров (Life Fellow IEEE), соровский профессор, академик и член Президиума Академии наук прикладной радиоэлектроники (АН ПРЭ), главный научный сотрудник ХНУРЭ, доктор технических наук, профессор, участник Великой Отечественной войны.

23 апреля 2010 года исполняется 90 лет главному научному сотруднику ХНУРЭ Якову Соломоновичу Шифрину, крупному ученому в области радиофизики и прикладной электродинамики, заслуженному деятелю науки и техники Украины, лауреату премии им. А.С.Попова АН СССР, президенту Украинской национальной ассоциации «Антенны», пожизненному действительному члену Международного общества радиоинженеров (Life Fellow IEEE), сороковскому профессору, академику и члену президиума Академии наук прикладной радиоэлектроники (АН ПРЭ), доктору технических наук, профессору, основоположнику известной во всем мире статистической теории антенн.

В начале Великой Отечественной войны Яков Соломонович, только что окончивший физический факультет Ленинградского государственного университета, добровольно ушел в ряды Ленинградского Народного ополчения и «задержался» в армии на 40 лет. Почти 25 лет своей воинской службы (1957–1980 гг.) он был начальником кафедры антенн и распространения радиоволн Военно-инженерной радиотехнической академии им. Л.А. Говорова. Под его руководством эта кафедра, по общему признанию, стала одной из лучших (если не лучшей) среди аналогичных кафедр военных и гражданских вузов бывшего СССР. Ее отличали высокий уровень постановки учебного процесса, исключительно квалифицированный преподавательский состав, мощный научный потенциал, эффективнейшая система подготовки научных кадров высшей квалификации. Всех этих успехов кафедра добилась во многом благодаря выдающимся педагогическим, научным и организаторским способностям ее руководителя профессора Я.С.Шифрина.

Последнее объясняет и то, что приход Якова Соломоновича в ХНУРЭ в 1980 г. стал знаковым событием не только для радиофакультета, но и для всего университета в целом. За тридцать лет работы в нашем университете Яков Соломонович внес огромный вклад в совершенствование учебного процесса, повышение фундаментальности инженерного образования, развитие научных исследований, подготовку научных кадров. Под его руководством или при его существенной помощи и научных консультациях в университете защищено более 15 кандидатских и около 15 докторских диссертаций. Созданные и развитые Яковым Соломоновичем и его учениками новые научные направления по статистической теории антенн, теории антенн с нелинейными элементами, диагностике фазированных антенных решеток хорошо известны отечественным и западным специалистам. По всем этим направлениям школа Я.С.Шифрина занимает лидирующие позиции в мире. За годы работы в ХНУРЭ Я.С. опубликовал лично (или в соавторстве) 10 монографий, 60 статей и около 65 докладов. Значительная часть этих научных трудов опубликована в зарубежных изданиях.

Помимо обширной многоплановой научно-педагогической деятельности непосредственно в нашем университете, Я.С. непрестанно оказывает большую помощь родственным кафедрам многих вузов Украи-

ны и России. Отражением этого, в частности, явилось то, что он, являясь почетным профессором ХНУРЭ, выбран также почетным профессором Таганрогского технологического института Южного Федерального университета и Севастопольского технического университета и почетным доктором Харьковского государственного университета им. В.Н. Каразина.

Особо следует отметить проводимую Я.С. широкомасштабную научно-организационную работу, направленную на развитие украинской антенной науки. Сразу же после распада СССР им в 1991 г. был организован республиканский антенный семинар. Позднее, в начале 1993 г., на базе ХНУРЭ Я.С. была создана, функционирующая по настоящее время, Украинская национальная ассоциация «Антенны», которая много сделала для объединения и тесного взаимодействия антенщиков Украины, интеграции украинской антенной науки в мировую. Налаживанию международных связей существенно способствовали также и созданные Я.С. в 1995 г. Восточно-Украинское и в 2000 г. Харьковское отделения Международного общества радиоинженеров. В 1995 г. Я.С. инициировал проведение международных антенных конференций, а в 2002 г. — еще и конференций по сверхширокополосным сигналам. Благодаря высокому научному авторитету и широким международным связям Я.С.Шифрина, на эти конференции съезжаются видные ученые из СНГ и многих стран дальнего зарубежья. К настоящему времени проведены уже 11 таких конференций. Эти конференции пользуются широким признанием в мире, что существенно способствовало повышению научного авторитета ХНУРЭ — одного из основных организаторов этих конференций. Повышению научного авторитета нашего университета в немалой мере способствовали также и многочисленные поездки Я.С. в дальнее зарубежье для выступлений с докладами на научных конференциях и чтения лекций по разным аспектам прикладной электродинамики.

Я.С. является членом редколлегии шести авторитетных научных журналов, активно участвует в деятельности АН прикладной радиоэлектроники.

Заслуги Я.С.Шифрина перед Родиной и наукой отмечены 4 орденами и 18 медалями. Почетной грамотой Президента Украины. В 1983 г. президиум АН СССР присудил ему премию им. А.С.Попова. В 1991 г. он удостоен звания «Заслуженный деятель науки и техники Украины», в 1994 г. стал сороковским профессором, в 2005 г. удостоен почетного знака Министра образования и науки Украины «За научные достижения».

Профессорско-преподавательский состав и весь коллектив Харьковского национального университета радиоэлектроники, члены Академии наук прикладной радиоэлектроники сердечно поздравляют Якова Соломоновича Шифрина со славным 90-летним юбилеем, желают ему доброго здоровья, бодрости духа, вдохновения и новых творческих успехов.

Ректор ХНУРЭ, Президент АН ПРЭ



М. Ф. Бондаренко



ВЕЛЬМИШАНОВНИЙ ЯКОВЕ СОЛОМОНОВИЧУ!

Від імені Президії Національної академії наук України і від себе особисто щиро вітаю Вас зі славним ювілеєм!

Ми глибоко шануємо Вас як всесвітньо відомого вченого в галузі радіолокації та радіоелектронних систем. У Вашому науковому доробку є чимало значних досягнень, які сприяють вирішенню багатьох державних та оборонних проблем.

Заснований Вами науковий напрям — статистична теорія антен — є одним із напрямів сучасної радіофізики, а Ваші експериментальні дослідження дальнього тропосферного розповсюдження радіохвиль дістали високу оцінку наукової спільноти.

У цей день приємно відзначити, що Вами підготовлено 25 докторів та більше 50 кандидатів наук, які продовжують Ваші роботи з теорії антен та розповсюдження радіохвиль. Ваша надзвичайна працездатність, доброзичливість, скромність, вимогливість до себе викликають у всіх, хто спілкується з Вами, глибоку повагу і щирі симпатії.

Щиро зичимо Вам, дорогий Якове Соломоновичу, міцного здоров'я та щастя, творчого натхнення й оптимізму, добробуту й процвітання. Нехай Ваші партнери й однорідники завжди будуть надійними, нехай таланить Вам у всіх Ваших справах.

Зі щирою повагою

Президент НАН України

академік НАН України

Б. Є. Патон

TO LIFE FELLOW IEEE PROF. YAKOV S. SHIFRIN

Dear Professor Shifrin,

It is a great pleasure for me, on behalf of the management of the IEEE Region 8 to send greetings to you on the occasion of anniversary of your 90th birthday and 65 years of scientific and pedagogical activity.

You have contributed fundamentally to the field of applied electromagnetics. The statistical antenna theory (SAT), which you have developed, is of primary importance in designing, developing and exploiting large expensive reflector antennas of space observing systems and unique radiotelescopes, as well as complicated multi-element phased antenna arrays. Your monograph "Issues of the Statistical Antenna Theory" published in the USSR in 1970 and translated in the USA a year later, made these works widely recognized and highly appreciated in the world, which had its reflection in the prestigious A.S. Popov Prize AS USSR award, which you received in 1983. Also owing to this, in 1998 you were elected the IEEE Fellow with an honorary citation "for fundamental contribution to antenna theory and technology".

The results of many years of investigation into the field of far tropospheric propagation (FTP) of radio waves are also very well-known. Your monograph on FTP (1964), being the first type of work of such character in the world, was evaluated highly by the Soviet and Western prominent scientists.

You and your disciples have laid the foundations of the theory of antennas with nonlinear elements, which have numerous applications in the modern radio electronics. Its results are also important in the social context, providing solutions to a number of actual problems of national economy, in particular to the development of different wireless power transmission lines via the microwave beam and the creation of solar space power stations.

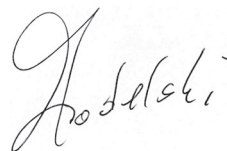
As a Director of the IEEE Region 8, I would particularly like to mention your exclusive services in the Organization of Antenna Science in an independent Ukraine. Immediately after the disintegration of the USSR, you dedicated yourself to the organization of Ukrainian antenna seminars and, on their basis, the creation of the Ukrainian National Antenna Association (1995) that significantly contributed into uniting antenna specialists in Ukraine and elucidating its an-

tenna scientific potential. IEEE Eastern-Ukrainian (1995) and Kharkov (2000) Chapters, of which you had been a creator and head for many years, powerfully stimulated the accession of Ukrainian antenna science into the global one.

International conferences on antenna theory and techniques (ICATT) you have organized and been leading biennially since 1995 contributed to this success to a great extent as well. I had the occasion to visit the second ICATT in Kyiv (1997) and enjoyed its scientific program and wonderfully warm atmosphere. Biennial conferences on ultrawideband and ultrashort impulse signals (UWBUSIS) you initiated in 2002 are also world-acclaimed events. Without any doubt, the high scientific level of these conferences, held under the auspices of the IEEE and attended by prominent scientists from different countries around the world, contributes to the prestige of the Institute.

Your numerous trips to different countries with presentations at scientific conferences and lectures given on different aspects of the applied electromagnetics have added immensely to the prestige of Ukrainian science. I am even prouder knowing that those trips were held owing to the efforts of my Polish colleagues, who invited you to the well-known conference on EMC in Wroclaw in 1990. Also, in 1993 you were awarded the honorary Kostyushko medal of the Polish Armed Forces for giving lectures and consulting students at the Polish Research Institute of Communications, the Polish Military School of Communications and the Military Academy.

Dear Yakov, on this special day, the entire Region 8 would like to cordially wish you a lot of good health, prosperity and more professional successes for the years to come.



Prof. Jozef Modelski
Region 8 Director

Warsaw, February 15th, 2010

Родился Я.С.Шифрин в г. Мстиславле (Белоруссия) 23 апреля 1920 г. В начале 1926 г. семья переехала в Ленинград, где он в 1937 г. окончил с серебряной медалью старейшую городскую школу (ныне Вторая Санкт-Петербургская гимназия им. Александра I). После окончания школы поступил на физический факультет Ленинградского государственного университета, который окончил с отличием в 1941 г. Специализировался в области теоретической физики.

В первые дни войны Я.С. Шифрин, будучи председателем профкома факультета, принимал активное участие в формировании Ленинградской Армии Народного Ополчения, а в начале июля вступил в ее ряды. По приказу Верховного Главнокомандующего в конце августа был откомандирован на учебу в Военную Краснознаменную академию связи им. С.М. Буденного (ВКАС). Летом и осенью 1943 г. принимал активное участие в боях за освобождение Украины на третьем Украинском фронте. Во время учебы во ВКАС Я.С. Шифриным была выполнена первая научная работа, посвященная расчету характеристик ряда проволочных антенн с учетом реальных параметров почвы, которая была опубликована лишь в 1948 г. После окончания весной 1944 г. с отличием радиофакультета ВКАС и кратких курсов по радиолокации, в сентябре 1944 г. назначен командиром одной из новых батарей станции орудийной наводки (СОН). Эта батарея до конца войны участвовала в боевых действиях в составе различных частей Войск ПВО страны. С конца 1946 г. по лето 1948 г. — первый преподаватель радиолокации в Севастопольском училище зенитной артиллерии (ныне Житомирский военный университет радиоэлектроники). В 1948-1951 гг. — адъютант первого набора Артиллерийской радиотехнической академии (АРТА) в г. Харькове. Его кандидатская диссертация посвящена теории приборов бегущей волны. С 1951 по 1956 гг. — на преподавательских должностях в АРТА, а с 1957 по 1980 гг. — начальник кафедры антенн и распространения радиоволн этой академии. В 1964 г. Яков Соломонович защищает докторскую диссертацию, посвященную созданной им статистической теории антенн. В 1966 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре антенн и распространения радиоволн.

После увольнения из Вооруженных Сил в 1980 г. — профессор, заведующий кафедрой, главный научный сотрудник в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ).

Яковом Соломоновичем внесен фундаментальный вклад по ряду направлений современной радиофизики. Он является основателем нового научного направления — статистической теории антенн (СТА). Эта теория, определяемая как теория антенн со случайными источниками, позволила впервые исследовать в полном объеме

свойства и потенциальные возможности реальных антенн, являющихся по существу излучающими системами со случайными источниками.

Исследования Я.С. Шифрина по СТА, охватывающие почти 50-летний период, можно разбить на два этапа. Итогом первого этапа — этапа становления основ СТА — явилась его широко известная монография «Вопросы статистической теории антенн» (изд-во Советское радио, 1970 г.). Эта книга содержит глубокое и систематическое изложение основ СТА. Подчеркнута общность теории, обусловленная тем, что она пригодна при любых значениях флуктуаций поля в апертуре антенны, и тем, что она одинаково результативна независимо от конкретного механизма флуктуаций поля в антенне, порождены ли они внутри нее или обусловлены случайными неоднородностями среды распространения волн. В последнем случае флуктуации поля в антенне иногда могут быть столь значительными, что диаграмма направленности (ДН) антенны вообще «рассыпается». Это может иметь место на загоризонтных линиях тропосферного и ионосферного рассеяния, на протяженных КВ-трассах, при прохождении волн через плазменные образования и т.д. Общность развитой теории предопределила широкую область ее применимости. Не случайно монография Я.С. Шифрина стала настольной книгой не только у научных работников и инженеров, работающих в области антенн, но и у специалистов, занимающихся распространением волн, радиолокацией, акустикой, оптикой и т.д.

Сразу же после ее выхода, монография Я.С. Шифрина была переведена и издана в США («Statistical Antenna Theory», Golem Press, 1971) и там также получила широкое признание и высокую оценку.

После 1970 г. фронт исследований существенно расширился. На этом втором этапе Я.С. Шифриным и его учениками выполнена серия работ, направленных на развитие общей СТА и решение многих важных прикладных задач. Здесь, в первую очередь, надо указать разработку (совместно с Л.Г.Корниенко) основ статистического синтеза антенн, обобщение СТА на зону Френеля и построение статистической теории антенн, сфокусированных в зону Френеля. Теория для зоны Френеля строилась как для непрерывных, линейных и апертурных антенн, так и для дискретных систем (включая случайные разреженные решетки). Актуальность этих исследований обусловлена, с одной стороны, ростом электрических размеров современных антенн, влекущим за собой увеличение протяженности и, соответственно, значимости зоны Френеля, а с другой стороны, обострением проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). Последнее диктует необходимость изучения структуры поля антенны на различных расстояниях от нее, т.е. во всем окружающем ее пространстве.

Статистическая теория антенн послужила также исходной и при разработке Я.С. Шифриным (совместно с В.А. Усиным) основ статистической теории антенных измерений. Эта теория позволяет корректно оценить потенциальные возможности голографического и коллиматорного методов антенных измерений, требования к соответствующей измерительной аппаратуре, к антенным эталонам.

Практика современного антенностроения убедительно подтверждает, что разработка сложных, дорогостоящих антенн (прежде всего фазированных антенных решеток и крупных зеркальных антенн) немислимы сегодня без использования СТА, ее подходов и результатов. Именно на базе СТА можно сформулировать обоснованные требования к производству антенн, стабильности и надежности ее элементов, определить на этапе проектирования антенн их реальные и предельно достижимые характеристики с учетом различных условий эксплуатации. Как показано Я.С. Шифриным, флуктуации источников внутреннего и внешнего происхождения заметно ограничивают предельные (или целесообразные) размеры крупных антенн, сводят на нет попытки реализовать сверхнаправленные антенны, серьезно лимитируют минимально достижимый уровень боковых лепестков. Последнее осложняет решение задач ЭМС, помехоустойчивости и разведустойчивости радиотехнических систем (РТС).

В целом, исследования Я.С. Шифрина в области СТА можно с полным основанием отнести к числу краеугольных в общей теории и практике антенн.

Признанием этого явилось присуждение ему в 1983 г. Президиумом АН СССР премии им. А.С. Попова с формулировкой «За работы в области СТА, внесшие фундаментальный вклад в теорию и технику антенн».

В 1988 г. за монографию «Методы измерения параметров излучающих систем», содержащую метрологические аспекты СТА, Я.С. Шифрин был удостоен премии «За лучшую научную работу» Госкомитета СССР по народному образованию.

Работы по СТА удостоены и мирового признания. В 1998 г. Яков Соломонович избран (первым в Украине и первым среди антенщиков СНГ) действительным членом Международного общества инженеров электриков (Fellow) с формулировкой «За фундаментальный вклад в теорию и технологию антенн». В 2008 г. он становится пожизненным членом этого общества (Life Fellow IEEE).

Основы развитой Я.С. Шифриным СТА для дальнейшей зоны и зоны Френеля вошли в 1-й том «Справочника по антенной технике» (гл. 9, М.: ИПРЖР, 1997). Основы статистического синтеза антенн изложены в книге «Проблемы антенной техники» (гл. 13, изд. Радио и связь, 1989).

Вторым направлением фундаментальных исследований Я.С. Шифрина и его школы явились первые в СССР обстоятельные экспериментальные исследования дальнего тропосферного рас-

пространения (ДТР) радиоволн. Они выполнялись в течение длительного времени (1956-1962 гг.) на трассах различной протяженности, в различных диапазонах волн и в различное время года. Изучались средний уровень сигнала и его флуктуации, распределение поля в фокальной плоскости приемной антенны, потери усиления при ДТР, корреляция сигналов разных диапазонов волн и ряд других характеристик рассеянного поля. Особое внимание было уделено изучению весьма информативных мгновенных ДН приемных антенн. Для понимания и правильной интерпретации наблюдаемых при ДТР эффектов широко привлекалась СТА. Такой подход позволил установить ряд новых закономерностей, присущих ДТР, выяснить роль различных механизмов этого явления в зависимости от ряда факторов (сезона года, времени суток, длины трассы и т.д.). Полученные результаты изложены в двух монографиях (изд-во академии, 1964 г., и изд-во «Советское радио», 1965 г.), получивших широкую известность и высокую оценку специалистов. Первая из этих книг была вообще первой в мировой литературе монографией по ДТР.

Третье направление оригинальных исследований юбиляра — теория антенн с нелинейными элементами (АНЭ). Актуальность этих исследований связана, во-первых, с внедрением в радиотехническую практику разных типов АНЭ: антенн-выпрямителей (ректенн), смесительных антенн, антенн-умножителей, антенн-генераторов и т.д., — и, во-вторых, с проблемой ЭМС. Последнее настоятельно диктует необходимость изучения «вредных» нелинейных антенных эффектов, возникающих из-за наличия НЭ в антеннах или неблагоприятного режима работы передающего тракта РТС. Исследования Я.С. Шифрина и его учеников (прежде всего А.И. Лучанинова и В.М. Шокало) в течение более 20 лет привели к разработке достаточно общей теории антенн с сосредоточенными НЭ. Значительные успехи в последнее время достигнуты и в развитии теории антенн с распределенной нелинейностью, существенно необходимой при анализе интегрированных антенн. Созданы эффективные алгоритмы и программы расчета многих типов антенн с сосредоточенными и распределенными НЭ. Одним из важнейших выходов этих работ явилась детальная разработка теории и практики построения ректенных систем, являющихся оконечными устройствами систем беспроводной передачи энергии. Уже многие годы школа Я.С. Шифрина в области АНЭ занимает лидирующие позиции в мире. Результаты исследований этой школы в области АНЭ отражены в большом числе статей и депонированных монографий, а также вошли в упомянутый ранее 1-й том «Справочника по антенной технике» (гл. 10).

Четвертое направление исследований Я.С. Шифрина (совместно с У.Р. Лиепином) связано с диагностикой ФАР. Эта задача состоит в определении реального текущего состояния ФАР, местоположения и характера неисправностей в

ней в целях учета их влияния в ходе функционирования ФАР. Предложено два новых метода бесфазовой диагностики ФАР, которые представляются наиболее перспективными из всех методов, описанных в литературе к настоящему времени. Значительный интерес представляет также предложенный авторами новый метод компенсации влияния отказов (полных или частичных) части каналов ФАР, основанный на использовании взаимосвязи положения нулей в ДН антенны с ее общей формой. Важное теоретическое и практическое значение имеет и разработанный Я.С. Шифриным и У.Р. Лиепиным экспериментальный метод определения матрицы взаимовлияния излучателей ФАР. Зная эту матрицу, можно уже на этапе разработки ФАР предусмотреть алгоритмическую компенсацию эффектов взаимовлияния излучателей, что существенно облегчит реализацию сканирования луча ФАР в широком секторе. Основные результаты, полученные ими по диагностике ФАР, изложены в ряде статей и в книге «Активные фазированные решетки» (гл.13, М.: Радиотехника, 2004 г.).

Более 50 лет Я.С. Шифрин вел активную преподавательскую работу в Военно-инженерной академии им. Л.А. Говорова (бывшей АРТА) и в ХНУРЭ. Около 30 лет возглавлял кафедры в этих учебных заведениях. Им написано много высококачественных учебных пособий, среди которых выделяется книга «Антенны» (издание академии, 1976 г.), которая служила и служит до сих пор учебником в ряде военных и гражданских вузов СНГ. Помимо непосредственной педагогической работы, много внимания Я.С. уделял проблемам высшего образования в СССР, а теперь в Украине подготовке молодых преподавателей. Обобщив свой 50-тилетний опыт преподавания в технических вузах, он подготовил и издал в Таганроге, Харькове и Болгарии материал «Методологические основы фундаментального инженерного образования». Этот материал и лекции на эту же тему были с одобрением восприняты во многих вузах России и Украины. Многие годы Я.С. был членом различных методических и научных межведомственных советов по антеннам, распространению радиоволн, радиофизике. Он является членом редколлегии ряда авторитетных научных журналов по радиоэлектронике в России и Украине, активно участвует в работе АН ПРЭ.

Я.С. Шифрин — автор около 300 научных работ, в том числе 16 монографий. Под его руководством или при его существенной помощи были защищены около 25 докторских и более 50 кандидатских диссертаций.

Глубокого признания заслуживает научно-организационная деятельность Якова Соломоновича и помощь, которую он на протяжении многих лет оказывал и продолжает оказывать ряду вузов стран СНГ. Здесь можно указать, например, кафедры антенн Минского высшего военного училища (сейчас Военная академия Беларуси), Казанского авиационного института, Севастопольского технического университета (Сев НТУ)

и Таганрогского технологического института Южного Федерального университета (ТТИ ЮФУ) РФ, Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, отдел антенно-фидерных устройств ГKB «Южное» им. М.К. Янгеля и т.д. Это, в частности, нашло отражение в том, что он, будучи почетным профессором ХНУРЭ, был выбран также почетным профессором СевНТУ и ТТИ ЮФУ РФ, а также почетным доктором ХНУ им. В.Н.Каразина. Масштаб научно-организационной деятельности Я.С. существенно расширился после распада СССР. Уже в 1991 г. он организовал украинский антенный семинар, целью которого были обмен опытом антенщиков Украины, выяснение ее научного потенциала. На базе этого семинара в начале 1993 г. Яковом Соломоновичем была создана Украинская национальная ассоциация «Антенны», которая многое сделала для объединения антенщиков Украины, интеграции украинской науки в мировую. Последнему во многом способствовали созданное им (вместе с А.И. Носичем) в 1995 г. Восточно-Украинское и созданное им же в 2000 г. Харьковское отделения IEEE, руководителем которых он был многие годы.

Особо следует отметить большую многолетнюю работу, проводимую Я.С. по организации и проведению международных антенных конференций (ICATT). К настоящему времени проведено уже семь таких конференций, которые стали преемниками известных «пистольковских» антенных конференций, проходивших ранее в СССР на протяжении многих лет. В 2002 г. Я.С. инициировал проведение новых конференций — по сверхширокополосным и сверхкоротким импульсным сигналам (UWBUSIS). В 2010 г. будет проведена уже пятая подобная конференция. При организации тех и других конференций большое внимание уделяется организации высококачественных заказных докладов и оказанию финансовой поддержки молодым ученым. Труды этих конференций издаются на английском языке и расходятся по всему миру. На ICATT и UWBUSIS съезжаются видные ученые из Украины, России, Беларуси и из дальнего зарубежья. В немалой мере этому способствует высокий научный авторитет и широкие международные связи Якова Соломоновича, приобретенные им благодаря активному участию в многочисленных научных конференциях и чтению лекций по разным аспектам прикладной электродинамики в разных странах Европы, США, Японии, Китае и т.п. В период с 1990 г. по 2003 г. Я.С. Шифрин выступал с докладами и лекциями около 50 раз в 17 странах мира.

Заслуги Я.С. Шифрина перед Родиной и наукой получили широкое признание. Они отмечены 4 орденами и 18 медалями, благодарностями Президента Украины, премией А.С.Попова (1983 г.), званием «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (1991 г.), почетным знаком Министра высшего образования и науки Украины «За научные достижения» (2005 г.).

УДК 621.371.34

ИССЛЕДОВАНИЯ ДАЛЬНОГО ТРОПОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ХАРЬКОВСКОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ ИМ. Л.А. ГОВОРОВА

Я.С.ШИФРИН

Излагаются в сжатом виде основные результаты экспериментального исследования явления дальнего тропосферного распространения (ДТР) ультракоротких радиоволн, выполненного в Харьковской радиотехнической академии в 1956-1962 гг.

In the article, main results of the experimental investigations of the phenomenon of far troposphere propagation (FTP) for ultrashort waves, carried out at the Kharkov Radio Engineering Academy in 1956-1962, are briefly given.

Как было экспериментально установлено в конце 40-х – начале 50-х годов прошлого столетия, средний уровень электромагнитного поля в диапазоне УКВ, создаваемого тем или иным передающим устройством, на 5-6 порядков выше значения его, определяемого дифракционными формулами Фока. Это явление, получившее название дальнего тропосферного распространения (ДТР), сразу же после его открытия вызвало большой теоретический и практический интерес. Перед теоретиками встала задача объяснить это явление, найти механизмы, его порождающие. Что же касается практиков, то им стало ясно, что существование ДТР открывает перспективы построения загоризонтных линий радиосвязи на большие расстояния. Вместе с тем стало очевидным, что существование ДТР осложняет помеховую обстановку за горизонтом для радиосистем различного назначения. Однако и для построения надежных радиолиний, и для оценки степени ухудшения помеховой обстановки необходимо иметь достаточно надежные количественные данные об основных характеристиках поля при ДТР. Предложенные уже в 50-е гг., на начальном этапе исследований ДТР, теории: теория рассеяния на глобулах турбулентного происхождения, теория некогерентного рассеяния и отражения от протяженных атмосферных образований, теория когерентного рассеяния (из-за существования инверсионных слоев или из-за монотонного убывания диэлектрической проницаемости тропосферы с высотой) – оказались не в состоянии объяснить совокупность наблюдавшихся экспериментальных зависимостей. Это положение стимулировало появление как новых теоретических, так и, особенно, потока экспериментальных работ в разных странах мира, результаты которых обобщены в ряде монографий и учебников (см., например, [1-7]). В СССР одной из первых работ по исследованию ДТР была работа по двухлетней правительственной теме «Дельта» (1956-1957) гг. Исполнителями этой темы были Институт радиоэлектроники АН СССР (г. Москва) и Артиллерийская радиотехническая академия (г. Харьков).

Основные экспериментальные исследования по теме «Дельта» выполнялись в академии под руководством проф. Я.С. Шифрина.

Целью этих исследований являлось:

- определение основных характеристик поля при ДТР, в зависимости от разных факторов: времени суток, сезона, расстояния, длины волны и т.д. Эти данные необходимы, прежде всего, для построения радиолиний, использующих явление ДТР;

- выяснение, по возможности, роли различных механизмов ДТР в зависимости от тех же, указанных выше, факторов. Эти результаты необходимы как при решении ряда прикладных вопросов, так и для дальнейшего продвижения вперед теоретических исследований, создания более совершенной теории ДТР, чем уже существующие.

Исследования ДТР в академии продолжались и после окончания темы «Дельта», причем масштаб их и, соответственно, экспериментальная база были существенно расширены. Завершены исследования были в 1962 г. При этом последние полтора года они снова выполнялись в формате правительственной темы «Дельта-1» с теми же исполнителями, что и в первоначальной теме «Дельта». Основные результаты исследований, выполненных в академии, были изложены в книге [3], вышедшей в изд-ве академии в 1964 г. Надо отметить, что исследованиями ДТР в СССР занимались в то время и в ряде других организаций – военные моряки, в ИРЭ АН Украины, в Ленинградском электротехническом институте связи, в НИИ связи в Москве и т.д. Тем не менее, изложенные в [3] результаты исследований, проведенных в академии, представляют, на наш взгляд, особый интерес. Прежде всего, потому, что эти исследования охватывали почти семь лет, что являлось рекордным не только в СССР, но и, по-видимому, в мире. Столь длительный период позволил получить ряд уникальных результатов, касающихся, в частности, годового хода среднего уровня сигналов, связи уровня сигнала при ДТР с числом Вольфа, характеризующим солнечную активность, и т.д.

Вторая особенность этих исследований состояла в том, что они проводились на многих трассах в трех диапазонах волн (1,5 м, 10 см, 3 см) и охватывали широкий комплекс вопросов, добрая доля которых ранее не изучалась.

Третья особенность этих исследований – это их тесная связь со статистической теорией антенн, которая в эти же годы формировалась в академии [8]. Эта связь детально рассмотрена в работе [9].

И, наконец, следует отметить весьма тщательное описание в книге [3] всех условий проведения экспериментов, что весьма существенно при интерпретации полученных результатов и использовании их на практике.

Вероятно, совокупность отмеченных особенностей проведенных исследований и характера описания их в книге [3] способствовали высокой оценке как самих исследований, так и книги [3] рядом авторитетных специалистов, в частности, академиком Е.Л.Фейнбергом (которому авторы [3] послали свою книгу) и известным американским ученым П. Бекманом. Последний в предисловии к американскому изданию книги [9] написал «Исследования автора по «мгновенным» диаграммам направленности и другим характеристикам антенны в случайно флуктуирующих полях – это первоклассные экспериментальные работы»¹.

Результаты выполненных в академии исследований частично были опубликованы и в работах [10, 11]. Однако осталось много важных результатов, недостаточно известных широкому кругу специалистов, что связано с двумя причинами. Во-первых, книга [3] во многом «растворилась» в написанной позднее, в 1965 г., книге [4]. При этом ряд результатов работы [3] в книгу [4] не вошли. Да и цельность изложения результатов исследований, естественно, нарушилась. Во-вторых, и это сказалось особенно остро, книга [3] была выпущена ведомственным издательством малым тиражом, под грифом «Продаже не подлежит», что создавало сложности в распространении этой книги и попытках ссылок на нее.

В настоящей статье мы хотели бы напомнить в сжатой форме содержание исследований, выполненных в академии в (1956–1962) гг. Мы коснемся также и вопросов организации этой работы, ибо это существенно для уяснения масштаба и уровня проведенных исследований.

Изложение основных результатов, полученных в академии, и сегодня представляет самостоятельную ценность. Оно интересно и потому, что эти исследования, выполненные в конце 50-х – начале 60-х гг., нашли свое отражение в последующих работах по ДТР (см., например, [7, 12]) и, в частности, в исследованиях, проводимых в последние 15–20 лет в Харьковском институте радиоэлектроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ В АКАДЕМИИ

Исследования проводились в метровом диапазоне ($\lambda = 1,5$ м) на двух трассах протяженностью 200, 350 км, в 10-ти см диапазоне на 13 трассах протяженностью от 60 до 450 км и в 3-х см диапазоне на 17 трассах протяженностью от 30 до 350 км. В качестве излучающих установок в метровом и 10-ти см диапазонах волн использовались импульсные передатчики РЛС войск ПВО страны, расположенные на территории Украины и России. Кроме того, в 10-ти см диапазоне во время экспедиции использовался размещенный в кунге передатчик станции СОН-4. В 3-х см диапазоне – передатчик станции «Гром», тоже размещенный в кунге. Для приема сигналов в метровом диапазоне использовалась двухэтажная директорная антенна станции Мост-2, имевшая по два канала в каждом этаже. Антенна была установлена на высоте 28 м над поверхностью земли (на крыше 6-го этажа основного здания академии). Для приема сигналов 10-ти см диапазона использовались два параболоида вращения с диаметром 1,8 м, смонтированные на специальной ферме. Эта ферма была установлена на высоте 35 м (на крыше 8-го этажа центральной части здания академии). Кроме того, в 10-ти см диапазоне использовался еще и 3-х метровый параболоид вращения, установленный на антенной колонке от станции СОН-4 на высоте 50 м (на крыше 12 этажа центральной части здания). Этот же параболоид использовался и в 3-х см диапазоне волн при пяти сменных облучателях. Смена облучателей позволяла изменять эффективную площадь раскрытия параболоида при измерении потерь усиления антенны. Кроме того, в 3-х см диапазоне использовалась созданная в академии спаренная приемная установка из двух небольших параболоидов (с диаметрами 30 и, позднее, 60 см), которая располагалась рядом с 3-метровым параболоидом. При изучении поперечной корреляции поля эта установка устанавливалась в горизонтальном или вертикальном положении. Надо заметить, что размещение весьма громоздких и тяжелых 10-ти см фермы на крыше 8-го этажа и 3-х метрового параболоида с его колонкой на крыше 12-го этажа центральной части здания академии удалось реализовать с помощью башенного крана, принимавшего в то время участие в работах по завершению строительства здания академии. Для калибровки приемных антенн использовались генераторы РТ-10 (10 см диапазон) и ГСС-35 (3-х см диапазон), установленные на 10-м этаже восстанавливаемого тогда здания харьковского университета, расположенного напротив здания академии. В 1,5 м диапазоне использовался генератор Г-4, установленный на крыше здания гостиницы «Харьков». Частота и продолжительность калибровочных импульсных сигналов соответствовали параметрам импуль-

¹ Приведенные в [9] данные о характеристиках антенны в случайных полях заимствованы из [3].

сов передатчиков РЛС. Кроме антенн, расположенных на разных высотах в здании академии в Харькове, использовались также и антенны РЛС на полигоне академии в г. Чугуеве. Исследования проводились как на стационарных трассах, так и в ходе специальных экспедиций в летнее и зимнее время. Между передающими и приемными стационарными пунктами имела связь телефонная и радио связь. В экспедициях работала двухсторонняя радиосвязь. Общий объем работы составил около 200, 3700 и 1300 часов в 1,5 м, 10-ти и 3-х см диапазонов, соответственно. Сигналы с выхода приемника поступали для записи на фото пленку или на бумажную ленту. Для записи сигнала на фото пленку использовался 8-шлейфовый осциллограф МПО-2. Запись на бумажную ленту осуществлялась самописцем Н-370. Полученные записи обрабатывались вручную.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Средний уровень сигнала. Его долговременные изменения

Определена величина среднего за ряд лет уровня сигнала в зависимости от расстояния. С укорочением длины волны средний уровень сигнала падает, причем в коротковолновой части диапазона УКВ это проявляется сильнее. Так, в диапазоне 1,5 м – 10 см средний уровень убывает пропорционально λ , а в диапазоне 10 – 3 см – пропорционально $\lambda^{2,5}$. Средняя величина погонного ослабления α от расстояния практически не зависит и составляет

$$\alpha_{1,5\text{м}} = 0,085 \text{ дБ/км}; \alpha_{10\text{см}} = 0,11 \text{ дБ/км};$$

$$\alpha_{3\text{см}} = 0,125 \text{ дБ/км}.$$

Как видно из приведенных цифр, с укорочением λ величина α растет, хотя зависимость α от λ весьма слабая.

Величина среднегодового уровня сигнала от года к году заметно изменялась. В зависимости от расстояния эти изменения составляли 6-10 дБ. Установить заметную корреляцию этих изменений с изменением солнечной активности (числа солнечных пятен) не удалось. Однако вывод об отсутствии искомой корреляции может оказаться преждевременным, ибо период исследований все же был невелик по сравнению с периодом солнечной активности (11 лет).

Сезонный и суточный ход сигнала

Анализ усредненного за несколько лет сезонного хода сигнала показал, что от месяца к месяцу уровень сигнала заметно изменяется. Так, при $\lambda=10$ см летом сигнал на 5..10 дБ выше, чем зимой. С увеличением расстояния сезонный ход сигнала сглаживается.

Суточный ход сигнала выражен весьма существенно. Амплитуда колебаний достигает до 20 дБ и более. Летом суточный ход сигнала выражен сильнее. С увеличением расстояния суточный

ход сигнала сглаживается. Несмотря на резко выраженный суточный ход сигнала, установить какие-либо закономерности не удалось. Вероятно, это связано с тем, что суточный ход сигнала обусловлен сравнительно быстрыми, нерегулярными изменениями метеообстановки в отличие от регулярных – сезонных и годовых. Связь суточного хода с нерегулярными изменениями метеообстановки в равной мере проявляется в 10-ти и 3-х см диапазонах. Кривые суточного хода сигналов в этих двух диапазонах принимаемых одновременно на трассе в 200 км оказались заметно коррелированными.

Флуктуационные характеристики сигнала

Рассмотрению флуктуационных характеристик сигнала, его кратковременных изменений в пределах 0,5–1 часа уделялось значительное внимание. Изучались: частота и глубина замираний сигнала, закон распределения уровней сигнала, автокорреляционные функции и спектр сигнала. Как показали исследования, условно можно выделить три типа кратковременных замираний. Первый тип – быстрые замирания продолжительностью (в зависимости от длины волны) от долей секунды до 2..3 с. Второй тип замираний с продолжительностью от 5..10 с до нескольких десятков секунд. Третий тип – сравнительно медленные замирания с продолжительностью от нескольких минут до десятков минут. Замирания первого типа являются наиболее распространенными. Амплитуда их составляла 15..20 дБ. Замирания второго типа наблюдались, как правило, в тихую (антициклонную) погоду. Амплитуда их примерно такая же, как и амплитуда замираний первого типа. Замирания третьего типа, амплитуда которых составляет 30..40 дБ, наблюдались сравнительно редко, как правило, только в летнее время в антициклонную погоду. Характер замираний заметно меняется в течение суток. Обычно ночью сигнал характеризуется более медленными замираниями. Определенная по получасовым интервалам средняя продолжительность замираний в течение суток меняется. Амплитуда этих изменений уменьшается с укорочением длины волны. Средняя за сутки продолжительность замираний на трассе протяженностью в 200 км составила 9; 1,1 и 0,4 с для $\lambda = 150, 10$ и 3 см соответственно. Здесь надо, однако, заметить, что суточные сеансы для разных длин волн проводились в разные дни осени 1958 г.

Остановимся подробнее на законе распределения уровня сигнала. Изучение закона распределения сигнала представляет значительный интерес с точки зрения выяснения механизма ДТР. Так, если в основе ДТР преимущественно лежит рассеяние на глобулярных неоднородностях, то распределение уровней сигнала за короткие промежутки времени должно приближаться к рэле-евскому. При наличии в рассеянном сигнале медленно меняющейся составляющей, характерной при наличии отражения от слоев, закон распре-

деления за короткие промежутки времени должен быть близок к обобщенному рэлеевскому.

Законы распределения быстрых замираний строились за короткие промежутки времени (как правило, за 10 с) и сравнивались с рэлеевским законом. Как показали исследования, в зависимости процента совпадения экспериментального закона с рэлеевским (обозначим далее эту величину через M) от времени года и суток, а также от расстояния имеют место определенные закономерности. Днем величина M в 2..4 раза больше, чем ночью. При изменении расстояния величина M ведет себя немонотонно, достигая максимальной величины порядка (40..50) % на трассах средней протяженности ($R \sim 350$ км при $\lambda = 10$ см и $R \sim 200$ км при $\lambda = 3$ см). Показано также, что чем меньше уровень сигнала, тем величина M больше. Надо отметить, что величина M всегда далека от 100%. Отсюда следует, что механизм рассеяния на глобулярных неоднородностях не является довлеющим.

Несколько слов об автокорреляционных функциях и спектрах сигнала при ДТР. Изучение этих характеристик проводилось в 10-см диапазоне волн на 4-х трассах (120, 200, 250 и 350 км). Время выборки составляло 10 с. Результаты исследований изложены в книге [3] и статье [10]. Приведем лишь итоговые результаты.

Разбросы времени автокорреляции τ_0 и ширины спектра сигнала Δf по реализациям характеризуются следующими интервалами:

$$\tau_0 = (0,15..0,60) \text{ с } \Delta f = (0,8..1,9) \text{ Гц.}$$

Поперечная корреляция сигналов

В 10-ти см диапазоне исследования проводились на трассах в 200, 250 и 350 км. Разнос антенн осуществлялся в горизонтальной плоскости. В 3-х сантиметровом диапазоне протяженность трасс составляла 60, 150 и 200 км. Разнос антенн осуществлялся в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Основные результаты исследований таковы:

- корреляционное расстояние ρ составляет величину порядка нескольких десятков длин волн;
- с увеличением расстояния от 200 до 350 км ($\lambda = 10$ см) величина ρ растет;
- обычно ночью и утром величина ρ больше, чем днем;
- при увеличении размеров передающей апертуры величина ρ увеличивается. Грубая оценка здесь такова: $\rho \sim L_{\text{пер}}$;
- при приближении закона распределения уровня поля к рэлеевскому величина ρ уменьшается;
- характер изменения ρ в зависимости от расстояния и времени суток для $\lambda = 3$ см аналогичен тому, что имеет место при $\lambda = 10$ см;
- отношение значений ρ при вертикальном и горизонтальном разнсах антенн (параметр анизотропии случайного поля), измеренное в 3-х см диапазоне волн, примерно равно 0,6..0,8.

Потери усиления. Средние ДН

Потери усиления ΔG определялись путем сравнения сигналов, принятых одновременно исследуемой и эталонной антенной. Предполагалось, что у небольшой эталонной антенны потерь усиления нет. Исследования проводились в 10-ти и 3-х см диапазонах волн на трассах различной протяженности. Значения ΔG в обоих диапазонах менялись в пределах от ~ 3 до ~ 8 дБ. Интересно отметить немонотонный ход изменения ΔG в зависимости от расстояния. Так, в 10-ти см диапазоне наибольшее значение ΔG порядка 7 дБ имело место на расстоянии 200 км, а в 3-х см диапазоне ΔG порядка 8 дБ соответствовал расстоянию 150 км. К вопросу о потерях усиления примыкает вопрос о расширении средней ДН. Этот эффект также исследовался в 10-ти и 3-х см диапазонах на трассах различной протяженности. Оказалось, что и расширение ДН с ростом расстояния ведет себя немонотонно.

Угловой разнесенный прием (УРП)

Суть этого вида приема состоит в следующем. На приемном конце создаются две (или более) ДН, разнесенные в пространстве на определенный угол. Величина углового разнosa должна обеспечивать должное падение корреляции в приемных каналах с тем, чтобы при суммировании сигналов надежность приема заметно повысилась. Достоинство этой схемы разнесенного приема в том, что обе ДН создаются одним зеркалом, вблизи фокуса которого размещаются симметрично два облучателя. Недостаток схемы состоит в том, что разнос ДН по углу сопровождается падением среднего уровня сигнала в каждом приемном канале. Если для достижения заметной декорреляции сигналов потребуется сильно разнести ДН по углу, то средний уровень сигнала в каналах существенно снизится, и система будет практически нецелесообразной.

Таким образом, изучение возможностей системы УРП требует одновременного исследования двух вопросов:

- декорреляции сигналов в двух облучателях в зависимости от их разнosa в фокальной плоскости (разнosa двух ДН по углу);
- снижения среднего уровня сигнала при выводе облучателей из фокуса.

Исследования этих вопросов проводились в 10-ти см диапазоне волн на трех трассах протяженностью 60, 120 и 200 км. Прием сигналов осуществлялся 3-х м параболом с фокусным расстоянием 1,07 м. В этом зеркале устанавливался разработанный нами сложный волноводный облучатель, две половины которого могли выдвигаться в разные стороны от фокуса на расстояние от 0 до 8 см. Этому соответствовало раздвижение ДН каналов от 0° до 7° при горизонтальном и вертикальном разнсах облучателей. Величина корреляционного «расстояния» по углу оказалась на 60-ти км трассе порядка 6° и порядка 4° – на трассе ~ 200 км. При указанных выше угловых

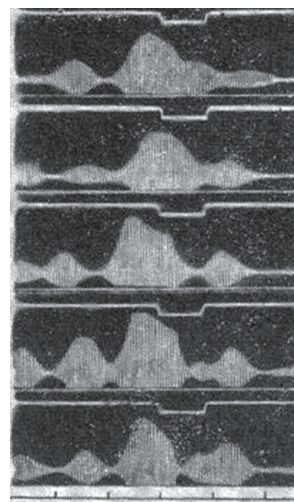
разносах снижение среднего уровня сигнала для 60 км трассы составило ~ 20 дБ, а для трассы в 200 км – около 7 дБ. Из приведенных цифр с учетом типичной глубины замираний сигнала (порядка 20 дБ) следует, что на 60-ти км трассе система, по-видимому, нецелесообразна, а на трассе 200 км она будет эффективной. С изменением размеров передающей и приемной антенн кривые коэффициента угловой корреляции и кривые распределения средней интенсивности в фокальной плоскости изменяются. Поэтому сделанные выше выводы о целесообразности применения схемы УРП на трассах различной протяженности являются ограниченно годными. В этих условиях целесообразно привлечь соображения статистической теории антенн. Как следует из результатов этой теории, при фиксированной статистике падающего поля увеличение размеров приемной антенны приводит к сглаживанию кривых распределения средней интенсивности в фокальной плоскости и большей декорреляции сигналов в симметричных относительно фокуса точках. Оба этих эффекта приводят к повышению надежности схемы УПР. Таким образом, из теоретических соображений следует, что при увеличении размеров приемной антенны достоинства схемы УРП возрастают. Эффективность системы повышается также при слабых сигналах, т.е. именно тогда, когда это больше всего и нужно.

Мгновенные ДН. Флуктуации направления главного максимума

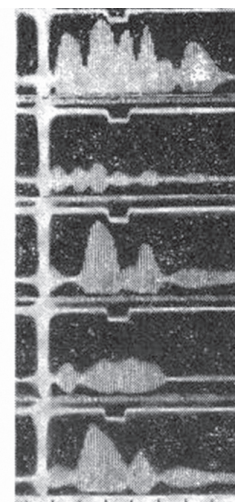
Под мгновенными ДН (МДН) понимаются диаграммы, снятые при быстром вращении антенны. Период вращения антенны (точнее время «прохождения» главного лепестка ДН углового размера области рассеяния) должен быть много меньше времени автокорреляции сигнала. В этом случае можно считать распределение поля у приемной антенны «замороженным». Снятые при этом МДН с определенным интервалом отражают мгновенное распределение структуры поля у антенны (его отдельные реализации) и динамику ее изменения.

Исследования МДН проводилось в 10-ти см диапазоне волн на трех трассах (80, 200 и 250 км). Прием сигналов осуществлялся антенной в виде усеченного параболоида вращения с размерами 2×10 м с шириной ДН $2\theta_0 = 0,7^\circ$ в горизонтальной плоскости. На передающем конце использовалась аналогичная антенна. Приемная антенна вращалась со скоростью 3 и 6 об/мин ($18^\circ/\text{с}$ и $36^\circ/\text{с}$, соответственно). Запись ДН осуществлялась на фото пленку осциллографа МПО-2. Одновременно с сигналом на фото пленку автоматически наносились азимутальные метки. Всего было записано и проанализировано около 1000 МДН. Характерные примеры их приведены в нашей работе [11] и ниже на рис. 1а и 1б. На рис. 1а приведена серия МДН, снятых с интервалом 20 сек. Эти ДН похожи на невозмущенные ДН (рис. 1в) и заметно коррелированы друг с другом. Такие МДН

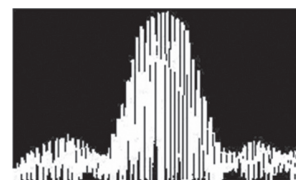
чаще имели место в ночное время, когда большую роль в образовании ДТР поля играют «когерентные» механизмы рассеяния поля. Летом в дневное время чаще наблюдались картины МДН типа показанных на рис. 1б. Типичным здесь являются сильные искажения МДН по сравнению с невозмущенной ДН и потеря корреляции между МДН, снятыми через 10 с. Очевидно, что эти МДН соответствуют ситуации, когда существенную роль в образовании поля при ДТР играет механизм рассеяния на глобулярных неоднородностях.



а – ДН, близкие к диаграмме в свободном пространстве



б – ДН, сильно искаженные по сравнению с ДН в свободном пространстве



в – ДН в свободном пространстве

Рис. 1

Значительное внимание было уделено попытке «количественной» оценки МДН. Такая оценка проводилась для двух важнейших статистических антенных параметров:

- ширины ДН и
- положения направления главного максимума (НГМ).

При статистической оценке ширины рассматривались две величины – средняя ширина ДН и ширина средней ДН [3,9].

Для нахождения первой величины $2\theta_{0,5P}$ вначале находился закон распределения расширений $\Delta\theta$ отдельных реализаций МДН. Имея данные о распределении $\Delta\theta$, можно определить среднюю ширину ДН, суммируя ширину невозмущенной ДН $2\theta_0$ и среднее расширение ДН. Так, для трассы в 200 км для одного из суточных сеансов получилось

$$2\theta_{0,5P} \approx 1,25^\circ \text{ и } 1,1^\circ$$

для дня и ночи, соответственно.

Определялась также и ширина средней ДН. Последняя находилась путем наложения ряда МДН так, чтобы азимутальные метки совпадали. Построенные таким образом средние ДН учитывают расширение отдельных реализаций МДН и уход НГМ в каждой из реализаций. Величина $2\theta_{\text{ср}}$ для тех же условий, как и выше, оказалась равной

$$2\theta_{\text{ср}} = 1,5^\circ \text{ и } 1,2^\circ$$

для дня и ночи, соответственно.

По уходу НГМ строился закон распределения этой величины, по которому определялось среднеквадратичное отклонение (СКО) ухода НГМ. В 10-ти см диапазоне при ширине невозмущенной ДН порядка $0,7^\circ$ величина СКО ухода НГМ оказалась порядка $0,6^\circ$ и $0,3^\circ$ для дня и ночи, соответственно.

Помимо перечисленных выше характеристик поля при ДТР, изучались еще и ряд других его интересных особенностей. Не останавливаясь на этом подробнее, заметим, что даже приведенное выше конспективное изложение проведенных в академии в период 1956-1962 гг. исследований ДТР показывает сколь объемными и многоплановыми они были. Надо заметить, что тема «Дельта» была первой правительственной научной темой, заданной еще совсем молодой, не достигшей и десяти лет ее существования, Харьковской радиотехнической академии. Поэтому она пользовалась широкой поддержкой руководства академии. Все наши просьбы оперативно выполнялись разными службами академии. Особенно стоит отметить производственные мастерские академии, оказавшие нам большую помощь в создании и развитии материальной базы наших исследований, а также фотолабораторию академии, выполнившую огромный объем работ по обработке нескольких километров фотопленки. Пожалуй, единственный пункт, по которому возникали немалые сложности, – это организация экспедиций. Скажем прямо, энтузиазма у начальника академии Ю.П.Бажанова они не вызывали. Понять его нетрудно, поскольку экспедиции стоили очень немалых затрат и могли привести к каким-либо неприятностям, особенно в зимнее время. Но, как только решение принималось, все необходимое делалось быстро и в полном объеме. К счастью, в экспедициях все обошлось благополучно, и все наши усилия и затраты полностью окупались полученными в их ходе важными результатами. Работы по теме «Дельта» пользовались также существенной поддержкой командования войск ПВО страны и командиров частей радиотехнических войск системы ПВО Страны, расположенных в Украине и России. Именно это весьма благожелательное отношение к нашей работе позволило широко привлечь к ее выполнению широко разветвленную сеть высококачественных РЛС Войск ПВО Страны, как правило, стоявших на боевом дежурстве(!). Здесь я с благодарностью хочу упомянуть генералов В.В. Дружинина, М.Т. Берего-

вого (Главный штаб войск ПВО), командира дивизии ПВО генерала Сергеева (сына известного революционера Артема) и, особенно, выпускника нашей академии, командира радиотехнического полка полковника (позднее генерала) Г.А. Гичко.

Полученные нами результаты исследований, оформленные в виде серии обстоятельных отчетов, были высоко оценены заказчиками работы и командованием Войск ПВО Страны. Основные исполнители работы (Я.С. Шифрин, Ф.Б. Черный, Ю.А. Тихомиров, П.С. Трашков и др.), а также зам. начальника академии по науке были награждены крупными, по тем временам, денежными премиями. Выполненные нами исследования по ДТР получили также, как я уже упоминал выше, высокую оценку ученых и инженеров, специалистов в области распространения радиоволн. Так, в книге А.А.Шура [7] приводятся свыше десятка ссылок на результаты наших исследований по разным аспектам явления ДТР, приведенные в книге [3]. Во многих работах [4,6, 12, 13 и др.] имеются ссылки на наши работы [10, 11]. Основные результаты проведенных нами исследований, как уже упоминалось выше, были включены в известную монографию [4], вышедшую в свет в 1965 г. Эта книга широко используется радиоспециалистами, занимающимися проектированием различных радиосистем, в основе работы которых лежит использование явления ДТР. В первую очередь, это касается связанных станций тропосферного распространения, работа по совершенствованию которых продолжается и по настоящее время. Основные усилия здесь направлены на использование более сложных сигналов и внедрение адаптивных методов борьбы с присущими явлению ДТР глубокими замираниями сигнала. В разработке таких адаптивных методов значительные успехи достигнуты В.И. Рудаковым [14].

Результаты и опыт, накопленный нами в ходе исследований ДТР в 1956-1962 гг., широко использовались в дальнейших исследованиях в СССР в области ДТР. Большую помощь мы оказали не раз приезжавшим к нам томичам (из ТИАСУР), ознакомив их с нашей экспериментальной базой, методикой выполнения исследований и обработки экспериментальных данных, а также подарив им образцы экспериментальных записей, характеризующих разные стороны явления ДТР. При нашей активной поддержке проводились исследования ДТР и анализ полученных результатов в Бакинской армии ПВО и в Прибалтике.

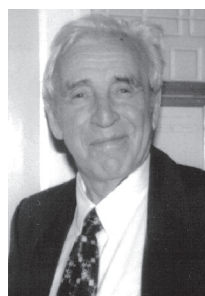
Полученный нами богатый материал существенно пополнил базу экспериментальных данных об особенностях ДТР, что оказалось важным для дальнейших попыток разобраться в сути явления ДТР. В этом плане представляются интересными работы, выполняемые в Харьковском национальном университете радиоэлектроники В.А. Петровым и его учениками. Эти исследования проводятся, начиная с 90-х годов прошлого века, и имеют своей основной целью выяснение ме-

ханизма рассеяния радиоволн как при обратном рассеянии (характерном для систем дистанционного зондирования атмосферы), так и при ДТР. Полученные ими теоретические оценки для радиуса поперечной корреляции $\rho \sim L_{\text{пер}}$ и для потерь усиления $\Delta G \sim 5\text{дБ}$ хорошо согласуются с приведенными выше экспериментальными данными. В настоящее время проводится очень непростая работа по должной интерпретации мгновенных ДН. Обо все этом рассказывается подробнее в публикуемой в этом же сборнике статье В.А. Петрова [15].

Литература.

- [1] Д.М. Высоковский. Некоторые вопросы дальнего тропосферного распространения радиоволн. – М.: Изд. АН СССР, 1958, 156 с.
- [2] Ф.Б. Черный. Распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1962. 480 с.
- [3] Я.С. Шифрин, Ф.Б. Черный, Ю.А. Тихомиров и др. Экспериментальное исследование дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн. Х.: Изд.АРТА, 1964, 103 с.
- [4] Дальнее тропосферное распространения ультракоротких волн/ Под ред. Б.А.Введенского, М.А.Колосова, А.И.Калинина, Я.С.Шифрина. – М.: Советское радио, 1965, 415 с.
- [5] В.И. Татарский. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967, 548 с.
- [6] И.А. Гусятинский, А.С. Немировский, А.В.Соколов, В.Н. Троицкий. Дальняя тропосферная радиосвязь. – М.: Связь, 1968, 248 с.
- [7] А.А. Шур. Характеристики сигнала на тропосферных радиоперелиниях. – М.: Связь, 1972, 105 с.
- [8] Я.С.Шифрин. Статистика поля линейной антенны. Х.: Изд. АРТА, 1962, 112 с.
- [9] Я.С.Шифрин. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Советское радио, 1970, 383 с. (англ. перевод «Statistical Antenna Theory», Golem Press USA, 1971, 370 p.).
- [10-11] Я.С.Шифрин, В.А.Тарасов, П.С.Трашков. Экспериментальное исследование некоторых вопросов дальнего распространения радиоволн 10-см диапазона. – М.: Электросвязь, 1964, ч.1, №8, с. 1..8, ч. 2, № 9, с.12-17.
- [12] Г.С.Шарыгин. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. – М.: Радио и связь, 1983, 139 с.
- [13] Б.А.Введенский, М.А.Колосов, А.В.Соколов. Исследования распространения метровых, сантиметровых и субмиллиметровых радиоволн //Радиотехника и электроника, 1967, № 11, с. 1867–1890.
- [14] В.И.Рудаков. Тропосферные системы связи с адаптивными антеннами. – Киев: АО «Авионика», 1999, 292 с.
- [15] В.А.Петров. Из истории исследований ДТР// Прикладная радиоэлектроника, 2010, Том 9, № 1. – С. 17-22.

Поступила в редколлегию 4.02.2010.



Шифрин Яков Соломонович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ХНУРЭ, области научных интересов: радиофизика и прикладная электродинамика.

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАЛЬНОГО ТРОПОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

В.А. ПЕТРОВ

Статья рассказывает о двух малоизвестных работах, которые связаны с исследованиями дальнего тропосферного распространения радиоволн — докладе Д.Т. Гьессинга и монографии под редакцией Я.С. Шифрина.

The paper narrates about two almost unknown works connected with researches in the far tropospheric propagation of radio waves — the paper of D.T. Gjessing and the monograph edited by Y.S. Shifrin.

В 1945 году при исследовании распространения радиоволн сантиметрового диапазона в слое влажного воздуха над поверхностью океана [1] было обнаружено, что напряженность поля далеко за пределами радиогоризонта убывает с ростом дальности значительно медленнее, чем могла бы объяснить любая из существующих теорий. Интенсивные флуктуации указывали на участие в механизме наблюдаемого явления каких-то случайных процессов. Аналогичные результаты были получены и при исследовании распространения радиоволн над сухой земной поверхностью в Аризоне [2]. Обнаруженное явление позднее получило название дальнего тропосферного распространения радиоволн (ДТР).

В 1950 году Букер и Гордон опубликовали теорию рассеяния радиоволн в тропосфере [3], которая объясняла явление ДТР взаимодействием волн с флуктуациями диэлектрической проницаемости воздуха. Для вычисления средней интенсивности поля, рассеянного в заданном направлении, в работе [3] определен «эффективный поперечник рассеяния» σ . Если известен объем V области неоднородной среды, в которой происходит рассеяние, то расчет интенсивности поля в месте приема сигналов выполняется по хорошо известным формулам радиолокации. В теории Букера и Гордона σ определяется выбранной моделью автокорреляционной функции относительных флуктуаций диэлектрической проницаемости ϵ воздуха. Расчеты поля за радиогоризонтом для экспоненциальной модели функции автокорреляции дали обнадеживающие результаты, и казалось, что один из главных механизмов явления ДТР найден.

Перспектива использования ультракоротких волн для связи далеко за пределами прямой видимости стимулировала активные теоретические и экспериментальные исследования во всем мире. Трудно назвать другую область науки и техники, которой было бы посвящено такое количество публикаций. Интерес исследователей «подогревался» тем, что данные разных экспериментальных работ не совпадали, а во многих случаях теоретические расчеты не подтверждались на практике. Дорогостоящие программы исследований расширялись, но природа этого интересного

явления оставалась неясной. Становилось очевидным, что учета только флуктуирующей части коэффициента преломления воздуха недостаточно.

Теоретические исследования рассеяния и отражения от слоистых неоднородностей тропосферы также приводили к результатам, неплохо согласующимся с данными ряда экспериментов. Выяснилось, что степень влияния разных механизмов ДТР зависит от времени суток и сезона, а для интерпретации рассеяния требуются дополнительные сведения о пространственном распределении ϵ . Нужны статистические характеристики, справедливые для текущего интервала времени (выборочные статистики), функции автокорреляции флуктуаций ϵ , вычисленные также для этого интервала, «вертикальный профиль» ϵ и др. Поэтому часть исследований была направлена на уточнение структурных особенностей тропосферы и измерение статистических характеристик пространственного распределения диэлектрической проницаемости.

Среди опубликованных в этот период (1959 — 1965 гг.) работ есть очень интересные публикации, ссылок на которые читатель, наверно, не найдет в советской монографической или периодической литературе. Трудно сказать, что тому причиной — объективные препятствия или человеческие слабости.

Можно назвать, по крайней мере, две такие публикации, и каждая из них заслуживает внимания. Эти работы оказали существенное влияние на наши исследования и в значительной мере определили их направление. Рассказывая об этих работах, хотелось бы избежать невольных сравнений, а тем более — противопоставлений... Впрочем, все познается в сравнении.

ЗАБЫТЫЙ ДОКЛАД

Активные исследования структуры атмосферы и особенностей распространения радиоволн требовали координации усилий ученых разных стран. В 1966 г. в Москве состоялся международный colloquium, посвященный атмосферной турбулентности и распространению радиоволн. Доклад норвежского ученого Д.Т. Гьессинга «Радиофизические аспекты нерегулярной структуры

атмосферы» [4] обобщал результаты исследований, выполненных им в 1960 – 1964 годах.

Опираясь на теорию Букера и Гордона и работы Дж. Бэтчелора, Д.Т. Гьессинг использовал выражение для эффективного поперечника рассеяния σ в следующей изящной форме:

$$\sigma = \frac{\pi}{2} k^4 \Phi(\mathbf{K}, t), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, $\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$, $|\mathbf{k}_0| = |\mathbf{k}_s| = k$, $\mathbf{k}_0$ и $\mathbf{k}_s$ – волновые векторы падающей и рассеянной волн, $\Phi(\mathbf{K}, t)$ – преобразование Фурье автокорреляционной функции флуктуаций $\varepsilon(\mathbf{r})$ в момент времени t , $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки в области V , внутри которой происходит рассеяние.

Из определения $\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$ следует:

$$|\mathbf{K}| = 2k \sin(\theta/2), \quad (2)$$

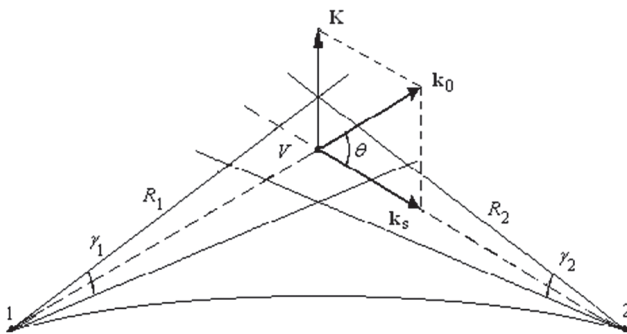
где θ – угол между векторами $\mathbf{k}_0$ и $\mathbf{k}_s$ (рисунок).

Если объем области V известен, а рассеяние из разных элементов этой области некогерентно, то эффективная площадь вторичного излучения всего объема $S = \sigma V$.

Средняя интенсивность поля I (плотность потока мощности) вблизи приемной антенны вычисляется по формуле

$$I = \frac{P_u \cdot G \cdot S}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2},$$

где P_u – мощность передатчика, G – коэффициент усиления антенны передатчика, R_1 и R_2 – расстояния от области V до передатчика 1 и приемника 2.



Трасса распространения радиоволн

Если эффективная площадь приемной антенны равна A , то мощность принятого рассеянного сигнала

$$P_c = IA = \frac{P_u GSA}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2} = \frac{P_u G \sigma VA}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2}.$$

В этой формуле все величины, кроме S , однозначно определяются условиями эксперимента. Объем V также можно рассчитать, если известны γ_1 и γ_2 – ширина диаграмм направленности антенн на уровне 0,5. Таким образом, чтобы вычислить P_c , нужно иметь значение σ .

Д.Т. Гьессинг ставит обратную задачу: по измеренным значениям P_c при разных углах рассеяния θ найти σ и вычислить $\Phi(\mathbf{K})$ по формулам (1) и (2), причем в таком интервале углов θ , которые характерны для ДТР. Этот интервал приблизительно соответствует $1^\circ < \theta < 6^\circ$. Такой путь исследования атмосферной турбулентности требовал сложного оборудования и тщательно подготовленного эксперимента. План предусматривал возможность согласованного перемещения диаграмм направленности передающей и приемной антенн по азимуту и углу места. При этом область пересечения диаграмм перемещалась по горизонтали, по вертикали, а также по дуге, причем так, чтобы длина вектора $\mathbf{K}$ оставалась постоянной, а его направление изменялось. Протяженность трасс составляла 340 км и 167 км.

В ходе экспериментов исследовались также пространственная неоднородность тропосферы, частота замираний, ширина спектра сигнала и доплеровский сдвиг частоты.

Обработка данных обширных экспериментальных работ привела к неожиданным результатам. Искомый спектр $\Phi(\mathbf{K})$ после усреднения по всем сериям наблюдений аппроксимировался зависимостью

$$\Phi(|\mathbf{K}|) \sim k^{-7,4}.$$

С учетом максимального возможного изменения объема V при изменении θ получилась зависимость

$$\Phi(|\mathbf{K}|) \sim k^{-6,4}, \quad (3)$$

тогда как из теории атмосферной турбулентности следовало ожидать

$$\Phi(|\mathbf{K}|) \sim k^{-11/3} = k^{-3,66}. \quad (4)$$

Явное несоответствие зависимостей (3) и (4) указывало на то, что выражение (1) не учитывает какие-то существенные факторы. Попытка решения обратной задачи оказалась неудачной. Зависимость (3), как отмечается в работе [4], не согласовалась и с данными Кэрлла и Ринга о распространении волн в нормально стратифицированной тропосфере. Не нашли экспериментального подтверждения и предположения о том, что поле за радиогоризонтом обусловлено отражением от горизонтально ориентированных слоистых образований.

Один из любопытных итоговых выводов работы в дословном переводе звучит так: «Если источниками рассеянных волн являются слои с синусоидальной волнообразной структурой, то отношение амплитуды к длине волны в этих слоях должно быть большим, и должно быть много таких слоев, чтобы объяснить результаты исследования однородности среды и ход замираний сигнала».

Возможно, работу Д.Т. Гьессинга постигла типичная участь исследований с отрицательным

результатом. Настораживающее несоответствие теории и эксперимента в этих исследованиях, к сожалению, не стало стимулом для уточнения теории рассеяния волн в тропосфере. Результаты работы в то время оказались не востребованными.

Эти исследования фактически были попыткой изучения атмосферы путем дистанционного наклонного зондирования. К этим вопросам раньше или позже придется вернуться, но в 1961 – 1964 годах постановка такой задачи оказалась преждевременной. И все же нужно отдать должное планированию сложного эксперимента и ценности полученного экспериментального материала. Причины неудачи отчасти стали понятны значительно позже, при решении задачи рассеяния волн в зоне дифракции Френеля. И тогда гипотеза о «волнообразных слоях» приобрела иное звучание, а наблюдения Д.Т. Гьессинга оказались очень полезными в исследованиях структуры источников вторичного излучения при разных состояниях тропосферы.

«НЕИЗВЕСТНАЯ» МОНОГРАФИЯ

... Математическое и физическое понимание проблемы часто идут рука об руку. Рассуждениями математика часто руководит физическое воображение, а так называемые физические соображения опираются, сознательно или нет, на очень хорошо понятые и, следовательно, хорошо знакомые математические законы...¹

Все, кому довелось быть первыми, знают, какого труда и напряжения сил требует любой новый научный результат. В первых исследованиях такого многопланового и сложного явления, как распространение ультракоротких волн за радиогоризонт, неясных вопросов было слишком много. Новые экспериментальные данные порождали новые вопросы. Общей чертой всех теоретических работ являлось то, что явление ДТР описывалось каждой из них лишь частично. Серьезное расхождение экспериментальных данных и результатов теоретического анализа вызывало недоверие разработчиков аппаратуры к теоретическим работам. Высказывалось мнение, что накопление опытных данных остается главной задачей исследователей. Как всякая крайность, такой подход лишь снижал уровень и ценность результатов исследований.

Сейчас, читая описание «чисто экспериментальных» работ, порой трудно понять, что именно хотел исследовать автор. Еще труднее использовать опубликованные материалы этих исследований для построения математической модели и расчетов. Среди «моря» экспериментальных данных приходится отбирать лишь те, что получены в ходе хорошо спланированного эксперимента и сопровождаются подробным его описанием. Иногда поиски недостающих подробностей пре-

вращаются в настоящее «расследование», которое заканчивается тем, что обнаруживаются неточности, ошибки, а порой и следы лукавства.

В поисках экспериментальных работ по ДТР мы в хорошо известной монографии Я.С. Шифрина «Вопросы статистической теории антенн» [5] обнаружили ссылку «[28]» на книгу «Экспериментальное исследование дальнего тропосферного распространения ультракоротких волн» под ред. Я.С. Шифрина [6]. Обратились в центральную научную библиотеку Харькова – библиотеку им. В.Г. Короленко. Такой книги там (как выяснилось позднее, и в других общедоступных библиотеках) нет.

Но вот передо мной эта, компактная как конспект, книга из личной библиотеки Я.С. Шифрина. Даже при беглом знакомстве с книгой обращают на себя внимание объем, масштаб и продолжительность выполненных авторами исследований. Структура книги и исследуемые вопросы характерны скорее для теоретических, а не чисто экспериментальных работ. По существу, это монография, написанная по материалам собственных исследований авторов. Как же такая книга осталась «незамеченной»? Почему на нее практически нет ссылок?

Более внимательное чтение лишь усилило эти вопросы, тем более, что мы нашли как раз то, что давно искали. Точные, ясные формулировки, исчерпывающая информация о методике обработки первичных данных, точное описание всех условий эксперимента... И странное ощущение, что эти графики уже где-то встречались. Оказывается, часть экспериментальных данных из этой книги вошла в хорошо известную монографию [7], изданную годом позже, в 1965 году. И снова в обширном библиографическом материале к этой монографии книга [6] не упоминается. Все дело, оказывается, в надпечатке на обратной стороне ее обложки: «Продаже не подлежит».

Об истории написания этих монографий рассказывает Я.С. Шифрин в своих воспоминаниях [8]. Монография [6] обобщала результаты непрерывных исследований, которые проводились на кафедре антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн в Артиллерийской радиотехнической академии (АРТА) с 1956 по 1962 год. В 1956–1957 и 1961–1962 годах исследования выполнялись совместно с Московским институтом радиоэлектроники АН СССР по постановлению правительства. Это были первые в СССР исследования ДТР такого масштаба. Основная цель – выяснить пути построения систем дальней связи на УКВ. План работы неоднократно уточнялся и дополнялся. В итоге программа работы оказалась значительно шире, чем в аналогичных исследованиях за рубежом.

Основные экспериментальные работы были выполнены в АРТА и завершены в 1962 году. Заканчивалась гигантская работа, связанная с обработкой «вручную» первичных данных в виде

¹ Л. Берс. Математические вопросы дозвуковой и околосзвуковой газовой динамики/ Пер. с англ. под ред. А.В. Бицадзе. – М.: ИЛ, 1961, 208 с.

записей на бумажной ленте самописцев и на фотопленках шлейфового осциллографа. Накопился огромный экспериментальный материал, новый, интересный, изложить который можно только в книге. Подробнее о содержании и результатах этих исследований рассказывает Я.С. Шифрин в статье, публикуемой в этом же сборнике.

Попытка издать книгу в Москве натолкнулась на встречное предложение москвичей написать монографию совместно. Намечался авторский коллектив в составе 25 человек, в том числе и ряда весьма видных ученых. Закрепить авторство основных исполнителей экспериментальной, самой трудоемкой части работы, можно было единственным путем — написанием и изданием в кратчайшие сроки собственной книги в издательстве АРТА. И эта книга вышла в свет в 1964 году благодаря усилиям руководителя этой работы в АРТА Я.С. Шифрина. Теперь, как пишет Я.С. Шифрин, можно было взяться за совместную работу с москвичами.

Согласование разнородного материала, предоставленного 25 авторами, легло на плечи четырех редакторов: Б.А. Введенского, А.И. Калинина, М.А. Колосова и Я.С. Шифрина. Трудная работа закончилась изданием в 1965 году монографии «Дальнее тропосферное распространение УКВ». Эта книга хорошо известна всем, кто так или иначе занимался вопросами ДТР. В ней рассмотрен широкий круг вопросов — от обзора разных теорий до инженерного расчета тропосферных радиолиний. Однако изложение совокупности экспериментальных результатов исследования ДТР, столь логично и последовательно представленное ранее в работе [6], в книге [7] утратило свою цельность.

Теоретические и экспериментальные работы можно сравнить с художественными и документальными кинофильмами. Первые отражают взгляд автора на проблему, вторые представляют собой не стареющий документ. С этой точки зрения монография [6] настолько интересна, что мы, пользуясь ксерокопиями графиков, знаем, что пока сумели воспользоваться только частью содержащейся в них информации. Для нас особый интерес представляют экспериментальные данные о пространственной корреляции поля в месте расположения приемной антенны, ход зависимостей потерь усиления антенн от угла рассеяния и длины трассы ДТР, записи «мгновенных» диаграмм направленности, полученных при быстром вращении приемной антенны, и их интерпретация с точки зрения статистической теории антенн [5].

На кафедре радиоэлектронных систем ХНУРЭ почти 20 лет ведутся исследования, связанные с рассеянием радиоволн в тропосфере. Обратное рассеяние (угол рассеяния $\theta \approx \pi$) изучается применительно к системам вертикального зондирования атмосферы. Рассеяние радиоволн при $\theta \ll 1$ непосредственно касается ДТР. Рас-

сматриваются «прямые» задачи, связанные с расчетами рассеянных полей, и «обратные» — синтез пространственной структуры источников вторичного излучения по заданным характеристикам рассеянного поля. При исследовании ДТР главной задачей остается уточнение математических моделей тропосферы. Специфика решаемых нами задач такова, что во многих случаях мы опираемся на статистическую теорию антенн, развитую Я.С. Шифриным в уже упоминавшейся работе [5]. В частности, при теоретическом анализе структуры рассеянного поля в зоне дифракции Френеля мы воспользовались очень любопытным свойством поля совокупности случайных источников с малым радиусом корреляции. Критерий дальней зоны этих источников, как показал Я.С. Шифрин, выглядит так:

$$\frac{Ll}{2R} \ll \lambda. \quad (5)$$

Классический критерий, как известно, значительно жестче:

$$\frac{L^2}{2R} \ll \lambda.$$

В этих формулах l — радиус корреляции амплитудно-фазового распределения источников, L — линейный размер области, занятой источниками, λ — длина волны, R — расстояние от этих источников до точки наблюдения.

Исследование источников вторичного излучения при углах рассеяния $\theta \approx \pi$ и $\theta \ll 1$ показало, что в обоих случаях эквивалентные источники вторичных волн можно описать совокупностью линейных систем со случайными возмущениями, излучающих вдоль своей оси.

Применение критерия (5) при расчетах статистических характеристик рассеянных полей в зоне дифракции Френеля позволило существенно упростить аппарат анализа и использовать соотношения и теоремы, полученные в приближении дифракции Фраунгофера. В этом приближении была найдена связь между размером апертуры передающей антенны d и радиусом корреляции рассеянного поля ρ_k . Оказалось, что $\rho_k \approx d$ в случае $\theta \approx \pi$, и приблизительно такую же зависимость следует ожидать при $\theta \ll 1$.

Самое любопытное здесь то, что такая связь ($\rho_k \sim d$) была установлена экспериментально при исследовании поперечной корреляции поля за радиогоризонтом авторами монографии [6]. Трудно сказать, математическое или физическое понимание проблемы побудило авторов исследовать этот вопрос. Еще одно важное наблюдение, описанное в монографии, касается зависимости потерь усиления антенн от длины тропосферной трассы. Было установлено, что эта зависимость не монотонная, хотя на это не указывала ни одна из известных тогда теорий. В наших исследованиях и оценках спустя более 40 лет мы пришли к тем же выводам. Но для этого потребовалось более

строго рассмотреть рассеянное поле в зоне дифракции Френеля.

Значительное внимание в монографии уделено исследованию средних диаграмм направленности и экспериментальному измерению потерь усиления антенн в зависимости от разных факторов. Кроме важного прикладного значения, эти исследования позволяют получить информацию о характере амплитудно-фазового распределения поля в плоскости апертуры антенны. В наших исследованиях эта информация нужна для сравнительной оценки статистических характеристик полей, рассеянных под углами $\theta \approx \pi$ и $\theta \ll 1$.

В системах вертикального зондирования атмосферы при $\theta \approx \pi$ рассеянное поле имеет ярко выраженную пятнистую структуру («спекл-структуру»). Приемная антенна находится в существенно неоднородном поле. В случае, когда передающая и приемная антенны идентичны и расположены в непосредственной близости, потери усиления составляют около 5 дБ. По результатам измерений в работе [6], такие же численные значения потерь усиления наблюдаются на трассах ДТР. По-видимому, в обоих случаях статистические характеристики полей имеют много общего, хотя механизмы рассеяния различны.

Авторами монографии подробно анализировалось отличие экспериментально полученных законов распределения от рэлеевского, причем этот признак (параметр «М») позволял выявить преобладающий механизм рассеяния. Интересен вывод: «При ДТР механизм рассеяния на глобулярных неоднородностях не является довлеющим». Эти данные важны сейчас, когда мы пытаемся уточнить модели структуры тропосферы, с которыми связаны и относительно высокие уровни сигналов, и их статистические характеристики.

В наших попытках найти пространственную структуру источников вторичного излучения при ДТР для разных состояний тропосферы мы пользуемся очень интересными результатами исследований углового разнесенного приема и мгновенных диаграмм направленности приемной антенны.

Угловой разнесенный прием в работе [6] исследован применительно к системам тропосферной связи. Получен важный практический вывод: применение такого пути борьбы с замираниями целесообразно при приеме слабых сигналов. Чтобы получить такой результат, пришлось проделать большую и сложную работу: спроектировать и изготовить двухканальный раздвижной первичный облучатель, исследовать дифракционную картину в фокальной плоскости антенны и угловую корреляцию принимаемых сигналов в реальных условиях тропосферной связи. А эти данные существенны для уточнения математической модели области рассеяния.

Отдельный раздел монографии посвящен исследованиям «мгновенных» диаграмм направ-

ленности, полученных при быстром вращении приемной антенны в горизонтальной плоскости, в условиях закрытых тропосферных трасс распространения радиоволн. Серии записей диаграмм, снятые с интервалами 10 с и 20 с, содержат информацию и о пространственной структуре рассеивающей среды, и о ее динамике. Приведены результаты обработки около 1000 диаграмм, записанных на фотопленках шлейфового осциллографа, и их анализ с точки зрения статистической теории антенн.

Сохранившаяся часть фотоснимков, отпечатанных с этих пленок, сейчас любезно предоставлена нам для работы Я.С. Шифриным. Мы пытаемся получить из этих записей дополнительную информацию о структуре тропосферы в области, где происходит рассеяние волн за радиогоризонт. Задача очень сложна, и трудно предсказать ожидаемый «выход». Но первые результаты показали, что она не безнадежна, и может быть, нам удастся обнаружить следы тех «волнообразных слоев», о которых говорил Гьессинг [4].

Мы упоминаем здесь о наших работах лишь для того, чтобы подчеркнуть, насколько актуальны сегодня затронутые в монографии вопросы. Ценность исследований связана и с тем, что многие эксперименты ставились на основе теоретического подхода к проблеме. До выхода в свет монографии [6] уже были опубликованы теоретические работы Я.С. Шифрина, освещающие некоторые вопросы статистической теории антенн. Влияние этих работ прослеживается и в экспериментальных исследованиях ДТР. Поэтому полученные в работе [6] экспериментальные результаты подсказывают постановку новых теоретических задач и помогают уточнить исходные данные для их решения.

К этим коротким заметкам нужно добавить, что читатели книги (кому удалось ее прочесть) благодарны авторам монографии за то, что интереснейший экспериментальный материал не «ушел» пылиться в архивы, и что книга написана для читателя, что экспериментальный материал надежный и добротный, что техника измерений и методика обработки данных описаны с исчерпывающей точностью и полнотой.

В 2009 году исполнилось 45 лет выхода в свет этой первой монографии по ДТР, написанной по материалам собственных исследований авторов. В ней содержатся обобщенные экспериментальные данные достаточные для проектирования радиолиний тропосферной связи. Эта цель работы достигнута.

Но на ее страницах, в таблицах и графиках хранится еще много объективной информации, ожидающей дальнейшего анализа. Во введении к монографии сформулирована одна из целей — получение результатов, необходимых «для продвижения вперед теоретических исследований, для создания более совершенной, чем существующие, теории ДТР». И эта цель также достигнута.

Книга сегодня востребована и будет нужна и полезна до тех пор, пока продолжают исследования распространения волн в тропосфере.

Эти очерки посвящаются 90-летию Якова Соломоновича Шифрина, выдающегося ученого и педагога, основоположника статистической теории антенн, вклад которого в развитие теории антенн и в исследования дальнего тропосферного распространения радиоволн трудно переоценить. Для нас большая и редкая удача — иметь возможность в любое время обратиться к Якову Соломоновичу с вопросом или обсудить результаты наших работ. Несмотря на высокий научный ранг Якова Соломоновича, общаться с ним легко и просто. Такие встречи и беседы всегда продуктивны и интересны.

*Внимание, с которым Я.С. относится к нашим работам и нашим трудностям, вызывает чувство искренней благодарности вместе с удивлением и неловкостью. Удивительно, сколько времени уделяет Я.С. анализу и подробному разбору наших работ. Его безусловная доброжелательность и готовность помочь естественным образом совмещаются с требовательностью и принципиальностью в научных вопросах. Никакая ошибка или неточность не ускользает из поля зрения Якова Соломоновича. Некоторые его замечания и советы можно повторять как афоризмы. *)*

Я приношу подборки статей и редкой литературы, подготовленные для нас Яковым Соломоновичем, подробно рассказываю о наших беседах своим помощникам — аспирантам. Лучшего примера отношения к научной работе и внимания к работе коллег они не найдут.

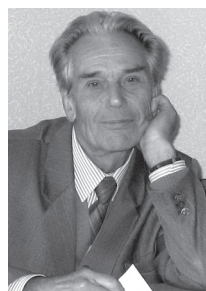
Мы сердечно поздравляем Якова Соломоновича с юбилеем, желаем здоровья и долгих лет столь же активной научной деятельности.

*) Подборка цитат и афоризмов будет опубликована в следующем юбилейном выпуске журнала.

Литература.

- [1] *M. Katzin, R.W. Bauchman, W. Binnian.* 3- and 9-centimeter propagation in low ocean ducts.// Proc. IRE, v.35, 1949. p.891.
- [2] *J.P. Day, L.G. Trolese.* Propagation of short radio waves over desert terrain// Proc. IRE, v.38, 1950. p.165.
- [3] *H.G. Booker, W.E. Gordon.* A Theory of Radio Scattering in the Troposphere// Proc. IRE, 38, 1950, №4, P.401.
- [4] *D.T. Gjessing.* Radio Physical Aspects of Irregular Structure in the Atmosphere// Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн. Тр. Междунар. коллоквиума. М.: Наука, 1967. С.226.
- [5] *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов.радио, 1970. 384с.
- [6] *Шифрин Я.С., Черный Ф.Б., Тихомиров Ю.А., Тарасов В.А., Трашков П.С.* Экспериментальное исследование дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн. Харьков: Изд. АРТА, 1964. 103 с.
- [7] Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн./ под ред. Введенского Б.А., Колосова М.А., Калинина А.Н., Шифрина Я.С. М.: «Сов.радио», 1965. 416 с.
- [8] *Шифрин Я.С.* Как мы жили. — Харьков: ИПП «Констраст», 2004. 512 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2010.



Петров Валерий Аркадиевич, кандидат физико-математических наук, профессор университета, профессор кафедры радиоэлектронных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: рассеяние радиоволн в тропосфере; цифровая обработка сигналов.

РАЗРАБОТКА АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В ОАО «РАДИОФИЗИКА»*С.А. ГАНИН, В.А. МАКОТА, А.М. ШИТИКОВ, А.В. ШИШЛОВ, А.Г. ШУБОВ*

На примерах конкретных разработок фазированных антенных решеток (ФАР) рассмотрены особенности компьютерного моделирования малоэлементных и многоэлементных ФАР. Изложен опыт калибровки ФАР. Приведены результаты достигнутого низкого уровня бокового излучения в диаграммах направленности антенн.

Features of computer simulation of minor-element and multi-element Phased Array Antennas (PAA) are considered on examples of concrete projects. The experience of PAA calibration is set forth. Achieved results of low side lobe level of radiation pattern are shown.

1. СТАТИСТИКА ПОЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

При разработке антенных решеток приходится решать довольно широкий круг задач. В зависимости от предъявляемых требований выбирается схема построения антенной решетки и ее конструкция, проводится ее математическое и экспериментальное моделирование. Важным этапом разработки является создание технологического процесса и оборудования, изготовление антенны, а затем ее настройка и испытания. В задачу Конструкторского бюро радиоприборов (КБРП, ныне ОАО «Радиофизика»), как правило, входит весь полный цикл разработки от зарождения идеи и формулировки принципов построения антенны до ее сдачи Заказчику.

Охватить весь этот круг проблем и их решений в одной статье, естественно, невозможно.

Авторы сочли целесообразным ограничиться рассмотрением в основном одной задачи — путей достижения в антенных решетках низкого уровня бокового излучения. Решение данной проблемы требует создания конструкций антенных решеток с жесткими допусками, формирования в элементах решеток амплитудно-фазовых распределений с малыми погрешностями, использования достаточно точных методов калибровки ФАР, знания механизмов и степени влияния различных погрешностей на характеристики излучения ФАР.

Эти вопросы были развиты в статистической теории антенн и теории калибровки ФАР, созданных Я.С. Шифриным и его школой. Другие аспекты деятельности Якова Соломоновича мы здесь рассматривать не будем.

Есть много примеров тому, как та или иная область науки и техники отождествляется с именем одного Ученого, внесшего в нее наибольший вклад. Статистическая теория антенн — это область, которая неразрывно связана с именем Я.С. Шифрина. Он занял в ней лидирующее положение после выхода его монографий «Статистика поля линейной антенны» (1962 г.) [1] и, особенно, «Вопросы статистической теории антенн» (1970 г.) [2]. Последняя стала настольной книгой каждого инженера — разработчика антенн. К этой тематике Я.С. Шифрин обращается на протяжении

всей своей деятельности. В 1997 г. издательское предприятие «Радиотехника» выпустило «Справочник по антенной технике» под общей редакцией Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина, в котором глава, посвященная статистической теории антенн [3], написана Я.С. Шифриным. В этой главе автор обобщил многие важные результаты по СТА, полученные им и его учениками после 1970 г. До Я.С. Шифрина в опубликованных работах рассматривались вопросы статистики допусков применительно к тем или иным конкретным типам антенн. Я.С. Шифрин предложил наиболее общий подход к изучению влияния случайностей в антеннах на их характеристики. В работах [2, 3] основное внимание уделено изучению статистики поля непрерывных антенн. Статистика поля антенных решеток рассмотрена в обзоре [4]. Разработка антенных решеток занимает особо важное место в тематике ОАО «Радиофизика». Своеобразным «камертоном» при этом служит СТА.

АФУ изделий ДЗ и ДЗУ. Одна из самых первых задач предприятия состояла в проектировании крупноапертурных антенных решеток изделий ДЗ и ДЗУ, которое осуществлялось при головной роли НИИ дальней радиосвязи. В эти годы предстояло совершить скачок от РЛС средств ПВО к станциям противоракетной обороны. В то время обнаружение и сопровождение самолетов осуществлялось станциями с механическим поворотом кабины с приемо-передающими устройствами и, как правило, с зеркальной антенной, имеющей раскрыв 10–12 м. Для станций дальнего обнаружения ПРО потребовались стационарные крупноапертурные антенны с электрическим сканированием луча. Идея построения одной из таких станций принадлежала, молодому тогда, талантливому Главному Конструктору изделия ДЗ Владимиру Пантелеймоновичу Сосульникову. Его заместителем по антеннам был Владимир Порфирьевич Васюков. В 1959 г. на техническом совещании в НИИДАР Владимир Пантелеймонович изложил содержание своего проекта. Многим умудренным опытом специалистам, присутствовавшим на этом совещании, идея построения новой станции показалась тогда красивой, но

неосуществимой мечтой. Другая часть, в первую очередь, молодых инженеров – поверила в это!

Потребовалась работа многих коллективов, чтобы исходная идея была реализована. Показательно, что облик созданной станции мало чем отличается от первоначального замысла В.П. Сокульникова.

За конструирование антенн, создание обширной кооперации КБ, крупнейших заводов страны и монтажных организаций взялся выпускник Физтеха – директор КБРП Георгий Григорьевич Бубнов.

Крупноапертурные антенные решетки изделий ДЗ и ДЗУ [5], [6], как и сами изделия в целом, не имеют аналогов в мировой практике.

Приемная антенна изделия ДЗ представляла собой сооружение с длиной апертуры и ее высотой порядка 100 м. На рис. 1 показаны две приемные антенны, смонтированные на единой металлоконструкции и ориентированные в противоположные направления.

Антенна формировала веер узких лучей в угломестной плоскости благодаря диаграммоформирующей линзе. Частотное сканирование лучей в азимутальной плоскости обеспечивалось линейками волноводно-щелевых излучателей. Эти линейки, образующие непосредственно апертуру антенны, являются ее ключевыми элементами. Они выполнены на основе волноводов с замедляющей периодической структурой. Последняя необходима для того, чтобы обеспечить высокую крутизну углочастотной характеристики сканирования луча при относительно узкой полосе частот принимаемого сигнала. Диаграммоформирующая линза видна на рис. 1 с тыльной стороны несущей металлоконструкции. Линза [7] соединена с линейками антенного полотна коаксиальными линиями равной длины. В то время, на основе достижений Я.Н. Фельда и его соратников,

диаграммообразующие матрицы на фидерных линиях стали все чаще вытесняться устройствами квазиоптического типа, выполненными на основе параллельных металлических поверхностей. Выравнивание электрических длин путей в них осуществлялось благодаря «складке» в системе пластин. Для такого высотного сооружения, как изделие ДЗ, могла использоваться только плоская конструкция линзы, которая была предложена В.Е. Бонковским, Г.А. Котельниковой и А.Г. Шубовым. Она была реализована в изделиях ДЗ и ДЗУ благодаря совместным усилиям НИИДАР и «Радиофизики» в 1960 – 1964 гг.

Линзы изделий ДЗ и ДЗУ до сих пор остаются самыми крупными в мире устройствами подобного типа.

На рис. 1 справа видны фрагменты конструкции радиопрозрачного укрытия (выполняющего также роль поляризационного фильтра) и опор для его установки.

Передающая антенна состояла из аналогичных волноводно-щелевых линеек, питаемых фазирруемыми усилителями большой мощности. Поскольку изделия ДЗ и ДЗУ представляют собой РЛС непрерывного излучения, передающая и приемная антенны разнесены на расстояние 3 км друг от друга. Чтобы обеспечить необходимую развязку между приемной и передающей антеннами, были предъявлены чрезвычайно жесткие требования к уровню боковых лепестков (УБЛ) в их диаграммах направленности (ДН).

Крупноапертурную антенну, состоящую из функциональных элементов больших размеров, приходится строить из отдельных блоков. Размеры блоков, являются весьма внушительными. При выборе их габаритов приходится учитывать возможности заводской технологии изготовления протяженных конструкций с заданной точностью и их транспортировки на объект монтажа.

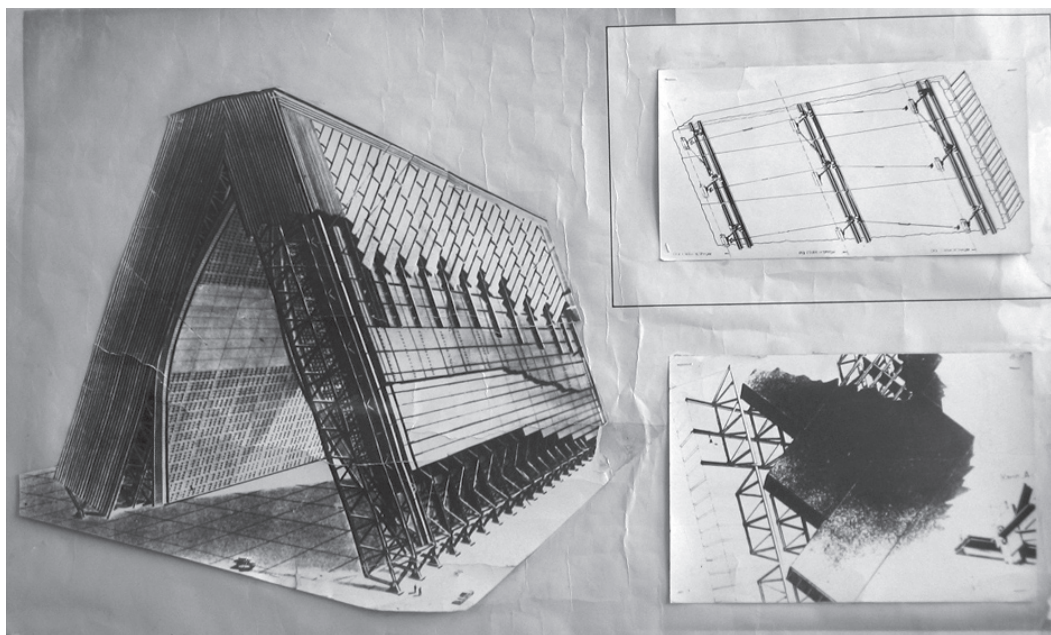


Рис. 1. Эскиз приемной антенны изделия ДЗ

Замедляющая структура в линейках представляет собой периодическую систему перегородок, впаянных в полость волновода. Допуски в зависимости от конкретного размера колеблются от десятых до сотых долей миллиметра при поперечном сечении волновода порядка $1 \text{ м} \times 0,5 \text{ м}$ и его общей длине 100 м. Суммарная длина волноводно-щелевых линеек для одной приемной антенны изделия ДЗ составила 20 км.

Для изготовления линеек был построен специализированный цех. Излучающие линейки были разделены на отдельные секции длиной 8 м. Их изготовление было автоматизировано и обеспечивало высокую точность. Линейки укомплектовывались в унифицированные параллельные ряды, которые использовались при монтаже антенны в целом. Окончательная обработка фланцевых соединений секций, установленных на общей раме, осуществлялась в термостатированном помещении. Для измерений параметров секций были изготовлены и отлажены на заводе специализированные стенды.

Измеренные амплитудно-фазовые распределения поля вдоль линеек показали, что осцилляции в них невелики и в соответствии со статистической теорией антенн не должны были привести к заметному снижению параметров антенны в целом.

Производство линеек с высокой точностью и тщательные их испытания оказались недостаточным условием для формирования нужной ДН и высокого КУ приемной антенны.

Дело в том, что заготовки для секций линеек выпускались в течение около 2-х лет в цехах, где не было стабильной температуры. Сезонные изменения температуры вызвали изменение параметров секций от партии к партии. Поскольку ряды антенного полотна собирались и отправлялись на объект по мере поступления заготовок, а затем монтировались по порядку, начиная с нижних рядов, такое изменение параметров секций привело к систематической ошибке. На рис. 2а показаны схематически фазовые распределения поля на нескольких линейках для одной из частот заданного диапазона. Отклонения фаз, от линейного закона, в каждом волноводе лежат в допустимых пределах. Различия температуры, в условиях которой изготавливались элементы замедляющей структуры, сказалось на наклоне фазовых фронтов. Углы наклона их вдоль отдельных линеек показаны на рис. 2а условно. В действительности, различия углов не превышало 1° – 2° . Но эти величины сопоставимы с шириной луча, и это вызвало бы искажение главного лепестка ДН.

Потребовалась компенсация разброса электрических длин линеек в центральном сечении полотна, что было осуществлено за счет вставок различной длины в коаксиальных линиях, соединяющих антенное полотно с линзой. Фазирование осуществлялось в реальном масштабе времени так, что вставки в коаксиальных линиях

отличались друг от друга на несколько длин волн. В результате фазирования (рис. 2б) была компенсирована разность фаз в центральном сечении, что с учетом сильно спадающего амплитудного распределения поля оказалось достаточным для получения качественной ДН.

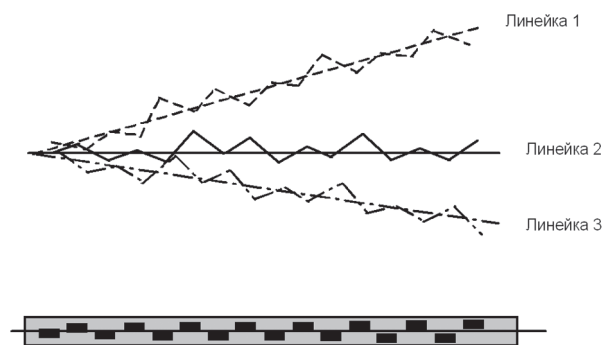


Рис. 2а. Отклонения фаз до фазирования

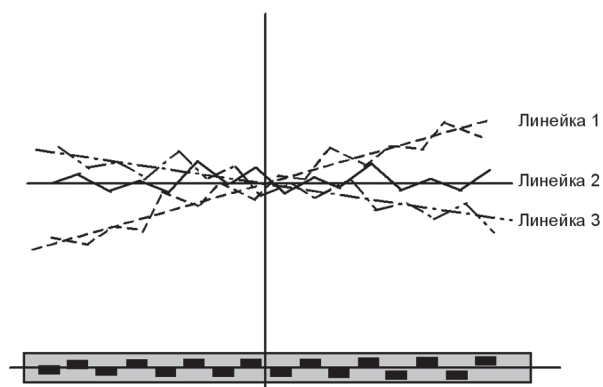


Рис. 2б. Отклонения фаз после фазирования

Сама по себе процедура фазирования является относительно простой, но она вызвала серьезные трудности, поскольку требовалось выполнить эту работу после монтажа антенны, на большой высоте.

На потенциале станции потери в коаксиальных линиях не сказались благодаря МШУ, установленным на выходах линеек.

В следующем изделии ДЗУ была предпринята попытка скомпенсировать наклоны фаз в линейках путем сортировки секций в процессе их изготовления. Однако складировать готовые секции линеек было негде, и они так же по мере выпуска поступали сразу на монтаж. В итоге был использован тот же способ фазирования.

В АФУ изделия ДЗУ были внесены изменения, которые улучшили его характеристики. Одновременно была проведена модернизация действующего изделия ДЗ.

Уровень боковых лепестков ДН в этих изделиях лежал в допустимых пределах. Необходимая развязка между передающей и приемной антеннами была обеспечена.

ФАР РЛС «Руза». К настоящему времени «Радиофизикой» разработан целый ряд антенн. Для иллюстрации приведем одну из таких разработок. Фото антенны показано на рис. 3.

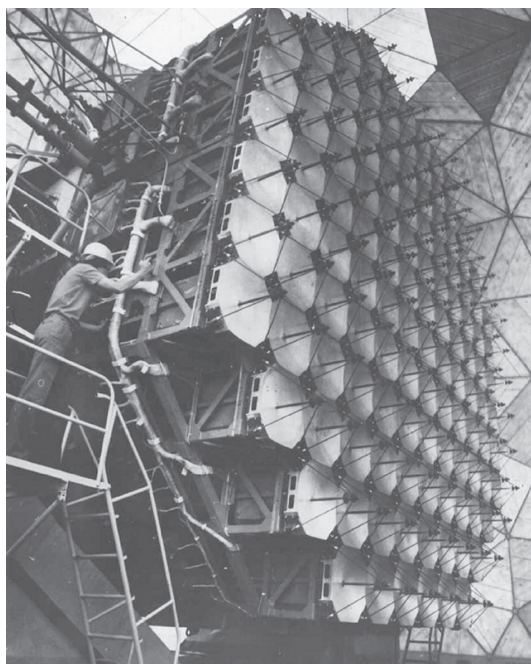


Рис. 3. ФАР миллиметрового диапазона волн

Это изделие является крупнейшей в мире РЛС миллиметрового диапазона, выполненной на основе ФАР [8]. Размеры апертуры ФАР составляют 7.2 м по каждой оси.

Сканирование луча в антенне — электрическое в узком угловом секторе и механическое — в широком секторе. Элементы антенны выполнены в виде двухзеркальных антенн. На передачу антенна запитывается двумя гироклистрономом общей импульсной мощностью 1 МВт. Для достижения высокой электрической прочности и снижения потерь в разводке сигналов от гироклистронов к модулям ФАР используются сверхразмерные многомодовые волноводы достаточно большого сечения. На выходах гироклистронов устанавливаются конверторы, преобразующие моду TE_{02} в моду TE_{01} . Далее, на наиболее протяженных участках тракта от передатчика до подрешеток, каждая из которых составляет одну четверть апертуры ФАР, используются волноводы круглого сечения с волной TE_{01} как наиболее соответствующие предъявляемым требованиям. Разводка сигналов к модулям (каждая подрешетка содержит 31 модуль) осуществляется с помощью делителя радиального типа и многомодовых волноводов прямоугольного сечения. При этом все паразитные моды в сверхразмерных волноводах подавлены.

На входе каждого модуля установлен фазовращатель. В режиме приема сигналы с выходов модулей, включающих в себя малошумящие усилители и фазовращатели, дополнительно усиливаются и подаются с помощью таких же волноводов прямоугольного сечения на диаграммоформирующую матрицу. Таким образом, антенна представляет собой полуактивную ФАР в режиме передачи и активную ФАР в режиме приема.

В ФАР, состоящей из крупноапертурных модулей, возникают интерференционные максимумы, уровень которых увеличивается при

сканировании луча. Этот фактор учитывается алгоритмически в процессе работы РЛС.

Калибровка ФАР была выполнена по вынесенному источнику. Фаза сигнала в тестируемом канале сравнивалась с фазой в опорном канале. Остальные модули при этом отключались.

Впоследствии был разработан алгоритм калибровки на основе переключений фазовращателей и измерений амплитуд сигнала.

Особенности моделирования ФАР. При разработке антенных решеток «Радиофизика» использует как аналитические методы анализа, так и компьютерное моделирование. Прежде всего, это нужно, чтобы оптимизировать излучающие элементы сложной конфигурации путем электродинамического решения задачи с требуемой точностью. Для этого, в частности, используются коммерческие программы, например, High Frequency System Simulator (HFSS), и другие.

В проектировании и производстве антенных решеток все больше внедряется печатная технология, где достигается точность изготовления порядка единиц микрон. Поэтому о точности изготовления излучателей и подрешеток из них речь уже не идет, по крайней мере, вплоть до миллиметрового диапазона волн (ММДВ).

Помимо электродинамического моделирования, основная тяжесть разработки ложится на управляющие элементы — фазовращатели или цифровые устройства, а также на методы калибровки ФАР.

Классификацию ФАР можно довольно условно произвести по принципу: малоэлементные антенны и многоэлементные антенны. К малоэлементным ФАР мы относим решетки, включающие в себя до нескольких сот каналов, тогда как многоэлементные ФАР содержат до нескольких тысяч каналов. При создании этих ФАР используются несколько разные подходы проектирования и компьютерного моделирования как его составной части.

2. МАЛОЭЛЕМЕНТНЫЕ ФАР

АФАР для системы NAPS. Компьютерное моделирование малоэлементных антенн — решетки в целом — состоит в анализе большого числа реализаций амплитудно-фазовых распределений поля (АФР) в ее апертуре с расчетом ДН антенны для каждой реализации. При этом величины случайных ошибок в заданных пределах задаются генератором случайных чисел. На первых порах для моделирования решетки, состоящей из 100 излучателей, задавалось несколько сот реализаций. По мере совершенствования компьютерных технологий, стало возможным обрабатывать 1000 и более реализаций. Это позволяет определить пределы увеличения УБЛ за счет случайного фона фактически с любой заданной степенью вероятности.

В современных системах связи требуется обеспечить чрезвычайно низкий уровень бокового излучения. Это требование для ряда систем

становится первостепенным. В качестве примера приведем антенну для проектируемой системы связи с помощью платформ, располагаемых в стратосфере. Проекты создания подобных систем получили название – High Altitude Platform Station (HAPS).

По сравнению со спутниковой связью, за счет значительного сокращения расстояния между наземной станцией и HAPS, энергетика линий связи позволяет использовать антенны на платформах со сравнительно малым коэффициентом усиления (порядка 20 дБ). В то же время для обеспечения необходимой развязки между каналами многолучевой антенны уровень боковых лепестков (УБЛ) должен быстро снижаться по мере увеличения углового раствора относительно главного максимума ДН. Это требование тяжелее всего выполнить для дальних боковых лепестков. Так в системе связи стандарта CDMA на краях сектора $\pm 90^\circ$ УБЛ не должен превышать минус 60 дБ. Для этого требуется использовать быстро спадающие амплитудные распределения поля в раскрыве антенны и обеспечить достаточно малые случайные ошибки в амплитудно-фазовом распределении, приводящие к фону боковых лепестков [9].

Диаграмма направленности идеализированной антенной решетки (при отсутствии амплитудных и фазовых ошибок) с излучателями, расположенными в точках $\vec{r}_n$ определяется выражением:

$$E(\vec{v}) = \frac{f(\vec{v})}{A} \cdot \sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp\{ik \cdot (\vec{r}_n; \vec{v})\}, \quad (1)$$

где $f(\vec{v})$ – ДН элемента решетки. Нами рассматриваются только сечения диаграмм. При этом, $\vec{v} = [\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta]^T$ зависит только от $\theta \in [-\pi/2; \pi/2]$ ($\varphi = \text{const}$), и везде далее аргумент $\vec{v}$ заменяется на θ . Идеальный излучающий элемент имеет ДН $f(\vec{v}) = \sqrt{\cos\theta}$; A_n – амплитуда n -го излучателя, N – общее число элементов в решетке, $\vec{r}_n$ – орт в точку наблюдения, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $A = \sum_{n=1}^N A_n$ – нормировочный коэффициент.

При наличии случайных ошибок в каждом канале, комплексные амплитуды A_n определяются соотношением:

$$A_n = A_n^0 \cdot \varepsilon_n = A_n^0 \cdot \rho_n \cdot e^{i\varphi_n} \quad (2)$$

A_n^0 – амплитуда n -го излучателя в отсутствии ошибок (действительная). Случайные величины ε_n , $n=1...N$ характеризуют амплитудные и фазовые ошибки в каждом канале антенны. Будем считать, что все ε_n одинаково распределены и независимы.

Численный алгоритм определения статистических характеристик бокового излучения антенных решеток, при наличии в апертуре случайных амплитудных и фазовых ошибок, состоит в анализе ансамбля случайных реализаций диаграмм,

при заданных максимальных амплитудных и фазовых отклонений.

Каждую случайную реализацию поля (1) определяют N случайных амплитуд A_n , задаваемых по формуле (2), где

$$\rho_n = 10^{B_0 \cdot \mu_n^a / 20}, \quad \varphi_n = \mu_n^\varphi \cdot \Phi_0.$$

Случайные величины $\mu_n^{a,\varphi}$ независимы и равномерно распределены на отрезке $[-1; +1]$. Для их получения, как было указано выше, используем генератор случайных чисел. Параметр B_0 определяет максимальную ошибку по амплитуде (дБ), а Φ_0 – максимальную ошибку по фазе (радианы).

Результаты моделирования ДН такой решетки приведены на рис. 4. Здесь показаны идеальная ДН при отсутствии ошибок, кривые средней мощности и верхней огибающей боковых лепестков по уровню

$$P_h(\theta) = P_{av}(\theta) + P_d(\theta),$$

$$\text{где } P_{av}(\theta) = \frac{1}{N_l} \sum_{l=1}^{N_l} |E_l(\theta)|^2,$$

$$P_d(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{l=1}^{N_l} (P_{av}(\theta) - |E_l(\theta)|^2)^2}.$$

Практически график $P_h(\theta)$ совпадает с кривой, полученной в соответствии с хорошо известными в статистической теории антенн соотношениями.

Такой алгоритм позволяет, помимо статистических оценок, найти, в частности, наихудшую реализацию. Она соответствует максимальному значению бокового лепестка в одном из направлений. Найденное АФР, соответствующее наихудшей реализации, сохраняется неизменным при расчете ДН во всем заданном диапазоне углов. Поэтому при таком подходе боковые лепестки в других направлениях оказываются иногда ниже оценок, полученных статистическими методами.

Из рисунка 4 видно, что идеализированная ДН ФАР с большим запасом (рис. 4а) удовлетворяет заданным требованиям (кривые с крестиками) на допустимый уровень боковых лепестков ДН. Случайные ошибки приводят к значительному фону боковых лепестков (рис. 4б). Для выполнения требований к антенне необходимы допуски на калибровку антенны не хуже, по крайней мере, 0.2 дБ по амплитуде и 1.5° по фазе (рис. 4в). Единственный способ обеспечить требуемую точность заключается в использовании цифровой схемы формирования диаграммы направленности.

Естественно, что создание подобной HAPS в настоящее время представляется почти фантастикой. Нужны, по крайней мере, два фактора: создание стабилизированной с высокой точностью платформы в стратосфере и революционные изменения в технологии цифровых устройств, которые приведут к резкому снижению стоимости

элементной базы. При создании РЛС цифровые методы успешно внедряются. Однако в коммерческих системах связи это еще впереди. Нужно двигаться поэтапно.

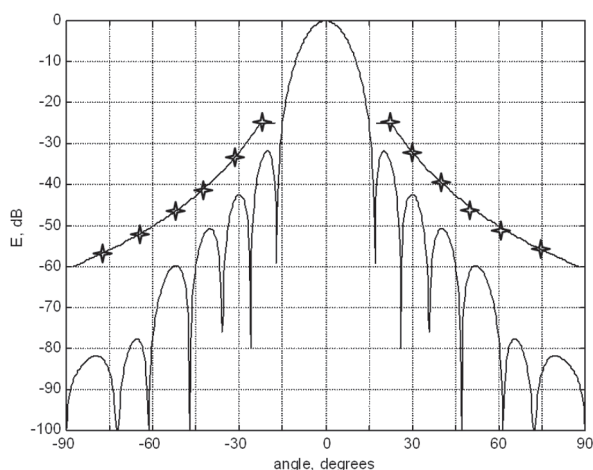
ETRI (Республика Корея) совместно с «Радиофизикой», Россия, разработали и испытали демонстрационный макет 19-элементной АФАР (рис. 5, 6, 7), формирующей семь лучей и дающей возможность продемонстрировать работу антенны в S- и Ka- диапазонах [10]. Указанные АФАР являются приемными, хотя проведенный анализ показывает, что по такому же принципу могут быть построены передающие антенны. Антенна содержит антенные решетки для каждого диапазона, радиочастотные подсистемы обоих диапазонов и единую цифровую подсистему.

Цифровая подсистема позволяет сформировать любую заданную связку из 7 лучей на выходе АФАР. В процессе испытаний макета были сформированы и измерены такие связки лучей.

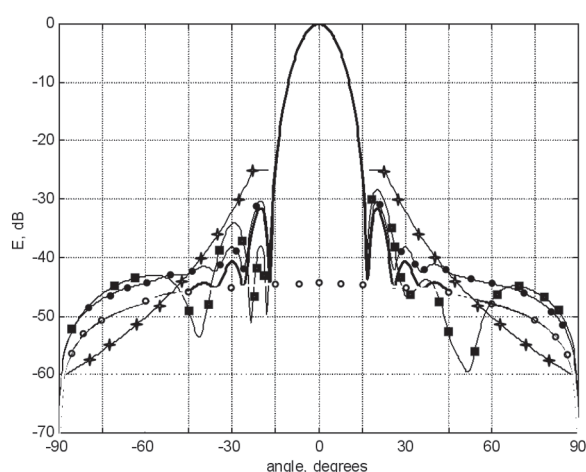
По согласованию с ETRI, эта же цифровая подсистема была испытана при сопряжении ее с линейной антенной решеткой для базовой станции мобильной связи. При этом также формируются 7 независимых лучей, каждый из которых

может быть достаточно узким и быстро пере-страиваемым в азимутальной плоскости, или луч П-образной формы для работы в широком азимутальном секторе. Это направление работ может оказаться более близким для практической реализации, чем создание HAPS.

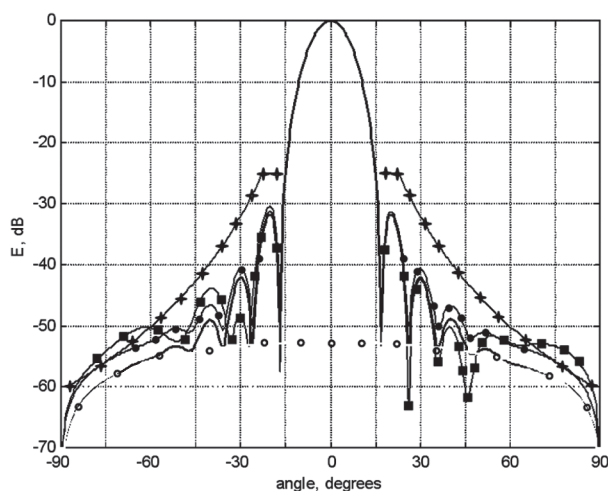
Чтобы обеспечить формирование лучей в заданном секторе и в нужной полосе частот, конструируются излучатели решеток с секторными ДН за счет сильных взаимных связей. Антенная решетка S-диапазона (схема рис. 6) содержит 19 печатных крест-вибраторов над металлическим экраном, с симметрирующими устройствами в системе возбуждения. Взаимная связь излучателей в составе решетки приводит к некоторому уплощению вершины диаграммы направленности (ДН) элемента решетки (характерные ДН центрального элемента в одном из сечений показаны на рис. 7). Измерения ДН элементов осуществлялись как непосредственно на выходах излучателей, так и на выходах радиочастотной подсистемы после преобразования частоты, а затем на выходе цифровой подсистемы. Полученная идентичность результатов измерений позволила судить о качестве сквозных характеристик каждого канала.



а — Идеальная диаграмма



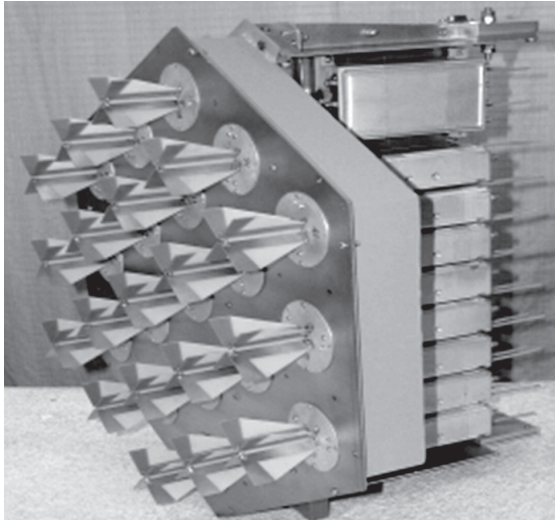
б — $B_0=0.2$ дБ, $\Phi_0=5^\circ$



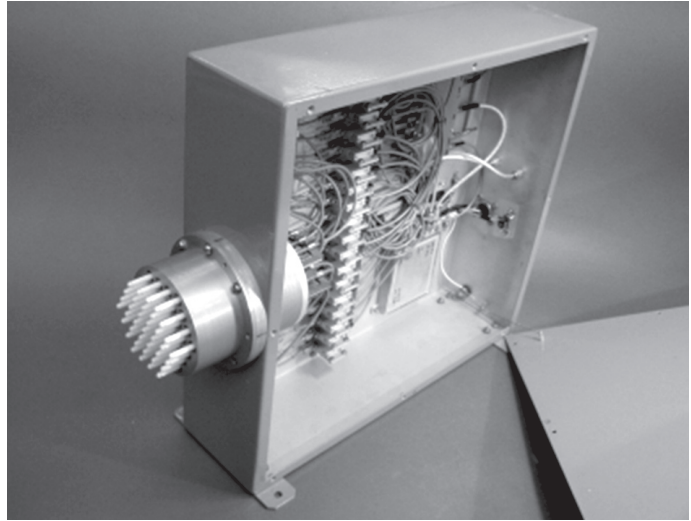
в — $B_0=0.2$ дБ, $\Phi_0=1.5^\circ$

Рис. 4. Диаграммы решетки из 14×14 элементов

- средняя ДН
- огибающая боковых лепестков по уровню $P_h = P_{av} + P_d$
- наихудшая реализация (максимум боковых лепестков)
- *— требуемая огибающая (CDMA),
- ○ фон боковых лепестков



а



б

Рис. 5. АФАР с цифровым диаграммоформированием: радиочастотные подсистемы и антенные решетки S-диапазона (а) и Ка-диапазона (б)

В Ка-диапазоне решетка выполнена в виде волноводной матрицы с диэлектрическими стержнями с сильной взаимной связью. Это позволило увеличить шаг решетки, и облегчить задачу размещения в модуле элементов, необходимых для преобразования частоты и оцифровки сигнала. В дальнейшем предполагается переход на печатную технологию и применение для получения секторной ДН элемента параллельных печатных плат с металлическими дисками. Исследования в этом направлении «Радиофизикой» проведены.

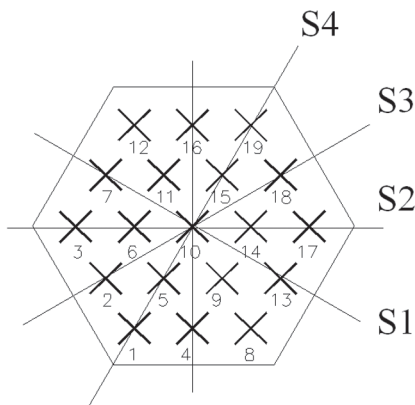


Рис. 6. Схема решетки S-диапазона

Обычно в технике антенных решеток применяется допущение (1), в соответствии с которым ДН антенны представляется в виде произведения ДН элемента в составе решетки на множитель решетки. Для малоэлементных решеток это допущение перестает работать. HFSS дает возможность вычислить как ДН элемента, расположенного в центральной части антенны, где у него имеются несколько «колец» окружения, так и элемента, расположенного на краю решетки. Благодаря этому вычисление диаграмм антенны в целом, соответствующих различным случайным реализациям АФР, производится в общем случае с учетом краевых эффектов:

$$E(\vec{v}) = \sum_{n=1}^N \frac{f_n(\vec{v})}{A} A_n \cdot \exp\{ik \cdot (\vec{r}_n; \vec{v})\}, \quad (3)$$

где $f_n(\vec{v})$ – ДН n -го элемента решетки.

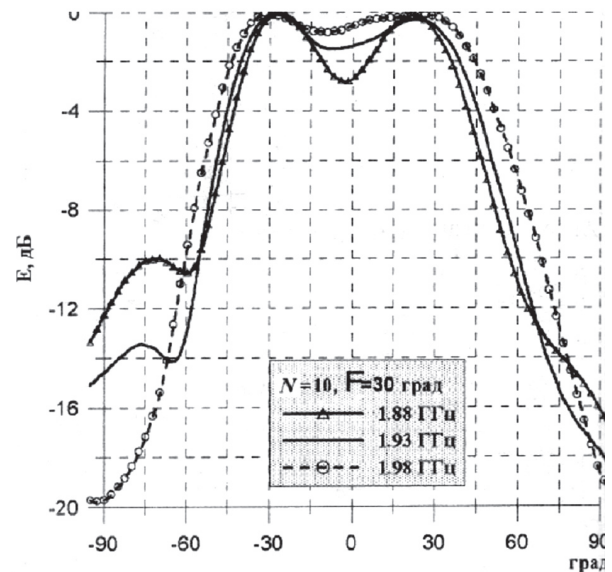


Рис. 7. Парциальная ДН элемента 10, сечение S3, (30° к горизонтальной оси)

Калибровка. Еще совсем недавно для калибровки ФАР использовалась фазометрическая аппаратура. Так, ФАР ММДВ, результаты разработки которой указаны в [8], калибровалась на начальном этапе по вынесенному источнику с помощью фазометра. В некоторых случаях использовалась специальная «насадка», которая поочередно фиксировалась на каждом излучателе ФАР.

Качество калибровки резко улучшилось, когда для этой цели стали использоваться штатные фазовращатели, встроенные в каждый канал возбуждения излучателя, или цифровая подсистема.

Коммутационный метод калибровки ФАР (в некоторых источниках он назван методом переключений) без использования фазометрической аппаратуры был предложен, в числе одной

из первых работ, в [11]. До настоящего времени в ОАО «Радиофизика» используются поэлементные методы калибровки, суть которых заключается в следующем: фазовращатели в каждом канале поочередно устанавливаются во все возможные состояния. В вынесенном источнике принимаются суммарный сигнал — от тестируемого и от опорного каналов. Данные измерений обрабатываются. В результате вычисляется фаза в каждом тестируемом канале при исходном состоянии фазовращателя. В ФАР, где отключить нерабочие каналы не представляется возможным, вынесенный источник принимает только суммарный сигнал, излучаемый всей ФАР, в том числе, тестируемым каналом. Суммарный сигнал служит при обработке данных в качестве опорного в этом случае.

На первый взгляд, измерения слабого сигнала от одного излучателя на фоне мощного суммарного сигнала от всей остальной решетки представляются бесперспективными, в первую очередь, из-за низкой точности. Дело обстоит именно так, если для выделения сигнала одного канала используется только какой-либо принцип его «окраски», без применения других мер. Дело существенно изменяется, когда фазовращатели всех каналов до начала калибровки выставляются в такие состояния, чтобы суммарный сигнал, формируемый всей решеткой в направлении на вынесенный источник, достиг достаточно низкого значения (но, все же, превышающего сигнал от тестируемого канала). В этом случае оба сигнала, — от измеряемого канала и от всей решетки, становятся сопоставимыми. Модуляция сигналов хорошо наблюдается и позволяет уверенно вычислить начальные фазы во всех каналах.

В других направлениях уровень сигнала может быть как угодно велик. Измерения малоэлементных антенн производятся чаще всего в безэховой камере, в условиях, когда отсутствуют заметные переотражения поля, попадающие в вынесенный источник. Но даже при наличии переотражений, вызываемых неподвижными предметами, суммарный сигнал продолжает быть стабильным, качество измерений не снижается. Важно, чтобы установленное исходное положение всех фазовращателей, кроме тестируемого, оставалось неизменным в течение полного цикла калибровки антенны.

Применение поэлементной калибровки показано на примере пассивной проходной ФАР, состоящей из 192 каналов [12]. ФАР включала в себя 32 модуля, каждый из которых содержал 6 каналов с *p-i-n*-диодными четырехразрядными

фазовращателями. Сложение принимаемого сигнала вначале происходило в модулях, затем суммировались сигналы модулей.

При калибровке использовались приближенные значения начальных фаз модулей, полученные в результате измерения их характеристик до установки в антенну и подключения излучателей. Вначале осуществлялась фазировка каналов в модулях, затем модулей между собой. Для выделения сигнала модуля, производилась расфазировка всех модулей антенны, кроме тестируемого.

На рис.8 слева показана апертура антенны на первом этапе калибровки. У всех модулей, кроме третьего, верхние три фазовращателя установлены в состояния, обеспечивающие синфазное сложение сигналов в направлении оси антенны (на рисунке показано белыми кругами), а нижние три — в противофазное им состояние (на рисунке показано серыми кругами). Такая расфазировка обеспечивает, в первом приближении, противофазное сложение сигналов каналов антенны в осевом направлении. Рис. 8 справа иллюстрирует калибровку на 2-м этапе. На рис. 9 показаны измеренные ДН до калибровки при выставлении фазовращателей по априорным данным (кривая 1) и после калибровки (кривая 2). Уровень боковых лепестков ДН 2 не превышает минус 25 дБ. Более подробно процедура калибровки рассмотрена в [12]. На рис. 10 показаны результаты калибровки поэлементным методом АФАР с цифровым формированием ДН [10].

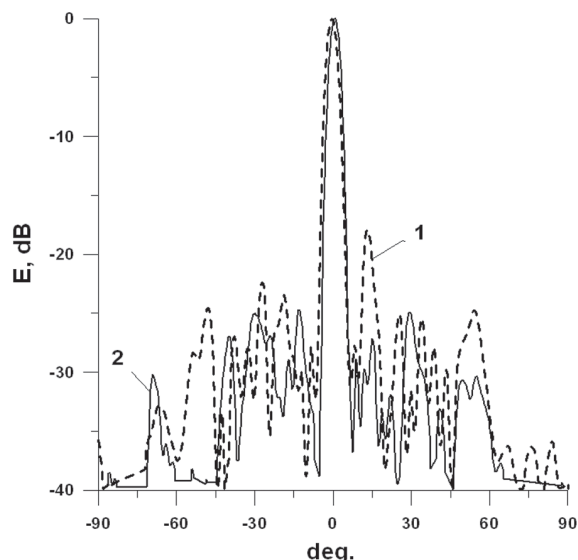


Рис. 9. ДН ФАР из 192 элементов (1 — до калибровки, 2 — после калибровки)

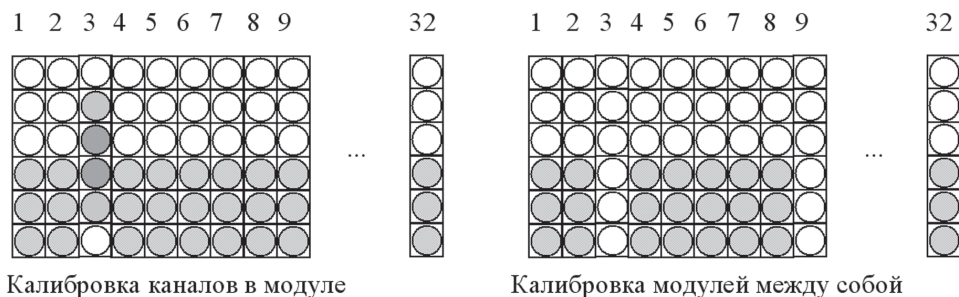
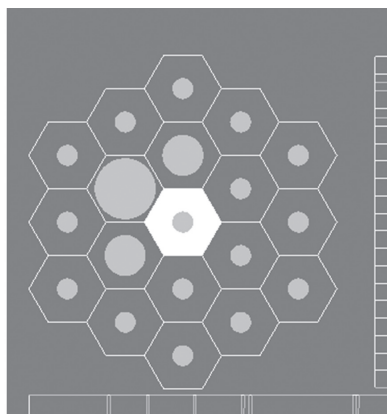
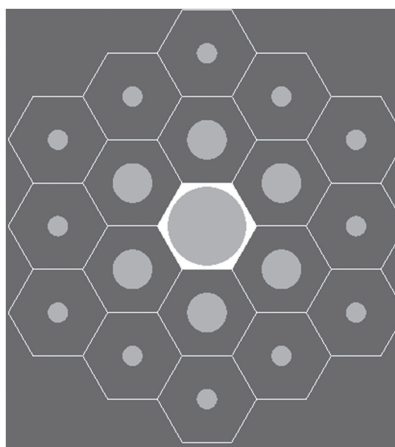


Рис. 8. Два этапа калибровки 192-канальной антенны



а — Амплитуды в каналах АФАР до калибровки



б — Амплитуды в каналах АФАР после калибровки

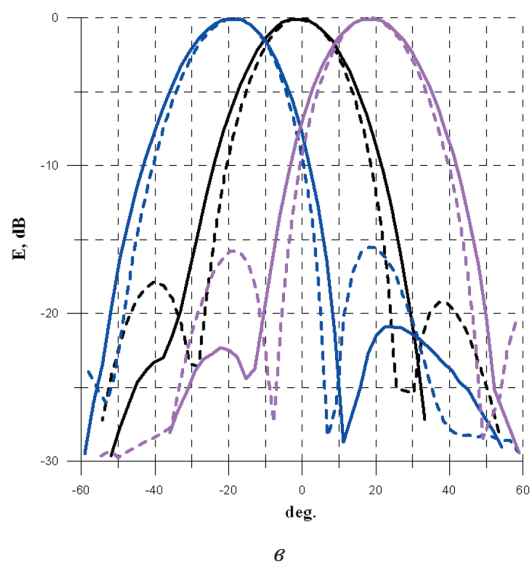


Рис. 10. Амплитуды в каналах 19-элементной АФАР с цифровым диаграммоформированием в процессе калибровки (а), (б). Измеренные сечения лучей для равномерного (пунктир) и спадающего (сплошная линия) амплитудных распределений (в)

3. МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ ФАР

Особенности разработки многоэлементной решетки проиллюстрируем на примере ФАР отражательного типа, миллиметрового диапазона волн (рис. 11 и 12).

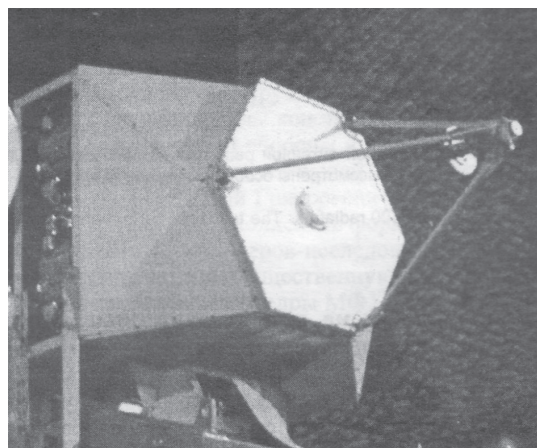


Рис. 11. ФАР на измерительном стенде

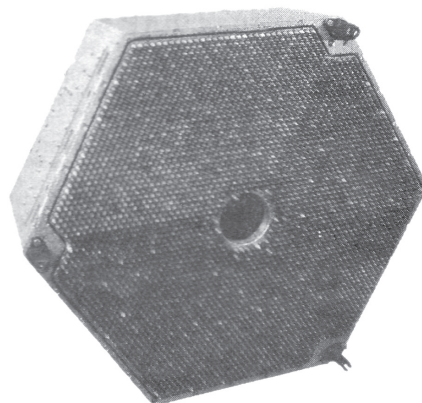


Рис. 12. Апертура ФАР

ФАР содержит 3600 излучателей-фазовращателей в раскрыве примерно 70λ и обеспечивает сектор электронного сканирования $\pm 25^\circ$ [13]. Возбуждение ФАР и формирование моноимпульсной связи ДН на прием осуществляется моноимпульсным облучателем и контррефлектором. Излучающие элементы ФАР расположены в узлах гексагональной сетки с шагом 1.1λ . Излучающий элемент представляет собой конический диэлектрический стержень, выступающий из волновода круглого сечения. Благодаря сильной взаимосвязи излучателей формируется парциальная ДН элемента с пологой вершиной и крутыми склонами (это характерно для ФАР, с так называемым, ограниченным сектором сканирования). Секторная форма ДН (рис. 13) позволила сократить число излучателей и фазовращателей за счет существенного подавления интерференционных максимумов в ДН. В традиционной решетке, при том же секторе сканирования, потребовалась бы более плотная установка элементов с шагом 0.7λ [14].

Увеличение шага излучателей дало возможность также разместить в апертуре ФАР выпускаемые промышленностью ферритовые фазовращатели (дискрет 45°).

Система управления фазовращателями строится по принципу распределенного вычислителя. Архитектура системы управления демонстрируется рис. 14. Вся апертура ФАР разбита на 36 под-решеток.

Используются унифицированные подрешетки двух типов. В подрешетке каждого типа содержится 6 строк. Число столбцов, а, следовательно, и общее количество элементов в подрешетках разное. Подрешетка 1-го типа включает в себя 88 элементов, 2-го типа — 118 элементов.

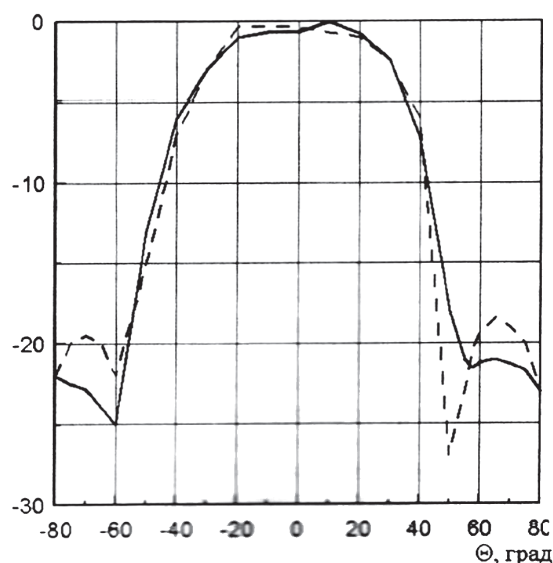


Рис. 13. Парциальная ДН элемента ФАР

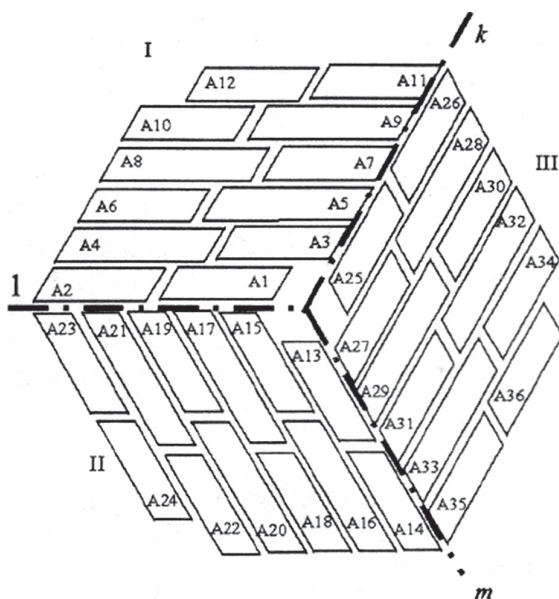


Рис. 14. Подрешетки ФАР

Прием команд от центральной ЭВМ осуществляется ячейкой управления лучом. В ней принятый сигнал обрабатывается, и формируются команды для каждой из 36 ячеек расчета фаз (ЯРФ) в подрешетках. ЯРФ служит для расчета и передачи в подрешетку кодов фазовращателей с учетом хранящихся в памяти индивидуальных констант. При этом учитываются фазовые сдвиги при нулевой установке фазовращателей. Они определяются при калибровке ФАР. Особенность ЯРФ состоит в том, что она управляет одновременно фазовращателями, расположенными в двух соседних строках подрешетки. Эти 2 строки образуют модуль. Таким образом, расчет фаз для антенны в целом из 3600 элементов производится 108 вы-

числителями одновременно. В режиме настройки и калибровки ФАР, любой фазовращатель антенны может быть выставлен в любое положение независимо от остальных фазовращателей, но в связи с особенностями системы управления, это возможно только помодульно, т.е. для установки фаз необходимо переслать в подрешетку состояния фазовращателей целого модуля.

Полный расчет фазового распределения с учетом времени прохождения команд выполняется за 920 мкс.

Система управления позволяет осуществлять контроль работоспособности фазовращателей, а также считывать фазовое распределение в персональный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Поскольку и в данном случае использовался поэлементный метод калибровки, необходимо было почувствовать модуляцию суммарного сигнала при изменении фазового состояния одного любого фазовращателя из 3600. Это означает, что перед началом калибровки должно быть выставлено исходное фазовое распределение (ИФР), которое обеспечивает достаточно низкий уровень суммарного сигнала в направлении оси антенны, совпадающем с направлением на вынесенный источник.

В отличие от [12], при калибровке рассматриваемой ФАР отсутствовала какая-либо априорная информация о начальном фазовом распределении (НФР), соответствующем нулевым состояниям фазовращателей. Калибровка осуществлялась в несколько этапов [15].

На этапе 1, чтобы максимально подавить сигнал в осевом направлении, требуемое ИФР находилось методом перебора ряда реализаций фаз по группам фазовращателей, выделенным в апертуре антенны. Примеры такого разделения каналов на группы приведены на рис. 15.

Фазовращатели, принадлежащие к разным группам, выделены цветом. На левой половине рисунка схематично показаны фазовращатели всей антенны, на правой — трех модулей крупным планом.

Далее синхронно изменялись состояния половины фазовращателей антенны до получения минимального сигнала. Затем производилось перераспределение каналов по группам, и процесс повторялся до получения приемлемого уровня сигнала. Для разбиения каналов на группы использовался набор функций Уолша. Свойство ортогональности функций позволяет успешно делить число каналов пополам — при каждом последующем разбиении в каждой группе остается примерно половина каналов, находившихся в ней при предыдущем разбиении. Остальные переходят в нее из другой группы. Вычисление функций Уолша для всего набора из 3600 фазовращателей по ряду причин неудобно, поэтому разбиение на группы производилось внутри каждого модуля. Выставление требуемого ИФР в данной ФАР требовало не более 10-15 итераций разбиения на группы.

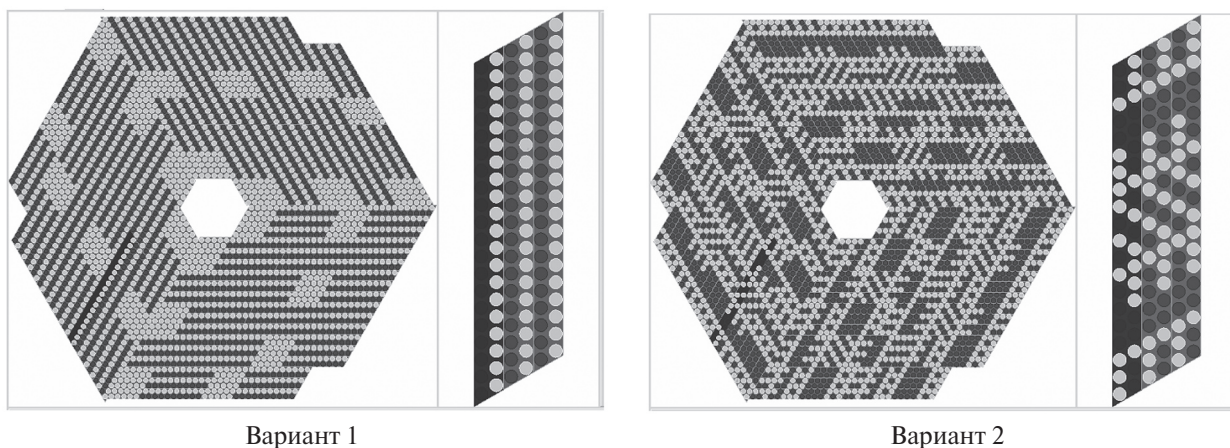


Рис. 15. Примеры разбиения каналов на группы

На этапе 2 производилась калибровка фазовращателей внутри модулей. Перед измерением каждой области нужно было получить максимум сигнала путем перебора фазовых состояний фазовращателей. В результате 2-го этапа были определены предварительные начальные фазы всех каналов.

На этапе 3 проводилась относительная калибровка модулей. В результате обработки данных по результатам измерений на этапах 2 и 3 получен полный набор начальных фаз для всех 3600 каналов.

Процесс калибровки был максимально автоматизирован благодаря специальному программному обеспечению. Вмешательство оператора требовалось лишь при переходе от одного этапа к другому и при подстройках аппаратуры. Калибровка ФАР была выполнена за один рабочий день.

О качестве калибровки можно судить по измеренным диаграммам направленности ФАР (рис. 16).

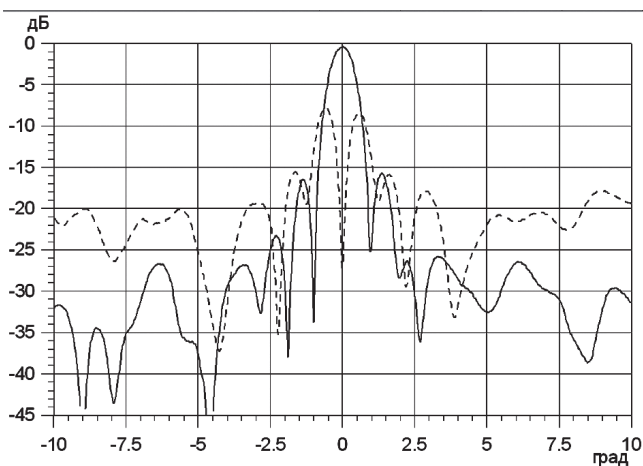


Рис. 16. Измеренные ДН ФАР при ориентации главного луча по нормали к ее апертуре. Сплошная линия – ДН суммарного канала, пунктирная – ДН разностного канала

В соответствии с проведенными оценками [13] среднеквадратичная ошибка калибровки составила 13° , т.е. существенно меньше дискрета фазовращателя.

Как следует из этого раздела, принятый алгоритм калибровки является многоэтапным и требует значительной затраты времени. Это можно допустить для экспериментальных образцов, когда продолжительность калибровки значительно меньше, чем время, необходимое для полного цикла всех остальных испытаний.

Особенно громоздко поэлементный метод выглядит по сравнению с высокопроизводительными методами калибровки. Так, еще в [11], наряду с поэлементным методом, был представлен способ с переключением всех фазовращателей перед каждым отсчетом, основанный на применении функций Уолша. Наиболее полно как встроенные способы контроля ФАР, так и диагностика путем одновременного переключения всей ФАР, рассмотрены в [16]. Эффективность предложенного в [16] алгоритма продемонстрирована на примере линейной антенной решетки. Указано, что обобщение алгоритма на плоскую решетку не вызывает особых трудностей при строчно-столбцовом методе управления фазовращателями. Отмечено, что в ряде случаев диагностика двумерных ФАР будет иметь заметные отличия, связанные со схемой питания и геометрией решетки.

В нашем случае, квазиоптический возбудитель формирует спадающее амплитудное распределение поля в апертуре в радиальных направлениях, проведенных из центра ФАР к ее периферии. Как показано на рис. 12, подрешетки, а следовательно, и модули в них, ориентированы под углом к соответствующему радиус-вектору. Ориентация подрешеток в каждой трети ФАР разная.

Кроме того, имеется специфика измерительного стенда ОАО «Радиофизика». Стенд размещен в экранированном помещении, стены которого покрыты поглощающим материалом. В помещении расположен ряд других стендов с испытуемыми макетами. Как было указано в разделе 2, возникающие паразитные переотражения практически не снижают точности измерений поэлементного метода. В процессе калибровки суммарная ДН антенны, соответствующая исходному фазовому распределению, и уровень переотражений остаются неизменными. Переотражения вносят не-

которую постоянную составляющую в опорный сигнал. Между тем, при методе одновременного переключения всех фазовращателей суммарная ДН решетки изменяется при каждом отсчете, и уровень паразитных переотражений по-разному влияет на результаты измерений.

Сложность конструкции ФАР, особенности системы управления и измерительного стенда обусловили выбор ее поэлементной калибровки.

Когда требуется настраивать достаточно большую партию изделий или осуществлять контроль в сложных условиях эксплуатации [17], высокопроизводительным методам калибровки, в том числе, разрабатываемым под руководством Я.С. Шифрина [16], нет альтернативы.

Это необходимо учитывать непосредственно при разработке ФАР и стендового оборудования.

Авторы выражают признательность Якову Соломоновичу Шифрину за внимание к рукописи и полезные замечания, В.Я. Шербенкову, Ю.А. Бомштейну, Л.А. Трушковой за помощь при подготовке рукописи.

Литература.

- [1] Шифрин Я.С. Статистика поля линейной антенны. — Х.: АРТА, 1962. — 118 с.
- [2] Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. — М.: Сов. радио, 1970. — 371 с. (Пер. на англ.: Statistical antenna theory. — Golem Press. 1971 — 370 p.).
- [3] Шифрин Я.С. Статистическая теория антенн — Гл. 9 в кн. Справочник по антенной технике. Т.1./ Под ред. Я.Н.Фельда и Е.Г.Зелкина. — М.: 1997. 57 с.
- [4] Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г. Статистика поля антенных решеток // Антенны. — 2000. №1. С.3-26.
- [5] Шубов А.Г., Теленков Е.А., Шишлов А.В. ОАО «Радиофизика» — участник разработки антенно-фидерных устройств.// Юбилейный сборник. М.: ОАО «Место Печати», 2008. С. 542-575.
- [6] Евстропов Г.А. Станция дальнего обнаружения баллистических ракет и космических объектов «Дунай-ЗУ».//Юбилейный сборник. М.: ОАО «Место Печати», 2008. С.153-171.
- [7] Shubov A.G., Denisenko V.V., Majorov A.V., Shalyakin A.A., Shishlov A.V. Development of Rotman's lenses for various frequency bands in Russia.//Proceedings of the Nordic Antenna Symposium, Lund, Sweden, September 2000. pp. 219-224.
- [8] Tolkachev A.A., Makota B.A., Pavlova M.P., Nikolayev A.M., Denisenko V.V., Soloviev G.K. A large-apertured radar phased array antenna of Ka band.// Proceedings of Int. Conf., Moscow, 1998. pp. 15-23.
- [9] Ku B. J., Ahn D.S., Lee S.P., Shishlov A.V., Reutov A.C., Ganin S.A., Shubov A.G. Radiation Pattern of Multi-beam Array Antenna with Digital Beam Forming for Stratospheric Communication System: Statistical Simulation. // ETRI Journal, 2002. V. 24, №. 3. pp. 197-204.
- [10] Ку Бон Жун, Ким Янг Су, Канг Бюн Су, Ан Ду Сеоб, Беляев А.С., Владимиров Н.В., Ганин С.А., Егоров Е.Н., Сусеров Ю.А., Шитиков А.М., Шишлов А.В., Шубов А.Г. О задаче создания многопанельной многолучевой антенны для стратосферной системы связи и этапах ее разработки. // Антенны, 2005. №1 (92). С. 22-29.
- [11] Бубнов Г.Г., Никулин С.М., Серяков Ю.Н., Фурсов С.А. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР. // М.: Радио и связь, 1988. 120 с.

- [12] Shubov A.G., Ganin S.A., Shitikov A.M., Shishlov A.V. Limit of accessible antenna array efficiency under their calibration by means of switching method. // Proceedings of the Nordic Antenna Symposium, Lund, Sweden. September 2000. P. 225-230.
- [13] Денисенко В.В., Дубров Ю.Б., Корчемкин Ю.Б., Макота В.А., Николаев А.М., Толкачев А.А., Шитиков А.М., Шишлов А.В., Шубов А.Г. Многоэлементная ФАР Ка-диапазона волн. // Антенны, 2005. №1 (92). С. 7-14.
- [14] Коротков В.Д., Скобелев С.П. Диэлектрические излучатели антенных решеток. // Тез. XXVI Межд. научно-технической конференции по теории и технике антенн, Москва, 29 ноября 1990 г, ч. 2. М.: НИИРФ, 1991. С. 10.
- [15] Бондарик А.В., Шитиков А.М., Шубов А.Г. Опыт использования поэлементных методов МТЕ и REV для калибровки многоканальных фазированных антенных решеток. //Антенны, 2005. №1 (92). С. 15-21.
- [16] Шифрин Я.С., Лиенинь У.Р. Бесфазовые методы диагностики фазированных антенных решеток // Антенны, 2000. №1. С.84-98.
- [17] Hood A.J., Murray B., and Purdy D. Lockheed Martin lightsar phased array antenna.//Proc. of the Millennium Conference on Antennas and Propagation, 2000. Paper 1419.

Поступила в редколлегию 18.02.2010.



Ганин Сергей Александрович, начальник сектора ОАО «Радиофизика», область научных интересов: теория и техника антенных решеток.



Макота Василий Андреевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ОАО «Радиофизика». Область научных интересов: фазированные антенные решетки и зеркально-линзовые антенны.



Шитиков Александр Михайлович, кандидат технических наук, начальник сектора ОАО «Радиофизика». Область научных интересов: фазированные антенные решетки.



Шишлов Александр Васильевич, кандидат технических наук, начальник отдела ОАО «Радиофизика». Область научных интересов: теория и техника антенн.



Шубов Анатолий Григорьевич, кандидат технических наук. Область научных интересов: теория и техника антенных решеток.

Dedicated to Prof. Yakov Shifrin on the occasion of his 90-year jubilee

SEISMO ELECTROMAGNETICS AS A FRONTIER OF RADIO SCIENCE

MASASHI HAYAKAWA

In this paper, a review on “Seismo- Electromagnetics” as one of the frontier science fields of Radio Science is presented. This new science has a rather short history on the order of one decade, but it would be of extreme importance in the countries like Japan with high seismic activity. The former method of short-time earthquake (EQ) prediction has been based on the conventional mechanical (seismic) measurement of crustal movements, but it was concluded about ten years ago to be useless for this short-term EQ prediction. Then, a new wave on the use of electromagnetic (non-seismic) effects has been developed during the last ten years or so as a promising candidate of EQ prediction. Several phenomena are suggested as promising EQ precursors. The first one is ULF (ultra-low-frequency) emissions from the lithosphere, the second is the seismo-atmospheric perturbation, and the third is the ionospheric perturbation associated with EQs by means of subionospheric VLF/LF propagation. We want to present some of our findings on these topics, and we hope that you could understand the important role of electromagnetic effects in EQ prediction.

В статье дается обзор по «сейсмо-электродинамике», как одному из актуальнейших научных направлений современной радиотехники. Это новое направление возникло совсем недавно (лет десять тому назад), но оно чрезвычайно важно для стран с высокой сейсмической активностью, подобных Японии. Предыдущий метод краткосрочного прогноза землетрясений (ЗТ) базировался на механических (сейсмических) измерениях движения земной коры, но лет десять тому назад был сделан вывод о том, что для краткосрочного прогноза землетрясений этот метод бесполезен. За последнюю декаду стали разрабатывать новое направление для краткосрочного прогноза ЗТ, в котором используются электродинамические (не сейсмические) эффекты. При этом в качестве перспективных предвестников ЗТ предлагается принять несколько явлений. Первое из них — это сверхнизкочастотные (СНЧ) излучения из литосферы, второе — сейсмо-атмосферные возмущения, а третье — ионосферные возмущения, фиксируемые при субионосферном распространении СНЧ/НЧ волн. Мы хотим представить результаты наших исследований на эту тему и надеемся, что вы сможете осознать важную роль электромагнитных эффектов в предсказании ЗТ.

1. INTRODUCTION ON SEISMO ELECTROMAGNETICS AND SHORT-TERM EQ PREDICTION

EQ prediction can be classified into three categories: (1) long-term, (2) intermediate-term and (3) short-term predictions. Long-term prediction means the estimate of the statistical probability of EQs to occur on the time-scales of 10 to 100 years, based on geological studies of faults and historic records of seismicity. Intermediate-term prediction (1 to years) is based on recent instrumental data of seismology and geodesy. So, long-term and intermediate-term predictions are really the subject of seismologists.

Although much more difficult than the above long-term and intermediate-term predictions, the short-term EQ prediction (3) is much more essential in saving human lives and is much more highly required in the seismo-active countries like Japan. Short-term means the time scale of hours to weeks. It is concluded about 10 years ago that the conventional mechanical measurement of crustal movement is found to be not so effective in the short-term EQ prediction. Amid the general pessimism, some significant new waves have been rising in this short-term EQ prediction and this is Seismo Electromagnetics. This is the potential use of electromagnetic (not mechanical) effects, and there have been accumulated a lot of promising electromagnetic precursors after the Kobe EQ. We think that it is becoming a consensus that some precursory effects do exist, mainly prior to an EQ.

It has been recently reported that electromagnetic phenomena take place in a wide frequency range prior to an EQ (Hayakawa and Fujinawa, 1994; Hayakawa, 1999; Hayakawa and Molchanov, 2002; Molchanov

and Hayakawa, 2008), and these precursory seismo-electromagnetic effects are expected to be useful for the mitigation of EQ hazards. Basically there are two principal methods of observation of EQ signatures. The first is the direct observation of electromagnetic emissions (natural emissions) from the lithosphere and the second is to detect indirectly the seismic effect taking place in a form of propagation anomaly of the pre-existing transmitter signals. The first method is based on the idea that natural emissions are radiated from the hypocenter of EQs due to some tectonic effect during their preparation phase. The problem of this “local” measurement is that our observing station should be located luckily very close to the EQ epicenter in order for us to detect seismogenic emissions. The second is based on the idea that there take place the anomalies in the atmosphere and ionosphere due to the seismicity, leading to the generation of propagation anomaly on the pre-existing transmitter signal characteristics (amplitude and phase). We call this type of observation “integrated” measurement, because we can detect any EQs which are located very close to the propagation path from the transmitter to the receiver, so that it is easy for us to accumulate the number of events for this integrated measurement.

In the following we pick up a few possible candidates of EQ precursor observations. Section 2 deals with the ULF emissions from the lithosphere (belonging to the local measurement), Section 3 concerns the perturbations in the atmosphere in possible association with EQs, and finally Section 4 is devoted to the seismo-ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation as an integrated measurement. In the final Section 5, we describe the general conclusion.

2. SEISMOGENIC ULF EMISSIONS

2.1. Introduction

This section deals with the ULF (ultra-low-frequency, with frequency less than 10 Hz) magnetic field variation belonging to the local measurement. The study on seismogenic ULF emissions started in the early 1990s. Even though the radio emissions are generated as a pulse in the EQ hypocenter, higher frequency components cannot propagate over long distances in the lithosphere due to severe attenuation, but ULF waves can propagate up to an observation point near the Earth's surface with small attenuation. This is the most important advantage of seismogenic ULF emissions.

There have been reported three reliable events for the ULF magnetic field variations prior to the EQs; (1) Armenia, Spitak EQ (1988 December 8, Magnitude = 6.9) (Molchanov et al., 1992), (2) USA, California, Loma Prieta EQ (1989 October 18, $M = 7.1$) (Fraser-Smith et al., 1990) and (3) Guam EQ (1993 August 8, $M = 8.0$) (Hayakawa et al., 1996a). The epicentral distance is 129 km for (1), 7 km for (2) and 65 km for (3). The Loma Prieta EQ happened very close to the observing station, so that it is better for us to indicate the results for this EQ. Fig. 2.1 illustrates the temporal evolution of ULF magnetic field (horizontal component, frequency = 0.01 Hz (period = 100 s)). It indicates that the magnetic field increases for about one week (5-12 days) before the EQ, followed by a quiet period and a sharp increase one day before the EQ (especially an abrupt increase 3-4 hours before the EQ). Very significant changes in ULF magnetic field were also observed for other two EQs, which were a stimulus to the extensive research on the relationship

of ULF emissions and EQs. Here we review the relationship between the two. An additional important point is that these seismogenic ULF emissions are so weak that it is of essential importance for us to develop any methods to identify those signals. We need sophisticated methods of signal processing, and we review the observational results by those methods. Finally, we will comment on our future works.

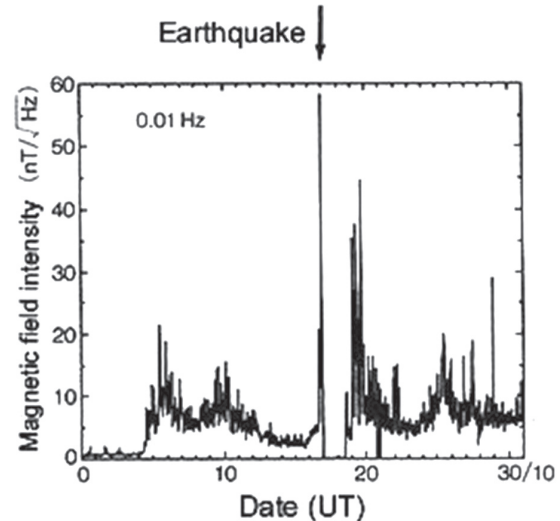


Fig. 2.1. Temporal evolution of geomagnetic variation for the Loma Prieta EQ ($f=0.01\text{Hz}$) (after Fraser-Smith et al., 1990)

2.2. Magnetic field sensors and observation system

Fig. 2.2 shows the summary on the occurrence of the EQ-related ULF activity in the form of EQ magnitude (M) versus epicentral distance (R) from an ULF magnetic station (Hattori, 2004; Hayakawa et

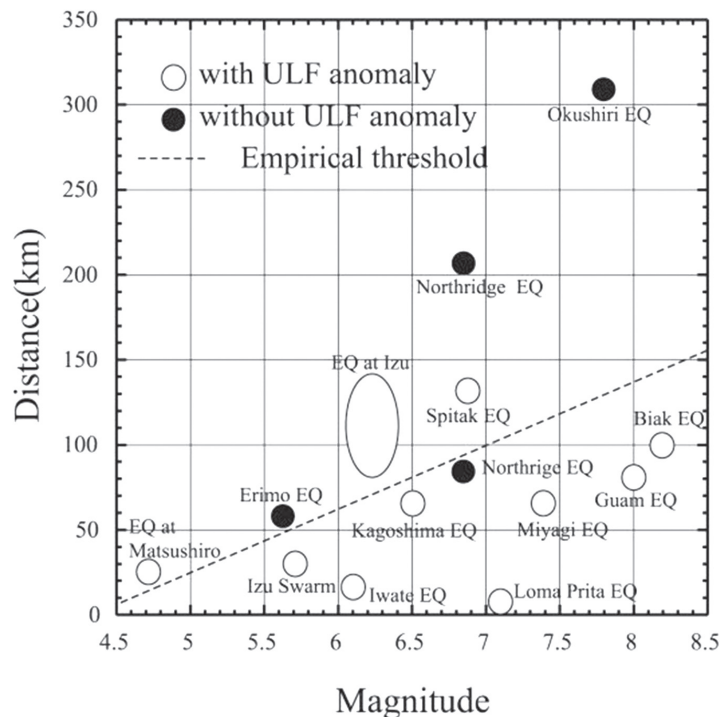


Fig. 2.2. Summary of the seismo-ULF emissions in the form of EQ magnitude (M) and epicentral distance (R). A white circle means the event with ULF anomaly, while a black circle means the event without ULF anomaly. The empirical threshold is indicated by a dotted line ($0.025R=M-4.5$)

al., 2007). White and black circles show an EQ with and without accompanied ULF anomalies, respectively. The dashed line indicates the empirical threshold ($0.025R \leq M < 4.5$) for the appearance of anomalous ULF signals preceding large EQs. This figure demonstrates that ULF emissions could be observed about 60 km from the source region for an EQ with $M \geq 6$, and the detectable distance of ULF magnetic anomalies would be extended to about 100 km in the case of an EQ with $M \geq 7$.

It is important to predict EQs with $M \geq 6$ in a highly populated region to mitigate disasters. Therefore, we decided to install a network of ULF magnetometers with high sampling rate to cover the Kanto (Tokyo) area with inter-sensor distances of about 70–80 km. Two types of magnetometers are adopted; torsion and induction types. Taking account of the existence of Kakioka Geomagnetic Observatory, Japan Meteorological Agency (JMA) (geographic coordinates: 36.2°N , 144.2°E), we planned to set up stations to cover the area, as shown in Fig. 2.3. Circles in the figure indicate the distance of 60 km from the station (the circle from Kakioka observatory is also displayed). The clock system at each station is controlled by GPS.

One of the sensors (induction magnetometer) has been installed, for example, in JMA's Matsushiro Seismological Observatory (36.5°N , 138.2°E), in which strain meters, tilt meters, and short-period seismometers are already in operation by JMA. A com-

parison between the seismic and electromagnetic data will be useful in understanding the fundamental physics of the EQ preparation process. We also installed the induction magnetometer at Chichibu station. Induction magnetometers installed at these two stations are of search coil type with 85 Hz sampling rate, named LEMI-30 produced by Lviv Center of Institute of Space Research, National Academy of Science of Ukraine. These sensors are intended for the study of frequency band from 0.01 to 30 Hz, and detailed specification of them is summarized in Hattori et al. (2004). Also the acoustic emission sensor was installed at Matsushiro station. The acoustic sensor records the emissions at four frequency bands of 30, 160, 500, and 1000 Hz. The lowest band corresponds to the uppermost frequency of LEMI-30.

A small L-shaped array has been composed with three torsion magnetometers, the distance of which is about 5 km at the western part of Izu peninsula and the southern part of Boso peninsula. With these arrays, we expect to develop a method to find the arrival direction of ULF waves (Hayakawa, 2006). Both Izu and Boso peninsulas are seismic active regions, so that we consider it good for precise observation for direction finding of ULF anomalous signals by means of the arrays. We also installed torsion magnetometers at Jaishi, Iyogatake, Hayakawa, Misakubo, and Shitara. These torsion magnetometers, MVC-2DS, were produced by Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere

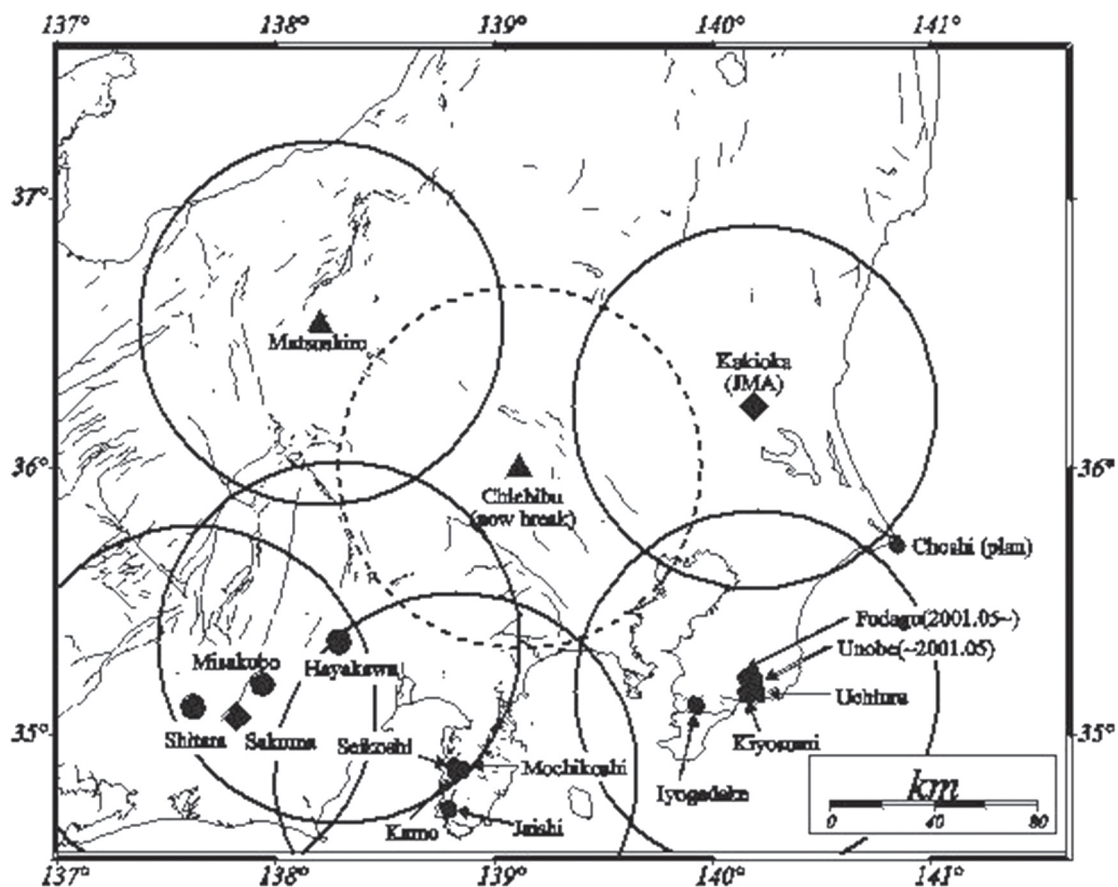


Fig. 2.3. A ULF network in the Kanto (Tokyo) area. A triangle indicates the installation of an induction magnetometer and a circle, the torsion-type magnetometer. Kakioka observatory is equipped with induction magnetometers. A box indicates the fluxgate magnetometer

and Radiowave Propagation, Saint Petersburg Filial (SPbF IZMIRAN), Russian Academy of Sciences. A magneto-sensitive element of the torsion sensor is a permanent magnet suspended with quartz or metallic fibers which serve as the rotation axis of the magneto-sensitive element. The reflecting surface which transforms angular displacement of the magneto-sensitive element into electric signal by means of photoelectric converter is mounted rigidly to the magnetic-sensitive element. When the element is turned by the force of the external magnetic field, the light beam deviates from the zero position, leading to an increase of one diode illumination and a decrease of the other. As a result, there appears a signal proportional to the disturbed magnetic field value for the sensor output. The element is suspended inside the fluid-filled capsule on the thin metallic fibers and a low-powered monochromatic infra-red emitting diode is used for the photo emitter. The feedback circuit which produces a magnetic field opposite to the external field is adopted. Also the coil for current compensation of constant magnetic field to set up the magnetic-sensitive element at the zero position and the coil for calibration are installed. The main technical parameters of MVC-2DS are described in Hattori et al. (2004).

2.3. Analysis method of ULF magnetic field variations

In addition to the installation of highly sensitive ULF sensors, we have to carry out sophisticated signal processing in order to detect and identify weak seismogenic ULF emissions. We have already developed several useful signal processings, some of which will be described below.

(a) The ratio of vertical to horizontal components of the magnetic field (polarization analysis)

There has been reported that it is useful to use the ratio of magnetic vertical to horizontal component S_Z/S_G ($S_G^2 = S_H^2 + S_D^2$, H and D are two horizontal magnetic components) to distinguish the seismogenic ULF emissions from other noises (Hayakawa et al., 1996a). While we expect that this ratio (S_Z/S_G) (polarization) is relatively small for the plasma waves coming from the ionosphere/magnetosphere, we expect that this ratio is considerably enhanced, $S_Z/S_G \sim 1$ or even more for seismogenic emissions. We apply this method to a particular event (Hattori et al., 2002). There were two EQs in the North-west part of Kagoshima prefecture with $M = 6.5$ and $M = 6.3$ on 1997 March 26 and May 16, respectively. Both EQs had the depth of about 20 km. Our ULF observatory (at Tarumizu, Kagoshima) is located about 60 km away from their epicenters, and three magnetic field components were measured there with sampling of 1s. By using the data during about a year from 1996 August to 1997 September on the relationship between ULF magnetic field variation and seismic activity, we try to indicate the presence of ULF field variation in response to the crustal activity. The

following procedure of data analysis was adopted. (1) We use the data of 4 hours during the local midnight (LT = 0 ~ 4 h). (2) We divide the data into an interval of 30 minutes and we have 8 segments. The FFT analysis is performed for those 8 segments. (3) We estimate the average and dispersion of the spectrum, to try to know the main frequency of seismogenic ULF emissions. (4) We perform the polarization analysis (S_Z/S_G) to find the seismogenic ULF emission. By averaging over those 8 segments, we obtain the daily average spectrum and polarization. (5) We compare these with the corresponding data from remote stations in order to distinguish between the local and global effects. (6) We compare the temporal evolution of average spectrum and average polarization with the geomagnetic activity (expressed by ΣKp) and the local crustal activity. With taking into account the spatial scale of magnetic variation at Tarumizu observatory, we examine the magnetic field data (3 components) at Ogasawara island (Chichi-jima) 1200 km away from Tarumizu and at Darwin (the conjugate point of Tarumizu). The largest noise at ULF is geomagnetic variation in the upper atmosphere, and this is the reason why we look at the data at the conjugate point. At these stations, the same sensors (inductions) are working. During our analysis period, we have confirmed that there were no EQs within a radius of 100 km from Chichi-jima and Darwin observatories.

Fig. 2.4(a) illustrates the temporal evolution of seismic activity (the energy radiated from EQs is integrated over one day, followed by the conversion back into the magnitude). Fig. 2.4(b) shows the temporal plot of the polarization (S_Z/S_G) during 10 days before

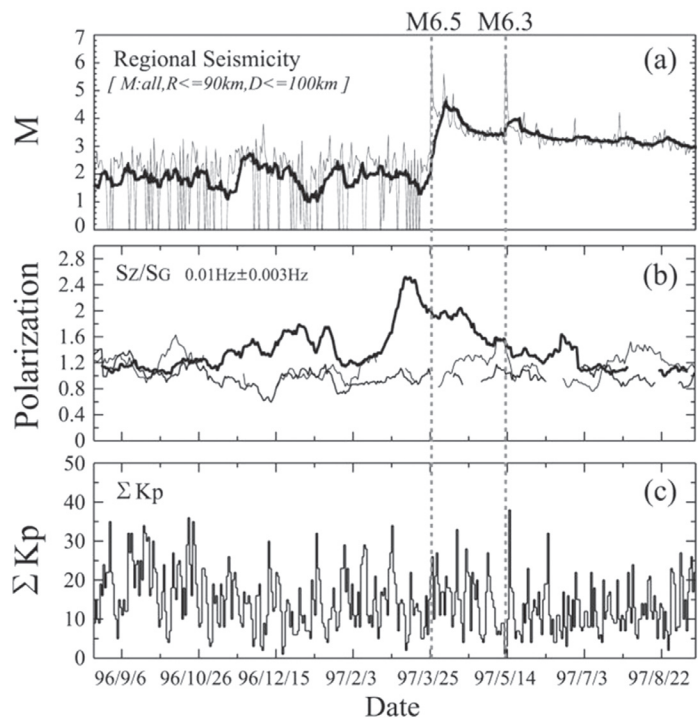


Fig. 2.4. Polarization results at Tarumizu, Chichijima and Darwin. (a) Temporal evolution of regional seismicity, (b) temporal variation of polarization (S_Z/S_G , 0.01Hz) at Chichijima and Darwin (thin lines) and at Tarumizu (thick line), and (c) ΣKp variation

the current day at three stations. The full line refers to Tarumizu. Fig. 2.4(c) refers to the geomagnetic activity (ΣKp). When we look at Fig. 2.4(b), the polarization at the two stations (Chichi-jima and Darwin in thin lines) is found to be stable, while we find a very significant change in the polarization at Tarumizu in a thick line. The polarization is seen to be increased from the background value of ~ 1.0 to more than double prior to the 1st EQ. We find a decrease in polarization and, when this decrease is stabilized, we had the 1st EQ. The polarization value is found to remain at this value for a while. Then, again we notice a decrease in polarization, and then we had the 2nd EQ. In the beginning of July, the polarization value returned to the background value. Significant changes are noticed only at Tarumizu, but not at Darwin and Chichi-jima. When comparing the seismic activity around Tarumizu and the polarization, we can conclude, (1) the polarization at Tarumizu is found to be significantly enhanced prior to the EQ, and (2) the temporal variation of polarization seems to be very parallel to that of seismic activity. This means that the polarization of the magnetic field variation is a good parameter to monitor the local seismic activity (Hattori et al., 2002, 2004) and the important point is that the polarization increase is taking place before the EQ. No significant correlation with the geomagnetic activity is found.

(b) Principal component analysis

We have been performing the array observation by using 3-4 torsion-type magnetometers both at the Izu and Boso peninsulas as shown in Fig. 2.3. The sampling frequency is 50 or 12.5 Hz. We know that the seismic activity at Miyake-island started to be active in the late June of 2000, and the volcano-eruption started there. The activity continued not only at Miyake Island, but also at its surroundings. The total number of EQs in this area amounted to 12,000, which is a record in this area since the opening of Meteorological Agency. We adopted the principal component analysis (PCA) for the ULF data observed at several stations in the Izu peninsula (Gotoh et al., 2002). By using the ULF data observed at close three stations, we can have 3 sets of data, which enable us to separate three possible sources. Generally speaking, the ULF signal

observed at a station, is a combination of a few effects; (1) geomagnetic variation of the magnetosphere (e.g., geomagnetic storms) due to the solar activity, (2) man-made noise, (3) any other effect (including seismogenic emissions). We have traced the eigen-value λ_n ($n = 1, 2, 3$) of three principal components in the frequency range from $T = 10$ s to $T = 100$ s by using the time-series data with duration of 30 m. As the result of analysis, the first principal component (λ_1) is found to be highly correlated with the geomagnetic activity (Ap). The second eigen-value (λ_2) is found to have a period of 24 hours, with daytime maximum and nighttime minimum. This suggests that this noise is due to the human activity. Fig. 2.5 illustrates the temporal evolution of the 3rd (or smallest) principal component (λ_3). We notice an enhancement in λ_3 from the middle March to the middle June (about a few months), followed by a quiet period (about one week before the 1st EQ) and by a sharp increase a few days before the 1st EQ. Similar sharp peaks are seen for the subsequent EQs with magnitude greater than 6.0. This general behavior seems to be in close agreement with Fig. 2.1, which indicates that this variation is reflecting the crustal activity in this district.

(c) Direction finding (magnetic field gradient method)

The objective of the above two methods was just to identify the presence of seismogenic ULF emissions, but we have to convince others that the detected ULF emission is much more likely to be associated with an EQ if we could locate its generation point. We have performed the so-called direction finding for the ULF emissions for the above-mentioned Izu peninsula EQ swarm. We have used the same local array network consisting of, at least, 3 stations in the Izu and Boso peninsulas. By measuring the gradient of horizontal and vertical components of the magnetic field at different frequencies (Kopytenko et al., 2002; Ismaguilov et al., 2002) (or periods in Fig. 2.6 (ordinate)), we deduce the direction of azimuth from the normal to the observed gradient. The result at Izu is given in Fig. 2.6. In the figure, 0° indicates the North direction, $+$, east and $-$, west, and Fig. 2.6 illustrates the temporal evolution of arrival directions. The ordinate indicates the

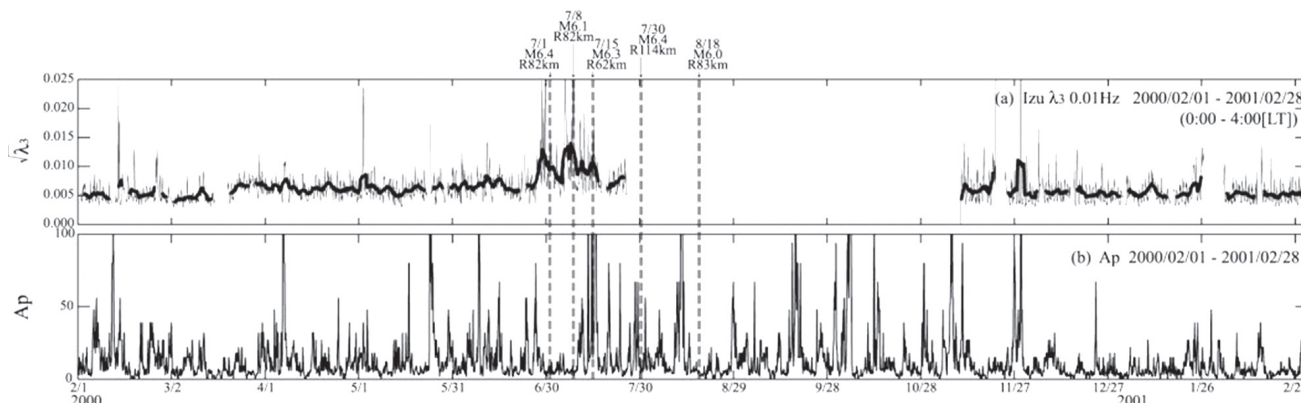


Fig. 2.5. Result of principal component analysis with the use of the H component data observed at three stations. The upper panel indicates the temporal evolution of the third principal component ($\sqrt{\lambda_3}$). The enhancement in λ_3 is seen from the middle March to the middle June, followed by a quiet period one week before the 1st EQ, and by a sharp increase a few days before the 1st EQ. (b) Geomagnetic activity (Ap)

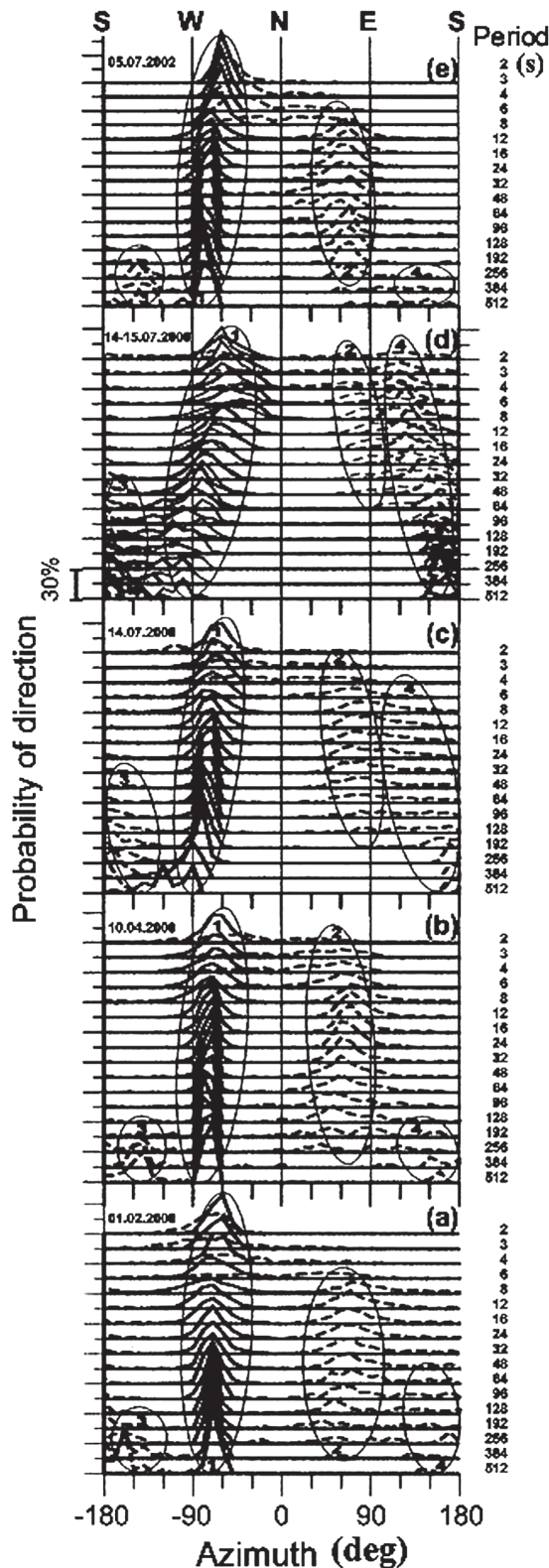


Fig. 2.6. Temporal variation of the occurrence histogram of direction of arrival (azimuth) by means of the Izu array. The abscissa is the arrival azimuth (0: North, +, east and -, west). Time goes from the bottom (a) to the top (e); (a) February 1st, 2000 (4 months before the swarm), (b) April 10, 2000 (two months before the swarm), (c) June 14, 2000 (12 days before the swarm), (d) July 14-15, 2000 (during the swarm) and (e) July 5, 2002 (two years after the swarm). There are 4 characteristic noise sources numbered from 1 to 4. The number 4 is the seismogenic emission

occurrence probability of arrival azimuth in the night-time period of 0 h to 6 h. Full lines refer to the vertical component, while broken lines to the horizontal component. Judging from the azimuth distributions, there are 4 noise sources. In the Izu array observation, there generally exists a signal predominantly from West (Suruga-Bay) (numbered 1 in Fig. 2.6) (corresponding to Parkinson vector) in the vertical component, reflecting the geological contrast between the sea and land. And for the horizontal component, there are two stationary signals. One is located in the East, which is directed to the seismo-active region in the eastern sea of the Izu peninsula (designated as 2 in Fig. 2.6). The second is the signal from the direction of Zenisu, which is designated as 3 in Fig. 2.6. The locations of the noise sources (numbered 1-3 in Fig. 2.6) are summarized in Fig. 2.7. The time goes from (a) to (e); (a) 4 months before the swarm, (b) two months before the swarm, (c) 12 days before the swarm, (d) during the swarm, and (e) two years after the swarm. Now we look at the noise designated as 4 in Fig. 2.6. This noise is found to be observed about two weeks before the EQ swarm ((c) in Fig. 2.6) due to the volcano eruption of Miyake Island, and these noise emissions are found to have propagated from the Miyake Island and their occurrence is most enhanced during the swarm (see Fig. 2.6(d)). Furthermore, we have tried to perform the direction finding for this noise numbered 4 from the Izu and Boso peninsulas. Fig. 2.8 is the direction finding results, as the result of triangulations from the Izu and Boso peninsula data. The azimuthal direction from each peninsula is given by the area within the two directions in broken lines. The area located by the triangulation, is found to be coincident with the active area of the Izu peninsula EQ swarm. As the conclusion, the ULF emissions identified in Fig. 2.6, 2.7 and 2.8 (Kopytenko et al., 2002; Ismaguilov et al., 2002), are highly likely to be associated with the swarm activity of Izu peninsula EQs.

(d) Direction finding (Goniometric method)

The importance of direction finding is again stressed by showing another result for a recent, large EQ (Niigata EQ) (Ohta et al., 2005; Hayakawa et al., 2006). This EQ happened at 17:56 JST on October 23 in 2004, and its magnitude and depth are 6.8 and 10 km. We show the presence of ULF emissions for this EQ, by using the data from other observatory at Nakatsugawa. The three components of magnetic field (B_{ns} , B_{ew} , B_z) are measured at Nakatsugawa by using the same induction magnetometers (Ohta et al., 2005) like at Izu and Boso peninsulas, but the importantly different point is that the waveform measurement is being performed at a wide frequency band. That is, the sampling frequency is 100 Hz, and Fig. 2.9 illustrates the temporal evolution of the emission intensity (B_{ew} component) at the frequency range, $f \leq 0.1$ Hz, which shows that the signal intensity is extremely enhanced by 3 dB as compared with the monthly mean during several days from October 2 to October 6. This noise seems to be anomalous. However, we cannot conclude that this is associated with the EQ, even though

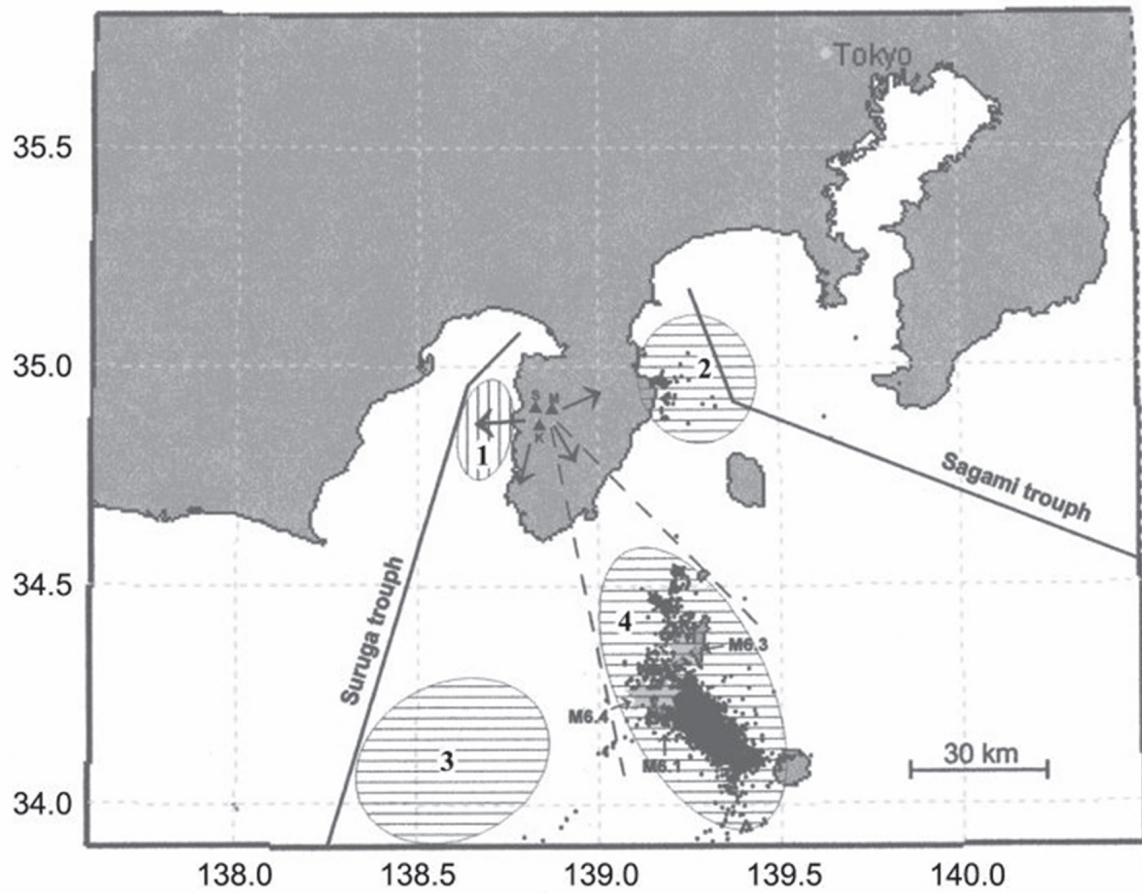


Fig. 2.7. Direction finding results. Different azimuthal directions in Fig. 2.6, correspond to different noise sources (numbered 1-4 in Fig. 2.6)

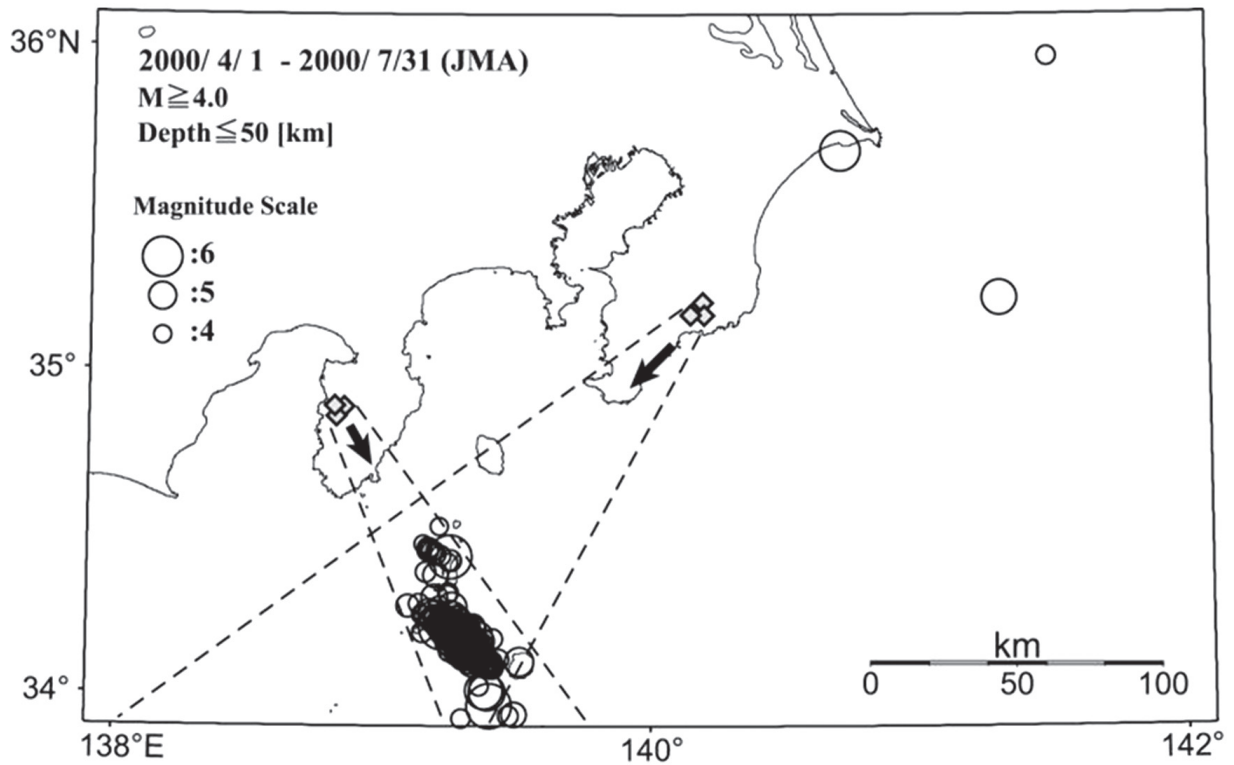


Fig. 2.8. Triangulation of the noise source (#4 in Fig. 2.6) by using the azimuths estimated from the Izu and Boso peninsula arrays

it occurs about a few weeks before the EQ. Then, we performed the direction finding for this noise by using the goniometer principle by means of two horizontal magnetic field components. We estimated the arrival azimuth by taking the ratio of B_{ns}/B_{ew} for the emissions with anomalous amplitude during 2-6 October. The estimated azimuth (mean value) is indicated in Fig. 2.10. The azimuthal direction is 55° from the East, which is consistent with the epicentral direction. This is indicative of a higher possibility that the noise is associated with the EQ.

2.4. Characteristics of seismogenic ULF emissions and generation mechanism

A large number of papers on seismogenic ULF emissions have been published since the famous EQs, Spitack, Loma Prieta, Guam, and in this section we have reviewed mainly our published results. We can summarize the characteristics of seismogenic ULF emissions based on not only our results, but also previous foreign results.

(1) There is no doubt that ULF emissions take place as a precursor to a relatively large EQ. The distance of

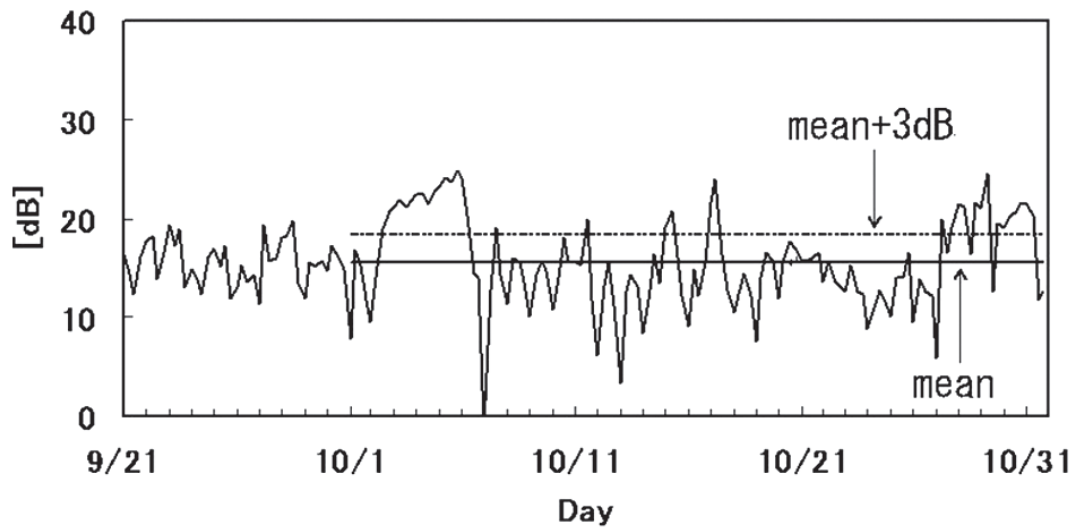


Fig. 2.9. Temporal evolution of magnetic field intensity at Nakatsugawa. The frequency is less than 0.1 Hz. Strong emissions are observed from October 2 to 6. EQ indicates the EQ time.

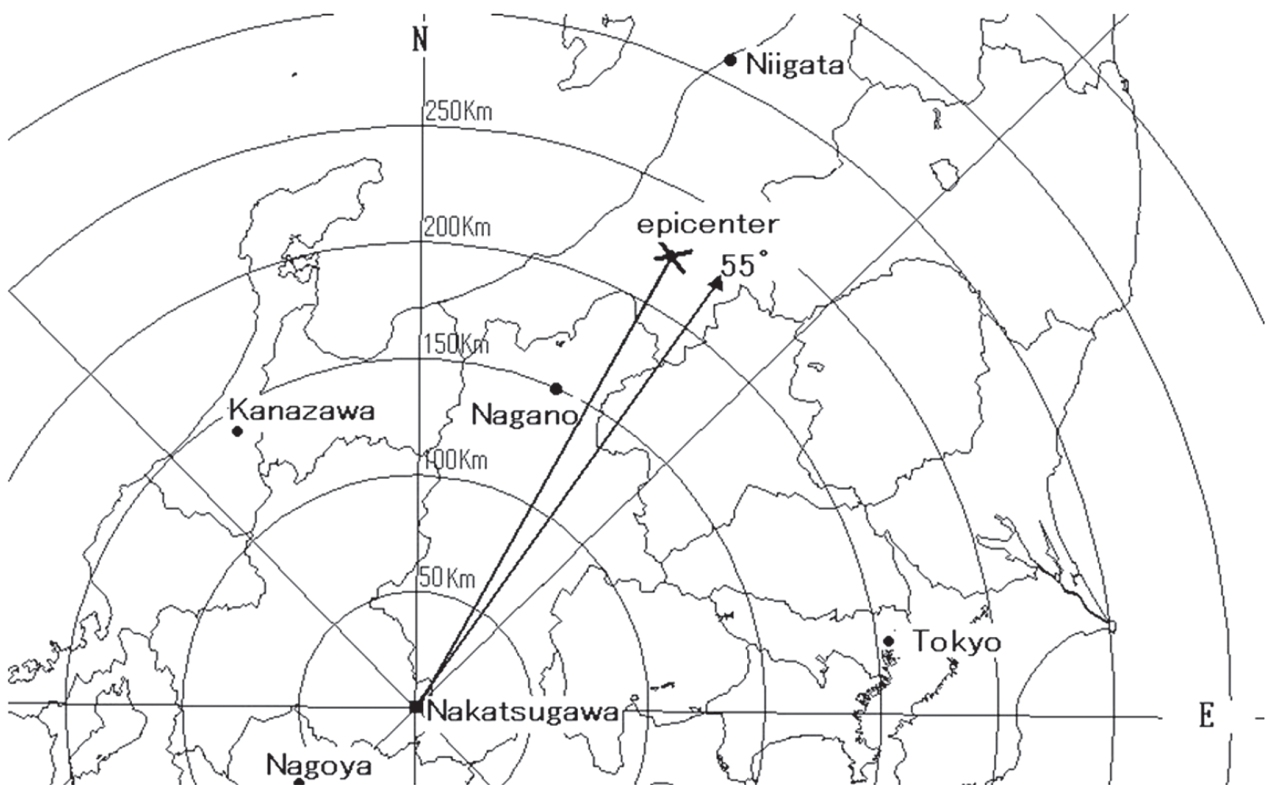


Fig. 2.10. Goniometric direction of ULF noises during 2-6 October as seen from Nakatsugawa. The epicenter is also indicated, for the sake of comparison

detection (R) is 70–80 km for magnitude = 6.0, and ~ 100 km for magnitude = 7.0. The empirical threshold of detection in Fig. 2.2 is given by $0.025 R = M - 4.5$.

(2) The ULF emissions for large EQs (with magnitude greater than 6.0), seem to exhibit a typical temporal evolution. First of all, we have a first peak one month to a few weeks before the EQ, followed by a quiet period and a significant increase in amplitude a few days before the EQ.

(3) The amplitude of those seismogenic ULF emissions is found to range from 0.1 nT to a few nT. However, their frequency spectra are not well understood; that is, what is the predominant frequency? Recent studies indicate the importance of the frequency of 10 mHz (period of 100s).

(4) The observation of ULF emission is a local measurement. So that only when our observing station happens to be very close to the EQ epicenter, we can detect seismogenic emissions. Otherwise it is impossible to detect any seismogenic emission, and this is the reason why we do not have abundant data set as is summarized in Fig. 2.2. The case of Niigata EQ, does not follow the above-mentioned threshold, so that we have to think of the generation and subsequent propagation for this case.

We next review the generation mechanism of seismogenic ULF emissions. It has been proposed that the ULF emission is generated by a mechanism which requires the charge separation (as an ensemble of small antennas) due to microfracturing by the stress change in the focal region before the EQ (Molchanov and Hayakawa, 1995). According to their theoretical estimate, the ULF emission can be detected within 60 km for $M = 6$ and 100 km for $M = 7$. This theoretical estimate seems to be in good agreement with the above-mentioned experimental threshold in Fig. 2.2. When the radio emission is generated at the source region, it should be wide-banded. However, the higher-frequency components decay during the propagation in the lithosphere, which results in the possible detection of ULF emissions near the Earth's surface (Molchanov et al., 1995). Another possible mechanism is electrokinetic effect (Fenoglio et al., 1995). We cannot say, at the moment, which one of these two representative mechanisms is more probable as the generation mechanism of seismogenic ULF emissions. Then, we comment on another aspect of the preparation process of EQs. During this preparation phase, the lithosphere is known to exhibit a self-organized criticality phenomenon. That is, we expect the microfracturing in the focal region due to the stress increase, followed by the growth and coalescence of microcracks. This process is thought to be involved in the generation of ULF emissions. This nonlinear process in the lithosphere can be tackled with the use of fractal analysis (Hayakawa et al., 1999; Ida et al., 2005; Ida and Hayakawa, 2006). The results from fractal analysis are preferably taken into account in the generation mechanism of seismogenic ULF emissions.

2.5. Future direction on a network of magnetic field observation (three components)

In Japan, some institutes (magnetic observatories belonging to JMA, Institute of Geological Survey,

etc.) have been continuing the magnetic observation with 3 components, but their sampling rate is too low (sampling of 1 minute). Also, Japanese universities have their own networks of observations, but they are interested in the measurement of total magnetic flux with the use of proton fluxgate magnetometers in the field of solid earth physics. In order to apply the magnetic field observation to EQ prediction, it is desirable to (1) observe three components of the magnetic field, (2) sample the data, at least, once per second, (3) observe the magnetic field with resolution of less than 10 pT, and (4) perform a coordinated observation at a multiple of stations.

Further, we have to take care of other effects; we need the information on solar-terrestrial effect (geomagnetic variation, geomagnetic storms) in the magnetic monitoring of seismic activity. We have found that there were observed significant geomagnetic variations before relatively large EQs. So that it is quite necessary to estimate accurately the temporal/spatial characteristics of the signals by simultaneous monitoring of solar terrestrial effects from the ground and from space.

3. SEISMOGENIC PERTURBATION IN THE ATMOSPHERE

3.1. Introduction

There seems to be a general consensus that underground electromagnetic fields in the frequency range $f \leq 1$ Hz associated with EQs are generated due to either electrokinetic (EK), microfracturing effect, or seismo-inductive effect (e.g., Molchanov and Hayakawa, 2008). At higher frequency we can expect appearance of emissions from the seismo-perturbed atmosphere and ionosphere, and you can find indeed a lot of papers on this subject (e. g., numerous collections of papers in Hayakawa and Fujinawa (1994), Hayakawa (1999), and Hayakawa and Molchanov (2002)). We can classify several types of atmospheric electromagnetic emissions as follows; (a) EQ light, (b) HF/VHF emission at the frequency range of 10–100 MHz, (c) Electromagnetic radiation in the ELF/VLF/MF frequency range from hundreds Hz to hundreds kHz, and (d) ULF/ELF atmospheric emission at the frequency range of 3–30 Hz.

Then, another effect is the perturbation of the atmosphere in possible association with EQs. This effect has been investigated with the use of over-horizon VHF transmitter signal (a kind of integrated measurement such as subionospheric VLF/LF propagation).

We will present latest results only of some of the above phenomena.

3.2. Seismo-atmospheric electromagnetic emissions

(a) HF/VHF emission in a frequency range of 10–100 MHz

Several case studies were reported in USA (Warwick et al., 1982, frequency ~18 MHz), Greece (Nomikos et al., 1995, $f \sim 41$ MHz and 53 MHz), and in Japan (Maeda and Tokimasa, 1996, $f \sim 22$ MHz; Yamada et al., 2002, $f \sim 50$ MHz). The intensity and duration of emission bursts reported were comparable with the conventional HF radiation from the thunderstorm

system because HF noise reception on board meteorological satellites is a routine registration for monitoring lightning activity. Nevertheless, there were no attempts to produce any correlation statistics or to detect and identify natural background from the HF bursts allegedly associated with EQs.

Here we present some latest results on these seismogenic VHF radio emissions. Yonaiguchi et al. (2007b) have made the first attempt of using the fractal analysis to the VHF radio noises observed at several stations in the Sendai area for a particular large EQ, Miyagi-ken oki EQ (16 August 2005; magnitude=7.2). The use of fractal analysis has enabled them to distinguish among different noise sources (lightning, solar-terrestrial effect and seismogenic effect).

(b) ULF/ELF atmospheric emission in the frequency range of 3–30 Hz

The conventional ULF range of 0.003–30 Hz can be divided into two physically different parts: the first is a range of 0.003–3 Hz, where we meet sporadic magnetospheric emissions (magnetic pulsations), natural (nonseismic) emission from the ionosphere and Ionospheric Alfvén Resonances (IAR) (0.3–3 Hz) with a small addition of occasional seismogenic emissions (Molchanov et al., 2003). While in the second part the main input is atmospheric emission from lightning pulses (atmospherics) resulted in intensity maxima near Schumann resonances. These spectrum maxima arise due to far-distant propagation of the atmospherics (e. g. Nickolaenko and Hayakawa, 2002). Ohta et

al. (2001) reported on the seismo-induced changes in ULF/ELF atmospheric noise. Based on the ULF/ELF observation in Nakatsugawa in Japan, they found abnormal enhancement in the ULF/ELF noise intensity one day and after the famous Chi-Chi EQ in Taiwan (21 September, 1999, $M=7.6$) and their goniometric direction finding suggested that those noise are coming from the direction of EQ epicenter. Later, Hayakawa et al. (2005) have reported on the abnormal Schumann resonance phenomena, especially the significant effect in the fourth harmonic ($f \sim 25$ Hz) and this anomaly is interpreted in terms of seismo-ionospheric perturbations.

Being stimulated by this work, the similar data on ULF/ELF magnetic field observations in a Russian station, Karymshiro will be presented here. Local variations of the magnetic field at the ULF-ELF frequency range associated with seismicity are studied with the data of observations at Karimshimo complex observatory (latitude 52.83°N , longitude 158.13°E , Kamchatka, Russia) (Shchekotov et al., 2007). A wideband emission is found to start about 5 days before an EQ and last until 5 days after it. Seismic ULF/ELF emission at the frequency range of 4–6 Hz as compared with the seismically quiet background has an enhanced P_{hh}/P_{dd} (P_{hh} and P_{dd} are the spectral power densities of H and D components) spectral ratio and a reduced standard deviation of ellipse orientation angle and the ellipticity, and it has a more linear polarization, as shown in Fig. 3.1. Parameters of this emis-

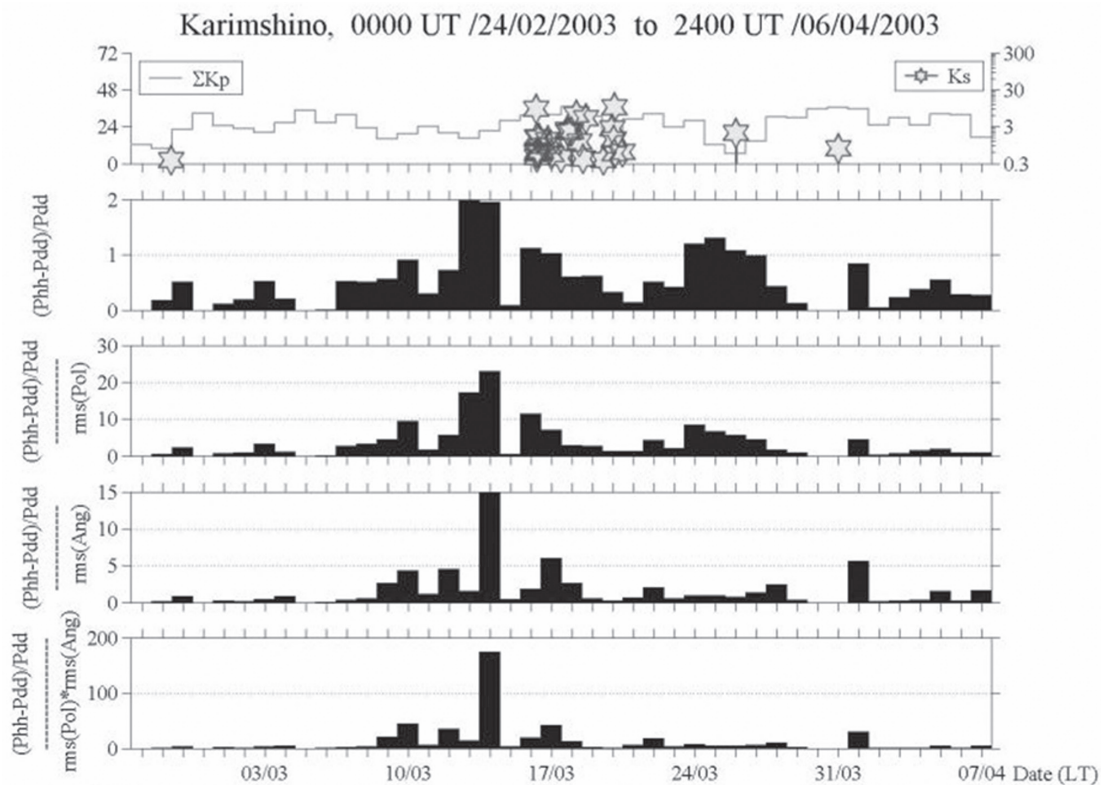


Fig. 3.1. The observation results in the frequency range (4–6 Hz) for different parameters: $\langle H/D \rangle - 1$ (second panel), $[\langle H/D \rangle - 1]/[\text{rms}(\text{Pol})]$ (third panel), $[\langle H/D \rangle - 1]/[\text{rms}(\text{Angle})]$ (fourth panel) and $[\langle H/D \rangle - 1]/[\text{rms}(\text{Angle}) \text{rms}(\text{Angle})]$ (bottom). Here rms (Pol) is the dispersion in polarization and rms (Angle) is the dispersion in ellipse orientation. The top panel indicates the ΣKp index (in dotted line) (the scale is given on the left end) and also Ks index (so-called seismic index) (its scale is given on the right end)

sion are studied for more than 30 individual EQs and statistically with the superposed epoch method. The reliability of the EQ predicting hypothesis is verified, and the favorable parameters for the EQs together with those for ELF magnetic field are selected. The following EQ parameters are favorable for this emission: depths $H < 50$ km, magnitudes $M_s > 5.5$, and epicenter distances $R < 300$ km. The changes of natural ULF/ELF emissions during the periods of enhanced seismic activity are interpreted as the result of the excitation of additional ULF/ELF emissions in the seismic zone to the east of the observatory or the redistribution of lightning discharges with their possible concentration near the active crust fault.

3.3. Seismo-atmospheric perturbation

(a) Reception of over-horizon VHF transmitter signals and seismo-atmospheric perturbation

The propagation of over-horizon FM signals probably associated with impending EQs was observed by Kushida and Kushida (1998). They detected the signals from an over-horizon transmitter in Central Japan several days or weeks prior to the Kobe EQ. Though we do not receive any signal from a VHF transmitter out of the line-of-sight, we sometime receive the signals from the transmitter and we define this as being abnormal. Some correlation was found between the abnormal VHF wave propagation and the EQs which happened at certain sensitive regions. This phenomenon has been studied intensively for a number of EQs in Central Japan from February 1 till June 30, 2000 by Fukumoto et al. (2001) by making full use of the advantage of an integrated measurement. The FM transmitter is located in Sendai, 312 km far from the

receiver in Chofu, whereas the distance of line-of-sight was 80 km. Though the FM signals (77.1 MHz) from Sendai have not been detected in Chofu on normal days because it is out of the line-of-sight, over-horizon FM signals have been occasionally received in Chofu with small incident angle smaller than 20° . Fig. 3.2 illustrates one example of detection of over-horizon signals from FM Sendai. The data are observed on 27 May, 2000, as a precursor to an EQ on 3 June, 2000 (with magnitude 6.2). The direction findings of the signal bearing have shown that there are sometimes a lot of differences with regards to the bearing of the future EQ epicentre. Fukumoto et al. (2001) found that the cross-correlation between the abnormal over-horizon FM signals and EQs exhibits a significant peak around 7 days before the EQ. Recently, an experimental evidence for the same phenomena has been confirmed by Fujiwara et al. (2004). There are few papers on seismo-atmospheric perturbations on the basis of studies on over-horizon VHF signals (Kushida and Kushida, 1998; Fukumoto et al., 2001; Fujiwara et al., 2004). We can summarize the important informations from these earlier works as follows, which would be essential for the following theoretical considerations.

(1) Over-horizon VHF FM transmitter signals are not detected under normal conditions (Kushida and Kushida, 1998; Fukumoto et al., 2001), but they are received on some occasions.

(2) Such abnormal over-horizon VHF signals are found to be received at a station out of the line-of-sight with small incident angle (incident angle $\leq 20^\circ$) (Fukumoto et al., 2001).

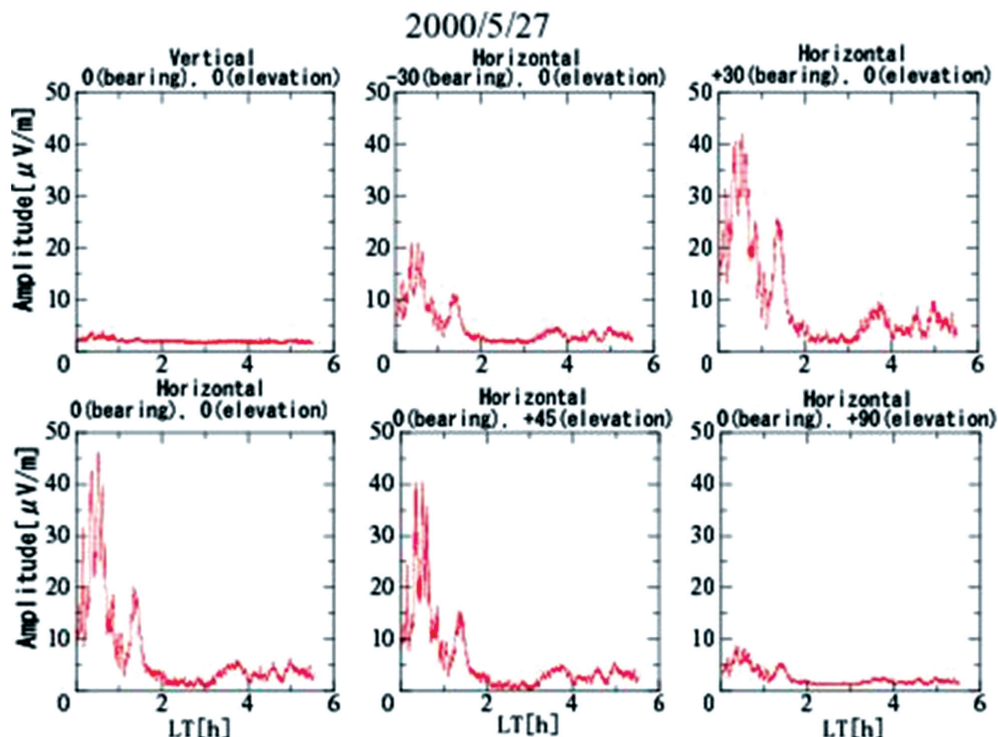


Fig. 3.2. An example of the reception at our university of over-horizon VHF signal from FM Sendai on 27 May, 2000. The outputs from different antenna systems are plotted, indicating the source bearing in the atmosphere (not the ionosphere). This reception may be a precursor to an EQ on 3 June, 2000 (magnitude 6.2)

(3) The cross-correlation between over-horizon VHF signals and EQs indicates that such an anomaly takes place about one week before the EQ (Fukumoto et al., 2001; Fujiwara et al., 2004).

(4) The direction finding of the bearing of observed over-horizon signal shows that there is sometimes a lot of difference with regards to the bearing of a future EQ. Always, the region or the atmospheric perturbation seems to be close to the land area for oceanic EQs (Fukumoto et al., 2001).

Unlike the initial hypothesis by Kushida and Kushida (1998), Fukumoto et al. (2001) have found that this VHF anomaly is not attributed to the ionosphere, but to the atmospheric perturbation (Point(2)). This atmospheric perturbation tends to take place about one week before the EQ (Point (3)). Point (4) is indicative of the suggestion that the atmospheric scatterer for over-horizon VHF signal seems to take place close to the land (not over the sea).

(b) Latest statistical results

Yonaiguchi et al. (2007a) have made the first study on the statistical correlation between the over-horizon VHF signal (FM Sendai received at Chofu) and EQs on the basis of one complete year data. It is found that meteorological radio duct effect is dominant in July–September. On the other hand, when we make our analysis area narrower just around the middle region of the great-circle path, we have always significant correlation between VHF signal characteristics (average, median intensity or variance) with seismicity in any months of the year, exceeding the confidence level.

Yasuda et al. (2009) have developed an interferometric direction finding for over-horizon VHF signals. The azimuth distribution by means of our interferometer has enabled us to correlate any burst in the temporal evolution of electric field intensity to a certain EQ. The over-horizon VHF transmitter signals (in our case, FM Sendai (77.1 MHz)) in possible association with EQs are always well above the background noise, whose azimuth is found to be relatively close to the direction of Sendai, relatively away from the EQ epicentral direction. On the other hand, the VHF radio noises as discussed in Section 3.2 (a) are always simultaneously detected as an enhancement of background noise, with their azimuths being relatively close to the EQ epicenter.

(c) A generation mechanism of seismo-atmospheric perturbations

Kushida and Kushida (1998) and Pilipenko et al. (2001) have assumed without any convincing results that the abnormal over-horizon VHF wave propagation is due to the back-scattering from the meter-scale plasma irregularities in the ionosphere above the seismo-active region. But, it is concluded above that the reception of over-horizon VHF signals is due to the atmospheric perturbation.

We recall that the weak over-horizon signals detected at Chofu were identified by audio monitoring to be FM Sendai broadcasting which is operated at the frequency 77.1 MHz. It is common knowledge that the effect of long-range VHF wave propagation is usu-

ally due to tropospheric ducting via the wave reflection below the tropopause (Turman, 1955; Hall et al., 1996). Yonaiguchi et al. (2007a) have actually found this ducting effect in particular seasons (summer). The ducting in the troposphere followed by the ray distortion builds up as a result of refractive index changes with altitude. In the geometric optics approach the curvature radius, R , of the ray can be expressed via the refractive index n as follows (e.g., see Turman, 1955):

$$\frac{1}{R} = \mathbf{N} \cdot \frac{\nabla n}{n}, \quad (1)$$

where $\mathbf{N}$ denotes the unit vector of a principal normal to the curve/ray. The refractive index of air depends mainly on the atmospheric pressure P , the temperature T , and the partial pressure of water vapour e , which is contained in the air. The empirical relation of these parameters can be written as follows (e.g., see Hall et al., 1996):

$$n - 1 = \frac{a_1 P}{T} + \frac{a_2 e}{T^2}, \quad (2)$$

where $a_1 = 7.8 \times 10^{-7} \text{ K/Pa}$ and $a_2 = 3.7 \times 10^{-3} \text{ K}^2/\text{Pa}$ are the empirical constants. The first term on the right-hand side of Eq. (2) covers the dry gases, mainly nitrogen and oxygen, while the next term is governed by the water vapour. The atmospheric pressure decreases with height approximately exponentially and the mean temperature usually falls by about 1 degree per 100 meters. The water vapour pressure depends on meteorological condition and on the saturated water vapour pressure, which, in turn, is a function of the temperature.

Under standard meteorological conditions the refractive index of air decreases with height z , and the typical value of its derivative is $dn/dz = -4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$. The ducting arises under the requirement that the refractive index falls off more rapidly with height so that

$$\frac{dn}{dz} < -\frac{1}{R_e}, \quad (3)$$

where R_e is the Earth's radius. This implies that the rays will follow the curvature of the Earth.

The major cause of radio ducting is the humidity and temperature inversion, which occasionally occurs over water surface during anticyclon conditions. It is usually the case that the ducts do not persist over land and they are a coastal effect. It should be noted that the long-duration pressure inversion does not occur since the winds soon restore the equilibrium. The vast majority of duct-producing inversions are located below 1–2 km (Yonaiguchi et al., 2007a), so that the tropospheric ducting requires low-angle entry of the ray into the duct. The over-horizon signals possibly related to EQs were found to have the elevation angle smaller than 10° (Fukumoto et al., 2001). This fact is in favour of the tropospheric ducting rather than the ionospheric scattering.

Since the tropospheric ducting is mainly due to the behaviour of water vapour pressure, the first term on the right-hand side of Eq. (2) can be neglected.

Thus, substituting Eq. (2) for n into Eq. (1) and taking $R = R_e$ yields

$$\frac{1}{R_e} \approx -\frac{a_2}{T^2} \frac{de}{dz} \sim \frac{a_2 \Delta e}{T^2 \Delta h}, \quad (4)$$

where Δe is the typical value of the vapour pressure variation and Δh denotes the vertical scale of the duct. Combining Eq. (4) with the state equation of perfect gases, we can estimate mass density variation of the water vapour at the boundaries of the duct

$$\Delta \rho = \frac{M \Delta h T}{R_e C a_2}, \quad (5)$$

where C is the universal gas constant and M is the mass of vapour molecule. Substituting $\Delta h = 0.1 - 0.5$ km and $T = 293$ K into Eq. (5) we get a rough estimation $\Delta \rho = (1.3 - 0.3) \times 10^{-2}$ kg/m³. Notice that this value is of the order of the mean vapour density at the ground surface.

It is interesting to note that such abnormal meteorological conditions can be related to the ground temperature variations occasionally observed before seismic events. The near-surface temperature increase of about 1–3 K and the soil moisture variations were recorded prior to a few strong crustal EQs (e.g. Sugisaki et al., 1980; Wang and Zhu, 1984). NOAA/AVHRR satellite thermal images exhibited the abnormal enhancement of the outgoing infrared radiation above seismo-active regions in Central and Middle Asia, China, Japan and European Union mainly along the fault system of the Earth's crust (Gorny et al., 1988; Tronin, 1999; Qiang et al., 1999; Tramutoli et al., 2001; Tronin et al., 2002). The thermal anomalies have been detected several days or weeks before EQ occurrence. The temperature increase of several K continued for a week after the EQ. The thermal anomalies covering the area $\sim 10^4 - 10^5$ km² changed in size before and after the EQ.

The effect is thought to be due to an output of optically active gases such as CO₂, CH₄, and water vapour which results in the local green house effect (Tronin, 1999). An alternative mechanism is assumed to be due to thermal water squeezing out from the higher depths towards the Earth's surface followed by the heating of the ground surface. A convection mechanism of rock warming by groundwater upward filtrating has been considered as a possible reason for stable temperature anomalies generated near the fault interception (Surkov et al., 2006). Note that the convection mechanism of rock warming may be more intensive for the underwater EQ or in the vicinity of coastline because of the fact that the crust thickness is smaller than that on the land.

Now we shall study the possible relation between the abnormal variations in refractive index and the ground surface temperature increase (Hayakawa et al., 2007). The heat exchange between the ground and atmosphere is mainly controlled by the diurnal variations of the solar radiation flux. The heat balance also contains the convective/turbulent heat exchange in the near surface atmospheric layer, the losses due

to water evaporation and the weak geothermal heat transfer (Tronin, 1999).

We now estimate the convective heat transfer, which depends on the temperature difference between the ground and the atmosphere

$$q_e = \gamma (T_a - T_g), \quad (6)$$

where the subscripts a and g refer to atmosphere and ground, and the constant γ varies from day to night as $\gamma = 15 - 25$ W/(m²K) (Gorny et al., 1993). The enhancement of the mean ground temperature by the value ΔT results in an increase of the upward heat transfer by the value $\Delta q_e = \gamma \Delta T$. If the diurnal variations of the heat balance are disregarded, the additional amount of the heat produced for the time interval t can be roughly estimated as $\Delta Q = \gamma \Delta T S t$, where S denotes the area of the temperature anomaly. Assuming for the moment that all the heat is fully converted into the energy, which is necessary to vapour the gravitational groundwater, the maximal mass of water vapour due to evaporation is $\Delta m = \Delta Q / \lambda$, where λ denotes the specific heat of water evaporation at given temperature. The water vapour can drag due to advection of air masses, typically occurring in early evenings in the summer with air from a warm land surface advecting over the cooler sea.

If the water vapour piles up around 1–2 km above the ground, it can produce the high humidity gradients and a temperature inversion forming a radio duct. The net mass of water vapour in the duct is estimated as $\Delta m_d = \Delta \rho \Delta h S_d$, where Δh is the duct thickness, S_d is the duct area, and $\Delta \rho$ is the variation of the vapour density. Assuming that $\Delta m \sim \Delta m_d$ and $S \sim S_d$, and taking into account the above equation for ΔQ , we get

$$\gamma \Delta T t / \lambda \sim \Delta \rho \Delta h, \quad (7)$$

Substituting Eq. (6) for $\Delta \rho$ into Eq. (8) we can estimate the time interval required to produce the vapour mass Δm_d

$$t \sim \frac{\lambda M T \Delta h^2}{a_2 \gamma T C R_e}. \quad (8)$$

We choose the following parameters and $\lambda = 2.45 \times 10^6$ J/kg ($T = 293$ K), $\gamma = 20$ W/(m²K) and $\Delta T = 1 - 3$ K. The numerical values of other parameters are found in this section. Substituting these values into Eq. (8) we obtain that t can vary from 3 h to 9 days. This estimate does not strongly contradict with the assumption that the weak heating of the ground surface for several days or weeks may be a cause of the underground water evaporation which, in turn, is capable of sustaining the generation of radio ducting. This means that, in principle, both the abnormal over-horizon FM signals and the ground temperature anomalies may be associated with EQ preparation process. We finally comment on the effect of EQ magnitude, even though its effect is very significant in the generation of seismo-atmospheric perturbations. This magnitude effect is implicitly included in the parameter S indicating the area of the temperature anomaly.

A crude analysis described above is indicative of a possible relation between abnormal phenomena of the reception of over-horizon VHF signals and EQ preparation stage. One can suppose the following scenario of the phenomena in a seismically active region. A variation of tectonic stress in the vicinity of faults results in the gradual groundwater squeezing out from the higher depths towards the Earth's surface. The warmed groundwater filtrates upwards from the higher depth to the Earth's surface to provide a weak increase in the ground temperature similar to that detected before an EQ (Gorny et al., 1988; Tronin, 1999; Qiang et al., 1999; Tramutoli et al., 2001; Tronin et al., 2002). In addition, there may be an increase in the contents of water vapour, CO₂, CH₄, and other optically active gases, which, in turn, leads to the local greenhouse effect followed by the ground temperature increase (Tronin, 1999). The lead time of abnormal over-horizon VHF signal is about one week (Point (3) in Section 3.3.), seems to be consistent with these satellite results on the ground temperature measurement.

If the favourable meteorological conditions occur in the near-surface layer over seismically active regions, it can produce the air humidity and temperature inversion followed by the abnormal variations of the air refractive index. Such meteorological conditions can persist in the vicinity of a coastal line. This seems to be consistent with Point (4) in Section 3.3. Eventually it can lead to the radio ducting and over-horizon VHF wave propagation (Kushida and Kushida, 1998; Fukumoto et al., 2001; Fujiwara et al., 2004).

3.4. Summary of seismo-atmospheric effects

We have reviewed seismogenic radio emissions in the atmosphere in possible association with EQs, including EQ light, HF/VHF radio emissions, ELF/VLF/MF radio emissions. Generally speaking, it is likely that those radio emissions take place in possible association with EQs, but there are very few attempts of any correlation statistics and also very few attempts to separate those seismogenic emissions from other noises. Therefore, the generation mechanism of these seismogenic emissions is extremely poorly understood or studied at the moment.

On the contrary, the study of seismo-atmosphere perturbations as studied by over-horizon VHF signals has been advanced very much recently, which indicates that the atmosphere is definitely perturbed before an EQ. The statistical study and direction finding studies have been very useful in elucidating the characteristics of seismo-atmospheric perturbations. Also, a generation mechanism has been recently proposed on the basis of the changes in geochemical quantities related with EQs, leading to the generation of radio ducts.

In the framework of this scenario one may also suppose that the increase of humidity and mean temperature in the atmospheric near-surface layer is accompanied by a weak fall-off of the atmospheric breakdown voltage. It is interesting to note in this connection that some strange phenomena such as a sheet lightning/heat-lightning, luminescence of mountain tips and fog regions were occasionally observed prior to

and during strong EQs (Finkelstein and Powell, 1970; Hedervari and Noszticzius, 1985; Derr and Persinger, 1986; Morgunov, 1998). The above assumption is in favour of this fact, although we are not sure whether these intriguing phenomena are really related to EQs. Finally, some aspects we wish to emphasize are summarized as follows:

(1) It seems that seismogenic emissions in a wide frequency from ULF/ELF to VHF are generated in a possible association with EQs, but the presence of those emissions is not established before detailed statistical correlation studies are done.

(2) We have assumed that the tectonic activity in the fault zone could trigger a weak increase of the ground surface temperature, underground water lifting and gas emanation, which, in turn, results in some variation of the humidity in the near surface layer of the atmosphere, followed by the changes of atmospheric refractive index and a possibility of the breakdown voltage.

(3) The appearance of over-horizon VHF signals and the increase of the ground surface temperature in seismo active regions may be resulted from the general origin that is the heating of the ground surface due to gradual groundwater squeezing out from the higher depths towards the Earth's surface or due to weak greenhouse effect.

(4) All the effects treated here seem to be sporadic and case sensitive, since they depend on meteorological conditions, diurnal and seasonal variation of the air humidity, proximity of the coastline, etc. Further experiments are necessary to sort out this interesting problem in seismically active regions in order to elaborate the theoretical consideration presented in this section.

4. VLF/LF RADIO SOUNDING OF IONOSPHERIC PERTURBATIONS ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES

4.1. The use of VLF/LF subionospheric propagation as new methodology

Most of the energy radiated by VLF/LF transmitters is trapped between the ground and the lower ionosphere, forming the Earth-ionosphere waveguide. Subionospheric VLF/LF signals reflect from the D-region of the ionosphere, probably the least studied region of the Earth's atmosphere (Rodger and McCormick, 2006). These altitudes (~ 70-90 km) are too far for balloons and too low for satellites, making in-situ measurements extremely rare. The only possible method of probing this D region is VLF/LF subionospheric radio signals.

Any variations in the ionospheric D/E-region lead to changes in the propagation conditions for VLF waves propagating subionospherically, and hence changes in the observed amplitude and phase of VLF/LF transmissions are due to different kinds of perturbation sources; (1) solar flares, (2) geomagnetic storms (and the corresponding particle precipitation), (3) the direct effect of lightning (e.g., Rodger and McCormick, 2006). In addition to these solar-terrestrial effects we can suggest one more effect of EQs (or seis-

mic activity) onto the lower ionosphere (Hayakawa, 2007).

The first attempt of VLF/LF radio sounding for seismo-ionospheric effects was done by Russian colleagues (Gokhberg et al., 1989; Gufeld et al., 1992), who studied the VLF propagation over a long distance from Reunion (Omega transmitter) to Omsk to detect any effect of an EQ in the Caucasia region. Then, they succeeded in finding out a significant propagation anomaly over the two long-distance paths from Reunion to Moscow and also to Omsk a few days before the famous Spitak EQ (Gufeld et al., 1992).

The most convincing result on the seismo-ionospheric perturbations with VLF sounding was obtained by Hayakawa et al. (1996b) for the famous Kobe EQ in 1995 (with magnitude of 7.3 and with depth of 20 km). Some important peculiarities in their paper are summarized as follows; (1) the propagation distance (from Tsushima Omega to Inubo observatory) is relatively short-path at VLF ($\sim 1,000$ km) as shown in Fig. 4.1(a), as compared with 5,000 ~ 9,000 km used in Russian papers (Gokhberg et al., 1989; Gufeld et al., 1992), and (2) they found that the fluctuation method as used before, was not so effective for the short-propagation path, so that they developed another way of analysis. That is, they paid attention to the times of terminator (morning and evening) and they found significant shifts in the terminator times before the EQ, as shown in Fig. 4.1(b). The morning terminator time (t_m) shifts to early hours, and t_e shifts to later hours. This point was statistically examined by a much longer data-base of ± 4 months, which indicates that the shift in t_e (phase) in Fig. 4.1(b) is found to exceed well above twice the standard deviation (2σ). This means that the daytime felt by subionospheric VLF signals is elongated-

ed for a few days around the EQ, and the theoretical estimation (Hayakawa et al., 1996b; Molchanov et al., 1998; Yamauchi et al., 2007) suggests that the lower ionosphere is lowered before the EQ.

A later extensive study by Molchanov and Hayakawa (1998) was based on the much more events during 13 years (11 events with magnitude greater than 6.0 and within the 1st Fresnel zone) for the same propagation path from the Omega, Tsushima to Inubo, and they came to the following conclusion.

(1) As for shallow (depth smaller than 30 km) EQs, 4 EQs form 5, exhibited the same terminator time anomaly as for the Kobe EQ (as in Fig. 4.1(b)) (with the same 2σ criterion).

(2) When the depth of EQs is in a medium range of 30-100 km, there were observed two events. One event exhibited the same terminator time anomaly, and another indicated a different type of anomaly.

(3) Deep (depth larger than 100 km) EQs (4 events) did not show any anomaly. Two of them had an extremely large magnitude (greater than 7.0), but had no propagation anomaly.

This summary might indicate a relatively high probability of the propagation anomaly (in the form of terminator time anomaly) of the order of 70 ~ 80 % for larger (magnitude greater than 6.0) EQs located relatively close to the great-circle path (e.g., 1st Fresnel zone).

In response to the above-mentioned significant results (especially the result for Kobe EQ), the Japanese government conducted the integrated EQ frontier project, and the former NASDA (National Space Development Agency of Japan) conducted the so-called "EQ Remote Sensing Frontier Project" (for which the author was the principal investigator) during 1997 to

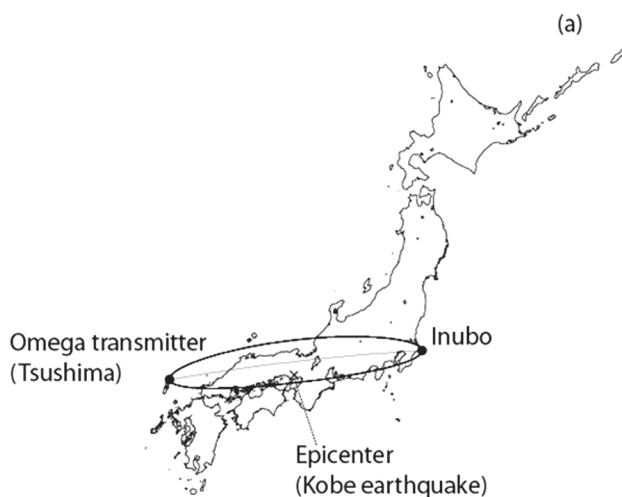


Fig. 4.1 (a). Relative location of the VLF transmitter (Omega, Tsushima), our observatory at Inubo and the EQ epicenter (x). The first Fresnel zone is indicated. (b) The sequential plot of diurnal variation (phase) (nearly the same pattern as for amplitude) and please pay attention to the variation in t_m (morning terminator time) and t_e (evening terminator time). The shaded areas indicate the shift from the monthly mean value

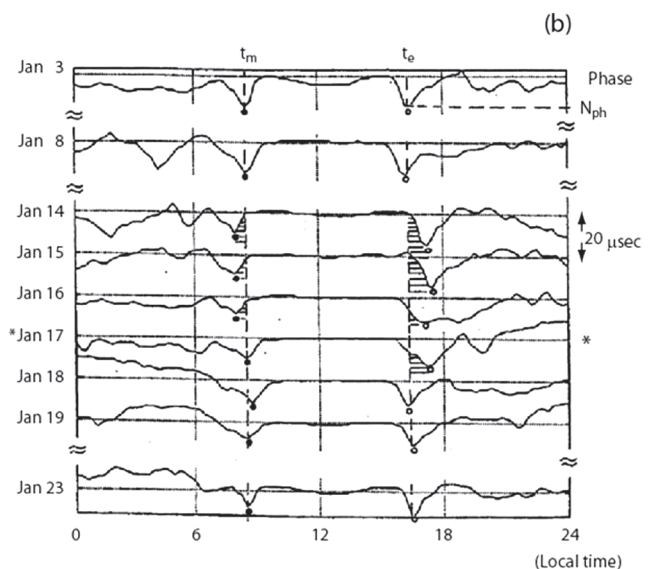


Fig. 4.1 (b). is found to exceed well above twice the standard deviation (2σ). This means that the daytime felt by subionospheric VLF signals is elongated for a few days around the earthquake, and the theoretical estimation (Hayakawa et al., 1996; Molchanov et al., 1998; Yamauchi et al., 2007) suggests that the lower ionosphere is lowered before the earthquake

2001 (five years project) (Hayakawa et al., 2004a, b; Hayakawa, 2004). In this project our greatest attention was paid to the subionospheric VLF/LF propagation aimed at the short-term EQ prediction. Fig. 4.2 is the Japanese VLF/LF network established within the framework of the Frontier Project and is still working. There are seven observing stations (Moshiri (Hokkaido), Chofu (Tokyo), Tateyama (Chiba), Shimizu (Shizuoka), Kasugai (Nagoya), Maizuru (Kyoto) and Kochi), and we observe several transmitters simultaneously at each station, unlike the early VLF receiving system. The VLF/LF transmitters now we observe, are (1) JJY (40 kHz, Fukushima), (2) JJI (22.2 kHz, Ebino, Kyushu), (3) NWC (19.8 kHz, Australia), (4) NPM (21.4 kHz, Hawaii) and (5) NLK (24.8 kHz, America). By using the combination of a number of observing stations and a large number of VLF/LF transmitters received, we will be able to locate the ionospheric perturbation with the accuracy of about 100 km. We make some comments on our system. Our VLF/LF receiver named Japal, is designed to measure very slow and small changes in amplitude and phase. The magnitude of slow phase and amplitude perturbations claimed for EQ precursors are much greater than this, so it should be detectable by our system if they exist.

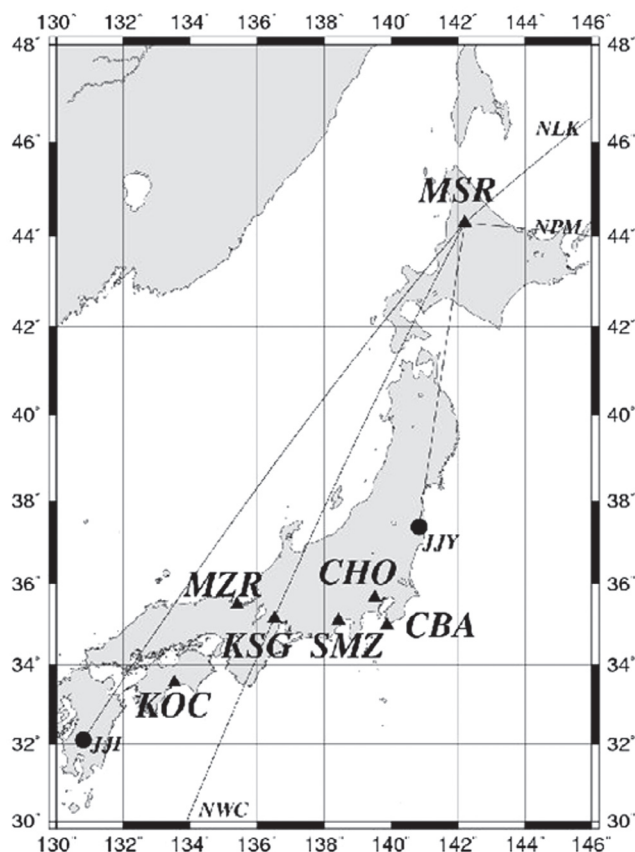


Fig. 4.2. VLF/LF network in Japan. Several observing stations (Moshiri (abbreviated as MSR), Chofu (CHO), Chiba (CBA), Shimizu (SMZ), Kasugai (KSG), Maizuru (MZR), and Kochi (KOC)) and several VLF/LF transmitter signals detected at each station. The situation for one station (MSR) is indicated, and receiving transmitters are JJY, NWC, JJI, NPM and NLK

Our VLF/LF system is deployed in different countries as well in response to their requests. One of our VLF/LF receivers is now working at Kamchatka in Russian with good data (Rozhnoi et al., 2004), and one is set in Taiwan as well. These stations, together with our Japanese dense network, are forming a global Pacific VLF/LF network. Additionally, a few VLF/LF receivers were installed in Europe, and especially one in Italy is working good with significant results (Biagi et al., 2004).

By means of the above-mentioned Japanese VLF/LF network, we have been working on many case studies for large EQs. We can list these EQs; (1) Izu peninsula EQ swarm (with the largest magnitude of 6.3) in March, 1997 (with the data from Tsushima, Omega to Chofu), (2) Tokai (Nagoya) area EQs (with data from NWC (Australia) to Kasugai (Nagoya) (Ohta et al., 2000), (3) Tokachi-oki EQ (25 September, 2003, M8.3) (Shvets et al., 2004a; Cervone et al., 2006), (4) Niigata-chuetsu EQ (23 October, 2004, M6.8) (Hayakawa et al., 2006; Yamauchi et al., 2007). Especially, in the case of Niigata EQ, we have made full use of our VLF/LF network observation (Yamauchi et al., 2007). That is, a comparison of the data on different propagation paths as a combination of several observing stations and several VLF/LF transmitter signals received, has enabled us to locate the ionospheric perturbation and to deduce their spatial scale. Also, their temporal dynamics have been inferred, together with the theoretical full-wave computations.

The terminator time method we developed, for the first time, for the case of Kobe EQ, has been used so far as a standard analysis method of VLF/LF records. In addition to this terminator time method, there is another method of VLF/LF data analysis, which is called, "nighttime fluctuation method" and which is a further improvement of the previous Russian papers.

4.2. Recent VLF/LF results

Here we present a few of our latest results by using our VLF/LF radio sounding. First, we present a result on the statistical correlation of ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF radio sounding with the EQs. Then, we present a case study as detected in Japan for the huge Indonesia Sumatra EQ.

(a) Statistical study on the correlation between ionospheric perturbations and EQs

In addition to the event studies it is highly required to undertake any statistical study on the correlation between ionospheric disturbances and EQs based on abundant data source. There have been very few reports on the statistical correlation between the ionospheric perturbations and EQs (Shvets et al., 2002, 2004b; Rozhnoi et al., 2004). Shvets et al. (2004b) have examined a very short-period (March-August, 1997) data for two paths (one is the Tsushima-Chofu and another, NWC (Australia)-Chofu) and found that wave-like anomalies in VLF Omega signal with periods of a few hours (as indicative of the importance of atmospheric gravity wave as suggested by Molchanov et al. (2001) and Miyaki et al. (2002)) were observed 1-3 days before or on the day of moderately strong EQs with magnitudes

5-6.1. Then, Rozhnoi et al. (2004) have extensively studied 2 years data of the subionospheric LF signal along the path Japan (call sign, JJY)-Kamchatka (distance = 2,300 km), and have found from the statistical study that the LF signal effect is observed only for EQs with magnitude, at least, greater than 5.5.

The following is a summary of our latest paper (Maekawa et al., 2006) devoted to such a statistical study on the correlation between ionospheric disturbances and seismic activity. A few important distinction from the previous works by Shvets et al. (2002, 2004b) and Rozhnoi et al. (2004) are described. The first point is the use of much longer period of VLF/LF data (five years long). The second point is that we pay attention to physical parameters of VLF/LF propagation data; (1) amplitude (or trend) and (2) dispersion (in amplitude) (or fluctuation). In the previous work by Rozhnoi et al. (2004) they have studied the percentage occurrence of anomalous days, in which an anomalous day is defined as one day during which the difference of amplitude (and/or phase) from the monthly average exceeds one standard deviation (σ).

Here we pay particular attention to the EQs occurring in and around Japan, so that we take a wave path from the Japanese LF transmitter, JJY (40 kHz) (geographic coordinates; 36°18' N, 139°85' E) and a receiving station of Kochi (33°33' N, 133°32' E). Fig. 4.3 illustrates the relative location of the LF transmitter, JJY and our receiving station, Kochi, and the distance between the transmitter and receiver is 770 km.

The subionospheric LF data for this propagation path is taken over 6 years from June 1999 to June 2005, but we excluded one year of 2004 (January to December, 2004) because of the following reason. As you may know, there was an extremely large EQ named 2004 Mid Niigata prefecture EQ happened on October 23, with magnitude = 6.8 and depth = 10 km (Hayakawa et al., 2006), and the effect of the main shock and also large aftershocks was so large and so frequent that it may disturb our following statistical result so much. Then we have excluded this year of 2004 from our analysis. We have to define the criterion of choosing the EQs. The sensitive area for the wave path, JJY transmitter to the Kochi receiving station is defined as follows. As shown in Fig. 4.3, first we adopt the circles with radius of 200 km just around the transmitter and receiver, and then the sensitive area is defined by connecting the outer edges of these two circles. All of the 92 EQs with magnitude (conventional magnitude (M) by Japan Meteorological Agency) greater than 5.0 are plotted in Fig. 4.3, but the EQ depth is chosen to be smaller than 100 km (with taking into account our previous result that shallow EQs can have an effect onto the ionosphere by Molchanov and Hayakawa (1998)). We have normally been using the fifth Fresnel zone as the VLF/LF sensitive area (Molchanov and Hayakawa, 1998; Rozhnoi et al., 2004), but we have found that the area just around the transmitter and receiver is also sensitive to VLF perturbation (e.g. Ohta et al., 2000) with taking into account the possible size of the seismo-ionospheric perturbation. In this sense

the sensitive area we choose here seems to be very reasonable because the width of the sensitive area is very close to the 10th Fresnel zone.

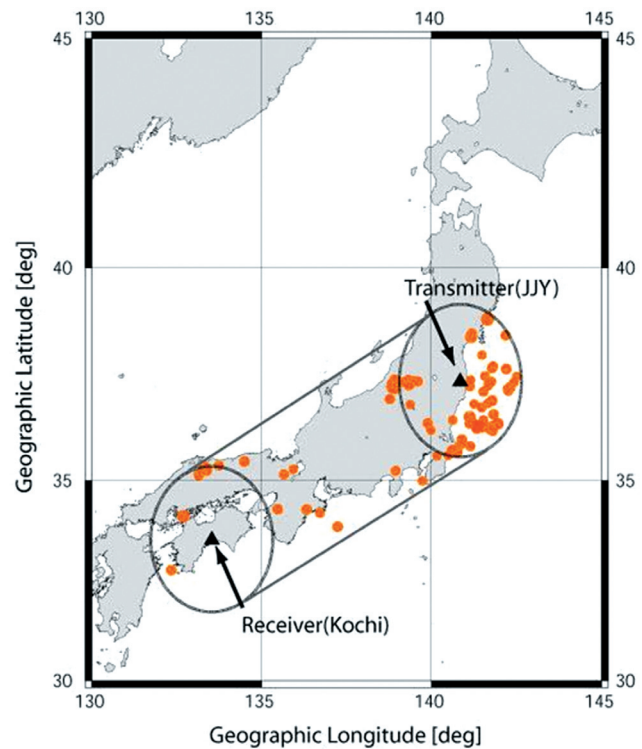


Fig. 4.3. Relative location of the LF transmitter, JJY in Fukushima and an observing station, Kochi. The sensitive area for this LF propagation path is also indicated; the circles with radius of 200km around the transmitter and receiver and by connecting the outer edges of these two circles. Also 92 EQs with conventional magnitude (M) greater than 5.0 are plotted, which took place within the sensitive area

In the following statistical analysis, we undertake the so-called superimposed epoch analysis in order to increase the S/N ratio. Here we define the EQ magnitude in the following different way. Because we treat the data in the unit of one (a) day (we use U. T. (rather than L. T.) to count a day because we stay on the same day even when we pass the midnight when we use U.T.), we first estimate the total energy released from several EQs with different magnitudes in one day within the sensitive area for the LF wave path as shown in Fig. 4.3 by integrating the energy released by a few EQs (down to the conventional magnitude $M = 2.0$) and by converting this into an effective magnitude (M_{eff}) for this particular day. This M_{eff} is much more important than the conventional magnitude for each EQ, because the LF propagation anomaly on one day is the effect integrated over several EQs taking place within the sensitive area on that day. Though not shown as a graph, we find that there are 19 days with M_{eff} greater than 5.5.

Diurnal variations of the amplitude and phase of subionospheric VLF/LF signal are known to change significantly from month to month and from day to day. Therefore, following our previous works (Shvets et al., 2002, 2004a, b; Rozhnoi et al., 2004; Hayakawa et al., 2006; Horie et al., 2007a), we use, for our analy-

sis, a residual signal of amplitude dA as the difference between the observed signal intensity (amplitude) and the average of several days preceding or following the current day:

$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle$$

where $A(t)$ is the amplitude at a time t for a current day and $\langle A(t) \rangle$ is the corresponding average at the same time t for ± 15 days (15 days before, 15 days after the EQ and EQ day). In the paper by Rozhnoi et al. (2004), they have defined an anomalous day when $dA(t)$ exceeds the corresponding standard deviation. In our analysis we have studied the nighttime variation (in the U.T. range from U.T. = 10 h to 20 h) (or L.T. 19 h to 05 h). Then, we use two physical parameters: average amplitude (we call it “amplitude”) (or trend) and amplitude dispersion (we call it “dispersion”) (or fluctuation)). We estimate the average amplitude for each day (in terms of U.T.) by using the observed $dA(t)$ and one value for dispersion (fluctuation) for each day.

Then, we are ready to undertake a superimposed epoch analysis. For the study on the correlation between ionospheric perturbations in terms of two parameters (amplitude and dispersion) and seismicity, we choose two characteristics periods; seismically active periods with M_{eff} greater than 5.5 and greater than 6.0. The number of events with $M_{\text{eff}} \geq 5.5$ is 19, and that with $M_{\text{eff}} \geq 6.0$ is 4.

We finally undertake the statistical test. When we perform the Fisher's z -transformation to the data amplitude and dispersion, respectively, the z value is known to follow approximately the normal distribution of $N(0, 1)$ with zero average and dispersion of unity. Figs. 4.4(a) and 4.4(b) represent the corresponding statistical z -test result. The 2σ (σ : standard deviation over the whole period of five years) line is indicated as the statistical criterion. First of all, we look at the amplitude (trend) result in Fig. 4.4(a). It is clear that the blue line for the M_{eff} greater than 6.0 exceeds the 2σ line (about 3 dB decrease) a few days before the EQ. This suggests that the ionospheric perturbation in terms of amplitude (trend) shows a statistically significant precursory behavior (3 to 5 days before the EQ). Next we go to Fig. 4.4(b) for the dispersion. The enhancement of dispersion (fluctuation) is clearly visible for extremely high seismic activity ($M_{\text{eff}} \geq 6.0$). That is, the dispersion is found to exceed the 2σ line 6–2 days before the EQ day. When the M_{eff} becomes a little smaller ($M_{\text{eff}} \geq 5.5$) the effect of EQs is found to be present, but it is not so significant as compared with the case for $M_{\text{eff}} \geq 6.0$. Finally, we comment on the corresponding result for $M \geq 5.0$ (further below $M_{\text{eff}} = 5.5$ by 0.5). We have found that the variations in amplitude and dispersion, are well inside the $\pm 2\sigma$ line for $M_{\text{eff}} \geq 5.0$, and together with our previous findings, we say that the seismic effect can only be seen definitely for $M_{\text{eff}} \geq 6.0$.

We compare our present statistical result with previous ones (Shvets et al., 2002; Rozhnoi et al., 2004). Rozhnoi et al. (2004) have studied the percentage occurrence of anomalous days for different con-

ventional EQ magnitudes. After examining different effects (solar flares, geomagnetic storms etc.), they have succeeded in detecting the seismic effect in subionospheric VLF/LF propagation only when the EQ magnitude exceeds 5.5. In our analysis, we do not pay attention to the percentage occurrence of anomalous days as studied by Rozhnoi et al. (2004), but we pay attention to two physical parameters of subionospheric LF propagation ((1) amplitude (trend) and (2) dispersion (or fluctuation)). Our result seems to have confirmed and supported our previous result by Rozhnoi et al. (2004) by using the much longer-period data. The present statistical study has given strong validation to the use of nighttime fluctuation method in finding out seismo-ionospheric perturbations (Hayakawa et al., 2006; Horie et al., 2007a)

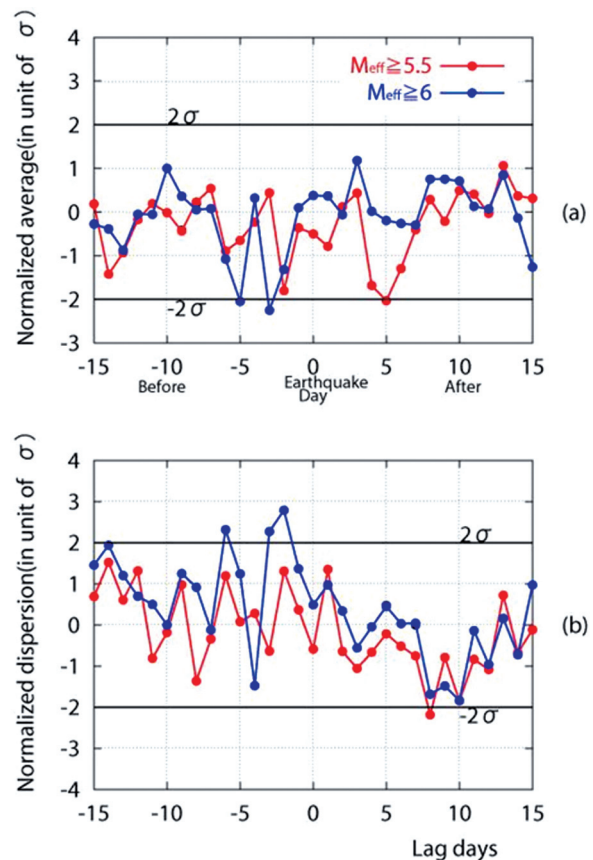


Fig. 4.4. Statistical test result for the amplitude (a) and dispersion (b). The day on the abscissa is defined as follows: day zero indicates the day of the EQ, and minus (plus) means that the phenomenon takes place before (after) the EQ. The important 2σ (σ : standard deviation) lines are plotted for the statistical test

(b) Case study of Sumatra EQ in December, 2004 (Ground-based VLF reception in Japan and satellite observation of VLF signals)

This section is concerned with a recent case study for the Sumatra EQ by means of the VLF data on the propagation between the NWC VLF transmitter (Australia) (21.82°S , 114.15°E) to Japan. Because this EQ is extremely huge, it is worthwhile to study whether this EQ has a certain effect on the lower ionosphere. If the effect exists, we would like to study the characteristics and dynamics of those perturbations.

A huge EQ happened to take place in the west coast of the Sumatra islands on 26 December, 2004. The magnitude of this EQ is 9.3 and the focal depth is 30 km. The epicenter is located at the geographic coordinates (3.31 °N, 95.95 °E). As shown in Fig. 4.5, the epicenter of this EQ is located as a large circle (12/26), which is found to be far away (about 2,000 km) from the great-circle paths from the NWC VLF transmitter (also shown in Fig. 4.5) and three Japanese receiving points (Chiba (abbreviated as CBA), Chofu (CHO) and Kochi (KOC)). The details of this VLF/LF network in Japan are given in Hayakawa et al. (2004a, b).

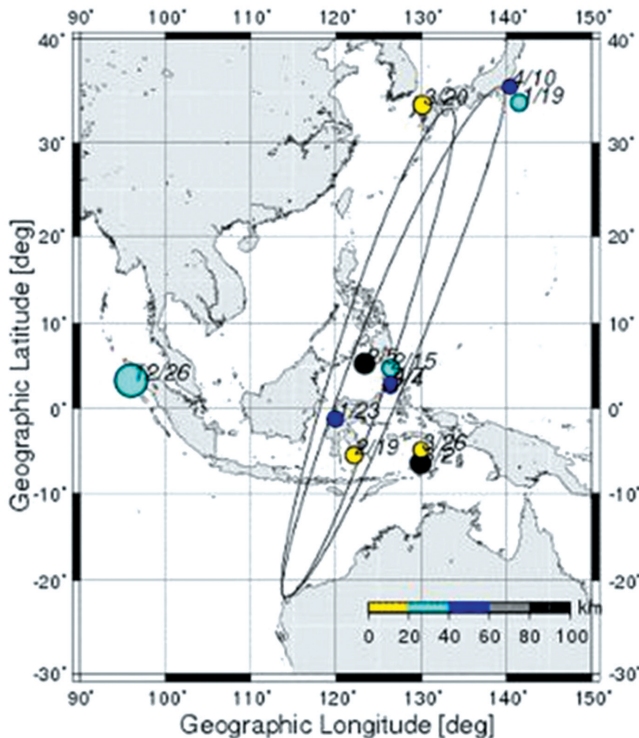


Fig. 4.5. Propagation paths from the transmitter, NWC (in Australia) to the two receiving sites (Kochi and Chofu).

The fifth Fresnel zone for each propagation path is indicated. The EQs with magnitude greater than 6.0 within and just close to the VLF sensitive zone during the years of 2004 and 2005 are all indicated. The center of each circle corresponds to the EQ epicenter, and the size of the circle indicates the EQ magnitude. The color of EQs during the period of November, 2004 to May, 2005 indicates the EQ depth. The date of the EQ is indicated beside the circle (i.e. 4/10 means April 10). The Sumatra EQ is far away from the great-circle paths, but it is indicated (12/26)

We pay particular attention to the period around the Sumatra EQ; that is, the period from the middle of November, 2004 to May, 2005. In Fig. 4.5 we have plotted only two propagation paths (two of fifth Fresnel zones for the NWC to Kochi and for the NWC to Chiba). During the period from the middle November, 2004 to May, 2005, we have indicated the epicenters of the EQs with magnitude greater than 6.0 and close to our propagation paths. The center of each circle indicates the EQ epicenter, and its size is proportional to the magnitude. The color of the circle indicates the depth with the step of 20 km.

As already explained above, there have been proposed two methods of analysis to find the precursory effect in VLF/LF data; (1) Terminator time method (Hayakawa et al., 1996b; Molchanov and Hayakawa, 1998), and (2) Nighttime fluctuation analysis (Shvets et al., 2004a, b; Roznoi et al., 2004; Maekawa et al., 2006). As shown in Fig. 4.5, the propagation path is approximately in the N-S meridian plane, so that the terminator time method is not so effective for this path. Because the terminator time method is effective mainly for the E-W propagation direction (Maekawa and Hayakawa, 2006). Hence, we have adopted the fluctuation analysis. Fig. 4.6 is the sequential plot of nighttime amplitude of NWC signal observed at the three observing sites (Chiba (CBA), Chofu (CHO), and Kochi (KOC)). It is easy to understand qualitatively that there is an increased fluctuation in the nighttime amplitude at all the stations. Then, we will estimate this nighttime fluctuation quantitatively. We use the nighttime L.T. time interval for six hours (L.T. = 21 h to 03 h), and we estimate the difference $dA(t)$ ($\equiv A(t) - \langle A(t) \rangle$) where $A(t)$ is the VLF amplitude at the time t and $\langle A(t) \rangle$ is the average value over ± 15 days (one month) at the same time t . Finally, we integrate dA^2 over the relevant nighttime six hours, and we have one data for each day.

As is shown in Maekawa et al. (2006), we have shown the analysis result during the two years of 2004 and 2005. This long-term analysis was used to infer that the VLF nighttime fluctuation seems to be depleted during seismically quiet periods.

The fifth Fresnel zone shown in Fig. 4.5 is already found to be useful and effective as the VLF sensitive zone for EQs with magnitude 6.0-7.0 (Hayakawa et al., 1996b; Molchanov and Hayakawa, 1998), when we think of the possible size of the seismo-ionospheric perturbations. This Sumatra EQ is extremely huge ($M = 9.3$), so that we expect an extremely large area of ionospheric perturbations for this EQ. By simply using either the formula on the preparation zone size by Dobrovolsky et al. (1979) or the empirical formula on the size of ionospheric perturbations by Ruzhin and Depueva (1996), the radius of preparation zone or possible ionospheric perturbation is estimated to be of the order of 7,000-8,000 km. The empirical formula by Ruzhin and Depueva (1996) is mainly based on the events mainly up to $M = 7.0$ or so, so that it is questionable for us to use this formula even up to $M = 9.3$. Even though, it may be reasonable to anticipate that the VLF propagation path from the transmitter, NWC to Japanese VLF sites is definitely influenced very much, or perturbed because the distance of the epicenter from the great-circle path is only 2,000 km.

As is already shown in Horie et al. (2007a), the geomagnetic activity just around the Sumatra EQ (e.g. $\pm$ one month around the EQ) is found to be relatively quiet except just after the middle of January, 2005 when the ΣKp exceeds 40 (disturbed). For example, in December, 2004, we have found relatively quiet geomagnetic activity. We look at the VLF fluctuations just before the Sumatra EQ. It is very fortunate that

we find a very prolonged seismically quiet period before the Sumatra EQ. Fig. 4.7 is the extended figure for the limited time period just around the EQ time. But, you see now the temporal evolutions of the nighttime fluctuation (the same integrated dA^2 over the night) at three stations (Chiba in black, Chofu in blue and Kochi in pink), together with the corresponding running value of m (mean) $+2\sigma$ (standard deviation) over ± 15 days (with the same color). We notice one sharp peak on 8 December, 2004 and a prolonged maximum during the period of December 21, 2004 to January 2, 2005. In the case of the fluctuation enhancement on 8 December, 2004, we notice a significant enhancement at Chiba (in black) exceeding $(m + 2\sigma)$ line. However, the fluctuation at Chofu (in blue) is not found to exceed the $(m + 2\sigma)$ line (given in the figure in pink) and

also there is no enhancement at all at Kochi (in red). Taking into account these facts, we may conclude that the amplitude fluctuation is taking place significantly only at Chiba, which means that this enhancement on 8 December, 2004 might be the effect only for the NWC-Chiba path. Next we discuss the prolonged period of amplitude fluctuation during the period of December 21, 2004 to January 2, 2005. During this period we notice the simultaneous enhancement in fluctuations at the three observing sites (Chofu (in blue), Chiba (in black) and Kochi (in red)), which means that this prolonged fluctuation is global, and the NWC-Japan propagation path is strongly disturbed. The fluctuation at Chofu (in blue) is found to exceed significantly the $(m + 2\sigma)$ line at Chofu a few days before the EQ. Also, we recognize the similar and significant enhancement

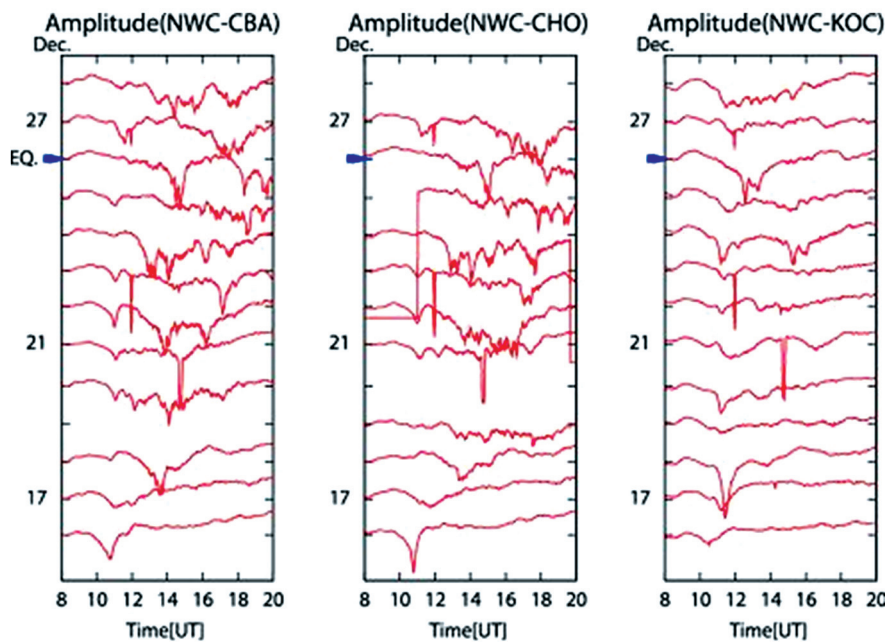


Fig. 4.6. Sequential plot of nighttime amplitude data of the NWC signal as observed at three Japanese observing stations (from left to right: CBA, CHO and KOC). Date goes from the bottom to the top, and the EQ date is given by EQ. Time is given in UT, so that the Japanese local time (LT) is given by UT + 9 h

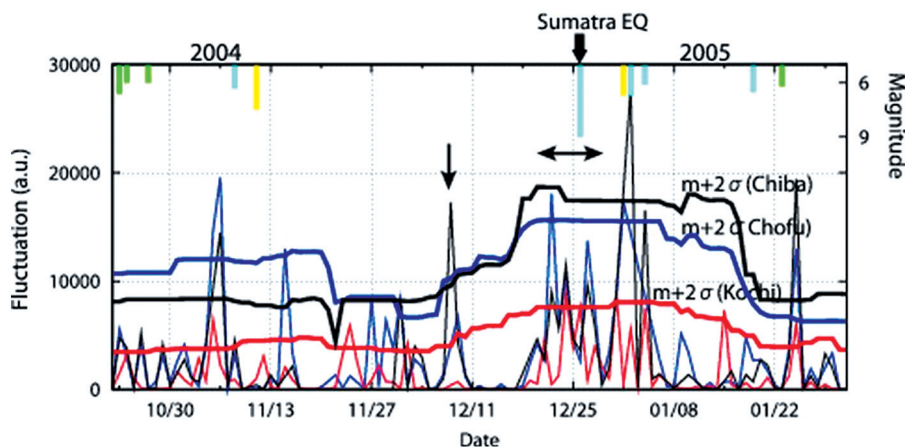


Fig. 4.7. Temporal evolution of VLF amplitude nighttime fluctuation (dA^2) at the three observing stations (Chofu (Blue), Chiba (Black), and Kochi (Red)). The red line indicates $(m$ (mean) $+2\sigma$ (σ : standard deviation)) at Chofu, and the corresponding lines refer to Chiba and Kochi. The EQ with magnitude greater than 6.0 is plotted downward, and the EQs during the restricted period of November, 2004 to May, 2005 are characterized by different colors (color indicates the depth)

in Chiba and also in Kochi. You can notice the excess of the nighttime fluctuation over the corresponding ($m + 2\sigma$) line both at Chofu and Kochi. Even after the main shock ($M = 9$) on 26 December, 2004, there occurred several aftershocks on 1 ~ 4 January, 2005 with magnitudes in a range from 6.1 to 6.7. In correspondence with this high seismic activity, there have been observed the prolonged VLF fluctuation during the period of 21 December, 2004 to 2 January, 2005.

When we look at the temporal evolutions in Fig. 4.6, we can easily identify clear wave-like structures in the data. Our visual inspection could give us an idea that there exist clear wave-like structures, for example, on 16, 24 and 26 December, 2004. These structures are quantitatively investigated by means of the wavelet and cross-correlation analyses. It is expected that these fine structures with wave-like properties could provide us with the information on how the ionosphere is perturbed in association with EQs.

We perform the wavelet analysis with a mother wavelet of the complex Morlet (Daubechies, 1990) to the difference $dA(t)$ (Shvets et al., 2004a, b; Rozhnoi et al., 2004; Maekawa et al., 2006), and compute the spectral intensity of the VLF fluctuation dA . Next we quantitatively estimate the time delay between these 2 stations by using the cross-correlation method.

Fig. 4.8 is the summary of the cross-correlation analysis on the time delay of the Chiba data with respect to Kochi on the basis of superimposed epoch analysis. The left panel in Fig. 4.8 corresponds to the period of 16 December to 26 December, 2004 (that is, 11 days) before the EQ. While, the right panel is the corresponding result for the period after the EQ (2 May to 12 May, 2005) (i.e. quite period). An important point is that the fluctuations in amplitude ($dA(t)$) is very enhanced in the period of 20-100 minutes before the EQ. This epoch analysis in the left panel indicates the clear presence of time delay or wave-like structure before the EQ. The period of fluctuation is confirmed to range from 20-30 minutes to above 100 minutes, and the time delay at the Chiba is around 2

hours with respect to Kochi. There is no significant frequency dependence (dispersion) in the time delay. The right panel of Fig. 4.8 shows no such wave-like structures at all after the EQ. So that, the presence of such wave-like structures is likely to be a precursory signature of this EQ.

Before the EQ, we could notice an enhancement in the fluctuation spectra in the frequency range from 20-30 minutes to about 100 minutes. This period corresponds to that of atmospheric gravity wave (AGW) (30 to 180 minutes) (Grossard and Hooke, 1975; Hooke, 1977) and this AGW is considered to be a possible and promising candidate for the lithosphere-ionosphere coupling (Molchanov et al., 2001; Miyaki et al., 2002; Shvets et al., 2004a, b). The wavelet at Chiba is delayed by about 2 hours with respect to that at Kochi, which is indicative of its propagating nature from the epicenter toward outsides. On the assumption that the wave is propagating radially from the epicenter, we can estimate the propagation distance between the NWC-KOC and NWC-CBA to be ~ 150 km. So that we can estimate the wave propagation velocity of our wave-like fluctuation to be about 20 m/s. This value seems to be in good agreement with the theoretical estimation of AGWs (Kichengast, 1996; Hooke, 1968). The experimental evidence on the wave like fluctuations as a precursor to this Sumatra EQ might be considered to be an evidence of the important role of AGW in the lithosphere-ionosphere coupling. Further details have appeared in Horie et al. (2007b).

The same NWC signals have been detected on board the French satellite, DEMETER, which has indicated that the signal to noise ratio (the ratio of the VLF signal to the background noise) is found to be significantly depressed during one month before the EQ, and that the diameter of the ionospheric perturbation as seen on the satellite is about 5,000 km (Molchanov et al., 2006). This satellite finding on the presence of the ionospheric perturbation in association with the Sumatra EQ and its spatial scale are found to be a further support to our ground-based VLF finding.

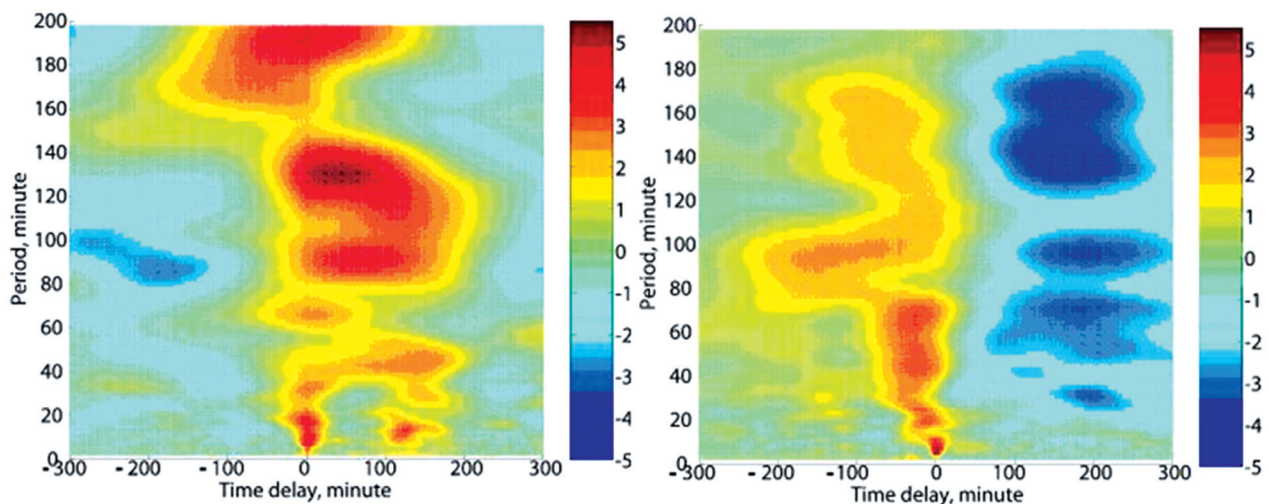


Fig. 4.8. The superimposed epoch analysis for the cross-correlation of fluctuation at the two stations of Chiba and Kochi. The left panel refers to the period before the EQ (December 16 to December 26, 2004), while the right, a quiet period after the EQ (May 2 to May 12, 2005). The time delay at CBA on the abscissa is defined with respect to KOC (the delay of +2 hours in the left panel at CBA, means that the wave structure arrives at CBA 2 hours later with respect to KOC)

4.4. Lithosphere-ionosphere coupling mechanism

Even though it seems highly likely that the ionosphere is disturbed before an EQ, it is poorly understood how the ionosphere is perturbed by the precursory seismic activity in the lithosphere. Hayakawa et al. (2004a, b) have already proposed a few possible hypotheses on the mechanism of coupling between the lithospheric activity and ionosphere; (1) chemical (+electric field) channel, (2) acoustic and gravity wave channel, and (3) electromagnetic channel. As for the first channel, the geochemical quantities (such as surface temperature, radon emanation etc.) induce the perturbation in the conductivity of the atmosphere, then leading to the ionospheric modification through the atmospheric electric field (e.g., Pulnits and Boyarchuk, 2004; Sorokin et al., 2006). The second channel is based on the key role of atmospheric oscillations in the lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, and the perturbation in the Earth's surface (such as temperature, pressure) in a seismo-active region excites the atmospheric oscillations traveling up to the ionosphere (Molchanov et al., 2001; Miyaki et al., 2002; Shvets et al., 2004a, b). The last mechanism is that the radio emissions (in any frequency range) generated in the lithosphere propagate up to the ionosphere, and modify the ionosphere by heating and/or ionization. But this mechanism is found to be insufficient because of the weak intensity of lithospheric radio emissions (Molchanov et al., 1995). So, the 1st and 2nd mechanisms are likely candidates for this coupling (Molchanov and Hayakawa, 2008).

Our latest finding mentioned in the previous section is thought to provide evidence on the important role of AGWs in the lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling. The observational evidence is, however, not much, so that we need to accumulate more facts on the generation mechanism. We can say the same thing for the 1st mechanism of chemical channel, and the subject, itself, is extremely interesting and challenging.

4.5. Concluding remarks

The most promising candidate for this short-term EQ prediction is recently recognized to be the monitoring of the ionosphere. We have proposed the VLF/LF radio sounding for seismo-ionospheric perturbations, and in this section we have presented a lot of convincing evidence on the presence of ionospheric perturbations associated with EQs on the basis of statistical and case studies. The most important point at the moment is the accumulation of convincing results as many as possible, which is being realized by this VLF/LF radio sounding with the characteristic nature of an integration observation.

We are sure about the presence of ionospheric perturbations associated with EQs, but more coordinated observations are highly required in order to elucidate the mechanism of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as the final goal of seismo-electromagnetic studies. For example, we choose a test site where we carry out a highly coordinated measurement; different kinds of observations including sur-

face monitoring, lithospheric radio emissions (e.g., ULF emissions), atmospheric effect (such as studied by over-horizon VHF signals) and ionospheric effect (as studied by subionospheric VLF/LF waves in this section).

5. FINAL CONCLUSION

As dedicated to Prof. Shifrin, we have presented a review of "Seismo Electromagnetics" as a new frontier field of Radio Science. This field of Seismo Electromagnetics is defined by the studies of electromagnetic phenomena and effects associated with EQs for the sake of short-term EQ prediction. This review consisted of the description of some history and our latest result on a few topical subjects of Seismo Electromagnetics including ULF emission in the lithosphere, seismo-atmospheric perturbation, seismo-ionospheric perturbations, lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, etc. This new science field is very interesting, attractive and challenging not only from the scientific point of view, but also is of potential importance as a promising candidate for short-term EQ prediction to mitigate EQ disaster in the countries with high seismic activity like Japan.

We would like to mention here that the former mechanical (seismic) measurements provide seismologists with the macroscopic information of an EQ in the lithosphere just after its occurrence, which would be useful for studying the EQ mechanism. But they seem to be useless for short-term EQ prediction. While, our electromagnetic (non-seismic) effects are likely to be associated with microscopic effects of the lithosphere, and they appear mainly prior to an EQ. Also, those electromagnetic efforts can propagate over considerable distance in the lithosphere, though, of course, it depends on wave frequency. These two properties of precursory occurrence and long-distance propagation of electromagnetic efforts are decisively superior to the conventional seismic measurement.

As is mentioned in this review, you understand that we are far from the practical EQ prediction, though there have been accumulated a rather considerable number of evidences. Depending on the type of physical parameters (local or integrated measurements), the number of reliable events is different. That is, the number of ULF events is still very small, so that we need to increase the number of reliable events as much as possible for the statistical correlation with EQs. On the other hand, the number of events of seismo-atmospheric and -ionospheric perturbations is already sufficient for statistical correlations with EQs. So that, we have to explore the mechanism of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as the final goal of Seismo Electromagnetics. For this purpose, any coordinated measurements collecting different parameters reflecting the lithospheric information (i.e., ULF emissions, acoustic emissions, etc.), atmospheric information (ELF/VLF and VHF emissions, atmospheric perturbations by VHF signals etc.) and ionospheric information (D region monitoring by VLF/LF signals, ionosonde observations (f_oF_2), TEC

observation, satellite observation etc.), would be highly required in near future.

Finally we would like to ask the readers to understand that our Seismo Electromagnetics is of non-seismic nature, so that it has nearly nothing to do with seismology. Though we know that the initial agent of our Seismo Electromagnetics is at any rate due to the mechanical effect (not macroscopic, but microscopic) in the lithosphere, the main science fields are Electromagnetics, Radiophysics and Engineering, Geophysics, Atmospheric Electricity, Atmospheric Physics and Chemistry, Plasma Physics, Upper Atmospheric Physics, Signal Processing etc. with seismology and geology just providing us with the fundamental information on the lithosphere.

ACKNOWLEDGEMENTS

The results presented in this paper are based on the extensive collaborations with domestic and overseas scientists, to whom the author is grateful for their collaboration. I list the main institutions for our collaboration; Chubu University, Chiba University, Tokai University, Communications Research Laboratory (now NICT) from Japan, Institute of the Earth (Russia), IZMIRAN St. Petersburg Branch (Russia), Institute of Radiophysics and Electronics, Kharikov (Ukraine), LPCE (Orleans, France), University of Bari (Italy) from abroad.

References and Notes

- [1]. Biagi, P. F., Piccolo, R., Castellana, L., Maggipinto, T., Ermini, A., artellucci, S., ellecci, C., Perna, G., Capozzi, V., Molchanov, O. A., Hayakawa, M., and Ohta, K. VLF-LF radio signals collected at Bari (South Italy): a preliminary analysis on signal anomalies associated with earthquakes. *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.4, 685-689, 2004.
- [2]. Cervone, G., Maekawa, S., Singh, R. P., Hayakawa, M., Kafatos, M., and Shvets, A. Surface latent heat flux and nighttime LF anomalies prior to the $M_w = 8.3$ Tokachi-Oki earthquake. *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.6, 109-114, 2006.
- [3]. Daubechies, I., The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 36, 961-1004, 1990.
- [4]. Derr, J. S., and Persinger, M. A., Luminous phenomena and earthquakes in southern Washington., *Experientia*, vol.42, 991-999, 1986.
- [5]. Dobrovolsky, I. R., Zubkov, S. I., and Myachkin, V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 117, 1025-1044, 1979.
- [6]. Fenoglio, M. A., Johnston, M. J. S., Byerlee, J. D., Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions. *J. Geophys. Res.*, vol. 100, 12951-12958, 1995.
- [7]. Finkelstein, D., and Powell, J., Earthquake lightning. *Nature*, vol. 228 (5273), 759-760, 1970.
- [8]. Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A., and Villard Jr., O. G., Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake; *Geophys. Res. Lett.*, vol.17, 1465-1468, 1990.
- [9]. Fujiwara, H., Kamogawa, M., Ikeda, M., Liu, J. Y., Sakata, H., Chen, Y. I., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y. J., and Ohtsuki, Y. H., Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, vol.31, L17110, 2004.
- [10]. Fukumoto, Y., Hayakawa, M., and Yasuda, H., Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.1, 107-112, 2001.
- [11]. Gokhberg, M. B., Gufeld, I. L., Rozhnoy, A. A., Marenko, V. F., Yampolsky, V. S., and Ponomarev, E. A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide. *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol.57, 64-67, 1989.
- [12]. Gorny, V. I., Salman, A. G., Tronin, A. A., and Shilin, B. B., The Earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity, *Proceedings of Academy of Sciences of the USSR*, vol. 301, 67-69, 1988.
- [13]. Gorny, V. I., Shilin, B. B., and Yasinsky, G. I., *Thermal Aerospace Survey*, Nedra, Moscow (in Russian), 1993.
- [14]. Gotoh, K., Akinaga, Y., Hayakawa, M., Hattori, K., Principal component analysis of ULF geomagnetic data for Izu islands earthquakes in July 2000, *J. Atmos. Electr.*, vol. 22, 1-12, 2002.
- [15]. Grossard, E. E., and Hooke, W. H., *Waves in the Atmosphere (Atmospheric Infrasond and Gravity Wave – Their Generation and Propagation)*, Elsevier Sci. Pub. Co.: Amsterdam, 1975.
- [16]. Gufeld, I. L., Rozhnoi, A. A., Tyumensev, S. N., Sherstuk, S. V., Yampolsky, V. S., Radiowave disturbances in period to Rudber and Rachinsk earthquakes, *Phys. Solid Earth*, vol. 28, 267-270, 1992..
- [17]. Hall, M. P. M., Barclay, L. W., and Hewitt, M. T. (Eds.), *Propagation of Radio Waves*, IEE, London. 1996.
- [18]. Hattori, K., ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, vol. 15, 329-360, 2004.
- [19]. Hattori, K., Takahashi, I., Yoshino, C., Isezaki, N., Iwasaki, H., Harada, M., Korepanov, K., Molchanov, O., Hayakawa, M., Noda, Y., Nagao, T., and Uyeda, S., ULF geomagnetic field measurements in Japan and some recent results associated with Iwateken Nairiku Hokubu earthquakes in 1998, *Phys. Chem. Earth*, vol.29, issues 4-9, 481-494, 2004.
- [20]. Hattori, K., Akinaga, Y., Hayakawa, M., Yumoto, K., Nagao, T., Uyeda, S., ULF magnetic anomaly preceding the 1997 Kagoshima earthquakes, In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*; Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Eds.; TERRAPUB, Tokyo, 19-28, 2002.
- [21]. Hayakawa, M. (Editor), *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, Terra Scientific Pub. Comp., Tokyo, 996p, 1999.
- [22]. Hayakawa, M., Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: A frontier in terrestrial electromagnetic noise environment, *Recent Res. Devel. Geophysics*, vol. 6, 81-112, 2004.
- [23]. Hayakawa, M. Measuring techniques of electromagnetic phenomena associated with earthquakes and latest results. *Inst. Electr. Inform. Comm. Engrs. Japan*, vol. J89-B, 1036-1045, 2006.

- [24]. Hayakawa, M., VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes, *Sensors*, vol.7, 1141-1158, 2007.
- [25]. Hayakawa, M., Ohta, K., Nickolaenko, A. P., and Ando, Y., Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan, *Ann. Geophysicae*, vol. 23, 1335-1346, 2005.
- [26]. Hayakawa, M., Hattori, K., and Ohta, K., Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes, *Sensors*, vol.7, 1108-1122, 2007.
- [27]. Hayakawa, M., Surkov, V. V., Fukumoto, Y., and Yonaiguchi, N., Characteristics of VHF over-horizon signals possibly related to impending earthquakes and a mechanism of seismo-atmospheric perturbations, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol.69, 1057-1062, 2007.
- [28]. Hayakawa, M., and Fujinawa, Y. (Editors), *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*; Terra Scientific Pub. Comp., Tokyo, 677p, 1994.
- [29]. Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, and O. A., and Yumoto, K., Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 23, 241-244, 1996a.
- [30]. Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Ondoh, T., and Kawai, E., The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals, *J. Comm. Res. Lab.*, Tokyo, vol. 43, 169-180, 1996b.
- [31]. Hayakawa, M., and Molchanov, O. A. (Editors), *Seismo Electromagnetics: Lithosphere - Atmosphere - Ionosphere Coupling*, TERRAPUB, Tokyo, p 477, 2002.
- [32]. Hayakawa, M., Molchanov, O. A., and NASDA/UEC team, Summary report of NASDA's earthquake remote sensing frontier project, *Phys. Chem. Earth*, vol. 29, 617-625, 2004a.
- [33]. Hayakawa, M., Molchanov, O. A., and NASDA/UEC team, Achievements of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, vol. 15, 311-328, 2004b.
- [34]. Hayakawa, M., Ohta, K., Maekawa, S., Yamauchi, T., Ida, Y., Gotoh, T., Yonaiguchi, N., Sasaki, H., and Nakamura, T. Electromagnetic precursors to the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, *Phys. Chem. Earth*, 31, 356-364, 2006.
- [35]. Hayakawa, M., Itoh, T., and Smirnova, N. Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, 2797-2800, 1999.
- [36]. Hedervari, P., and Noszticzius, Z., Recent results concerning earthquake lights, *Annales Geophysicae*, vol. 3, 705-708, 1985.
- [37]. Hooke, W. H., Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 30, 795-823, 1968.
- [38]. Hooke, W. H., Rossby-planetary waves, tides, and gravity waves in the upper atmosphere, in *The Upper Atmosphere and Magnetosphere*, Nat. Acad. Sci., Washington, 130-140, 1977.
- [39]. Horie, T., Maekawa, S., Yamauchi, T., and Hayakawa, M., A possible effect of ionospheric perturbations for the Sumatra earthquake, as revealed from subionospheric VLF propagation (NWA-Japan), *Int'l J. Remote Sensing*, vol. 28, 3133-3139, 2007a.
- [40]. Horie, T., Yamauchi, T., Yoshida, M., and Hayakawa, M., The wave-like structures of ionospheric perturbation associated with Sumatra earthquake of 26 December, 2004. *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 69, 1021-1028, 2007b.
- [41]. Ida, Y., M. Hayakawa, A. Adalev, and K. Gotoh, Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the 1993 Guam earthquake, *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. 12, 157-162, 2005.
- [42]. Ida, Y., and M. Hayakawa, Fractal analysis for the ULF data during the 1993 Guam earthquake to study prefraction criticality, *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. 13, 409-412, 2006.
- [43]. Ismaguilov, V. S., Kopytenko, Yu. A., Hattori, K., and Hayakawa, M., Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Sci.*, vol. 20, 1-5, 2002.
- [44]. Kopytenko, Yu. A., Ismaguilov, V. S., Hattori, K., and Hayakawa, M., Monitoring of the ULF electromagnetic disturbances at the station network before EQ in seismic zones of Izu and Chiba peninsulas, In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*; Hayakawa M., Molchanov. O. A., Eds.; TERRAPUB, Tokyo, pp 11-18, 2002.
- [45]. Kushida, Y., and Kushida, R., On a possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, *RIKEN Review*, 19, 152-160, 1998.
- [46]. Kichengast, G., Elucidation of the physics of the gravity wave - TID relationship with the aid of theoretical simulations, *J. Geophys. Res.*, vol. 101, 13353-13368, 1996.
- [47]. Maeda, K., and Tokimasa, N., Decametric radiation at the time of the Hyogo-ken Nambu earthquake near Kobe in 1995, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 23, 2433-2436, 1996.
- [48]. Maekawa, S., Horie, T., Yamauchi, T., Sawaya, T., Ishikawa, M., Hayakawa, M., and Sasaki, H., A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan, *Ann. Geophysicae*, 24, 2219-2225, 2006.
- [49]. Maekawa, S., and Hayakawa, M., A statistical study on the dependence of characteristics of VLF/LF terminator times on the propagation direction. *Inst. Electr. Engrs. Japan, Fundamentals and Materials, Special Issue on Recent Progress in Seismo-Electromagnetics*, vol. 126, 4, 220-226, 2006.
- [50]. Miyaki, K., Hayakawa, M., and Molchanov, O. A., The role of gravity waves in the lithosphere - ionosphere coupling, as revealed from the subionospheric LF propagation data. in "Seismo Electromagnetics: Lithosphere - Atmosphere - Ionosphere Coupling"; Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Eds.; TERRAPUB: Tokyo; pp 229-232, 2002.
- [51]. Molchanov, O. A., Schekotov, A. Y., Fedorov, E. N., Belyev, G. G., and Gordeev, E. E., Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka, *Natural Hazard Earth System Sci.*, vol. 3, 1-7, 2003.
- [52]. Molchanov, O. A., and Hayakawa, M., *Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results*, TERRAPUB, Tokyo, 189p, 2008.
- [53]. Molchanov, O. A., and Hayakawa, M. Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, 3091-3094, 1995.

- [54]. Molchanov, O. A., Kopytenko, Y. A., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A., Matiashvili, T. G., Fraser-Smith, A. C., and Bernadi, A. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($M_s=6.9$) and the Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: Comparative analysis, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 19, 1495-1498, 1992.
- [55]. Molchanov, O. A., Hayakawa, M., and Rafalsky, V. A., Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, vol. 100, 1691-1712, 1995.
- [56]. Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Ondoh, T., and Kawai, E., Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake, *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 105, 239-248, 1998.
- [57]. Molchanov, O. A., and Hayakawa, M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, vol. 103, p 17,489-17,504, 1998.
- [58]. Molchanov, O. A., Hayakawa, M., and Miyaki, K., VLF/LF sounding of the lower ionosphere to study the role of atmospheric oscillations in the lithosphere-ionosphere coupling, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, vol. 15, 146-158, 2001.
- [59]. Molchanov, O. A., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., Lefeuvre, F., Biagi, P. F., Castellana, L., and Hayakawa, M., Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 6, 745-753, 2006.
- [60]. Morgunov, V. A. Electric phenomena preceding aftershocks of Shikotan earthquake, *Proceedings of Russian Academy of Sciences*, vol. 359, 102-105, 1998 (in Russian).
- [61]. Nickolaenko, A. P. and Hayakawa, M., *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*, Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 380p, 2002.
- [62]. Nomicos, K., Vallianatos, F., Kalliakatos, J., Sideris, S., and Bakatsakis, M., Latest aspects of telluric and electromagnetic variations associated with shallow and intermediate depth earthquake in South Aegean. *Annali di Geophysica*, vol. X1/2, 361-375, 1995.
- [63]. Ohta, K., Watanabe, N., and Hayakawa, M., The observation of ULF emissions at Nakatsugawa in possible association with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, *Earth Planets Space* vol. 57, 1003-1008, 2005.
- [64]. Ohta, K., Umeda, K., Watanabe, N., and Hayakawa, M., ULF/ELF emissions observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 1, 37-42, 2001.
- [65]. Ohta, K., Makita, K., and Hayakawa, M., On the association of anomalies in subionospheric VLF propagation at Kasugai with earthquakes in the Tokai area, Japan, *J. Atmos. Electr.*, vol. 20, 85-90, 2000.
- [66]. Pulinets, S., and Boyarchuk, K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*; Springer, Berlin, 315p, 2004.
- [67]. Pilipenko, V., Shalimov, S., Uyeda, S., Tanaka, H., Possible mechanism of the over-horizon reception of FM radio waves during earthquake preparation period, *Proceedings of Japan Academy*, vol. 77B (7), 125-130, 2001.
- [68]. Qiang, Z. J., Dian, C. G., and Li, L. Z., Satellite thermal infrared precursor of two moderate-strong earthquakes in Japan and impeding earthquake prediction, In: Hayakawa, M. (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 747-750, 1999.
- [69]. Rodger, C., and McCormick, R. J., Remote sensing of the upper atmosphere by VLF. in "Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges"; Füllekrug, M. et al. Ed.; Springer, pp 167-190, 2006.
- [70]. Rozhnoi, A., Solovieva, M. S., Molchanov, O. A., and Hayakawa, M., Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions, *Phys. Chem. Earth*, vol. 29, 589-598, 2004.
- [71]. Ruzhin, Yu. Y., and Depueva, A. Kh., Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies, *J. Atmos. Electr.*, vol. 16, 271-288, 1996.
- [72]. Schekotov, A. Y., Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Fedorov, E. N., Chebrov, V. N., Sinitsin, V. I., Gordeev, E. E., Belyaev, G. G., and Yagova, N. V., ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity, *Radio Sci.*, vol. 42, RS6S90, doi:10.1029/2005RS003441, 2007.
- [73]. Shvets, A. V., Hayakawa, M., and Molchanov, O. A., Subionospheric VLF monitoring for earthquake-related ionospheric perturbations, *J. Atmos. Electr.*, vol. 22, 87-99, 2002.
- [74]. Shvets, A. V., Hayakawa, M., and Maekawa, S. Results of subionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi ($m = 8$, Hokkaido, 25 September 2003) earthquake, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 4, 647-653, 2004a.
- [75]. Shvets, A. V., Hayakawa, M., Molchanov, O. A., and Ando, Y., A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding, *Phys. Chem. Earth*, vol. 29, 627-637, 2004b.
- [76]. Sorokin, V. M., Yaschenko, A. K., Chmyrev, V. M., and Hayakawa, M., DC electric field formation in the mid-latitude ionosphere over typhoon and earthquake regions, *Phys. Chem. Earth*, vol. 31, 454-461, 2006.
- [77]. Sugisaki, R., Anno, H., and Ui, H., Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochemical Journal*, vol. 14, 101-112, 1980.
- [78]. Surkov, V. V., Pokhotelov, O. A., Parrot, M., and Hayakawa, M., On the origin of stable IR anomalies detected by satellites above seismo-active regions, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 31, 164-171, 2006.
- [79]. Tramutoli, V., Bello, D., Pergola, G. N., and Piscitelli, S., Robust satellite technique for remote sensing of seismically active areas, *Annali di Geofisica*, vol. 44, 295-312, 2001.
- [80]. Tronin, A. A., Satellite thermal survey application for earthquake prediction. In: Hayakawa, M. (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes*, TERRAPUB, Tokyo, pp. 717-746, 1999.
- [81]. Tronin, A. A., Haykawa, M., and Molchanov, O. A., Thermal IR satellite application for earthquake research in Japan and China, *J. Geodynamics*, vol. 33, 519-534, 2002.

- [82]. Turman, F.E., *Electronic and Radio Engineering*, Fourth ed. McGraw-Hill, New York, pp. 818–823, 1955.
- [83]. Wang, L., and Zhu, C., Anomalous variations of ground temperature before the Tangsan and Haiheng earthquakes, *J. of Seismological Research*, vol. 7 (6), 649–656 1984 (in Chinese),
- [84]. Warwick, J. W., Stoker, C., and Meyer, T. R., Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960, *J. Geophys. Res.*, vol. 87, 2851–2859, 1982.
- [85]. Yamada, Y., Sakai, K., Yaji, Y., and Shimakura, S., Observation of natural noise in VHF band which relates to earthquakes, in *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Hayakawa, M., and Molchanov, O. A. (Ed.), TERRAPUB, Tokyo, 255–258, 2002.
- [86]. Yamauchi, T., Maekawa, S., Horie, T., Hayakawa, M., and Soloviev, O., Subionospheric VLF/LF monitoring of ionospheric perturbations for the 2004 Mid-Niigata earthquake an their structure and dynamics, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 69, 793–802, 2007.
- [87]. Yasuda, Y., Y. Ida, T. Goto, and M. Hayakawa, Interferometric direction finding of over-horizon VHF transmitter signals and natural VHF radio emissions possibly associated with earthquakes, *Radio Science*, vol. 44, RS2009, doi:10.1029/2008RS003884, 2009.
- [88]. Yonaiguchi, N., Ida, Y., and Hayakawa, M., On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 69, 661–674, 2007a.

- [89]. Yonaiguchi, N., Ida, Y., Hayakawa, M., and Masuda, S., Fractal analysis for VHF electromagnetic noises and the identification of preseismic signature of an earthquake, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 69, 1825–1832, 2007b.

Manuscript received March 10, 2010



Masashi Hayakawa was born in Nagoya, Japan on February 26, 1944. He received the B.E., M.E., and Doctor of Engineering degrees, all from Nagoya University in 1966, 1968 and 1974, respectively. In 1970, he joined the Research Institute of Atmospheric Physics, Nagoya University, as a Research Associate. He became an Assistant Professor in 1978 and an Associate Professor in 1979, at the same Institute. Since 1991, he has been a Professor with the University of Electro-Communications (UEC), Tokyo, Japan, and in April 2009 Emeritus professor of UEC. He is now working as a project professor in UEC. He has been engaged in space physics, atmospheric electricity, seismo- electromagnetics, signal processing, EMC, radio communication, and inversion problems. Dr. Hayakawa is the former (1996–1999) URSI Commission E Chair, and the former President of the Society of Atmospheric Electricity of Japan. He is now Editor-in-Chief of *J. Atmos. Electr.*, and on the editorial board of *Indian J. Radio and Space Physics*. He is on the Technical Committee of Zurich EMC Symposium, on the Scientific Program Committee of Wroclaw EMC Conference.

PHASELESS TECHNIQUES IN ANTENNA NEAR-FIELD MEASUREMENTS: ALGORITHMS, SIMULATIONS AND EXPERIMENTS

SEYYED-FARHAD RAZAVI AND YAHYA RAHMAT-SAMII

This paper describes recent developments and advantages of applying phaseless near-field measurement techniques in constructing antenna radiation patterns. The advantages of operating at higher frequencies and cost effectiveness of these techniques have motivated a great deal of research over the past decade. A brief description of the present methods is accompanied by a detailed investigation of the Iterative Fourier Technique (IFT) as a powerful phaseless algorithm for planar near-field measurements. The standard form of IFT limits its usage in dealing with important antenna issues such as scanned beams, polarization construction, uniqueness of the solutions and the impact of probe errors. This paper will discuss these issues and illustrate the modifications necessary to develop a powerful algorithm for phaseless near-field measurements. Through a novel customized simulation approach, the effects of probe positioning errors are addressed and it is demonstrated that the phaseless method produce far superior results compared to standard amplitude/phase near field measurements. Representative experimental data, using UCLA's Bi-polar planar near field range, are presented to show the utility of the algorithms developed in this paper.

В статье описываются последние разработки и преимущества применения бесфазовых методов измерений в ближней зоне для восстановления диаграммы направленности (ДН) антенн. Привлекательность использования бесфазовых методов на высоких частотах и их экономичность стимулировали появление за последнюю декаду большого количества соответствующих работ. Краткое описание предлагаемых методов сопровождается детальным рассмотрением итерационной процедуры Фурье (ИПФ), как мощного бесфазового алгоритма при планарных ближнезонных измерениях. Стандартная форма ИПФ ограничивает возможности ее использования при изучении: антенн со сканированием луча, поляризационных эффектов, единственности решений, влияния ошибок зондирования. Указаны изменения, которые надо внести в алгоритмы с тем, чтобы существенно расширить возможности бесфазовых ближнезонных методов измерений. Предлагаемые изменения позволяют, в частности, оценить влияние ошибок установки зонда на восстанавливаемую ДН. Показано, что бесфазовый метод имеет существенные преимущества по сравнению со стандартным амплитудно-фазовым методом ближнезонных измерений. Это положение подтверждено обширными экспериментальными данными, полученными на биполярном плоском ближнезонном полигоне UCLA.

1. INTRODUCTION

1.1. Celebrating Prof. Yakov Shifrin's 90th Birthday

We are delighted to be invited to contribute this paper to the 90th birthday special issue of the "Applied Radio Electronics", honoring Prof. Yakov Shifrin, whose contributions to the electromagnetic and antenna communities are profoundly appreciated worldwide. His outstanding technical works in the area of statistical antenna theory, pioneered by him in 1971's, have benefited many of us [1]. His books and technical writings have been source of inspiration for many researches [1-4]. One of the authors, Rahmat-Samii, has also immensely enjoyed his on-going friendship with Prof. Shifrin. Rahmat-Samii works [5-7] in the realm of the effects of random errors on antenna performance have been influenced by Prof. Shifrin's works in this area. It is in the spirit of Prof. Shifrin's research style to strive for new directions and apply it to practical engineering problems. The subject of antenna near-field phaseless measurements is receiving considerable attention as a potentially viable approach in measuring and characterizing antenna radiation performance. This paper focuses on this topic and presents some of the recent findings of the authors in this area. Prof. Rahmat-Samii is also thankful to the special issue editor, Prof. Nona Maksimova, for extending the invitation to contribute this paper. We

hope that the electromagnetic and antenna community will find it interesting and practical.

1.2. Background and Problem Statement

In the 20th century we witnessed the evolution of plenty novel antenna designs and the field of antennas and propagation has matured to an incredible extent. Amazing variations in antenna topologies suggest that each antenna is designed to fulfill special performance needs, such as, gain, frequency of operation, radiation pattern, etc. Upon the construction of an antenna, there is required to ensure its actual performance by performing measurements. The antenna measurements techniques are developed as a response to this requirement. Among typical antenna characteristics the far-field pattern characterization is by far the most difficult, time consuming and demanding one. This is due to the fact that any antenna radiates in all directions; consequently the antenna pattern has complex angular and polarization characteristics. In practice, an antenna is placed on a stage capable of rotating in azimuth and elevation at a distance larger than $2D^2/\lambda$ from the source antenna for direct far-field measurements (D is antenna's diameter and λ is the wavelength). Consequently, far-field pattern measurements for both large antennas and at higher frequencies typically require huge real-estate facilities. In response to this problem various techniques such as compact ranges and near field techniques have been developed

in last thirty years. Fig. 1 shows a schematic of various techniques. This paper focuses on planar near field measurement which allows measuring the near-field of the antenna in indoor facilities at some practical distances, and then computes the far-field patterns. In particular, advances in near-field “phaseless” measurements will be the central theme of this paper.

The near-field techniques will eliminate the need for large measurement ranges. One is traditionally only interested in the magnitude of the far-field patterns. Consequently there is only a need for an amplitude measurement in far-field facilities. Unfortunately, this is not the case for near-field techniques where there is a necessity of accurate measurements of both amplitude and phase data. At lower frequencies this fact does not impose much restriction; however, this is not the case at higher frequencies.

The recent trend for antenna operation at higher frequencies like millimeter and terahertz waves is pushing the limits for the design and implementation of antenna measurement ranges capable of operating at these frequencies. Unfortunately accurate measurements of the phase are cumbersome in these frequencies and network instruments, if available, are highly expensive. This fact has motivated the implementation of the phaseless techniques. It is needless to say that these methods are not vulnerable to the instrumental phase drifts.

This paper revisits the utility of phaseless techniques and provides solutions to the concerning issues. The paper covers three main areas for completeness, namely, phaseless algorithm developments, novel simulation studies and finally representative experimental activities. At first the theory and algorithms

behind the phaseless techniques are discussed and advanced beyond the traditional approaches. Specifically the IFT method is reviewed and extended and its utility in a few cases is examined through simulations. This method is chosen due to its fast convergence response utilizing FFT. Its appropriateness for planar measurements allowed its implementation in the current UCLA bi-polar near-field facility. After detailing the development of the IFT to a general purpose algorithm the phenomenal ability of this method in coping with the probe positioning errors is presented through novel simulation studies. It is shown how this probe positioning error can affect the phase distribution much more than the amplitude distribution and henceforth making the standard amplitude/phase near-field measurements so vulnerable to this type of errors. Finally representative experimental activities are summarized to demonstrate the utility of phaseless algorithms developed in this paper in real life. Specifically, experimental data for a slot array antenna and a microstrip antenna are presented. All the pertinent references will be cited in the subsequent sections of this paper.

2. ADVANCES IN PHASELESS TECHNIQUES AND ALGORITHMS

In phaseless measurement techniques, one attempts to reconstruct the phase distribution based on some known amplitude information or constraints. This process is usually referred to as “phase retrieval”. There are a number of approaches dealing with this problem, and many of which have their roots in crystallography and optics. Many of these methods are focused on the application of the Iterative Fourier

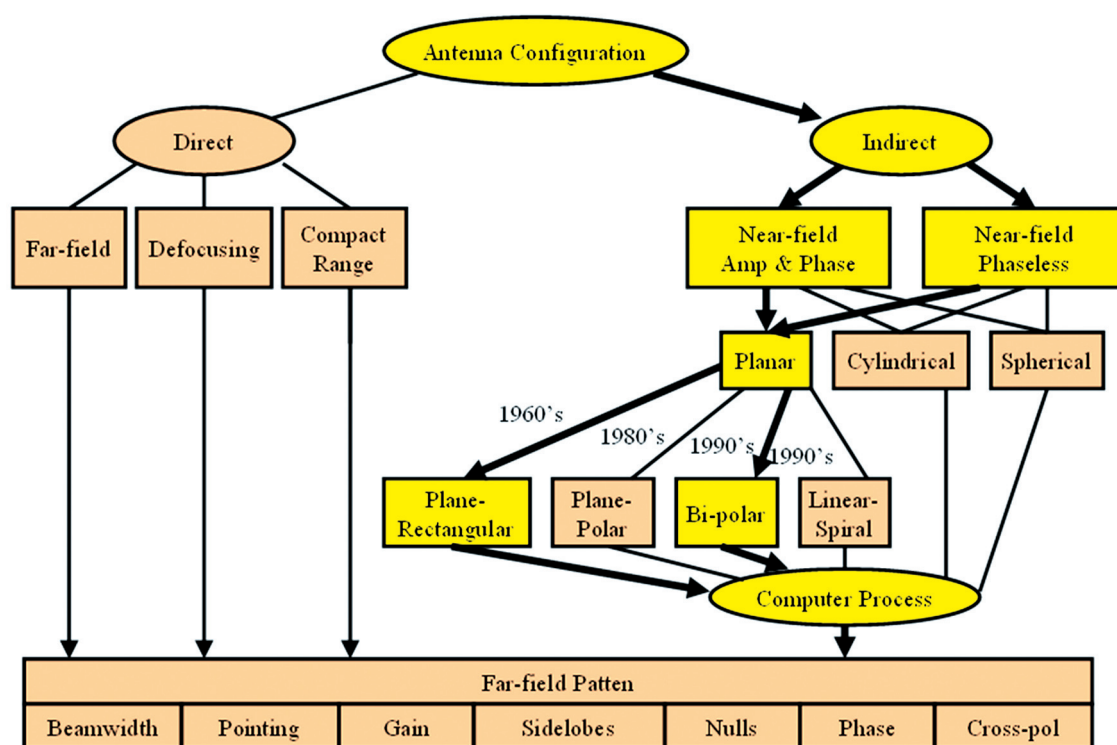


Fig. 1. Various techniques available in measuring antenna far field patterns. The focus of this paper is on indirect, phaseless near-field planar rectangular (for simulations) and bi-polar (for experiments) methods

Technique (IFT), where the phaseless data information is enforced at each step. The Misell algorithm [8], error reduction [9], and input-output algorithm [10] are all categorized in this area. In antenna measurements, the well-known plane-to-plane method [11], exclusively formulated to deal with the planar near-field measurement, is another example that makes use of this technique. The method adopted in this paper is a modified form of IFT. The appropriateness of IFT for planar measurements and the utilization of FFT for expediting the iterations motivated the authors for adopting this method.

There are also functional methods in which an error norm is minimized to attain the best phase distribution on the plane of measurements. For instance, a functional is formulated based on the squared amplitude of the near-field in two different planes and is numerically minimized [12]. In contrast, there are methods which are based on interferometric approaches. They employ the Gabor holography using another source as a reference. They suffer from some drawbacks like the phase instability and the requirements for accurate information regarding the reference antenna patterns and positions [13]. Interestingly, in [14] the authors have integrated two probes to make the measurement on the same plane and therefore, the need for another antenna is mitigated. This method, as a mixture of functional and interferometric approaches, does not have the problems associated with the interferometric method but requires a mechanism to add the probes' voltages and their 90 degree shifted values.

A. Iterative Fourier Technique

Due to the fact that the IFT used in this paper is the advanced version of traditional IFT, a concise overview is presented. At first two sets of individual planar measurement (here bi-polar) are taken (step 1 in Fig. 2). In the next step using the optimum sampling interpolation (OSI), exclusively developed for the bi-polar near-field measurements [15], two sets of rectangular grid containing the amplitude data are created (step 2). The sampling rate should be at least $\lambda/4$ for the reasons mentioned in [16]. Afterward based on the antenna aperture shape an aperture mask constraint is defined which is zero outside and is one inside the aperture (M_{AUT}),

$$M_{AUT}(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \text{ inside the aperture} \\ 0 & (x, y) \text{ outside the aperture} \end{cases} \quad (1)$$

M_{AUT} acts as the first initial guess for aperture plane field distribution. This initial guess is then propagated to the first plane (step 3). The calculated amplitudes then will be replaced with the measured amplitudes of plane #1 and the phase is retained. Then the resultant field will be propagated to the next plane (step 4) and the calculated amplitudes are replaced with the measured amplitudes of the plane #2 and again the phase is retained. This cycle will form a complete iteration in this method which can be mathematically presented as:

$$\begin{aligned} A_{II}^{y,n}(x, y) \cdot e^{j\Phi_{II}^{y,n}(x, y)} &= \\ \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ M_I^y(x, y) \cdot e^{j\Phi_I^{y,n}(x, y)} \right\} \times H(k_x, k_y) \right\} & \quad (2) \\ A_I^{y,n+1}(x, y) \cdot e^{j\Phi_I^{y,n+1}(x, y)} &= \\ \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ M_{II}^y(x, y) \cdot e^{j\Phi_{II}^{y,n}(x, y)} \right\} \times H^{-1}(k_x, k_y) \right\} & \end{aligned}$$

where $\mathcal{F}$ denotes the Fourier Transform, n is the running index denoting the n th iteration, k_x and k_y are Fourier domain variables or angular frequencies, $M_{I,II}^{x,y}$ are the measured amplitudes, A_I^y and Φ_I^y are the amplitude and phase on the first plane, A_{II}^y and Φ_{II}^y are the amplitude and phase on the second plane with H and H^{-1} as the forward and backward propagating functions between planes #1 and #2 (Fig. 2) and are defined as follow:

$$\begin{cases} H(k_x, k_y) = e^{-j(z_{II} - z_I)\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}} & \text{for } k_x^2 + k_y^2 \leq k_0^2 \\ H(k_x, k_y) = 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3a)$$

$$\begin{cases} H^{-1}(k_x, k_y) = e^{+j(z_{II} - z_I)\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}} & \text{for } k_x^2 + k_y^2 \leq k_0^2 \\ H^{-1}(k_x, k_y) = 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3b)$$

in which z_I and z_{II} are the AUT plane distances from the measurement planes I and II . H and H^{-1} are defined zero for $k_x^2 + k_y^2 \geq k_0^2$ due to the stability requirements of iterations.

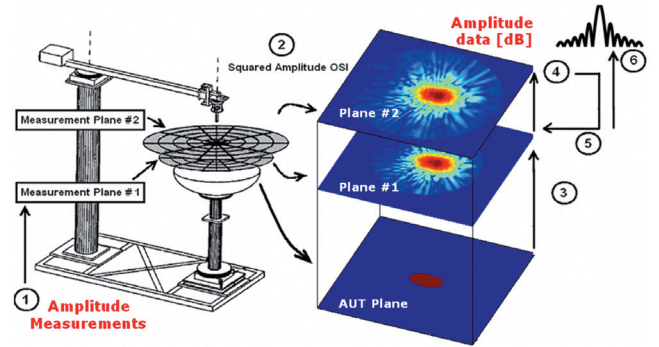


Fig. 2. Steps involved in the Iterative Fourier Technique in reconstructing the phase using two amplitude near-field measurements in a bi-polar configuration

Unlike [16] we do not go back to the AUT plane to enforce the aperture constraint (M_{AUT}), because this will impose a non-physical condition (enforcement of fields outside aperture to zero). Moreover, in many situations the aperture of the antenna is not planar. In these cases, projection of the aperture on a plane can not be defined uniquely. Instead we will back-propagate the field in plane #2 to the plane #1 (step 5 in Fig. 2) and the point-wise error metric (as a normalized measure to the square of residual error) is calculated similar to [10, 16] as follows:

$$\varepsilon_{r,n} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i,j} \left(A_I^{y,n+1}(x, y) - M_I^y(x, y) \right)^2}{\sum_{i,j} M_I^y(x, y)^2} \right) \quad (4)$$

Then the same procedure will be repeated (steps 4 and 5 in Fig. 2). This will continue until the maximum number of iterations or desired convergence rate is reached. Subsequently, the calculated phases in plane #1 together with the measured amplitudes in this plane are used to calculate the far-field patterns of the antenna (step 6 in Fig. 2).

To test the functionality of this procedure the simulation results for a broadside-directed array of 21×21 infinitesimal y-directed dipoles separated by $\lambda/2$ with uniform amplitude is shown in Fig. 3(a). The implementation of infinitesimal dipoles allows one to have accurate calculation of the near-field on the planes of the measurements. Plane #1 and #2 have a size of $50\lambda \times 50\lambda$ and the sampling points are uniformly distributed in a 256×256 grid. The two measurement planes are located at distances of 5λ and 7λ from the aperture plane. The valid angle is $\theta_v = 68.70$ ($\sin(\theta_v) = 0.93$), which requires to set all data outside the circles of radius 17.8λ and 25λ to zero, for plane #1 and #2, respectively. Figure 3 demonstrates the result only after 100 iterations, which takes only a few seconds to run. It is interesting to see that the levels, positions of nulls and side-lobe levels are detected pretty well up to the geometrical optic valid angle of 70° . The response of the algorithm is also tested for a more sophisticated layout of the array elements. Every 5th element in the array is rotated in the manner depicted in Fig. 3(b). The resulted far-field pattern has high side lobes even near grazing angles. The reconstructed far-field together with the exact pattern is also shown in Fig. 3(b). It is clearly observed that the IFT has been able to extract the phase correctly in order to generate the far field pattern even for this rather sophisticated case.

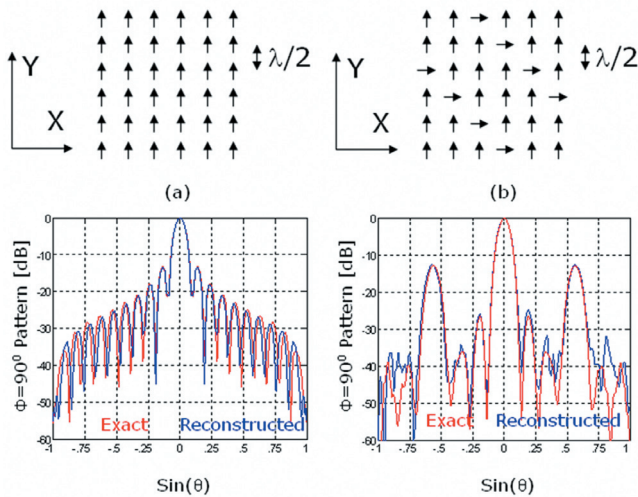


Fig. 3. The exact and reconstructed far-field patterns by IFT. Simulations are performed using 21×21 arrays of infinitesimal dipole elements with (a) simple layout and (b) a more sophisticated layout

B. Recent Advances in Applying the IFT: Scanned beams, Polarization and Uniqueness

Unfortunately the IFT (in either original or modified version) is sensitive to the well-posedness of the data. The iterations in the standard IFT may be trapped in a local minima or the problem of stagna-

tion may occur. A hybrid solution is introduced which searches for a global optimum initial guess based on a two-variable approach [17]. A representative measurement is illustrated in the last section of this paper to show the effect of this simple and yet very efficient adaptation of IFT.

Referring back to Fig. 3(b) one notices that rotation of the infinitesimal dipoles will increase the cross polarized field. An important issue regarding the usage of IFT is the fact that this method was customarily used, until recently [18], only for the dominant polarization. The correct detection of co- and cross-polarized far-field components for linearly, elliptically and circularly polarized fields requires both the measurements of x- and y-directed near-fields and a linkage between them. The need for the inclusion of both components is clearly observed in the following far-field formulas [19]:

$$\begin{cases} E_{co} = \sin \phi E_\theta + \cos \phi E_\phi \\ E_{cr} = \cos \phi E_\theta - \sin \phi E_\phi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_\theta = f_x \cos \phi + f_y \sin \phi \\ E_\phi = \cos \theta (-f_x \sin \phi + f_y \cos \phi) \end{cases} \quad (5)$$

with

$$\begin{cases} f_x = \mathcal{F} \left\{ A_I^{x,n}(x,y) \cdot e^{j\Phi_I^{x,n}(x,y)} \right\} = \mathcal{F} \left\{ E_I^x \right\} \\ f_y = \mathcal{F} \left\{ A_I^{y,n}(x,y) \cdot e^{j\Phi_I^{y,n}(x,y)} \right\} = \mathcal{F} \left\{ E_I^y \right\} \end{cases} \quad (6)$$

The need for the linkage (the phase constant adjustment) can be pictorially observed in Fig. 4, where the IFT could correctly extract the phase distribution but with a phase shift. To accommodate for this phase shift the relative phase constant between the phase of x-directed and y-directed near-field should be extracted by some means. This is done by taking a single amplitude measurement on a carefully chosen point [18] in the measurement grid along a direction different from x- and y-axis. This extra measurement will remove the ambiguity caused by phase shifts essential to the IFT. This process is depicted in Fig. 5, where M_I^x and M_I^y are the measured field magnitude along x and y direction, ϕ is the extra measurement direction, M_I^ϕ is the measured field magnitude along ϕ direction, and finally ϕ_c is the phase constant at this point. The formula relating these parameters is:

$$\begin{aligned} (M_I^\phi)^2 = & (M_I^y \sin(\phi) \cos(\phi_c) + M_I^x \cos(\phi))^2 \\ & + (M_I^y \sin(\phi) \sin(\phi_c))^2 \end{aligned} \quad (7)$$

This polarization extraction technique assumes that we are measuring the actual near-field but in reality the probes cannot measure the exact near-field. The effect of a non-ideal probe may raise the question of the appropriateness of the method; fortunately, it is shown that the effect of the probe cannot hinder the utility of this technique [20].

As a final discussion on the planar near-field phaseless measurements it is worth looking into the

concerns regarding the uniqueness of the results associated with these methods. The uniqueness problem is investigated in the literature in three different categories. The first category considers cases where only one set of one-dimensional amplitude-only measurements (Fig. 5(a)) is available [21]. It is proven that there is more than one solution although the number of solutions is countable. Nonetheless, the uniqueness of the phaseless measurements when one has access to two one-dimensional measurements is proven in the optics [22] (Fig. 5(b)). In contrast to one set of one-dimensional measurements, the number of solutions drops significantly, and for most parts only one solution exists when one set of two-dimensional measurements is available. This is because of the mathematical fact that the two-dimensional signals are in general un-factorizable [23] (Fig. 5(c)). It is conjectured that due to the high possibility of the uniqueness for even one set of two-dimensional signals, the uniqueness of the IFT as a method which uses two set of two-dimensional signals can follow [24] (Fig. 5(d)).

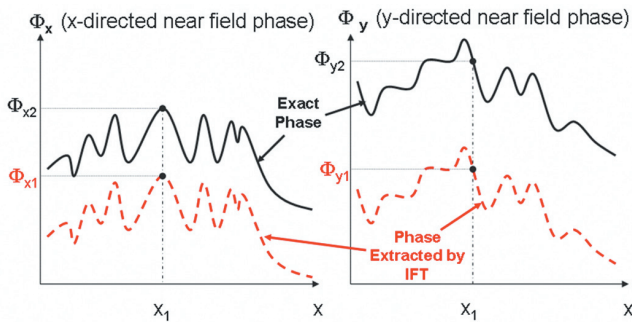


Fig. 4. The difference in the phase constant for both x- and y-directed extracted phase by IFT. The method outlined in the text allows the construction of both co- and cross-polarized components of the far field

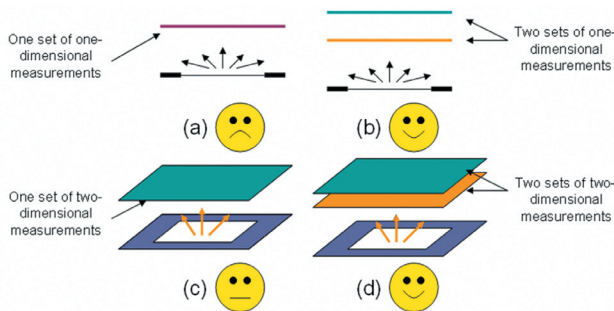


Fig. 5. Schematic representation of scenarios under which the uniqueness in phaseless measurements may be anticipated. (a) one set of one-dimensional, (b) two sets of one-dimensional, (c) one set of two-dimensional and (d) two sets of two-dimensional measurements. The focus of this paper is on (d)

3. NOVEL SIMULATIONS: THE ROLE OF PROBE-POSITIONING ERRORS

This section shows how IFT, as a phaseless measurement technique, can have a far better performance in the presence of probe positioning errors than the standard amplitude/phase near-field techniques. At higher frequencies a slight fluctuation of the probe positions over the sampling plane can cause a very high disturbance in the detected near-field phase. Consequently

the typical amplitude/phase near-field measurements are susceptible to the probe positioning error. In contrast in the phaseless measurements only the amplitude is detected which is much less sensible to these kinds of errors. For example at 30 GHz, 1 mm probe positioning errors results into $\lambda/10$ or 36 degrees phase error!

In the past, the issues of the noise and the presence of measurement errors are not investigated in details to provide strong impetus to the importance of phaseless measurements. In this section the near field of a few different types of antennas with both high and low side lobes is simulated to create as realistic case as possible. The effects of the probe positioning errors are investigated by injecting random errors in the position of the probe samples along z-axis. It is also illustrated how the positioning errors can distort the phase distributions. Through detailed characterizations of the constructed far field patterns, robustness of the Iterative Fourier technique even at the presence of very high probe positioning errors is demonstrated.

To illustrate the sensitivity of the phase to the probe-height error using the same technique mentioned in previous section random errors are injected in the height of the near-field samples. Figure 6 shows the high sensitivity of the phase versus the less sensitive amplitude distribution on one the measurements plane. The errors corresponds to a fluctuation of $\pm 0.5\lambda$ which although a very large one, it can easily happen in millimeter frequencies. To create these near-fields the same tool discussed in earlier sections is used to generate the electric near-field of an aperture antenna modeled by an array of 21×21 infinitesimal dipoles separated $\lambda/2$ apart from each other. Different types of amplitude tapering are introduced to change the side lobe levels accordingly. The phases are all uniform; henceforth the far-fields are broadside directed. The aperture is relatively large and therefore the modeled antennas have relatively high gain which is typical for the antennas measured in the planar near-field facilities.

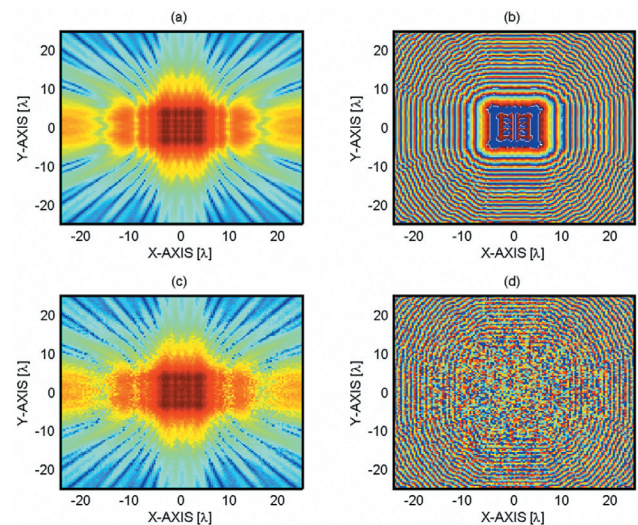


Fig. 6. (a)(b) The exact amplitude and phase versus (c)(d) the distorted amplitude and phase due to the probe positioning error in the near-field of a typical radiator. It is assumed that the probe positions are randomly varying in the range of $\pm \lambda/2$. Note that as expected the phase is much more affected than the amplitude

A. High Side Lobe Level Antennas

This subsection will demonstrate the simulation results for typical antennas with very high side lobe levels. Two types of apertures are considered, a uniform and an aperture with a Chebyshev tapering corresponding to a side lobe level of -13.3 dB. The results are shown in Fig. 7 where the far-fields of these two antennas are calculated by three methods. The black solid curves represent the exact far-field corresponding to the near-field data generated on errorless probe positions. The dotted curve is the result of the standard amplitude/phase near-field method using the data corrupted with the probe positioning error. The dashed line is the result of the IFT method with the corrupted amplitude data. The phenomenal response of the IFT method as a phaseless method working on the erroneous data is quite remarkable. The collected data over the near-field plane corresponds to a valid angle of 70° which corresponds to a $\sin(\theta) = 0.94$. The IFT response has been acceptable even for the case where the side lobes are very high near the grazing angle (Fig. 7(b)). Clearly the standard amplitude/phase near field method fails.

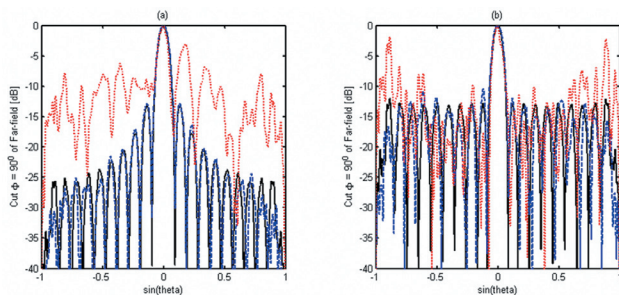


Fig. 7. Far-field patterns for (a) an antenna aperture with uniform and (b) 13.3 dB SLL Chebyshev tapering. The solid black curves are exact far-fields whereas the dashed and dotted are IFT generated far-field and standard amplitude/phase method operating on corrupted data

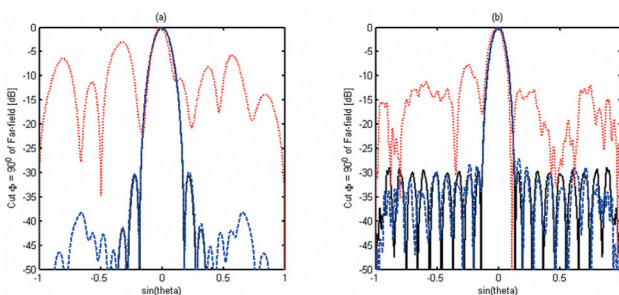


Fig. 8. The far-field pattern for (a) an antenna aperture with 30 dB SLL quadratic and (b) 30 dB SLL Chebyshev tapering. The solid black curves are exact far-fields whereas the dashed and dotted are IFT generated far-field and amplitude-phase method operating on corrupted data

B. Low Side Lobe Level Antennas

This subsection will focus on the antenna patterns with low side lobe level. The simulation procedure is similar to the previous subsection. The only difference is that for simulating a pattern with decreasing side lobe levels—a condition which is usually occurring with high gain antennas (like reflectors) suitable for planar near-field measurements—a quadratic taper-

ing is introduced [25]. The other pattern is generated similar to the Chebyshev tapering in previous subsection with the difference that the infinitesimal dipoles amplitude tapering corresponds to a medium side lobe level of -30 dB.

The results are shown in the Fig. 8 where the robustness of the phaseless IFT method is again confirmed. One may notice that the standard amplitude/phase near-field method is remarkably off in terms of a useful determination of the far-field patterns, whereas the phaseless IFT method proves itself as a viable solution in coping with the probe positioning errors.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The modifications introduced in the previous sections were vital to improve the applicability of the phaseless method in planar near-field measurements. The necessity of an optimum initial guess together with the need for a linkage between the measured field data along principal directions, were addressed. This section will demonstrate the performance enhancement of the discussed phaseless algorithm for measurements conducted in the UCLA bi-polar planar near-field facility. The bi-polar facility is introduced to minimize the hardware complexity by using two rotational axes instead of the commonly used translational axes in near-field rectangular grids [26]. It also offers the possibility of measuring scan plane sizes larger than the actual area of the chamber [26]. A typical grid for this type of near-field measurements is shown in Fig. 9.

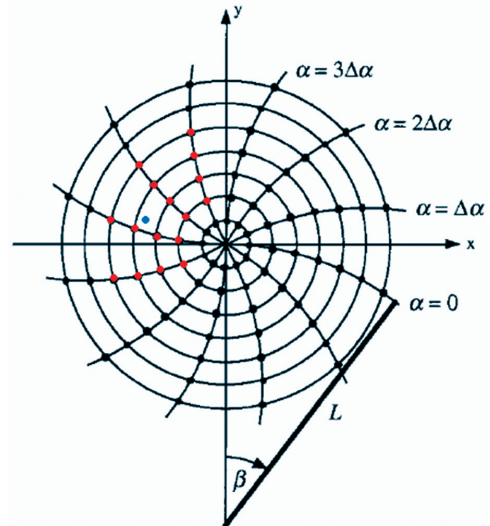


Fig. 9. A typical Bi-polar data collection grid. The marked dot, out of the bi-polar grid, is a typical point over the rectangular grid whose field will be calculated using the OSI (refer back to the step 2 of Fig. 2)

A. Representative Measurements for the Necessity of the Initial Guess Optimization

To show the improvement of the far-field while one is optimizing initial guess versus the standard IFT, two sets of measurements are conducted. The first one is done with an antenna mechanically tilted to create a scanned-beam antenna, and the other one by rotating the same antenna while it is broadside directed to

increase the measured x-directed field (Fig. 10). The antenna is an elliptically shaped slot array antenna operating at 9.3 GHz. The dimension of the antenna is 14.8λ (H -plane) $\times$ 8.7λ (E -plane) and it has a broadside directed pattern. The first plane is located 13.13 cm ($\approx 4.17\lambda$) from the AUT plane (which in this case is defined to be the plane parallel to the positioner and containing the highest tip of the antenna for the first measurement). The other plane is located 7.62 in ($\approx 2.36\lambda$) from the first plane. The two sets of measurements have a valid angle of $\theta_v = 70^\circ$. The far-field pattern for the first one is shown in Fig. 11 where one can immediately see the improvement in finding the correct far-field characteristics of the antenna. The extracted phase for the second measurement was even more interesting (Fig. 12). This time the antenna was broadside directed—a characteristics which usually helps the fast convergence of standard IFT—but as can be seen in the extracted near-field phases the improvement using the modified IFT can be clearly observed even for this case. The probe compensation is carried out for all of these representative measurements.

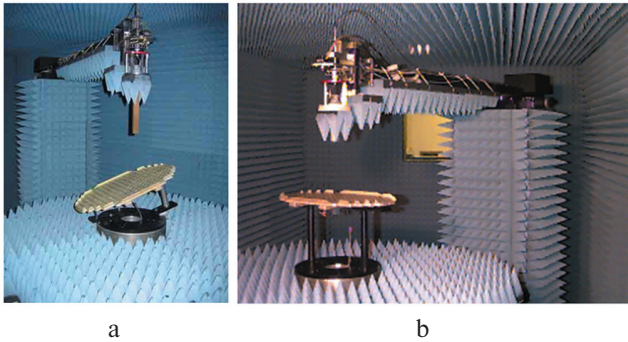


Fig. 10. The measured slot array antenna (a) mechanically tilted and (b) rotated 60° from the x-axis in UCLA bi-polar near-field facility

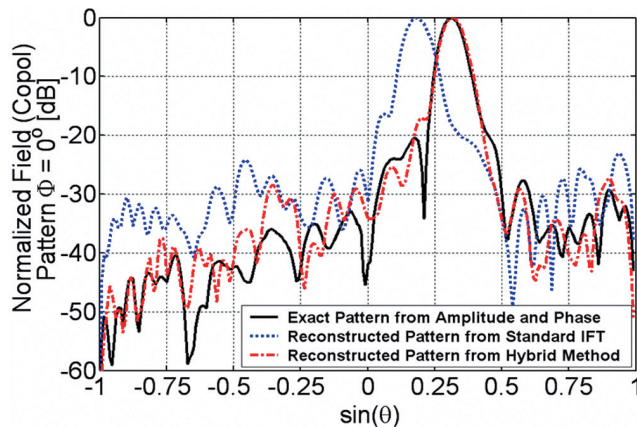


Fig. 11. Far-field pattern of the tilted slot array antenna

B. A Representative Measurement for the Extraction of Correct Polarizations

The previous sections emphasized on the necessity of measuring both the dominant and non-dominant polarizations. Moreover the importance of the linkage between these two sets of measurements was also highlighted. In this section a measurement is conducted over an elliptically polarized antenna as a proof of the concept.

In contrast to [18] where a linearly polarized antenna is used, an elliptically polarized array of 2×8 patch antennas operating at 13.4 GHz is designed to assess the effectiveness of polarization extraction algorithm. This antenna is measured in UCLA bi-polar near-field facility (Fig. 13). Figure 14 shows the constructed far-field patterns when one is applying the adjustment necessary for extracting the correct co- and cross-polarized far-fields. The solid patterns are the co-polarized far-fields while the non-dominant polarization is neglected and the phase difference adjustment is not applied. The removal of the non-dominant component will alter the cross-polarized definition totally and that is why the cross polarized is not shown there.

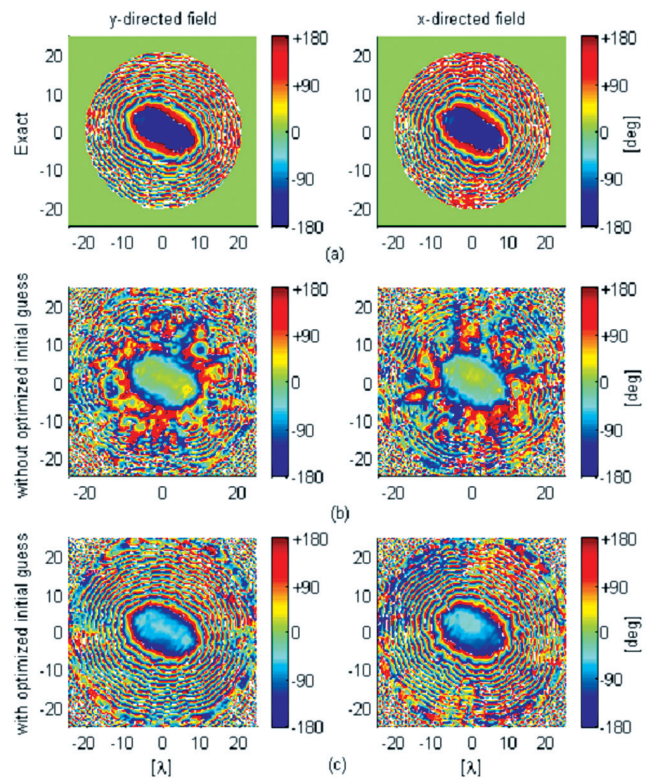


Fig. 12. Comparison between (a) the exact phase of the measured near field, (b) reconstructed phase without initial guess optimization and (c) reconstructed phase with initial guess optimization

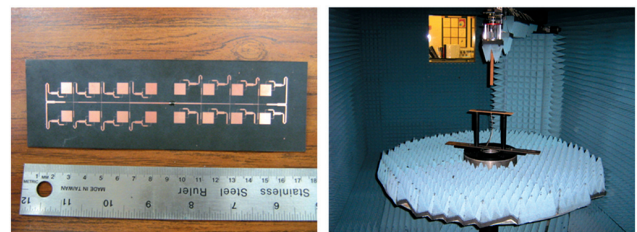


Fig. 13. An elliptically polarized antenna array measured in UCLA bi-polar near-field facility

The high cross polarized level is due to the poor design of the array antenna. As the final remark, it is worth mentioning that the reason for the wide beam over the $\Phi = 90^\circ$ cut is that the antenna array is much narrower along y-axis.

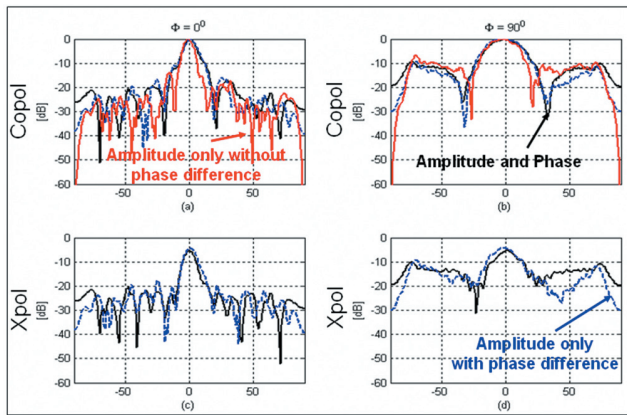


Fig. 14. Far-field patterns using (a) exact (phase & amplitude) (solid), (b) IFT without phase constant and non-dominant component adjustment (light solid) and (c) IFT with both phase constant and non-dominant component adjustment (dashed)

5. CONCLUSIONS

The need for compact and easily accessible ranges has motivated the implementation of near-field measurements techniques. Unfortunately the need for measuring the antennas at higher frequencies like millimeter wave and beyond enforces the utilization of costly instruments. Application of phaseless measurements can retain all the advantages of the near-field techniques and at the same time eliminate the need for costly instruments. This paper has discussed all the issues regarding a robust implementation of the phaseless algorithms. The complexity involved with scanned beam antennas is addressed. The extraction of polarization and the necessity of not only incorporating both polarization but also linking them together is discussed. The issue of uniqueness is also reviewed. The modification necessary to develop a powerful algorithm for phaseless near-field measurements are illustrated by both simulations and measurements using UCLA's bi-polar planar near field facility.

Literature.

- [1] Y. S. Shifrin, Statistical Antenna. Theory, Golem Press, USA, 1971.
- [2] Y. S. Shifrin, Yu. M. Borodavko. Statistics of the field of linear antenna in the Fresnel zone // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics, 1989. No. 5. pp. 17-24.
- [3] Y. S. Shifrin, V. A. Usin. Statistical aspects of the theory for defining antenna characteristics by the field measurements in the near zone // Proc. of the 3 Int. Conf. of Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, 1999. pp. 468-470.
- [4] Y. S. Shifrin. On the field fluctuations in diffraction image of focusing systems // Telecommunications and Radio Engineering, 2008. V. 67, No. 20. pp. 1825-1833.
- [5] Y. Rahmat-Samii. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors // IEEE Trans. Antenna Propagat., January 1983. V. 31, No. 1. pp. 92-98.
- [6] K. Bahadori and Y. Rahmat-Samii. Effect of periodic and aperiodic surface distortions on membrane reflector antennas // Antennas Propagat. Soc. Int. Symp., IEEE, 20-25 June 2004. V. 3. pp. 3031-3034.
- [7] S. Sinton and Y. Rahmat-Samii. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas // IEEE Trans. Antenna Propagat., June 2003. V. 51, No. 6. pp. 1331-1337.
- [8] D. L. Misell. A method for the solution of the phase problem in electron microscopy // J. Phys. D, Appl. Phys., 1973. V. 6. pp. L6-L9.
- [9] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik, 1972. V. 35, pp. 237-246.
- [10] J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison // Applied Optics, August 1982. V. 21, No. 15. pp. 2758-2769.
- [11] P. Anderson and S. Sal. New possibilities for phaseless microwave diagnostics—Part I: Error reduction techniques // Proc. Inst. Elect. Eng., Aug. 1985. V. 132. pp. 291-298.
- [12] T. Isernia, G. Leone, and R. Pierri. Radiation pattern evaluation from near-field intensities on planes // IEEE Trans. Antennas Propagat., May 1996. V. 44, pp. 701-710.
- [13] G. Leone, R. Pierri, and F. Soldovieri. On the performances of two algorithms in phaseless antenna measurements // 10th Inter. Conf. on Antennas and Propagation, 14-17 April 1997. V. 1, No. 436. pp. 136-141.
- [14] S. Costanzo, G. Di Massa, and M. D. Migliore. A novel hybrid approach for far-field characterization from near-field amplitude-only measurements on arbitrary scanning surfaces // IEEE Transaction on Antenna Propagat. June 2005. V. 53, No. 6. pp. 1866-1874.
- [15] R. G. Yaccarino, Y. Rahmat-Samii and L. I. Williams. The bi-polar planar near-field measurement technique, part II: near-field to far-field transformation and holographic imaging method // IEEE Trans. Antenna Propagat., February 1994. V. 42, No. 2. pp. 196-204.
- [16] R. G. Yaccarino, and Y. Rahmat-Samii. Phaseless bi-polar planar near-field measurements and diagnostics of array antennas // IEEE Trans. Antenna Propagat., March 1999. V. 47, No. 3, pp. 574-583.
- [17] S. F. Razavi, and Y. Rahmat-Samii. A new look at phaseless planar near field measurements: limitations, simulations, measurements and a hybrid solution // IEEE Antennas Propagat. Mag., April 2007. V. 49, No. 2. pp. 170-178.
- [18] S. F. Razavi, Y. Rahmat-Samii. Polarization sensing in planar near-field phaseless measurements // IEEE Trans. Antenna Propagat., 2008.
- [19] A. C. Ludwig. The definition of cross polarization // IEEE Trans. Antennas Propagat., Jan. 1973. pp. 116-119.
- [20] S. F. Razavi and Y. Rahmat-Samii. Non-ideal probe effect on the polarization extraction using the planar near-field phaseless antenna measurements // Antennas Propagat. Soc. Int. Symp., IEEE, 7-11 July 2008.
- [21] A. Papoulis. Error analysis in sampling theory // Proceedings of the IEEE, July 1966. V. 54, No. 7, pp. 947-955.
- [22] B. J. Hoenders. On the solution of the phase retrieval problem // Journal of Mathematical Physics, September 1975. V. 16, No. 9, pp. 1719-1725.

- [23] Iu. M. Bruk, L. G. Sodin. "On ambiguity of the image reconstruction problem", Optics Communications, Sept. 1979. V. 30, pp. 304-308,.
- [24] S. F. Razavi and Y. Rahmat-Samii. On the uniqueness of planar near-field phaseless antenna measurements based on two amplitude-only measurements // Antennas Propagat. Soc. Int. Symp., IEEE, 7-11 July 2008.
- [25] Y. Rahmat-Samii. Reflector Antennas, Chapter 15 in the book Antenna Handbook / edited by Y. T. Lo and S. W. Lee, 1988, New York, VNR Comp.
- [26] Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams and R. G. Yaccarino. The UCLA bi-polar planar-near-field antenna-measurement and diagnostics range // IEEE Antennas Propagat. Mag., Dec. 1995. V. 37, No. 6. pp. 16–35.

Manuscript received March 12, 2010



Seyyed Farhad Razavi was born in Tehran, Iran. He received his B.S.E.E from Sharif University of Technology and his M.S.E.E from University of Tehran on 2001 and 2003 respectively. He is currently pursuing his Phd at University of California, Los Angeles (UCLA). He has been working in the Antenna Research, Analysis, and Measurement Laboratory at UCLA

under the supervision of Professor Yahya Rahmat-Samii since January, 2005. His research interests are in antenna design and advanced antenna measurement techniques including phaseless measurements. He is the recipient of Best AMTA Student Paper Award for three consecutive years (2006-2008) and was awarded the best BS. Project from Sharif University sponsored by Schlumberger institute.



Yahya Rahmat-Samii is a Distinguished Professor, holder of the Northrop-Grumman Chair in electromagnetics, member of the US National Academy of Engineering (NAE) and the past chairman of the Electrical Engineering Department at the University of California, Los Angeles (UCLA). Before joining UCLA, he was a Senior Research Scientist at CalTech/

NASA's Jet Propulsion Laboratory. Dr. Rahmat-Samii was the elected 1995 President of IEEE Antennas and Propagation Society and also appointed an IEEE Distinguished Lecturer presenting lectures internationally. He is the current Chairman of the United States National Committee of the International Union of Radio Science (USNC-URSI), 2009-2011. Dr. Rahmat-Samii was elected as a Fellow of IEEE in 1985, a Fellow of IAE in 1986 and the Edmond S. Gillespie Fellow of AMTA in 2007. He also served as the Vice President of AMTA. Dr. Rahmat-Samii has authored and co-authored over 800 technical journal articles and conference papers and has written 30 book chapters and four books entitled, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, *Implanted Antennas in Medical Wireless Communications*, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, and *Impedance Boundary Conditions in Electromagnetics*. He is also holder of several patents. His pioneering research contributions cover diverse areas of modern analyses, designs, optimizations and measurements in electromagnetics engineering and antennas. Many of his original concepts have been used in NASA's planetary and earth observation missions and commercial personal communication systems. Rahmat-Samii has received numerous awards, including the 1992 and 1995 Wheeler Best Application Prize Paper Award for his papers published in the IEEE Antennas and Propagation Transactions, 1999 University of Illinois ECE Distinguished Alumni Award, IEEE Third Millennium Medal, and AMTA'2000 Distinguished Achievement Award. In 2001, Rahmat-Samii was the recipient of an Honorary Doctorate in Physics from the University of Santiago de Compostela, Spain. In 2001, he was elected as a Foreign Member of the Royal Flemish Academy of Belgium for Science and the Arts. In 2002, he received the Technical Excellence Award from JPL and in 2005 he was the recipient of the URSI Booker Gold Medal. He was the recipient of the 2007 Chen-To Tai Distinguished Educator Award of the IEEE Antennas and Propagation Society. In 2009, he was selected to receive the IEEE Antennas and Propagation Society highest award, Distinguished Achievement Award, for his outstanding career contributions. Prof. Rahmat-Samii is the designer of the IEEE AP-S logo which is displayed on all IEEE AP-S publications.

SYNTHESIS METHOD OF AN ARRAY PATTERN WITH MAXIMUM DIRECTIVITY AND NULLS AT ARBITRARY ANGLES

KENICHI KAGOSHIMA, HIROMICHI TERATAKE, SHIGEKI OBOTE

Statistical antenna theory which was established by Prof. Shifrin includes the synthesis concept for finding the source distribution. The synthesis concept is also important in designing array antennas. The synthesis for maximum directivity problem has been solved, but the maximum directivity problem with null constraint which is important in practical wireless communications has not been solved. In this paper, a new method using the Lagrange multipliers method is proposed to synthesize the array patterns with the maximum directivity and nulls at arbitrary angles. Numerical results are presented to ensure the theory.

Статистическая теория антенн, созданная профессором Шифриным, включает в себя и задачу синтеза для нахождения распределения источников. Этот вопрос особенно важен при конструировании антенных решеток. Задача синтеза решеток с максимальным КНД решена. Но проблема синтеза решеток с максимальным КНД при одновременном формировании нулей в заданных направлениях, важная при построении систем связи, не решена. В статье предлагается новый метод решения этой проблемы, основанный на использовании множителей Лагранжа. В подтверждение теории приведены результаты соответствующих численных расчетов.

1. INTRODUCTION

Statistical antenna theory, which was established by Professor Shifrin [1], has been an important field of antenna design and practical use, especially in the field of large antennas in both reflector antennas and array antennas. He has presented invited talks at many international conferences or symposia, one of which was presented at the International symposium on antennas and propagation held in Sapporo, August 1992 [2]. It includes "synthesis" concept to find the statistics of source distribution in antennas.

On the other hand, the pattern synthesis has been an important field in array antennas, and many valuable papers have been published. [3] The synthesis problem for maximum directivity of array antennas were successfully formulated by Cheng and Tseng for isotropic elements [4], and was extended to dipole elements, which are more practical, by Inagaki and Sekiguchi [5]. However, in wireless communications, maximizing $S/(I+N)$ is more important than S/N , where S , N , and I are the signal power, noise power and interference power, respectively. This means that antennas are required to achieve interference cancellation as well as maximum directivity. Cheng and Inagaki successfully obtained the excitation coefficients by using eigenvalues of matrices. However, this method cannot deal with the directivity optimization under null constraint. In this paper, we propose a new method using Lagrange multipliers for solving directivity optimization with null constraint. In section II and III, the theory of the method is described and numerical results are presented in section IV. In section V, conclusions will be summarized.

2. SYNTHESIS OF AN ARRAY ANTENNA WITH MAXIMUM DIRECTIVITY

Before describing the array synthesis of null constrained maximum directivity, the synthesis of the array antenna with maximum directivity is presented. This problem has been solved by Cheng and Tseng by using eigenvalues of the array factor matrix in the case of point sources and extended to the case of realistic antenna elements of dipoles. We present an alternative method using the method of Lagrange multipliers. Figure 1 shows the configuration of the array and the coordinates of the analysis. Fig.1 is the case of a linear array of dipoles, however the analysis method can be used in an arbitrary configurations such as a circular array or a two dimensional array. Suppose, $G(\theta, \phi)$ is the directivity to the direction of (θ, ϕ) . $G(\theta, \phi)$ can be expressed as

$$G(\theta, \phi) = \frac{[V]^\dagger [A] [A]^\dagger [V]}{[V]^\dagger [B] [V]} \quad (1)$$

where $[V]$ is the vector of excitation voltages of elements, $[B]$ is the matrix of real part of mutual admittance of the array, and $+$ denotes the complex conjugate transposed. $[A(\theta, \phi)]$ expresses the vector of the array factor due to the piecewise-sinusoidal current on the element, and these are given by the following equations, respectively.

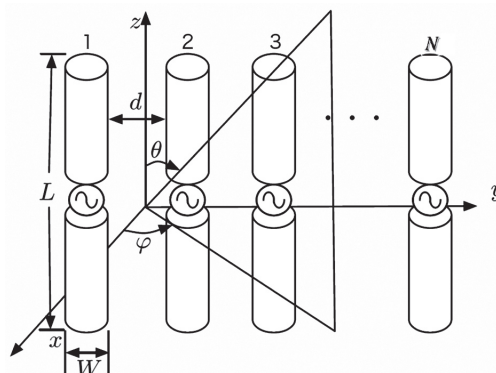


Fig. 1. Analysis Geometry

Table 1

Specifications for simulation

Frequency f	3[GHz]
Segment length	17 (sectioned sin wave)
Element length	0.5λ
wire radius	0.001λ
Element spacing	0.25λ
Element number	3 to 5 elements

$$[V] = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_N] \quad (2)$$

$$B_{ij} = \text{Re}(Y_{ij}) \quad (3)$$

$$[A] = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_N]^T \quad (4)$$

$$A_j = \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} \sin \theta \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{M_i} Y_{ij}^{n*} a_i^n. \quad (5)$$

In equation (5), a_i^n is the array factor due to the n -th piecewise sinusoidal current on the i -th element.

Since $G(\theta, \varphi)$ in equation (1) is expressed by the ratio of the Hermitian quadratic form, the $[V]$, which makes $G(\theta, \varphi)$ to be maximum, can be derived through the maximum eigenvalue of $([A][A]^\dagger - \lambda[B])$ and is given by the following equation.

$$[V] = [B]^{-1}[A]. \quad (6)$$

The maximum directivity G_m is also expressed by equation (7).

$$G_m = [A] [B]^{-1} [A]. \quad (7)$$

On the other hand, if we apply the method of Lagrange multipliers to equation (1), the cost function $F(V)$ may be defined as

$$F(V) = V^H A A^H V - \lambda(P_{in} - V^H B V), \quad (8)$$

where P_{in} is the input power of the array and H denotes the Hermitian operator.

Differentiating $F(V)$ by V and setting it to be zero, equation (9) can be derived.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial V} F &= \frac{\partial}{\partial V} (V^H A A^H V + \lambda \frac{\partial}{\partial V} (V^H B V)) \\ &= 2A A^H V + 2\lambda B V = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Also, differentiating $F(V)$ by λ and equating it to zero, the following input power condition is derived.

$$P_{in} = V^H B V. \quad (10)$$

From equation (9) and equation (10), the Lagrange multiplier λ can be obtained by the equation:

$$\lambda = -\frac{V^H A A^H V}{P_{in}}. \quad (11)$$

And substituting equation (11) into equation (9), the optimum excitation voltage vector $[V]$ can be given by equation (12)

$$V = \zeta B^{-1} A, \quad (12)$$

where $\zeta = P_{in} / V^H A$.

In equation (12), ζ includes the undetermined variable V . However, since it is common to all elements, excitation voltages V can be determined by equation (12) which is equal to equation (6) derived by the method of eigenvalue analysis. Equation (12) is the result obtained by the alternate method which can be extended to the synthesis problem of maximum directivity with null constraint and is described in section III.

3. SYNTHESIS OF MAXIMUM DIRECTIVITY WITH NULLS AT ARBITRARY ANGLES

Suppose, the directional function of the array antenna is given by $D(\theta, \varphi)$, where (θ_d, φ_d) is the direction of desired wave and (θ_i, φ_i) is that of interference wave. The problem synthesized is that the directivity to the direction of (θ_d, φ_d) should be maximum under the constraint of a null radiation to the direction of (θ_i, φ_i) . The cost function $H(V)$ of this problem can be defined by the equation.

$$\begin{aligned} H(V) &= V^H A(\theta_d, \varphi_d) A(\theta_d, \varphi_d)^H V - \\ &- \lambda_1 (P_{in} - V^H B V) - \lambda_2 (0 - V^H D(\theta_i, \varphi_i) D(\theta_i, \varphi_i)^H V). \end{aligned} \quad (13)$$

Hereafter, for simplicity, $A(\theta_d, \varphi_d)$ is expressed by A , and $D(\theta_d, \varphi_d)$ is expressed by D . As similar to equation (11), differentiating $H(V)$ by V and setting it to be zero, equation (14) can be derived.

$$\frac{\partial}{\partial V} H = 2A A^H V + 2\lambda_1 B V + 2\lambda_2 D D^H V = 0. \quad (14)$$

Also, differentiating $H(V)$ by λ_1 , and λ_2 , respectively, and equating them to zero, the following simultaneous equation can be derived.

$$\begin{cases} \lambda_1 B V = -A A^H V - \lambda_2 D D^H V \\ P_{in} = V^H B V \\ 0 = V^H D D^H V \end{cases} \quad (15)$$

Here, we set $\alpha_0, \beta_{01}, \alpha_1$ and β_{11} as follows.

$$\begin{cases} V^H A A^H V = \alpha_0 \\ V^H D D^H V = \beta_{01} \\ V^H D D^H B^{-1} A A^H V = \alpha_1 \\ V^H D D^H B^{-1} D D^H V = \beta_{11} \end{cases} \quad (16)$$

It should be noted that the left-hand side of equation (16) are all scalar and complex values, and λ_1 and λ_2 in simultaneous equation (15) can be solved as follows.

$$\lambda_1 = \frac{\det(T_1)}{\det(S_1)}, \quad \lambda_2 = \frac{\det(T_2)}{\det(S_1)} \quad (17)$$

Substituting λ_1 and λ_2 into the first equation of (15), excitation voltage V can be expressed as

$$V = -\frac{\det(S_1)}{\det(T_1)} B^{-1} A A^H V - \frac{\det(T_2)}{\det(T_1)} B^{-1} D D^H V, \quad (18)$$

where S_1, T_1 and T_2 are matrices given as follows.

$$S_1 = \begin{bmatrix} P_{in} & \beta_{01} \\ 0 & \beta_{11} \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} -\alpha_0 & \beta_{01} \\ \alpha_1 & \beta_{11} \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} P_{in} & -\alpha_0 \\ 0 & -\alpha_1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Since $A^H V$ and $D^H V$ are scalar values, V can be expressed by equation (20).

$$\begin{aligned} V &= -\zeta_1 B^{-1} A - \zeta_2 B^{-1} D = \\ &= \zeta_1 B^{-1} \begin{pmatrix} -A & \frac{\zeta_2}{\zeta_1} B^{-1} D \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (20)$$

where ζ_1 and ζ_2 are complex constants and given by the following equations.

$$\zeta_1 = \frac{\det(S_1)}{\det(T_1)} A^H V, \quad \zeta_2 = \frac{\det(T_2)}{\det(T_1)} D^H V. \quad (21)$$

In equation (20), ζ_1/ζ_2 can be manipulated and simplified as

$$\frac{\zeta_2}{\zeta_1} = \frac{\det(T_2) D^H V}{\det(S) A^H V} = -\frac{D^H B^{-1} A}{D^H B^{-1} D}. \quad (22)$$

Finally, V can be expressed by equation (23)

$$V = \zeta_1 B^{-1} \left(-A + \frac{D^H B^{-1} A}{D^H B^{-1} D} D \right). \quad (23)$$

If equation (23) is substituted to equation (1), the maximum directivity with the null radiation at (θ_i, φ_i) can be obtained. Also, antenna patterns can be calculated using excitation voltages given by eq. (23).

The third equation of (15) corresponds to the null condition at (θ_i, φ_i) and if N null points are specified, similar equations $V^H D_n D_n^H V = 0$ ($n = 1, 2, \dots, N$) are added as well as the Lagrange multipliers from λ_1, λ_2 to $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N+1}$. And similarly, optimum excitation voltages, which make the **directivity** of the direction (θ_d, φ_d) maximum and null radiations at (θ_i, φ_i) ($i = 1, 2, \dots, N$), can be derived.

4. NUMERICAL RESULTS

Based on the theory described in sections II and III, numerical studies have been carried out.

Specifications on numerical studies are shown in table 1. Fig. 2 shows radiation patterns of the array excited for achieving the maximum directivity at desired direction with null constraint and without constraint.

The desired direction is set at $\varphi=90$ degrees, that means the endfire radiation, and there is one null in (a) and two nulls in (b). Fig. 2 (c) shows the radiation pattern of the array with optimum excitation efficient for the directivity, which has no null constraint. The synthesized array without null constraint originally has null at $\varphi = -45$ degrees, therefore, the pattern of the array with null constraint at $\varphi = -45$ degrees is very similar to that of the array without null constraint. However, the null depth of the array with null constraint is very large compared to that of the array without null constraint.

Fig. 2 (b) shows the array pattern with two null constraints, one is at -45 degrees and the other is at 30 degrees. Both nulls are clearly formed at specified angles. Although the second null is specified at 30 degrees, which is rather close to that of the array without null constraint shown in Fig. 2 (c), the directive gain in the desired direction ($\varphi=90$ degrees) does degrade very little. Fig. 3 shows the array pattern with null at 60 degrees, which is close to that of the desired direction. In this case, the degradation of the directive gain becomes very large, especially when the element number $N=3$. Table 2 shows the excitation coefficients obtained by equation (12) and equation (23), when the element spacing is 0.25 wavelength.

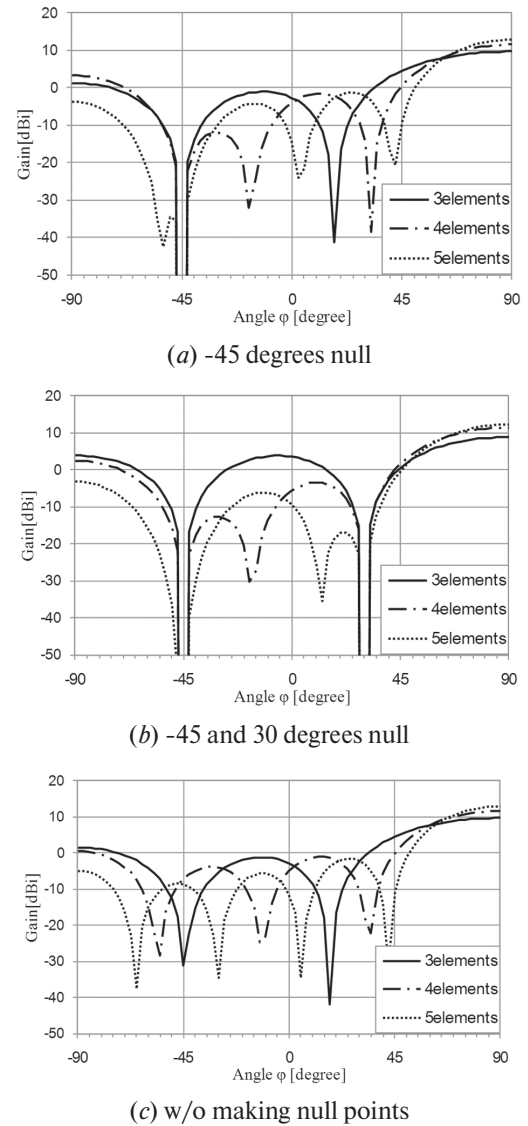


Fig. 2 Synthesized pattern for optimum directivity

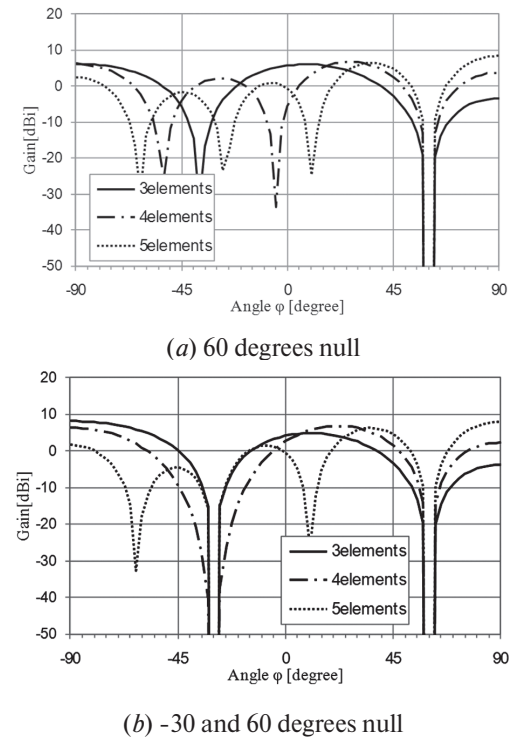


Fig. 3 Synthesized pattern for optimum directivity

Table 2

Excitation coefficients relative to the first element

N	Null direction	I_2/I_1	I_3/I_1	I_4/I_1	V_2/V_1	V_3/V_1	V_4/V_1	$Z_1=V_1/I_1$
2	w/o null	0.96 $\angle -146.19$	*	*	1.97507 $\angle -152.06$	*	*	$27.71 + j 52.21$
	$\angle -45$	0.93 $\angle -113.20$	*	*	3.35887 $\angle -102.44$	*	*	$33.01 + j 22.17$
	$\angle 30$	1.06 $\angle 132.52$	*	*	0.386778 $\angle 135.46$	*	*	$82.02 + j 103.76$
	$\angle 60$	1.08 $\angle 98.59$	*	*	0.300837 $\angle 74.68$	*	*	$116.284 + j 94.16$
3	w/o null	1.35 $\angle -161.64$	0.95 $\angle -324.61$	*	3.30418 $\angle -153.27$	2.31131 $\angle -304.61$	*	$15.08 + j 36.97$
	$\angle -45$	1.34 $\angle -161.30$	0.95 $\angle 36.15$	*	3.30435 $\angle -151.38$	2.33196 $\angle 57.20$	*	$15.87 + j 36.39$
	$\angle 30$	1.14 $\angle -172.46$	0.98 $\angle 15.80$	*	2.56406 $\angle -153.51$	1.42339 $\angle 29.86$	*	$18.65 + j 43.50$
	$\angle 60$	0.76 $\angle 165.29$	1.03 $\angle -22.75$	*	1.65876 $\angle -156.22$	0.821472 $\angle -52.50$	*	$26.05 + j 57.47$
4	w/o null	1.84 $\angle -164.86$	1.82 $\angle 26.34$	0.97 $\angle -140.29$	4.89378 $\angle -155.71$	5.64913 $\angle 44.71$	2.31505 $\angle -96.57$	$10.01 + j 27.36$
	$\angle -45$	1.98 $\angle -162.86$	1.97 $\angle 25.02$	0.96 $\angle -140.79$	7.36384 $\angle -178.95$	7.86897 $\angle 18.71$	3.30704 $\angle -116.67$	$-1.38 + j 21.79$
	$\angle 30$	1.93 $\angle -163.94$	1.89 $\angle 30.21$	0.96 $\angle -136.3$	5.15405 $\angle -157.80$	6.29589 $\angle 44.85$	2.68677 $\angle -89.14$	$8.85 + j 26.68$
	$\angle 60$	1.44 $\angle -176.17$	1.46 $\angle -3.13$	0.99 $\angle -177.23$	3.45458 $\angle -159.07$	2.85778 $\angle 20.96$	1.26776 $\angle 173.09$	$11.90 + j 35.91$

N : Number of elements, I_i : Input current of i -th element, V_i : Input voltage of i -th element

Fig. 4 shows the relation between gain reduction and the null location, when the number of nulls is one. When the angular difference becomes less than 45 degrees, the degradation of the directivity becomes large and less than 30 degrees, it significantly degrades. Fig. 5 shows the broadside case, wherein the beamwidth becomes narrower than that in the endfire case, then the degradation of the directivity is not so much, even if the angular difference is less than 30 degrees.

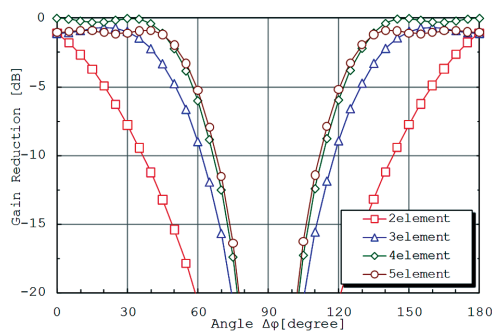


Fig. 4. Gain reduction vs angular difference between desired and null directions (one null, $d=0.25\lambda$)

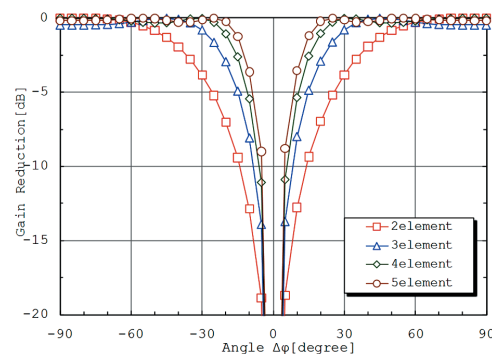


Fig. 5. Gain reduction vs angular difference between desired and null directions (one null, $d=0.5\lambda$)

Fig. 6 shows the input impedance of the array optimally excited with null constraint and without null constraint. Originally, the array without null constraint has nulls at -45 degrees and 20 degrees, so the input impedances of both arrays coincide.

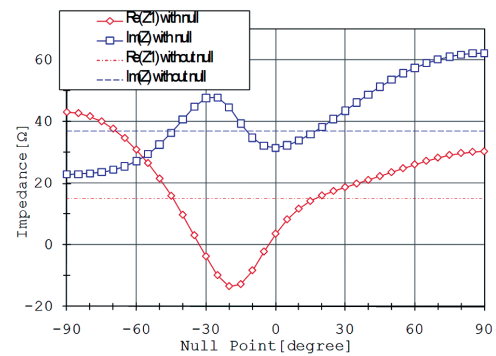


Fig. 6. Input impedance with and without null constraint ($N=3$, $d=0.25\lambda$)

CONCLUSIONS

A new array pattern synthesis method was proposed to maximize the directive gain at a desired direction and to form nulls at interference directions. Excitation coefficients for achieving the desired pattern have been formulated by using the method of Lagrange multipliers. Numerical calculations have been performed for linear arrays, and the excitation coefficients of the synthesized array have been presented. The effects of null constraints were investigated, and it was cleared that the angular difference between the desired direction and the interference direction was important. The synthesis method proposed in this paper is useful for designing array antennas and expected

to improve the performance of wireless communications.

The authors dedicate this article to Prof. Yakov Shifrin celebrating his 90 year jubilee and wish him all the best for many years.

References

- [1] Y. S. Shifrin, "Statistical antenna theory", the Golem Press, Boulder, Colorado, 1971.
- [2] Y. S. Shifrin, "Statistical antenna theory", Proceedings of ISAP'92, Sapporo, Japan, Aug., 1992.
- [3] R. E. Collin and F. J. Zucker, Antenna theory, chapter5, pp.194-203, McGraw-Hill, 1969.
- [4] D. K. Cheng and F. I. Tseng, "Gain optimization for arbitrary antenna arrays", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-15, #11, pp.356-366, 1967.
- [5] N. Inagaki, and T. Sekiguchi, "Exact design of an array of linear antennas with optimum directivity," IEICE Trans. on Commun., vol.53-B, no.11, pp.687-692, Nov. 1970.

Manuscript received March 15, 2010



Kenichi Kagoshima received the B.E., M.E. degrees in electronics engineering and Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan in 1969, 1971 and 1974, respectively. He joined Nippon Telegraph & Telephone Corporation (NTT) Laboratory, and engaged in research and development of many kinds of radio communication antennas, especially earth station antennas, satellite borne large multi-beam antennas and also mobile communication antennas. He had served as a research group leader of the antenna group of NTT Wireless Systems Laboratories. Since 1997, he has been with the Department of Media and Telecommunications of Ibaraki University. Currently, he is interested in numerical techniques for analyzing complex small anten-



nas and MIMO antennas. He was an associate Editor and the Editor of the IEICE(the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) Transaction on Communication from 1990 to 1992 and from 1993 to 1994, respectively. From 1999 to 2000, he was a chair of antennas and propagation professional group of the IEICE. He was also a Secretary and Treasure, Vice Chairman of IEEE AP-S Tokyo-Chapter in 1992, 1993 and 1994, respectively. He was a chairman of the 2002 Interim International Symposium of Antennas and Propagation (ISAP' 02). He served as a session organizer and chairperson of the IEEE Antennas and propagation symposium several times. He was awarded Yonezawa Prize for young engineers from IEICE in 1973 and best paper award in 1998.

Hiromichi Teratake graduated Department of Media and Telecommunications Engineering, The College of Engineering Ibaraki in 2008. Now he is in the master's course of the Graduate School of Science and Engineering Ibaraki University and attending to the study on MIMO.



Shigeki Obote received his B.E., M.E. and D.E. degrees in electrical and electronic engineering from Tottori University, Tottori, Japan, in 1996, 1998 and 2000, respectively. Since 2000, he has been with department of media and telecommunications engineering, faculty of engineering, Ibaraki University, Ibaraki, Japan, where he is currently an associate professor. His research interests are in RFID tag, MIMO and adaptive array antenna.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ ПОМЕХИ

Н.Н. МИНЕРВИН

Получено выражение для предельного размера антенны радиолокационной станции при компенсации воздействия внешней помехи.

Причиной ограничения размера антенны являются пространственные флуктуации фронта помеховой волны. Эти ограничения сравниваются со значительно менее существенными, имеющими место при приеме полезного сигнала, в отсутствие воздействия внешней помехи. В качестве примера для обоих рассмотренных случаев приведены численные оценки влияния турбулентности тропосферы.

The expression for a limit of size of the radar antenna at compensation of the interference action is obtained. Restrictions on the antenna size are caused by the spatial fluctuations of the interference front fluctuations. These restrictions are compared with significantly less important ones taking place when receiving the useful signal without action of interference. As examples for both cases, numerical estimates of the troposphere turbulence influence are given.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Возможности компенсации внешней помехи, определяющие в конечном счете отношение сигнал/помеха, ограничиваются случайными флуктуациями фронта помеховой волны.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является оценка предельных размеров апертуры антенны радиолокационной станции, при которых еще обеспечивается требуемое ослабление воздействия внешней помехи.

Анализ результатов последних исследований и публикаций. Мерой подавления внешней шумоподобной помехи может служить отношение дисперсий помехи на выходе и входе устройств пространственной обработки принимаемых реализаций сигналов и помех

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{ВЫХ}}^2}{\sigma_{\text{ВХ}}^2}.$$

Ограничения этого коэффициента ослабления рассмотрены с использованием методов и результатов статистической теории антенн [1] и алгоритмов оптимальной пространственной обработки принимаемых реализаций сигнала и помехи [2] в работе [3].

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Далее будут использоваться предельные значения этого коэффициента, которые справедливы для наиболее благоприятных условий ослабления воздействия внешней помехи. Этими условиями являются:

- наличие только одного источника внешней помехи;
- установившийся режим;
- существенное влияние только фазовых флуктуаций;
- радиус корреляции фазовых флуктуаций значительно больше размера апертуры антенны;
- реализовано оптимальное по критерию максимума отношения сигнал/шум амплитудно-фазо-

вое распределение на апертуре антенной системы, которое существенно отличается от случая отсутствия пространственных фазовых флуктуаций помехи (для линейной антенны получено в [3]).

Оценки, приведенные в [3], показали, что отклонения от этих условий ухудшают коэффициент ослабления помехи η в разы.

Для большей наглядности полученных результатов ограничимся рассмотрением линейной антенной системы и фазовым коэффициентом корреляции, описываемым соотношением

$$r_\phi = e^{-|z-z_1|/\rho_\phi},$$

где z и z_1 — координаты точек антенны, отсчитываемые от центра антенны; ρ_ϕ — радиус корреляции фазовых флуктуаций.

Будем считать также $\rho_\phi \gg L$, где L — длина антенны, так как только при этом условии возможно реальное ослабление помехи.

При соблюдении перечисленных условий в [3] получено соотношение

$$\eta = \frac{\sigma_\phi^2 L}{2\rho_\phi},$$

из которого для допустимого размера апертуры антенны следует

$$L \leq 2 \frac{\rho_\phi}{\sigma_\phi^2} \eta. \quad (1)$$

Представляет интерес сравнение этой величины с допустимым размером антенны при отсутствии воздействия внешней помехи.

При отсутствии воздействия внешней помехи будем предельными размерами апертуры антенны считать ее максимальные размеры, в пределах которых еще эффективно когерентное суммирование волн при случайных искажениях ее фронта.

В монографии [1] для оговоренных выше условий в режиме накопления полезного сигнала средняя мощность принимаемых колебаний определяется выражением

$$\overline{|f(\psi)|^2} = \frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int e^{-\frac{\sigma_\phi^2 |x-x_1|^2}{c} + j\psi(x-x_1)} dx dx_1,$$

где $c = \frac{2\rho_\phi}{L}$ – нормированный радиус корреляции фазовых флуктуаций; $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ – обобщенный угол; θ – реальный угол прихода волн, отсчитываемый от нормали к линии антенны; λ – длина волны; $x = \frac{2z}{L}$ и $x_1 = \frac{2z_1}{L}$ – относительные координаты точек z и z_1 , отсчитываемые от центра антенны; амплитудное распределение принято равномерным.

Анализ этого выражения в [1] позволяет получить для антенны, направленной на источник излучения ($\psi = 0$), закон убывания мощности сигнала с увеличением длины L антенны

$$\overline{|f(0)|^2} = 1 - \frac{\sigma_\phi^2 L}{3\rho_\phi}.$$

Задавая приемлемым уровнем Δ относительного падения мощности сигнала, для допустимой длины L антенны получим

$$L \leq 3 \frac{\rho_\phi}{\sigma_\phi^2} \Delta. \quad (2)$$

Сравнение ограничений на длину антенны, накладываемых неравенствами (1) и (2), показывает, что, несмотря на отличие рассматриваемых процессов обработки принимаемых сигналов, требования к длинам антенн определяются одними и теми же параметрами флуктуаций фронта принимаемых волн (ρ_ϕ и σ_ϕ^2).

Существенное отличие ограничений (1) и (2) определяется совершенно разными допустимыми значениями ослабления мощности внешней помехи и снижения мощности полезного сигнала.

Требования к η и Δ в каждом конкретном случае может быть различным. При дальнейших численных оценках будем использовать относительно слабое неравенство

$$\eta < 0,1\Delta. \quad (3)$$

При этом размер антенны при компенсации внешней помехи должен быть не менее, чем в 15 раз меньше размера антенны при простом накоплении полезного сигнала.

Причинами флуктуаций фронта волны могут быть: неоднородности тропосферы, неоднородности рельефа подстилающей поверхности позиции радиолокационной станции, погрешности изготовления антенн и др.

В качестве примера приведем конкретные оценки влияния флуктуаций диэлектрической проницаемости тропосферы. Необходимые для такой оценки возможные значения дисперсии σ_ϵ^2 флуктуаций диэлектрической проницаемости, а так же соотношения для дисперсии σ_ϕ^2 фазовых

флуктуаций и радиуса ρ_ϕ корреляции фазовых флуктуаций имеются в литературе (например, [4]).

Сразу отметим сильную изменчивость характеристик турбулентности тропосферы. Поэтому оценки сделаем для трех значений дисперсии флуктуаций диэлектрической проницаемости: минимального $\sigma_{\epsilon\min}^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$, среднего $\sigma_{\epsilon\text{ср}}^2 = 0,45 \cdot 10^{-12}$ и максимального $\sigma_{\epsilon\max}^2 = 9 \cdot 10^{-12}$.

Используя имеющиеся в литературе оценки ρ_ϕ и σ_ϕ^2 , в удобных для вычисления единицах имеем

$$\frac{\rho_\phi [\text{М}]}{\sigma_\phi^2} = \frac{\lambda^{3,2} [\text{см}]}{r^{1,6} [\text{км}]} \cdot L_0^{-0,6} [\text{км}] \times \begin{cases} 0,45 \cdot 10^6 & \text{при } \sigma_{\epsilon\min}^2, \\ 0,45 \cdot 10^4 & \text{при } \sigma_{\epsilon\text{ср}}^2, \\ 1,5 \cdot 10^3 & \text{при } \sigma_{\epsilon\max}^2. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь: L_0 – внешний масштаб турбулентности, который обычно приближенно полагают равным высоте источника излучения (будем считать $L_0 = 1$ км); r – путь волны в тропосфере (будем считать $r = 100$ км).

С использованием соотношений (1)-(4) для $\Delta = 0,1$ и $\eta = 0,01$ на рис. 1 представлены в логарифмическом масштабе численные оценки предельных размеров L_1 антенн в режиме накопления полезного сигнала (пунктирные линии 1, 2 и 3 соответственно для $\sigma_{\epsilon\min}^2$, $\sigma_{\epsilon\text{ср}}^2$ и $\sigma_{\epsilon\max}^2$) и предельных размеров L_2 антенн в режиме компенсации внешней помехи (сплошные линии 4, 5 и 6 соответственно для $\sigma_{\epsilon\min}^2$, $\sigma_{\epsilon\text{ср}}^2$ и $\sigma_{\epsilon\max}^2$).

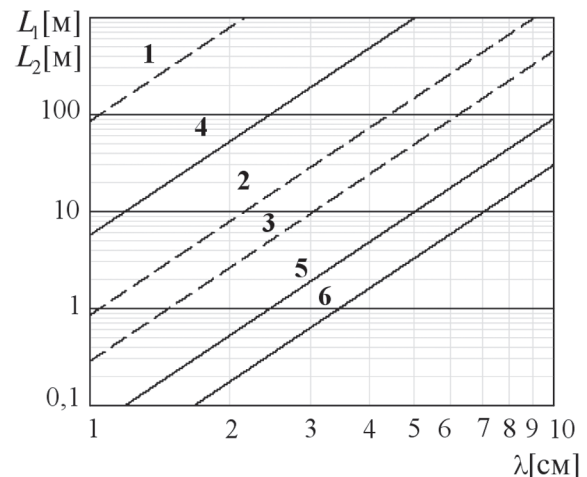


Рис. 1. Предельные размеры антенн

Из рисунка видно, что предельные размеры антенн существенно зависят от степени турбулентности тропосферы и длины волны.

В рассматриваемом диапазоне длин волн слабой турбулентности тропосферы в режиме накопления полезного сигнала (штриховая линия 1) ограничения размера антенны практически нет, а

в режиме компенсации внешней помехи (сплошная линия 4) такие ограничения могут возникнуть при длине волны около 1 см.

При средней и максимальной турбулентности тропосферы в режиме накопления полезного сигнала (штриховые линии 2 и 3) ограничения размера антенн могут возникнуть до длины волны около 2 см, а в режиме компенсации внешней помехи (сплошные линии 5 и 6) ограничения могут возникнуть до длины волны около 6 см.

Многие реальные радиолокаторы претендуют на значительно большее ослабление внешней помехи, чем принятое нами при численных оценках (до $\eta = -30$ дБ). В этом случае ограничение размеров антенны будет возникать до длин волн более 20 см.

Для низколетящих целей следует ожидать дополнительно существенного влияния неоднородностей подстилающей поверхности позиции радиолокатора (например, поверхности взволнованного моря). Это влияние может стать основным в метровом диапазоне длин волн и для высоколетящих целей.

Приведенный выше материал показывает, что алгоритмы и показатели качества пространственной обработки сигнала при наличии внешней помехи и соответствующие практические рекомендации должны учитывать результаты статистической теории антенн, полученные Я.С. Шифриным в [1]. Область их применения шире теории и техники только самих антенн.

Наряду с этой заметкой, подчеркивающей практическую значимость полученных Яковом Соломоновичем Шифриным фундаментальных результатов не только в статистической теории антенн, в эти юбилейные дни возникает желание выразить глубокое уважение к нему как доброму благородному человеку.

Я сравнительно мало служил под его формальным руководством, но непосредственно и косвенно он оказывал благотворное влияние на мою жизнь более 57 лет.

Мои друзья и сослуживцы в Москве (институт автоматики и телемеханики АН СССР) и в Харькове (Лев Константинович Черняев) сотрудничали с Яковом Соломоновичем в пятидесятые годы во время написания им кандидатской диссертации по теории электронно-волновой лампы (передового фронта радиоэлектроники тех лет) и делились своими уважительными впечатлениями от этого сотрудничества.

Яков Соломонович принимал у меня кандидатские экзамены по специальности (широкий и узкий профили). Я запомнил его глубокие вопросы и доброжелательное отношение к экзаменуемому. Благодаря его рекомендации моим официальным оппонентом по кандидатской диссертации был физик мирового уровня Александр Ильич Ахиезер, общение с которым для меня было большой честью.

Большое уважение к Якову Соломоновичу способствовали престижу АРТА им. Л.А. Говорова в научном мире и вниманию к ее представителям в частности. Именно этим я объясняю успешность своих отдельных контактов с выдающимся физиком чл.-кор. АН СССР Сергеем Михайловичем Рытовым и создателем уникальных радиолокационных комплексов чл.-кор. АН СССР Григорием Васильевичем Кисунко. Это не требовало особых просьб, все происходило в пределах рядового рабочего сотрудничества.

Вне служебных отношений Яков Соломонович — очень благожелательный интересный собеседник, оптимистичный жизнерадостный человек («душа компании»).

Такие люди украшают жизнь, и очень хочется, чтобы Яков Соломонович много-много лет продолжал это делать.

Литература.

- [1] Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. — М.: Сов. радио, 1970. — 384 с.
- [2] Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1981. — 416 с.
- [3] Минервин Н.Н. Влияние случайных искажений в тропосфере помеховой волны на эффективность ее подавления корреляционным автокомпенсатором // Радиотехника. Всеукр. научно-технический сборник. ХНУРЭ. 2006. Вып. 147. — С. 149-156.
- [4] Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. — М.: Радио и связь, 1983. — 220 с.

Поступила в редколлегию 24.02.2010



Минервин Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Область научных интересов: учет условий распространения радиолокационных сигналов при их обработке.

СТАТИСТИКА АДАПТИВНЫХ ОПТОУПРАВЛЯЕМЫХ АНТЕНН

В.И. КАРПЕНКО, О.В. КАРПЕНКО, Р.А. ЗБРИЦКИЙ, В.В. ОНИЩЕНКО

В настоящее время для решения ряда важных задач в информационных и радиолокационных системах используется миллиметровый диапазон длин волн. Одним из перспективных направлений освоения миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн являются оптоуправляемые антенны, позволяющие осуществлять пространственно-временную обработку сигналов непосредственно в раскрыве антенны. Результаты теории и практики построения таких антенн приведены авторами в ряде работ. В данной работе на основе статистической теории антенн проведены теоретические исследования, которые позволили в зависимости от характеристик полупроводниковых покрытий, структуры адаптивной переизлучающей системы с оптоуправляемым покрытием произвести анализ потенциальных возможностей таких систем в зависимости от решаемых задач. При этом статистика формируемых радиоголограмм рассматривается на основе математической модели статистических характеристик поля в плоскости приемной апертуры и характеристик полупроводникового покрытия. А статистические характеристики восстанавливаемых радиоизображений объектов, выраженные через статистические характеристики применяемого полупроводника, позволили определить дисперсию несмещенной оценки измеряемых параметров.

Nowadays the millimeter range of wavelengths is used for solving the number of important problems in the information and radiolocation systems. One of perspective directions in mastering the millimeter and submillimeter radio waves range technology is the implementation of optically controlled antennas that enable to carry out the space-time signal processing directly in the antenna aperture. The results of the theory and practice of such antennas design are shown by the authors in a number of their works. In the article, on the basis of the statistical antenna theory, the theoretical investigations are carried out, which allowed to impose the requirements on basic parameters of the used optically controlled coverings and to analyze their potentialities depending on problems to be solved with a specific adaptive system incorporating the optically controlled antenna. The requirements, being subject to semiconductor parameters and features, are based on the statistical description of the information registered on the optically controlled antenna covering; the mathematical model of the field in the receive antenna aperture and its statistical characteristics; the analysis of statistical characteristics of radio images being restored from registered radioholograms; the mathematical expressions obtained to estimate the potential evaluation precision of linear dimensions of the restored object radioimage.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в развитии антенной техники для получения высокой угловой разрешающей способности является переход к миллиметровому диапазону длин волн. Однако нестабильности приемо-передающих трактов и неоднородности турбулентной атмосферы существенным образом ограничивают линейные размеры антенн этого диапазона. Эти причины побудили к решению вопроса построения адаптивных систем, обеспечивающих пеленгацию и получение некоординатной информации в условиях мультипликативных помех.

На кафедре квантовой электроники ВИРТА им. Л.А. Говорова, начиная с 1985 года, активно проводились исследования по созданию адаптивных оптоуправляемых переизлучающих антенн. Они базировались на показанной принципиальной возможности создания антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, основанных на изменении комплексного коэффициента отражения СВЧ поля в полупроводниковых структурах под воздействием оптического излучения. Отдельно следует выделить в этом направлении работу Бахраха Л.Д., Авраменко Р.Ф. и Николаевой В.И., показавших принципиальную возможность осуществления фазового

управления отраженным СВЧ сигналом в многослойных полупроводниковых структурах с помощью оптического излучения, которая нашла благоприятную почву для развития вопросов обработки радиолокационной информации с помощью методов и устройств оптической обработки сигналов.

Развитие теории и техники обработки сигналов миллиметрового диапазона длин волн в оптическом диапазоне достаточно полно изложено в ряде работ [2–8, 11], где основное внимание уделено переизлучающим адаптивным радиолокационным системам с оптоуправляемыми антеннами, в непосредственном раскрыве которых осуществляется обработка принимаемых сигналов голографическим методом. Это позволяет с помощью сформированного опорного сигнала получить неискаженное радиоизображение наблюдаемого объекта в условиях мультипликативных помех. Однако в работах не рассмотрены вопросы статистической оценки влияния характеристик оптоуправляемых покрытий и конструктивных особенностей таких систем на качественные показатели формируемых радиоизображений объектов.

Устранение этого пробела базируется на результатах основополагающей работы Я.С. Шифрина [1], который, занимаясь педагогической и на-

учной деятельностью в ВИРТА им. Л.А. Говорова, оказал огромное влияние на развитие антенной техники практически всех диапазонов длин волн и основал новое научное направление — статистической теории антенн. Яков Соломонович активно оказывал поддержку новым работам и не только в области антенной техники, что благоприятно повлияло на становление учебного и научного процессов в ВИРТА ПВО им. Л.А. Говорова и других высших военных учебных заведениях. Это способствовало тому, что академия заняла ведущее место среди научных и научно-производственных учреждений и предприятий СССР в разработке адаптивных антенных систем различного назначения.

1. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ОПТОУПРАВЛЯЕМЫХ АНТЕНН И СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Простейшая оптоуправляемая антенна, рис. 1, представляет собой структуру, содержащую полупроводниковый слой 1, диэлектрик 2, воздушный зазор 3, проводник 4.

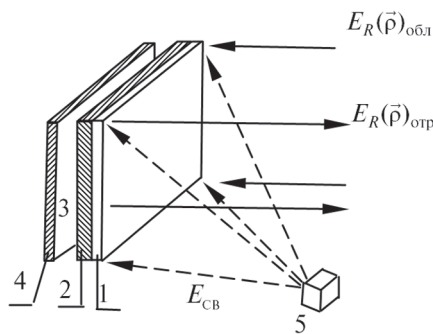


Рис. 1. Оптоуправляемая антенна

Под воздействием светового излучения 5 изменяется проводимость полупроводникового слоя, что приводит к амплитудным и фазовым изменениям отраженного СВЧ сигнала $E_R(\rho)_{отр}$ в каждой точке многослойной структуры. При изменении интенсивности светового сигнала $E_{св}$ в каждой точке полупроводникового покрытия можно управлять амплитудно-фазовым распределением отраженного СВЧ поля в раскрыве оптоуправляемой антенны (ОА), т.е. оптоуправляемая антенна облучается СВЧ сигналом с известным амплитудно-фазовым распределением, а процесс управления излучением осуществляется сигналами, формируемыми на оптической несущей частоте. Поэтому с помощью такой антенны, например, легко создавать управляемую радиолинзу, которая обеспечивает не только сканирование, но и фокусировку отражаемого СВЧ поля на излучение и прием в зависимости от создаваемой оптическим излучением двумерной картины освещенности полупроводниковой поверхности.

На кафедре квантовой электроники ВИРТА ПВО им. Л.А. Говорова, в дальнейшем Харьковский Военный Университет, проведена теоре-

тическая разработка вопросов формирования многослойных полупроводниковых покрытий, обеспечивающих изменение фазы отраженного СВЧ сигнала в пределах от 0 до 2π при реализуемых интенсивностях облучения полупроводниковых покрытий с помощью современных лазеров. Это позволило разработать адаптивные переизлучающие системы, в которых пространственно-временная обработка радиосигналов осуществлялась непосредственно в раскрыве оптоуправляемой антенны [2].

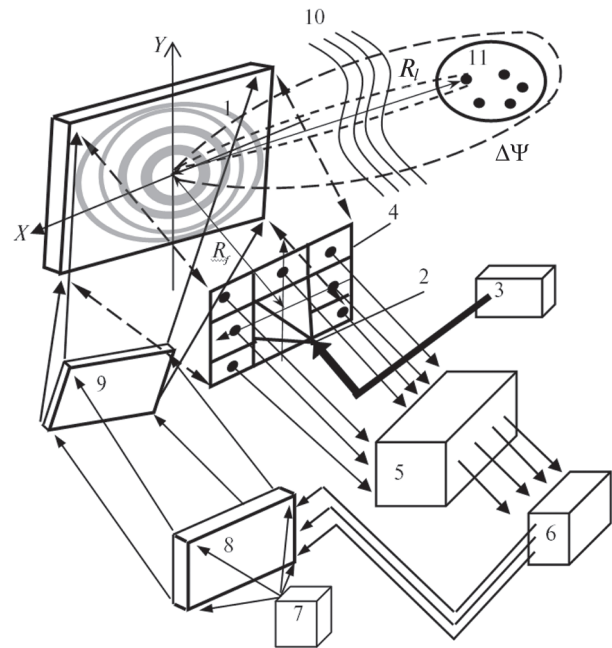


Рис. 2. Структурная схема адаптивной оптоуправляемой антенны

Структурная схема адаптивной оптоуправляемой антенны представлена на рис. 2, где: 1 — оптоуправляемая антенна (ОА); 2 — рупорный СВЧ облучатель; 3 — СВЧ генератор; 4 — матрица приемных СВЧ элементов, расположенная в фокальной плоскости оптоуправляемой антенны (картинная плоскость наблюдаемого объекта); 5 — приемно-усилительный тракт; 6 — устройство оптической обработки сигналов; 7 — источник лазерного излучения; 8 — пространственно-временной модулятор лазерного излучения; 9 — проекционная оптика; 10 — турбулентная среда распространения радиоволн; 11 — наблюдаемый протяженный объект, содержащий M блестящих точек.

В работе [3] приведены результаты исследования экспериментального макета адаптивной оптоуправляемой антенны, а основные требования к реализации основных узлов получены в [4].

Принцип работы такой антенны заключается в следующем. Например, по результатам внешнего целеуказания необходимо облучить отдельную l -ю блестящую точку объекта 11, который может находиться в дальней или в зоне Френеля антенны 1. Для этого при отсутствии турбулентной среды на поверхности полупроводника антенны

следует создать освещенность, которая представляет собой чередующиеся светлые и темные полосы, радиусы кривизны которых в простейшем случае определяются выражениями и являются результатами интерференции двух волн:

$$\rho_n = \sqrt{n\lambda F + \left(\frac{n\lambda}{2}\right)^2}, \quad n=0,1,2,3\dots,$$

где F — эквивалентное фокусное расстояние радиолинзы:

$$F = \frac{R_l R_f}{R_l + R_f}.$$

Первая волна распространяется от l -й блестящей точки, расположенной на дальности R_l от начала координат антенны, а вторая — от СВЧ облучателя 2, расположенного в картинной плоскости наблюдаемого объекта на расстоянии R_f .

Рассмотрим последовательность процесса адаптации такой антенны и получения радиоизображения протяженного объекта, содержащего M блестящих точек. Считаем, что дифракционная разрешающая способность антенны позволяет разрешать отдельные блестящие точки. При наличии турбулентной атмосферы у цели формируется диаграмма направленности $\Delta\Psi$, которая перекрывает все блестящие точки цели. В работах [3, 5, 6] показано, что при многократном переизлучении фазосопряженного поля на цели формируется опорный сигнал. А при контроле за процессом адаптации его можно сформировать за три цикла переизлучения на протяженной цели. При этом в каждом цикле переизлучения осуществляется прием сигналов матрицей приемных СВЧ элементов 4, усиление их в тракте 5, перенос спектра сигналов на оптическую несущую частоту, преобразование полученного поля по Фурье (Френелю) и гетеродинирование его в устройстве 6, что позволяет на его выходе формировать на оптической несущей частоте в определенном масштабе поле, фазосопряженное по отношению к принимаемому оптоуправляемой антенной 1. Это поле через пространственно-временной модулятор лазерного излучения 8 и проекционную оптику проецируется на поверхность полупроводникового покрытия антенны 1.

Таким образом, на оптоуправляемом полупроводниковом покрытии формируется радиоголограмма, облучение которой СВЧ сигналом с СВЧ облучателя 2 обеспечивает переизлучение фазосопряженного поля по отношению к принимаемому. При этом на цели формируется опорный сигнал с дифракционной разрешающей способностью, определяемой линейными размерами переизлучающей антенны, т.е. вся переизлучаемая энергия фокусируется на одной из блестящих точек протяженной цели. Принятый опорный сигнал запоминается, а на излучение формируется радиоголограмма, аналогичная первому циклу излучения, а при приеме сигналов от всех блестя-

щих точек протяженной цели на антенне формируется фазосопряженная голограмма от опорного сигнала.

Поскольку поле, принимаемое от всех блестящих точек протяженной цели, несет информации о турбулентной атмосфере точно такую же, как и опорный сигнал, радиоголограмма которого сформирована на полупроводниковом покрытии, то в картинной плоскости наблюдаемого объекта (на выходе матрицы приемных СВЧ элементов) формируется радиоизображение отдельных блестящих точек.

Предложенная структурная схема адаптивной оптоуправляемой антенны позволяет исключить влияние турбулентной атмосферы и ряд внутренних нестабильностей отдельных элементов, изменяющихся медленнее процесса адаптации на процесс формирования радиоизображения объекта.

Однако на качество этих радиоизображений оказывают влияние следующие факторы: качество сформированных радиоголограмм на оптоуправляемом покрытии, которое в свою очередь зависит от характеристик используемых полупроводников, статистических погрешностей оптического устройства обработки радиосигналов и проекционной аппаратуры, статистических характеристик радиосигналов, поступающих на вход оптоуправляемой антенны от протяженной цели и опорного сигнала.

Проведенные экспериментальные исследования [2] показали, что изменение параметров оптического устройства обработки радиосигналов и проекционной аппаратуры является медленным по отношению ко времени цикла переизлучения в адаптивной системе и может в дальнейшем не учитываться.

Экспериментальная оптоуправляемая антенна 1 представлена на рис. 3. Как видно она состоит из отдельных полупроводниковых пластинок 2.

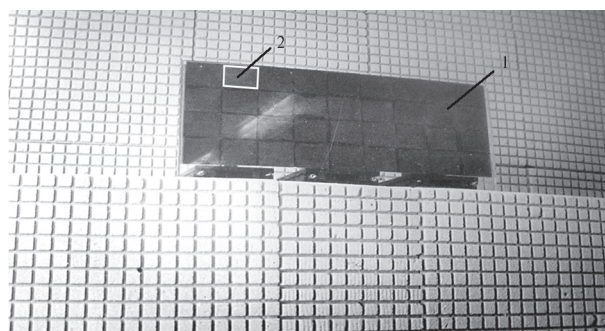


Рис. 3. Оптоуправляемая антенна

Отношение линейных размеров отдельных пластинок к длине отражаемой радиоволны совпадает с отношением характерного линейного размера проявляющегося отдельного зерна на фотопленке к длине световой волны, что позволит использовать методики статистической оценки свойств радиоголограмм на основе статистики оптической голографии. С другой стороны минимальные размеры элементарного участка

антенного покрытия Δ_0 управляемого световым излучением, ограничены средней длиной пробега электронов полупроводникового слоя и составляют порядка 0,3–0,8 см, которые и ограничивают линейные размеры максимальных пространственных частот, формируемых оптическим освещением.

Следует отметить, что максимальная пространственная частота оптического излучения зависит от конструктивных особенностей адаптивных оптоуправляемых систем и при значительных размерах антенн может совпадать с характерным размером отдельной пластинки антенны.

Поэтому, для формируемой радиоголограммы, подобно оптической, справедливо утверждение, что структура формируемой радиоголограммы представляет собой совокупность отдельных отражающих центров, отражающие характеристики которых зависят от разброса параметров отдельных пластинок, или же от отдельных участков Δ_0 каждой пластинки.

Тогда среднее значение коэффициента отражения пропорционально проводимости, зависящей от интенсивности светового потока, приходящегося на участок Δ_0 . Будем считать, что интенсивность светового поля, падающего на полупроводниковую поверхность $I_c(\vec{p})$, нормирована таким образом, что интеграл от нее по всей светочувствительной области Ω равен средней проводимости, возникающей в полупроводниковом слое

$$\frac{1}{\mu_n} \int_{\Omega} I_c(\vec{p}) d\vec{p} = \bar{G}_c, \quad (1.1)$$

для полезного сигнала и соответственно

$$\frac{1}{\mu_n} \int_{\Omega} I_{ш}(\vec{p}) d\vec{p} = \bar{G}_{ш}, \quad (1.2)$$

для шумового сигнала.

В этих выражениях $1/\mu_n$ — нормирующий множитель, определяемый из выражения

$$\frac{1}{\mu_n} \int_{\Omega} [I_c(\vec{p}) + I_{ш}] d\vec{p} = \bar{G},$$

где $\bar{G}$ — среднее значение проводимости полупроводникового покрытия.

Тогда среднее значение проводимости антенны при наличии сигнала и среднее значение шумовой проводимости

$$\bar{G}_c = \bar{G}'_c \cdot S; \quad \bar{G}_{ш} = \bar{G}'_{ш} \cdot S,$$

где $\bar{G}'_c$ — удельная проводимость при наличии сигнала; $\bar{G}'_{ш}$ — удельная шумовая проводимость антенны.

Если регистрация радиоголограммы осуществляется на линейном участке характеристики проводимости, тогда выполняется соотношение

$$\mu_n \bar{G}_{\Delta_0} \approx I(\vec{p}) \cdot \Delta_0. \quad (1.3)$$

Если же регистрация осуществляется на нелинейном участке, то при достаточно малых Δ можно записать

$$\mu_n \bar{G}_{\Delta_0} \approx \Phi[I_c(\vec{p})] \cdot \Delta_0,$$

где функция Φ описывает нелинейную зависимость. Тогда средняя проводимость будет описываться выражением

$$\mu_n \bar{G} = \int_{\Omega} \Phi[I_c(\vec{p})] d\vec{p} + I_{ш} \cdot S,$$

где S — площадь светочувствительного покрытия.

Если интенсивность $I(\vec{p})$ не флуктуирует на отдельном элементарном участке покрытия, то величину проводимости можно считать распределенной по закону Пуассона. Так как проводимость на отдельных элементарных площадках между собой независима, то совместное распределение по всем отражающим центрам представляется в виде

$$P(G_1, G_2, \dots, G_n) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{G_i!} \bar{G}_i^{G_i} e^{-\bar{G}_i}, \quad (1.5)$$

где средняя проводимость i -го отражающего центра (отдельной пластинки) определяется из выражения

$$\mu_n \bar{G}_i = \int_{\Delta_i} [I_c(\vec{p}) + I_{ш}] d\vec{p}.$$

Значение коэффициента отражения СВЧ сигнала отдельных пластинок (отражающих центров) можно также учесть некоторым интенсивностным параметром α . Значение этого параметра описывается свойствами каждой отражающей пластинки, а выражение для коэффициента отражения оптоуправляемого покрытия запишем в виде

$$\tau_n(\vec{p}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta(\vec{p} - \vec{p}_i). \quad (1.6)$$

Введенный параметр α_i связан с отражающими характеристиками каждой отдельной пластинки или отражательного центра. Следовательно, флуктуации величины α определяются непосредственно флуктуациями параметров отдельных полупроводниковых пластинок и их сочетанием на поверхности антенны, а значит и флуктуациями проводимости в каждой отдельной пластинке. Среднеквадратическое значение флуктуаций отражающих характеристик отдельных пластинок или же их центров обозначим через σ_α .

Таким образом, отражающие характеристики СВЧ сигнала полупроводникового покрытия определяются с одной стороны статистическими характеристиками входного светового поля, а с другой стороны — параметрами используемого полупроводникового покрытия. Введенные выше зависимости позволяют произвести оценку влияния статистических свойств оптоуправляемых

(полупроводниковых) покрытий на качество восстановленных радиоизображений. Для проведения дальнейших расчетов необходимо сначала определить статистические характеристики принимаемого оптоуправляемой антенной поля и провести их преобразование с учетом введенных статистических свойств оптоуправляемых покрытий.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯ В ПЛОСКОСТИ ПРИЕМНОЙ АПЕРТУРЫ И ЕГО СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сигнальную составляющую поля, поступающего на оптоуправляемую антенну от протяженного объекта, содержащего M блестящих точек, обозначим через $E_c(\vec{r}, t)$, а шумовую составляющую через $n(\vec{r}, t)$. Будем также считать, что выполняются соотношения

$$\langle n(\vec{r}, t) \rangle = 0;$$

$$\langle n(\vec{r}_1, t_1) n(\vec{r}_2, t_2) \rangle = N_0 \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \delta(t_1 - t_2). \quad (2.1)$$

Учитывая адитивный характер шума, поле в плоскости оптоуправляемой антенны представим в виде

$$E(\vec{r}, t) = E_c(\vec{r}, t) + n(\vec{r}, t). \quad (2.2)$$

Для объекта, находящегося на различных расстояниях от антенны, запишем принимаемое поле через комплексную амплитуду поля в картинной плоскости объекта и передаточную функцию пространства, отбросив временной параметр

$$E(\vec{r}) = \int_{\Omega_0} E(\vec{r}') H(\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}', \quad (2.3)$$

где

$$H(\vec{r} - \vec{r}') = \frac{1}{j\lambda R} \exp \left\{ jkR + j \frac{k}{2R} |\vec{r} - \vec{r}'|^2 \right\} \quad (2.4)$$

для зоны Френеля и

$$H(\vec{r} - \vec{r}') = \frac{1}{j\lambda R} \exp \left\{ jkR + j \frac{k}{2R} |\vec{r}|^2 - j \frac{k}{R} \vec{r} \vec{r}' \right\} \quad (2.5)$$

для зоны Фраунгофера, R — расстояние от центра картинной плоскости объекта до начала координат оптоуправляемой антенны; $\vec{r}$ и $\vec{r}'$ — текущие координаты в картинной плоскости объекта и оптоуправляемой антенны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; Ω_0 — область картинной плоскости наблюдаемого объекта.

При условии, что комплексная амплитуда одной из компонент электрического поля в картинной плоскости объекта удовлетворяет соотношению

$$\langle E(\vec{r}_1) E^*(\vec{r}_2) \rangle = \langle E^*(\vec{r}_1) E(\vec{r}_2) \rangle = U(\vec{r}_1) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2),$$

где $U(\vec{r}_1)$ — некоторая функция, отличающаяся от нуля в картинной плоскости объекта Ω_0 и являющаяся проекцией облученной поверхности объекта на его картинную плоскость. Представим корреляционную функцию комплексных ампли-

туд поля, принимаемого от протяженного объекта в виде блестящих точек, находящихся в зоне Френеля

$$\begin{aligned} K_E(\vec{r}_1, \vec{r}_2) &= \sum_{\ell=1}^M U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) H(\vec{r} - \vec{r}_1) \times \\ &\times H^*(\vec{r} - \vec{r}_2) = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \exp j \left\{ \frac{k}{2R} (|\vec{r}_1|^2 - |\vec{r}_2|^2) \right\} \times \\ &\times \sum_{\ell=1}^M U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \exp j \left\{ \frac{k}{R} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \vec{r} \right\}. \quad (2.6) \end{aligned}$$

Очевидно, что такая запись правомерна при условии, что линейный размер отдельной блестящей точки меньше линейного размера дифракционного предела разрешения оптоуправляемой антенны. С учетом (2.6) и (2.2) корреляционная функция принимаемого поля

$$\begin{aligned} R(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) &= \langle E(\vec{r}_1, t_1) E^*(\vec{r}_2, t_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{2} \text{Re } K_E(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \exp -j \{ \omega_0(t_1 - t_2) \} + \\ &+ N_0 \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \delta(t_1 - t_2). \quad (2.7) \end{aligned}$$

Как видно, корреляционная функция состоит из двух слагаемых, причем второе обусловлено исключительным фоном, а первое — только сигнальной составляющей. В дальнейшем это слагаемое будем обозначать $R_c(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2)$.

Среднее значение энергии Q , приходящейся на область Ω оптоуправляемого покрытия за время T , обусловлена только полем, рассеянным от объекта, и определяется выражением

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^T \int_{\Omega} R_c(\vec{r}_1, t; \vec{r}_2, t) d\vec{r} dt = \\ &= \frac{T}{2} \int_{\Omega} \sum_{\ell=1}^M U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) |H(\vec{r} - \vec{r}')|^2 d\vec{r} = \\ &= \frac{T}{2} \frac{S}{\lambda^2 R^2} \sum_{\ell=1}^M U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}). \quad (2.8) \end{aligned}$$

В последнем равенстве учитывалось, что $|H(\vec{r} - \vec{r}')|^2 = 1/(\lambda R)^2$, а через S обозначена площадь поверхности Ω оптоуправляемой антенны.

Для наблюдаемого поля, являющегося реализацией гауссовского процесса, функционал плотности вероятности (ФПВ) имеет вид [9, 10]

$$\begin{aligned} F[E(\vec{r}, t)] &= K_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Omega} \int_{\Omega} W(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) \times \right. \\ &\times E(\vec{r}_1, t_1) E(\vec{r}_2, t_2) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 dt_1 dt_2 \left. \right\}, \quad (2.9) \end{aligned}$$

где K_0 — константа, независимая от конкретной реализации $E(\vec{r}, t)$. Функция $W(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2)$ определяется из уравнения [9]

$$\int_0^T \int_{\Omega} R(\vec{\rho}_1, t_1; \vec{\rho}_2, t_2) W(\vec{\rho}_2, t_2; \vec{\rho}_3, t_3) d\vec{\rho}_2 dt_2 = \\ = \delta(t_1 - t_3) \delta(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_3). \quad (2.10)$$

В соответствии с методикой решения интегральных уравнений типа (2.10), ФПВ представим в виде [12]

$$F[E(\vec{\rho}, t)] = K_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2N_0} \int_0^T \int_{\Omega} E^2(\vec{\rho}, t) d\vec{\rho} dt - \right. \\ \left. -\frac{1}{2} \int_{\Omega_0} V(\vec{r}) \left| \int_{\Omega} H(\vec{r} - \vec{\rho}) E_0(\vec{\rho}) d\vec{\rho} \right|^2 d\vec{r} \right\},$$

где

$$E_0(\vec{\rho}) = \int_0^T E(\vec{\rho}, t) \exp -j(\omega_0 t) dt; \quad (2.11)$$

$$V(\vec{r}) = -\frac{1}{2N_0^2} \frac{U(\vec{r})}{1 + \left(\frac{T}{4N_0} \right) V(\vec{r})};$$

$$U(\vec{r}) = \sum_{\ell=1}^M U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}); \quad (2.12)$$

$$U_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) = \left| \dot{K}_{\ell}(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \right|^2, \quad (2.13)$$

где $\dot{K}_{\ell}$ — значение комплексного коэффициента отражения ℓ -ой блестящей точки протяженного объекта.

Данные выражения составляют полное статистическое описание принимаемого поля. В дальнейшем рассмотрим влияние введенных статистических характеристик оптоуправляемых покрытий на статистические характеристики поля, восстанавливаемого из регистрируемых радиоголограмм.

3. АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ, ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗ РАДИОГОЛОГРАММ

Рассмотрим случай, когда протяженный объект находится в зоне Френеля оптоуправляемой антенны. При этом в первом такте приема комплексная амплитуда поля в плоскости антенны описывается выражением (2.3) с учетом (2.4). Принятое поле формируется на входе приемных СВЧ элементов 4, рис. 2, и переносится в оптическое устройство обработки сигналов 6, где после преобразования по Френелю [3] и гетеродинирования через пространственно-временной модулятор 8 и проекционную оптику поступает на оптоуправляемую поверхность антенны. На ее поверхности регистрируется радиоголограмма, распределение световой интенсивности которой определяется интерференцией информационного и гетеродинного сигналов

$$I_c(\vec{\rho}) = A_0^2 + |E(\vec{\rho})|^2 + 2 \operatorname{Re} A_0 E(\vec{\rho}) \times \\ \times \exp -j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2F} \right] \right\}. \quad (3.1)$$

$$\text{где } E_c(\vec{\rho}) = A_0 \exp -j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2F} \right] \right\} \quad (3.2)$$

— гетеродинный сигнал, формируемый в оптическом устройстве обработки; $\vec{m}_0$ — единичный вектор, определяющий направление прихода сферической волны; F — эквивалентное фокусное расстояние.

При регистрации радиоголограммы на линейном участке характеристики проводимости полупроводникового покрытия и условия, что шумы, вносимые покрытием, пересчитаны на вход и характеризуются величиной $I_{1ш}$ с соответствующей дисперсией $\sigma_{1ш}^2$, коэффициент отражения сформированной радиоголограммы с учетом (1.2) можно записать

$$\tau_{\text{и}}(\vec{\rho}) = k_0 [I_c(\vec{\rho}) + I_{\text{ш}} + I_{1ш}] = k_0 [A^2 + |E(\vec{\rho})|^2 + \\ + 2A_0 \operatorname{Re} E(\vec{\rho}) \exp -j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2F} \right] \right\}], \quad (3.3)$$

где $A^2 = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} + I_{\text{ш}} + I_{1ш}$; $k_0 I_{1ш}$ — это то значение коэффициента отражения сформированной радиоголограммы, которое вызвано ошибками преобразования информационных сигналов в СВЧ ($\sigma_{\text{фр}}^2$) и оптических трактах ($\sigma_{\text{фо}}^2$) и определяется выражением

$$\sigma_{\text{фс}}^2 = \sigma_{\text{фо}}^2 + \sigma_{\text{фр}}^2. \quad (3.4)$$

Зарегистрированная радиоголограмма облучается полем от сформированного опорного сигнала.

$$E_o(\vec{\rho}) = A_b \exp j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\}, \quad (3.5)$$

где R_0 — расстояние от центра антенны до опорного сигнала сформированного на точке l протяженного объекта, а восстановленное поле в плоскости матрицы приемных элементов определяется выражением

$$E_{\text{и}}(\vec{r}') = A_b k_0 \int_{\Omega_0} \int_{\Omega} \tau_{\text{и}}(\vec{\rho}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') \times H(\vec{\rho} - \vec{r}) \times \\ \times \exp j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\} d\vec{r} d\vec{\rho}. \quad (3.6)$$

Учитывая ранее введенные обозначения и выражение (3.3), запишем выражение для определения интенсивности восстановленного радиоизображения

$$\begin{aligned}
 I(\vec{r}') = & \left| E_{\text{н}}(\vec{r}') \right|^2 = (A_{\text{в}} \cdot k_0)^2 \left| \int_{\Omega} A^2 + \left| E(\vec{\rho}) \right|^2 \times \right. \\
 & \times \exp j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\} H(\vec{\rho} - \vec{r}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') d\vec{\rho} + \\
 & + A_{\text{в}} \int_{\Omega} E^*(\vec{\rho}) H(\vec{\rho} - \vec{r}) d\vec{\rho} + A_0 \int_{\Omega} E(\vec{\rho}) \times \\
 & \times \exp j \left\{ 2k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\} H(\vec{\rho} - \vec{r}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') d\vec{\rho} \left. \right|^2. \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

Проанализируем слагаемые, несущие информацию о радиоизображении объекта

$$\begin{aligned}
 A_{\text{в}} \int_{\Omega_0} \int_{\Omega} E^*(\vec{\rho}) H(\vec{\rho} - \vec{r}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') d\vec{\rho} dr' = \\
 = \frac{S}{\lambda^2 R_0^2} \int_{\Omega_0} \int_{\Omega} E^*(\vec{\rho}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') \times \\
 \times \exp j \left[\frac{k}{2R} \left(\left| \vec{r}'_0 \right|^2 - \left| \vec{r}'_i \right|^2 \right) \right] h(\vec{r}'_i - \vec{r}'_0) \approx \sum_{i=1}^M E^*(\vec{r}'_i). \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

Слагаемое (3.8) выражения (3.7) описывает радиоизображение наблюдаемого объекта без влияния турбулентной атмосферы, а остальные слагаемые характеризуют расходящуюся волну.

Подставляя выражение для коэффициента отражения полупроводникового покрытия (1.6)

$$\tau_{\text{и}}(\vec{\rho}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta(\vec{\rho} - \vec{\rho}_i), \quad (3.9)$$

в (3.6) получим выражение для определения комплексной амплитуды восстановленного поля в следующем виде

$$\begin{aligned}
 E_{\text{и}}(\vec{r}') = A_{\text{в}} \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \\
 \times \exp j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\} H(\vec{\rho}_i - \vec{r}') \quad (3.10)
 \end{aligned}$$

и интенсивности восстановленного радиоизображения

$$I(\vec{r}') = \left| E_{\text{и}}(\vec{r}') \right|^2.$$

Рассматриваемые функции коэффициента отражения оптоуправляемого покрытия $\tau_{\text{и}}(\vec{\rho})$ и амплитуды восстанавливаемого поля $E_{\text{и}}(\vec{r}')$ являются случайными. Это выражается в том, что они зависят от случайной величины интенсивностного параметра отражения α полупроводникового покрытия и количества возникающих отражающих центров с соответствующими координатами $\vec{\rho}_i$, зависящими, в свою очередь, от входных световых сигналов. Вследствие квантового характера взаимодействия света с веществом, можно считать, что возникновение одних отражательных центров никак не сказывается на появлении других. Таким образом, возникающие центры

отражения являются статистически независимыми. Выполнение отмеченных условий позволяет использовать модель пуассоновского потока для описания совокупности возникающих центров отражения на оптоуправляемом покрытии.

Отражающие центры, возникающие за счет шумовых сигналов, можно считать величинами более высоких порядков малости и также описывать пуассоновским потоком с некоторой постоянной интенсивностью $I_{\text{ш}}$. Поэтому вся совокупность значений координат $\vec{\rho}_1, \dots, \vec{\rho}_n$ всех возникающих центров отражения также является пуассоновским потоком. При этом плотность вероятности координат возникающих центров отражения на поверхности антенны

$$\begin{aligned}
 P(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \dots, \vec{\rho}_n, n) = \frac{1}{n!} \prod_{i=1}^n I_{\text{н}}(\vec{\rho}_i) \times \\
 \times \exp \left[- \int_{\Omega} I(\vec{\rho}) d\vec{\rho} \right], \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

где $I_{\text{н}}(\vec{\rho})$, при условии соблюдения линейного режима записи с точностью до нормирующего множителя $\mu_{\text{н}}$, (1.2), равно

$$I_{\text{сн}}(\vec{\rho}) + I_{\text{шн}} + I_{\text{лшн}} = I_{\text{сн}}(\vec{\rho}) + I_{\text{шсн}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 I_{\text{н}}(\vec{\rho}) = \frac{1}{\mu_{\text{н}}} I_{\text{с}}(\vec{\rho}) + \frac{1}{\mu_{\text{н}}} I_{\text{шс}} = \frac{1}{\mu_{\text{н}}} A^2 + \frac{1}{\mu_{\text{н}}} \left| E(\vec{\rho}) \right|^2 + \\
 + \frac{2}{\mu_{\text{н}}} A_0 \operatorname{Re} E(\vec{\rho}) \exp \left\{ -jk \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\}. \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Нормирующий множитель $\mu_{\text{н}}$ выбирается из условия (1.2)

$$\int_{\Omega} I_{\text{н}}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} = \frac{1}{\mu_{\text{н}}} \int_{\Omega} [I_{\text{с}}(\vec{\rho}) + I_{\text{шс}}] d\vec{\rho} = \bar{G}, \quad (3.13)$$

где $\bar{G}$ – среднее значение проводимости полупроводникового покрытия.

Обозначив $I_{\text{шс1}} = I_{\text{шс}} / \mu_{\text{н}}$; $A_{01} = A_0 \sqrt{1/\mu_{\text{н}}}$; $E_1(\vec{\rho}) = E(\vec{\rho}) \sqrt{1/\mu_{\text{н}}}$ и $E_1(\vec{r}') = E(\vec{r}') \sqrt{1/\mu_{\text{н}}}$, представим соотношение (3.13) в виде

$$\begin{aligned}
 \bar{G} = I_{\text{шс1}} \cdot S + A_{01}^2 \cdot S + \int_{\Omega} \left| E_1(\vec{\rho}) \right|^2 d\vec{\rho} + \\
 + 2 H_{01} R_{\text{с}} \int_{\Omega} E_1^*(\vec{\rho}) \exp -j \left\{ k \vec{m}_0 \left[\vec{\rho} - \frac{\vec{\rho}^2}{2R_0} \right] \right\} d\vec{\rho}. \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Рассмотрим первые три слагаемых данного выражения. $I_{\text{шс1}} \cdot S = \bar{G}_{\text{шс}}$ – средняя проводимость, вызванная нестабильностью параметров оптоуправляемого покрытия по поверхности антенны $\bar{G}_{\text{шс}}$, а также наличием флуктуаций, возникающих при обработке с погрешностями сигналов в СВЧ и оптических трактах, которые в дальнейшем регистрируются на оптоуправляемом покрытии

тии $\bar{G}_{\text{ш1}}$, т.е. $\bar{G}_{\text{ш}\Sigma} = \bar{G}_{\text{ш}} + \bar{G}_{\text{ш1}}$. Первое слагаемое в данном выражении характеризует среднюю шумовую проводимость, возникающую в полупроводниковом покрытии антенны при отсутствии полезного сигнала. $\bar{G}_o = A_{o1}^2 \cdot S$ – средняя проводимость, обусловленная опорным сигналом, при условии, что информационный сигнал отсутствует, т.е. $E_1(\vec{p}) = 0$. $\bar{G}_c = \int_{\Omega} |E_1(\vec{p})|^2 d\vec{p}$ – средняя проводимость, обусловленная записью лишь полезного сигнала, т.е. когда $A_{o1} = 0$ и $I_{\text{ш}\Sigma} = 0$.

Величины $I_{\text{ш}\Sigma}$, A_{o1} , $E_1(\vec{p})$ и $E_1(\vec{r})$ в отличие от аналогичных величин без дополнительного единичного индекса отличаются тем, что они учитывают количественно и светочувствительные характеристики оптоуправляемого покрытия в отличие от величин $I_{\text{ш}}$, $E(\vec{p})$, $E(\vec{r})$ и A_o , которые определяются лишь интенсивностью соответствующих сигналов.

В дальнейшем будут использованы только величины с индексом “1” и поэтому для простоты обозначений дополнительный индекс будет опускаться.

Введем безразмерные комплексные амплитуды

$$E_{\text{н}}(\vec{p}) = \frac{E(\vec{p})}{\sqrt{\frac{1}{S} \int_{\Omega} |E(\vec{p})|^2 d\vec{p}}}, \quad E_{\text{н}}(\vec{r}) = \sqrt{\frac{S_0}{\bar{G}_c}} E(\vec{r}). \quad (3.14)$$

При этом

$$\bar{G}_c = \int_{\Omega} |E(\vec{p})|^2 d\vec{p} \approx \int_{\Omega_{\text{в}}} |E_{\text{н}}(\vec{r})|^2 d\vec{r}, \quad (3.15)$$

где Ω – поверхность оптоуправляемой антенны; $\Omega_{\text{в}}$ – поверхность плоскости восстановления радиоизображения.

Следует отметить, что выражение (3.15) справедливо лишь при потенциально высоком угловом разрешении оптоуправляемой антенны, позволяющем получать на наблюдаемом объекте несколько элементов разрешения.

Выражение (3.12) при введенных нормированных величинах представим в виде

$$I(\vec{p}) = \frac{1}{S} \bar{G}_{\text{ш}} + \frac{1}{S} \bar{G}_o + \frac{1}{S} \bar{G}_c |E_{\text{н}}(\vec{p})|^2 + \frac{2}{S} \sqrt{\bar{G}_o \bar{G}_c} \operatorname{Re} E_{\text{н}}^*(\vec{p}) E_0 \exp \left[-j \frac{k}{R_0} \vec{r} \vec{n}_0 \left(\vec{p} - \frac{\vec{p}^2}{2R_0} \right) \right].$$

С учетом (1.6), среднее значение коэффициента отражения оптоуправляемого покрытия определяется из выражения

$$\bar{r}_{\text{н}}(\vec{p}) = k_o \bar{\alpha} I(\vec{p}), \quad (3.16)$$

где k_o – коэффициент пропорциональности.

Тогда, воспользовавшись выражением (3.2), можно записать выражение для среднего значения коэффициента отражения

$$\bar{r}_{\text{н}}(\vec{p}) = \bar{\alpha} \left\{ A_o^2 + |E_0(\vec{p})|^2 + 2 \operatorname{Re} A_o E(\vec{p}) \times \exp -j \left[k \vec{m}_0 \left[\vec{p} - \frac{\vec{p}^2}{2R_0} \right] \right] \right\}. \quad (3.17)$$

При условии высокого углового разрешения и восстановлении радиоголограммы сферической волной, средняя интенсивность восстановленного радиоизображения оптоуправляемой антенной может быть представлена в виде

$$\bar{I}(\vec{r}) = \bar{\alpha}^2 \frac{A_o^2 \mu_{\text{н}}}{\lambda^2 R_0^2} \left\{ \frac{\bar{G}_o \bar{G}_c \mu_{\text{н}}}{M_0} |E_{\text{н}}(\vec{r}' + \vec{R}_0 \vec{m}_0')|^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right) \bar{\sigma} \right\}, \quad (3.18)$$

где $M_0 = S \cdot S_0 / (\lambda R)^2$ – число элементов разрешения, обеспечиваемых оптоуправляемой антенной на восстанавливаемом радиоизображении объекта; σ_{α}^2 – дисперсия флуктуаций коэффициента отражения полупроводниковых пластинок, определяемая экспериментально; $\sigma_{\alpha_1}^2$ – дисперсия флуктуаций коэффициента отражения полупроводникового покрытия, возникающая при обработке с погрешностями в СВЧ и оптических трактах принимаемой оптоуправляемой антенной сигналов.

Из полученного выражения следует, что в восстановленном радиоизображении средняя интенсивность сигнала пропорциональна средним проводимостям, обусловленным опорным и информационным сигналами $\bar{G}_o$ и $\bar{G}_c$, интенсивности восстанавливаемого сигнала и обратно пропорциональна числу элементов разрешения M_0 .

Общее превышение полезного сигнала над фоном для восстановленного радиоизображения определяется из отношения

$$\bar{G}_o \bar{G}_c |E_{\text{н}}(\vec{r}' + \vec{R}_0 \vec{m}_0')|^2 / M_0 \bar{G} \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right), \quad (3.19)$$

где $\bar{G}$ – среднее значение проводимости оптоуправляемого покрытия, определяемое выражением (3.13).

Корреляционная функция распределения интенсивности в восстановленном радиоизображении определяется из выражения

$$K(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \langle I(\vec{r}_1) I(\vec{r}_2) \rangle - \langle I(\vec{r}_1) \rangle \cdot \langle I(\vec{r}_2) \rangle. \quad (3.20)$$

С учетом (3.18), запишем выражение для корреляционной функции восстановленного поля

$$K(\vec{r}_1', \vec{r}_2') = 2 \bar{\alpha}^4 \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right) \frac{A_o^4}{\lambda^4 R^4} \frac{\bar{G}_o \bar{G}_c}{M_0} \times \times \operatorname{Re} \left\{ \left[(\bar{G}_{\text{ш}} + \bar{G}_o) h_R(\vec{r}_1' - \vec{r}_2') + \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \bar{G}_c \exp \left\{ -j \left[\pi \frac{1}{\lambda R_0} |\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2|^2 \right] \right\} \times \\
 & \times \frac{1}{S_0} \int_{\Omega} E_H(\vec{r}) E_H^*(\vec{r} - \vec{r}_1 + \vec{r}_2) \exp \left\{ j \frac{k}{R_0} (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \vec{r} \right\} \times \\
 & \times d\vec{r} \left] E_H^*(\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0) E_H(\vec{r}'_2 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0) \times \right. \\
 & \left. \times \exp \left\{ -j \frac{k}{2R_0} \left[|\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0|^2 - |\vec{r}'_2 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0|^2 \right] \right\} \right\}, \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } h_R(\vec{r}') = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \exp(j \frac{k}{R_0} \vec{r}' \vec{\rho}) d\vec{\rho}.$$

Из полученного выражения определим дисперсию средней интенсивности восстановленного радиоизображения

$$\begin{aligned}
 \sigma_I^2(\vec{r}) = K(\vec{r}, \vec{r}) = 2\bar{\alpha}^4 \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right) \frac{A_B^4}{\lambda^4 R_0^4} \times \\
 \times \frac{\bar{G}_0 \bar{G}_c}{M_0} |E_H(\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0)|^2, \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

и соответственно коэффициент корреляции интенсивности в восстановленном радиоизображении

$$\begin{aligned}
 k(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{K(\vec{r}'_1, \vec{r}'_2)}{\sqrt{K(\vec{r}'_1, \vec{r}'_1) K(\vec{r}'_2, \vec{r}'_2)}} = Z_1 [(\bar{\sigma}_{\text{ш}} + \bar{\sigma}_0) \times \\
 \times h_R(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) + \bar{G}_c \exp \left(-j \pi \frac{1}{R_0} (\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2)^2 \right) \times \\
 \times \frac{1}{S_0} \int_{\Omega_0} E_H(\vec{r}') E_H^*[\vec{r}' - (\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2)] \times \\
 \times \exp \left[j \frac{k}{R_0} (\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) \vec{r} \right] d\vec{r}'], \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 Z_1 = \frac{1}{G} \text{Re} \exp \left\{ -j \frac{k}{2R_0} \left[|\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0|^2 - |\vec{r}'_2 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0|^2 \right] \right\} \times \\
 \times \frac{E_H(\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0) E_H(\vec{r}'_2 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0)}{|E_H(\vec{r}'_1 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0)| |E_H(\vec{r}'_2 + \vec{R}_0 \vec{m}'_0)|}.
 \end{aligned}$$

Наличие экспоненциальных множителей, а также вместо традиционной автосвертки – интеграла несколько другого вида связано с тем, что восстановление и запись радиоголограммы осуществляется сферическими волнами.

Как видно, в области формирования радиоизображения аддитивно участвуют два независимых между собой случайных процесса с различными корреляционными свойствами.

Для первого из них радиус корреляции

$$\Delta r_{k_1} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\Omega_0} h_R(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) d\vec{r}'} = \sqrt{\frac{S_0}{\pi M_0}}, \quad (3.24)$$

а для второго

$$\Delta r_{k_2} = \frac{1}{\pi S_0} \int_{\Omega_0} \int_{\Omega_0} E_H(\vec{r}') E_H[\vec{r}' - (\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1)] d\vec{r}' d\vec{r}'. \quad (3.25)$$

Следовательно, всплесков интенсивности, соответствующих быстрым флуктуациям по всей области радиоизображения оказывается порядка M_0 , а медленных – порядка единицы. При этом относительный вклад быстрых флуктуаций по сравнению с медленным определяется величиной

$$z = (\bar{G}_0 + \bar{G}_{\text{ш}}) / \bar{G}_c.$$

Таким образом, восстановленное распределение интенсивности электромагнитного излучения, представляющее радиоизображение наблюдаемого объекта, является сравнительно гладким, но на этом гладком фоне появляются резкие выбросы. Суммарное число таковых выбросов порядка M_0 и оно тем резче, чем больше проводимость полупроводникового покрытия антенны за счет шумовых составляющих различной природы и гетеродинного сигнала, формирующего радиоголограмму. Поэтому чем больше гетеродинный сигнал, определяющий проводимость $\bar{G}_0$ и шумовой составляющей $\bar{G}_{\text{ш}}$, тем меньше значение корреляционной связи между двумя разрешаемыми разнесенными блестящими точками в восстановленном радиоизображении наблюдаемого объекта.

Рассмотрим величину, которая будет характеризовать насколько реальное значение интенсивности восстановленного радиоизображения в произвольной точке области наблюдения Ω_B может отличаться от своего среднего значения в этой же точке (СКО), что собственно и дает представление о величине отношения сигнал-шум.

Для этого введем величину q , равную отношению средней интенсивности восстановленного радиоизображения $\bar{I}(\vec{r}')$ к ее дисперсии $\sigma_I^2(\vec{r}')$. Поскольку $\bar{I}(\vec{r}') = \bar{I}_c(\vec{r}') + \bar{I}_{\text{ш}\Sigma}(\vec{r}')$, то

$$q = \frac{\bar{I}(\vec{r}')}{\sigma_I^2(\vec{r}')} = \frac{\bar{I}_c(\vec{r}')}{\sigma_I^2(\vec{r}')} + \frac{\bar{I}_{\text{ш}\Sigma}(\vec{r}')}{\sigma_I^2(\vec{r}')} = q_c + q_{\text{ш}}. \quad (3.26)$$

С учетом выражений (3.18) и (3.22) слагаемые (3.26) можно представить в виде

$$q_c = \frac{\bar{G}_0 \bar{G}_c}{\sqrt{2\bar{G} M_0 \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right)}} |E_H(\vec{r}')|, \quad (3.27)$$

$$q_{\text{ш}} = \frac{\bar{G}_0 \bar{G}_{\text{ш}}}{\sqrt{2\bar{G} M_0 \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right)}} |E_H(\vec{r}')|, \quad (3.28)$$

Из выражения (3.27) видно, что величина q_c пропорциональна $\sqrt{\frac{\bar{G}_0 \bar{G}_c}{\bar{G}}}$. Откуда следует, что

увеличение проводимости покрытия антенны за счет только мощности гетеродинного или же полезного сигнала не целесообразно, а эффективное увеличение параметра q_c требует совместного увеличения мощности информационного и гетеродинного сигналов. Поскольку увеличение мощности информационного сигнала связано со спецификой построения оптоуправляемых антенн, то основным параметром, влияющим на точностные характеристики восстанавливаемого радиоизображения, будет чувствительность регистраторов принимаемого СВЧ поля, которая ограничивается в основном чувствительностью приемных СВЧ трактов, качеством преобразования принятых СВЧ сигналов в управляющие оптические сигналы, реализующие радиоголограмму и статистических свойств полупроводниковых покрытий антенны.

Среднее значение комплексной амплитуды поля, восстановленного из зафиксированной радиоголограммы с учетом выражений (3.10) и (3.12), представим в виде

$$\bar{E}_n(\vec{r}') = \frac{1}{S} A_b \bar{\alpha} \mu_n \sqrt{\bar{G}_0 \bar{G}_c} \int E_n^*(\vec{\rho}) H(\vec{\rho} - \vec{r}') d\vec{\rho}, \quad (3.29)$$

которое в случае высокого углового разрешения может быть преобразовано к виду

$$\bar{E}_n(\vec{r}') \approx \frac{1}{\sqrt{S \cdot S_0}} A_b \bar{\alpha} \mu_n \sqrt{\bar{G}_0 \bar{G}_c} E_n^*(\vec{\rho}). \quad (3.30)$$

Перед тем, как перейти к комплексному анализу влияния процесса регистрации и случайности входных информационных сигналов на качество восстановленного радиоизображения, рассмотрим ряд вопросов, связанных со статистикой координат возникающих центров отражения и их суммарного числа. Случайный характер информационных сигналов изменяет статистические закономерности, которым подчиняется проводимость $G(\vec{\rho})$ и сами координаты отражающих центров $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \dots, \vec{\rho}_n$ полупроводникового покрытия, возникающие в результате воздействия этих сигналов на поверхность антенны. Один из путей решения поставленной задачи заключается в последовательном усреднении по распределению (3.11), а затем по возможным реализациям $I_c(\vec{\rho})$.

С учетом полученных результатов запишем выражение для усредненного по реализациям значения корреляционной функции восстановленного радиоизображения при наблюдении объекта, содержащего M блестящих точек в виде

$$\begin{aligned} \langle \bar{K}_n(\vec{r}'_1, \vec{r}'_2) \rangle &= \overline{\langle E_n(\vec{r}'_1) E_n^*(\vec{r}'_2) \rangle} = A_b^2 \bar{\alpha}^2 \bar{G}_0 \frac{1}{\lambda^2 F^2} \frac{1}{S_0} \times \\ &\times \sum_{\ell=1}^M h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_\ell) \int_{\Omega_b} U_{n\ell}(\vec{r}') d\vec{r}' + \\ &+ A_b^2 \bar{\alpha}^2 \langle G \rangle \frac{1}{\lambda^2 F^2} h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) = \end{aligned}$$

$$= \sum_{\ell=1}^M B_{1\ell} h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_\ell) + B_2 h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1), \quad (3.31)$$

$$\text{где } B_{1\ell} = A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n^2 \bar{G}_0 \langle \bar{G}_c \rangle \frac{1}{\lambda^2 F^2} \frac{1}{S_0} \int_{\Omega_b} U_{n\ell}(\vec{r}') d\vec{r}';$$

$$B_2 = A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n \langle \bar{G} \rangle / (\lambda F)^2;$$

$$h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \exp \left[j \frac{k}{F} (\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) \vec{\rho} \right] d\vec{\rho}.$$

Данное выражение используем в дальнейшем для получения функционала плотности вероятности восстановленного поля. С этой же целью определим среднюю энергию восстанавливаемого поля в плоскости Ω_b , которая для переизлучающих крупноапертурных оптоуправляемых антенн совпадает с областью Ω_0 для случая формирования сфокусированного поля в картинной плоскости наблюдаемого объекта, а для случая восстановления искаженного или неискаженного радиоизображения объекта с плоскостью Ω . Переходя от нормированных величин к энергетическим, получим следующее выражение

$$\begin{aligned} \bar{Q}_b &= \frac{T}{2} \int_{\Omega_b} |E_n(\vec{r}')|^2 d\vec{r}' = \frac{T}{2S} A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n^2 \bar{G}_0 \bar{G}_c + \\ &+ \frac{T}{2} \frac{S_b}{S \cdot S_0} M_0 \bar{G} A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n, \end{aligned} \quad (3.32)$$

где S_b — площадь восстанавливаемого радиоизображения.

При высоком угловом разрешении

$$\begin{aligned} \langle \bar{Q}_b \rangle &= \frac{T}{2S} A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n^2 \bar{G}_0 \langle \bar{G}_c \rangle + \\ &+ \frac{T}{2} \frac{S_b}{S \cdot S_0} A_b^2 \bar{\alpha}^2 \mu_n M_0 \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha_1}^2}{\bar{\alpha}^2} \right) \langle \bar{G} \rangle. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Анализируя данное выражение, можно сказать, что усредненное по реализации значение энергии восстановленного поля состоит из двух слагаемых — сигнального $\langle \bar{Q}_c \rangle$ и шумового $\langle \bar{Q}_{ш} \rangle$. Первое слагаемое пропорционально энергии принимаемого поля и зависит от энергии опорного и восстанавливающего полей, а также светочувствительных характеристик полупроводникового покрытия.

Второе слагаемое — следствие шумового фона обусловлено случайным процессом регистрации. Поэтому, помимо величин $\bar{G}_0$, $\bar{G}_c$, оно зависит от $\bar{G}_{ш}$, $\sigma_{\alpha\Sigma}^2$, M_0 , а также от соотношения площадей восстанавливаемого радиоизображения объекта S_b и площади действительного радиоизображения S_0 .

С учетом (3.31) и (3.32) представим (3.33) в виде

$$\begin{aligned} \langle \bar{Q}_B \rangle = \langle \bar{Q}_c \rangle + \langle \bar{Q}_{шв} \rangle = \frac{T}{2} \frac{1}{S} A_B^2 \bar{\alpha}^2 \bar{G}_0 \langle \bar{G}_c \rangle \mu_H^2 + \\ + \frac{T}{2} A_B^2 \bar{\alpha}^2 \mu_H \langle \bar{G} \rangle \frac{S_B}{\lambda^2 R^2}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Следует заметить, что для протяженной цели, содержащей M блестящих точек $\langle \bar{Q}_c \rangle = \sum_{\ell=1}^M \langle \bar{Q}_{c\ell} \rangle$, в которой каждое слагаемое $\langle \bar{Q}_{c\ell} \rangle$ определяет энергию, восстановленную на соответствующей блестящей точке. В общем случае амплитуда восстановленного поля

$$E_n(\vec{r}', t) = \text{Re } E_n(\vec{r}') \exp[-j\omega_0 t] + n(\vec{r}', t). \quad (3.35)$$

Под отношением сигнал-шум будем понимать отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума и обозначим эту величину через q^* .

При этом всю энергию и ее составляющие будем рассчитывать для области, соответствующей ее действительному радиоизображению так, что $\langle \bar{Q}_{ш} \rangle$ определяется тем же соотношением, что и $\langle \bar{Q}_{шв} \rangle$, но с заменой S_B на S_0 . Тогда

$$q^* = \frac{\langle \bar{Q} \rangle}{2N_0} = \frac{\langle \bar{Q}_c \rangle}{2N_0} + \frac{\langle \bar{Q}_{ш} \rangle}{2N_0} = q_c^* + q_{ш}^*. \quad (3.36)$$

Помимо отношения сигнал-шум q^* , введем коэффициент контраста, который равен отношению сигнал-шум в расчете на один элемент разрешения

$$k^* = \frac{q_c^*}{M_0}, \quad k_{ш}^* = \frac{q_{ш}^*}{M_0}. \quad (3.37)$$

С учетом введенных величин, коэффициенты $B_{1\ell}$ и B_2 выражения (3.32) можно представить в виде

$$\sum_{\ell=1}^M B_{1\ell} = \frac{2}{TS_B} M_B \langle \bar{Q}_c \rangle, \quad B_2 = \frac{2}{TS_B} \langle \bar{Q}_{шв} \rangle,$$

где $M_B = S S_B / (\lambda R)^2$ — число элементов разрешения в восстановленном радиоизображении.

С учетом (3.31) корреляционная функция вида (2.7) для восстановленного поля от объекта, содержащего M блестящих точек, запишется в виде

$$\begin{aligned} R(\vec{r}'_1, t_1; \vec{r}'_2, t_2) = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \left[\sum_{\ell=1}^M B_{1\ell} h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + B_2 h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) \right] \exp[j\omega_0(t_2 - t_1)] + \right. \\ \left. + N_0 \delta(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) \delta(t_1 - t_2) \right\}. \end{aligned}$$

На основе полученных выше результатов, запишем выражение для функционала плотности вероятности восстановленного поля от объекта, состоящего из отдельных блестящих точек.

$$\begin{aligned} F[E_n(\vec{r}', t)] = K_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2N_0} \int_0^T \int_{\Omega_B} E_n^2(\vec{r}', t) d\vec{r}' dt + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^M C_{1\ell} \left| \int_{\Omega_B} h(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') E_0(\vec{r}') d\vec{r}' \right|^2 + \frac{1}{2} C_2 \times \right. \\ \left. \times \text{Re} \int_{\Omega_B} \int_{\Omega_B} h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) E_0(\vec{r}'_1) E_0^*(\vec{r}'_2) d\vec{r}'_1 d\vec{r}'_2 \right\}, \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\text{где } C_2 = \frac{1}{2N_0^2} \cdot \frac{B_2}{1 + \frac{T}{4N_0} \frac{\lambda^2 R^2}{S} B_2} = \frac{2}{TS_B N_0} \cdot \frac{q_{шв}^*}{1 + k_{шв}^*}; \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} C_{1\ell} = \frac{1}{2N_0^2} \frac{B_{1\ell}}{\left[1 + \frac{T}{4N_0} \frac{\lambda^2 R^2}{S} B_2 \right] \left[1 + \frac{T}{4N_0} \frac{\lambda^2 R^2}{S} (B_{1\ell} + B_2) \right]} = \\ = \frac{2M_B}{N_0 TS_B (1 + k_{шв}^*) (1 + q_{c\ell}^* + k_{шв}^*)}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

где K_0 — некоторая константа; $k_{шв}^* = q_{шв}^* / M_B$.

Важно отметить, что наличие в выражении (3.38) функции $h(\vec{r}'_\ell - \vec{r}')$ вырезает из области $\Omega_B (\Omega_0)$ область, соизмеримую с элементом разрешения радиоголограммы. Следовательно, все члены входящей в данное выражение суммы между собой не перекрываются по основному лепестку, а в статическом смысле связь между ними определяется выражением (3.26).

Для решения задач оценки неизвестных параметров требуется выяснить зависимость коэффициента K_0 от той исходной информации, для которой составляется данный функционал.

В связи с этим для проведения оценки точности измерения линейных размеров наблюдаемого объекта, состоящего из совокупности блестящих точек, из его восстановленного радиоизображения необходимо найти отношение правдоподобия, которое определяется в виде отношения функционала плотности вероятности восстановленного поля (3.38) к функционалу плотности вероятности шумового сигнала, обусловленного случайным процессом регистрации радиоголограммы и шумами внешних источников. Выражение функционала плотности вероятности шумов поля в области восстановления изображения соответствует гипотезе об отсутствии полезного сигнала и записывается в следующем виде

$$\begin{aligned} F_{ш}[E_n(\vec{r}', t)] = K_{ш} \exp \left\{ -\frac{1}{2N_0} \int_0^T \int_{\Omega_B} E_n^2(\vec{r}', t) d\vec{r}' dt + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} C_2 \text{Re} \int_{\Omega_B} \int_{\Omega_B} h(\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1) E_0(\vec{r}'_1) E_0(\vec{r}'_2) d\vec{r}'_1 d\vec{r}'_2 \right\}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

В выражениях функционалов неизвестными параметрами являются коэффициенты K_0 и $K_{ш}$, зависящие от исходной информации, для которой составлен соответствующий функционал. В

общем случае найти значения этих множителей не удастся, ибо часто оказывается, что они имеют бесконечно большую величину.

Согласно известной методике можно определить величину отношения этих коэффициентов, входящую в выражение для отношения правдоподобия, которая представима экспоненциальным множителем

$$B = \frac{K_0}{K_{\text{ош}}} = \exp \left\{ 2 \sum_{\ell=1}^{M_B} \ln \frac{1 + K_{\text{шв}}^*}{1 + q_{c\ell}^* + K_{\text{шв}}^*} - 2 M_B \ln (1 + K_{\text{шв}}^*) \right\}. \quad (3.42)$$

Тогда, составляя отношение правдоподобия из функционалов (3.23) и (3.41), получим

$$Z[E_i(\vec{r}, t)] = \exp \left\{ -2 M_B \ln (1 + k_{\text{ш}}^*) - 2 \sum_{\ell=1}^M \ln \left[1 + \frac{q_{c\ell}^*}{1 + k_{\text{шв}}^*} \right] + \frac{M_B}{N_0 T S_B} \frac{1}{1 + k_{\text{шв}}^*} \times \sum_{\ell=1}^M \frac{q_{c\ell}^*}{1 + q_{c\ell}^* + k_{\text{шв}}^*} \left| \int_{\Omega_B} h(\vec{r}' - \vec{r}') E_0(\vec{r}') d\vec{r}' \right|^2 \right\}, \quad (3.43)$$

где $q_{c\ell}^*$ — отношение сигнал-шум, соответствующее ℓ -ой блестящей точке объекта.

4. ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

Определение линейных размеров объекта может быть достигнуто путем измерения расстояния между сформированными сигналами в изображении объекта, наблюдаемыми от его крайних блестящих точек. Нахождение данного параметра эквивалентно измерению относительной угловой или линейной координаты между двумя точечными объектами.

Определение относительных величин во временной области, заключающееся в измерении временного интервала между двумя короткими импульсами, позволяет, применяя общие аналитические закономерности для области линейных координат, записать дисперсию ошибки определения линейных размеров двухточечной цели в следующем виде

$$\sigma_{L_0}^2 = \sigma_{r'_1}^2 + \sigma_{r'_2}^2 - K_{12} \sigma_{r'_1} \sigma_{r'_2}, \quad (4.1)$$

где $\sigma_{r'_1}^2$, $\sigma_{r'_2}^2$ — дисперсии ошибок определения линейных координат блестящих точек в картинной плоскости объекта; K_{12} — коэффициент корреляции в изображении объекта между отдельными блестящими точками.

В случае высокого углового разрешения величина коэффициента корреляции в выражении будет существенно меньше единицы, но, придержи-

ваясь общей математической строгости, ее необходимо учитывать.

Для определения значения дисперсии ошибки измеряемого параметра воспользуемся выражением отношения правдоподобия восстанавливаемого изображения объекта, состоящего из совокупности блестящих точек (3.43). Выбранная статистика содержит информацию о корреляционных связях в действительном изображении объекта, поэтому необходимость отдельного отыскания коэффициента корреляции в дальнейшем отпадает. Зависимость между отдельными блестящими точками по диаграмме направленности будет учтена при анализе отношения правдоподобия.

Дисперсия несмещенной оценки измеряемого параметра $\hat{X}$ имеет нижнюю границу, определяемую по правилу РАО-Крамера

$$\sigma_{\hat{X}}^2 \geq [I_n(x)]^{-1}, \quad (4.2)$$

где

$$I_n(x) = m_1 \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x} \ln Z(x) \right]^2 \right\} = m_1 \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \ln Z(x) \right] \right\}$$

— информация по Фишеру, содержащаяся в выборке, определяемая математическим ожиданием от второй производной логарифма отношения правдоподобия по оцениваемому параметру x . Запишем выражение для потенциальной точности определения линейной координаты ℓ -ой блестящей точки объекта в картинной плоскости, используя отношение правдоподобия (3.43). При этом дисперсия ошибок может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_{r'_\ell}^2 = \left\langle \left[\frac{\partial^2}{\partial r'^2} \ln (Z[E(\vec{r}', t)]) \right] \right\rangle_{r'=r'_\ell}^{-1}, \quad (4.3)$$

где $\langle \cdot \rangle$ — среднее значение второй производной от логарифма отношения правдоподобия в точке с координатой r'_ℓ .

В выражении отношения правдоподобия разделим энергетические параметры от информационных, для чего вынесем за знак интеграла энергетическую величину $|E_0(\vec{r}')|^2$, выраженную через энергию сигнала от отдельных блестящих точек

$$|E_0(\vec{r}')|^2 = \sum_{\ell=1}^M \frac{\langle Q_{c\ell} \rangle}{T \cdot S_B}. \quad (4.4)$$

Проводя логарифмирование и двукратное дифференцирование выражения (3.43) по координате $\vec{r}'$, имеем

$$\frac{\partial^2}{\partial r'^2} \ln (Z[E(\vec{r}', t)]) = \sum_{\ell=1}^{M_0} \frac{q_{c\ell}}{\Delta_r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \vec{r}'^2} f_\ell^2(\vec{r}'), \quad (4.5)$$

где $q_\ell = \frac{(q_{c\ell}^*)^2}{T^2 (1 + K_{\text{шв}}^*) (1 + q_{c\ell}^* + K_{\text{шв}}^*)}$ — параметр, характеризующий отношение сигнал-шум в изоб-

ражении ℓ -ой блестящей точки; $\Delta_r^2 = S_B / M_B$ — площадь элемента разрешения в плоскости восстановления действительного изображения объекта; $f_\ell^2(\vec{r}') = \left| \int_{\Omega} h(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') d\vec{r}' \right|^2$ — функция, определяющая угловое разрешение информационной системы;

$$h(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \exp ik \left(\frac{\vec{r}' - \vec{r}'_\ell}{F} \vec{\rho} \right) d\vec{\rho}.$$

Поясним физическую сущность отношения сигнал-шум и рассмотрим этот параметр в виде двух сомножителей. Первый сомножитель $q_{c\ell}^* / (1 + K_{шв}^*) = \langle Q_{c\ell} \rangle / (N_0 + \langle Q_{ш} \rangle / M_0)$ характеризует отношение энергии в изображении ℓ -ой блестящей точки к сумме спектральной плотности мощности внешнего шума N_0 и энергии шумов, обусловленных процессами регистрации голограммы и восстановления изображения в расчете на один элемент разрешения. Второй сомножитель, в отличие от первого, дополнительно содержит в знаменателе слагаемое $q_{c\ell}^*$ и записывается в виде

$$q_{c\ell}^* / (1 + K_{шв}^* + q_{c\ell}^*) = \langle Q_{c\ell} \rangle / \left(N_0 + \frac{\langle Q_{ш} \rangle}{M_0} + \langle Q_{c\ell} \rangle \right).$$

Последний сомножитель характеризуется отношением энергии сигнала от блестящей точки к общей энергии сигнала и шумов. Сложная зависимость отношения сигнал-шум от энергетических параметров обусловлена зависимостью между энергией сигнала и шумом, образуемым в области действительного изображения при восстановлении голограммы облучающей волной. При увеличении энергии облучающего поля вместе с сигналом увеличиваются регистрационные шумы в изображении объекта.

Преобразуем выражение функции $f_\ell^2(\vec{r}')$ к удобному для дифференцирования виду

$$f_\ell^2(\vec{r}') = \left(\frac{1}{2} \int_0^r \sin c\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}'_1) / \Delta r d\vec{r}'_1 \right)^2, \quad (4.6)$$

где $\Delta r = \sqrt{S_B / M_B} = \frac{\lambda}{L_0} R$ — линейный размер элемента разрешения антенны с эквивалентным размером раскрыва L_0 .

При разложении интеграла $f_\ell(\vec{r}')$ в степенной ряд и ограничиваясь двумя членами разложения, получим

$$f_\ell(\vec{r}') = \left| \frac{\Delta \vec{r}}{2\pi} \left[\frac{\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}')^3}{18\Delta \vec{r}} - \frac{\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}')}{\Delta \vec{r}} - \frac{\pi\vec{r}'_\ell^3}{18\Delta \vec{r}} + \frac{\pi\vec{r}'_\ell}{\Delta \vec{r}} \right] \right|. \quad (4.7)$$

Используя правила дифференцирования сложных функций, получим выражения для пер-

вой и второй производной функции $f_\ell^2(\vec{r}')$ по переменной $\vec{r}'$

$$(f_\ell^2(\vec{r}'))' = 2 f_\ell(\vec{r}') f_\ell'(\vec{r}'); \\ (f_\ell^2(\vec{r}'))'' = 2 (f_\ell'(\vec{r}'))^2 + 2 f_\ell(\vec{r}') f_\ell''(\vec{r}'), \quad (4.8)$$

где $f_\ell'(\vec{r}') = \sin c\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') / \Delta r$,

$$f_\ell''(\vec{r}') = \frac{(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') \cos [\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') / \Delta r] + \sin [\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') / \Delta r]}{(\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') / \Delta r)^2}.$$

Вторая производная логарифма отношения правдоподобия определится выражением

$$\frac{\partial^2}{\partial r'^2} \ln (Z [E_n(\vec{r}', t)]) = \sum_{\ell=1}^{M_0} \frac{q_\ell}{\Delta_r^2} (f_{1\ell}(\vec{r}') + f_{2\ell}(\vec{r}')), \quad (4.9)$$

где $f_{1\ell}(\vec{r}') = 2 [f_\ell'(\vec{r}')]^2 = \sin^2 c\pi(\vec{r}'_\ell - \vec{r}') / \Delta r$;

$$f_{2\ell} = 2 f_\ell(\vec{r}') f_\ell''(\vec{r}').$$

В полученном выражении за счет сомножителя $f_\ell''(\vec{r}')$ функция $f_{2\ell}(\vec{r}')$ является быстросциллирующей относительно нулевого значения, что позволяет при усреднении по координате $\vec{r}'$ считать ее близкой к нулю. Выражение для дисперсии ошибки измерения линейной координаты, после подстановки (4.9) в (4.3) и усреднения, примет вид

$$\sigma_{r'\ell}^2 = \left[\sum_{\ell=1}^{M_0} \frac{q_\ell}{\Delta_r^2} f_{1\ell}(\vec{r}') \right]_{r'=r'_\ell}^{-1}. \quad (4.10)$$

Для упрощения дальнейшего анализа предположим, что объект состоит из двух блестящих точек с одинаковыми модулями коэффициентов отражения. Это соответствует случаю, когда нормирующая функция, входящая в выражение для энергии сигналов от каждой точки, принимает равные значения

$$U_{n\ell}(\vec{r}') = U_n(\vec{r}') \delta(\vec{r}' - \vec{r}'_\ell) = 0,5.$$

Принимая во внимание сделанные допущения, потенциальная точность измерения линейных размеров объекта может быть найдена из расчетного соотношения

$$\sigma_{Lo} = \sigma_{n1} \cdot \Delta_r, \quad (4.11)$$

где $\sigma_{1n} = 2 [q_1 (1 + \sin^2 x^2 \pi L_{он})]^{-1/2}$ — нормированное значение ошибки оцениваемого параметра, выраженное в долях элемента линейного разрешения; $\Delta_r = \sqrt{S_B / M_B} = \lambda R / \sqrt{S}$ — размер элемента линейного разрешения; $L_{он} = (r'_1 - r'_2) / \Delta_r$ — нормированное значение линейного размера объекта, выраженное в долях элемента линейного разрешения; $q_1 = (q_{c1}^*)^2 / (1 + K_{шв}^*) (1 + q_{c1}^* + K_{шв}^*)$ — отношение сигнал-шум для каждой точки объекта в восстанавливаемом изображении.

Из анализа полученного выражения следует, что точность определения линейных размеров

объекта улучшается при увеличении отношения сигнал-шум q и улучшении углового разрешения антенной системы, а также зависит от линейных размеров наблюдаемого объекта.

Прежде чем произвести расчет зависимостей точностных характеристик оптоуправляемых антенн от их параметров, необходимо определить неизвестный нормировочный коэффициент μ_n , входящий в отношение сигнал-шум, который был введен ранее в выражении (1.1).

С этой целью предъявим общие требования к системе восстановления изображения.

Пусть при наихудших шумовых параметрах оптоуправляемого покрытия, минимальном уровне освещения его и наличии внешнего фона в области восстановления изображения в информационной системе обеспечивается измерение линейных размеров объекта при отношении сигнал-шум не менее чем 15–20. Учтем, что определение линейных и угловых размеров объекта равносильно определению относительной угловой координаты в пеленгационных моноимпульсных системах, которые обладают следующей потенциальной точностью измерения

$$\sigma_\theta = \sigma_{H2} \cdot \Delta_\theta, \quad (4.12)$$

где $\sigma_{H2} = [0.36\pi^2 q]^{-1/2}$ — нормированное значение среднеквадратического отношения, выраженное в долях элемента дифракционного углового разрешения; $\Delta_\theta = \lambda / L_0$ — угловая ширина элемента разрешения; q — отношение сигнал-шум; L_0 — линейный размер раскрытия антенны.

Приравняем нормированные значения среднеквадратических отклонений в выражениях (4.11), (4.12) и в результате получим уравнение для определения нормирующего множителя

$$\begin{aligned} & r' \left[\frac{(0.5\mu_n^2 \bar{G}_0 \bar{G}_c)^2}{(N_0 + \mu_n \bar{G}(1 + \sigma_\alpha^2 / \bar{\alpha}^2))} \times \right. \\ & \left. \times \frac{1}{(N_0 + 0.5\mu_n^2 \bar{G}_0 \bar{G}_c + \mu_n \bar{G}(1 + \sigma_\alpha^2 / \bar{\alpha}^2))} \right]^{-1/2} = \\ & = [0.36\pi^2 q]^{-1/2}, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где $\bar{G} = \bar{G}_0 + \bar{G}_c + \bar{G}_{ш}$ — средняя проводимость.

Условимся, что минимальное значение отношения сигнал-шум соответствует наименьшему уровню освещенности оптоуправляемого покрытия, изменяющего, например, среднюю проводимость полупроводникового покрытия на основе *CdS* до значений $\bar{G}_c = \bar{G}_0 = 2.5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Напомним, что интервал изменения проводимости при эффективном управлении отражающими свойствами данного типа фоточувствительных покрытий лежит в пределах $2\div 25 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Пусть наихудшие шумовые свойства устройства оптической обработки радиосигналов определяются значением шумовой проводи-

мости полупроводникового покрытия равной $\sigma_{ш} = 0.15(\bar{G}_0 + \bar{G}_c)$ при максимальной нестабильности параметров отражательных центров $\sigma_\alpha^2 / \bar{\alpha}^2 = 0.2$.

Интенсивность внешнего фона в области восстановления действительного изображения выразим через значения средних сигнальных проводимостей

$$N_0 = 0.01\mu_n(\bar{G}_0 + \bar{G}_c). \quad (4.14)$$

При введенных исходных данных уравнение нормировки (4.13) приобретает вид

$$\frac{\mu_n^2 \cdot \bar{G}_0^2}{11/6(\mu_n + 0.68)} = 0.36\pi^2 q. \quad (4.15)$$

Тогда при величине отношения сигнал-шум $q = 15\div 20$ — значение нормировочного коэффициента составляет $\mu_n = 250\div 340$.

Выбранная нормировка параметров оптоуправляемой антенны позволяет рассчитывать ее точностные характеристики.

Значения средних сигнальных проводимостей полупроводника выбираются в пределах эффективного участка оптического управления отражающими характеристиками фоточувствительного антенного покрытия и составляют $\bar{G}_0 + \bar{G}_c = 5; 7.5; 10; 12.5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Нестабильности отдельных отражающих центров, характеризующие зернистую структуру голограммы, заданы параметром $\sigma_\alpha^2 / \bar{\alpha}^2$, принимающим дискретные значения 0; 0.05; 0.1; 0.15.

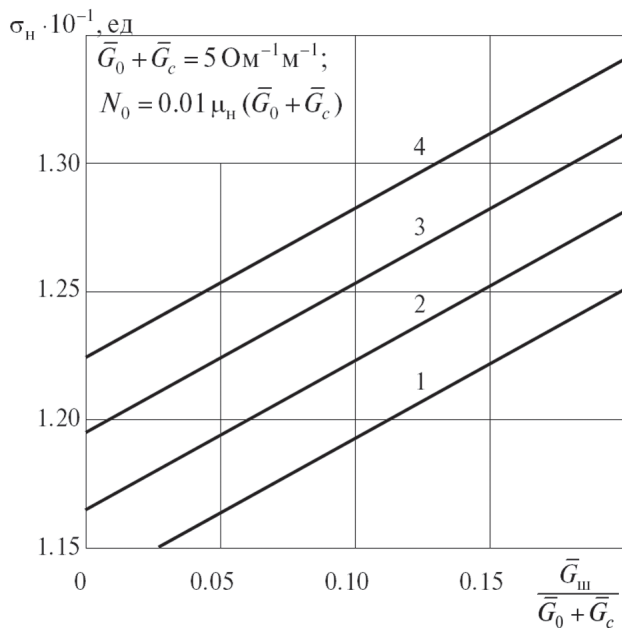
Как показывают экспериментальные исследования отдельных образцов оптоуправляемых покрытий, разброс их отражающих характеристик при одинаковом для всех уровне засветки составляет не более 10 % от среднего значения коэффициента отражения СВЧ излучения по мощности. Зададим интервал изменения шумовой проводимости оптоуправляемой антенны в пределах $\bar{G}_{ш} = 0 \div 0.2(\bar{G}_0 + \bar{G}_c)$.

Таким образом, можно предположить, что принятые для расчета исходные данные близки к реальным шумовым параметрам оптоуправляемой антенны и позволяют получить достоверную оценку точностей.

Результаты расчета нормированного среднеквадратического значения ошибки измерения линейного размера объекта представлены на рис. 4, а, б.

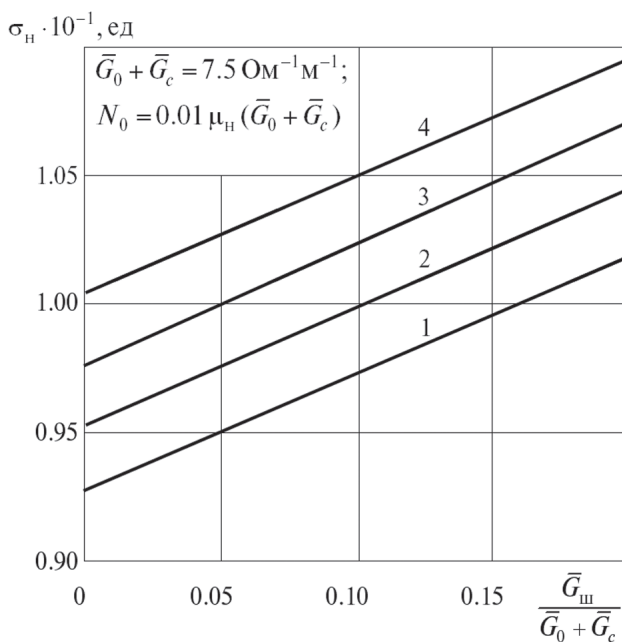
Анализ данных зависимостей показывает, что среднеквадратическое значение ошибки практически линейно возрастает при увеличении шумовой проводимости. Нестабильность отражающих параметров отдельных независимых центров также приводит к ухудшению точностных параметров антенн. Оптимальные значения освещенности, при которой обеспечивается эффективное управление отражающими характеристиками многослойного полупроводникового антенного покрытия на основе *CdS* и достигается наивыс-

шая точность определения линейных размеров объекта, должно соответствовать следующим значениям сигнальных проводимостей $\bar{G}_0 + \bar{G}_c = 10 \div 12.5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.



а

1) $\sigma_\alpha^2 / \bar{\alpha}^2 = 0$; 2) 0.05; 3) 0.1; 4) 0.15



б

Рис. 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные теоретические исследования, которые опираются на полученные ранее экспериментальные результаты работ [2-7] и статистической теории антенн позволили в зависимости от характеристик полупроводниковых покрытий, структуры адаптивной

переизлучающей системы с оптоуправляемым покрытием произвести анализ потенциальных возможностей таких систем в зависимости от решаемых задач. При этом статистика формируемых радиоголограмм рассматривается на основе математической модели статистических характеристик поля в плоскости приемной апертуры и характеристик полупроводникового покрытия. А статистические характеристики восстанавливаемых радиоизображений объектов, выраженные через статистические характеристики применяемого полупроводника, позволили определить дисперсию несмещенной оценки измеряемых параметров. При этом нормированные значения точности определения измеряемых параметров составляют $8 \cdot 10^{-2} \div 1.3 \cdot 10^{-1}$.

Литература.

- [1] Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. — М.: Сов. радио, 1970. — 380 с.
- [2] Карпенко В.И., Карпенко О.В., Збрицкий Р.А. Развитие теории и техники обработки радиосигналов. Харьков, АНПРЭ, Прикладная радиоэлектроника, Т.8.№.4. 2009. — С. 501-509.
- [3] Карпенко В.И., Карпенко О.В. Голографический принцип компенсации фазовых искажений фронта электромагнитной волны в многопозиционных радиотехнических сетевых системах. Харьков, АНПРЭ, Прикладная радиоэлектроника, Т.8. №.1. 2009. — С. 24-32.
- [4] Карпенко В.И., Фещенко А.Б., Мазанов В.Г. Способы фокусировки СВЧ-излучения и принципы построения голографических устройств оптической обработки радиосигналов в оптоуправляемых системах. М.: Радиотехника, №6, 2001. — С. 38-42.
- [5] Карпенко В.И., Голуб Ю.В., Фещенко А.Б. Синтез оптимального алгоритма формирования фазосопреженного поля, реализуемого в раскрытых оптоуправляемых антенн // Наука и оборона. 1994. Вып. 3.
- [6] V.I. Kapenko. Processing and radiolocation data obtained in the optical range. Polish — Ukrainian seminar on Optoelectronics metrology. Lancut, Poland, 1994.
- [7] Карпенко В.И., Моисеева Г.А. Повышение эффективности управления комплексным коэффициентом отражения многослойной структуры, содержащей полупроводник, в миллиметровом диапазоне длин волн. // Харків. Системи обробки інформації. Випуск 2 (69). 2008. — С. 63-65.
- [8] Карпенко В.И., Шостко С.Н. Техника миллиметровых волн в адаптивных радиолокационных системах / Техника миллиметровых волн. Институт радиофизики и электроники / Под ред. В.П. Шестопалова. — К.: Наукова думка, 1985. — 130 с.
- [9] Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Статистическая теория голографии. — М.: Радио и связь. 1981. — 329 с.
- [10] Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Сов. радио, 1975. — 397 с.
- [11] W.R. Babbitt, P.A. Roos. High resolution range/doppler radar using broadband coherent optical processing. CLRC, Snowmass, p.1-30.
- [12] Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.Н., Тартаковский Г.П., Широков В.В. Вопросы статистической радиолокации в 2-х т. — М.: Сов. радио, 1968.

Поступила в редколлегию 26.02.2010.



Карпенко Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Украины, ведущий научный сотрудник Научного центра Воздушных Сил Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов: оптоэлектроника, голография, адаптивная обработка радиолокационных сигналов.



Карпенко Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-методического центра иностранных языков Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов: многопозиционные радиотехнические системы, голография, цифровая обработка сигналов, лингвистика.



Збрицкий Роман Александрович, адъюнкт Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов: радиоголография, оптические устройства сканирования радиоизлучения.



Онищенко Валерий Валентинович, научный сотрудник Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов: цифровая обработка изображений и сигналов.

ОПТИМАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА МНОГОМОДОВЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ РАССОГЛАСОВАНИЯ

Е.Ю. ГОРОДЕЦКАЯ, А.И. МАЛЕХАНОВ, Д.М. ХАРЛАМОВ

Анализируется эффективность методов оптимальной пространственной обработки сигналов в волноводном канале распространения в условиях модового рассогласования, появляющегося в результате неточной оценки пространственной структуры отдельных мод на входе приемной антенной решетки. Приведены результаты расчетов потерь выходного отношения сигнал/шум (ОСШ), обусловленных рассогласованием, в широкой области параметров, которые характеризуют амплитудные и фазовые соотношения сигнальных мод на входе антенны, их взаимную ортогональность, величину межмодовых корреляций, а также уровень модовой помехи.

The signal-to-noise ratio (SNR) performance of optimal array signal processing in the presence of modal mismatch is studied. Modal mismatch is treated as a general effect of erroneous estimation of the modal shapes at the array input. The results of calculations of the mismatch-induced SNR loss for the optimal array processor in a wide range of parameters determined by the amplitude, phase, and orthogonal characteristics of the signal modes, their mutual covariance, and by the input modal noise level, are given and discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование методов пространственной обработки сигналов представляет значительный интерес в связи с решением задач обнаружения и оценки параметров сигналов в неоднородных средах с использованием протяженных антенных решеток (АР). Как известно, оптимизация обработки полностью когерентных сигналов (пространственный масштаб когерентности которых много больше размеров приемной антенны) достигается в классе методов линейной обработки, которая представляет собой весовое амплитудно-фазовое суммирование сигналов, принимаемых в отдельных каналах АР. Такая обработка сводится, по существу, к формированию пространственного фильтра с некоторым амплитудно-фазовым распределением (АФР) и отвечающим ему диаграммой направленности, оптимальной для заданных пространственных спектров сигнала и помех окружающих источников [1-3]. Вместе с тем, характерное для случайно-неоднородных сред ослабление пространственной когерентности полезного сигнала с ростом дистанции приводит к более сложным решениям для оптимальной пространственной обработки в классе квадратичных методов. Такая обработка сводится к формированию многолучевой диаграммообразующей схемы и некогерентному накоплению выходных сигналов АР по отдельным «лучам», т.е. парциальных пространственных фильтров, каждый из которых имеет свое АФР [1, 4-6].

Особую специфику задачи оптимизации пространственной обработки сигналов приобретают в случае их волноводного распространения. В этом случае, вне зависимости от возможного ослабления когерентности полезного сигнала на больших дистанциях, появляется еще один принципиальный аспект — многомодовое формирование поля сигнала и помех на входе АР. Даже в случае полностью детерминированного канала распространения пространственные спектры

сигнала и помех могут содержать значительное число отдельных гармоник (мод). Очевидно, «конфигурация» каждой такой гармоники, или ее АФР на входе АР, будет зависеть как от АФР самой моды (т.е. от свойств волновода), так и от геометрии расположения АР в волноводе. Конкретные значения потенциального выигрыша оптимальной обработки становятся зависимыми в итоге от обоих обсуждаемых факторов, связанных с распространением сигналов — от модовой дискретизации пространственного спектра сигнально-помехового поля и статистических эффектов ослабления пространственной когерентности полезного сигнала. Последние, в свою очередь, физически обусловлены ослаблением взаимных корреляций амплитуд распространяющихся мод по мере удаления приемной АР от источника сигнала.

На сегодняшний день теория антенн с обработкой сигналов в многомодовых каналах распространения получила наибольшее развитие в приложении к низкочастотной акустике океана [3, 7]. Это связано именно с тем, что дальнейшее распространение низкочастотного звука в океане обусловлено формированием в верхнем слое океана подводного звукового канала, представляющего собой природный случайно-неоднородный волновод рефракционного типа. Для различных типов океанических волноводов дистанции, для которых учет статистических эффектов в диапазоне низких частот (до ~1 кГц) становится существенным, оказываются весьма различными: от нескольких десятков километров в мелководных каналах до сотен километров в глубоком океане (обзор ряда экспериментальных данных представлен в [8]). Это означает, что анализ методов пространственной обработки многомодовых сигналов, в том числе оптимальной, должен включать оба обсуждаемых сценария — полностью когерентного и частично-когерентного сигнала, в зависимости от физических параметров зада-

чи (частотный диапазон, дальность, тип канала, размеры антенны). В серии наших работ такой анализ был проведен [9, 10], что позволило рассчитать характерные зависимости коэффициента усиления (выигрыша) АР от ее волновых размеров при различных методах обработки (линейных и квадратичных) в реалистичных условиях дальнего распространения звука в случайно-неоднородных океанических волноводах [11–13].

Одной из важных и физически очевидных причин, способных привести к значительному снижению эффективности пространственной обработки сигналов дискретного модового спектра, является наличие различного рода ошибок в оценке модовой структуры сигнально-помехового поля. Такие ошибки, в дальнейшем называемые модовым рассогласованием, могут возникать по двум независимым причинам: вследствие неточного знания характеристик канала распространения (и соответствующей неопределенности пространственных распределений отдельных мод на входе приемной АР) либо неточной оценки (или нестационарного положения) отдельных элементов АР в канале. В обоих случаях рассогласование приводит к уменьшению выходного ОСШ, ухудшению характеристик обнаружения или оценки параметров сигнала (например, координат положения источника) [7, 14–16].

Несмотря на важность проблемы модового рассогласования, вопрос о его влиянии на выходные характеристики оптимальной обработки сигналов в случае слабо коррелированных мод практически не обсуждался в литературе. Кроме того, в подавляющем большинстве работ сценарий модового рассогласования анализируется путем моделирования конкретных условий распространения и приема сигналов, что не представляется достаточным с точки зрения общего анализа проблемы. Целью настоящей работы является исследование потерь выходного ОСШ, обусловленных модовым рассогласованием, для оптимальной линейной и квадратичной обработки в широкой области параметров задачи, что даст возможность оценить влияние всех основных физических факторов и высказать ряд рекомендаций в плане минимизации возможных потерь выходного ОСШ.

Исследование проводится нами в два этапа. Сначала мы используем модель двухмодового сигнала, принимаемого на фоне аддитивной одномодовой помехи, присутствующей в одной из сигнальных мод, и изотропного шума. В рамках этой простой и вместе с тем универсальной модели, не требующей конкретизации модовой структуры волновода, показано существенное влияние амплитудно-фазовых соотношений и взаимных корреляций сигнальных мод, уровня модовых помех, а также разрешающей способности АР (коэффициента ортогональности мод на приемной апертуре) на величину потерь выходного ОСШ, обусловленных модовым рассогласованием. Особый интерес подобная постановка пред-

ставляет для случая относительного небольшого числа «рабочих» мод¹, когда рассогласование оценки пространственных распределений даже единичных мод на входе АР может привести к заметному ослаблению ее помехоустойчивости. Далее проводится численное моделирование задачи для вертикальной 16-элементной АР в мелководном звуковом канале с профилем скорости звука, типичным для гидрологии Баренцева моря. Результаты моделирования и их физическая интерпретация наглядно иллюстрируют общие выводы предыдущего анализа в рамках двухмодовой модели.

2. МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Итак, будем предполагать, что источник полезного сигнала, источники помех и приемная АР, содержащая N элементов, расположены в волноводе. Следовательно, сигнал и внешние помехи на входе АР формируются суперпозицией конечного числа M распространяющихся мод дискретного спектра. Тогда АФР сигнального (обозначаемого вектором $\mathbf{s}$), помехового ($\mathbf{n}$) и суммарного ($\mathbf{x}$) полей на входе АР (для некоторой заданной частоты) могут быть представлены в следующем виде [9, 10]:

$$\mathbf{s} = \sum_{m=1}^M a_m \mathbf{n}_m, \quad \mathbf{n} = \mathbf{n}_0 + \sum_{m=1}^M b_m \mathbf{u}_m, \quad (1a)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{n}_0 + \sum_{m=1}^M a_m \mathbf{u}_m + \sum_{m=1}^M b_m \mathbf{u}_m, \quad (1b)$$

где $\mathbf{u}_m = (u_m(\mathbf{r}_1, z_1), u_m(\mathbf{r}_2, z_2), \dots, u_m(\mathbf{r}_N, z_N))^T$ — вектор АФР моды с номером m на входе АР, называемый в дальнейшем модовым вектором (верхний индекс « T » означает транспонирование); $a_1, a_2, \dots, a_M$ — модовые амплитуды сигнала, называемые в дальнейшем модовым спектром сигнала (компоненты этого спектра являются комплексными случайными величинами); $b_1, b_2, \dots, b_M$ — аналогично, модовый спектр помех; $\mathbf{n}_0$ — вектор шума, отвечающий помехе сплошного пространственного спектра (которая включает также собственный шум в каналах АР), $(\mathbf{r}_1, z_1)$ — декартовы координаты элементов АР (радиус-вектор в горизонтальной плоскости и вертикальная координата). Модовые векторы-столбцы образуют матрицу $\mathbf{U}$ размера $(N \times M)$, которая есть матрица модовой структуры на входе АР. Подчеркнем, что в зависимости от расположения и общего числа приемников ортогональные свойства мод на входе АР могут быть различными, т.е. модовые векторы не образуют ортогональный базис разложения (1) (за

¹ В акустике океана такой случай наиболее характерен для мелководных звуковых каналов, в которых полное число распространяющихся мод относительно невелико, и, кроме того, рассеяние звука в донных породах приводит к существенному обеднению модового спектра с ростом дистанции («вытеканию» мод высоких номеров из канала).

исключением случаев специального размещения АР в канале). В дальнейшем будем предполагать, что сигнал и помехи являются случайными и статистически независимыми, помехи имеют гауссову статистику, а шумовая компонента $\mathbf{n}_0$ есть пространственно-белый шум.

Таким образом, в рамках модели (1) сигнальное поле на входе АР представляет собой совокупность конечного числа некоторых заданных пространственных распределений с произвольными (в общем случае) ортогональными свойствами и случайными амплитудами, характер взаимных корреляций которых полностью определяет, для заданных размеров АР, когерентные свойства сигнала. Эта же модель отвечает анизотропной (модовой) компоненте помехового поля, имеющей, как правило, некоторый характерный (для заданного частотного диапазона и типа канала) модовый спектр и масштаб когерентности. Отметим, что модель (1) может быть также использована при лучевом описании поля в рефракционном канале или, если среда распространения представляет собой свободное пространство, при учете переотражений полезного сигнала и приходе сразу нескольких сигнальных компонент. В этом случае модовый индекс m относится к номеру компоненты углового спектра принимаемого поля.

Следуя работам [1, 4-6, 9-13], эффективность обработки сигналов будем характеризовать следующей величиной выходного ОСШ:

$$q = \frac{\langle P(s+\mathbf{n}) \rangle - \langle P(\mathbf{n}) \rangle}{\left\{ \langle P^2(\mathbf{n}) \rangle - \langle P(\mathbf{n}) \rangle^2 \right\}^{1/2}}, \quad (2)$$

под которым понимается отношение отклонения выходной мощности $\langle P(\cdot) \rangle$, вызванное появлением полезного сигнала, к ее стандартному отклонению в отсутствие сигнала. Известно, что критерий оптимизации обработки по критерию максимуму величины (2) тесно связан с более общим для задачи обнаружения критерием максимума отношения правдоподобия, и в практически важном частном случае обнаружения слабого гауссова сигнала на фоне гауссовых помех эти два критерия эквивалентны друг другу [1, 4].

Прежде чем переходить непосредственно к анализу эффектов модового рассогласования, остановимся кратко на методах оптимальной, по критерию максимума ОСШ (2), обработки многомодовых сигналов в рамках модели (1). Подчеркнем, что мы ограничиваемся здесь рассмотрением именно пространственной обработки, относящейся, как и сама модель (1), к некоторой фиксированной частоте спектра принимаемых сигналов.

Оптимальная обработка когерентных сигналов на фоне помех является линейной: сигнал на выходе обработки $y_{lin}(\mathbf{x})$ представляет собой линейное преобразование вектора наблюдений. В общем случае оно имеет вид: $y_{lin}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \omega_i x_i = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$,

где $\mathbf{w}$ — АФР (весовой вектор) антенны. Такая обработка соответствует обычной схеме весового накопления сигналов, т.е. однолучевой диаграммообразующей схеме, где термин «луч» относится к главному лепестку диаграммы направленности АР. Оптимальный весовой вектор и отвечающее ему значение ОСШ определяются при этом известными выражениями [1, 2]:

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{M}_{nn}^{-1} \mathbf{s}^*, \quad q_{max} = \mathbf{s}^T \mathbf{M}_{nn}^{-1} \mathbf{s}^*, \quad (3)$$

где $\mathbf{M}_{nn} = \langle \mathbf{n}^* \mathbf{n}^T \rangle = \mathbf{I} + \mathbf{U}^* \mathbf{R}_{nn} \mathbf{U}^T$ — матрица пространственных корреляций помех, имеющая прямую связь с матрицей взаимных корреляций модовых амплитуд $\mathbf{R}_{nn} = \langle \mathbf{b}^* \mathbf{b}^T \rangle$ размера $(M \times M)$, называемую далее матрицей межмодовых корреляций (здесь $\mathbf{I}$ — единичная матрица пространственных корреляций белого шума, ** — знак комплексного сопряжения). В свободном пространстве выражение (3) отвечает формированию диаграммы направленности с главным максимумом в направлении прихода сигнала и глубокими провалами в направлениях на помеховые источники, чем и достигается максимизация выходного ОСШ.

Оптимальная обработка частично-когерентных сигналов является квадратичной, в результате которой осуществляется более сложное (квадратичное) преобразование вектора наблюдений следующего общего вида:

$$y_{quad}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^+ (\mathbf{W}^* \mathbf{W}^T) \mathbf{x} = \left| \mathbf{W}^T \mathbf{x} \right|^2,$$

где $\mathbf{W}$ — матрица $(N \times R)$ весовых коэффициентов АР, число столбцов которой $R \geq 2$. Такая обработка представляет собой некогерентное накопление откликов отдельных пространственных фильтров, каждый из которых характеризуется своим весовым вектором, совпадающим с соответствующим вектором-столбцом весовой матрицы. В вырожденном случае (при $R=1$) весовая матрица формально есть весовой вектор, а преобразование сигналов сводится к квадратичному детектированию на выходе сумматора АР, т.е. собственно пространственная обработка при этом остается линейной. Следовательно, квадратичная пространственная обработка представляет собой более общую схему преобразования сигналов в АР, сочетающую линейные операции пространственной фильтрации сигналов (построение R -лучевой диаграммо-образующей схемы) и некогерентное накопление выходных сигналов по отдельным «лучам».

Оптимальная весовая матрица и соответствующая ей величина ОСШ определяются из уравнений, в которых, в отличие от уравнения (3), присутствует в явном виде корреляционная матрица сигнала на входе АР [1, 4-6]:

$$\mathbf{W}_{opt} \mathbf{W}_{opt}^+ = \mathbf{M}_{nn}^{-1} \mathbf{M}_{ss} \mathbf{M}_{nn}^{-1}, \quad (4a)$$

$$q_{max} = \left\{ Sp(\mathbf{M}_{nn}^{-1} \mathbf{M}_{ss})^2 \right\}^{1/2}, \quad (4b)$$

при этом каждый парциальный весовой вектор удовлетворяет уравнению [9]:

$$\mathbf{w}_r = \lambda_r^{1/2} \mathbf{M}_{mm}^{-1} \mathbf{s}_r^*, \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad (4b)$$

где $\mathbf{M}_{ss} = \langle \mathbf{s}^* \mathbf{s}^T \rangle = \mathbf{U}^* \mathbf{R}_{ss} \mathbf{U}^T$ — матрица пространственных корреляций полезного сигнала, λ_r , $\mathbf{s}_r$, R — её собственные числа, собственные векторы и ранг, соответственно (верхний индекс «+» обозначает эрмитово сопряжение), матрица $\mathbf{R}_{ss} = \langle \mathbf{a}^* \mathbf{a}^T \rangle$ — матрица межмодовых корреляций сигнала.

Таким образом, число парциальных пространственных фильтров оптимальной квадратичной обработки совпадает с полным рангом матрицы когерентности полезного сигнала. Его величина в общем случае не превышает минимального из двух чисел, определяющих размерность задачи — M (число мод) и N (число приемников). Как правило, однако, ранг оказывается заметно меньше этой оценки сверху в силу частичного разрешения модовой структуры антенной и (или) сохранения в сигнальном поле частичных межмодовых корреляций даже на больших удалениях от источника (это наиболее характерно для мод с близкими номерами) [11, 17]. С учетом сильно неравномерного, как правило, спектра собственных значений корреляционной матрицы, в расчет достаточно принимать её «эффективный» ранг, под которым понимается число старших собственных значений. Последнее, в свою очередь, имеет ясный физический смысл: по порядку величины эта величина совпадает с отношением размера АР к масштабу пространственной когерентности сигнала. Это и есть та величина, которая определяет относительный масштаб пространственной случайности сигнала.

Модовое рассогласование можно формально определить как появление некоторой аддитивной добавки (ошибки) в «правильных» модовых векторах:

$$\tilde{\mathbf{u}}_m = \mathbf{u}_m + \delta \mathbf{u}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

Тогда в качестве параметра, характеризующего относительную величину рассогласования в каждой моде, естественно определить следующее отношение:

$$\xi_m = \frac{|\delta \mathbf{u}_m|^2}{|\mathbf{u}_m|^2}. \quad (6)$$

Распределение величины (6) по номерам мод показывает, насколько сильно различные моды волновода подвержены рассогласованию. Очевидно, что это распределение, как и сами модовые векторы, зависит от числа и размещения элементов АР в канале.

Влияние модового рассогласования количественно будем характеризовать величиной относительных потерь выходного ОСШ:

$$\rho = \frac{q_{mismatch}}{q_{max}}, \quad (7)$$

где $q_{mismatch}$ есть ОСШ в условиях рассогласования, q_{max} — максимальное ОСШ, которое рассчитывается согласно выражениям (3) или (4) (для оптимальной линейной или квадратичной обработки соответственно). Величина $q_{mismatch}$ рассчитывается по тем же выражениям, но с подстановкой «рассогласованного» весового вектора $\tilde{\mathbf{W}}$ (для линейной обработки) или «рассогласованной» весовой матрицей $\tilde{\mathbf{W}}$ (для квадратичной обработки). Рассогласование последних (их отличия от оптимальных решений) обусловлено тем, что искажения (5) в оценке модовой структуры полей приводят к рассогласованию оценок корреляционных матриц сигнала и помех на входе АР.

Дальнейшее исследование заключается в сравнительном анализе потерь ОСШ (7) в различных сигнально-помеховых ситуациях на входе АР, которые характеризуются амплитудными и фазовыми соотношениями или величиной взаимных корреляций сигнальных мод, ортогональными свойствами мод на входе АР, а также уровнем модовых помех. Совокупность этих физических параметров полностью определяет специфику поставленной задачи в сравнении со случаем свободного пространства. От этих же параметров в явном виде зависят и потенциальные возможности оптимальной обработки, т.е. значения максимальных ОСШ (3), (4) в отсутствие рассогласования [9-13].

3. ДВУХМОДОВЫЙ СИГНАЛ НА ФОНЕ МОДОВОЙ ПОМЕХИ И ИЗОТРОПНОГО ШУМА

Теоретический анализ проводится нами в рамках модельной задачи обработки двухмодового сигнала на фоне пространственно-белого шума и модовой помехи, присутствующей в одной из сигнальных мод (для определенности, в первой). В такой постановке векторы сигнала и помех (1) на входе АР имеют вид:

$$\mathbf{s} = a_1 \mathbf{u}_1 + a_2 \mathbf{u}_2, \quad \mathbf{n} = \mathbf{n}_0 + b_1 \mathbf{u}_1. \quad (8)$$

В рамках модели (8) выделим две группы безразмерных параметров задачи, которые наиболее удобны для дальнейшего анализа и физической интерпретации его результатов.

Параметры модового сигнально-помехового поля:

$$\sigma = \frac{\langle |a_2|^2 \rangle \langle |\mathbf{u}_2|^2 \rangle}{\langle |a_1|^2 \rangle \langle |\mathbf{u}_1|^2 \rangle} - \text{отношение интенсивнос-}$$

тей сигнальных мод; $\psi = (\arg a_2 - \arg a_1)$ — разность

фаз сигнальных мод; $\delta = \frac{(\mathbf{u}_2^+ \mathbf{u}_1)}{|\mathbf{u}_2| \cdot |\mathbf{u}_1|}$ — коэффициент

ортогональности модовых векторов на входе АР;

$\gamma = \frac{p_{mod}}{p_{wh}}$ — относительный уровень модовой по-

мехи (здесь $p_{mod} = \langle |b_1|^2 \rangle$; p_{wh} — интенсивность

белого шума на входе); $\varepsilon = \frac{|<a_1 a_2^*>|}{\sqrt{|<a_1|^2>|<a_2|^2>}}$ – ко-

эффициент взаимных корреляций сигнальных мод. Отношения $\frac{|<a_{1,2}|^2>|u_{1,2}|^2}{|<b_1|^2>|u_1|^2}$ есть, по сути,

входные ОСШ для каждой из мод, называемые в дальнейшем модовыми ОСШ.

Параметры модового рассогласования:

$\xi_1 = \frac{|\delta u_1|^2}{|u_1|^2}$, $\xi_2 = \frac{|\delta u_2|^2}{|u_2|^2}$ – коэффициенты модового

рассогласования (6); $\Delta_{11} = \frac{(u_1^+ \delta u_1)}{|u_1| \cdot |\delta u_1|}$, $\Delta_{12} = \frac{(\delta u_2^+ u_1)}{|\delta u_2| \cdot |u_1|}$,

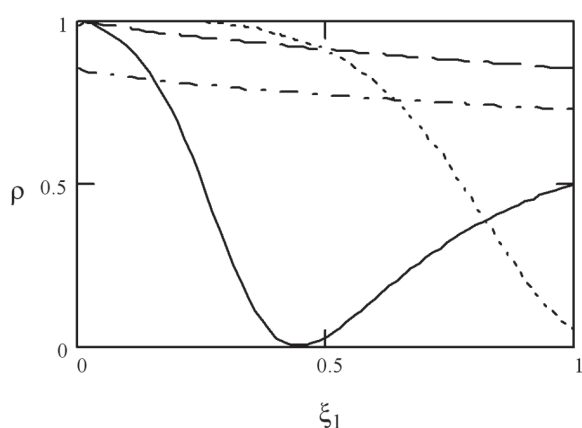


Рис. 1. Зависимость потерь ОСШ $\rho(\xi_1)$ в условиях отсутствия модовой помехи ($\gamma = 0$) и равномерно-модового спектра сигнала ($\sigma = 1$): 1) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 1$ (сплошная кривая); 2) $\xi_2 = 0.14$; $\varepsilon = 1$ (пунктир); 3) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 0.3$ (штрих); 4) $\xi_2 = 0.5$; $\varepsilon = 0$ (штрих-пунктир). Остальные параметры: $\delta = 0.8$, $\psi = \pi$, $\Delta_{11} = 0$, $\Delta_{12} = 0$, $\Delta_{21} = \Delta_{22} = 0.5$, $\Delta = 1$

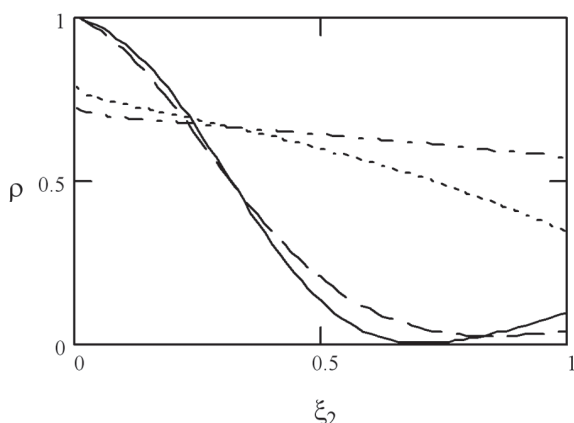


Рис. 2. Зависимость $\rho(\xi_2)$ в случае модовой помехи ($\gamma = 10$) и сигнала преимущественно на второй моде ($\sigma = 10$): 1) $\xi_1 = 0$; $\varepsilon = 1$ (сплошная кривая); 2) $\xi_1 = 0.14$; $\varepsilon = 1$ (пунктир); 3) $\xi_1 = 0$; $\varepsilon = 0.3$ (штрих); 4) $\xi_1 = 0.5$; $\varepsilon = 0$ (штрих-пунктир). Остальные параметры: $\delta = 0.8$, $\psi = \pi$, $\Delta_{11} = \Delta_{12} = 0.5$, $\Delta_{21} = \Delta_{22} = 0$, $\Delta = 1$

$\Delta_{21} = \frac{(\delta u_1^+ u_2)}{|\delta u_1| \cdot |u_2|}$, $\Delta_{22} = \frac{(u_2^+ \delta u_2)}{|u_2| \cdot |\delta u_2|}$, $\Delta = \frac{(\delta u_1^+ \delta u_2)}{|\delta u_1| \cdot |\delta u_2|}$ – ко-
эффициенты ортогональности векторов рассогласования и модовых векторов.

Отличительной особенностью данной модельной постановки является возможность исследования поставленной задачи без конкретизации условий распространения сигнала и положения АР в канале. Все обсуждаемые эффекты полностью определяются значениями приведенных параметров.

На рис. 1–4 приведены зависимости потерь ОСШ (7) от величины рассогласования (6) в одной из мод при фиксированных значениях величины рассогласования в другой моде и остальных параметров задачи. Особый интерес для нас представляет сравнительный анализ влияния модово-

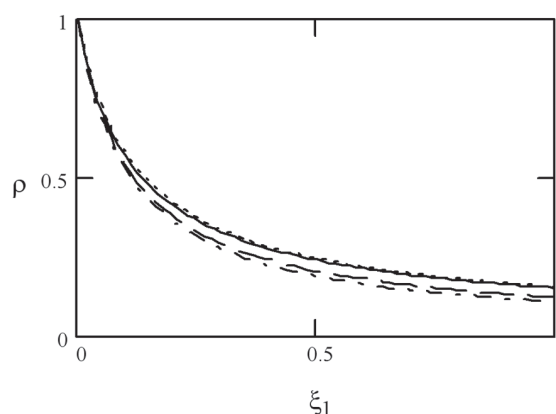


Рис. 3. Зависимость $\rho(\xi_1)$ в аналогичном рис. 2 случае при $\gamma = 10$ и $\sigma = 10$: 1) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 1$ (сплошная кривая); 2) $\xi_2 = 0.14$; $\varepsilon = 1$ (пунктир); 3) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 0.3$ (штрих); 4) $\xi_2 = 0.5$; $\varepsilon = 0$ (штрих-пунктир). Остальные параметры: $\delta = 0$, $\psi = \pi$, $\Delta_{11} = \Delta_{12} = 0$, $\Delta_{21} = \Delta_{22} = 1$, $\Delta = 1$

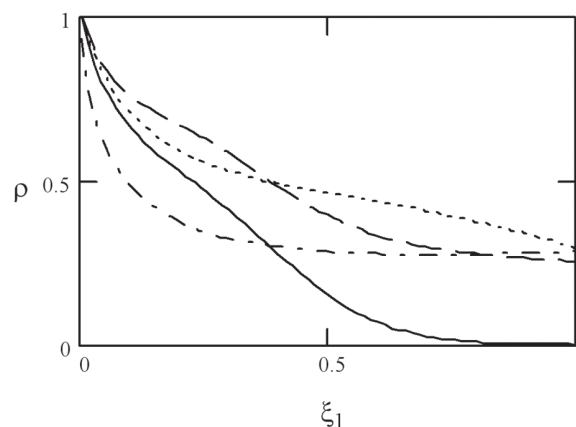


Рис. 4. Зависимость $\rho(\xi_1)$ в случае модовой помехи ($\gamma = 10$) и равномерного спектра сигнала ($\sigma = 1$): 1) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 1$ (сплошная кривая); 2) $\xi_2 = 0.14$; $\varepsilon = 1$ (пунктир); 3) $\xi_2 = 0$; $\varepsilon = 0.3$ (штрих); 4) $\xi_2 = 0.5$; $\varepsilon = 0$ (штрих-пунктир). Остальные параметры: $\delta = 0.8$, $\psi = \pi$, $\Delta_{11} = \Delta_{12} = 0$, $\Delta_{21} = \Delta_{22} = 0.5$, $\Delta = 0.8$

го рассогласования на величину выходного ОСШ в двух предельных случаях: полностью коррелированных (раздел 3.1) и взаимно-некоррелированных (раздел 3.2) сигнальных мод. В первом случае, как отмечено выше, оптимальная обработка является линейной и сводится к формированию весового вектора, которому отвечают определенные значения откликов АР на сигнальные моды, зависящие от их помехоустойчивости (модовых ОСШ); во втором случае оптимальная обработка становится квадратичной и требует построения весовой матрицы, состоящей в данной постановке из двух векторов-столбцов.

3.1. Коррелированные моды сигнала

Выражение для оптимального весового вектора (3) имеет в этом случае вид:

$$\mathbf{w}_{opt} = p_{wh}^{-1} \left[\alpha \left(\mathbf{a}_1^* - a_2^* \gamma \left(\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2 \right) \right) \mathbf{u}_1 + a_2^* \mathbf{u}_2 \right],$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \gamma |\mathbf{u}_1|^2}. \quad (9)$$

Видно, что весовой вектор (9) есть суперпозиция двух компонент: первая из них «отвечает» за подавление первой моды, что приводит к уменьшению уровня модовой помехи на выходе обработки (в асимптотике $\gamma \rightarrow \infty$ коэффициент $\alpha \rightarrow 0$, при этом первая мода вообще не дает вклада в выходной сигнал), а вторая — за согласованную фильтрацию второй (сигнальной) моды. Следовательно, модовое рассогласование приводит к ослаблению эффективности обработки в результате как уменьшения отклика на полезный сигнал, так и увеличения отклика на модовую помеху. Формально, потери выходного ОСШ обусловлены при этом тем, что рассогласованный весовой вектор $\tilde{\mathbf{w}}$ отличается от оптимального вектора (9) в силу отличий векторов $\tilde{\mathbf{u}}_{1,2}$ от точных векторов $\mathbf{u}_{1,2}$, а наибольшие потери отвечают ситуации, когда эти весовые векторы оказываются взаимно ортогональными.

Несмотря на относительную простоту двухмодовой модели сигнала, аналитическое рассмотрение задачи оказывается весьма громоздким с учетом всех ее параметров, поэтому мы ограничимся рядом наиболее важных частных случаев.

В случае нулевой модовой помехи (при $\gamma = 0$) оптимальная обработка заключается в согласованной фильтрации модового сигнала на фоне пространственно-белого шума. Очевидно заранее (для любого числа сигнальных мод), что влияние рассогласования при этом определяется тем, насколько оно велико для тех мод, в которых мощность сигнала является наибольшей. Допустим сначала, что рассогласование есть только в одной из мод, для определенности, во второй моде ($\xi = \xi_2$)². Важной особенностью зависимости $\rho(\xi)$

в этом случае является то, что она может быть немонотонной и иметь минимум (отвечающий максимуму потерь ОСШ) при некоторой конечной величине рассогласования $\xi = \xi_{cr}$:

$$\sqrt{\xi_{cr}} = - \frac{1 + 2\delta\sqrt{\sigma}\cos\psi + \sigma}{\sqrt{\sigma}(\Delta_{12}\cos\psi + \Delta_{22}\sqrt{\sigma})}.$$

Отмеченная немонотонность $\rho(\xi)$ отвечает условию $\cos\psi < -\frac{\Delta_{22}}{\Delta_{12}}\sqrt{\sigma}$, $\Delta_{12} \neq 0$, и в случае

$\cos\psi = -1$, когда сигнальные моды оказываются в противофазе на входе АР, величина $\rho(\xi_{cr}) = 0$ (т.е. величина $q_{mismatch} = 0$). При обратном условии зависимость $\rho(\xi)$ является монотонно убывающей. Видно также, что с уменьшением величины $\frac{\Delta_{22}}{\Delta_{12}}\sqrt{\sigma}$ и ростом параметра δ значение ξ_{cr}

уменьшается, следовательно, зависимость $\rho(\xi)$ становится более резкой в области малых значений ξ , что свидетельствует о наибольшем влиянии рассогласования на эффективность обработки. Обратим также внимание на зависимость от величины δ : чем она меньше, т.е. чем менее ортогональны моды (хуже разрешающая способность АР), тем большие потери ОСШ могут наблюдаться уже при малых значениях рассогласования в одной из сигнальных мод.

При учете рассогласования в обеих сигнальных модах естественно выделить два предельных случая: сильно неравномерного и, напротив, равномерного модового спектра сигнала. В первом случае (при $\sigma \gg 1$ или $\sigma \ll 1$) оптимальный модовый фильтр, как и сигнал, становится «одномодовым», поэтому величина потерь ОСШ определяется коэффициентом ортогональности точного и рассогласованного модовых векторов только для

одной (наиболее мощной) моды: $\rho \sim \frac{|\tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{u}_i|^2}{|\tilde{\mathbf{u}}_i|^2 |\mathbf{u}_i|^2}$, где

$i = 1$ (при $\sigma \ll 1$), либо $i = 2$ (при $\sigma \gg 1$). Существенно, что такие важные параметры, как разность фаз и коэффициент взаимной ортогональности сигнальных мод, практически не влияют при этом на величину потерь ОСШ. Напротив, в случае равномерного модового спектра (при $\sigma \approx 1$) зависимость потерь ОСШ от межмодового фазового сдвига и коэффициента ортогональности мод становится, как и следовало ожидать, наиболее заметной. Минимальное значение $\rho = 0$ (полная потеря эффективности обработки) достигается в этом случае при условии взаимной ортогональности разностных векторов $(\tilde{\mathbf{u}}_2 - \tilde{\mathbf{u}}_1)$ и $(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1)$, когда рассогласование приводит к полному подавлению выходного сигнала (рис. 1, пункт для случая 2).

В ситуации, когда на входе АР присутствует мощная модовая помеха (параметр $\gamma \gg 1$), возможное влияние рассогласования, очевидно,

² Например, при неточной оценке положения вертикальной АР в подводном канале или отдельных ее элементов рассогласование оказывается более заметным для мод с высокими номерами, имеющими осциллирующие амплитудные распределения с меньшими масштабами (см. следующий раздел).

только усиливается. Если рассогласование присутствует только во второй сигнальной моде, то, аналогично предыдущему случаю, также возможно немонотонное поведение зависимости $\rho(\xi)$. Соответствующее выражение для величины рассогласования в точке максимума потерь ОСШ имеет теперь вид:

$$\sqrt{\xi_{cr}} = -\frac{1 + 2\delta\sqrt{\sigma}\cos\psi + \sigma + \sigma\gamma(1 - \delta^2)}{\sqrt{\sigma}(\Delta_{12}\cos\psi + \Delta_{22}\sqrt{\sigma}) - \sigma\gamma(\Delta_{12}\delta - \Delta_{22})}.$$

Из этого выражения видно, что при $\sigma\gamma \gg 1$ значение $\sqrt{\xi_{cr}} \approx \frac{1 - \delta^2}{\Delta_{12}\delta - \Delta_{22}}$ и также уменьшается с

ростом δ вследствие того, что рассогласование во второй (сигнальной) моде «проецируется» на первую (помеховую) моду, отчего эффективность подавления помехи резко падает даже при малых значениях ξ (рис. 2, сплошная кривая для случая 1).

Анализ влияния рассогласования в обеих модах позволяет выделить и другие критические ситуации, появление которых зависит от соотношения интенсивностей сигнальных мод. В частности, если сигнал и помеха присутствуют преимущественно в разных модах ($\sigma \gg 1$, $\gamma \gg 1$), но разрешающая способность АР относительно мала, даже малое рассогласование в первой моде (при условии $\sqrt{\xi_1} \gg \gamma^{-2}$) приводит к заметному подавлению второй моды и сигнала в целом (рис. 2, пунктир для случая 2). Однако, основной вклад в величину потерь ОСШ определяется в этом случае ростом выходной мощности модовой помехи, в том числе, и при полностью ортогональных модах, когда подавление полезного сигнала практически отсутствует (рис. 3, сплошная кривая и пунктир). Подчеркнем, что случай разделяющихся модовых спектров сигнала и помех представляет в контексте нашего анализа наибольший интерес, поскольку он отвечает наибольшему значению «невозмущенной» величины максимального ОСШ (3) — фактически, наилучшим условиям приема сигнала с точки зрения его обнаружения на фоне мощной помехи. В то же время, обусловленные модовым рассогласованием потери ОСШ при этом могут оказаться также наиболее значительными.

Обратный случай $\sigma \ll 1$ не представляет особого интереса, так как модовые спектры сигнала и помехи при этом практически не различаются, и оптимизация АР даже в отсутствие рассогласования практически не обеспечивает заметного выигрыша в сравнении с одиночным приемником. В свободном пространстве этому случаю отвечает ситуация, когда направления на источники полезного сигнала и мощной помехи практически совпадают, т.е. не разрешаются в пределах главного лепестка диаграммы направленности АР.

Наконец, для случая равномерного спектра сигнала ($\sigma = 1$) возможные потери ОСШ занимают некоторое промежуточное положение и зави-

сят, как и в случае нулевой модовой помехи, от межмодовой разности фаз. Результирующий эффект также обусловлен в этом случае частичным подавлением полезного сигнала и уменьшением эффективности подавления мощной помехи (рис. 4, сплошная кривая и пунктир). Влияние «несимметричного» по модам помехового фактора существенно зависит от взаимной ортогональности мод: чем она ниже (хуже разрешающая способность АР), тем больше потери выходного ОСШ (меньше величина ρ).

Таким образом, в ситуации приема когерентного сигнала, который формируется полностью коррелированными модами, величина потерь ОСШ в основном определяется амплитудно-фазовыми соотношениями сигнальных мод (параметрами σ и ψ), а также уровнем модовой помехи (параметром γ), при этом результирующий эффект рассогласования существенно зависит от пространственного разрешения АР модовой структуры (параметра δ). В частности, при сильно неравномерном распределении сигнала и помех по модам потери ОСШ могут быть существенными даже при малых величинах рассогласования в результате как частичного подавления наиболее «полезных» мод (мод с наибольшими значениями модовых ОСШ), так и резкого роста выходной мощности помех. Прямыми аналогами таких эффектов в свободном пространстве являются, соответственно, частичное ослабление выходного сигнала в результате смещения максимума оптимальной диаграммы направленности от направления на источник полезного сигнала и рост выходного уровня помехи в результате смещения (даже незначительного — на угол, много меньший ширины лепестка) нуля диаграммы от направления на помеховый источник, при этом последний эффект тем больше, чем выше интенсивность помехи.

3.2. Некоррелированные моды сигнала

Распространение многомодового сигнала в случайно-неоднородном канале сопровождается ослаблением его пространственной когерентности в результате ослабления межмодовых корреляций, которое, в свою очередь, происходит вследствие растущих с дистанцией флуктуаций межмодовых фазовых сдвигов. Оптимальная квадратичная обработка такого сигнала строится путем некогерентного (без учета случайных фазовых сдвигов) накопления откликов парциальных пространственных (модовых) фильтров (4в), а в предельном случае полностью некогерентных и разрешаемых антенной мод — некогерентного накопления отдельных мод, формирующих поле сигнала на входе АР [10, 18].

Параметром, характеризующим в рамках нашей модели степень когерентности сигнала, является коэффициент ϵ взаимной корреляции модовых амплитуд. Остановимся кратко на анализе влияния рассогласования в предельном случае взаимно-некоррелированных сигнальных мод

(при $\varepsilon = 0$). Численные иллюстрации представлены также для промежуточных случаев частично-коррелированных мод (рис. 1–4, штрих-пунктирные и штрихованные кривые для случаев 3, 4 соответственно).

Как и в предыдущем подразделе, сначала остановимся на анализе ситуации, когда модовый шум отсутствует ($\gamma = 0$). В случае сильно неравномерного спектра сигнала оптимальная обработка оказывается, как и для когерентного сигнала, практически «одномодовой», а дополнительный выигрыш квадратичной обработки практически отсутствует. Физически это представляется очевидным, поскольку такой сигнал сохраняет высокую пространственную когерентность вне зависимости от межмодовых корреляций (эффективный ранг его корреляционной матрицы равен 1). Также очевидно, что потери выходного ОСШ определяются при этом величиной рассогласования только в одной, наиболее мощной сигнальной моде.

Наиболее интересен здесь, однако, случай близких по интенсивности взаимно-некоррелированных мод, поскольку некогерентное накопление выходных сигналов парциальных модовых фильтров обеспечивает при этом максимальный выигрыш квадратичной обработки в сравнении с линейной обработкой. Величина этого дополнительного выигрыша равна $\sqrt{2}$ (в рамках данной модели), в общем случае — $\sqrt{M}$ [10, 11]. Соответственно, влияние модового рассогласования на эффективность квадратичной обработки оказывается при этом также наиболее существенным.

Не приводя громоздких выражений, отметим только, что величина ОСШ медленно убывает с ростом величины рассогласования. Например, даже для достаточно больших значений $\xi_1 = 1, \xi_2 = 1$ величина потерь ОСШ $\rho \approx 0.5$ (при дополнительном упрощающем расчет условии, что оба вектора рассогласований $\delta \mathbf{u}_{1,2}$ ортогональны исходным модовым векторам). Из рис. 1 также хорошо видно, что влияние рассогласования на квадратичную обработку заметно меньше в сравнении с согласованной обработкой полностью когерентного сигнала.

В случае присутствия на входе АР мощной модовой помехи ($\gamma \gg 1$) и умеренных значений $\sigma \geq 1$ отклик на сигнал первого парциального фильтра относительно мал, поэтому потери ОСШ будут определяться, в основном, рассогласованием по второй моде, как и для рассмотренной выше линейной обработки когерентного сигнала. При дальнейшем разделении модовых спектров сигнала и помехи (т.е. при $\sigma \gg 1$) эффект рассогласования практически не отличается от случая коррелированных мод, поскольку АР «не чувствует» ослабление межмодовых корреляций сигнала (как и в случае нулевой модовой помехи). На рис. 2, 3 показано, что ослабление межмодовых корреляций при больших значениях параметра σ

действительно слабо влияет на результирующие потери выходного ОСШ.

При равномерном спектре сигнала эффект рассогласования также менее заметен в сравнении с аналогичной ситуацией при коррелированных модах. Однако, как это видно на рис. 4, из-за рассогласования в первой моде потери могут оставаться существенными, главным образом, вследствие отмеченного выше эффекта «просачивания» мощной помехи в выходной сигнал (этот эффект, однако, также не зависит от когерентных свойств сигнального поля и определяется величиной параметра δ).

Таким образом, проведенный анализ в рамках простой модели (8) показал, что в ситуации слабых межмодовых корреляций полезного сигнала квадратичная обработка не только способна обеспечить дополнительный (в сравнении с линейной обработкой) выигрыш выходного ОСШ, но и менее подвержена влиянию модового рассогласования. Для сигналов с равномерным распределением модовых ОСШ, когда квадратичная обработка наиболее эффективна, обусловленные рассогласованием потери выходного ОСШ монотонно уменьшаются с ослаблением межмодовых корреляций и оказываются минимальными при некоррелированных модах.

4. ВЕРТИКАЛЬНАЯ АР В МЕЛКОВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

В данном разделе представлены численные результаты, иллюстрирующие влияние модового рассогласования на величину выходного ОСШ при работе вертикальной АР в акустическом волноводе мелкого моря. В отличие от предыдущего исследования, выполненного в общем виде без конкретизации модовой структуры канала, эффект рассогласования демонстрируется здесь путем прямого моделирования сигнального и помехового полей на входе АР с заданным расположением элементов.

Для моделирования гидрологических условий был выбран типичный глубинный профиль скорости звука в Баренцевом море (рис. 5, сплошная кривая) и заданы следующие параметры задачи: скорость продольных волн в дне (однородном упругом полупространстве) — 1830 м/с, глубина канала 120 м, частота 300 Гц (полное число мод дискретного спектра $M = 29$), число элементов $N = 16$, межэлементное расстояние $d = 2,5$ м (полный размер антенны составляет при этом 37,5 м), глубина положения первого элемента $z_1 = 5, 35, 75$ м. Модовое рассогласование моделировалось путем некоторого сглаживания «точного» профиля скорости звука (рис. 5, штрих-пунктир). Поскольку такое искажение профиля отвечает средней по глубине области канала, оно приводит к заметному рассогласованию в структуре мод с низкими номерами, вертикальные профили которых не выходят на поверхность и больше прижаты к дну. Расчет величин ξ_m (6) при различных глубинах

размещения АР подтвердил, что рассогласование достигает заметных величин только для мод с относительно низкими номерами $m \leq 10$ (см. рис. 6 для случая $z_1 = 35$ м).

Выбранная нами модель канала по своим геоакустическим параметрам, характеризующим свойства пород морского дна, максимально упрощена и не претендует на хорошее соответствие реальным условиям. В данной работе нам важна не столько точность моделирования конкретных условий распространения звука, сколько демонстрация эффекта модового рассогласования и его зависимости от параметров задачи. Более сложные расчеты сигнального поля с учетом слоистой структуры донных пород приведут, очевидно, к поправкам в модовой структуре канала и величинах ξ_m , но не к изменению характера обсуждаемых эффектов. Отметим в этой связи, что неточное знание геоакустических параметров мелководного канала, как и профиля скорости звука в самом водном слое, является естественной причиной модового рассогласования при работе протяженных гидроакустических антенн в реальных условиях [14-16].

Для расчета корреляционной матрицы модовых помех нами использовалась известная статистическая модель т.н. собственных шумов океана, возбуждаемых точечными ненаправленными источниками, изотропно распределенными на морской поверхности [19]. В рамках этой модели межмодовые корреляции шумового поля отсутствуют, а матрица пространственных корреляций помех на входе АР имеет вид:

$$\{\mathbf{M}_{mn}\}_{ij} = \frac{1}{p_{wh}} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{[u'_m(0)]^2}{h_m \operatorname{Im}(h_m) H} u_m(z_i) u_m(z_j), \quad (10)$$

где h_m — продольные волновые числа мод; H — глубина волновода; ij — номера элементов АР. Первый множитель под знаком суммы, зависящий от значений производных модовых функций $u_m(z)$ на поверхности, есть модовый спектр интенсивности помех. Выполненный для заданных параметров расчет показал, что интенсивность помех монотонно растет с ростом номера моды, начиная с номеров $m \sim 10$, в то время как в низких модах помехи практически отсутствуют. Такой характер спектра помех обусловлен физической моделью их генерации: наиболее зашумленными оказываются «выходящие» на поверхность моды высоких номеров. Следовательно, оптимальный модовый фильтр является в данном случае фильтром относительно низких мод. Поскольку структура именно этих мод, при выбранном нами механизме рассогласования, наиболее подвержена рассогласованию (см. рис. 6), можно ожидать заметных потерь выходного ОСШ. Вместе с тем, помеховые (высокие) моды при этом практически не подвержены рассогласованию. Следовательно, отмеченный выше фактор потерь ОСШ, который связан с ослаблением эффективности подавления

анизотропных модовых помех в условиях рассогласования, не должен быть существенным в данном случае.

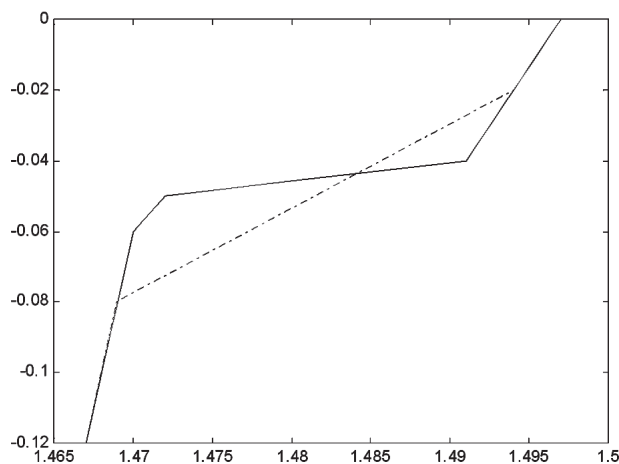


Рис. 5. Модельные профили скорости звука (по оси абсцисс, в км/с) как функции глубины (по оси ординат, в м) в мелководном канале глубиной $H = 120$ м: сплошная линия — точный профиль, штрих-пунктир — искаженный профиль

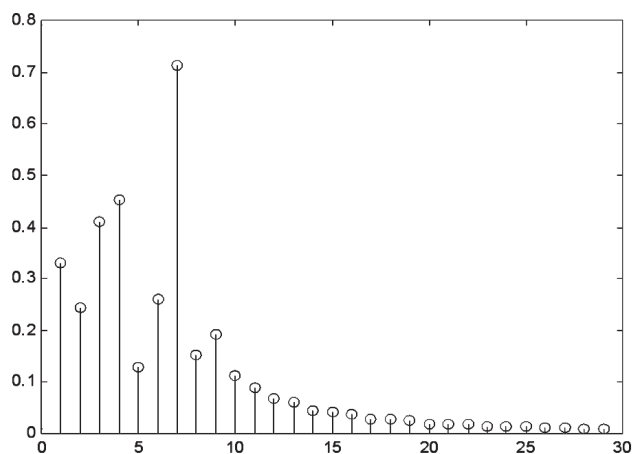


Рис. 6. Распределение величины модового рассогласования $\xi(m)$ по номерам мод (при $z_1 = 35$ м)

4.1. Линейная обработка когерентного сигнала

Зависимости потерь ОСШ (7) от расстояния до источника для случая полностью коррелированных мод приведены на рис. 7 при различных глубинах источника и приемной АР. Физически, этот случай отвечает относительно близким расстояниям, для которых статистические эффекты многократного рассеяния звука на случайных неоднородностях канала «не успевают» привести к ослаблению межмодовых корреляций. Изменение расстояния приводит, однако, к изменению фазовых соотношений сигнальных мод на входе АР (набег фазы по каждой из мод зависит от ее продольного волнового числа h_m). Изменение глубины источника, в свою очередь, приводит к изменению модового спектра возбуждаемого им сигнала и к соответствующему изменению модовых ОСШ (при заданном спектре модовых помех

(10)); а изменение глубины АР — к изменению ортогональных свойств модовых векторов на апертуре АР. Таким образом, меняя эти параметры, мы имеем возможность показать влияние всех отмеченных в предыдущем разделе физических факторов, влияющих на величину потерь ОСШ в условиях модового рассогласования.

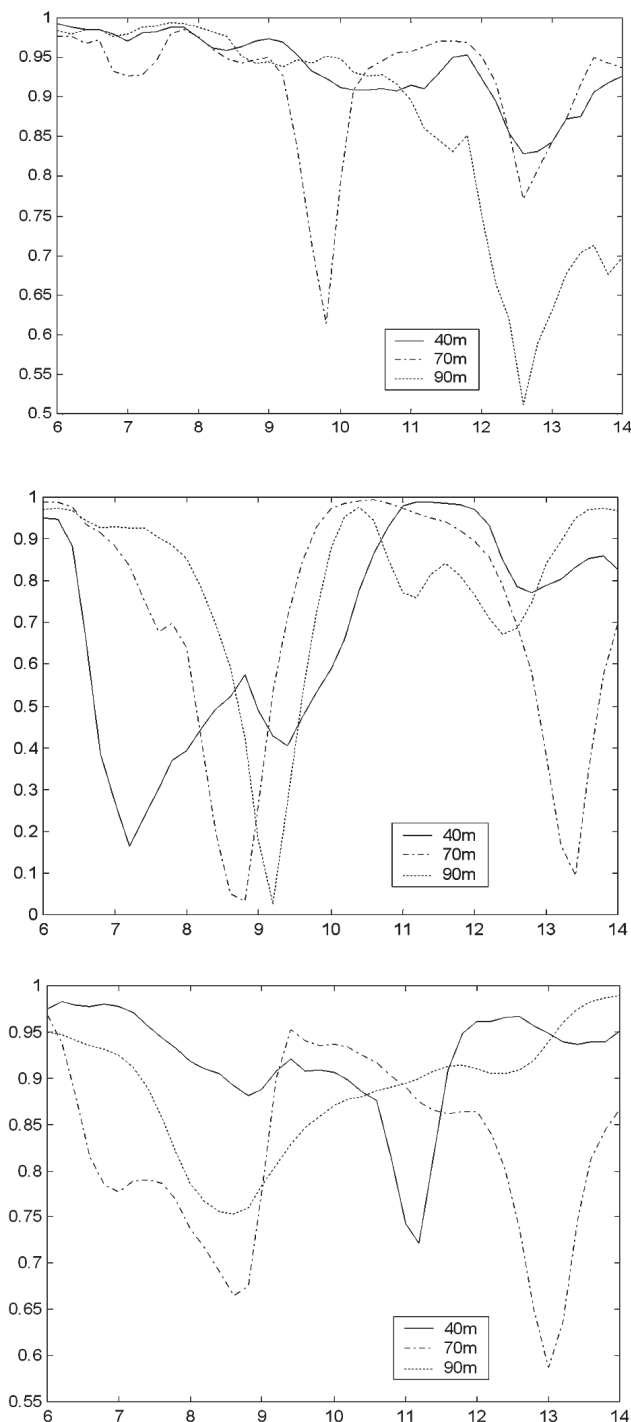


Рис. 7. Потери выходного ОСШ оптимальной линейной обработки в зависимости от расстояния до источника (по оси абсцисс, в км) при различных глубинах источника (40, 70, 90 м) и АР: $z_1 = 5, 35, 75$ м (сверху вниз)

При расположении АР вблизи поверхности ($z_1 = 5$ м, верхний рисунок) рассогласование приводит к заметному эффекту только тогда, когда

источник возбуждает группу низких мод, имеющих относительно большую величину рассогласования (см. пунктирные и штрих-пунктирные кривые). Однако даже в этом случае потери выходного ОСШ относительно невелики (до величины $\sim 0,5$), поскольку низкие моды слабо «освещают» подповерхностную АР и поэтому их вклад в принимаемый сигнал относительно невелик (в используемой модели канала низкие моды «прижаты» ко дну).

Наиболее значительный эффект модового рассогласования, как видно из среднего рисунка, отвечает расположению АР в центральной части канала ($z_1 = 35$ м): выходное ОСШ падает практически до нуля для некоторых дистанций. Отметим, что моды с наибольшим рассогласованием являются в данном случае частично-ортогональными. В предыдущем разделе уже было показано, что уменьшение разрешающей способности АР приводит в условиях рассогласования к росту потерь ОСШ (фактически, к большему подавлению полезного сигнала). Появление глубоких провалов в зависимости потерь ОСШ от расстояния убедительно подтверждает вывод о существенном влиянии межмодовых фазовых сдвигов сигнальных мод. Очевидно из физических соображений, что ширина этих провалов обратно пропорциональна числу наиболее мощных мод в спектре сигнала, поскольку именно их фазовые соотношения определяют данный эффект и конкретную форму этой зависимости.

При расположении АР в придонной области ($z_1 = 75$ м) влияние рассогласования, как и в первом случае, относительно невелико, но уже по другой причине. Низкие моды с наибольшими значениями модовых ОСШ обладают в этом случае достаточно высокой взаимной ортогональностью на антенне, поскольку АР практически перекрывает область локализации модовых функций по глубине.

С учетом характерного для мелководного распространения эффекта «обеднения» модового спектра сигнала в результате рассеяния звука в дне, можно качественно заключить, что показанные на рис. 7 зависимости с ростом расстояния будут постепенно сглаживаться (количественные иллюстрации этого эффекта здесь не приводятся). В предельном случае одной распространяющейся моды величина потерь ОСШ вообще перестает зависеть от расстояния и имеет некую постоянную величину, зависящую только от соответствующей величины ξ_m для данной (первой) моды. Вместе с тем, заметное уменьшение влияния модового рассогласования, как уже было показано выше, проявляется также в результате другого эффекта дальнего распространения — ослабления межмодовых корреляций. Фактически, оба этих физических фактора приводят к уменьшению потерь ОСШ и повышению робастности обработки с ростом расстояния до источника.

4.2. Квадратичная обработка частично-когерентного сигнала

Для моделирования эффекта рассогласования в случае частично-когерентного сигнала нами использовалась достаточно простая эвристическая модель межмодовых корреляций, использованная также в ряде предыдущих наших работ [11, 17]:

$$\langle a_m a_n^* \rangle = |a_m| |a_n| \exp\left(-\frac{|m-n|}{\Delta}\right), \quad (11)$$

где параметр Δ есть некоторый масштаб межмодовых корреляций (число мод, для которых сохраняются корреляции амплитуд с данной модой). Модель (11) качественно верно отражает наиболее важное свойство межмодовых корреляций сигнала в случайно-неоднородном волноводе: их монотонное уменьшение с увеличением разности номеров мод [20, 21]. Масштаб Δ уменьшается с расстоянием до источника асимптотически до нуля, т.е. до полного исчезновения межмодовых корреляций, в результате чего пространственный масштаб когерентности сигнала также уменьшается до некоторой минимальной величины, зависящей от типа канала (см., например, [8]).

Существенным упрощением в модели (11) является то, что в ней не учитываются остаточные (после статистического усреднения) межмодовые разности фаз, которые могут сохраняться для некоторых пар мод с близкими номерами на больших дистанциях. Следовательно, модель (11) дает возможность получить усредненную (по дистанции) оценку для потерь ОСШ, сглаживающую «интерференционную» структуру их зависимости с учетом влияния межмодовых фазовых сдвигов для некоторых пар мод. Другое упрощение модели, выражающееся в отсутствии зависимости масштаба Δ от модовых номеров³, не является принципиальным в контексте нашего рассмотрения.

Расчеты величины потерь ОСШ, выполненные для средней глубины установки АР и трех значений масштаба межмодовых корреляций, представлены в табл. 1 (предельный случай $\Delta = 0$ отвечает диагональной матрице $\mathbf{R}_{ss}$). Видно, что в сравнении с рассмотренным выше случаем полностью когерентного сигнала влияние модового рассогласования значительно уменьшается, и потери ОСШ не превышают величину ~ 0.5 . При этом с увеличением масштаба межмодовых корреляций влияние рассогласования несколько возрастает (сигнал становится более когерентным), но в силу того, что в модели (11) не учитываются остаточные межмодовые разности фаз, потери ОСШ остаются практически незначительными для всех значений выбранных параметров.

³ Эта зависимость, как правило, имеет место в реальных каналах и отражает различную интенсивность флуктуаций межмодовых фазовых сдвигов для разных групп мод в зависимости от типа случайных неоднородностей и их пространственных масштабов.

Таблица 1

Потери выходного ОСШ для АР
с квадратичной обработкой сигнала

$z_1 = 35$ м	$\Delta = 0$	$\Delta = 3$	$\Delta = 10$
$z_{source} = 40$ м	0.78	0.71	0.54
$z_{source} = 70$ м	0.97	0.98	0.94
$z_{source} = 90$ м	0.97	0.94	0.76

Таким образом, результаты численного моделирования оптимальной пространственной обработки сигналов в условиях модового рассогласования, обусловленного неточным знанием характеристик канала распространения, полностью подтверждают общие выводы предыдущего анализа в рамках простой двухмодовой модели. Показано, что в случае когерентного сигнала величина потерь выходного ОСШ оптимальной обработки сильно зависит от координат источника, определяющих межмодовые разности фаз и модовый спектр интенсивности сигнала, а также от положения АР в канале, влияющего на пространственное разрешение модовой структуры волновода. При некоторых «критических» амплитудно-фазовых соотношениях сигнальных мод выходное ОСШ в результате рассогласования может падать практически до нуля, что свидетельствует о полной потере эффективности АР. В случае слабо коррелированных сигнальных мод потери выходного ОСШ заметно уменьшаются и слабо зависят от ортогональных свойств мод на входе АР. Следовательно, оптимальная квадратичная обработка частично-когерентного многомодового сигнала является более устойчивой (робастной) по отношению к модовому рассогласованию в сравнении с оптимальной линейной обработкой сигнала, формируемого суперпозицией полностью коррелированных мод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача оптимальной пространственной обработки сигналов на фоне помех в волноводном канале распространения в условиях рассогласования оценки структуры мод дискретного спектра на входе приемной АР. Это рассогласование возникает вследствие априорной неопределенности относительно свойств канала либо неточного знания положений отдельных элементов АР и является весьма характерным сценарием задачи обнаружения сигналов на фоне помех в реальных природных волноводах. Выполнен сравнительный анализ потерь ОСШ, вызванных модовым рассогласованием, в двух принципиально различных ситуациях, характеризующих условия распространения сигнала: полностью коррелированных и частично-коррелированных (в том числе, некоррелированных) сигнальных мод. С позиций общего анализа методов пространственной обработки сигналов дискретного спектра с использованием протяженных

антенн, представленные результаты позволяют оценить робастность оптимальных методов в условиях модового рассогласования.

Показано, что в случае когерентного сигнала, который формируется полностью коррелированными модами на относительно коротких (в этом смысле) расстояниях до источника, потери выходного ОСШ при заданных величинах модового рассогласования определяются, главным образом, межмодовыми фазовыми соотношениями и значениями модовых ОСШ и существенно зависят также от пространственного разрешения модовой структуры сигнала, т.е. от размеров и положения приемной АР в канале. В частности, в ситуации сильно неравномерного распределения модовых ОСШ, когда сигнал и помехи присутствуют преимущественно в разных группах мод волновода, потери выходного ОСШ оказываются наиболее значительными в двух различных ситуациях: 1) при слабой ортогональности мод с наибольшими и наименьшими значениями модовых ОСШ (при этом происходит частичное подавление наиболее «полезных» мод); 2) при больших величинах рассогласования в структуре помеховых мод с наименьшими ОСШ (при этом резко уменьшается эффективность их подавления).

Показано также, что с ослаблением взаимных корреляций модовых амплитуд полезного сигнала влияние модового рассогласования заметно уменьшается. Величина потерь выходного ОСШ монотонно уменьшается с уменьшением характерного масштаба межмодовых корреляций и перестают зависеть от межмодовых фазовых сдвигов, если последние носят полностью случайный характер и не имеют средней (когерентной) компоненты. Это означает, что оптимальная квадратичная пространственная обработка частично-когерентного многомодового сигнала является значительно более устойчивой к модовому рассогласованию.

Таким образом, минимизации возможного влияния модового рассогласования на выходное ОСШ протяженной АР можно добиться двумя путями. Во-первых, путем пространственного разрешения (ортогонализации) групп мод с наибольшими и наименьшими уровнями входного ОСШ, причем основное внимание должно быть уделено оценке структуры тех мод, в которых присутствует (или ожидается) мощная помеха. Такая ортогонализация позволит минимизировать «просачивание» модовой помехи в выходной сигнал обработки, которое приводит к значительному уменьшению ОСШ. Во-вторых, путем использования эвристической процедуры некогерентного накопления сигнальных мод на относительно близких расстояниях от источника, для которых сохраняются регулярные межмодовые разности фаз, а сам сигнал сохраняет высокую пространственную когерентность. Такой подход означает, по существу, уменьшение возможных потерь рассогласования за счет предварительного уменьше-

ния выходного ОСШ в результате использования неоптимального (и поэтому более устойчивого) метода обработки.

В действительности, оба отмеченных подхода к минимизации потерь ОСШ взаимосвязаны, поскольку значительный выигрыш протяженной АР при использовании некогерентной пространственной фильтрации мод может быть реализован только в случае сильных различий модовых спектров сигнала и помех. Другими словами, пространственное разрешение (ортогональность) «сигнальных» и «помеховых» мод на входе АР есть необходимое условие такого выигрыша [18]. В ситуации, когда оценки модовых спектров сигнала и помех, а также самой модовой структуры волновода, могут быть получены априори на основе реалистичной модели распространения, выбор робастного метода пространственной обработки может быть уточнен, исходя из сравнительной численной оценки возможных потерь выходного ОСШ для конкретных условий размещения АР в канале.

Авторы благодарят В.И. Таланова за интерес к работе и полезные замечания. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственной программы поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

- [1] Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
- [2] Пистолькорс А.А., Литвинов О.Л. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.
- [3] Ильичев В.И., Калужный А.Я., Красный Л.Г., Лануй В.Ю. Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов. М.: Наука, 1992. 415 с.
- [4] Baker C.R. Optimum quadratic detection of random vector in Gaussian noise // IEEE Trans. 1966. V. C-14. № 6. P. 802-808.
- [5] Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и нестабильности среды на пространственную и временную обработку сигналов // Подводная акустика и обработка сигналов. / Пер. с англ. Под ред. Л. Бьёрнё. М.: Мир, 1986. С. 43-68.
- [6] Morgan D.R., Smith T.M. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with application to large-array matched-field beamforming // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87. № 2. P. 737-747.
- [7] Ianniello J.P. Recent developments in sonar signal processing // IEEE Signal Processing Mag. July 1998. P. 27-40.
- [8] Carey W.C. The determination of signal coherence length based on signal coherence and gain measurements in deep and shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1998. V. 104. № 2. Pt. 1. P. 831-837.
- [9] Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891-897.
- [10] Малеханов А.И., Серебряков Г.В. Помехоустойчивость оптимальной пространственной обработки полей дискретного спектра // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 6. С. 1069-1080.

- [11] Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И. Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 6. С. 1044-1051.
- [12] Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г., Фарфель В.А. Влияние эффектов дальнего распространения звука в случайно-неоднородном океане на потери усиления горизонтальной антенной решетки // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 5. С. 615-622.
- [13] Вдовичева Н.К., Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г. Коэффициент усиления вертикальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 6. С. 769-776.
- [14] Feuillade C., DelBalzo D.R., Rowe M.M. Environmental mismatch in shallow-water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 85. № 6. P. 2354-2364.
- [15] Tolstoy A. Sensitivity of matched-field processing to sound-speed profile mismatch for vertical arrays in a deep water Pacific environment // Ibidem. P. 2394-2405.
- [16] Hamson R.M., Heitmeyer R.M. Environmental and system affects on source localization in shallow water by the matched-field processing of a vertical array // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. № 5. P. 1614-1620.
- [17] Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И. Адаптивное управление акустическими полями в океанических волноводах // Формирование акустических полей в океанических волноводах: Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Зверева. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1994. С. 9-43.
- [18] Малеханов А.И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1992. Т. 38. №5. С. 898-904.
- [19] Kuperman W., Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 67. № 6. P. 1988-1996.
- [20] Вировлянский А.Л., Костерин А.Г., Малахов А.Н. Флуктуации мод в каноническом подводном звуковом канале // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 229-235.
- [21] Артельный А.А., Раевский М.А. Межмодовые корреляции акустического поля в волноводе со случайными объемными неоднородностями // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 5. С. 774-778.

Поступила в редколлегию 3.03.2010.

Городецкая Елена Юрьевна, научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Область научных интересов: численное моделирование задач радиофизики и акустики.



Малеханов Александр Игоревич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Область научных интересов: теория антенн, распространение волн в неоднородных средах, акустика океана.



Харламов Дмитрий Михайлович, ведущий системный аналитик компании Exigen Services. Область научных интересов: теория антенн, обработка сигналов.

ЛЕНТОЧНО-ДИАГОНАЛЬНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ МП ОЦЕНОК КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МАТРИЦ ГАУССОВЫХ ПОМЕХ В АЛГОРИТМАХ АДАПТАЦИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Д.И. ЛЕХОВИЦКИЙ, Ю.И. АБРАМОВИЧ, Г.А. ЖУГА, Д.С. РАЧКОВ

Сопоставляется “энергетическое” быстродействие ряда алгоритмов адаптивной обработки когерентных сигналов на фоне гауссовых помех. Основное внимание уделяется относительно новому сочетанию двух способов регуляризации максимально правдоподобной (МП) оценки корреляционной матрицы (КМ) гауссовых векторов входных воздействий с дискретными и непрерывными энергетическими спектрами. Показывается целесообразность такого сочетания для повышения быстродействия и рациональные способы его практической реализации на основе решетчатых фильтров.

In the article, the “energy” speeds of a number of adaptive processing algorithms of coherent signals against the background of Gaussian clutter are compared. Main attention is paid to a relatively new combination of two ways for regularization of the maximum likelihood estimate (MLE) of the correlation matrix (CM) containing Gaussian vectors of inputs with discrete and continuous energy spectra. The expediency of such a combination for the speed increase, and efficient lattice-filter-based methods of its practical realization are shown.

ВВЕДЕНИЕ

История развития адаптивной пространственно-временной обработки сигналов на фоне помех — это история борьбы за увеличение ее быстродействия. Высокое быстродействие — необходимое условие эффективной работы адаптивной системы в реальных условиях малых интервалов стационарности входных воздействий. Оно весьма желательно и в практически возможных ситуациях стационарности на относительно больших временных интервалах, поскольку позволяет снизить требования к объему операций обработки в единицу времени.

За примерно полувековой период адаптивной обработки предложено много способов решения этой задачи, рассмотреть которые в рамках одной работы практически невозможно. Значительная часть из них развивает “базовые” методы, которые в момент их появления знаменовали начало принципиально нового этапа теории и техники адаптивной обработки. К ним можно отнести, в частности, методы, основанные на использовании:

- стохастических градиентных алгоритмов адаптации (корреляционных автокомпенсаторов (АК) помех) [1 — 8];
- максимально правдоподобных (МП) оценок корреляционных матриц (КМ) гауссовых помех [9];
- “диагонально регуляризованных” МП оценок КМ помех [10, 11];
- факторизованных представлений матриц, обратных оценочным КМ различного вида, и их ленточных аппроксимаций [12—15, 20, 24, 26—28].

Эти методы в той или иной мере исследованы в литературе, список которой далеко выходит за рамки приведенного в статье. Однако в большинстве работ они рассматривались отдельно и сравнивались между собой по различным критериям.

В [14] было высказано предположение о целесообразности совместного использования двух

последних методов, независимо подтвержденное и теоретически обоснованное затем в [15].

Цель данной статьи — количественно оценить эффективность такого объединения и обосновать рациональные способы его практической реализации.

Статья организована следующим образом. В п. 1 анализируются особенности переходных процессов в корреляционных АК. В п. 2 описываются структура рассматриваемых фильтров, алгоритмы их адаптивной настройки, “энергетический” критерий сравнения быстродействия [9] и модели входных воздействий, использованные в математических экспериментах. В п. 3 анализируются результаты экспериментов и показываются преимущества ленточной аппроксимации матрицы, обратной диагонально регуляризованной оценочной КМ. В п. 4 обсуждаются возможные варианты практической реализации соответствующих комбинированных алгоритмов адаптации и обосновывается целесообразность использования для этой цели адаптивных решетчатых фильтров (АРФ).

1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОРРЕЛЯЦИОННЫХ АВТОКОМПЕНСАТОРАХ

А. На рис. 1 приведена упрощенная схема одного из первых вариантов аналоговых одноступенчатых АК с выделенным основным (нерегулируемым) g -м, $g \in 1, M$ каналом и системой из $M-1$ параллельно включенных вспомогательных (регулируемых) каналов [1—8].

Помеха на его выходе

$$\varepsilon = \varepsilon(t) = y_g(t) + \mathbf{k}^*(t) \cdot \mathbf{y}_-(t) \quad (1)$$

образована суммой помехи $y_g(t)$ основного (g -го) канала приема и линейной комбинацией компонент $(M-1)$ -мерного вектора $\mathbf{y}_-(t) = \{y_\ell(t)\}_{\ell=1, \ell \neq g}^M$ помех вспомогательных каналов с $(M-1)$ -мерным вектором весов $\mathbf{k}(t)$. При обычно исполь-

зуемых в цепях корреляционной обратной связи (КОС) интегрирующих фильтров первого порядка этот вектор удовлетворяет системе дифференциальных уравнений [4 – 8]

$$T \cdot \frac{dk(t)}{dt} + k(t) = -\Gamma \cdot y_-(t) \cdot \varepsilon^*(t), \quad k(0) = k_0, \quad (2)$$

где T – постоянная времени интеграторов (обычно одинаковая в каждом из них), $\Gamma = \text{diag}\{z_i > 0\}_{i=1}^{M-1}$ – диагональная матрица коэффициентов усиления цепей КОС, а под производной от вектора понимается вектор производных от его элементов.

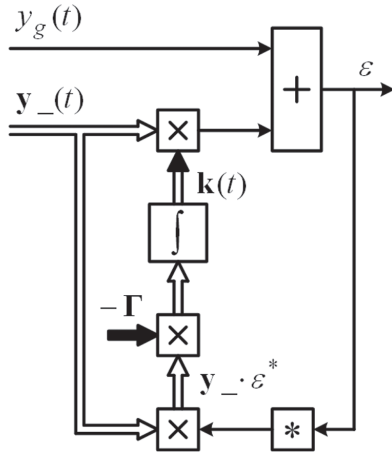


Рис. 1. Аналоговый одноступенчатый АК

Для среднего значения $r(t) = \overline{k(t)}$ вектора весов справедливо приближенное равенство

$$T \cdot \frac{dr(t)}{dt} + r(t) \approx -\Gamma \cdot \overline{y_-(t) \cdot \varepsilon^*(t)}, \quad r(0) = r_0, \quad (3)$$

в силу которого в стационарной помеховой обстановке в установившемся режиме, когда $r(t) = r = \text{const}$, $\overline{y_-(t) \cdot \varepsilon^*(t)} \approx -\Gamma^{-1} \cdot r$, и при усилениях $z_i \rightarrow \infty$

$$\overline{y_-(t) \cdot \varepsilon^*(t)} \approx 0. \quad (4)$$

Здесь и далее звездочка и черта сверху – символы эрмитового сопряжения и статистического усреднения соответственно.

Справедливость (4) означает, что в установившемся режиме помеха на выходе АК (рис. 1) некоррелирована с помехами вспомогательных каналов, вследствие чего ее мощность меньше, чем мощность помехи на выходе любого M -входного весового сумматора с вектором весов $w = \{w_i\}_{i=1}^M \neq r_M$ с g -м элементом $w_g = 1$. Тем самым АК представляет собой асимптотически (при $t \rightarrow \infty$) оптимальный компенсатор (подавитель) стационарной помехи.

Б. В типичных условиях помех, стационарных только на ограниченных временных интервалах, эффективность АК может быть недостаточной из-за особенностей установления переходных процессов. Эти особенности детально изучены в

литературе [4 – 8 и др.], поэтому здесь мы только проиллюстрируем их, используя решение приближенного уравнения (3) для среднего значения $r(t)$ вектора весов АК.

В соответствии с (1) его можно переписать в виде

$$\begin{aligned} d\mathbf{r}(t)/dt &\approx \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}(t) + \mathbf{b}, \\ \mathbf{A} &= -T^{-1} \cdot (\mathbf{I}_{M-1} + \Gamma \cdot \Phi_-) = \mathbf{T} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{T}^*, \\ \mathbf{b} &= -T^{-1} \cdot \Gamma \cdot \mathbf{p}_g, \\ \mathbf{\Lambda} &= \text{diag}\{\lambda_i\}_{i=1}^{M-1}, \quad \mathbf{T} = \{\mathbf{t}_i\}_{i=1}^{M-1}, \\ \Phi_- &= \overline{y_- \cdot y_-^*}, \quad \mathbf{p}_g = \overline{y_- \cdot y_g^*}. \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{I}_v$ – единичная $v \times v$ матрица, $\mathbf{\Lambda}$ и $\mathbf{T}$ – диагональная матрица собственных чисел (с.ч.) λ_i и унитарная матрица собственных векторов $\mathbf{t}_i$, $i \in 1, M-1$ матрицы $\mathbf{A}$.

При нулевом начальном значении ($\mathbf{r}(0) = \mathbf{0}$) решение [16, с.197] этой системы

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \int_0^t \mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-s)} ds \cdot \mathbf{b} = \mathbf{r} + \mathbf{r}_{\text{trans}}(t), \\ \mathbf{r} &= -\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b}, \quad \mathbf{r}_{\text{trans}}(t) = -\mathbf{e}^{\mathbf{A}t} \cdot \mathbf{r} \end{aligned} \quad (6)$$

определяется матричной экспонентой, которая при действительной матрице усиления Γ допускает представление [16, с.218]

$$\mathbf{e}^{\mathbf{A}t} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{T}^*, \quad \mathbf{E}(t) = \text{diag}\{\exp(\lambda_i \cdot t)\}_{i=1}^{M-1}. \quad (7)$$

Поскольку $\lambda_i < 0$, то при $t \rightarrow \infty$ $\mathbf{E}(t) \rightarrow \mathbf{0}$, $\mathbf{e}^{\mathbf{A}t} \rightarrow \mathbf{0}$, $\mathbf{r}_{\text{trans}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$ и, следовательно, вектор весов $\mathbf{r}(t)$ стремится к своему установившемуся значению $\mathbf{r}(t) \rightarrow \mathbf{r}$, обеспечивающему выполнение равенств (4) при больших усилениях в цепях КОС ($z_i \rightarrow \infty$). Поэтому длительность переходного процесса (быстродействие) АК определяется переходной составляющей вектора весов, в силу (6) – (7) равной

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{trans}}(t) &= \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{T}^* \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} = \sum_{i=1}^{M-1} \frac{\phi_i}{\lambda_i} \cdot e^{\lambda_i(A) \cdot t} \cdot \mathbf{t}_i, \\ \Phi &= \{\phi_i\}_{i=1}^{M-1} = \mathbf{T}^* \cdot \mathbf{b}. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда следует, что переходная составляющая вектора весов равна взвешенной сумме собственных векторов $\mathbf{t}_i$ матрицы $\mathbf{A}$ (5) с экспоненциальными весами, показатели степени которых пропорциональны с.ч. этой матрицы. В общем случае они зависят от свойств КМ Φ_- помех компенсационных каналов. В частности, в АК со скалярными матрицами усиления $\Gamma = z \cdot \mathbf{I}$ в цепях КОС эти с.ч.

$$\lambda_i = -T^{-1} \cdot (1 + z \cdot \mu_i), \quad i \in 1, M-1 \quad (9)$$

полностью определяются с.ч. μ_i КМ Φ_- помех компенсационных каналов. В условиях реальных помех эти с.ч. могут существенно различаться по величине. При этом в (8) наряду с “быстрыми” экспонентами (с большими по модулю с.ч.) будут входить и “медленные”, которые затягивают про-

цесс “обнуления” переходных компонент вектора весов и, тем самым, наступление установившегося режима.

Это наглядно иллюстрируют показанные на рис. 2 результаты работы адаптивной системы СДЦ на основе АК в бортовой РЛС “Лиана” самолета дальнего радиолокационного обнаружения (СДРЛО) [17, 18]. В верхнем ряду здесь показаны осциллограммы тестового сигнала для настройки АК – радиоимпульса с фиксированной несущей частотой (а), и пассивных помех – отражений от моря (б) и суши (в) при выключенном, а в соответствующем нижнем ряду – при включенном АК.

Видно, что здесь протяженность некомпенсированной “кромки” помех от моря достигает примерно 30 км (б), от суши – не менее 60 км (в), тогда как для тестового сигнала она не превосходит 2 км (а).

Такое быстроедействие и его зависимость от характеристик помех были приемлемы в условиях СДРЛО [18]. Однако они не позволяли рассчитывать на эффективную работу АК (алгоритма (1), (2)) в более сложной и динамично меняющейся помеховой обстановке, достаточно характерной для наземных РЛС. Это стимулировало активный поиск в разных странах **цифровых** алгоритмов адаптации с существенно более высоким быстроедействием. Их анализу и сравнению посвящен остальной материал статьи.

2. СТРУКТУРА АНАЛИЗИРУЕМЫХ СИСТЕМ, АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ, КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ, МОДЕЛИ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Рассматриваемые адаптивные фильтры имеют одинаковую структуру, показанную на рис. 3. В каждом из них формируется весовая сумма

$$\varepsilon = \hat{\mathbf{r}}^* \cdot \mathbf{u} = \sum_{i=1}^M \hat{r}_i^* \cdot u_i \quad (10)$$

компонент M – мерного входного вектора

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_\gamma = \left\{ u_i^{(\gamma)} \right\}_{i=1}^M = \mathbf{y} + \gamma \cdot \mathbf{s}, \quad \gamma = 0, 1 \quad (11a)$$

аддитивной смеси взаимно независимых векторов помехи $\mathbf{y} = \{ y_\ell \}_{\ell=1}^M \sim CN(0, \Phi)$ и, возможно (при $\gamma = 1$), полезного сигнала

$$\mathbf{s} = \{ s_i \}_{i=1}^M = \beta \cdot \mathbf{x}, \quad \beta \sim CN(0, \sigma_s^2), \quad (11b)$$

с вектором весов

$$\hat{\mathbf{r}} = \hat{\Psi} \cdot \mathbf{x}. \quad (12)$$

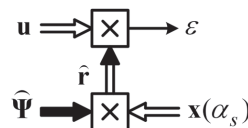


Рис. 3. Структура анализируемых адаптивных фильтров

Отличия между ними заключаются в выборе матрицы $\hat{\Psi} = \{ \hat{\omega}_{ij} \}_{i,j=1}^M$, использующейся в качестве обратной для априори неизвестной КМ помех $\Phi = \mathbf{y} \cdot \mathbf{y}^*$, которая преобразует опорный вектор полезного сигнала $\mathbf{x}$ в весовой вектор (12).

Б. Ниже рассматриваются четыре разновидности этих матриц.

1⁰. Предложенная и исследованная в [9] матрица

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_1 = \hat{\Phi}^{-1}, \quad (13)$$

обратная **выборочной** КМ

$$\hat{\Phi} = \{ \varphi_{ij} \}_{i,j=1}^M = K^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^* = K^{-1} \cdot \sum_{i=1}^K \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^*, \quad (14)$$

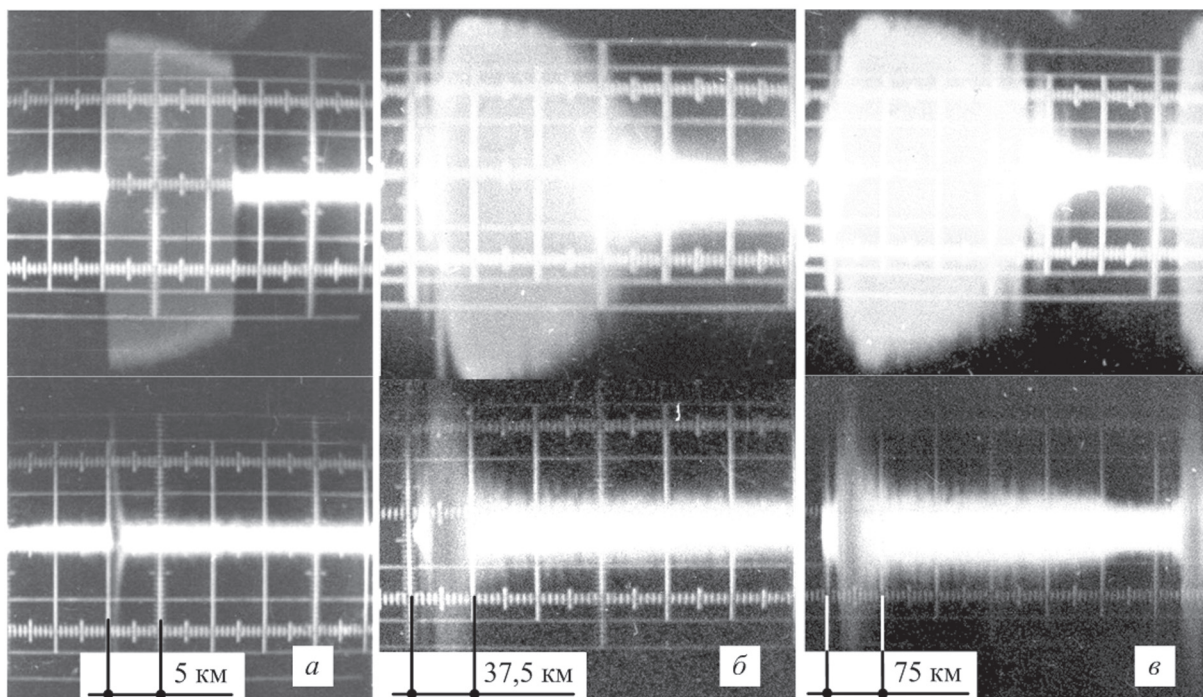


Рис. 2. Переходные процессы в АК при входном тестовом сигнале (а), отражениях от моря (б) и суши (в)

образованной $K \geq M$ взаимно независимыми векторами помехи со свойствами

$$\overline{\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j^*} = \begin{cases} \Phi, & i=j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j \in 1, K. \quad (15)$$

КМ (14) при объеме выборки $K < M$ вырождена, поэтому процедура адаптации на основе обратной к ней матрицы (13) может начинаться только после накопления $K \geq M$ обучающих векторов помехи (15).

2⁰. Аналогичная (13) матрица

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_2 = \hat{\Phi}_{dl}^{-1}, \quad (16)$$

обратная **диагонально дополненной** (Diagonally Loaded [10, 19]) выборочной КМ

$$\hat{\Phi}_{dl} = c \cdot \mathbf{I}_M + \hat{\Phi}, \quad c > 0. \quad (17)$$

В отличие от (14), последняя невырождена при любых $K \geq 1$, поэтому процедура адаптации (16), (12), (10) на ее основе может начинаться уже с $K=1$.

3⁰. Ленточная (*band*) эрмитова $M \times M$ матрица

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_3 = \hat{\Psi}_b = \mathbf{H}_b^* \cdot \mathbf{H}_b = \mathbf{N}_b \cdot \mathbf{N}_b^* \quad (18)$$

с шириной ленты $z = 2 \cdot m - 1$, сомножители которой – ленточные **треугольные** $M \times M$ матрицы с шириной ленты $m \leq M$ (рис. 4).

Рис. 4. Треугольные ленточные верхне-нижнее и нижне-верхнее разложения эрмитовой ленточной матрицы (18)

Нижняя ($\mathbf{H}_b$) и верхняя ($\mathbf{N}_b^*$) ленточные треугольные матрицы в (18) равны (рис. 5).

Здесь

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_m^*(\ell) &= \{a_i^{(m)}(\ell)\}_{i=1}^m = \mathbf{e}_1^{(m)*} \cdot \mathbf{N}^{(m)*}(\ell), \quad \ell \in 1, M+1-m, \\ \mathbf{b}_m^*(\ell) &= \{b_i^{(m)}(\ell)\}_{i=1}^m = \mathbf{e}_m^{(m)*} \cdot \mathbf{H}^{(m)}(\ell), \quad m \leq M, \end{aligned} \quad (19)$$

m -мерные первая и последняя (m -я) строки соответственно верхней треугольной матрицы $\mathbf{N}^{(m)*}(\ell)$ и нижней треугольной матрицы $\mathbf{H}^{(m)}(\ell)$ – треугольных сомножителей **Холецкого** эрмитовой $m \times m$ матрицы

Рис. 5. Структура ленточных треугольных сомножителей матрицы (18)

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}^{(m)}(\ell) &= \mathbf{H}^{(m)*}(\ell) \cdot \mathbf{H}^{(m)}(\ell) = \\ &= \mathbf{N}^{(m)}(\ell) \cdot \mathbf{N}^{(m)*}(\ell) = (\hat{\Phi}^{(m)}(\ell))^{-1}, \end{aligned} \quad (20)$$

обратной ℓ -й, $\ell \in 1, M+1-m$ главной $m \times m$ подматрице $\hat{\Phi}^{(m)}(\ell) = \{\hat{\Phi}_{ij}\}_{i,j=\ell}^{m+\ell-1}$ выборочной КМ (14) (рис. 6), $\mathbf{e}_v^{(n)*}$ – v -я строка $n \times n$ матрицы $\mathbf{I}_n$.

Рис. 6. Треугольные верхне-нижнее и нижне-верхнее разложения эрмитовой матрицы (20)

Эрмитова главная $m \times m$ подматрица $\hat{\Phi}^{(m)}(\ell) = \{\hat{\Phi}_{ij}\}_{i,j=\ell}^{m+\ell-1}$ выборочной КМ (14) вырождена только при $K < m$, поэтому процедура адаптации на основе ленточной аппроксимации (18) обратной матрицы может начинаться уже при $K \geq m$. Эрмитова **невырожденная** $M \times M$ матрица, обратная (18), называется далее **ленточно** (*band*) регуляризованной.

4⁰. Эрмитова ленточная $M \times M$ матрица с шириной ленты $z = 2 \cdot m - 1$, $m \leq M$,

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_4 = \hat{\Psi}_{bd} = \mathbf{H}_{bd}^* \cdot \mathbf{H}_{bd} = \mathbf{N}_{bd} \cdot \mathbf{N}_{bd}^*, \quad (21)$$

построенная тем же способом, но по главным $m \times m$ подматрицам **диагонально** регуляризованной матрицы (17). Адаптация в этом случае может начинаться уже с выборки объема $K=1$. **Невырожденная** матрица, обратная (21), называется далее **ленточно-диагонально** (*band-diagonal*) регуляризованной.

В. Быстродействие описанных алгоритмов ниже характеризуется введенной в [9] зависимостью случайной величины (**с.в.**)

$$\begin{aligned} \chi(K) &= \frac{\hat{\mu}(K)}{\mu} \in 0, 1, \\ \hat{\mu}(K) &= \frac{|\mathbf{x}^* \cdot \hat{\mathbf{r}}(K)|^2}{\hat{\mathbf{r}}^*(K) \cdot \Phi \cdot \hat{\mathbf{r}}(K)}, \quad \mu = \mathbf{x}^* \cdot \Psi \cdot \mathbf{x} \end{aligned} \quad (22)$$

от объема обучающей выборки K . Она имеет очевидный смысл потерь выходного отношения сигнал/(помеха+шум) (**ОСПШ**) $\hat{\mu}(K)$ фильтра (рис. 3) по сравнению с его максимальным значением μ , которое в гипотетической ситуации

точно известной **КМ** помехи Φ обеспечивается оптимальным весовым вектором $\mathbf{r} = \Phi^{-1} \cdot \mathbf{x}$.

Г. Потери (22) рассчитываются для помех с **непрерывными** и **дискретными** спектрами $s(f)$, связанными с их **КМ** помех равенствами **Винера** – **Хинчина** [4]

$$\Phi = \{ \varphi_{pq} \}_{p,q=1}^M = \int_{-1/2}^{1/2} s(f) \cdot \mathbf{x}(f) \cdot \mathbf{x}^*(f) df, \quad (23)$$

$$\mathbf{x}(f) = \left\{ e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \ell} \right\}_{\ell=1}^M.$$

В обоих случаях рассматриваются помехи со спектрами и **КМ** вида

$$s(f) = 1 + \eta \cdot s_{norm}(f), \quad \Phi = \mathbf{I}_M + \eta \cdot \rho, \quad (24)$$

в которых первые слагаемые – спектр и **КМ** некоррелированных собственных шумов M каналов приема с одинаковой (единичной) дисперсией (мощностью), η – относительная (по отношению к этим шумам) мощность внешней помехи, $s_{norm}(f)$ – ее спектр, нормированный условием

$$\int_{-1/2}^{1/2} s_{norm}(f) df = 1, \quad (25a)$$

$$\rho = \{ \rho_{pq} \}_{p,q=1}^M = \int_{-1/2}^{1/2} s_{norm}(f) \cdot \mathbf{x}(f) \cdot \mathbf{x}^*(f) df, \quad (25b)$$

$$\rho_{pp} = 1 -$$

$M \times M$ матрица коэффициентов взаимной корреляции помех M приемных каналов.

Д. В первом случае внешние помехи аппроксимируются процессами **авторегрессии** (**АР**) целого порядка $p \geq 1$ [4, 20] с непрерывными спектрами вида

$$s_{norm}(f) = \frac{c_0}{\prod_{i=1}^p |1 - \beta_i \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}|^2}, \quad (26)$$

$$\beta_i = |\beta_i| \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i}, \quad |\beta_i| < 1, \quad i \in 1, p,$$

где c_0 – константа, обеспечивающая нормировку (25a), β_i – параметры **АР** процесса.

В частности, **АР** процесс первого порядка ($p = 1$) имеет спектр

$$s_{norm}(f) = \frac{c_0}{|1 - \beta_1 \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}|^2} \quad (27a)$$

и **экспоненциальную** корреляционную функцию (**ЭКФ**), для которой

$$\rho_{pq} = \rho_1^{|p-q|}, \quad \rho_1 = \beta_1, \quad (27b)$$

где ρ_1 – коэффициент корреляции помех двух смежных каналов приема.

Для **АР** процесса порядка $p \rightarrow \infty$ с равными действительными параметрами

$$s_{norm}(f) = e^{a \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot f} / I_0(a), \quad (28)$$

$$\rho_{pq} = I_{|p-q|}(a) / I_0(a),$$

где $I_\nu(x)$ – модифицированная функция **Бесселя** ν -го порядка, a – параметр, выбираемый по заданному значению ρ_1 . При относительно больших значениях $|\rho_1| \geq 0.98$ вместо (28) можно использовать более простую формулу

$$\rho_{pq} = \rho_1^{|p-q|}, \quad (29)$$

соответствующую помехе с **гауссовой** (колокольной) корреляционной функцией (**ГКФ**).

Е. Во втором случае используются помехи с нормированными спектрами

$$s_{norm}(f) = (1/h_\Sigma) \cdot \sum_{i=1}^n h_i \cdot \delta(f - f_i), \quad (30a)$$

$$h_\Sigma = \sum_{i=1}^n h_i, \quad f_i \in -1/2, 1/2,$$

и для которых, в силу (23), **КМ** (24) равна

$$\Phi = \mathbf{I}_M + \eta \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{X}^*, \quad (30b)$$

$$\mathbf{X} = \{ \mathbf{x}(f_i) \}_{i=1}^n, \quad \mathbf{h} = \text{diag} \{ h_i / h_\Sigma \}_{i=1}^n,$$

и соответствует совокупности n комплексных гармоник с частотами (пространственными, временными) f_i и интенсивностями h_i , $i \in 1, n$.

Как в первом, так и во втором случаях рассматриваемые истинные **КМ** (23), (24), (28) – (30) являются эрмитовыми **теплицевыми** [16]. Как хорошо известно, такую структуру теоретически могут иметь **КМ** помех на выходах “регулярных” пространственно-временных каналов приема (линейных эквидистантных антенных решеток (**АР**) из идентичных элементов (модулей), систем междупериодной обработки (**МПО**) сигналов импульсных РЛС с постоянным интервалом зондирования и т.д.). В отличие от эрмитовых **КМ** общего вида, соответствующих произвольным системам каналов приема, теплицевы **КМ** полностью определяются элементами только одного (первого или последнего) столбца. Такое уменьшение числа априори неизвестных параметров теоретически позволяет повысить быстродействия адаптивной обработки в “регулярных” системах, что более подробно обсуждается в п. 4.3.

Ж. Ниже анализируются результаты сравнения эффективности алгоритмов (10), (12), $1^0 - 4^0$ по критерию (22) в условиях **гауссовых** помех с **КМ** (24), (27), (29), (30b), полученные математическим моделированием. Используемые в нем гауссовы K – мерные обучающие выборки помех со свойствами (15) формировались путем известного преобразования

$$\mathbf{Y} = \{ \mathbf{y}_i \}_{i=1}^K = \mathbf{G} \cdot \mathbf{Z} \quad (31)$$

“корнем” $\mathbf{G}$ заданной $M \times M$ **КМ** помех $\Phi = \mathbf{G} \cdot \mathbf{G}^*$ пакета

$$\mathbf{Z} = \{ \xi_i \}_{i=1}^K, \quad \xi_i \sim CN(0, \mathbf{I}_M),$$

$$\overline{\xi_i \cdot \xi_j^*} = \begin{cases} \mathbf{I}_M, & i = j, \\ \mathbf{0}, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j \in 1, K \quad (32)$$

взаимно независимых комплексных гауссовых M -мерных векторов белого шума ξ_i с нулевым вектором средних и единичной КМ, генерируемых стандартным датчиком случайных чисел.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Начнем с анализа эффективности адаптивной обработки (10), (12) на основе алгоритмов $1^0 - 4^0$ в условиях помех с непрерывными спектрами (27), (28).

А. На рис. 7, а показаны “энергетические” частотные характеристики (ЧХ) фильтра (рис. 3) — зависимости максимального ОСПШ μ (22) от нормированной (пространственной, временной) частоты f $M=50$ -элементной пачки полезного сигнала s (11б), (23) с $\sigma_s^2=1$. Они рассчитаны для АРпомехпорядков $p=1$ (27) и $p \rightarrow \infty$ (29) с $\eta=50$ дБ и КМ (24), собственные числа (с.ч.) которых, упорядоченные по величине, показаны на рис. 7, б.

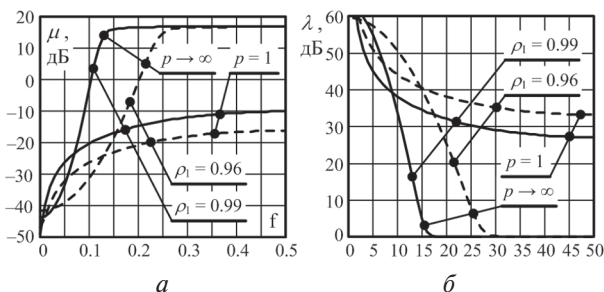


Рис. 7. “Энергетические” ЧХ фильтра рис. 3 (а) и спектры с.ч. КМ (24) модельных помех (б)

Графики наглядно иллюстрируют существенные различия потенциальных возможностей обработки сигналов на фоне помех с ГКФ ($p \rightarrow \infty$) и ЭКФ ($p=1$), порождаемые различиями спектров с.ч. их КМ, хорошо воспроизводящих форму энергетического спектра соответствующих помех.

Б. На рис. 8 показано поведение критерия (22) для оценок $1^0 - 4^0$.

Параметры помех здесь те же, что и на рис. 7, частота полезного сигнала $f=0.22$. Ширина ленты треугольных 50×50 матриц-сомножителей $m=5$ (рис.4, 5). Кривые получены усреднением значений $\chi(K)$ (22) в $NA=50$ независимых испытаниях. Нижним индексом в оценке 2^0 указано значения параметра регуляризации $K \cdot c$ в (17). Абсцисса точки пересечения кривых $1^0 - 4^0$ с горизонтальной штрих-пунктирной прямой на уровне -3 дБ указывает объем выборки K , которым обычно характеризуют быстродействие по критерию (22) адаптивной обработки (10), (12) на основе выбранных оценок обратной матрицы (ниже для краткости используется термин “быстродействие оценок”).

Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Оценка 1^0 , в условиях (15), (32) являющаяся максимально правдоподобной (МП) оценкой

КМ общего вида [4, 8–12], теоретически устраняет основной недостаток корреляционных АК — зависимость быстродействия адаптивной обработки от параметров помех (распределения с.ч. их КМ). Кривые 1^0 с ростом объема обучающей выборки K ведут себя одинаково на всех рис. 8, а–г, которые соответствуют КМ с существенно разными распределениями с.ч. (рис. 7, б). Это достоинство МП оценок было установлено еще в [9], где показано, что плотность распределения

$$p_\chi(x) = p_\chi(x, K) = \frac{x^{\delta+1} \cdot (1-x)^{M-2}}{B(\delta+2, M-1)}, \quad \delta = K - M, \quad (33)$$

$$B(n+1, m+1) = \frac{n! \cdot m!}{(n+m+1)!}$$

случайной величины (22) от КМ помех не зависит. Среднее значение потерь

$$\bar{\chi} = \frac{(\delta+2)}{(K+1)} = \frac{(K-M+2)}{(K+1)} < 1 \quad (34)$$

равно $2/(M+1)$ при “стартовом” значении $K=M$ (≈ 14 дБ при $M=50$) и не превосходит 3 дБ ($\bar{\chi} \geq 0.5$) при объеме выборки $K \geq 2 \cdot M - 3$ (≈ 100 при $M=50$), что полностью согласуется с поведением кривой 1^0 на рис. 8, а–г.

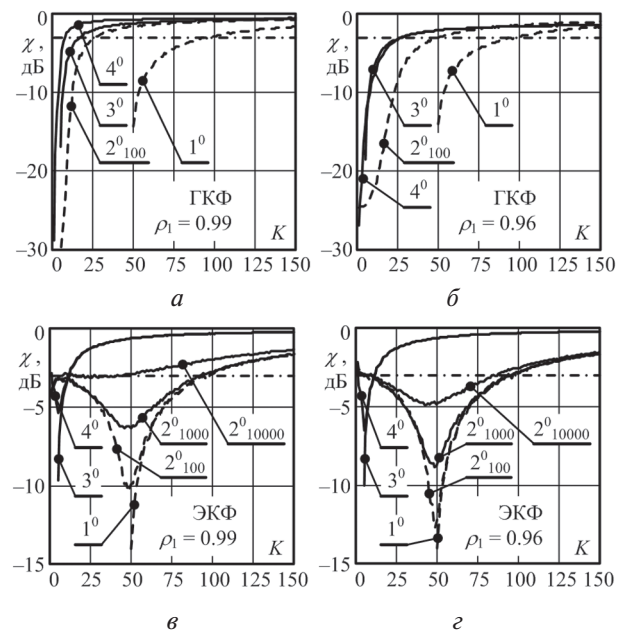


Рис. 8. “Энергетическое” быстродействие оценок $1^0 - 4^0$ ($\eta=10^5$, $M=50$, $f=0.22$, $c=100$, $m=5$)

Для дальнейшего полезно привести еще одно объяснение этого результата.

Представим искомый весовой вектор (12) — (14) в виде $\tilde{\mathbf{r}} = K \cdot \tilde{\mathbf{r}}$ и рассмотрим процесс формирования последовательности опорных векторов

$$\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{\mathbf{r}}_\ell = \mathbf{B}_\ell \cdot \mathbf{x}, \quad \mathbf{B}_\ell = \tilde{\Phi}_\ell^{-1},$$

$$\tilde{\Phi}_\ell = \sum_{i=1}^{\ell} \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^* = \tilde{\Phi}_{\ell-1} + \mathbf{y}_\ell \cdot \mathbf{y}_\ell^*, \quad \ell \in M+1, K, \quad (35)$$

последний из которых (при $\ell = K$) пропорционален требуемому (12) при оценке 1^0 .

Используя формулы обращения суммы матриц [21], для матрицы $\mathbf{B}_\ell$ получим

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_\ell &= \mathbf{B}_{\ell-1} - \mathbf{v}_\ell \cdot \mathbf{g}_\ell^*, \quad \mathbf{g}_\ell = \mathbf{c}_\ell \cdot \mathbf{v}_\ell, \\ \mathbf{v}_\ell &= \mathbf{B}_{\ell-1} \cdot \mathbf{y}_\ell, \quad \mathbf{c}_\ell = 1 / (1 + \mathbf{y}_\ell^* \cdot \mathbf{v}_\ell), \end{aligned} \quad (36)$$

что позволяет представить ℓ -й опорный вектор (36) в виде

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_\ell &= \tilde{\mathbf{r}}_{\ell-1} - d_\ell \cdot \mathbf{B}_{\ell-1} \cdot \mathbf{y}_\ell, \quad d_\ell = \mathbf{c}_\ell \cdot \eta_\ell, \\ \eta_\ell &= \mathbf{y}_\ell^* \cdot \tilde{\mathbf{r}}_{\ell-1}, \quad \ell \in M+1, K. \end{aligned} \quad (37)$$

Построенная по (37) схема формирования векторов (35) показана на рис. 9.

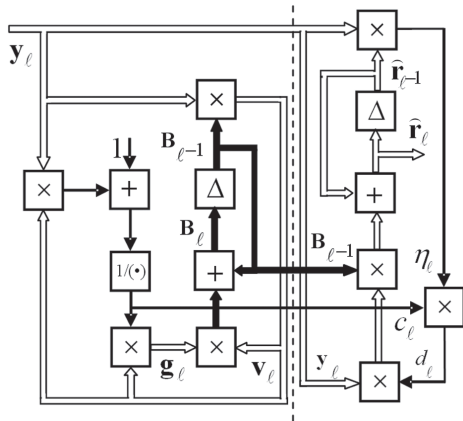


Рис. 9. Формирование весовых векторов (35) по (37)

Здесь справа от штриховой вертикальной линии расположен подобный АК (рис. 1) адаптивный весовой сумматор с цепями КОС. В нем, однако, в отличие от АК, матрица усиления цепей КОС не диагональная и, тем более, не скалярная матрица $\mathbf{\Gamma}$ (2), (9). Ее роль выполняет формируемая по (36) слева от штриховой вертикальной линии матрица $\mathbf{B}_\ell$, обратная матрице $\tilde{\mathbf{\Phi}}_\ell$ (35), пропорциональной (несмещенной) МП оценке КМ помех. В связи с этим становится скалярной (пропорциональная единичной) матрица $\mathbf{A}$ в (5), а ее собственные числа и определяемое ими быстроедействие схемы рис. 9 перестают зависеть от КМ помех [22, 23].

2. Основным недостаток оценки 1^0 заключается в невозможности начать процедуру адаптации на ее основе до набора обучающей выборки объема $K \geq M$, а для того, чтобы потери критерия (22) не превысили 3 дБ, требуются выборки примерно вдвое большего объема. В широком классе многоканальных ($M \gg 1$) систем обработки, работающих в динамично меняющейся помеховой обстановке, выборки такого объема могут быть недоступны, так что эффективная адаптация в таких условиях на основе этой оценки достижима только в относительно малоканальных системах пространственно-временной обработки.

3. Как видно из рис. 8, этот недостаток МП оценки 1^0 существенно ослабляется оценками $2^0 - 4^0$, построенными в соответствии с принципом “ожидаемого правдоподобия” (*expected-*

likelihood (EL)) – конструктивной альтернативой принципу “максимального правдоподобия” (*maximum-likelihood (ML)*)” в условиях выборок малого объема [15, 19, 20, 24]. Сущность принципа EL оценивания заключается в том, что в качестве оценки $\tilde{\mathbf{\Phi}}$ априори неизвестной истинной КМ берется не матрица, максимизирующая нормированное отношение правдоподобия [19]

$$ОП(\tilde{\mathbf{\Phi}}, \mathbf{Y}) = \frac{\det(\tilde{\mathbf{\Phi}}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{\Phi}}) \cdot \exp\{M\}}{\exp\{\text{tr}(\tilde{\mathbf{\Phi}}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{\Phi}})\}}, \quad (38)$$

а матрица, приближающая значения (38) к тем, которые можно ожидать от значений $ОП(\mathbf{\Phi}, \mathbf{Y})$, порождаемых истинной КМ $\mathbf{\Phi}$.

Замечательная особенность случайного $ОП(\mathbf{\Phi}, \mathbf{Y})$ – зависимость его плотности распределения только от числа адаптивно управляемых каналов M и объема выборки $K \geq M$ при **независимости** от КМ помех (“сценария”). Действительно, используя (14), (31), (32), его можно переписать в виде

$$ОП(\mathbf{\Phi}, \mathbf{Y}) = \frac{\det(1/K \cdot \sum_{i=1}^K \xi_i \cdot \xi_i^*) \exp\{M\}}{\exp\{\text{tr}(1/K \cdot \sum_{i=1}^K \xi_i \cdot \xi_i^*)\}}, \quad (39)$$

что и доказывает сделанное утверждение [19]. При небольших отношениях K/M значения (39) могут существенно отличаться от максимального значения

$$\max_{\tilde{\mathbf{\Phi}}} ОП(\tilde{\mathbf{\Phi}}, \mathbf{Y}) = ОП(\hat{\mathbf{\Phi}}, \mathbf{Y}) = 1, \quad (40)$$

доставляемого МП оценкой $\hat{\mathbf{\Phi}}$ (14) независимо от числа каналов M и объема выборки $K \geq M$.

Для иллюстрации этих различий на рис. 10 показаны плотности $p_{ОП}(x)$ (а) и функции $f_{ОП}(x)$ (б) распределения ОП (39) при $M=12$ и различном относительном размере выборки K/M , полученные по 10^6 независимых испытаний.

Видно, что при $K/M \leq 4$ значения ОП (39), генерируемые истинной КМ, с очень большой вероятностью значительно меньше максимального значения $ОП=1$, порождаемого ее МП оценкой (14). Так, при $K/M=3$ значения ОП (39) с вероятностью 0.95 не превосходят 0.15 при медиане ≈ 0.1 , а при $K/M=2$ с той же вероятностью они не больше 0.05 при медиане 0,0257. В связи с этим в условиях выборок относительно малого объема вполне естественен отказ от МП оценок $\hat{\mathbf{\Phi}}$ (14) и переход к оценкам $\tilde{\mathbf{\Phi}} \neq \hat{\mathbf{\Phi}}$, порождающим значения ОП (38), более близкие к значениям ОП (39), генерируемым истинной КМ [19].

Вариантами именно таких (не МП) оценок являются оценки $2^0 - 4^0$, предложенные из физических соображений в [10–14] задолго до разработки в [15, 19, 20, 24] принципа EL оценивания, давшего им убедительное теоретическое обоснование как способа согласования при доступном

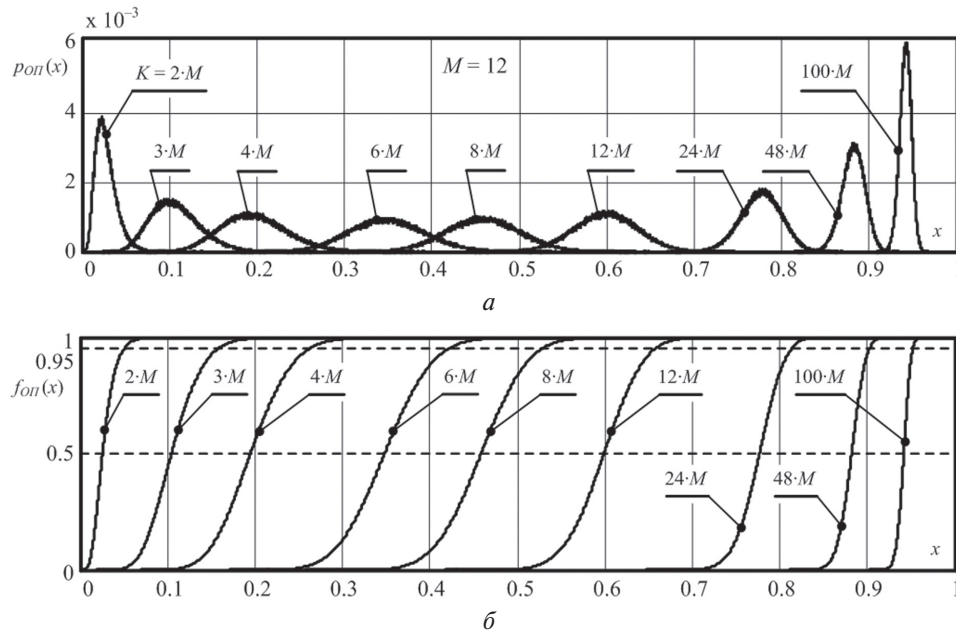


Рис. 10. Семейства плотностей (а) и функций (б) распределения ОП (39)

относительном размере выборки K/M статистического правдоподобия используемой оценки с истинной КМ.

4. Кривые 2^0 на рис. 8 получены для оценки

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_{12} = \hat{\Phi} \mathbf{I}_{dc}^{-1}, \\ \hat{\Phi} \mathbf{I}_{dc} &= c/K \cdot \mathbf{I}_M + \hat{\Phi} = (c \cdot \mathbf{I}_M + \hat{\Phi})/K, \quad c > 0, \end{aligned} \quad (41)$$

в которой параметр регуляризации c/K обратно пропорционален объему выборки K . Такое задание отвечает принципу ЕЛ оценивания, в соответствии с которым при малом объеме выборки используемая оценка КМ может быть далека в смысле (38) от МП оценки (14), но с ростом объема выборки приближается к ней. Этот принцип позволяет оптимизировать параметр диагональной регуляризации c при имеющемся объеме обучающей выборки [15, 19, 24].

Необходимость в этом может возникать, поскольку в зависимости от КМ помех одно и то же значение c может по-разному влиять на поведение критерия (22). Так, при $c=100$ с ростом объема выборки потери для помех с ГКФ монотонно уменьшаются (рис. 8, а, б), тогда как для помех с ЭКФ на интервале $K \in [1, M]$ они монотонно растут (рис. 8, в, г). Этот рост замедляется выбором значения $c > 100$.

5. Матрица (41) пропорциональна матрице $\hat{\Phi} \mathbf{I}_{dc} = c \cdot \mathbf{I}_M + \hat{\Phi}$, допускающей рекуррентное представление, аналогичное (35). Поэтому адаптивный весовой вектор (12) на основе оценки (41) может формироваться схемой (рис. 9), которая в этом случае “запускается” начальным вектором $\mathbf{r}_{dc0} = c^{-1} \cdot \mathbf{x}$, существенно более простым, чем вектор $\mathbf{r}_0 = \hat{\Phi}_M^{-1} \cdot \mathbf{x}$, “запускающий” ее при выборе оценки 1^0 .

6. Наблюдаемое на рис. 8 высокое быстродействие оценки 3^0 связано с тем, что использу-

емая в ней ленточная аппроксимация матрицы, обратной КМ, специфически оптимальна (максимально энтропийна) [26]. Вследствие этого в гипотетических условиях известной КМ интенсивных АР помех порядка p она обеспечивает практически потенциальную эффективность обработки при ширине ленты $m > p$ и малые потери даже при $m \ll p$ [25]. Это наглядно иллюстрируют расчетные семейства “энергетических” ЧХ фильтра рис. 3 в условиях помех с ГКФ ($p \rightarrow \infty$) при различных ширинах m ленты, показанные на рис. 11.

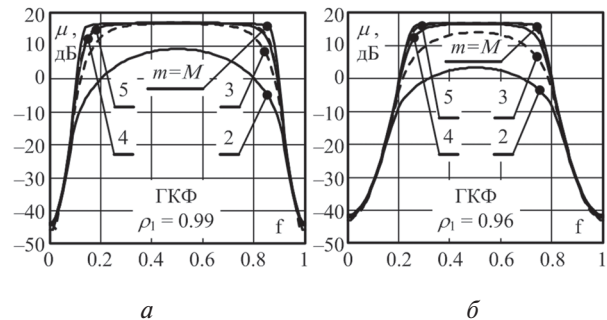


Рис. 11. Энергетические ЧХ фильтра рис. 3 при ленточной матрице (18) ($\eta = 10^5$, $M = 50$)

Видно, что уже при $m=4, 5 \ll M=50$ даже в условиях интенсивных АР помех порядка $p \rightarrow \infty$ потери ОСПШ невелики и будут еще меньше при меньшей интенсивности АР помех конечного порядка. В то же время уменьшение за счет ленточной регуляризации числа параметров, оцениваемых на этапе адаптации, может существенно снизить требования к объему обучающей выборки (повысить быстродействие) и одновременно упростить обработку.

В частности, в примерах рис. 8 ($M=50$, $m=5$) оценка 3^0 (ленточная регуляризация) по сравнению с оценкой 1^0 примерно в 4 раза увеличивает

быстродействие при ГKF помех (рис. 8, а, б), и примерно в 8 раз – в помехах с ЭKF (рис. 8, в, г) (выигрыши могут быть больше (меньше) при большем (меньшем) значении M). В обоих случаях она заметно эффективнее оценки 2^0 , что для помех с непрерывными спектрами было предсказано в [15]. Выигрыши могут дополнительно увеличиться при оптимизации ширины ленты в соответствии с ЕЛ принципом оценивания [24].

7. Оценка 4^0 (ленточно-диагональная регуляризация) объединяет достоинства оценок 2^0 , 3^0 – она никогда не хуже, но может быть и лучше, чем лучшая из них. Последний вывод справедлив и для помех с дискретными спектрами (30а) и КМ (30б), что наглядно иллюстрируется рис. 12.

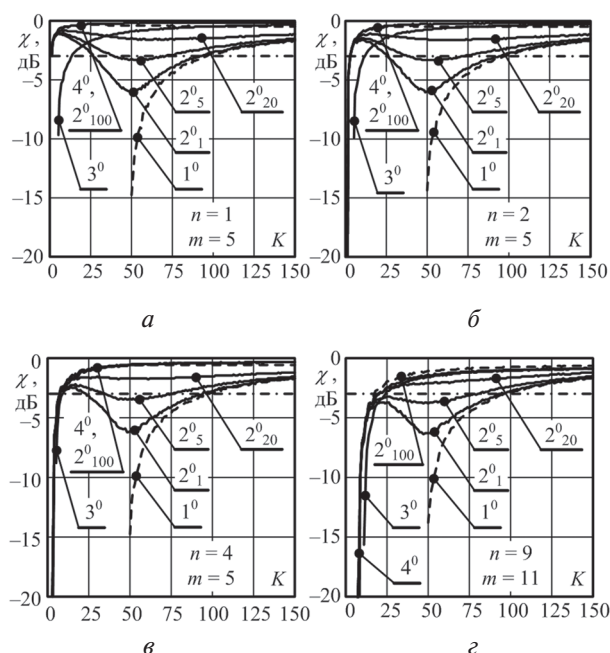


Рис. 12. “Энергетическое” быстродействие оценок $1^0 - 4^0$ ($\eta=10^5$, $M=50$, $c=100$, $m=5$)

Здесь показаны зависимости, аналогичные приведенным на рис. 8, но помеху образуют одна (а), две (б), четыре (в) и девять (г) комплексных гармоник с различными (пространственными,

временными) частотами в смеси с собственным шумом каналов приема. Полезный сигнал – когерентная $M=50$ – элементная пачка с частотой, отличной от частот мешающих гармоник. Нижним индексом в оценке 2^0 указаны значения параметра регуляризации c в (41).

Видно, что оценка 1^0 в этом случае, как и следует из теории [9], не меняет быстродействия адаптивной обработки (10), (12) по критерию (22). В то же время диагонально регуляризованная оценка 2^0 с правильно заданным параметром регуляризации меняет его радикально – вход в зону “3 дБ потерь” обеспечивается выборкой объема $K=2 \cdot n$ [10, 11]. При этом, как было предсказано в [15], она обеспечивает более высокое быстродействие, чем оценка 3^0 при ширине ленты $m > n$. Но, как и в случае помех с непрерывным спектром, наиболее эффективна комбинированная оценка 4^0 , при $m > n$ обеспечивающая наилучший эффект даже при неоптимальном подборе параметра диагональной регуляризации.

Из-за отмеченных достоинств именно эта комбинированная оценка представляется наиболее целесообразной при решении широкого круга задач адаптивной пространственно-временной обработки сигналов. Ниже обосновываются рациональные способы ее практической реализации.

4. О РЕАЛИЗАЦИИ ЛЕНТОЧНОЙ И ЛЕНТОЧНО-ДИАГОНАЛЬНОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

А. Возможны различные варианты фильтров с ленточными $M \times M$ матричными импульсными характеристиками (МИХ), на основе которых могут реализовываться ленточная и ленточно-диагональная регуляризация. На рис. 13 показаны примеры наиболее простых из них с ленточными треугольными МИХ порядка $M=6$ с шириной ленты $m=3$, очевидным образом обобщаемые на произвольные M и m .

Структуру МИХ этих (как и любых других) линейных фильтров легко определить, прослежи-

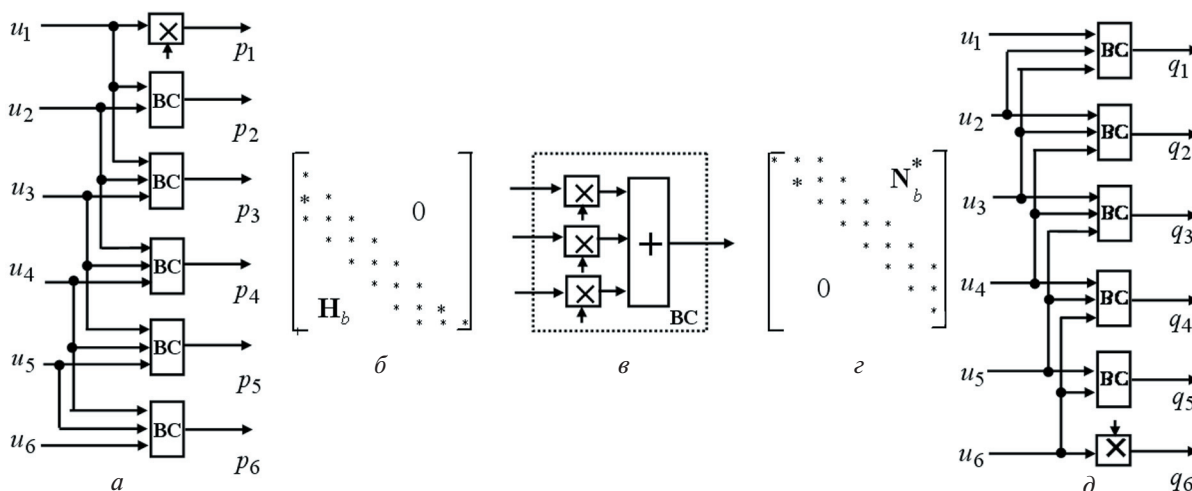


Рис. 13. Простейшие фильтры с ленточными треугольными МИХ ($M=6$, $m=3$)

вая количество и расположение компонент входного вектора $\mathbf{u} = \{u_k\}_{k=1}^M$, “участвующих в формировании” компонент выходного вектора.

Так, первая (p_1), вторая (p_2) компоненты вектора

$$\mathbf{p} = \{p_k\}_{k=1}^M = \mathbf{H}_b \cdot \mathbf{u} \quad (42)$$

на выходе фильтра (а) образованы соответственно первой (u_1) и первыми двумя (u_1, u_2) компонентами входного, а компоненты $p_k, k \in 3, M$, начиная с третьей, формируются в весовом сумматоре (ВС, в) $m=3$ компонент — k -й (u_k) и $m-1=2$ “предшествующих” компонент u_{k-2} и u_{k-1} . Такое преобразование в (42) обеспечивается нижней треугольной ленточной МИХ $\mathbf{H}_b$ с шириной ленты $m=3$ (б).

Точно так же нетрудно убедиться во взаимном соответствии фильтра рис. 13, д и его верхней треугольной ленточной МИХ $\mathbf{N}_b^*$ с шириной ленты $m=3$ (з), преобразующих входной вектор $\mathbf{u} = \{u_k\}_{k=1}^M$ в вектор

$$\mathbf{q} = \{q_k\}_{k=1}^M = \mathbf{N}_b^* \cdot \mathbf{u}. \quad (43)$$

Б. Адаптивные фильтры со структурой рис. 13, а, д реализуют требуемую (18) ленточную аппроксимацию (рис. 4) эрмитовой матрицы, обратной КМ помех, если строки их МИХ (рис. 5), определяющие параметры ВС (в), будут удовлетворять условиям (19), (20). Нетрудно показать, что нормированные соответствующим образом весовые векторы $(m-1)$ -канальных корреляционных АК (п. 1.А) с последним ($g=m$) и первым ($g=1$) основным (нерегулируемым) каналом в установившемся режиме удовлетворят необходимым требованиям к весам ВС фильтров рис. 13, а и рис. 13, д соответственно. Такое решение относительно несложно, однако может быть практически неоправданным из-за недостатков одноступенчатых АК (п. 1.Б).

В роли ВС теоретически могут использоваться и существенно более быстродействующие схемы рис. 9. Недосток такого решения — неоп-

равданная сложность, быстро увеличивающаяся с ростом требуемой ширины ленты МИХ.

В. Более рациональны структуры фильтров, приведенные на рис. 14. Они состоят из $v = M+1-m$ показанных в штриховых треугольных рамках $m=3$ — входных фильтров с нижними (а) и верхними (б) треугольными $m \times m$ МИХ, каждый из которых строится из элементарных (двухвходовых) весовых сумматоров (ЭВС) с нормированным выходом (б), (з) [29–31, 4]. Фильтры с $m \times m$ нижними треугольными МИХ обозначены АК ПД 1 (АК с последовательной декорреляцией помех), а с верхними треугольными — АК ПД 2.

Условия (19), (20) здесь выполняются при равенстве коэффициента передачи регулируемого канала каждого ЭВС взятому со знаком минус коэффициенту корреляции помех на его входах с последующей нормировкой к единице мощности помех на их выходах. Ленту нижней треугольной $M \times M$ МИХ рис. 5, а при этом образуют $m \times m$ нижняя треугольная МИХ первого АК ПД 1 и последние строки МИХ остальных АК ПД 1, а ленту верхней треугольной $M \times M$ МИХ рис. 5, б — первые строки $m \times m$ верхних треугольных МИХ АК ПД 2 и полная $m \times m$ верхняя треугольная МИХ последнего (v -го) АК ПД 2.

Недостатками адаптивных аналогов фильтров рис. 14 в случае КМ общего вида можно считать различие параметров соответствующих ЭВС различных АК ПД. Оно неоправданно увеличивает объем вычислений на этапе их оценивания, а также сложность (или даже невозможность) в структуре этих АК ПД учесть возможную априорную информацию о специфике (в частности, теплицевости) КМ (п. 2.Е).

Г. Среди рассмотренных и ряда других известных разновидностей фильтров с ленточными треугольными или эрмитовыми МИХ практически наиболее приемлемы решетчатые фильтры (РФ) [4, 12–14, 32, 33], для рассматриваемого примера ($M=6, m=3$) показанные на рис. 15 [13, 14].

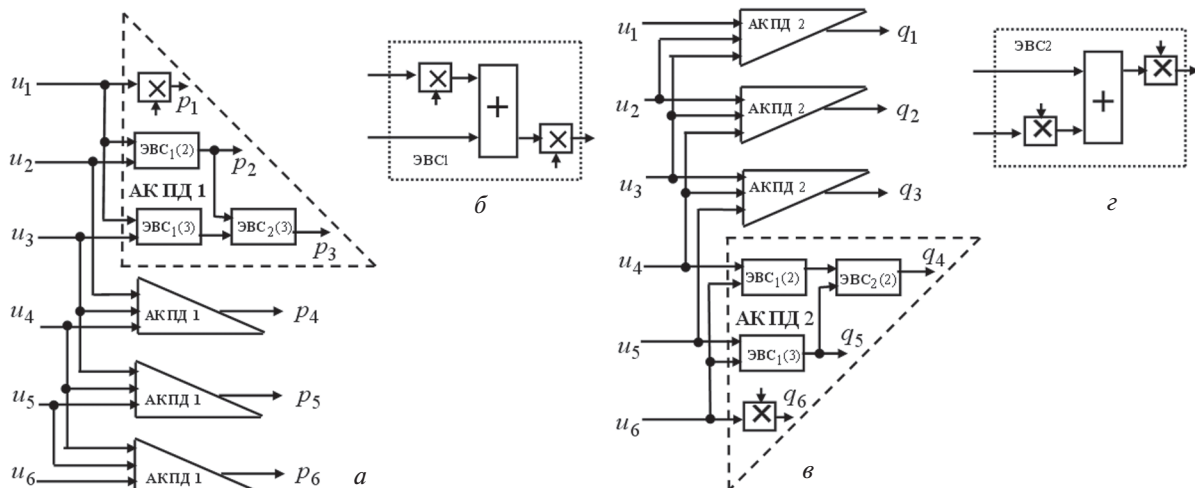


Рис. 14. Фильтры с ленточными нижней (а) и верхней (в) треугольными МИХ

Они строятся из набора нормирующих множителей $s_i(\ell)$, $\ell \in 1, M$ в первой (последней) ступени первого (второго (ж)) РФ и “нормированных элементарных решетчатых фильтров (ЭРФ)” – двухходовых весовых сумматоров с перекрестными связями (а), (з) в последующих ступенях, число которых уменьшается (увеличивается) на единицу от ступени к ступени этих РФ. Проследивая расположение компонент входного вектора, формирующих компоненты выходного, нетрудно убедиться, что первый РФ (б) имеет $2 \cdot M \times M$ МИХ W_{1b} (в), состоящую из $M \times M$ нижней (H_b) и верхней (N_b^*) ленточных треугольных матриц с шириной ленты $m=3$, равной числу его ступеней. Аналогичным образом легко показать, что при комплексно сопряженных параметрах ЭРФ (а) и (з) второй РФ (ж) имеет $M \times 2 \cdot M$ МИХ W_{1b}^* (д), состоящую из $M \times M$ верхней (H_b^*) и нижней (N_b) ленточных треугольных матриц с шириной ленты $m=3$, равной числу его ступеней. В этом случае соединение выходов первого РФ (б) с одноименными входами второго (ж) образует РФ с эрмитовой $M \times M$ ленточной МИХ $\Psi_b = W_{1b}^* \cdot W_{1b}$ (е) с шириной ленты $z=2 \cdot m-1$.

Условия (19), (20) здесь выполняются, если параметры ЭРФ (рис. 15, а)

$$\beta_i(\ell) = \alpha_i^*(\ell), \quad s_i(\ell) = c_i(\ell) = (1 - |\alpha_i(\ell)|^2)^{-1/2}, \quad (44)$$

$$i \in 2, m; \quad \ell \in 1, M+1-i$$

равны взятой со знаком минус оценке коэффициента корреляции помех на их входах и множителям, нормирующим к единице выходные мощности помех.

Д. Взаимосвязи (44) приводят к тому, что порождающий их РФ (рис. 15, а) более “экономичен”, чем внешне более простой фильтр (рис. 14, а) с той же МИХ. Но наиболее важное преимущество РФ заключается в “наследовании” его параметрами структурных особенностей исходной КМ [12–14].

Так, персимметрия КМ (симметрия относительно побочной диагонали) порождает априорное равенство параметров ЭРФ i -й ($i \in 2, m$) ступени

$$s_1(\ell) = s_1(M+1-\ell), \quad \ell \in 1, M,$$

$$\alpha_i(\ell) = \alpha_i(M_i+1-\ell), \quad i \in 2, m;$$

$$\ell \in 1, M_i; \quad M_i = M+1-i,$$

$$(45)$$

симметрично относительно ее центрального ЭРФ.

Следствием теплицевости КМ являются равенства

$$s_1(\ell) = s_1(1) = s_1, \quad \ell \in 1, N;$$

$$\alpha_i(\ell) = \alpha_i(1) = \alpha_i, \quad s_i(\ell) = s_i(1) = s_i, \quad i \in 2, N,$$

$$(46)$$

означающие одинаковость параметров всех ЭРФ каждой ступени РФ.

Если, кроме того, теплицева КМ является КМ дискретного процесса авторегрессии порядка $p < M$, то РФ “укорачивается”:

$$\alpha_i = 0, \quad s_i = 1 \quad \text{для всех } i > p+1. \quad (47)$$

Отмеченное “наследование” (разновидности которого далеко не исчерпываются приведенными примерами) позволяет достаточно просто использовать априорную информацию о специфике структуры реально неизвестной КМ за счет простой модификации “базовых” алгоритмов их адаптивной настройки, синтезированных для КМ общего вида (без явно выраженной специфики) [14]. Эта модификация сводится к усреднению оценок априори равных параметров, полученных по “базовым” алгоритмам. Эффект такого учета иллюстрируется ниже.

Е. В условиях (15) МП оценка персимметричной КМ равна [34]

$$\hat{\Phi}_\Pi = K^{-1} A_\Pi, \quad A_\Pi = 1/2 \cdot Y_\Pi \cdot Y_\Pi^*,$$

$$Y = \{Y, \Pi, Y^-\}, \quad (48)$$

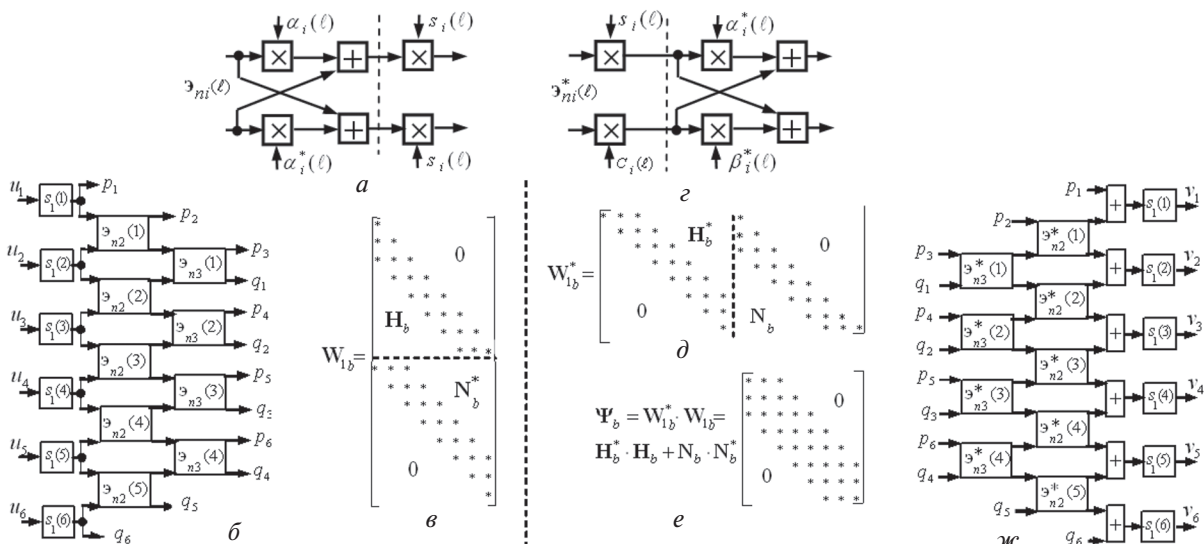


Рис. 15. РФ с ленточными треугольными и эрмитовыми МИХ

где $\mathbf{\Pi}$ – симметричная ортогональная $M \times M$ матрица перестановок [21] с единицами на побочной диагонали, $(\sim)$ – символ комплексного сопряжения. Как показано в [36], в этом случае потери **ОСПШ** (22) оценки 1^0 имеют то же β – распределение $p_\chi(x, K)$ (33), что и на основе оценки (14), но со средним

$$\overline{\chi_\Pi} = (2 \cdot K_\Pi - M + 2) / (2 \cdot K_\Pi + 1) < 1, \quad (49)$$

совпадающим с (34) при выборке объема $K_\Pi = K/2$. Тем самым в системах с центральной симметрией каналов приема (с персимметричными **КМ**) [34–38] переход от оценок (14) к (48) удваивает быстродействие оценки 1^0 , оцениваемое по среднему значению случайных потерь **ОСПШ** (22). Однако при $K_\Pi = K/2$ дисперсия этих потерь вдвое больше дисперсии распределения (33). В связи с этим оценки (14), (48) более корректно сравнивать по “интегральному” критерию [38]

$$P(K) = \int_{\nu_{\text{пор}}}^1 p_\chi(x, K) dx, \quad (50)$$

характеризующему зависимость от объема выборки K вероятности P того, что потери χ не превысят допустимого уровня $\nu_{\text{пор}}$. Эти зависимости показаны на рис. 16 для оценки (14) (сплошные кривые) и оценки (48) при $K_\Pi = K/2$ (штриховые кривые) для $\nu_{\text{пор}} = 0.5$ (–3дБ), 0.631 (–2дБ), 0.794 (–1дБ) и значениях $M = 8, 16$.

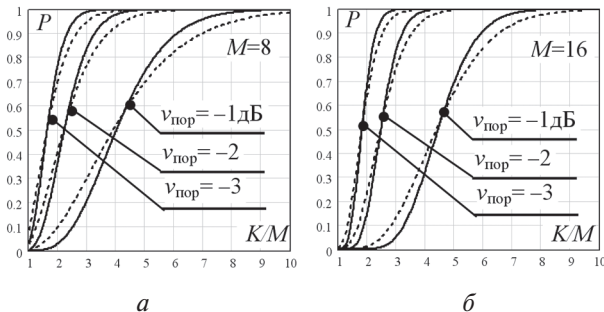


Рис. 16. Быстродействие оценок (14) и (48) по “интегральному” критерию (50)

Видно, что оценка (48) при любых $\nu_{\text{пор}}$ уже по выборке “половинного” объема $K = K/2$ обеспечивает примерно ту же вероятность $P(K)$, что и оценка (14) по выборке удвоенного объема $K \geq M$. Несколько более высокая эффективность оценки (48) при “малых” $P(K) \leq 0.5$ и оценки (14) – при “больших” $P(K) > 0.5$ обусловлены отмеченным отличием дисперсий при равенстве средних значений потерь (22). Видно также, что для любых $\nu_{\text{пор}}$ вероятность (50) весьма слабо зависит от абсолютного значения M , а определяется отношением K/M .

Ж. На рис. 17, а, б показаны полученные моделированием зависимости, аналогичные зависимостям рис. 8, а, б, а на рис. 17, в, г – аналогичные зависимостям рис. 12, а, б, но для оценок $1^0 - 4^0$ на основе **МП** оценки (48) персимметричной **КМ**.

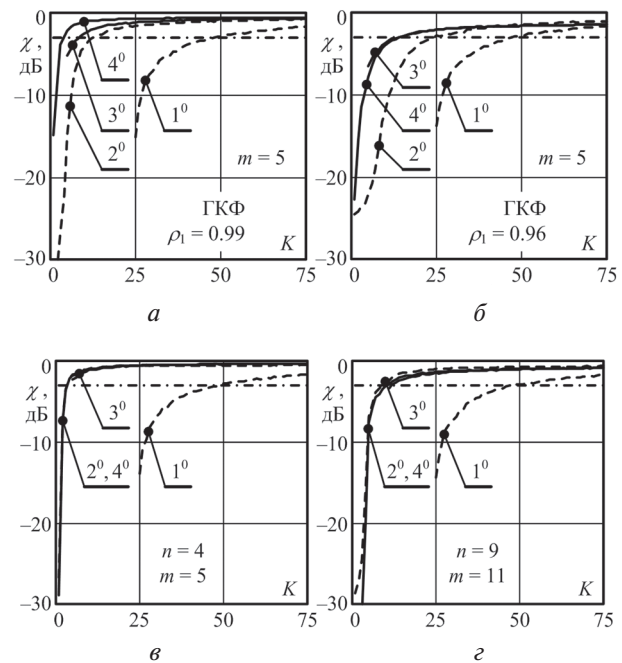


Рис. 17. Быстродействие оценок $1^0 - 4^0$ на основе (48)

Из их сравнения с соответствующими результатами рис. 8 и рис. 12 следует, что переход в центрально-симметричных системах приема от (14) к (48) практически удваивает быстродействие оценок $1^0 - 4^0$ как для помех с непрерывными (рис. 17, а, б), так и с дискретными (рис. 17, в, г) спектрами, **не меняя** соотношений между ними, описанных в выводах № 3–7 п.3.Б. Формальная причина этого – увеличенное число степеней свободы распределения оценки (48) [37] по сравнению с распределением оценки (14) [9]. Физическая основа – примерно вдвое меньшее число параметров, определяющих персимметричную **КМ** по сравнению с **КМ** общего вида, вследствие чего каждый из них оценивается по выборке $\mathbf{Y}_\Pi$ (48) примерно вдвое большего объема [35, 37].

З. Рис. 18, а, б иллюстрирует эффективность адаптивной обработки в тех же условиях, что и на рис. 17 а, б, но на основе M – входных **АРФ** (рис. 15) с ленточными **МИХ**, настроенных с учетом теплицевости **КМ** помех (п. 2.Е). Штриховые горизонтальные прямые указывают максимальное значение **ОСПШ** μ в гипотетических условиях известной **КМ** (знаменатель формулы (22)), сплошные кривые – зависимости от объема обучающей выборки K оценочного **ОСПШ** $\hat{\mu}$ (числитель (22)) адаптивных фильтров различного порядка M .

Видно, что в этом случае обеспечивается высокое быстродействие адаптивной обработки, увеличивающееся с ростом числа каналов M . Так, в приведенных примерах уже при единственной обучающей выборке ($K=1$) потери не превосходят 10 дБ при $M=5$, 3 дБ – при $M=10$, и пренебрежимо малы при $M \geq 30$.

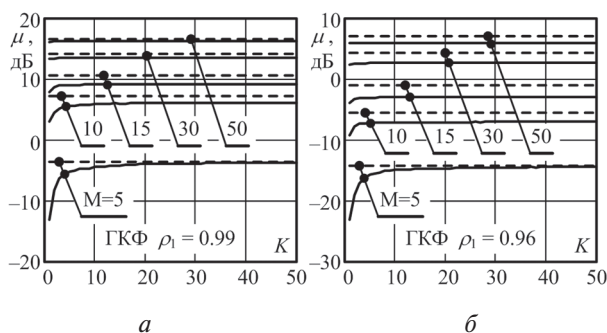


Рис. 18. Быстродействие оценки 3^0 в условиях теплицевых КМ помех

Причиной этого является использование в качестве единственного параметра всех ЭРФ каждой ступени среднего значения оценок параметров всех ЭРФ этой ступени, полученных по “базовым” алгоритмам для КМ общего вида [14], возможное в силу их априорного равенства (46) в условиях теплицевых КМ. Такое (междуканальное) усреднение аналогично (но не эквивалентно) предусматриваемому МП оценкой (14) (временному) усреднению K выборочных матриц ранга 1 с равными КМ (первое условие в (15)). Из-за невыполнения в общем случае второго условия в (15) эффект междуканального усреднения (накопления) оценок меньше, чем временного (14), однако, дополняя временное, оно увеличивает быстродействие, и тем сильнее, чем выше его вклад (значение M). При больших M (в примерах рис. 18 — при $M \geq 30$) этот вклад столь велик, что даже позволяет отказаться от временного накопления (использовать единственную обучающую выборку ($K = 1$)).

Рассмотренный “косвенный” способ учета теплицевости КМ за счет накоплению априори равных параметров ЭРФ $m < M$ ступеней АРФ, который может рассматриваться как первый шаг рекуррентной процедуры [39] в сочетании с выбором ширины ленты в соответствии с ЕЛ принципом, весьма эффективен и в то же время существенно проще целого ряда других способов решения этой задачи [40 – 42].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставлено быстродействие различных алгоритмов адаптивной пространственно-временной обработки когерентных сигналов на фоне гауссовых помех. Показано, что важный резерв его повышения связан с ленточной аппроксимацией матрицы, обратной диагонально регуляризованной максимально правдоподобной оценке корреляционной матрицы помех, параметры которой (ширина ленты и скалярный множитель диагональной регуляризации) выбираются в соответствии с принципом “ожидаемого правдоподобия”. Обоснована возможность, целесообразность и преимущества практической реализации предложенного способа повышения быстродействия на основе универсальных адаптивных решетчатых фильтров (АРФ).

Авторы с удовольствием посвящают эту работу Юбилею выдающегося ученого, замечательного человека, наставника и друга Якова Соломоновича Шифрина, желают ему здоровья, многих лет плодотворной жизни, удовлетворения от сделанного и достигнутого, вдохновенного общения с желанными и близкими людьми и полного комплекта давно заслуженной адмиральской формы.

Литература

- [1] А. с. № 296267. Способ автоматической регулировки амплитуды и фазы компенсирующего сигнала в радиоприемных устройствах с подавлением коррелированных помех двухканальным компенсационным методом / Я.Д. Ширман, С.И. Красногоров (СССР). — № 296267; заявл. 27.01.62; опубл. 1988, Бюл. изобретений № 2.
- [2] А. с. № 324956. Способ компенсации коррелированных помех и автоматической ориентации нулей диаграммы направленности на источники помех // Я.Д. Ширман, С.И. Красногоров (СССР). — № 324956; заявл. 02.03.63; опубл. 1988, Бюл. изобретений № 33.
- [3] Ширман Я. Д. Первые отечественные исследования адаптации антенных систем к мешающим воздействиям / Я. Д. Ширман [и др.] // Радиотехника. — 1989. — № 11.
- [4] Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С., Леховицкий Д.И., Лещенко С.П., Лосев Ю.И., Николаев А.И., Горшков С.А., Москвитин С.В., Орленко В.М. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с., ил.
- [5] Widrow B., Mantey P.E., Griffiths L.J., Goode B.B. Adaptive antenna systems // Proc. IEEE. — Vol. 55, Dec. 1967. — P. 2143.
- [6] Howells P. Explorations on fixed and adaptive resolution at GE and SURC // IEEE Trans. — 1976. — Vol. AP-24, № 4.
- [7] Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Уидроу Б., Стирнз С.; пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с.
- [8] Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. — 448 с.
- [9] I.S. Reed, J.D. Mallett and L.E. Brennan. Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays // IEEE Transactions on Aerospace Electronic System. — November, 1974. — Vol. AES-10. — PP. 853–863.
- [10] Абрамович Ю.И. Регуляризованный метод адаптивной оптимизации по критерию максимума отношения сигнал/помеха / Ю.И. Абрамович // Радиотехника и электроника. — М., 1981. — Т. 26, № 3. — С. 543–551.
- [11] Абрамович Ю.И., Неврев А.И. Анализ эффективности адаптивной максимизации отношения сигнал/помеха, использующей обращение оценки корреляционной матрицы // Радиотехника и электроника, 1981. — Т. 26, № 12. — С. 2558–2566.
- [12] Леховицкий Д.И., Зарицкий В.И., Раков И.Д., Свердлов Б.Г., Ратынский М.В. Методы адаптивной решетчатой фильтрации в задачах пространственно-временной обработки сигналов // Препринт 8610. — М.: РТИ АН СССР, 1987. — 30 с.

- [13] Леховицкий Д.И. Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые фильтры. // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1992. — Т. 35, №9–10. — С. 790–808.
- [14] Леховицкий Д.И., Милованов С.Б., Раков И.Д., Свердлов Б.Г. Универсальные адаптивные решетчатые фильтры. Ч.2. Адаптация при заданном корне из оценочной корреляционной матрицы. // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1992. — Т. 35. — №11–12. — С. 969–991.
- [15] Y. Abramovich, N. Spencer, and B. Johnson. Band-inverse TVAR covariance matrix estimation for adaptive detection / IEEE Trans. Aero. Elect. Sys., submitted 11 Dec 2006 + 15, Aug 2007, accepted 24 Sep 2008.
- [16] Беллман Р. Введение в теорию матриц. / Пер. с англ. — М.: Наука, 1976. — 351 с.
- [17] Ширман Я.Д., Манжос В.Н., Леховицкий Д.И. Этапы развития и проблемы теории и техники разрешения радиолокационных сигналов // М.: Радиотехника. — 1997. — № 1. — С. 31–42.
- [18] Литвинов В.В. Первые разработки корреляционных автокомпенсаторов пассивных помех (1964–74 гг.) и проблематика СДЦ при низкой частоте посылок в обзорных РЛС // Х.: Прикладная радиоэлектроника. — 2009. — Т. 8, № 4. — С. 461–468.
- [19] Y.I. Abramovich, N.K. Spenser, A.Y. Gorokhov. A Modified GLRT and AMF Framework for Diagonally Loaded and Fast Maximum-Likelihood Adaptive Detectors // IEEE Trans. on Aerospace and Electr. Syst. — Vol. 43, №3. — Jul 2007. — PP. 1017–1051.
- [20] Y. Abramovich, N. Spencer, M. Turley. Time-varying autoregressive (TVAR) models for multiple radar observations // IEEE Trans. Sig. Proc. — Vol. 55, № 4, PP. 1298–1311, Apr. 2007.
- [21] Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984.
- [22] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1968.
- [23] Кокин В.Н., Темеров А.В., Фединин В.В. Использование текущей оценки обратной корреляционной матрицы помех в адаптивном обнаружителе // Радиотехника и электроника. — 1980. — Т.25, №7. — С. 1540–1542.
- [24] Y. Abramovich, N. Spencer, and M. Turley. Order estimation and discrimination between stationary and time-varying autoregressive (TVAR) models // IEEE Trans. Sig. Proc. Vol. 55, № 6. — PP. 2861–2876, Jun. 2007.
- [25] Леховицкий Д.И., Табачников М.И., Шипицын С.И. Выбор порядка линейного фильтра предсказания для стационарных случайных процессов с гауссовской корреляционной функцией. — М.: Радиотехника. — 1990. — № 4. — С. 44 – 48.
- [26] H. Dym and I. Gohberg. Extensions of bandmatrices with band inverses // Linear Algebra Appl. — Vol. 36, PP. 1–24, Mar. 1981.
- [27] Леховицкий Д.И., Полишко С.В., Жуга Г.А. О стратегии использования МП оценок КМ в многоканальных системах адаптивной обработки сигналов на фоне помех. Материалы I международной научной конференции «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», Харьков–Туапсе, 3–6. 10. 2006.
- [28] D. Likhovitskiy, Y. Abramovich. Adaptive lattice filters for band-inverse (TVAR) covariance matrix approximations: theory and practical applications. — IRS — 2009, Hamburg, Germany, 09–11 September 2009, Proceedings, p.p. 535–539.
- [29] Гираудон С. Патент США № 3876847, МКИ 325/367 от 8.04.1975.
- [30] Лексаченко В.А., Шаталов А.А. Синтез многомерного “выбеливающего” фильтра по методу Грама–Шмидта // Радиотехника и электроника. — 1976. — №1.
- [31] Полов К.П. Адаптивный компенсатор помех // Радиотехника. — 1979. — Т. 34, №1. — С. 19–24.
- [32] Lev-Ari H., Kailath T. Schur and Levinson algorithms for non-stationary processes // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust, Speech and Signal Process (Atlanta, CA, March 1981). — PP.860–864.
- [33] Адаптивные фильтры: Пер. с англ./Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. — М.: Мир, 1988.— 392 с., ил.
- [34] Nitzberg R. Application of maximum likelihood estimation of persymmetric covariance matrices to adaptive processing. // IEEE Trans. Aerosp. And Electr. Syst.— 1980.— v.16.— № 1.— p.124–127.
- [35] Абрамович Ю.И., Горохов А.Ю. К оценке скорости сходимости адаптивных фильтров компенсации помех с персимметрической корреляционной матрицей // Радиотехника и электроника. — 1993. — Т. 38, № 1. — С. 101–111.
- [36] Кошевой В.М., Радионов В.В. Эффективность адаптивных фильтров с центральной симметрией приемных каналов // Радиотехника и электроника. — 1994. — №11. — С. 1779–1788.
- [37] Леховицкий Д.И. К теории адаптивной обработки сигналов в системах с центральной симметрией каналов приема // Х.: Радиотехника. — 1996. — №100. — С. 140–158.
- [38] Леховицкий Д.И., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г., Зарицкий В.И. Сравнение эффективности адаптивной обработки в произвольных и центрально-симметричных ФАР // М.: Антенны. — 2000.— Вып.1 (44). С. 99–103.
- [39] Берг Дж.П., Люнбергер Д.Г., Венгер Д.Л. Оценивание ковариационных матриц с заданной структурой // ТИИЭР. — Т. 70, № 9. — 1982. — С. 63–77.
- [40] Miller M.I., Fuhrmann D.R., O’Sullivan J.A., and Snyder D.L. Maximum-likelihood methods for Toeplitz covariance estimation and radar imaging. In S. Haykin, editor, Advances in Spectrum Analysis and Array Processing, volume II, pages 145–172. Prentice-Hall, 1991.
- [41] Nicolls F. and G. de Jager. Maximum likelihood estimation of Toeplitz-block-Toeplitz covariances in the presence of subspace interference. International Conference on Pattern Recognition, CPR1998, Brisbane, Australia, 1998.
- [42] Hongbin Li, Stoica P., Jian Li. Computationally Efficient Maximum Likelihood Estimation of Structured Covariance Matrices // IEEE Transactions on Signal Processing. — Vol. 47. — PP. 1314–1322. Prentice-Hall, 1999.

Поступила в редколлегию 5.03.2010



Леховицкий Давид Исаакович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра Харьковского Национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: адаптивная пространственно-временная обработка сигналов на фоне помех в информационных системах различного назначения.

Абрамович Юрий Иосифович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Australian Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Аделаида, Австралия. Область научных интересов: обработка сигналов (в частности — адаптивная пространственно-временная обработка, диаграммообразование, обнаружение сигналов, оценка параметров) и их применение в радиолокации, связи и радиоэлектронной борьбе.



Жуга Геннадий Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник Харьковского Национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: унифицированные процессоры и системы адаптивной обработки сигналов на фоне помех.



Рачков Дмитрий Сергеевич, аспирант Харьковского Национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: унифицированные процессоры и системы адаптивной обработки сигналов на фоне помех.

О ЮБИЛЯРЕ

В настоящем разделе помещены воспоминания коллег, друзей и учеников юбиляра. Они расположены в алфавитном порядке по фамилиям авторов. Воспоминания зарубежных коллег Я.С. Шифрина, с их согласия, даны в русском переводе.

СЕВАСТОПОЛЬСКИЕ ВСТРЕЧИ

Е.Б. БАШУК, А.Г. ЛУКЬЯНЧУК

Нам повезло близко познакомиться с необыкновенным человеком Яковом Соломоновичем Шифриным, когда в 1998 году он приехал в Севастополь с предложением провести на базе нашего технического университета Международную антенную конференцию.

Сегодня многие будут говорить о научных успехах юбиляра, о его педагогическом и организаторском таланте. Эта сторона деятельности отмечена так же Ученым Советом Севастопольского национального технического университета (СевНТУ) присвоением в 2007 году Якову Соломоновичу звания Почетного профессора СевНТУ за заслуги в развитии науки, научного и образовательного сотрудничества и большой вклад в подготовку кадров.

Хочется поделиться своими впечатлениями от встреч с этим неординарным человеком в неофициальной обстановке. Ему интересно жить, а окружающим всегда интересно встречаться и быть рядом с ним. Когда бы мы ни виделись — это всегда масса впечатлений и положительных эмоций. При этом не замечается разница в возрасте, поскольку он молод душой и поддерживает себя в прекрасной спортивной форме.

Во время нашей первой поездки по горному Крыму он, опережая всех, сумел подняться на вершину пещерного города Эски-Кермен, не переставая восхищаться местными достопримечательностями: сказочными видами, глубокой колеей, пробитой в камне доисторическими повозками, пещерными сооружениями... Правда, это утро и началось необычно... В 7 утра перед выездом из университетской базы отдыха «Горизонта» Яков Соломонович задумчиво произнес: «Мы же сегодня отдыхаем весь день? Ну, так надо отдыхать как положено! Коньячок — вот он, с вечера остались пирожки, не просто же чаю пить на дорожку!» Изумленные Нона Григорьевна и Елена Борисовна со смехом поддержали Якова Соломоновича, а я испытал чувство завистливого восхищения, поскольку был за рулем.

В другой раз ужинали у нас дома большой компанией, в числе гостей — профессор Ф.Ф. Дубровка с супругой и профессор из Германии П. Эденхофер с женой Сигрид, которая сломала ногу и потому передвигалась на костылях. Яков Соломонович любит хорошую компанию, веселое общение, хороший стол. Засиделись допозд-

на. Провожаем гостей. И вдруг лифт с Яковым Соломоновичем, Федором Федоровичем Дубровкой и «импортной» гостьей застрял между этажами. Муж ее в это время «ждет очереди на лифт». Сигрид в лифте впадает в панику и начинает громко звать мужа, Петер сильно нервничает, Нона Григорьевна старается успокоить его, а Яков Соломонович, с присущей ему особенностью во всем находить шуточные моменты, пытается поднять бодрость духа у Сигрид. В конце концов, пленников освободили, но Сигрид, видимо, все же испугалась, потому что в Севастополь больше не приезжала — сказала непригодность европейских женщин к нашей суровой действительности. А жаль, хорошая у нас получилась компания, и Сигрид так хорошо пела...

В 2007 году культурной программой антенной конференции «ICATT» была предусмотрена прогулка на ослах вокруг «сфинксов Каролезской долины». Но нас одолевали сомнения, а не тяжело ли будет Якову Соломоновичу ехать верхом. Однако он одним из первых вскочил в седло и показал остальным, более молодым членам оргкомитета пример лучших образцов верховой езды (см. фото). После этого Яков Соломонович инициировал подъем на вездеходах по бездорожью на вершину древнего пещерного города Мангуп-Кале. Все участники этого подъема натерпелись страху, а Яков Соломонович продолжал восхищаться окружающими красотами. Доброжелательно и



Выездное заседание участников ICATT'07 в Каролезской долине (Крым). Справа налево: А.Б. Гершман, Ю.В. Юханов, Н.Г. Максимова, Я.С. Шифрин, А.В. Юханова, А.И. Малеханов, Е.В. Малеханова

с неподдельным интересом Яков Соломонович отнесся к нашей забаве — коллекционированию сувенирных наперстков. Он не только регулярно доставлял новые экземпляры наперстков из своих зарубежных поездок, но и взял на себя труд рецензирования каталога коллекции. Его отзыв на первое издание каталога коллекции, выдержанный в классической манере научных рецензий, сразил нас своей доброжелательностью. Мы часто перечитываем этот шуточный документ, оформленный по всем правилам и заверенный всеми подписями и печатями.

А рассказы Якова Соломоновича о военном времени, с точным указанием воинских частей и

соединений, фамилий, имен и отчеств командиров полков и рот! Мы с удовольствием прочитали обе его биографические книги, подаренные автором. В них целая эпоха, созданная, прожитая и выстраданная семьей Шифриных вместе со всей страной. Это увлекательнейший рассказ о трагических, будничных и комических сторонах своей жизни и жизни своих близких.

Творчество, высочайший интеллект, отличное чувство юмора, твердость духа — все вместе — это и есть Яков Соломонович, которому от души желаем еще много счастливых и удачных лет впереди.

К ДЕВЯНОСТОЛЕТИЮ УЧЕНОГО И УЧИТЕЛЯ, ПОЧЕТНОГО ПРОФЕССОРА И ДОКТОРА ЧЕТЫРЕХ УНИВЕРСИТЕТОВ РФ И УКРАИНЫ Я.С. ШИФРИНА

В.И. ГОМОЗОВ

ВВЕДЕНИЕ

Яков Соломонович Шифрин — крупный ученый и выдающийся педагог — хорошо известен как в странах СНГ, так и в дальнем зарубежье. И это не случайно. Достаточно перечислить некоторые из его ученых и почетных степеней и званий.

Он *является*: доктором наук, профессором; Заслуженным деятелем науки и техники Украины; Почетным профессором и доктором четырех университетов РФ и Украины; академиком, и членом бюро Президиума Академии наук прикладной радиоэлектроники Беларуси, РФ и Украины; лауреатом премии им. А.С. Попова АН СССР, стипендиатом Президента Украины как выдающийся ученый страны; Соросовским профессором, имевшим два гранта Сороса по науке; президентом Украинской национальной ассоциации “Антенны”; пожизненным действительным членом института инженеров по электротехнике и электронике (Life Fellow IEEE, США).

Высокому авторитету Я.С. существенно способствовали и его многочисленные поездки в дальнее зарубежье с выступлениями на многочисленных научных конференциях и чтения лекций, а также и то, что Я.С. был организатором и руководителем многих международных научных конференций.

Мне в моей жизни пришлось много раз очно и заочно сталкиваться с этим замечательным человеком, о чем я и хочу рассказать в этих заметках.

В Артиллерийской радиотехнической академии (АРТА) я, В.И. Гомозов (далее В.И.), был курсантом радиотехнического факультета с 1953 г.

В это время майор Шифрин Я.С. (далее Я.С.) — фронтовик, окончивший в 1951 г. адъюнктуру АРТА первого набора, был уже старшим преподавателем академии. Но работал он на других факультетах. Поэтому до своего выпуска из академии в 1958 г., да и после возвращения в нее в 1960 г. вплоть до 1964 г., я слышал о Я.С. от своих

товарищей по службе в академии, которые сталкивались с ним на двух кафедрах, где он работал после окончания адъюнктуры. Это были вначале кафедра РЛС зенитной артиллерии и позднее кафедра антенн и распространения радиоволн, которую он возглавлял с 1957 г. по 1980 г. Поэтому, рассказывая далее о Я.С., я, кроме своих личных впечатлений, буду использовать также сведения, полученные мною от товарищей, из очерка истории академии [1] и из книги воспоминаний самого Я.С. Шифрина «Как мы жили» [2].

Как мне представляется, разговор о Я.С. естественно начать с описания его пребывания в адъюнктуре, ибо здесь закладывались основы его становления как будущего ученого и учителя.

ПЕРВЫЙ НАБОР АДЬЮНКТОВ АКАДЕМИИ

В феврале 1948 г. около двух десятков офицеров от старшего лейтенанта до майора приехали в г. Харьков для подготовки и сдачи вступительных экзаменов в только что открывшуюся адъюнктуру АРТА СА. Впоследствии один из них, генерал-лейтенант в отставке В.И. Кузнецов, писал [3], что «...не все приехавшие в полной мере отдавали себе отчет в том, какой крутой поворот в службе и жизни их ждет в случае поступления в адъюнктуру». Правда, другой из них, майор О.Н. Баранов, уехавший с места службы перед его непосредственным представлением к очередному воинскому званию, заявил: “Подполковников много, а кандидатов наук мало”. Успешно сдали экзамены и были зачислены в адъюнктуру семь человек: майор Аверьянов В.Я., майор Баранов О.Н., капитан Геллер С.И., капитан Кузнецов В.И., капитан Мисюра В.А., майор Ширяев В.Ф. и капитан Шифрин Я.С. Их подготовка, по воспоминаниям Я.С. Шифрина и В.И. Кузнецова [2,3], была не одинаковой. Все они обучались до войны или во

время войны в разных вузах по различным специальностям и в течение различного времени.

Теперь же перед ними всеми стояли одинаковые задачи — за три года сдать кандидатские экзамены и написать диссертации в области радиолокации, которая в те годы в СССР только формировалась по-серьезному.

Занятия в адъюнктуре начались 1-го сентября. На первом году обучения предстояло сдать экзамены по философии, английскому и немецкому языкам и два экзамена по специальности — «широкий» и «узкий». Особую сложность представлял первый из них, так как программа его была чрезвычайно объемной и сложной. Для того, чтобы помочь адъюнктам справиться с этим экзаменом, руководство академии приняло решение дополнить обычные формы обучения адъюнктов весьма солидными курсами лекций по спецглавам математики.

Позднее "широкий" экзамен в адъюнктуре АРТА отменили. Нет его и в программах аспирантской подготовки других известных мне радиотехнических вузов. А жаль. Этот экзамен существенно повышает кругозор адъюнкта (аспиранта), что немаловажно как для его научной работы, так и, особенно, для его будущей преподавательской деятельности. Имеющийся у меня не малый опыт в подготовке научно-педагогических кадров полностью подтверждает сказанное. Помимо сдачи кандидатских экзаменов и работы над диссертацией адъюнкты первого набора АРТА широко привлекались к проведению учебных занятий и активно участвовали в методической работе своих кафедр. Хотя это заметно и усложняло их жизнь, оно, несомненно, принесло им в дальнейшем большую пользу. Жаль, что и этой важнейшей стороне в подготовке аспирантов сегодня зачастую не уделяется должного внимания. В целом жизнь адъюнктов первого набора была очень напряженной. И, тем не менее, благодаря упорному труду, все они практически к положенному сроку представили свои диссертации. Я.С. представил ее одним из первых (к сентябрю 1951 г.), несмотря на смену научного руководителя и потерю полугода на самостоятельный поиск темы будущей работы. Защита диссертации состоялась в октябре 1952 г. на ученом совете радиотехнического факультета Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского. Успешно без особых задержек защитились и другие адъюнкты первого набора адъюнктуры АРТА.

В архиве Я.С. сохранилась фотография, на которой запечатлены пятеро из адъюнктов этого набора.

Впоследствии я встречался со всеми выпускниками первого набора либо в ходе занятий, либо на разных встречах в ходе нашей совместной многолетней работы в академии. Все они отмечали, что работали в адъюнктуре напряженно, активно и с удовольствием.



30 лет адъюнктуры академии (1978 г.).
Слева направо: В.А. Мисюра, Я.С. Шифрин,
В.Ф. Ширяев, О.Н. Баранов, В.И. Кузнецов

Дружили семьями и тогда, и потом, и даже в сложных ситуациях не теряли чувства юмора, умели отдыхать. Какое-то представление об этом дает гимн адъюнктов первого набора, сочиненный Я.С. к 30-й годовщине их выпуска, и выступление В.И.Кузнецова на 50-летию академии им. Говорова Л.А. [2,3].

Гимн адъюнктов первого набора [2]:

Хорошо адъюнктом быть, в академии служить —
Лучше этой должность трудно отыскать.
Хоть прошло уж много лет, но сомненья в этом нет,
Что неплохо бы опять адъюнктом стать.

Припев: Иго, эго, иго, эго...

Если только зад хороший у адъюнкта,

Иго, эго, иго, эго...

Всегда найдет он счастье свое.

В академию пойдешь, книжек много наберешь,
Тихо, мирно набираешься ума.

А экзамены сдавать нам давно не привыкать,
И до лампочки нам прочие дела.

Припев

Целый год так проведешь, песни весело поешь,
Да и выпить по субботам время есть.

Место выпить мы найдем,
и "Столичную" возьмем,
И корейку на закуску можно съесть.

Припев

На второй и третий год жизнь сложнее потечет,
Ибо надо диссертацию писать.

Да и это не беда, это сделаешь всегда,
Если только твердо заповеди знать.

Припев

Много времени прошло и теперь уже не то
Позабавиться, как раньше, нет силов.

Постарели мы, друзья, но компания все та,
И опять поем припев из прежних слов.

Припев

В 72 года В.И. Кузнецов в [3] сказал: "Годы адъюнктуры — один из ответственных периодов жизни. Кипучий и радостный. Желаю адъюнктам эффективно использовать все возможности этого благодатного времени". Я согласен с этим мнением и жалею, что не учился в адъюнктуре и докторантуре. Обе диссертации я писал соискателем без "благодатного" времени.

РУКОВОДСТВО Я.С.ШИФРИНЫМ КАФЕДРОЙ АНТЕНН И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН АКАДЕМИИ

В адъюнктуре Яков Соломонович учился на кафедре «Теоретические основы радиотехники (ТОР)». По окончании адъюнктуры он был назначен преподавателем аппаратурной кафедры, на которой в течение ряда лет преподавал РЛС зенитной артиллерии. В апреле 1956 г. он был назначен заместителем, а в начале 1957 г. начальником кафедры антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн («АФУ и РРВ»), которой руководил около 25 лет. Когда Я.С. принял кафедру, на ней было всего 15 человек.

Как известно, в армии существует принцип, которым должен руководствоваться любой начальник, обучая своих подчиненных, — «делай, как я». На кафедре основная фигура — преподаватель. И, соответственно, прежде чем учить подчиненных преподавателей, как им читать лекции или проводить другие виды занятий по данному курсу, вновь назначенный, уважающий себя и своих подчиненных, начальник кафедры обязан в должной мере изучить учебные дисциплины кафедры. Изучить их можно снаружи и изнутри. Изучение снаружи означает посетить все или хотя бы значительную часть занятий основных преподавателей. Изучить изнутри значит провести все занятия или добрую их долю самому. Только после этого начальник кафедры имеет моральное право управлять преподавателями, учебным процессом, вносить предложения по его улучшению.

Я.С. стал начальником кафедры АФУ и РРВ, когда на ней было три основных солидных курса: для слушателей — будущих инженеров — курсы «Антенно-фидерные устройства» и «Распространение радиоволн» и для слушателей — будущих командиров — один гибридный курс «Антенны и распространение радиоволн». Я.С. прочитал лекции по всем трем курсам, а также провел практические занятия по ним и проделал все лабораторные работы. На это у него ушло почти три года.

В 1985 г., когда меня назначили начальником кафедры «Тактика и вооружение войск ПВО», я пытался в той мере, в которой это было возможно, следовать примеру Я.С. Однако на моей кафедре было десять учебных дисциплин, и изучение всех их изнутри потребовало бы слишком много времени. Поэтому основную дисциплину я изучал и снаружи, и изнутри, а остальные — только снаружи, путем выборочного посещения занятий и просмотра конспектов лекций ведущих преподавателей. На мой взгляд, в моей ситуации этот компромиссный вариант был оптимальным.

После этого небольшого отступления вернусь к Я.С. и руководимой им кафедре АФУ и РРВ. В 1964 г., по настоянию Я.С., на его кафедру с кафедры ТОР были переданы учебные дисциплины «Теория электромагнитного поля» и «Техника СВЧ». Это привело к сосредоточению на кафедре АФУ и РРВ всех дисциплин электродинами-

ческого цикла. Кафедра стала ответственной за электродинамическую подготовку выпускников академии. Передача на кафедру новых учебных дисциплин сопровождалась, естественно, и переходом на нее преподавателей-специалистов по этим предметам Л.К. Черняева, Б.И. Штительмана, М.А. Алексеева и др. Численность кафедры заметно возросла. Началась большая работа по взаимодействию всех дисциплин кафедры, написанию учебных пособий, развитию лабораторной базы. Основные усилия в научно-методической работе кафедры были направлены на разработку научных основ читаемых дисциплин, с целью придания им большей фундаментальности, и на введение в читаемые курсы последних достижений науки. Решение этой задачи, равно как и задачи подготовки молодых научных кадров, немыслимо без серьезной кафедральной науки. Именно поэтому в общем комплексе забот Я.С., как заведующего кафедрой, наука всегда была приоритетом номер один. Придя на кафедру в апреле 1956 г., он сразу же взял на себя руководство работой по исследованию дальнего тропосферного распространения (ДТР) радиоволн, которая незадолго до его прихода была задана академии как двухлетняя правительственная тема «Дельта». Разработанная им программа многолетних исследований ДТР существенно выходила за рамки этой темы. Это позволило получить уникальные результаты, изложенные в монографии «Экспериментальное исследование ДТР» (изд-ва АРТА, 1964 г.) [4], высоко оцененной как в СССР, так и в США. Позднее часть этих результатов вошла также и в монографию [5] (Изд. Сов. радио, 1965 г.), написанную совместно с московскими учеными.

Здесь мне хочется отметить присущую Я.С. способность создавать добрые отношения с коллегами по работе, зачастую переходящие в многолетнюю дружбу. Естественно, это способствует и дальнейшему успешному решению многих деловых вопросов, в частности нахождению официальных оппонентов для своих учеников. Попутным результатом успешных работ Я.С. в области исследования ДТР явилось избрание его заместителем председателя тропосферной секции Совета по распространению волн АН СССР.

С 1959 г. Я.С. начал исследования в области статистической теории антенн (СТА). Эти исследования были стимулированы разработкой и внедрением в антенную практику крупных дорогостоящих зеркальных антенн и сложных фазированных антенных решеток. Достаточно полно результаты исследований по СТА представлены в работах [6-11]. СТА стала «визитной карточкой» Я.С. не только для специалистов по антеннам, но и для специалистов по многим другим научным направлениям — РРВ, акустике, оптике, радиолокации и т.д. Особенно ярко это проявилось после выхода в свет его широко известной монографии [7] и ее перевода на английский язык.

Летом 1964 г. Я.С. закончил оформление до-

кторской диссертации, в ноябре этого же года защитил ее, а в декабре 1965 г. ему была присуждена ученая степень доктора технических наук по специальности «Радиолокация и радионавигация».

Помимо развертывания исследований по «своим» направлениям, Я.С. всячески поддерживал и стимулировал исследования членов его кафедры по другим научным направлениям: теории и практике построения антенных обтекателей, адаптивным антеннам, исследованиям ионосферных эффектов, загоризонтной радиолокации и т.д. Фронт научных исследований на кафедре непрерывно расширялся. Увеличивалось число правительственных и договорных работ. На кафедре появились три проблемные лаборатории. Численность ее перевалила за 100 человек. Резко возросло число аспирантов и соискателей из войск. В середине 70-х г. по кафедре ежегодно защищалось порядка пяти кандидатских и чуть ли не ежегодно по одной докторской диссертации. За время руководства Я.С. кафедрой докторские диссертации, по которым он был официальным или неофициальным консультантом, защитились: Ф.Б. Черный, Л.Г. Корниенко, В.И. Замятин, Н.Н. Минервин. Позднее: В.А. Усин, А.Ф. Маслов, Т.А. Скворцов, В.И. Новожилов, Г.К. Солодовников, Г.Н. Ткачев, Б.Н. Бахвалов и др. Основной задел по своим диссертациям они сделали при консультациях Я.С. Все эти доктора наук мне были знакомы лично, и, что характерно, с породившей их кафедры они никуда не уходили. Столько докторов ни на одной кафедре в академии не было. Последнее, очевидно, определялось умением Я.С. создавать на кафедре – в коллективе из разных по характеру людей – нормальные человеческие отношения, чему я у него старался учиться. Учился я у него и отношению к своим подчиненным. Бывает, что в разговоре с начальником подчиненный сказал что-то (порою совершенную мелочь), не понравившееся начальнику. И нередко последний надолго это запоминает. Я.С. считал, что подчиненных, да и вообще любого человека надо оценивать интегрально и предельно доброжелательно.

В 1964 г. я впервые имел честь лично беседовать с Я.С. в связи со следующей ситуацией. Мой дипломник В.И. Замятин окончил академию в этом же году с Золотой медалью. Вадим работал в военном научном кружке под моим руководством по разработке экспериментального макета передатчика на карматроне для создаваемого в академии макета РЛС нового типа. Я еще не был кандидатом наук и не имел права руководить адъюнктами. Мне посоветовали обратиться к Я.С. Мол, если надо помочь талантливому человеку, то он либо поможет лично, либо подскажет путь выхода из ситуации. Я встретился с Я.С. и попросил его принять Вадима для беседы. После этой беседы Я.С. согласился взять Вадима в адъюнктуру кафедры и договорился по этому поводу с генерал-майором И.А. Лыко-

вым. Я заверил Я.С., что нареканий в мой адрес за эту рекомендацию не будет. Видимо, я не ошибся. В 1980 г., увольняясь из ВС СССР, Я.С. предложил командованию академии вместо себя на должность начальника кафедры АФУ и РРВ назначить уже доктора наук, профессора, полковника В.И. Замятина. В этой должности Вадим, сохраняя традиции кафедры, служил до 1992 г.

Ранее на примере гимна адъюнктов, сочиненного Я.С., я продемонстрировал, что ему присуще острое чувство юмора. На память приходит еще пара таких примеров.

Пример первый. Так уж получилось, что и Я.С., и начальника академии маршал Ю.П. Бажанов родились в один и тот же день 23 апреля, 1920 и 1905 гг., соответственно. В связи с этим совпадением, как пишет Я.С. в своих воспоминаниях, он порою шутливо рекомендовал себя как самого тонкого подхалима в академии.

Пример второй. В феврале 1966 г. мне нужно было согласовать сетевой график по учебному курсу «Метрология и радиотехнические измерения» со всеми специально-техническими кафедрами. Я позвонил Я.С. на кафедру. Мне сказали, что Я.С. болеет, и надо звонить ему домой. Когда я объяснил, что мне нужно, он: сказал: «Володя, график согласуй с Маратом Алексеевым, который этот вопрос знает лучше меня, а за моей подписью подойди к Саше Евсееву. Он расписывается красивее, чем я». При этом Марату и Саше были даны соответствующие команды.

ПОЧЕТНЫЙ УЧИТЕЛЬ Я.С. ШИФРИН НА ЮБИЛЕЯХ ВЫПУСКНИКОВ АКАДЕМИИ

Кафедра АФУ и РРВ преподавала слушателям всех факультетов. Я.С. сам проводил много занятий, и почти все слушатели его знали. Он высокообразован, интеллигентен, музыкален. Любит и хорошо поет русские и украинские песни. Быстро ориентируется в любых компаниях, не выделяясь в их среде. С уважением относился к слушателям, которые отвечали ему тем же. Поэтому выпускники всегда были рады видеть его на своих юбилейных встречах. Расскажу об одной из таких встреч выпускников 1958 г. в связи с 50-летием их выпуска из АРТА. Это было в мае 2008 г. Нас, выпускников, было уже мало: время берет свое. Из бывших наших преподавателей, кроме Я.С., на встречу пришли Е.С. Егоров, кандидат наук, доцент, который вел у нас занятия по курсу «Индикаторные устройства», а также Б.В. Найденков, кандидат наук, доцент, проводивший у нас занятия по курсу ТОРЛ.

Вначале мы минутой молчания почтили тех, кого не стало, и выпили за них. Затем слово предоставили Почетному Учителю Я.С. Шифрину, который от себя и от имени других преподавателей тепло поздравил нас с 50-летием выпуска и пожелал здоровья и дальнейших таких же встреч. Вспомнил он и о лучшем из начальников акаде-

мии маршале артиллерии Юрии Павловиче Бажанове.

После этого каждый из нас рассказал и об основных изменениях в своей жизни и предложил тост на ту или иную тему.



Я.С. поздравляет выпускников 1958 г.

Затем мы попросили Я.С. спеть несколько песен, начав, конечно с «Гимна адъюнктов». После «Гимна адъюнктов» он спел еще несколько песен, некоторые из которых периода войны.

В соседнем зале собрались выпускники 1968 г., к обучению которых «приложили» руку и некоторые из нас, выпускников 1958 г. (Д. Алексеичев, Г. Богословский, В.И., Г. Мурзин, Л. Раскин, В. Строков, В. Ярушек). Среди наших учеников были доктора наук и профессора А.И. Стрелков, А.И. Николаев, Б.В. Храбростин, кандидат наук и доцент Б.С. Пырин. По докторским диссертациям Николаева и Храбростина я руководил разработкой и оформлением технических предложений.



Выпускники 1968 г. с преподавателями (слева направо): А.И. Николаев, Б.С.Пырин, Б.В. Храбростин, В.И., А.И. Стрелков, Я.С.

Я.С. ШИФРИН В ХНУРЭ

С сентября 1980 г. и до сих пор Я.С. работает в ХИРЭ (ХНУРЭ), без малого уже 30 лет. Перед его приходом кафедра антенн была почему-то расформирована, а читавшиеся на ней учебные дисциплины переданы на кафедру радиоизмерений. Новых учебников по этим дисциплинам в библиотеке было недостаточно. Структура курса антенн была устаревшей. Естественно, что Я.С. пришлось взяться за наведение порядка по всем электродинамическим учебным дисциплинам. За короткое время были скорректированы про-

граммы всех электродинамических курсов, разработаны ряд новых учебных пособий, приняты кардинальные меры по обновлению содержания лабораторных работ и материальной базы лаборатории, обеспечению ее новой измерительной аппаратурой и типовыми элементами современных АФУ. По просьбе Я.С., из библиотеки Минского высшего инженерного зенитно-ракетного училища (МВИЗРУ) в библиотеку ХИРЭ было передано около 250 экземпляров его учебника «Антенны», а из библиотеки ВИРТА — большое количество другой современной литературы и нескольких десятков экземпляров монографии Я.С. по СТА [7].

Наряду с работой по наведению порядка в учебном процессе, Я.С. активно включился и в работу по подготовке научных кадров. Картина здесь была довольно печальной. На всем радиофакультете был лишь один доктор наук — Б.Л. Кашеев. И это при том, что у него был хорошо оснащенный полигон под Харьковом по исследованию метеоров. На факультете было еще несколько групп, занимавшихся разными интересными НИР под руководством М.Ф. Лагутина, И.Н. Преснякова, Е.Г. Прошкина, В.А. Омельченко и др. Но и в этих группах докторов наук не было. Что же касается антенной группы, то почти все члены ее, пройдя аспирантуру или ряд лет соискательства, диссертацию так и не защитили. Я.С. внимательно разобрался с каждым из должников и наметил пути завершения диссертаций и организации их защиты. Примерно за три года кафедральные завалы были ликвидированы. Кандидатские диссертации защитили 6 сотрудников: А.И. Лучанинов, П.Л. Токарский, С.Н. Сакало, И.А. Гладкоскок, А.А. Щербина, А.С. Посохов.

С помощью Я.С. начались и защиты докторских диссертаций (Е.Г. Прошкин, М.Ф. Лагутин, В.А. Омельченко и др.). На совещании ректор института В.В. Свиридов по этому поводу заметил: «С приходом Якова Соломоновича Шифрина на радиофакультете начались защиты докторских диссертаций».

Оживилась и наука в антенной группе. Для начала Я.С. прочел цикл лекций по СТА и организовал группу для выполнения хоздоговорной работы по СТА, заданной Радиотехническим институтом (РТИ) АН СССР. По отзыву заказчика работы, начальника отдела РТИ Д.С. Конторова, заданная работа была выполнена на высоком уровне.

Наряду с организацией исследований по СТА, Я.С. решил разобраться с наукой, которая проводилась на кафедре до его прихода. Наиболее интересными из них, по его мнению, оказались работы, проводимые А.И. Лучаниновым и В.М. Шокало по активным антеннам и по ректеннам для беспроводных линий передачи энергии СВЧ-лучом. Изучив эти работы, Я.С. предложил существенно повысить уровень, объем и цели исследований. Так родилось новое научное направление «Антенны с нелинейными элементами» (АНЭ). Я.С. решил активно подключиться к исследованиям в этом направлении и, более того, взять на себя руководство ими [12].

К началу 90-х гг. Я.С. уже «освоился» в ХИРЭ в должной мере и поставил вопрос перед ректором о восстановлении в институте электродинамической кафедры. И в 1991 г. в институте появилась кафедра технической электродинамики и антенн (ТЭА), которую Яков Соломонович и возглавлял до 1996 г.

Распад СССР побудил Я.С. создать в 1991 г. республиканский антенный семинар, на базе которого в 1993 г. была создана Украинская Национальная ассоциация «Антенны». Целью ее было объединение антенщиков Украины, выяснение ее антенного потенциала и интеграция украинской науки в мировую. Последнему способствовало также создание в 1995 г. Восточно-Украинского и позднее, в 2000 г., Харьковского отделений Международного общества радиоинженеров. В 1995 г. Я.С. инициировал проведение в Украине Международных антенных конференций, а в 2002 г. дополнительно и конференций по сверхширокополосным сигналам. К настоящему времени проведено уже 11 конференций. В них участвовали ученые Украины, РФ, США, Японии, Германии, Франции, Нидерландов, Польши, Китая, Индии, Италии и др. Труды конференций издаются на английском языке, что увеличило круг их потребителей.

Я был членом докторского ученого Совета в ХИРЭ по двум радиотехническим специальностям и приказами МОН Украины неоднократно назначался председателем ГЭК по приему защит дипломных проектов и дипломных работ студентов очного и заочного обучения. Даже по тематике и характеру дипломных работ чувствовалось развитие науки на радиотехническом факультете.

Осенью 1996 г. Я.С. по возрасту перешел с должности заведующего кафедрой на должность профессора-консультанта. Появилось больше времени для занятия наукой, что позволило опубликовать серию научных трудов по обобщению выполненных до этого исследований по СТА [10, 11] и по АНЭ [13–15]. В этот же период Я.С. (совместно с его учеником У.Р. Лиепином) выполнил цикл исследований по разработке новых методов диагностики ФАР, результаты которых обобщены в [16]. Эти исследования определяют четвертое научное направление в деятельности Я.С. Параллельно шла и работа по руководству докторантами. Докторские диссертации защитили В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, Г.И. Чурюмов. У первых двух я был оппонентом. В последующие годы защитились В.В. Должиков, А.Ю. Панченко, П.Л. Токарский, В.М. Карташов.

Несколько слов о зарубежных поездках Я.С. Поездок этих было немало. По его подсчетам, он выступал раз 50 в двух десятках стран. Основная тематика его докладов и лекций относилась к СТА, теории АНЭ, новым методам диагностики ФАР, а также касалась вопросов фундаментальности инженерного образования. При этом, выезжая в разные страны для участия в научных конференциях или чтения лекций, Я.С. старался ознакомиться с природой, бытом, архитектурой и разными достопримечательностями в этих странах. Для этого он просил организаторов его поездки зарезерви-

ровать несколько дополнительных дней. В эти дни он пешком вышагивал по 10–12 км, считая, что только так можно узнать тот или иной город. Рассказывать о том, что Я.С. смог увидеть в этих поездках, в данной статье нет необходимости. Хочу лишь привести два любопытных примера.

Будучи в Великобритании, Я.С. не упустил возможности постоять с обеих сторон Гринвичского меридиана, то бишь постоять сразу в двух полушариях Земли. А будучи в Германии, он сфотографировался у памятника немецкому писателю и философу XVIII в. Г.Э. Лессингу, который выступал против феодальной идеологии и религиозной нетерпимости. Известную пьесу Лессинга «Мудрый Натан» он знал еще по школе.



Я.С. по обе стороны Гринвичского меридиана, г. Лондон, 1997 г.



Я.С. у памятника Г.Э. Лессингу, Германия, г. Брауншвейг, 1997 г.

О способностях Я.С. исполнять русские и украинские песни уже говорилось. Пел он и в дальнем зарубежье. Так, в апреле 2002 г. в швейцарском г. Давосе на международной конференции он встретился с моим другом, лауреатом Госпремии Украины, Заслуженным деятелем науки УССР, доктором наук, профессором Б.И. Макаренко, тоже любившим и умевшим петь разные песни. После подведения оргкомитетом итогов конференции и фуршета они по пути в гостиницу запели свои песни. Окна домов были темными. Затем они засветились, начали открываться, и прозвучали недовольные голоса. Когда же профессора допели украинскую мелодичную песню, послышались аплодисменты. Одобренные этим, как рассказывал мне Б.И. Макаренко, они допели весь свой репертуар и “сорвали” уже более плотные аплодисменты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Слова, приводимые мною ниже, не являются обычной формальностью в адрес юбиляра. Я действительно считаю за честь и подарок судьбы, что мне удалось длительное время общаться с Я.С. и учиться у него нормальным человеческим взаимоотношениям с окружающими и тому, как можно получать удовольствие, если удастся помочь хорошим людям. От всей души и с глубо-

ким уважением поздравляю **Якова Соломоновича Шифрина с 90-летним юбилеем!** Желаю здоровья, дальнейших творческих успехов и очередных плодотворных идей!

Литература

- [1] *Тоньшин Е.Д., Челпанов А.С.* Академии имени Говорова Л.А. 50 лет. Исторический очерк. / Под ред. В.К. Стрельникова. — Харьков: МО СССР, ВИРТА ПВО, 1990. — 267 с.
- [2] *Шифрин Я. С.* Как мы жили. — Харьков: ИПП “Контраст”, 2004. 512 с.
- [3] *Кузнецов В.И.* Первые “aborигены науки” АРТА. / Разовая юбилейная газета к 50-летию академии им. Говорова Л.А. — Харьков: ВИРТА ПВО, май 1991 г.
- [4] *Шифрин Я.С., Черный Ф.Б., Тихомиров Ю.А., Тарасов В.А., Трашков П.С.* Экспериментальное исследование ДТР ультракоротких радиоволн. Монография. / Под ред. Я.С. Шифрина. — Харьков: АРТА СА, 1964. 103 с.
- [5] ДТР ультракоротких волн /Под ред. Б.А. Введенского, М.А. Колосова, А.И. Калинина, Я.С. Шифрина. Монография. — М.: Сов. радио, 1965. 416 с.
- [6] *Шифрин Я.С.* Статистика поля линейной антенны. Монография. — Харьков: АРТА, 1962. 118 с.
- [7] *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. Монография. — М.: Сов. радио, 1970. 384 с. *Shifrin Y.S.* Statistical Antenna Theory. — Golem Press, 1971, 370 p.
- [8] *Шифрин Я.С. Усин В.А.* Основы статистической теории голографического метода определения параметров антенн в ближней зоне. — В кн. “Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне” /Под ред. Л.Д. Бахраха. — Л.: Наука, 1985. Гл. 5. 52 с.
- [9] *Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г.* Статистический синтез антенн. — В кн. “Проблемы антенной техники” / Под ред. Л.Д. Бахраха и Д.И. Воскресенского. — М.: Радио и связь, 1989. Гл. 13. 22 с.
- [10] *Шифрин Я.С.* Статистическая теория антенн. В кн. “Справочник по антенной технике”. /Под ред. Я.Н. Фельда и Е.Г. Зелкина. — М.: ИПРЖР. Т. 1, 1997. Гл. 9. 57 с.
- [11] *Shifrin Y.S.* Statistical Antenna Theory (Theory Foundations, State-of-the-Art, Basic Applications). // Telecommunications and Radio Engineering. — 2001. V. 55, № 6–7, pp. 1–67.
- [12] *Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Шокало В.М.* Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем. Монография. — Харьков: Деп. в УкрНИИТИ, 31.09.89, № 942, — Ук89, 1989. 182 с.
- [13] *Шифрин Я.С., Лучанинов А.И.* Антенны с нелинейными элементами. В кн. “Справочник по антенной технике”. /Под ред. Я.Н. Фельда и Е.Г. Зелкина. — М.: ИПРЖР. Т. 1. 1997. Гл. 10. 31 с.
- [14] *Шифрин Я.С., Шокало В.М., Лучанинов А.И., Коновальцев А.А., Грецих Д.В., Омаров М.А.* Исследования по беспроводной передаче энергии в ХНУРЭ. //Сб. материалов Международного радиоэлектронного Форума МРФ-2002. Ч.1. — Харьков: ХНУРЭ, АН ПРЭ, 2002. С. 236-239.
- [15] *Шифрин Я.С., Лучанинов А.И.* Математическая модель антенны с сосредоточенными нелинейными элементами. // Успехи современной радиоэлектроники, 2007, № 9. С.3-21.
- [16] *Шифрин Я.С., Воронин Е.Н., Лиепинь У.Р.* Диагностика фазированных антенных решеток. В кн. “Активные фазированные антенные решетки. /Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. 2004. Гл. 13. 40 с.

VIVAT PROFESSORE

(к 90-летию профессора Якова Соломоновича Шифрина)

Н.Н. ГОРОБЕЦ

Известие о предстоящей публикации специального выпуска журнала «Прикладная радиоэлектроника» в честь 90-летия Якова Соломоновича Шифрина вызвало у меня двойные чувства. С одной стороны, конечно, большое желание принять в этом активное участие. А с другой — определенную растерянность: так глубоко мое уважение к этому человеку и так велика благодарность судьбе за то, что я имел возможность близко общаться с ним, что писать как-то, кроме как в превосходных степенях, совершенно не представляется возможным. А это как-то неловко. Однако потом я подумал: пройдет еще лет двадцать – тридцать, и найдется так много «лучших друзей», «последователей», «учеников» и, конечно, людей, «помогавших ему в работе», и прочих самозванцев, что через эти ряды будет невозможно пробиться. Действительно, лучше сейчас рассказать хоть небольшую часть того, чем я обязан и за что благодарен Якову Соломоновичу. Такие люди, как он, чаще всего не помнят большей части того добра, которое они сделали для людей.

Впервые я познакомился с Яковом Соломоновичем заочно. В 1964 г. мой научный руководитель по аспирантуре — Юрий Васильевич Шубарин — принес в лабораторию автореферат докторской диссертации Якова Соломоновича и посоветовал мне его старательно изучить, сопроводив этот совет словами, что это — образец того, как надо выбирать научное направление, как проводить исследования и как их представлять. И действительно, фундаментальная работа Я.С.Шифрина по статистической теории антенн (СТА), составлявшая сущность его докторской диссертации, была уже тогда остро актуальна в связи с разработкой крупных антенн для радиотехнических систем обнаружения космических объектов и обеспечения надежной радиосвязи с ними. С тех пор прошло более 40 лет, однако актуальность СТА только усилилась. Во-первых, в связи с все повышающимися требованиями к характеристикам антенн. Так, требования к уровню бокового излучения антенны порядка — 60 дБ (а уровень этот определяется методами СТА) стали

почти «повседневными». Второй причиной повышенного интереса к СТА является активное освоение все более и более коротких волн (миллиметровых, субмиллиметровых и т.д.), при которых влияние всякого рода случайностей на параметры антенн усиливается. Такому подходу к выбору направления исследований я, как заведующий кафедрой, и старался следовать.

Вообще для нашей кафедры Яков Соломонович был «крестным отцом»: Юрий Васильевич очень рано ушел от нас, мы остались без руководителя. Так вот — ни одна диссертация, ни одна серьезная работа не вышла из стен нашей кафедры без поддержки, советов и «благословения» Якова Соломоновича: для кого-то он был официальным оппонентом, для кого-то — ведущей организацией, рецензентом, редактором, и для всех — добрым советчиком и доброжелательным, но непогрешимым судьей.

О Якове Соломоновиче — ученом, о его роли в становлении антенной теории и техники и личностей многих-многих его коллег и учеников как ученых даже в этом сборнике, я уверен, сказано уже немало, и сказано достойно. И в моей жизни, как я уже сказал, как наставник он сыграл огромную роль, за что, конечно, я ему глубоко благодарен. Но сейчас я хочу поговорить о другом. А именно — о высокой нравственной составляющей влияния на окружающих этого бесконечно мудрого и интеллигентного человека.

«Корифей, столп» — юбилей Якова Соломоновича как раз тот случай, когда «высокопарных слов не надо опасаться». Но все это многожды говорилось в адрес Якова Соломоновича до меня, многожды скажут и после. А вот «опора, поддержка» — это не так часто приходится слышать. Тем не менее, любой из его знакомых, читающий эти строки, если хорошенько пороется в памяти, вспомнит (а многим это дастся и без всяких усилий), как именно Яков Соломонович помог ему в сложной ситуации или в трудный момент, причем палитра его помощи людям самого широкого спектра: от вовремя данного мудрого совета до самого энергичного вмешательства в нужное время в некий процесс. При том ни тени дешевого альтруизма или, тем более, желания заработать на этом какие-то моральные дивиденды в этой помощи никогда не просматривается — чувствуется, что всегда его желание помочь (и реализация его!) продиктовано глубокой доброжелательностью, взвешивается на весах чести и справедливости.

Вот только один из множества примеров. В 1974 г., когда тогдашнее руководство Харьковского государственного университета им. А. М. Горького вознамерилось реорганизовать радиофизический факультет путем слияния кафедр, мы стояли перед перспективой фактического упразднения кафедры как таковой (тогда она называлась кафедрой электрорадиотехники). Я, тогда молодой и не очень опытный заведующий кафедрой, пришел с этой бедой к Якову Соломоновичу. Он вни-

мательно выслушал меня и с хитринкой в глазах сказал: «Ну что ж, реорганизация — дело доброе, полезное. Реорганизуем свою кафедру в кафедру прикладной электродинамики». Так родилось название нашей кафедры — первой в СССР. Но советом дело не ограничилось. Яков Соломонович поехал в Москву, привез два авторитетных письма член-корей АН СССР А. А. Пистолькорса и Л. Д. Бахраха, в которых высоко оценивалась наука, проводимая на нашей кафедре. Далее он через своего хорошего знакомого Б. В. Бойко, занимавшего в то время в Киеве весьма значимую должность председателя комиссии прикладных проблем при АН Украины, организовал мне прием у одного из заместителей Министра науки и образования Украины. Результатом этой беседы и писем А. А. Пистолькорса и Л. Д. Бахраха было решение Министерства о сохранении нашей кафедры с новым названием, о чем я писал выше. Такое не забывается.

Общеизвестно, что, трактуя действия других, человек тем самым рассказывает о себе. Все, наверное, читали мемуары Якова Соломоновича. Кто не обратил внимания на то, о чем я хочу сейчас сказать, взгляните еще раз, под новым углом зрения. В книге рассказывается о множестве людей (с которыми ему по жизни приходилось встречаться) и их поступках. Все мы знаем, как сложна жизнь, и какие разные мотивы движут в различных ситуациях людьми. Так вот что характерно: всем упомянутым в воспоминаниях Якова Соломоновича словам и поступкам людей он дает трактовку, самую высокую с нравственной точки зрения из всех возможных. Для меня лично это является безусловным свидетельством его собственной, личной высочайшей нравственности, которая неразрывно связана с высокой интеллигентностью и неповторимым «питерским» шармом Якова Соломоновича.

В общении с Яковым Соломоновичем у меня был, на первый взгляд, мелкий, не важный случай, который, тем не менее, дал мне возможность многое понять в нем. Как-то, желая познакомиться с одним человеком, я решил навестить у Якова Соломоновича справки: что это за человек, чем дышит, «на какой козе к нему подъезжать». Представьте себе, мне даже пришлось улыбнуться про себя, подивиться «наивности» такого умудренного опытом человека. Как будто объявляя, что это — золото высшей пробы, Яков Соломонович сказал об этом человеке: «Как — что за человек? Он — бывший офицер!». Кто бы и как бы не рассказывал, как высоко несет Я. С. Шифрин честь офицера, больше, чем этой короткой его фразой, на мой взгляд, и не скажешь.

Мне очень импонирует та легкая, едва уловимая, не подчеркиваемая самоирония, с которой он на юбилеях принимает дифирамбы в свой адрес. Понятно, что весь его жизненный опыт, его энциклопедические знания не дают ему возможности недооценивать себя. Но такая трогательная просматривается скромность в его реакции на

оценку его заслуг, что не возникает ни малейшего сомнения в ее абсолютной органичности для этого человека.

Покоряет какое-то негромкое, «изящное» жизнелюбие Якова Соломоновича — без малейшего намека ни на сибаритство, ни на «брызги шампанского», но в то же время заставляющее всех окружающих почувствовать вкус к жизни, или, по крайней мере, понять, что уж для кого, для кого, а для этого человека — жизнь многокрасочна и увлекательна.

Но самое главное в жизни Якова Соломоновича — и это видно невооруженным глазом — это,

конечно, его служение науке. «Жизнь — науке, честь — никому» (если перефразировать известный девиз тоже, кстати, питерской писательницы) — это, по-моему, именно о нем. Но и здесь он не работает «в кубышку», «на список трудов». Огромные усилия, массу времени и организаторского таланта тратит Яков Соломонович на создание предпосылок успехов других ученых в области антенной теории и техники. Тут и антенная ассоциация, тут и его знаменитое «биеннале» — конференции в разных городах Украины, которые получили мировое признание.

МОЙ МНОГОЛЕТНИЙ ДРУГ — ЯКОВ СОЛОМОНОВИЧ ШИФРИН

В.А. ГРАБИНА

23 апреля 2010 года мой многолетний друг и товарищ Яков Соломонович Шифрин (для меня просто Яша), отмечает свое 90-летие. Столь серьезная дата вызывает приятное удивление у всех, кто сегодня сталкивается с юбиларом. Его активности по-прежнему можно позавидовать. Так, совсем недавно, в августе 2009 г., он выступал с докладом на крупной международной конференции в Москве, а затем совместно со своей спутницей по жизни Ноной Григорьевной Максимовой отправился в родной Питер, дабы достойно принять своего китайского друга, крупного ученого Вен Шун Цана, тепло принимавшего его и Н.Г. в Китае в 2003 г. А до того, в первой половине 2009 г., они с Ноной сумели преодолеть массу бюрократических преград на пути организации визита Вен Шуна и его жены в Россию и Украину. В течение недели Яша с юношеским пылом знакомил своих китайских друзей с любимым нами обоими Санкт-Петербургом и его красивейшими окрестностями (гг. Пушкиным и Петергофом). Не прошло и месяца после возвращения из Питера, а Я.С. снова в пути. На сей раз, он едет во Львов, где руководит работой очередной (уже седьмой по счету) международной антенной конференцией. Добавим к этому три написанные им в 2009 году статьи. В голове у юбиляра сейчас новые статьи и заботы об очередной конференции по сверхширокополосным сигналам, запланированной на сентябрь 2010 г.

И все же юбилей есть юбилей и тем более такой весомый. Это более чем достаточный повод, для того чтобы хоть в небольшой мере оживить воспоминания о нашей многолетней дружбе с юбиляром, начало которой восходит еще к нашим особенно дорогим студенческим годам.

Впервые с Яшей мы встретились в далеком 1937 году как студенты первой группы первого курса физического факультета Ленинградского университета. Попав в эту группу, я почти сразу установил, что в ней имеется очень симпатичное и дружное ядро из пяти человек (Нина Калинина, Ира Лебедева, Вика Филиппович, Яша Шиф-

рин, а главное, Олечка Минович), пришедших на физфак из одного класса 1-й образцовой школы Октябрьского района г. Ленинграда. Эта старейшая в городе школа, которая и до революции, и в настоящее время называется Второй Санкт-Петербургской гимназией им. Александра I, всегда была, да и сейчас является одной из лучших, элитных гимназий Санкт-Петербурга. Неслучайно ее учениками были дети А.С.Пушкина (Александр и Григорий), будущий канцлер России А.М. Горчаков, поэт Петр Вяземский, известный юрист А.Ф. Кони, известнейший дирижер Е.А.Мравинский, основатель Ленинградского ТЮЗа А.А.Брянцев, выдающийся ученый А.А.Фридман и другие знаменитые и выдающиеся личности. О многих из них рассказывается в школьном музее. Кстати, на одном из музейных стендов и в книге, изданной к 190-летию гимназии, среди лучших выпускников школы 30-х годов есть и Яшино имя, как Заслуженного деятеля науки и техники Украины и президента Украинской национальной ассоциации «Антенны». В этой школе работали замечательные учителя, о которых Яша очень тепло вспоминает в своей книге «Как мы жили». Судя по тому, что он пишет, это были широко образованные, высококультурные люди. Некоторые из них занимали высокие должности в вузах и НИИ Ленинграда и, вместе с тем, работали в школе, считая своим долгом передать своим ученикам все лучшее не только в той области знаний, которую они преподавали, но и старались привить им любовь к литературе, музыке и искусству, на протяжении многих лет читая по вечерам дополнительные лекции по истории мировой культуры для школьников старших классов. Видимо, благодаря таким учителям и особому духу, царившему в школе, симпатичная пятерка из этой школы выделялась в нашей группе своей образованностью и крепкой дружбой. Несомненным лидером в этой пятерке был Яша. Его привязанность к родной школе и признательность учителям с годами не ослабла: вот уже на протяжении более 70 лет он поддерживает с ней связь. В последние пятнад-

цать лет эта связь даже окрепла благодаря тому, что директором гимназии стала Людмила Маратовна Мардер, по образованию физик, которая оказалась ученицей (по Ленинградскому педагогическому институту им. А.И. Герцена) старшего брата Якова Соломоновича Ф.Ш. Шифрина. Так, по ее приглашению, в 2005 г. Я.С. вместе с Ноной Григорьевной Максимовой стали участниками широко отмечавшегося 200-летия гимназии. На торжественной церемонии Яков Соломонович предложил соорудить во дворе гимназии памятник с надписью «Учителям петербургских гимназий от благодарных учеников», подкрепив это предложение начальным взносом. По непонятным для нас причинам эта идея, к сожалению, реализована не была (вроде бы городские власти не дали согласия). Невольно, однако, задумаешься: много ли мы знаем примеров такой глубокой признательности к своей родной школе, к тем, кто нас учил и воспитывал?

После этого отступления вернусь к первым дням нашего физфаковского знакомства. После всего сказанного выше неудивительно, что я сразу же влился в эту группу. Нашим общим другом на многие годы стал и Густав Наан — человек очень необычайной судьбы. Подробнее о нем пишет Я.С. в своей книге «Как мы жили». Замечу здесь лишь то, что впоследствии Г.И. Наан стал крупным философом, вице-президентом Эстонской Академии наук.

Жизнь на физфаке была очень интересной и напряженной. На первом плане была, конечно, учеба. Да и грех было плохо учиться у таких преподавателей, как академик В.А. Фок, академик В.И. Смирнов, чл.-кор. АН С.Э. Фриш, Т.П. Кравец и др. Упражнения тоже вели талантливые молодые люди — будущие доктора и профессора. Яша учился прекрасно. За все время обучения он получил лишь одну четверку — по истории КПСС. Преподаватель этой науки некто Кудрявцев был весьма одиозной личностью. Он, например, считал, что если человек не прослушал его лекции, то, как бы он не отвечал на экзамене, пятерки он не достоин. А Яша из-за тяжелой болезни пропустил почти целый семестр, включая и лекции «классика» Кудрявцева, вот его оценка и была предопределена. А в целом отличная Яшина учеба была отмечена тем, что на третьем курсе он был удостоен Сталинской стипендии, установленной в 1939 г. в связи с 60-летием со дня рождения И.В. Сталина. Таких стипендий на весь физфак, где учились более пяти сот студентов, было выделено всего две. Сегодня я могу сказать, что, помимо исключительно ответственного отношения Яши к учебе, сработали, по-видимому, и гены: большими способностями отличались и старшие братья Яши, тоже учившиеся на физфаке — это Фридрих (1915 г. рождения), о котором я уже говорил, и Кусиель (1918 г. рождения). Кусиель Соломонович Шифрин, ставший впоследствии ученым с мировым именем, в год нашего поступления в университет был уже студентом третьего курса одновременно

и на физическом и математико-механическом факультетах. Пройдет немного лет, и он закончит аспирантуру у крупного физика Я.И. Френкеля, в 30 с небольшим лет защитит докторскую диссертацию и станет одним из ведущих физиков-теоретиков Ленинграда. Между братьями были не только естественные теплые родственные отношения, но и, что хочется особо подчеркнуть, большая дружба. Одним из ярких ее проявлений были те огромные усилия, которые Яша затратил на организацию 90-летнего юбилея Кусиеля. К этой дате он подготовил к изданию юбилейный выпуск журнала «Успехи современной радиоэлектроники», сделал все, чтобы были опубликованы персоналии о юбиларе в восьми авторитетнейших журналах, (в том числе и за рубежом), издал книгу «Кусиель Соломонович Шифрин. Ученый, Учитель и Человек», составителем и редактором которой он был.

Физфаковская студенческая жизнь далеко не ограничивалась учебой. На факультете ключом кипела и общественная жизнь. Размах ее существенно превышал то, что делается в вузах в настоящее время. Осенью 1939 г. Яшу избрали в состав профкома, а через год он стал председателем профкома факультета. Это произошло вполне закономерно, ибо по своей природе Яша — человек очень активный. Его любовь к общественной и организаторской деятельности красной нитью проходит через всю его жизнь, начиная от пионерских дел в детстве, командирских должностей в армии, тридцатилетнего заведования кафедрами в разных вузах и заканчивая той огромной работой, которую он добровольно взвалил на себя за последние двадцать лет по организации антенной науки в независимой Украине. А в тот период, о котором сейчас идет речь, т.е. в 1939–1941 гг., когда Яша активно участвовал в работе студенческого профкома, мне довелось работать в комитете комсомола физфака, а в последний предвоенный год я был секретарем этого комитета. Чем только не занимались студенческий профком и комитет комсомола факультета! Работали мы дружно, в тесном контакте. Довольно много времени занимало у нас рассмотрение вопросов помощи студентам, распределение путевок в дома отдыха, субсидии туристам, разовая материальная помощь студентам и т.д. и т.п. И, как это ни странно, такие возможности (не в пример нынешним временам) у общественных организаций были, хотя страна наша в то время была очень небогатой.

Завершая рассказ о наших совместных студенческих годах, не могу не коснуться дел туристических. В те годы туризм и альпинизм были очень популярны среди студентов ЛГУ. Естественно, это затронуло и нас. В начале 1939 г. мы начали подготовку к путешествию по Сванетии — очень красивому и непростому для туристов уголку Кавказа. Была сформирована группа из пяти человек, в которую, кроме нас с Яшей, вошли еще три студента из нашей группы. Неожиданно, однако, планы наши изменились. Один из опытейших туристов физфака, студент пятого курса Саша Андрианов

уговорил нас на путешествие по рекам и озерам Кольского полуострова. Этот замечательный сорокадневный лодочный турпоход запомнился всем его участникам на всю жизнь. Основная часть нашего маршрута проходила по местам, куда не только туристы никогда не доходили, но где и местные жители бывали весьма редко. Поэтому на нас были возложены и научные задачи уточнения некоторых географических деталей. (Об этом Саша позднее докладывал во Всероссийском географическом обществе, расположенном тогда в Ленинграде.) Поскольку этот наш маршрут был пройден впервые, то это добавило к его категории сложности дополнительный балл. В результате в 1939 г. на весь Ленинград наш маршрут оказался единственным маршрутом пятой (наивысшей) категории сложности. О том, как он проходил, Саша Андрианов написал в своей статье «Реками Заполярья», опубликованной в журнале «На суше и на море» №5, 1940 г. Почти сорок дней мы были оторваны от цивилизации. Назад в Ленинград мы возвращались через Архангельск и Вологду, и, когда 24 августа купили в Вологде газеты, то первое, что бросилось нам в глаза, — это была информация о «нашей дружбе» с немцами (заключение пакта о ненападении между СССР и Германией). Смута, которую породила эта информация в наших головах, продолжалась до 22 июня 1941 г.

В начале войны, где-то в конце июня Яша возглавил комиссию по набору студентов трех факультетов ЛГУ в Ленинградскую армию народного ополчения (ЛАНО). За три дня эта работа была успешно завершена, и в первых числах июля комиссия вместе с другими ушла в ряды Василеостровской дивизии ЛАНО. Там же в первом полку этой дивизии оказался и я, попав туда после десяти дней, проведенных на оборонительных работах под Ленинградом¹. Разместили нас в Академии художеств на набережной Невы. Оттуда нас ежедневно водили строем на остров Голодай, где нам старались привить элементы воинской науки. И так продолжалось недели две. Числа 14-го июля нас неожиданно построили в большом зале Академии художеств и скомандовали: «Студенты старших курсов технических вузов и физмат факультетов университета — два шага вперед!». Естественно, и Яша, и я в числе других выполнили эту команду. Привезли нас всех на Среднюю Рогатку в помещение Военно-воздушной академии им. Можайского. И здесь мы узнали, что, оказывается, вышел приказ Сталина об откомандировании из ополчения студентов старших курсов технических вузов и направлении их в военные училища и академии. В академии нас переделали, и мы стали слушателями Можайки. Академия в это время готовилась к эвакуации, и нас, новоиспеченных слушателей, подключили к этой работе. Через несколько дней я неожиданно узнал, что Яшу из числа слушателей академии отчислили. О

причинах этого я узнал только через много-много лет от самого Яши. Оказалось, что отчислили его за то, что у него есть дядя за границей, в Южной Африке, о чем он сам честно написал в своей анкете. С этого момента наши пути разошлись лет на двадцать. Судьбе, однако, было угодно, чтобы мы вновь встретились в начале 60-х годов в Харькове. Повстречавшись в Харькове вновь, мы не расстаемся уже около 50 лет. И связывает нас не только рожденная в ЛГУ дружба, но и многие другие нити — общие друзья нашей ленинградской юности, близость научных интересов, общий круг харьковских знакомых (радиостов и генетиков), и общая любовь к путешествиям. Так, в 1970 г., ностальгически вспомнив наше «кольское путешествие» 1939 года, мы решили отправиться вдвоем на озеро Байкал и в Бурятию. Но теперь мы были уже далеко не студентами, и поехали туда по приглашению Бурятского филиала Сибирского отделения АН СССР, присланному Яше Чимитом Цыдыповым — первым в Бурятии доктором физ.-мат. наук, которому незадолго до этого Яша помог с докторской диссертацией. Он же встретил нас на Байкале, и мы проехали все восточное побережье Байкала, посетили Улан-Удэ, побывали в буддийских храмах и доехали до китайской границы, набравшись массы впечатлений.

С большим интересом и удовольствием на протяжении всех этих 50 лет я слежу за научными достижениями моего друга, поражаюсь его неутомимой деятельностью, направленной на развитие антенной науки в Украине. Последнее затронуло и меня, поскольку на антенных конференциях, которыми он руководит, есть и близкая мне секция, связанная с биологическим и медицинскими применениями электромагнитных волн СВЧ диапазона.

Дружба между нами уже давно переросла в дружбу семьями. На протяжении последних 10-15 лет мы собирались одной и той же дружной компанией. Это мы с моей женой Галочкой (Галиной Николаевной), Яша с Ноной (Нонной Григорьевной), и еще одна замечательная пара — Александр Семенович Сердаков и его жена Аня (Анна Дмитриевна). Саша Сердаков — тоже ленинградец и тоже закончил физфак ЛГУ, только на год раньше нас с Яшей. Он — доктор технических наук, профессор, но, главное, глубоко порядочный человек. К одному из отмечавшихся нами праздников Саша как-то написал незамысловатые стихи, в которых есть такие строчки:

Яков Соломонович, ну и я — Семенович,
Есть еще Грабина. Вот и вся дружина!

И сейчас, накануне 90-летия моего многолетнего друга и товарища я хочу от имени нас с Галей и Саши с Аней сердечно поздравить Якова Соломоновича с его замечательным юбилеем. Яша, мы все желаем тебе, прежде всего, здоровья. Именно оно даст тебе возможность и далее заниматься любимыми делами и радоваться жизни во всех ее проявлениях. Всего тебе самого-самого доброго на многие годы.

¹ С 4 июля 1941 г. эта дивизия считалась Действующей армией.

С ЮБИЛЕЕМ, ДОРОГОЙ ЯКОВ СОЛОМОНОВИЧ!

В.А.КАПЛУН

Я познакомился с Яковом Соломоновичем Шифриным в начале 60-х годов на одной из Всесоюзных антенных конференций, проводимых ежегодно Межведомственным Советом по антенной технике, созданным в конце 40-х годов незабываемым А.А. Пистолькорсом.

Ежегодные встречи специалистов в области антенн и техники СВЧ, обсуждение новых полученных ими результатов, обмен мнениями по разным вопросам способствовали тому, что участники антенных конференций достаточно быстро знакомились друг с другом, и нередко при этом их отношения становились дружескими. Тем не менее, как организаторы конференций, так и сами участники предъявляли к качеству принимаемых и заслушиваемых докладов достаточно высокие требования. Поэтому их обсуждение на заседаниях проходило хотя и доброжелательно, но в достаточно жесткой форме. Доклады и сообщения посвящались, как правило, либо результатам решения тех или иных конкретных технических задач, либо рассмотрению перспективных научных вопросов, определяющих пути дальнейшего развития теории и техники антенн и устройств СВЧ. В работе антенных конференций участвовали как молодые инженеры, так и уже известные ученые, работающие в области антенн многие годы.

Вот на одной из таких конференций мой доклад и был подвергнут критике Яковом Соломоновичем. Последующее деловое обсуждение отдельных положений моего доклада с участием Л.Д. Бахраха способствовало разрешению возникших вопросов. Этот эпизод положил начало нашему знакомству, а в дальнейшем и нашим дружеским отношениям с Яковом Соломоновичем. Попутно замечу, что через Л.Д. Бахраха, которого с Яковом Соломоновичем, уже давно связывала крепкая дружба, у многих сотрудников НИИ-17, где я тогда работал, завязались тесные отношения с антенной кафедрой Я.С. Шифрина в Военно-инженерной радиотехнической академии имени маршала Советского Союза Говорова Л.А. (Харьков).

В деловом отношении мое знакомство с Яковом Соломоновичем было для меня весьма полезным. В нем меня подкупали его серьезное, вдумчивое отношение к любым научным вопросам, возникавшим в ходе наших разговоров, его доброжелательность и четко выраженное желание помочь собеседнику в решении тех или иных задач. Несколько позднее я, по предложению Якова Соломоновича, с большим интересом познакомился с хорошо оборудованными учебными лабораториями его кафедры и даже побывал на экзамене, который он проводил по курсу антенн. Вдобавок к этому Яков Соломонович любезно подарил мне немало хорошей учебно-методической литературы, которую издавала его кафедра. Из всего этого я извлек много полезного для своей дальнейшей преподавательской деятельности.

Особенно я хотел бы здесь отметить написанный Я.С. Шифриным учебник «Антенны» (изд. ВИРТА, 1976 г.), который, на мой взгляд, является одним из лучших из многих аналогичных книг и активно используется мною и по сей день.

Вернусь к вопросу о связи антенного отдела НИИ-17 с коллективом кафедры Я.С.Шифрина. Быстрому укреплению этих связей способствовали не только дружеские отношения руководителей этих подразделений, но и множественное взаимное пересечение научных интересов. В частности, мой отдел и его кафедра решали одновременно весьма близкие электродинамические и технические задачи, применительно к радиопрозрачным обтекателям и укрытиям. Здесь стоит подчеркнуть, что, несмотря на близость решаемых нами задач, между нами не было даже элементов нездоровой конкуренции. В основе нашего сотрудничества лежали только интересы дела, желание взаимно помочь друг другу. Такое положение во многом определялось Яковом Соломоновичем, который с большим уважением и теплотой относился к А.А.Пистолькорсу и Л.Д. Бахраху. Это нашло свое отражение и в его отношении к работникам антенного отдела НИИ-17. Естественно, что и обратные отношения были соответствующими.

Сложившиеся добрые отношения и общность технических интересов позволили мне попросить Якова Соломоновича быть одним из оппонентов по моей докторской диссертации в 1966 г. Хочу, однако, подчеркнуть, что, несмотря на благожелательное отношение ко мне, Я.С. был достаточно строг и объективен при оценке моей работы. Немало состоялось бесед, и было сделано немало замечаний. Я считаю большой удачей, что в конечном итоге он положительно оценил мою работу, отметил ее высокий уровень и практическую значимость.

Со своей стороны, я несколько раз выступал оппонентом по кандидатским диссертациям аспирантов кафедры Я.С. Шифрина, а однажды я оппонировал докторскую диссертацию ученика Якова Соломоновича В.И.Замятина. Хочу отметить, что диссертации, выполненные на кафедре Я.С. Шифрина, всегда отличались высоким научным уровнем, и оппонировать их было весьма приятным делом.

Где-то в середине 70-х годов прошлого века специалисты, занимающиеся радиопрозрачными антенными обтекателями и укрытиями, в рамках Межведомственного Координационного антенного совета были выделены в отдельную секцию (№5), руководить которой поручили мне. Естественно, на меня выпала и задача периодического сбора этой секции для обмена опытом работы. Организовать подобные сборы в Москве было не легко. Поэтому я обратился к Якову Соломоновичу с просьбой организовать и провести в 1978 г.

на базе Военной инженерной радиотехнической академии (ВИРТА) в Харькове конференцию по теории и техники антенных обтекателей и укрытий. К моей радости, Яков Соломонович, несмотря на свою занятость и хлопотность этого мероприятия, согласился взяться за это нелегкое дело. Потребовалась вся его настойчивость и масса усилий, но такая конференция состоялась с числом участников около 150 человек. Отобранные доклады и сообщения вызвали большой интерес и активные обсуждения. В массе своей они были посвящены вопросам электродинамического проектирования и расчета обтекателей и укрытий, а также их конструктивным особенностям. Опубликованные труды, что также является заслугой Якова Соломоновича, нашли широкое распространение во многих заинтересованных организациях и способствовали развитию этой специфической техники.

Безусловно, и это было отмечено в решении Координационного Совета, организация данной конференции и ее успешная работа — это несомненная заслуга Я.С. Шифрина.

Через несколько лет я еще раз отважился просить Якова Соломоновича оказать мне помощь в организации аналогичной конференции на базе Высшего инженерного военного училища в г. Минске (МВИЗРУ), с которым у Якова Соломоновича были тесные связи. Ожидая законной «выволочки» за такую повторную просьбу, я был снова очень приятно удивлен и обрадован, что получил согласие и на этот раз. Так, в 1981г. была проведена на базе МВИЗРУ и Белгосуниверситета очередная Всесоюзная конференция, посвященная обтекателям и укрытиям. Доклады и сообщения, а также их обсуждения, как и в прошлый раз, вызвали большой интерес. Опубликованные результаты разошлись по многим заинтересованным организациям. Я хочу специально подчеркнуть роль Якова Соломоновича в организации и этой конференции. Этот факт еще раз характеризует Я.С. Шифрина как активного, передового ученого, стремящегося возможно шире пропагандировать научные достижения, полученные в разных областях теории и техники антенн. Сейчас весьма

кстати сказать об этом! Ведь именно Я.С. Шифрин после развала СССР организовал проведение достаточно широких Международных антенных конференций, которые стали преемниками «пистолькорсовских». Эти конференции с участием многих специалистов-антенщиков, даже из стран, ранее не входивших в Советский Союз, неоднократно проводились под руководством Якова Соломоновича в ряде городов Украины. Для себя я считаю большой удачей участие по приглашению Якова Соломоновича в двух таких конференциях и руководство там работой одной из секций.

В заключение конференций проводился заключительный вечер-банкет. Надо было видеть, с каким энтузиазмом все его участники приветствовали Якова Соломоновича. В этом, несомненно, проявлялось выражение благодарности Я.С.Шифрину. Это то самое малое, что могли сделать все мы — участники конференции, чтобы отметить ту огромную научно-организаторскую работу, которая была для нас проведена.

Дорогой Яков Соломонович! Я от всей души поздравляю Вас с Вашим большим юбилеем. Считаю для себя честью, что заметный отрезок моей жизни мне посчастливилось идти рядом с Вами, работать в одной области науки и пользоваться Вашими советами и неизменным расположением. Я горжусь тем, что вместе с Вами в Великую Отечественную войну участвовал в боях за нашу общую Родину и, в частности за освобождение Украины. Я всегда с удовольствием вспоминаю наши встречи — будь-то на конференциях, в стенах НИИ 17, дома у Л.Д. Бахраха или где-либо еще. Эти воспоминания вызывают у меня самые теплые чувства!

Яков Соломонович, я всегда знал, что Вы — истинный патриот науки. Ваш вклад в нее, особенно в теорию и технику антенн, очень большой. А разработка статистической теории антенн делает этот вклад бесценным и выдвигает Вас, на мой взгляд, в ряд самых известных ученых-антенщиков.

Как Ваш почитатель с более чем 50-летним стажем, хочу пожелать Вам многих лет крепкого здоровья, хорошего и бодрого настроения и оптимизма. Он ведь был всегда Вам свойственен.

ОРГАНИЗАТОР АНТЕННОЙ НАУКИ В НЕЗАВИСИМОЙ УКРАИНЕ (к юбилею Я. С. Шифрина)

В.А. КАТРИЧ, Н.Н. КОЛЧИГИН

Распад Советского Союза в начале 90-х гг. существенно изменил научную ситуацию в бывших советских республиках, ставших независимыми странами. Разрушились традиционные радиальные (через Москву) научные связи. Не стало хоздоговорных научных работ с ведущими московскими НИИ, ощутимо поддерживавшие республиканскую науку в финансовом плане. Прекратили работу разные Советы, Комитеты и даже научные конференции, на которые собирались специалисты из всего СССР для обмена научной информацией, поддержания контактов, обмена

опытом. Все это в полной мере касалось и антенной науки. Надо было что-то делать. Несомненно, что наиболее видным антенщиком в Украине в те годы был, да и сейчас является, лауреат премии им. А. С. Попова АН СССР проф. Я. С. Шифрин, создатель известной во всем мире статистической теории антенн. Как говорится, ему и сам Бог велел искать выход из сложившегося положения. И Яков Соломонович, в силу присущей ему активной жизненной позиции, с энтузиазмом взялся за это дело. По его инициативе уже в начале 1991 г. в Харькове, в Доме ученых заработал городской,

а немного позднее республиканский антенный семинар, на базе которого после длительной подготовительной работы была создана Украинская Национальная ассоциация «Антенны», объединившая более 60 организаций страны. Целью всей этой работы было объединить антенщиков Украины, разобраться с оставшимися на Украине научным «антенным» потенциалом, восстановить разорванные связи в пределах СНГ. И эти задачи были успешно решены. В 1995 г. Я. С. Шифрин создает Восточно-Украинское (с А. И. Носичем), а в 2000 г. — Харьковское отделение международного Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Эти отделения дали мощный импульс интеграции украинской антенной науки в мировую. Существенно способствовали этому и международные антенные конференции, инициированные Я. С. Шифриным в том же 1995 г. На организацию и проведение этих конференций он потратил много усилий. К настоящему времени проведены уже семь таких конференций. В 2002 г. Я. С. Шифрин инициировал еще и конференции по сверхширокополосным сигналам. В этом году будет проведена пятая конференция этого научного направления. На научные конференции съезжаются видные ученые из стран СНГ и дальнего зарубежья, многие из которых лично знакомы с Я. С. Шифриным. Важную роль в повышении авторитета украинской науки и ее интеграции в мировую сыграли многочисленные зарубежные поездки Я. С. Шифрина с выступлениями на научных конференциях и чтением лекций по разным аспектам прикладной электродинамики в различных университетах. Таких поездок было около пятидесяти, в более чем 15 стран мира.

Наряду с активной научной, научно-организационной и международной деятельностью, Я.С. Шифрин много сил и внимания уделяет и оказанию научной помощи разным вузам Украины. И здесь нам хочется остановиться подробнее на связях Я.С. Шифрина с Харьковским национальным университетом имени В.Н. Каразина. Связи эти длительные и многоплановые. Многие годы он был дружен с выдающимися учеными университета, физиками А.И. Ахизером, Я.Б. Файнбергом, Н.А. Хижняком, математиками И.В. Сухаревским и Н.С. Ландкофом, генетиком В.Г. Шахбазовым (активным сторонником Якова Соломоновича по вопросам вузовского образова-

ния) и многими другими. Многолетняя дружба связывает его и с математиками В.А. Марченко и Ю.В. Ганделем. Но, естественно, особо тесные и деловые связи у Я.С. Шифрина сложились с радиофизическим факультетом. Это сотрудничество оказалось чрезвычайно плодотворным и в научном плане, и в вопросах подготовки научных кадров. Немалое количество кандидатских и докторских диссертаций на факультете защищены при той или иной, но всегда существенной, помощи Якова Соломоновича. Ученые университета Н.Н. Колчигин и Д.Д. Иванченко получили Государственную премию Украины в области науки и техники за 2005 г. при неосценимой поддержке Я.С. Шифрина. Его неиссякаемый оптимизм и уверенность в успехе постоянно вдохновляли авторов работы.

Высоко оценивая результаты многолетнего плодотворного сотрудничества Я. С. Шифрина с учеными университета, Ученый совет университета присвоил ему звание Почетного доктора Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

В последнее время университет стал местом базирования Харьковского отделения IEEE. Кафедры теоретической радиофизики и прикладной электродинамики университета взяли на себя также работу по организации ежегодных научных конференций, инициированных Яковом Соломоновичем. В решении этих вопросов, чрезвычайно важных для дальнейшего развития украинской электродинамической науки, Яков Соломонович оказал и продолжает оказывать нам огромную помощь.

Я. С. Шифрин пользуется огромным уважением коллег и учеников. Нас всегда поражает его неиссякаемая жизненная энергия, способность работать с утра и до позднего вечера, помнить обо всех и о каждом и при этом сохранять бодрость духа и хорошее настроение. В восхищение приводит его чуткость, внимательное отношение к коллегам, трепетное отношение к молодежи. По его предложению в рамках международных конференций были организованы школы для молодых ученых, а также, совместно с EuMA, гранты и премии для поддержки работ студентов и аспирантов.

Для нас он всегда служит примером в отношении к науке, к жизни и к людям.

АНТЕННИЩИКИ «АЛМАЗА» — Я.С. ШИФРИНУ

В.А. КАШИН

Мое первое знакомство с Яковом Соломоновичем Шифриным было заочным и состоялось в начале 60-х годов, когда я начал работать молодым специалистом в антенном подразделении КБ-1 (сегодня это ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»). Именно тогда появилась в технической библиотеке нашего предприятия книга Якова Соломоновича «Статистика поля линейной антенны» (издательство АРТА, 1962г.).

Эта книга, впоследствии ставшая фактически учебником для специалистов, позволила антенщикам перейти от уровня интуитивных требований на точность изготовления антенн и их узлов к обоснованным оценкам влияния конструктивных допусков на электродинамические характеристики антенных устройств.

Антеннщики «Алмаза» сразу поняли, что значение разработанной в книге Я.С.Шифрина ме-

тодологии выходит за рамки рассмотренных в ней вопросов и немедленно приступили к освоению и распространению этой методологии на проблемы фазированных антенных решеток (ФАР). В это время на нашем предприятии для ЗРС разрабатывались многоэлементные ФАР, характеристики которых во многом определялись статистическими параметрами антенных элементов. Поэтому книга Я.С. Шифрина как нельзя кстати пришлось к разработке антенн совершенно нового класса.

Более того, используя развитую Яковом Соломоновичем идеологию, антенщикам «Алмаза» удалось применить статистический подход к анализу сугубо детерминированных и довольно сложных алгоритмов управления фазами элементов ФАР и получить весьма простые инженерные формулы, существенно облегчившие и ускорившие процесс проектирования цифровой аппаратуры для электрического управления лучом ФАР.

И довольно естественно от задач статистического анализа характеристик ФАР антенщики «Алмаза» перешли к задачам статистического синтеза. В период, когда теория фазового синтеза антенных решеток еще не была достаточно развита, на «Алмазе» были созданы весьма простые методы статистического фазового синтеза, позволившие реализовать на практике формирование расширенных лучей и расширенных пеленгационных характеристик за счет управления фазами ФАР.

Мое личное знакомство с Я.С. Шифриным состоялось в середине 70-х годов в Харькове.

МОЙ УЧИТЕЛЬ

Л.Г. КОРНИЕНКО

С Яковом Соломоновичем Шифриным я впервые встретился 52 года назад, еще будучи курсантом 3-го курса Харьковской Артиллерийской Радиотехнической Академии. Кто мог тогда предположить, что эта встреча станет доминантой моей жизни, определит мой жизненный путь. Подполковник Шифрин, начальник кафедры «Антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн», читал нам лекции по одноименному курсу.

Я часто сижу за письменным столом и перелистываю свой старый конспект лекций по этой дисциплине. Уже довольно потрепанный переплет, пожелтевшие страницы. Тогда туго было с бумагой, и я писал плотным убористым, но довольно разборчивым почерком, успевая записать почти все, сказанное лектором. (Потом, подражая учителю, я изменил свой почерк до неузнаваемости и, пожалуй, это единственное, в чем он мне «навредил»). Сколько раз я обращался к этому конспекту! И когда готовился к экзамену, и когда занимался на кафедре в военно-научном кружке, и при дипломном проектировании, и при подготовке в войсках к вступительному экзамену в адъюнктуру, и в период работы над кандидатской диссертацией, и

Тогда я вместе с А.А. Леманским (позже он стал нашим Генеральным конструктором) посетил Военную инженерную радиотехническую академию, где Яков Соломонович возглавлял антенную кафедру, и договорились с ним о привлечении к решению наших технических проблем высококвалифицированных сотрудников и адъюнктов кафедры. Уже при первой встрече сложилось впечатление о Якове Соломоновиче как исключительно доброжелательном и эрудированном человеке. И это впечатление укрепилось при последующем общении в процессе выполнения кафедрой работ по тематике «Алмаза».

Круг общения с Яковом Соломоновичем не ограничивался только совместными работами в интересах «Алмаза». Были многочисленные встречи на Всесоюзных антенных конференциях, на научных конференциях Военной инженерной радиотехнической академии, на заседаниях Межведомственного координационного совета по антенной технике, а также при обсуждении готовящихся к печати моих статей по статистическим вопросам ФАР.

Оглядываясь на десятилетия назад, я хочу от всей души поблагодарить Якова Соломоновича за интересное и плодотворное сотрудничество и еще раз отметить огромное значение научных достижений лично его и его школы в области статистики антенн для создания современных антенных систем различного назначения.

при подготовке к проведению занятий... А иногда перелистываю просто так, чтобы вспомнить былое. Этот конспект стал моей настольной книгой. Я до сих пор удивляюсь стройности логики и доступности изложения материала, умению переброса мостиков к материалу других дисциплин, привлечению аналогий, легкому отвлекающему юмору (я записывал и это!). Мне на лекциях хотелось задавать вопросы, и помню, как, преодолевая робость, я путано их формулировал, как Яков Соломонович меня подбадривал, и с какой радостью и даже гордостью за себя слушал я его обстоятельные ответы и рекомендации подробнее изучить этот вопрос в той или иной литературе. Поначалу меня «пугали» математические выражения, которые тогда еще доцент Шифрин с легкостью записывал на доске. «Как все это можно запомнить? Наверняка доцент просидел всю ночь, зазубривая эти формулы, чтобы удивить нас», — вертелось в моей голове. Но доцент по ходу лекций иногда давал примерно такие разъяснения: «Я легко запоминаю эти выражения, потому что я их понимаю» — и приводил их подробную физическую интерпретацию. Постепенно я перестал «бояться» ма-

тематики и стал понимать, что в этих компактных формулах заложены глубокие научные мысли, вот только нужно это увидеть.

Сейчас я могу сказать, что на лекциях Якова Соломоновича господствовал творческий дух, они учили нас думать, размышлять, вырабатывали умение самостоятельно извлекать знания из тех или иных источников. Основное внимание наш лектор уделял ключевым вопросам излагаемой дисциплины, ее основам, используемым в ней методам, применяемому математическому аппарату.

Будучи широко эрудированным педагогом, он показывал динамику развития теории и техники антенн, обращал наше внимание на еще нерешенные вопросы, обсуждал на лекции возможные пути их решения.

Во время лекций Я.С. любил обращаться к истории развития науки. Помню, меня это порой раздражало. «Разве можно на такие пустяки тратить драгоценное учебное время? Потом сам копайся в книгах и дописывай тему», — думал я. Но потом стало интересно, тем более, что Я.С. приводил и курьезные случаи. До меня стало «доходить», что не все так просто в науке. И сколько, оказывается, еще есть непонятого, спорного и нерешенного в этой науке. Обращения учителя к аудитории посвятить себя трудному, но чрезвычайно увлекательному и интересному научному труду, я стал постепенно примерять на себя и воспринимать все более серьезно. Во многом благодаря его лекциям, под их влиянием, я решил посвятить себя научно-педагогической деятельности в области прикладной электродинамики.

На 4-м и 5-м курсах я работал в научном кружке на кафедре и выполнял диплом по антенной тематике. Пришлось самостоятельно осваивать новый для меня материал и проводить экспериментальные исследования. Я впервые понял специфику научной деятельности. Большие умственные напряжения и временные затраты при незначительных достижениях наводили на мысль о неблагодарном труде и вызывали разочарования. Если бы не постоянная поддержка Я.С., его умение настроить на преодоление последующего этапа работы, то я мог бы сломаться и, как многие другие, оставить мысли о научной работе. Уже тогда мой учитель внушил мне мысль, что успех возможен при ежедневной кропотливой работе, чтобы постепенно продвигаться вперед и тренировать ум. Нужно хотеть творить и не бояться трудностей. Так я получил первые уроки о научном труде и еще раз утвердился в мысли посвятить свою дальнейшую жизнь научно-педагогической работе. Этому способствовало и приглашение от Якова Соломоновича приехать к нему на кафедру в адъюнктуру после обязательного срока службы в войсках. Сейчас я могу сказать, что он обладает удивительным даром подбора и воспитания кадров. Многие аспиранты, прошедшие «через его руки», стали докторами наук или прекрасными преподавателями. Наша кафедра, наряду с кафед-

рой Я.Д. Ширмана, была рекордсменом в академии по числу «выращенных» докторов и лучших преподавателей.

Проработав по окончании академии несколько лет на полигоне, я поступил в аспирантуру на кафедру Шифрина. Я был одним из его первых адъюнктов и попал к нему в разгар его работы над докторской диссертацией. Я.С. сразу же приобщил меня к научной работе, предложив мне изучить кипу статей, в том числе и своих, по вопросам статистической теории антенн. Когда он убедился, что я уже что-то начал соображать, то начал давать мне небольшие задания, вначале на проверку тех или иных асимптотических формул. Мы встречались два-три раза в неделю, и, выложив свои трудности, я получал от него обстоятельные разъяснения и новые задания. Как меня это подбадривало! И я работал «взахлеб». Сколько было исписано бумаги, прежде чем я получил необходимые навыки проведения порой весьма нудных и запутанных математических преобразований. И как было радостно узнавать, что мой результат совпадает с результатом, уже полученным ранее Я.С. Но он требовал еще и понимания логики преобразований и их физическую подоплеку. Этим Я.С. учил меня не только математике, но и умению мыслить, пониманию каждого этапа продвижения вперед. Темпы и масштаб научной работы заметно расширились, когда я начал решать небольшие задания по НИР и приступил к разработке темы кандидатской диссертации. В этот период Я.С. прививал мне навыки научной работы, учил меня четко формулировать и понятно, грамотно излагать на бумаге свои мысли. Для меня это было особенно тяжело. Как я ни старался, но описать и проанализировать полученные результаты у меня не получалось, хотя в качестве образцов я брал статьи Я.С. Шифрина. Каждая работа имеет свое лицо, но у меня оно получалось каким-то искаженным. Яков Соломонович терпеливо редактировал мои отчеты и статьи, а порой просто брал и переписывал их, подолгу обсуждая со мной каждый абзац. Часто оказывалось, что я нечетко объяснял, а порой и вовсе не замечал интересные мысли, новые повороты в исследовании. Я.С. объяснял, что спешка и нетерпеливость в науке недопустимы, всякая выполненная работа должна «отлежаться и снова должна быть продумана в деталях», а потом прочитана как бы заново — тогда можно заметить недостатки и критически оценить полученные результаты. Такой стиль работы сохранился у меня до сих пор.

Особое внимание Я.С. обращал на необходимость изучения фундаментальных творений по теоретической и прикладной электродинамике, творческого прочтения новой тематической литературы и периодических изданий для расширения кругозора и оценки места и значения своих исследовательских работ. Он предлагал рассказать ему содержание той или иной книги или статьи и то, какие мысли у меня возникли для расшире-

ния или углубления своих научных изысканий. У меня до сих пор хранятся толстые тетради с кратким описанием содержания прочитанного мной материала. Я.С. не воспринимал поверхностного озвучивания и предлагал еще разочек поразмыслить о прочитанном в том или ином направлении. Педагогическую стажировку на кафедре я проходил по курсу «Теория электромагнитного поля». Я.С. считал, что нужно начинать с фундамента и заставил меня проштудировать ряд разделов книги Дж. А. Стрэттона «Теория электромагнетизма», лекции Фейнмана по электромагнетизму. Я хорошо помню, с каким трудом преодолевал я каждую страницу этих книг, мне приходилось обращаться и к другим, в том числе учебным, книгам. По мере прочтения я, по подсказке Я.С., старался придумать те или иные простенькие задачки, которые потом включил в «Сборник задач». При первом обсуждении на заседании предметно-методической комиссии мой сборник подвергся жесткой, как мне показалось, критике со стороны преподавательского состава, и мне пришлось его заново переделывать.

Наука требует общения и апробаций. Я.С. систематически отправлял меня в командировки в НИИ, интересующиеся тематикой наших работ, для обмена мнениями, обсуждения полученных результатов, направлений дальнейших исследований. Особенно тщательно он подготавливал меня к выступлениям на семинарах, конференциях, обучая меня искусству публичных выступлений. На тренировках к выступлениям я мельчил и затуманивал оригинальные моменты, не мог сосредоточиться на главном. Мой руководитель же требовал от меня краткости и доходчивости изложения актуальности задачи и сути исследования, подчеркивания новизны полученных результатов и их практической значимости. В НИИ и на конференциях мне посчастливилось общаться с такими «аксакалами» антенной науки, именитыми учеными как А.А. Пистолькорс, Я.Н. Фельд, Л.Д. Бахрах, Е.Г. Зелкин, Д.М. Сазонов (впоследствии ставшими личными друзьями Я.С.) и многими другими. Я с удивлением обнаруживал, что это открытые и доброжелательные люди, доступные для общения, готовые обсудить и высказать свое отношение к той или иной работе, с интересом относящиеся к исследованиям Я.С. Шифрина и его учеников. Излишне говорить, как это стимулировало мою работу.

Все это способствовало тому, что я своевременно закончил аспирантуру и успешно защитил кандидатскую диссертацию. После этого я стал преподавателем кафедры, которой продолжал руководить Яков Соломонович. С самого начала этой деятельности я, как и другие молодые и (не только молодые) преподаватели, ощущал на себе его заботу о росте моего педагогического мастерства. Здесь следует отвлечься и сказать, что Я.С. был и остается ярким приверженцем подготовки в технических вузах специалистов широкого профиля на базе профессионализации фундаментальных

знаний. Эту идею он отстаивал на совещаниях и конференциях всех уровней, вплоть до министерских. На эту тему им написано ряд обстоятельных статей (в том числе и заказных). Естественно, что под этим ракурсом проходила вся учебно-методическая работа на кафедре, тем более что профессорско-преподавательский состав поддерживал своего начальника в этих устремлениях. Такой подход соответствовал профилю кафедры, на которой преподавались фундаментальные дисциплины «Теория электромагнитного поля», «Распространение радиоволн» и прикладные дисциплины – «Техника СВЧ» и «Антенны». Поэтому Я.С. требовал от преподавателей знания не только всех дисциплин кафедры, но и радиолокационной техники (в части их касающейся), которая изучалась на соответствующих профилирующих кафедрах, ее перспектив развития. Мастерство преподавателя оценивалось умением иллюстрировать общетеоретический материал конкретными техническими приложениями для усиления профессиональной направленности и мотивации преподаваемых на кафедре дисциплин.

Заседания кафедры проводились еженедельно. Нередко они проходили в форме либо научных, либо методических семинаров с приглашением преподавателей со спецтехнических и профилирующих кафедр. Эти семинары были замечательной школой для «молодых» преподавателей, которые выступали с обзором новой научной и учебной литературы, с результатами своих научных исследований, с анализом тематики прошедших научных конференций, с отчетом о войсковой стажировке, с предложениями об усилении междисциплинарных связей и др. В каждом выступлении должны были быть сформулированы конкретные предложения по внедрению тех или иных новинок в учебный процесс кафедры, по усилению военно-прикладной направленности обучения, по усилению связи с войсками.

Обязательным для молодых преподавателей было посещение заседаний специализированных ученых советов, где защищали свои кандидатские диссертации наши адъюнкты. Я всегда восхищался выступлениями Якова Соломоновича, его умением убеждать членов совета в том, в чем он был сам убежден. После таких выступлений члены совета зачастую говорили, что они наконец-то поняли актуальность и новизну защищаемой диссертации. Так же ярко он выступает и на научно-методических конференциях, отстаивая ту или иную научную идею или концепцию обучения.

Я.С. Шифрин считал, что каждый преподаватель должен заниматься научной работой, писать учебники или учебные пособия, совершенствовать или обновлять учебно-лабораторную базу, совершенствовать методику преподавания. На кафедре было принято систематически проводить открытые лекции, взаимные посещения занятий с последующим критическим обсуждением содержания и методики их проведения. Мы не обходили

«острых углов», открыто высказывали свою точку зрения, подчеркивали интересные находки, давали дружеские советы. Цель таких обсуждений, по установке начальника кафедры, заключалась не в злорадстве и унижении, а во взаимной помощи во благо учебного процесса. Я не могу припомнить, чтобы на кафедре возникали неприязненные взаимоотношения. Каждый занимался своим делом и старался помочь своему коллеге, и все вместе праздновали успех. У Я.С. были со всеми одинаково ровные отношения, своих намерений он не скрывал, с каждым проводил беседы о перспективе с учетом темпов реализации интеллектуальных способностей и личных достижений преподавателя, его отношения к работе: Яков Соломонович хорошо ориентировался, кто на что способен и где может принести наибольшую пользу. Принципиальность и открытость позиции Я.С. у всех вызывала уважение к нему.

Я.С. Шифрин нередко посещал мои занятия, привлекал меня к активной методической работе, давал многочисленные советы по разным вопросам читаемой мною дисциплины. Он воспитал во мне любовь к научно-педагогической деятельности, целеустремленной работе по решению стоящих передо мною задач, предельно ответственному и добросовестному подходу к подготовке к занятиям, обучал тонкостям педагогического мастерства, особенностям общения с различными успевающими студентами разных курсов. Все это, несомненно, нашло отражение в том, что в дальнейшем я несколько раз был признан лучшим преподавателем Академии.

Уже будучи преподавателем, старшим преподавателем и доцентом, я под руководством Я.С. проводил активную научную работу. Часто в процессе обсуждения той или иной научной проблемы мой руководитель замечал, что в статьях различных авторов имеется нестыковка. Одни утверждают одно, а другие — противоположное, и нам бы стоило в этом разобраться. Получив такую установку, я с нетерпением приступал к работе. Так появились наши совместные статьи, в частности, о предельном уровне боковых лепестков, об ограничениях, налагаемых атмосферой на направленность больших антенн, которые вызвали значительный интерес у специалистов. В подобных научных диспутах родилась и тема моей докторской диссертации. Вскоре в Академии открылась докторантура, куда я и поступил. И здесь при активной помощи Я.С. и его поддержке я за три года подготовил и в 1975 г. защитил докторскую диссертацию. С тех пор я работаю профессором кафедры антенн, разработал многие новые дисциплины, написал учебники и учебные пособия. Все эти годы я продолжаю активно заниматься наукой, подготовил большой отряд молодых ученых. И, тем не менее, я до сих пор не перестаю учиться у Я.С. Шифрина педагогике и научной работе. Его яркие выступления на конференциях, посвященных развитию образования, совершенствованию методики преподавания тех или иных дисциплин научили меня находить

главное в массе порою противоречивых фактов, выявлять тенденции и перспективы в развитии науки, которые надо своевременно ввести в учебный процесс. Написанные им учебные пособия и монографии пользуются широким признанием среди студентов и радиоспециалистов разного уровня. Особенно я хотел бы отметить учебник «Антенны», по которому учились и учатся тысячи студентов разных вузов СНГ и известную во всем мире книгу «Вопросы статистической теории антенн». Они могут служить образцами того, как надо писать учебник для студентов или монографию для радиоспециалистов по новому научному направлению. Для меня Яков Соломонович является наиболее авторитетным педагогом и ученым, всегда готовым в полной мере поделиться своими знаниями и умениями. Он всегда доступен и открыт. Трудно переоценить ту помощь, которую он на протяжении ряда десятилетий оказывает мне и моим коллегам в разрешении возникающих перед нами разных научно-методических проблем. Я всегда пользуюсь безотказной помощью моего Учителя по многим вопросам своей профессиональной деятельности, за что я ему глубоко благодарен. Я горжусь тем, что являюсь первым из его учеников, защитивших докторскую диссертацию. Но вместе с тем хочу подчеркнуть, что я являюсь лишь одним из учеников Я.С., одним из огромного отряда военных и гражданских инженеров, преподавателей, кандидатов и докторов наук, в подготовку которых он внес неоценимый вклад за более чем 55-ти летний стаж своей педагогической работы. Эти специалисты работают в различных вузах, НИИ, на предприятиях разных стран в ближнем и дальнем зарубежье. Многие из его учеников уже давно сами руководят антенными кафедрами и имеют массы своих учеников.

Яков Соломонович — не только талантливый человек, но и большой труженик. Мы часто встречаемся в неформальной обстановке у него дома для обсуждения тех или иных проблем. В его небольшом кабинете письменный стол, тумбочки, подоконники завалены новыми книгами, журналами, оттисками статей, письмами от отечественных и зарубежных ученых. Бесперывно звонит телефон. К Я.С. обращаются по самым разнообразным вопросам, вплоть до помощи в трудоустройстве. И если он что-то обещает, то можно быть уверенным, что выполнить обещанное он не забудет. Он в непрерывном научном движении: пишет отзывы, рецензии, статьи, обширные обзоры, редактирует книги, консультирует. Его возмущает дилетантство, безответственность, коррупция, пустившая метастазы в образование и в науку, несправедливость к интеллектуальному труду. Я.С., посетив с «научно- педагогическими визитами» почти все ведущие страны мира, уже давно мог осесть в тепленьком зарубежном местечке. Но душа его — здесь, во все еще никак не определившейся стране, где так нужны его знания, опыт, организаторские способности, непрекаемый авторитет.

Я.С. умеет не только плодотворно трудиться, но и хорошо отдыхать. Вспоминаются кафедральные праздники: защиты диссертаций, юбилей коллег, присвоение очередных воинских званий. Отмечали мы и День Победы, День Советской Армии. Неизменным тамадой был Я.С. Он знал много интересных историй, анекдотов, шуток, тостов и, главное, умело их преподносил. После небольшой торжественной части, собрание плавно переходило в веселые посиделки, которые обычно заканчивались гимном «Хорошо адъюнктом быть...». Я.С. затягивал эту песню, постукивая в такт ладонью по столу. Совместно с ним мы долгое время были членами специализированных ученых советов, часто вместе ездили на конференции, защиты диссертаций. И, конечно, — банкеты, пикники. Я.С. всегда выступал на них в роли центр-форварда, был центром притяжения. Особое отношение у него к женщинам. Многим из них он помог написать и защитить диссертации. Ценит женскую красоту во всех ее проявлениях. Он не обходил их стороной, любил с ними пофлиртовать. И они не оставались к нему равнодушными. Если обнаруживалась хорошая партнерша, Я.С. демонстрировал публике красоту и изящество бальных танцев. Я.С. не забывает о женщинах до сих пор.

Я.С. Шифрин — человек чести, совести и принципа, никогда не пасовал и не выслуживался перед начальством. Говорят, что к начальнику заходишь со своим, а выходишь с его мнением. Но этот человек всегда умел находить такие аргументы, которые не только убеждали, но и переубеждали командиров. Он помог многим своим подчиненным и товарищам в решении их личных вопросов. Приведу курьезный случай. На строевом смотре проверяющий генерал, заметив у полковника Шифрина пряжку ремня на боку, начал втолковывать ему, что центр пряжки по всем армейским канонам должен быть напротив пупка. И предложил поправить пряжку. «Не могу, товарищ генерал,

— ответил полковник, — у меня пупок на боку».

В своем рассказе о Я.С. я намеренно не упоминал о его мировой известности, многочисленных званиях, премиях, наградах, в том числе и зарубежных. Они, в основном, получены в советские времена, и, конечно, не отражают его заслуг в период независимой Украины. А таких заслуг много. Взять хотя бы его кипучую деятельность по организации антенной ассоциации и по организации и проведению международных конференций по теории и технике антенн: в Харькове (одна), Киеве (две), Севастополе (три), Львове (одна) с периодичностью в два года. На конференции съезжались как маститые, так и молодые ученые не только из Украины, но и из России, Белоруссии, Прибалтики, Германии, США, Польши и других стран. В наше время, когда в Украине идут процессы разобщенности общества и развала науки, антенное сообщество демонстрировало единодушие и взаимное доверие, осуществляло поддержку молодых талантов, аккумулировало современные научные и технологические достижения. Сколько сил и энергии Я.С. тратил на издание трудов конференций на английском языке, которые расходились во многие страны мира. Пока эта деятельность, приносящая научную славу Украине, не нашла достойной оценки. На эту тему можно говорить долго. Но, в конце концов, дело не в регалиях, а в человеке. В том тепле и таланте, которые Я.С. бескорыстно и щедро отдает людям. И мне хотелось написать именно об этом. Мне повезло, что на пороге самостоятельной жизни я связал свою судьбу с этим удивительным человеком, открывшим передо мной мир науки и творчества. И, поздравляя Якова Соломоновича с 90-летним Юбилеем, хочу поблагодарить его за все то добро, что он для меня сделал, и пожелать ему крепкого здоровья, бодрости и оптимизма, новых путешествий и ярких впечатлений, и новых творческих успехов.

Я.С. ШИФРИН И АНТЕННЫЙ ОТДЕЛ НИИ-17 — МНИИП — ОАО «КОНЦЕРН «ВЕГА»

А.П. КУРОЧКИН

Якова Соломоновича Шифрина и антенный отдел НИИ-17 — МНИИП — ОАО «Концерн «Вега» связывают давние творческие и дружеские узы. Он на протяжении нескольких десятков лет регулярно бывал в отделе, хорошо знаком со многими сотрудниками и по праву считается почетным членом нашего коллектива.

В основе этого лежит то, что Якова Соломоновича связывала крепкая многолетняя дружба с Львом Давидовичем Бахрахом, который более 34 лет был начальником антенного отдела, а потом 17 лет его научным руководителем. С большим уважением относился к Якову Соломоновичу и Александр Александрович Пистолькорс, кото-

рый многие годы тоже был научным руководителем отдела.

В отделе с давних пор хорошо известны фундаментальные труды Я.С.Шифрина по статистической теории антенн, а его монография «Вопросы статистической теории антенн» была и остается настольной книгой для многих сотрудников отдела. Разработанная им и его учениками теория применялась при расчете допусков на изготовление антенных устройств различного назначения и их элементов, расчете погрешностей измерения характеристик направленности антенн методами ближней зоны, определении требований к точностным характеристикам со-

ставных частей измерительных комплексов. В результате совместных исследований, выполненных сотрудниками отдела и кафедры ВИРТА им. А.Л.Говорова, которой много лет руководил Я.С.Шифрин, был решен ряд задач, связанных с созданием антенных устройств и обтекателей для радиолокационных комплексов, разработанных в разные годы в МНИИП.



В день шестидесятилетия Льва Давидовича
22 июля 1981 г.

С антенным отделом НИИ-17 — МНИИП — ОАО «Концерн «Вега» тесно связана и научно-организационная деятельность Я.С.Шифрина. Вместе с А.А.Пистолькорсом, Л.Д.Бахрахом и рядом сотрудников отдела он активно участвовал в работе Межведомственного координационного совета по антенно-волноводной технике и поглощающим покрытиям (МКС-7), который на протяжении длительного времени базировался в нашем отделе, в подготовке и проведении Всесоюзных конференций по теории и технике антенн.

В последние годы по инициативе и под руководством Я.С.Шифрина в различных городах Украины проводятся Международные конференции по теории и технике антенн, которые способствуют восстановлению научных контактов между антенщиками России, Украины и других стран СНГ. Сотрудники отдела активно участвуют в работе этих конференций.

Я.С. Шифрин много лет работает в редколлегии журнала «Антенны», главным редактором которого многие годы был Л.Д.Бахрах, а членами редколлегии — ряд сотрудников антенного отдела. Его рецензии помогают авторам улучшить свои статьи и способствуют повышению научного уровня и авторитета журнала.

Статьи и монографию Я.С.Шифрина я прочитал, когда выполнял дипломную работу в антенном отделе НИИ-17. В это время проводились первые в стране научно-исследовательские работы по созданию космических радиолокаторов с

синтезированной апертурой (РСА). Рассматривались различные варианты расположения точек излучения и приема зондирующих сигналов на траектории полета носителя РСА с целью снижения уровня интерференционных лепестков в диаграмме направленности синтезированной апертуры. Л.Д.Бахрах предложил рассмотреть вариант случайного расположения точек зондирования. При этом он настоятельно посоветовал мне изучить упомянутую выше монографию Я.С.Шифрина. Использование подхода, развитого в этой монографии, с учетом ограничений, свойственных РСА, позволило нам успешно решить поставленную задачу.

Наше очное знакомство с Я.С.Шифриным произошло спустя несколько лет в Харькове во время конференции, которая проходила в ВИРТА. Познакомил нас Л.Д.Бахрах после моего доклада, посвященного вопросам применения голографии и методов оптической обработки информации для определения характеристик антенн. Я.С.Шифрин одобрительно отозвался о докладе, пригласил на свою кафедру, рассказал о проводимых ими работах. В ходе беседы выявились возможные направления сотрудничества в области антенных измерений в ближней зоне.

В середине 70-х годов вместе с Л.Д.Бахрахом мною была подготовлена к изданию монография «Голография в микроволновой технике». Я.С.Шифрин внимательно прочитал рукопись и сделал довольно много замечаний, которые мы с Львом Давидовичем обсудили и большинство из них учли при доработке. Нужно отметить деликатность, с которой делались замечания. Они выражались в форме советов. Яков Соломонович подчеркивал, что мое право прислушаться к ним или отвергнуть. Особенно запомнились советы Якова Соломоновича по построению книги и подаче материала. Одно из его замечаний касалось недостаточной связи материалов, изложенных в разных главах. Он предложил дополнить главы взаимными ссылками и пояснениями в тех местах, где с различных точек зрения рассматривался один и тот же или близкие вопросы. Эти дополнения существенно улучшили рукопись, материал стал более связанным, и книга в большей степени стала соответствовать понятию «монография». Этим советом Я.С.Шифрина я всегда пользуюсь в своей работе, передавал и передаю его своим коллегам, которые пишут книги и диссертации.

Благодаря Якову Соломоновичу у меня сложились дружеские отношения и плодотворные научные контакты с В.А.Усиным — учеником Я.С.Шифрина. Результатом совместных работ стало написание нескольких статей, а в 1985 году и издание монографии «Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне», соавторами которой являются Л.Д.Бахрах, С.Д.Кременецкий, В.А.Усин, Я.С.Шифрин и автор этих строк.

Я глубоко признателен Якову Соломоновичу за его внимание и поддержку в моей научной работе на протяжении многих лет.

В последние годы нас особенно сблизили события, связанные с болезнью и кончиной очень близкого нам человека — Льва Давидовича Бахраха. Яков Соломонович приехал в Москву на прощание с Л.Д.Бахрахом, произнес очень теплые слова о нем. Он поддержал идею выпуска журнала «Антенны», посвященного памяти Л.Д.Бахраха, одним из первых прислал статью о нем, посоветовал включить в этот выпуск список научных тру-

дов, постоянно интересовался ходом подготовки выпуска и поддерживал работу над ним.

Сотрудники антенного отдела ОАО «Концерн «Вега» и члены редколлегии журнала «Антенны» сердечно поздравляют Якова Соломоновича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и успехов в его многогранной научной и организаторской деятельности.

МОИ ВСТРЕЧИ С Я.С. ШИФРИНЫМ

Л.М. ЛОБКОВА

Мне доставляет огромную радость возможность поделиться воспоминаниями о встречах и общении с Яковом Соломоновичем Шифриным, которые проходили в течение более 40 лет!

В начале 50-х годов прошлого века я, будучи студенткой физического факультета Ленинградского Государственного Университета (ЛГУ), занималась исследованием радиоастрономических антенн в Пулковской обсерватории, участвовала в радиоастрономических измерениях излучения Солнца, особенно во время солнечного затмения 1953 г. в Грузии.

В 1955 г. в ЛГУ обратились из Ленинградского электротехнического института связи им. М. А. Бонч-Бруевича (ЛЭИС) с просьбой направить радиофизика в аспирантуру на кафедру «Антенны и распространение радиоволн», руководимую профессором Марком Павловичем Долухановым. Выбор пал на меня. Мне было предложено поступить в аспирантуру ЛЭИС. Моим научным руководителем стал Марк Павлович, который предложил мне тему «Когерентное рассеяние электромагнитных волн и его роль в дальнем тропосферном распространении (ДТР) ультракоротких радиоволн». Выбор этой темы был связан с тем, что как раз в это время в СССР были начаты работы по ДТР. Головным исполнителем являлся Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР, а руководителем работ был назначен академик Б.А.Введенский. Наряду с теоретическими исследованиями в ЛЭИС были организованы и экспериментальные исследования в дециметровом диапазоне волн на трассе Ленинград (передающий пункт находился в Воейково) — Петрозаводск (приемный пункт располагался в пригороде на Виллагоре).

Аналогичные работы были организованы в ИРЭ АН СССР, которые проводились с привлечением коллектива ученых Харькова из Артиллерийской Радиотехнической академии (АРТА) под руководством профессора Якова Соломоновича Шифрина.

В этот период, занимаясь теорией рассеяния в неоднородных средах, я познакомилась с профессором Кузиэлем Соломоновичем Шифриным, братом Якова Соломоновича, который рассказал мне о нем и о тематике его научных исследований.

Однажды, при просмотре акустических журналов в ленинградской публичной библиотеке на Садовой улице, мне встретилась одна из работ Якова Соломоновича 1961 г. Трудно передать мои ощущения после просмотра этой статьи. Я увидела возможности применения накопленных мною знаний в области ДТР к теории антенн.

После этой статьи Якова Соломоновича начался новый период в моей жизни — это поиск его статей, которые своей ясностью и строгостью изложения просто завораживали меня. К сожалению, труды АРТА были почти недоступны, только несколько статей можно было найти в спецхранах. Но главное, что произошло со мной, — это то, что я взялась за изучение не только книг по теории вероятности и случайным процессам, но и за работы С.М. Рытова и В.И. Татарского, с целью уяснения особенностей флуктуации фазы и амплитуды поля ЭМВ при распространении их в неоднородной среде. Мне стало ясно, что результаты этих работ мне понадобятся при определении характеристики апертурных антенн, работающих в неоднородной среде.

Период с 1961 по 1969 гг. был прожит с именем Якова Соломоновича, и, конечно, я мечтала о встрече с ним самим, что и произошло в сентябре 1969 г. в Харькове, на IX всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Эта встреча положила начало нашей 40-летней дружбе и дала дополнительный импульс моей научной деятельности. После очередного пленарного заседания, на котором почтили память ушедшего от нас летом 1969 г. Б.А. Введенского, я со страхом в сердце подошла к Якову Соломоновичу. Мне хотелось рассказать ему о результатах своих работ и о том, какую роль его работы сыграли в моей жизни. К моей радости, Яков Соломонович оказался доброжелательным собеседником и внимательно выслушал мою просьбу. К тому времени я уже в основном подготовила докторскую диссертацию по статистике антенн к защите и хотела рассказать ему о главных результатах моей работы. Однако Яков Соломонович без лишних слов предложил мне ознакомиться вначале с его монографией, которая в это время еще находилась в печати.

В 1970 г. я защитила докторскую диссертацию, и на кафедре мне было рекомендовано

опубликовать основные ее результаты. Монография была направлена в издательство «Связь», а ее рецензентом был Яков Соломонович Шифрин, книга которого «Вопросы статистической теории антенн» к этому времени уже была опубликована. С 1971 г. начались наши встречи по обсуждению моей книги. Работа Я.С. над представленным мною материалом явилась для меня примером исключительной добросовестности и ответственности. Мне приходилось не раз приезжать из Ленинграда в Харьков, чтобы обсудить вопросы и замечания, которые возникали у Якова Соломоновича по мере чтения моей рукописи. К этому хочется добавить, что Яков Соломонович каждый раз беспокоился о моем проживании в Харькове, а наши длительные беседы проходили у него дома. Работа с ним многому меня научила, а что касается книги, то, несомненно, логика и стиль изложения материала в ней заметно улучшились, а главное, ее содержание стало существенно более адекватным той физической проблеме, которой она посвящена.

В 1973 г., волею судьбы я переехала в Севастополь, в Приборостроительный институт (ныне это Севастопольский Национальный Технический Университет — СевНТУ), где я и работаю по настоящее время. С переездом в Севастополь общение с Яковом Соломоновичем и учеными Харькова стало значительно более тесным. Я с благодарностью вспоминаю систематическую помощь и поддержку, которую Я.С. оказывал нашей науке и подготовке молодых кадров. А письма, написанные им в Министерство науки и образования Украины, помогли нам получить дополнительное финансирование по науке и редкий министерский грант для молодых ученых нашей кафедры.

Особый период нашей совместной работы начался после 1991 г.

Яков Соломонович был организатором и неизменным руководителем международных кон-

ференций по теории и техники антенн, которые в последнее десятилетие несколько раз проводились в СевНТУ. Естественно, это способствовало привлечению наших студентов к науке и успешной работе нашей научной молодежи. Наряду с конференциями Яков Соломонович организовал Украинскую ассоциацию «Антенны», в ходе заседаний которой обсуждались результаты научных исследований молодых ученых. И каждый раз Яков Соломонович всячески старался их поддерживать, подчеркивая новизну и значимость докладываемых ими работ. Так произошло с работой Л.П. Яцук, которая после обсуждения в антенной ассоциации была представлена к защите как докторская диссертация.

Яков Соломонович Шифрин принадлежит к числу тех редких для нашего времени ученых, который посвятил свою жизнь науке и созданию научных школ в ряде университетов, включая и СевНТУ. Не случайно он является почетным профессором нашего университета и радиотехнического факультета.

Отличительной чертой Якова Соломоновича является поистине многосторонняя образованность, интеллигентность, сочетающаяся с добрым и сердечным отношением к коллегам и ученикам, наряду с критическим, но доброжелательным анализом их научных работ.

В заключение мне хочется от своего имени, а также от имени молодых ученых и всего преподавательского состава факультета радиоэлектроники нашего СевНТУ сердечно поздравить, дорогого Якова Соломоновича со славным юбилеем — 90-летием со дня рождения и пожелать ему доброго здоровья, благополучия и активного долголетия!

Пусть этот юбилей будет для юбиляра не только праздником воспоминаний, но и стимулом для новых замыслов и надежд.

Я.С. ШИФРИН И ТЕОРИЯ АНТЕНН С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.И. ЛУЧАНИНОВ

Так уж распорядилась судьба, что мне выпала удача в течение длительного времени работать в науке под руководством Якова Соломоновича Шифрина. И началась эта работа в далеком, сейчас, 1980 году, когда Яков Соломонович перешел из академии им. Л.А. Говорова в ХТУРЭ на кафедру радиоизмерений. С присущей ему энергией Я.С. окунулся в жизнь кафедры. Одним из первых его шагов стала организация и проведение цикла лекций по статистической теории антенн для научных сотрудников и преподавателей кафедры. Его поразительное лекторское мастерство, преданность делу, которым занимаешься, настолько увлекли слушателей, что часть сотрудников коренным образом изменила направление своих исследований. И как оказалось — довольно ус-

пешно. В результате этого образовалась новая для ХТУРЭ научная школа по статистической теории антенн. Впоследствии результаты проводимых под руководством Я.С. исследований в этом направлении стали основой докторской диссертации В.В. Должикова и кандидатских диссертаций Ю.М. Бородавко, В.А. Назаренко, В.Ю. Радченко, В.Г. Лихограй, А.В. Сербин.

Однако меня в это время поразила другая черта Якова Соломоновича — его способность очень быстро вникать в суть вопросов, казалось бы, очень удаленных от основного направления собственных исследований. Дело в том, что до прихода к нам Я.С. на кафедре антенн ХТУРЭ под руководством А.П. Дорохова были начаты исследования в области активных антенн, которые

после ликвидации кафедры антенн были продолжены на кафедре радиоизмерений. До 1980 г. было выполнено несколько НИР, результаты которых опубликованы в целом ряде статей и двух монографиях, а В.М. Шокало защитил в МАИ кандидатскую диссертацию по активным передающим антеннам. Казалось бы, вполне устоявшееся и общепризнанное направление исследований. Мы попросили Я.С. познакомиться с состоянием этих работ. Его реакция после первого семинара для нас была почти шокирующей: «Это чепуха!». Прошло еще несколько встреч и стало понятно, что Яков Соломонович видит все совершенно иначе. Оказывается, и активные приемные антенны, и активные передающие антенны — это только составляющие более общего класса антенн — антенн с нелинейными элементами, в который входят и ректенны, и антенны с преобразованием частоты и т.п.. В то время почти все мы работали в научно-исследовательском секторе, необходимы были хозяйственные работы. Я.С. организовал командировку для В.М. Шокало, П.Л. Токарского и меня в Москву в КБРП им. Расплетина, где познакомил нас с А.Г. Шубовым, Ю.Г. Владыченским и А.Н. Егоровым — сотрудниками отдела, который занимался разработками ректенн. Сам же Яков Соломонович в это время встречался с руководителем КБРП Г.Г. Бубновым. После одной из таких встреч он нам сообщил, что КБРП готово заключить с ХТУРЭ большой хозяйственный договор. Довольно быстро были оформлены все документы и начались исследовательские работы.

Потом были исследования по антеннам с нелинейными элементами, которые постоянно расширялись, был выполнен еще ряд крупных работ с ведущими организациями, как бывшего СССР, так и Украины. По результатам этих работ опубликованы более чем 90 статей, 4 монографии и сделано несколько десятков докладов на международных конференциях. Наиболее весомыми доказательствами актуальности нового направления явились опубликование главы «Антенны с нелинейными элементами» в «Справочнике по антенной технике» под редакцией Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина и участие в симпозиуме по антеннам JINA-94. Я.С. подал в Оргкомитет предложение об организации секции по антеннам с нелинейными элементами и буквально «выбил» из нас 6 докладов. Несмотря на то, что Оргкомитет принял

всего 2 доклада, прочитанные Яковом Соломоновичем, они вызвали достаточно большой интерес. Весьма положительные отклики на них были получены от «отцов» беспроводной передачи энергии П.Глезера и В.Брауна. Поступили предложения участвовать в написании монографии в составе международного коллектива авторов, написать обзорную статью в журнал, посвященный солнечной энергетике. К сожалению, в силу ряда причин, эти предложения оказались нереализованными. Авторитет школы подтвердился, когда П.Глезер прислал доклад на международную конференцию по теории и технике антенн ICATT'95, главным инициатором которой был Яков Соломонович.

Сам Яков Соломонович является автором около 50 научных работ и трех монографий в этом направлении. Потом были его доклады в Польше, Германии, Франции, США, Японии. Эти доклады были одобрены ведущими зарубежными учеными и научное направление — антенны с нелинейными элементами — получило заслуженное признание. Потом были защиты кандидатских диссертаций в этом направлении Щербиной А.А., Посоховым А.С., Лучаниновым А.И., Коновальцевым А.А., Гаввой Д.С., Грецких Д.В. и докторских (В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, М.А. Омаров).

Здесь следует отметить и еще одну из многих черт, присущих Якову Соломоновичу — его заботу о сотрудниках. Сразу включившись наравне со всеми в исследования по теме, на одном из первых совещаний он сказал: «Исследования по НИР это, конечно, основное, но результаты их должны быть в ваших диссертациях. Всем чем смогу — помогу!». Дальнейшая жизнь в полной мере подтвердила эти слова. К этому времени на кафедре с незаконченными диссертациями были еще и П.Л. Токарский, С.Н. Сакало и И.Д. Гладковский, исследования которых были в несколько других направлениях, чем антенны с нелинейными элементами. Тем не менее, Яков Соломонович, несмотря на разнообразие тем диссертаций, глубоко вникал в каждую работу. Результат — в очень короткий срок все работы были защищены.

Дорогой Яков Соломонович! В дни Вашего юбилея позвольте всем нам, кому Вы дали путевку в науку, горячо и сердечно поздравить Вас и пожелать Вам счастья и всего самого доброго еще на многие и многие годы!

ПЯТНАДЦАТЬ ЛЕТ РЯДОМ С Я.С. ШИФРИНЫМ

Н.Г. МАКСИМОВА

Имя «Шифрин» я услышала в своей семье еще в раннем детстве, потому что мой папа Григорий Степанович Сафронов вначале учился, а потом, как и Яков Соломонович, работал в Академии им. Л.А. Говорова.

Через много лет, когда я уже работала в Проблемной научно-исследовательской лаборатории зондирования атмосферы (ПНИЛ ЗА) ХИРЭ, мы в наших исследованиях пользовались книгами Я.С.Шифрина по статистической теории антенн. А в 1980 г. оказалось, что Яков Соломонович тоже работает в ХИРЭ, в «секретной» 110-й комнате, которая находится как раз напротив нашей 108-й. Я всегда видела его стремительно проносящимся по коридору. Мы только здоровались, но случилось, что и перекидывались парой фраз, и я почувствовала симпатию к этому человеку.

Прошло совсем немного времени, и я узнала, что с его приходом в ХИРЭ начали происходить позитивные перемены на факультете РТ, где защитить не то что докторскую, а и кандидатскую диссертацию было делом малореальным. А тут на информационном стенде ХИРЭ стали появляться объявления о защите очередной кандидатской диссертации на кафедре радиоизмерений, куда пришел работать Яков Соломонович. А потом на факультете РТ начались защиты докторских диссертаций, вначале Е.Г.Прошкина, М.Ф.Лагутина, И.Н.Преснякова, В.А.Омельченко, а потом В.М.Шокало, А.И.Лучанинова, М.А.Омарова и других. Позднее защитились и соискатели докторских диссертаций на других факультетах ХНУРЭ: Г.И.Чурюмов, А.Ю.Панченко и т.д. Работая «по соседству», я знала, что все эти защиты стали возможны благодаря тому, что все соискатели в той или иной мере прошли через руки Якова Соломоновича. Что такое «пройти через его руки», я поняла, когда, по совету знающих людей, к нему обратились сотрудник ПНИЛ ЗА Ю.Н.Ульянов — с просьбой прочитать его кандидатскую диссертацию — и научный руководитель нашей лаборатории Е.Г.Прошкин — с просьбой прочитать его доклад, на основании которого ему потом была присуждена степень доктора технических наук. Совет оказался добрым: Яков Соломонович вычитывал их работы самым тщательным и строгим образом, заставляя отшлифовывать «конечный продукт», а это, конечно же, способствовало их успешным защита.

С наступлением «мрачных девяностых» ПНИЛ ЗА резко сократилась, и осенью 1993 г. меня отправили в отпуск «за свой счет», а потом и вовсе уволили, поскольку тема, на которой я числилась, уже закончилась. Случайно встретив в коридоре Я.С., я попросила его продлить мой неоплачиваемый отпуск. Он согласился, и его заместитель В.М. Шокало оформил мне отпуск на год

по одной из тем на кафедре технической электродинамики и антенн (ТЭА), возглавляемой Я.С.

Не буду много писать о том, как я выжила в том году. Зарабатывала какие-то гроши шитьем, играла для души на пианино и мечтала о путешествиях в разные страны. И не просто о путешествиях, а о зарубежных научных конференциях. Я представляла себе, что когда-нибудь продолжу свою научную работу, которую начала в ПНИЛ ЗА, защищу диссертацию и стану представлять нашу работу за рубежом... Да, но для этого же нужно грамотно изъясняться на английском, а мне все казалось, что мне моего английского не хватает. Поэтому мечтой было и поднять свой уровень если не до совершенства, то близко к тому. Мне тогда казалось, что, только работая у Якова Соломоновича на кафедре, я смогу реализовать свои мечты: я видела, что при общем спаде науки в институте, научная жизнь на их кафедре продолжается.

В общем-то, так все и случилось. В июле 1994 г. мне позвонил Яков Соломонович, сказав, что для меня освободилось место. С 1 сентября 1994 г. я уже работала на кафедре ТЭА. Специфика моей работы оказалась весьма отличной от той, которая была у меня в ПНИЛ ЗА, где от меня требовалось писать программы во время разработки и апробирования в натурных экспериментах системы радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы. Здесь же я, продолжив исследования по «своей» тематике, одновременно стала выполнять обязанности ученого секретаря Национальной ассоциации «Антенны», созданной Яковым Соломоновичем в столь трудное для науки и ученых время. Целью этой Ассоциации было объединить в одно сообщество антенщиков Украины, выяснить ее научный «антенный» потенциал и восстановить разорванные в результате перестройки связи между учеными бывшего СССР. А это означало заниматься не очень интересной для меня тогда работой по подготовке заседаний Ассоциации, а потом, начиная с конца 1994 г., и конференций по теории и технике антенн. Но... здесь как раз оказалась востребованной моя тяга к иностранным языкам, так как переписка с учеными разных стран у Я.С. не прекращалась ни на день...

Когда я начала работать у Я.С., то первым моим делом была переписка с секретарем антенной конференции в Ницце. Яков Соломонович очень хотел, попав впервые во Францию, посмотреть заодно и Париж. Но во французском посольстве никак не хотели давать визу на срок, превышающий период проведения конференции. Помню, что вся эта переписка длилась достаточно долго, но Париж Я.С. все же посмотрел.

После возвращения из Франции Яков Соломонович уже вплотную приступил к подготовке первой международной конференции по теории

и технике антенн (ISATT), намеченной на осень 1995 г. Моей задачей при этом было вести обширную переписку и готовить к публикации присылаемые тезисы докладов. В те годы в нашем институте не было ни интернета, ни электронной почты. Поэтому большую часть корреспонденции пересылали через институтскую канцелярию, но часто приходилось и ходить в центр города в чуть ли не единственный в городе пункт с электронной почтой, отправляя и получая письма от антенщиков из других городов Украины, России и дальнего зарубежья. Замечу, что платить за всю эту обширную электронную переписку Я.С. приходилось самому. Но, как говорит Яков Соломонович, не это главное. Главное — это то, что его инициативу возродить в СНГ антенные конференции, проводившиеся ранее в СССР под руководством А.А. Пистолькорса, поддержали, в первую очередь, его близкий друг — антенщик №1 в СССР Лев Давидович Бахрах и другие крупные ученые из Украины, России и Беларуси. Большой гордостью Я.С. было и то, что на эту первую конференцию свои тезисы прислал Петер Глэзер из Америки, один из пионеров беспроводной передачи энергии. При этом он написал, что высоко ценит работы в этой области, проводимые в нашем университете под руководством профессора Шифрина. В отличие от Пистолькорсовских конференций, которые проводились для обмена опытом между учеными русскоязычного Советского Союза, конференции, задуманные Я.С., должны были объединить ученых из разных стран. Для этого, решил он, тезисы нужно было издать на двух языках — русском и английском. Когда же дело дошло до тезисов на английском языке, оказалось, что далеко не все антенщики, хотевшие принять участие в нашей конференции, владели им в достаточной мере. Это создавало проблему, так как предполагалось, что какое-то количество изданных тезисов будет распространено за пределами СНГ. Пришлось привлечь нескольких специалистов, владевших английским, которые исправили это положение. Мой английский к этому времени был вполне сносный, но несколько, так сказать, «лабораторный». Поэтому для меня эта работа оказалась очень хорошей школой...

На ту конференцию приехал и Михаил Сергеевич Юрченко, бывший тогда заведующим кафедрой в Киевском политехническом институте (КПИ). До сих пор Михаил Сергеевич вспоминает, как на товарищеском ужине Якова Соломоновича, который прекрасно поет, поддержал весь зал, и возникло редчайшее ощущение «момента истины». Все были охвачены единым порывом. Это чувство настолько поразило Михаила Сергеевича, что он предложил провести следующую конференцию в Киеве, в КПИ. Две последующие конференции ISATT'99 и ISATT'03 были проведены в Севастополе (на базе Севастопольского национального технического университета — СевНТУ). Хотя при подготовке ISATT'97

нам помогали сотрудники КПИ, в подготовке ISATT'99 — сотрудники СевНТУ, а в подготовке ISATT'03 — сотрудники ХНУ им. В.Н. Каразина, вся информация стекалась в наш «штаб». Яков Соломонович сделал все, чтобы конференции прошли на мировом уровне. В первую очередь, он очень тщательно подошел к вопросу о том, кто будет представлять заказные доклады. Здесь он использовал свои связи, завязавшиеся не только в советские времена, но и во время многочисленных международных конференций, на которых он к тому времени уже побывал. По его приглашению приезжали Л.Д.Бахрах и многие видные ученые из Украины, России и других стран СНГ, из Польши — Й.Модельский, из Германии — Петер Эденхофер, из США — Яхья Рахмат-Самии, Денис Козакофф и Бальбине, из Нидерландов — Кеес ван'т Клоостер, а из Японии приезжали Т. Катаги, К. Кагошима, Т. Такано и Х. Шигесава.



Участники ISATT-97 в Киеве во время прогулки по Днепру. В 1-м ряду (слева направо) Ф.Ф. Дубровка, А.Г. Дудко, Я. Рахмат-Самии, я, Я.С. Шифрин

Очень большое внимание Яков Соломонович уделял тому, чтобы в конференциях приняло участие как можно больше молодежи. В середине 90-х зарплата у научных сотрудников была настолько низкой, что многие аспиранты и молодые кандидаты наук просто не смогли бы приехать ни в Киев, ни в Севастополь. И Яков Соломонович решил, что нужно изыскать все возможности, чтобы поддержать их. А для этого надо было искать спонсоров, которые бы выделили какую-то хоть небольшую сумму. И спонсоров находили, и молодежь приезжала. Так, на конференции ISATT-99 удалось поддержать около 70 ее участников из Украины и России. Я.С. старался в то очень трудное время также поощрить материально и всех, кто помогал в организации конференций. Все конференции ISATT проводились при поддержке IEEE, поэтому отчитываться за них перед этой организацией надо было трудами. И краснеть за них нам не пришлось. Когда они для контроля требовали прислать один экземпляр, то потом покупали еще несколько десятков их.

Во время проведения конференции Яков Соломонович очень беспокоился о том, чтобы все прошло хорошо. Поэтому он не ложился спать,

пока не продумает до мелочей все, что предстоит сделать на следующий день, а вставал в 5 утра... Его заботой было не только сделать так, чтобы заседания прошли на самом высоком уровне, но и реализовать для участников запоминающуюся социальную программу. Особенно его волновало, как себя чувствуют у нас зарубежные гости. Думаю, что его забота не пропала даром, если, например, Кеничи Кагошима и Кеес ван'т Клоостер дважды приезжали на наши конференции, Петер Эденхофер — трижды, а Хироши Шигесава со своей милой женой Соное — четыре раза.



Члены Программного и оргкомитетов ICATT'99 на фоне СевНТУ. Слева направо: П. Эденхофер, Н.Н. Горобец, В.И. Рудаков, А.Г. Дудко, Т. Катаги, Ф.Ф. Дубровка, В.А. Катрич, Н.Г. Максимова, А.А. Кириленко, Я.С. Шифрин, А.С. Ильинский, Л.Д. Бахрах, М.С. Юрченко, Э.И. Велиев, М.А. Омаров

Результатом тех конференций явилось и то, что у некоторых талантливых молодых людей появилась возможность работать по специальности за рубежом. В самые трудные годы перестройки это было очень важно для них, но невозможно без рекомендации маститых ученых. Такие рекомендации давал им Яков Соломонович. Сейчас можно рассуждать, хорошо это или плохо для Украины, но для этих молодых людей это, безусловно, стало благом. Ведь нельзя сравнить условия для занятий наукой у нас и, например, в Нидерландах, где трудолюбивый и способный человек может не только реализовать себя в своей профессии, но и за несколько лет дом построить, и весь мир посмотреть.

В октябре 2009 г. прошла уже 7-я антенная конференция, на этот раз во Львове. Это уже третья конференция, на которой Я.С. выступает в качестве почетного руководителя. Однако он, как и раньше, держит руку на пульсе конференции, тревожится, смогут ли люди приехать, не слишком ли большой оргвзнос, не слишком ли дорогое проживание...

...Но все это было потом.

Вернусь к временам моего прихода на кафедру технической электродинамики и антенн, которую возглавлял Яков Соломонович. Прошло всего около двух недель с тех пор, как я начала здесь

работать, как он спросил меня, почему я до сих пор не защитилась. Меня этот вопрос очень порадовал. Очень уж было обидно бросить результаты тех исследований и экспериментов, которые мы с таким энтузиазмом проводили в течение нескольких лет в ПНИЛ ЗА. Я и сегодня абсолютно уверена, что без моральной поддержки Я.С. вряд ли рискнула бы посвятить несколько лет написанию диссертации. Дело в том, что задолго до этого вопрос о моей кандидатской диссертации стоял в планах ПНИЛ ЗА, но никто из моих руководителей не мог мне, как программисту, участвовавшему в натурных экспериментах, сказать, что именно будет темой моей работы. Для меня тем более это было тайной за семью печатями. А Яков Соломонович мне сказал: «Если ты участвовала в подготовке и проведении экспериментов, то ты равноправный автор, и имеешь право на результаты работы». Тогда я подняла все полученные с моим участием результаты, заново проанализировала их и с помощью Якова Соломоновича наметила несколько направлений исследований, проводившихся в ПНИЛ ЗА, которые могли войти в мою работу. Результаты этого анализа и стали основой моей кандидатской работы. Должна сказать, что настоящую школу написания статей я до того не проходила. Это, естественно, затруднило и написание диссертации. Хорошо, что рядом был Яков Соломонович, который не только подсказал, как лучше подать материал, но и безотказно много раз вычитывал мою диссертацию: ведь он не мог допустить, чтобы диссертация его протеже была не должного качества. Так что я и сегодня считаю, что у меня было два научных руководителя по диссертации. Официальным был Юрий Николаевич Ульянов, мой бывший сотрудник по ПНИЛ ЗА (энтузиаст радиоакустического и акустического зондирования, для которого это направление стало делом всей его жизни), а неофициальным — Яков Соломонович Шифрин.

Большой проблемой при написании диссертации было отсутствие у меня дома компьютера, что существенно затягивало расчеты и оформление большого числа рисунков. Все изменилось после того, как мы с моим «шефом» в 2000 г. по приглашению профессора Петера Эденхофера поехали в командировку в Германию. Яков Соломонович был приглашен для чтения лекций, а я поехала с ним в качестве специалиста по компьютеру и переводчика. Именно благодаря этой поездке у меня появился первый персональный компьютер, и дело с диссертацией пошло веселей.

Но не только эта моя мечта была воплощена в жизнь с помощью Якова Соломоновича. Во время своей годичной безработицы я мечтала когда-нибудь поехать со своим докладом на международную конференцию по радиоакустике и акустике куда-нибудь в дальнее зарубежье. Но, даже работая, как это можно сделать при моей более чем скромной зарплате? Благодаря Я.С. я узнала, что некоторые конференции проводятся при подде-

ржке спонсоров, рекламирующих на этих конференциях свою продукцию. Я решила попытаться счастья и буквально под диктовку моего Учителя написала письмо в оргкомитет конференции, которая в 1998 г. должна была проходить в Вене. Сколько же было радости, когда в ответ на мое письмо получила ответ, смысл которого был примерно таков: «Вы только приезжайте к нам, а мы пропасть вам не дадим!» И действительно, потратив тогда на дорогу всего 120 долларов, я съездила на «свою» конференцию и там впервые выступила с докладом на английском языке. Теперь я езжу на эти конференции каждые два года в разные страны, то благодаря помощи спонсоров, то за свой счет, и меня эти поездки очень радуют. Ведь помимо общения с людьми, занимающимися той же тематикой, много радости доставляет этот цивилизованный вид путешествий сам по себе.

В любви к путешествиям мы с Яковом Соломоновичем совпали. Выезжать за рубеж он стал только тогда, когда ему было уже 70. Как только появилась возможность, он снял с себя допуск к секретной информации и начал ездить на зарубежные конференции одним из первых в нашем институте. Первая из них была в Польшу, потом в самое трудное время — в 1991 и 1992 гг. — в Японию, где его принимали как самого почетного гостя. После этого он объездил почти два десятка стран, включая США и Канаду. А в 2002 г., когда я собиралась поехать в Италию на две «свои» конференции по дистанционному зондированию атмосферы, Яков Соломонович предложил мне поехать туда вместе. Я, конечно, с радостью согласилась: ведь это был первый случай, когда мы с ним стали соавторами докладов. Дело в том, что тематика дистанционного зондирования атмосферы с помощью систем радиоакустического и акустического зондирования находится на стыке наук, включая радиофизику и метеорологию. И, конечно, немалую роль здесь играет антенная наука.

Рим нас поразил своими масштабами и красотой. Несмотря на то, что в июне стояла небывалая для этого месяца 40-градусная жара, мы много ходили по городу и старались увидеть как можно больше. Побывали в Колизее, в музеях Ватикана, соборе святого Петра, съездили в древний город Остию под Римом, искупались в Тирренском море с его черными, видимо, образовавшимися после извержения вулкана, пляжами.

Сейчас забавно вспомнить, что из Рима мы вернулись 30 июня, а защита моей кандидатской состоялась 5 июля.

А сразу после того, как документы были отправлены в ВАК, я, по просьбе Якова Соломоновича, присоединилась к его работе над книгой, которую он задумывал написать уже давно, но все никак не мог выбрать для нее время. Ведь, кроме написания собственных статей и монографий, на нем лежала колоссальная работа по вычитыванию большого количества статей, кандидатских и докторских диссертаций всех тех, кто его об этом

просил. (Может, я и повторяюсь, но я точно знаю, что далеко не каждый ученый, тем более, такой, как Яков Соломонович, — с мировым именем, будет тратить на это столько времени и делать это с такой добросовестностью.) А книгу он задумал написать о жизни своей семьи, своих друзей и коллег. Основной идеей, которой он при этом руководствовался, было увековечить память о родителях, братьях и сестрах, учителях (которым он признателен всю свою жизнь) и близких друзьях. Назвав книгу «Как мы жили», большие надежды Я.С. возлагает на то, что она будет интересна всем, с кем он был связан по жизни, а главное, его детям, внукам и всем последующим поколениям. В ней он рассказал все, что осталось в его памяти, начиная с раннего детства. Но и не только в памяти! Поразительно то, что, пройдя через войну и послевоенные переезды, да и просто за столько десятилетий он сохранил множество материалов, которые емугодились при написании книги: массу писем, школьных документов и т.п., и даже свою ленинградскую пионерскую газету, из которой можно узнать об особенностях обучения в школе в тридцатые годы. Я вообще люблю мемуарную литературу, но, конечно, такую, которая написана так, чтобы ее было интересно читать. Как первый читатель, могу сказать, что мне было очень интересно читать главы, которые Яков Соломонович давал мне «на вычитку». (Вот когда я смогла отплатить добром за добро! Я имею в виду вычитывание Яковом Соломоновичем моей диссертации.) Иногда, сидя одна у компьютера, я начинала смеяться от неожиданной легкой и доброй шутки. Когда он писал о военном времени, я часто вспоминала своих родителей-ветеранов войны, особенно маму: ведь ей, как и всем женщинам на войне, было особенно тяжело. А Яков Соломонович во время войны командовал батареей, личный состав которой, в основном, состоял из женщин. Описание жизни в послевоенное время мне тоже было близко. Так уж случилось, что вся моя жизнь прошла в Харькове, куда Яков Соломонович приехал почти тогда, когда я родилась, и с тех пор более тридцати лет проработал в Академии им. Л.А. Говорова. Будучи дочкой военного, тоже много лет проработавшего в Академии, в семье я не только слышала много имен папиных сотрудников, но и ходила вместе с их детьми в детский сад, музыкальную студию при академии, ездила с ними в пионерский лагерь, ходила на концерты и в кино в клуб академии и т.д. В общем, это было похоже на жизнь в общем для нас военном городке, только «городок» этот находился в центре Харькова. Общие темы для разговора у нас с Яковом Соломоновичем оказались и благодаря тому, что мы с ним давно стали сотрудниками одного института: я пришла работать в ХИРЭ в 1973 г., а Я.С. — в 80-м.

Таким образом, получилось, что вся предыдущая жизнь подготовила меня к тому, чтобы я смогла быть полезна Якову Соломоновичу и в его многотрудной работе, и по жизни, и даже при на-

писании книги «Как мы жили». Когда подошло время книгу издать, Яков Соломонович обратился в харьковское издательство «Контраст», которое, к сожалению, не имеет права на продажу. А это значит, что не только издавать книгу надо было за свой счет, но и распространять ее тоже надо было самим. И эту большую работу Я.С. выполнил довольно быстро, разослав книгу в подарок своим родственникам, друзьям, ученикам и во многие библиотеки. Немало книг ушло зарубежным друзьям, для которых я перевела на английский язык те места в книге, которые их касаются.

С тех пор прошло уже больше пяти лет, но до сих пор к нам обращаются с просьбой о книге. Хорошо, что она у нас есть в электронном варианте, поэтому теперь, когда «твердых копий» уже не осталось, все желающие получают ее по электронной почте.

Книга была издана в 2004 г., но за те три года, которые Яков Соломонович ее писал, были еще и другие события в нашей жизни. Так, в 2002 г. мы с Я.С. ездили на Генеральную ассамблею Международного радиосоюза (URSI) в Маастрихт (Нидерланды), куда Я.С. пригласили выступить с заказным докладом. Эта поездка дала нам возможность посмотреть несколько таких сказочных городов, как Дельфт, Гаага, Лейден, Утрехт, а также гораздо менее уютный Роттердам с его небоскребами.

А в 2003 г. Якова Соломоновича пригласили на конференцию в Китай. Побывать в такой экзотической для нас стране только три дня, которые длится конференция, было бы неразумно. Поэтому Я.С. договорился, что поездка продлится почти две недели, а за это он прочитает лекции в нескольких китайских организациях. Условием Якова Соломоновича было и то, что я тоже поеду с ним для оказания помощи в подготовке презентаций на английском языке. Самое удивительное — это то, что поехал Я.С. в Китай, чувствуя себя после проведенной ICATT'03 весьма неуверенно: все-таки сказалось сильное напряжение в течение нескольких дней, вследствие чего спланированная была поездка оказалась под большим вопросом. Но «где наша не пропадала!» Шифрин не был бы Шифриным, если бы он отступился. И мы поехали. По предварительной договоренности с хозяевами, за то, что мы там находились в течение 12 дней в прекраснейших университетских гостиницах, Якову Соломоновичу надо было, помимо заказного доклада на конференции, прочитать 7 лекций в Шанхайском и Нанкинском университетах и в одном из НИИ в Пекине. Неважное самочувствие на этих лекциях вначале еще чувствовалось, но со дня на день оно улучшалось, и, соответственно, лекции становились все лучше и лучше. А лекция, которую Я.С. прочитал в Пекине, заставила раскрыть рты не только китайских слушателей, но и меня — она была прочитана блестяще! Вся поездка была, конечно, незабываемой, и в том, что она оказалась успешной, главную роль сыграл видный ученый из Юго-Вос-

точного китайского университета в Нанкине Вен Шун Цан. Как и Петер Эденхофер во время нашей командировки в Германию, он продумал все до мелочей и сделал все, чтобы нам было хорошо и интересно. Одним из самых незабываемых китайских впечатлений была организованная Вен Шуном поездка в «маленький городок» (с населением в 1 миллион жителей) Янцоо с посещением частного парка с озером, по которому проплывают большие красочные лодки с загримированными и одетыми под старину оперными артистами.

Забегая вперед, скажу, что спустя 6 лет, в 2009 г., Вен Шун со своей женой Цу Рэй нанес нам «ответный визит», только не в Харьков, а в Москву (на конференцию) и Санкт-Петербург. Собираясь на конференцию PERS в Москву, он попросил Якова Соломоновича помочь ему сделать срок действия визы достаточным для того, чтобы они с женой смогли посмотреть еще и Санкт-Петербург, и Киев. Виза, которую им организовали москвичи — хозяева конференции, не давала им такой возможности. Хоть и не сразу, но Якову Соломоновичу удалось найти человека (директора Института радарной метеорологии А.С.Солонина), который организовал выдачу российской визы для наших китайцев. Виза в Украину была получена с помощью начальника отдела международных связей нашего университета С.И.Петрова. Вся процедура и у нас отняла довольно много времени. Но, в конце концов, визы были получены, и мы встретились с Вен Шуном и Цу Рэй в Санкт-Петербурге. Для того чтобы облегчить им тяжесть их расходов, Яков Соломонович предложил им жить в квартире своего брата Кусяеля Соломоновича на Невском и во всем поступал как очень гостеприимный хозяин. Он в деталях расписал план показа его любимого города и не успокоился, пока не показал все, что наметил. Должна сказать, что физически выдержать пешие прогулки по Невскому с ответвлениями на другие интересные улицы и мне было нелегко, а как же он сам все это выдержал? А мы еще побывали и в Петергофе, и в Пушкине... Но как же там красиво!... Помимо этого, Якову Соломоновичу очень хотелось повести наших друзей куда-нибудь в театр или на концерт. Проходя мимо филармонии, мы увидели, что там проходит организованный Еленой Образцовой концерт, участие в котором принимали лауреаты итальянских конкурсов оперного искусства. Все они поют на лучших оперных сценах Италии, включая миланскую «Ла Скала». Не знаю, было ли в моей жизни более значительное музыкальное впечатление. Мы, правда, так и не поняли, понравился ли концерт нашим китайским друзьям: ведь никаких чувств они при этом не выразили. К тому же, как сказал нам Вен Шун, их в социалистическом Китае больше воспитывали на русской музыке с убеждением, что западная музыка — это буржуазная музыка и она вредна для воспитания. А этот концерт был составлен только из произведений итальянских композиторов... Для меня во всей этой истории

самым важным было то, что с Яковом Соломоновичем наши впечатления совпали.

А для того, чтобы выразить благодарность всем, кто помогал нам в получении российской визы для Вен Шуна и Цу Рэй, Яков Соломонович организовал поездку в Воейково, где располагается Институт радарной метеорологии (ИРАМ), возглавляемый А.С. Солонинным. Александр Сергеевич рассказал высоким гостям о том, чем занимается его ИРАМ и каких успехов они достигли. Оказалось, что коллектив института маленький — всего 50 человек, но о нем знают во многих странах благодаря прекрасной организации и высочайшей производительности труда. Большую роль в этом сыграла кадровая политика А.С.: у него много талантливой молодежи, которая приходит к нему работать прямо со студенческой скамьи, да и настоящие домашние обеды для сотрудников за счет института тоже, наверное, вносят свой вклад в общий успех.

Для Я.С. это была еще и поездка в места, где раньше работал его брат Кусиель Соломонович Шифрин, с которым они всю жизнь очень дружны. Сейчас Кусиель Соломонович живет в США, куда он переехал работать в 74-летнем возрасте. А в 2008 г., когда К.С. исполнялось 90 лет, Яков Соломонович сделал все, чтобы юбилей этого выдающегося ученого не прошел незамеченным: выпустил юбилейный сборник журнала «Успехи современной радиоэлектроники», издал книгу «Кусиель Соломонович Шифрин. Ученый, Учитель, Человек» и добился того, чтобы во многих солидных журналах не только России, но и США вышли персоналии, посвященные юбилею К.С.

Яков Соломонович очень гордится тем, что смог сделать еще одно доброе дело, связанное с братом, которое состояло в следующем. Двоюродный брат Елизаветы Марковны — жены Кусиеля Соломоновича — Борис Львович Айзенберг во время Великой Отечественной войны вначале воевал в составе партизанского полка под Ленинградом. После разгрома полка он попал в плен к немцам, чудом избежал расстрела, бежал из лагеря и около двух лет воевал в белорусской партизанской бригаде, комиссаром которой был Петр Миронович Машеров. Обо всем этом он написал очень правдивую книгу, которую при его жизни, в советское время, издать было невозможно. Перед смертью он оставил рукопись у Кусиеля Соломоновича. Найдя эту рукопись в ленинградской квартире брата, в которой полтора десятилетия никто не жил, Яков Соломонович подготовил книгу «33 месяца в тылу врага» к печати и издал ее. Помимо этого, он размножил рисунки Бориса Львовича, сделанные им в партизанском отряде, на одном из которых запечатлен и П.М. Машеров. Замечу, что, как и книгу «Как мы жили», книги о брате и «33 месяца в тылу врага» Я.С. издал в том же издательстве «Контраст» тоже за свой счет и разослал их в подарок друзьям, родственникам, а также во многие крупные библиотеки мира,

НИИ и вузы, с которыми так или иначе была связана жизнь К.С. Шифрина и Б. Л. Айзенберга. Несколько экземпляров книги «33 месяца в тылу врага» Я.С. отправил в музеи Белоруссии, Ленинграда и Москвы, собирающие материалы по истории Великой Отечественной войны. Работа по нахождению адресов всех этих организаций сама по себе потребовала от Я.С. немалых усилий, но, тем не менее, он все это довел до конца.

Мне кажется, каждый, уходя из этого мира, был бы счастлив (если можно так сказать), зная, что есть на Земле кто-то, кто не оставит его в неизвестности, выполнит хотя бы частично то дело, которое он считал очень важным и полезным для людей. Яков Соломонович — это именно такой человек. Он не успокоился, пока не опубликовал сначала в своей книге «Как мы жили», а потом и в «Украинской технической газете» (выходящей тиражом в 75 тысяч экземпляров) рассказ об изобретениях своего друга Израиля Манзона, раз после его ухода из жизни ничего уже нельзя было сделать для того, чтобы внедрить его изобретения. Именно Яков Соломонович добился того, чтобы харьковскому семинару, основанному известным физиком Н.А. Хижняком, присвоили его имя, а московскому дифракционному семинару, основанному Я.Н.Фельдом, — имя этого прекрасного ученого. К посмертному 90-летнему юбилею Фельда Я.С. организовал переиздание его замечательного учебника по антеннам. Много времени и усилий Я.С. уделил тому, чтобы помочь своему другу А.Л.Гутману (живущему сейчас в США) в его попытках реализовать в СНГ свои интересные предложения, и т.д. и т.п.

Так получилось, что сегодня мы с Яковом Соломоновичем стали сотрудниками сравнительно нового подразделения нашего университета — научно-исследовательского центра интегрированных информационных радиоэлектронных систем и технологий (НИЦ ИИРЭСТ), возглавляемого Александром Ивановичем Доховым. Характерны для этого коллектива не только злободневная тематика решаемых задач, включающих разработку интегрированной информационной системы обеспечения управления подвижными объектами в масштабе всей Украины, метеорологического радиолокатора и альтернативных источников топлива, но и общая доброжелательная атмосфера, которая всегда способствует успеху дела. Для меня это еще одна возможность приложения моих знаний: востребованными здесь оказались мой опыт исследований в области дистанционного зондирования пограничного слоя атмосферы и знание английского языка. А Яков Соломонович все так же продолжает свою многоплановую деятельность, стараясь при этом оказать максимальную помощь сотрудникам НИЦ ИИРЭСТ в решении стоящих перед ними задач.

Сегодня, когда Якову Соломоновичу уже 90, побыв какое-то время на одном месте, дома, он готов опять лететь, ехать, идти, встречаться с людьми.

ми. И люди тоже едут и идут к нему. Особенно его радует, когда к нему приходят молодые способные люди, вселяющие надежду, что даже сейчас, в не самое легкое для науки в Украине время, дело всей его жизни может перейти в хорошие руки.

В заключение хочется заметить, что еще в свои 85 Яков Соломонович сказал, что это последний юбилей, который он отмечает, Несмотря на это, когда «на горизонте забрезжило» 90-летие, нашлись люди, живущие в дальнем зарубежье, которые сказали: «23 апреля 2010 г. мы к Вам приедем!» Ну, что ж, значит, надо готовиться... Ведь юбилеи таких людей, как Я.С.Шифрин, — это уже не их личное дело, а внеочередная конференция.

В ПОЛЕ ПРИТЯЖЕНИЯ

А.И. МАЛЕХАНОВ

Поскольку материал нашей статьи «Оптимальная пространственная обработка многомодовых сигналов в условиях рассогласования» готовился к этому специальному выпуску журнала, посвященному Якову Соломоновичу Шифрину в связи с его 90-летием (!), не могу отказать себе в удовольствии написать еще несколько теплых неформальных фраз о юбиляре.

Не открою никаких континентов, если скажу коротко, что Я.С. — уникальный ученый и человек. Об этом знает все антенное сообщество, но сказать об этом своими словами все равно хочется.

Если по порядку, то уникальность Я.С., конечно же, в том, что он — зачинатель целого ряда ключевых направлений в современной теории и технике антенн. Наверное, статистическая теория антенн — самое значительное его начинание, быстро пустившее ростки и корни буквально по всей антенной науке. Его пионерская монография оказалась не просто первой в мировой литературе, но это был буквально прорыв в новую область. И даже не просто прорыв, но сразу же глубокое продвижение, за которым, как за расчищающим завалы бульдозером, уже легко идти и подбирать из отвалов отдельные куски драгоценной породы. Порода эта действительно оказалась ценной, достойных задач хватило на многих, и разработали это открытое Я.С. месторождение общими мировыми усилиями основательно. Это совсем не частый сюжет, чтобы не только впервые, но вот так сразу глубоко и продуктивно!

Уникальность Я.С. и в том, что он никогда не ставит себя в заслуженное положение живого классика, а собеседника — в любое из противоположных классики положений (почитателя, обожателя, просителя, а то и завистника...). Напротив, его самое естественное и привычное положение — внимательного и доброжелательного товарища по цеху.

Хорошо помню, как впервые встретил Я.С. и свой первый разговор с ним. Дело было в 1991 году на узкой полосе галечного пляжа под Туап-

Только съезжаются на нее не только коллеги-антенщики, но и друзья, и родственники (из Германии, например, собирается приехать целая команда «во главе» с первым правнуком Я.С.) и вместо трудов конференции готовятся юбилейные выпуски 5 издающихся в Харькове, Киеве и Москве научных журналов, куда со всего мира присылают статьи и воспоминания друзья и коллеги Я.С.

А мне хочется выразить благодарность дорогому Якову Соломоновичу за то, что он сделал мою жизнь такой наполненной и интересной, сердечно поздравить его с юбилеем и пожелать ему сохранить на многие годы этот огонь в душе, делающий его таким молодым и целеустремленным!

се, того самого пляжа, где харьковчане проводили свои регулярные в те годы осенние конференции по обработке случайных сигналов и полей (конечно, не буквально на пляже, но пляж был очень существенным элементом инфраструктуры тех замечательных конференций в «Электроне»). Я тогда только начинал, под руководством Владимира Ильича Таланова, свои занятия в области антенн с обработкой сигналов, причем именно в случайных средах, и уже немного «имел, что сказать». Собственно, возможность познакомиться и что-то обсуждать лично с Я.С. была одним из стимулов поехать на ту конференцию. Не найдя возможности подойти к Я.С. в перерывах заседаний (это было не так просто, я был не одинок в своих желаниях), решил сделать это на пляже. Мы оба были в плавках, я вежливо подсел рядом на теплую гальку, и разговор сложился как-то сразу и обо всем... В качестве безотказного пароля, я передал Я.С. привет от В.И. (я уже знал об их знакомстве и взаимной симпатии), потом рассказал немного о наших задачах, постановку и подходы к которым Я.С. «раскусил» очень быстро. Постепенно наш разговор стал шире, коснулся многолетних и дружеских связей Я.С. с нижегородской (а тогда еще горьковской) школой радиофизики. Оказалось, что Я.С. знает в ней многих, и потому спрашивал меня с неподдельным интересом о научных делах и здоровье своих коллег-горьковчан, рассказывая попутно истории своих связей с ними. Понятно, что мне это было не только интересно и поучительно, но и просто приятно, даже лестно. Возвращаясь на заседание, Я.С. возложил на меня ответственную (и тоже приятную) миссию передать его теплые приветствия целой команде моих старших коллег в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН и особенно в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ), откуда и начинались горьковские работы в области антенн и антенных измерений... Еще одна очевидная грань уникальности Я.С., которая кажется мне тоже очень важной — это то, что

ему удалось «сломать барьеры» и вдохнуть жизнь, казалось бы, в ушедшую вместе с Советским Союзом традицию Всесоюзных (часто тогда называемых «Пистолькорсовскими») конференций по антеннам. Последнее десятилетие уже «Шифринские» ICATT играют, фактически, роль тех все-союзных конференций. А кто еще мог бы начать кропотливо собирать те разбросанные камни? Кто еще мог бы сделать это, кроме самого Я.С., со всем его научным авторитетом, известностью и чисто человеческой привлекательностью? Пожалуй, что никто... Но это совсем не значит, что было легко самому Я.С. — взвалить на себя эту ко многому обязывающую ношу и сделать уже привычным график нечетных годов для регулярных сборищ всех «антеннщиков» (один из любимых терминов Я.С.) под знаменами ICATT. И то, что Я.С. так раскрутил и продолжает вдохновлять эту очень нужную для сообщества традицию, без всякого преувеличения, можно назвать его личным научно-организационным подвигом.

Мне не довелось самому участвовать в тех всесоюзных конференциях, но начав свою антенную жизнь уже с упомянутых харьковских конференций под Туапсе и затем участвуя в ICATT, я понял для себя главное, для чего вообще нужны научные конференции — для того, чтобы научные люди чувствовали себя не просто писателями

мудреных формул или вершителями сложных экспериментов, но людьми, делающими общее интересное дело... С тех пор прошло уже некоторое количество лет (пусть и не так много в масштабе Я.С.), но это ощущение и даже критерий хороших конференций сохранились во мне. И сейчас мне особо приятно отметить тот факт своей биографии, что я был практически на всех ICATT, стараясь всячески поддерживать Я.С. в его стремлении собирать нас, более молодых идвигающихся по своим научным путям антеннщиков, и что ни разу меня не покинуло это светлое чувство единения и научной дружбы!

Наконец, уникальным мне кажется и такое эффективное долголетие, которое демонстрирует Я.С. Для нас, кто моложе — это как заоблачная высота, как Эверест. То есть теоретически такая вершина как будто доступна, но практически — иди и попробуй! И еще мне кажется, что все, кто попал в поле мощного притяжения Я.С. и имеет счастье быть рядом с ним, пусть иногда и даже изредка, могут быть благодарны природе за то, что она щедро одарила Я.С. удивительным и редким талантом — жить интересно, жить для людей, и жить долго. В этом повезло всем нам!

Здоровья и долгие лета Вам, дорогой Яков Соломонович!

ПАТРИАРХ АНТЕННОЙ НАУКИ

Б. М. МИНКОВИЧ

С доброжелательным, простым в обращении и жизнерадостным, известным ученым и педагогом Я.С.Шифриным я по-настоящему познакомился где-то в 1962 г.: Он согласился быть вторым оппонентом по моей кандидатской диссертации. Первым был д.т.н. А.Л. Дробкин. Как видите, это было очень давно, когда Я.С.Шифрин еще не был д.т.н., но многие годы уже был начальником кафедры антенн и распространения радиоволн Артиллерийской Радиотехнической академии в г. Харькове.

До этого были случайные встречи и знакомство по научным работам. Когда я появился в училище ХВАИВУ в 1957 г., кафедрой командовал Ю.В. Шубарин — прекрасный человек, к большому сожалению, рано ушедший сначала из училища, а затем и в мир иной. И мы — мой коллега Ю.И. Давидчевский и я — решили вырастить к.т.н. по антеннам из одного из наших сотрудников. Он был уже подполковником и старше нас. Полученные нами экспериментальные данные плохо лезли в теоретические ворота. Тогда я вспомнил статистическую теорию антенн, одним из законных отцов которой был Я.С., и, наведя статистическую тень на антенный плетень, нам удалось нашего сотрудника сделать к.т.н. Но он скоро сбежал от нас, уехав под Москву.

Вернемся к оппонированию. В диссертации меня больше всего беспокоила эксперименталь-

ная часть, она была не очень солидная — в условиях нашей кафедры в училище имени Маршала Н.И.Крылова, не имевшей научной лаборатории, провести приличный эксперимент было весьма сложно. Но Я.С. меня быстро успокоил, он на него почти не обратил внимания и даже намекнул, мол, зачем я его вообще делал. У Якова Соломоновича была такая простецкая манера общения, что вначале она меня сильно смущала. Я привык к более строгим, официальным отношениям. Даже своих дипломников я звал по имени-отчеству. Но потом я понял, что для Я.С. — это просто естественная манера поведения. В течение многих лет мы с ним, к сожалению, встречались не часто. Но все же встречались. Поводами для подобных встреч были: 1) антенные семинары в Харькове, на которых я бывал редко. Во-первых, потому что наша кафедра, которой после Шубарина заведовал Н.А. Кубанцев, мало занималась антенными исследованиями. А во-вторых, и потому, что училище стало ракетным и очень-очень секретным; 2) конференции в Москве, которые были настоящими праздниками для всех антеннщиков Советского Союза; 3) дни рождения и юбилеи самого Я.С., которые проходили, да и проходят как радостное событие для знакомых и друзей — такую ему удается всегда создать атмосферу; 4) иногда Я.С. приглашал меня в оппоненты по диссертациям тех своих аспирантов, которые развивали статистическую теорию антенн.

Я.С. Шифрин — непосредственный участник Великой Отечественной войны, участник ее кровавых боев. Благодаря этому, воздействие его личности на меня имеет особое значение. В молодости в каждом из нас сильны эгоистические чувства, тебе хочется, чтобы мир вращался вокруг тебя. Не всегда обращаешь внимание на других людей, которые нуждаются в твоём внимании и помощи. Мне часто пришлось общаться с участниками боевых действий ВОВ. Среди них оказались жизнерадостные и молодые люди. В их числе был и Я.С. И вот однажды, призадумавшись, я представил себе, что все они в годы войны были очень молоды, перед ними была вся жизнь, но каждый день мог быть последним. И я установил для себя нравственный закон — всегда относиться к ним с глубочайшим уважением и всегда оказывать им содействие и помощь. И вот уже лет 40 я следую этому принципу, и душе моей стало лучше.

Якова Соломоновича интересовали мои успехи и в области сбора грибов, ему даже хотелось сходить для этой цели в лес. Но я был еще «молод», мои походы были многокилометровые, и я боялся брать Я.С. с собой. Хотя пару раз, мы гуляли с ним по лесопарку. Он, как и я, любит природу. Будем относиться друг к другу, как и к природе, бережно.

В конце 70-х г. мне удалось показать, что ряд из Дольф-Чебышевских диаграмм образует полную систему многочленов в среднем по области боковых лепестков. Это было кое-что новое. И Я.С. пришел мне на помощь: Он через член-кора АН СССР Л.Д. Бахраха — своего близкого друга, а тот через академика Ю.Б.Кобзарева помог опубликовать работу в ДАН СССР. Это событие мне приятно до сих пор.

В 1993 г. был организован Харьковский военный университет (ХВУ), в котором были объединены Академия имени Маршала Говорова и наше училище, и я попал преподавателем на кафедру учеников Я.С., с некоторыми из которых я был знаком и раньше. Среди них были В.И.Замятин, Л.Г.Корниенко, В.А. Усин, А.Ф.Маслов и др. Хорошо помню, как в знак признания заслуг Я.С. по приказу начальника ХВУ была открыта аудитория-лаборатория имени Я.С.Шифрина. На кафедре было изобилие д.т.н., но большинство из них, увы, желали стоять грудью за чужой спиной. Из-за этого, когда в 2000 г. начальником кафедры стал человек, возможно, неплохой, но к.т.н. и к тому же человек болезненный, жизнь на кафедре стала замирать и авторитет кафедры антенн — детища Я.С. — с ее наиболее высоким тогда в Украине (а, возможно, и в СНГ) потенциалом, стал, к моему огорчению, быстро падать. Уничтожить кафедру легко, вновь создать — очень трудно. На это нужны многие годы, не говоря уже о финансовой стороне дела.

В конце 90-х годов благодаря Я.С. в ХВУ стали поступать подлинники двух антенных американских изданий «Transactions on Antennas and Propagation» и «AP Magazine». Если первое из них — известное нам чисто научное издание, то со

вторым мы почти не были знакомы. Этот журнал помимо научных статей публикует методические материалы и много интересной информации о жизни мирового антенного сообщества, о предстоящих и прошедших антенных конференциях с фотографиями участников, на которых мелькали и харьковчане, в том числе и часто Я.С. Мне запомнилась методическая статья на тему преподавания электродинамики, где высказывалась крамольная мысль, как бы преподавать эту науку без роторов, дивергенции и т.д., ведь инженеры в своей практической деятельности их никогда не используют. Мы дескать выстраиваем сложные строительные леса, а затем выбрасываем как ненужные. В журнале попадались и стихи известных авторов, помню один из них после разрушения башен-близнецов в Нью-Йорке 11 сентября, в котором автор отмечает, что цифры 9 и 11 в совокупности очень знаменательны в истории человечества. В частности, хрустальная ночь в Германии произошла 9 ноября, и вроде Иерусалимские храмы тоже были разрушены в одну из этих дат.

В последние 20 лет творческая и деятельная натура Я.С. вырвалась на международные научные просторы. Если ранее во времена СССР все всесоюзные антенные конференции проводились в Москве и были закрытыми, то после распада СССР благодаря Я.С. аналогичные конференции (при чем открытые) стали проводиться в Украине. Харьков стал центром антенной жизни. Даже в 90-е годы, когда инфляционные процессы в экономике привели к разобщению людей и научных коллективов, когда не хватало средств на самое необходимое, Я.С. удавалось собирать в разных городах Украины многих антенщиков, которые были рады рассказать друг другу о своих научных достижениях, да и просто возможности человеческого общения. На эти конференции, помимо антенщиков из СНГ, приезжают и многие видные специалисты из дальнего зарубежья. Труды их издаются на английском языке и расходятся по всему миру. Низко поклонимся Я.С. за его деяния.

Но не думайте, что Яков Соломонович на организации конференций успокоился. Он взял, да и написал и издал в 2004 г. книгу своих воспоминаний «Как мы жили». Один из экземпляров книги с дарственной надписью он подарил библиотеке им. Короленко в Харькове. Я нашел ее в каталоге, выписал и прочел. Солидный, с иллюстрациями, том. Книга понравилась, особенно описание довоенной, военной и послевоенной жизни до развала СССР. Из всего этого я сделал вывод: написал воспоминания, издал — подари солидной библиотеке, иначе все канет в Лету.

Последние годы 23 апреля я довольно регулярно появляюсь в ХНУРЭ с целью поздравить Я.С. Шифрина с днем рождения, передать ему заряд бодрости на очередной год, да и пожелать дожить до 120 лет. После каждого такого посещения и самому также хочется жить и трудиться.

Юбилару — многие, многие лета.

НАШ ЯКОВ СОЛОМОНОВИЧ

В.А. ОБУХОВЕЦ, Ю.В. ЮХАНОВ

Мы узнали о Якове Соломоновиче ещё в период студенческой юности по его книге «Вопросы статистической теории антенн» и многочисленным публикациям в научных журналах. Для нас, провинциальных студентов и аспирантов, он всегда стоял в одном ряду с такими выдающимися учеными, как А.А. Пистолькорс, Л.Д. Бахрах, Г.Т. Марков, Е.Н. Васильев, В.В. Никольский и др. и являлся (как и сейчас) непререкаемым авторитетом в теории антенн и радиолокации.

Впервые «живьем» мы встретились с Я.С. в Таганроге осенью 1983 г. на защите кандидатской диссертации сотрудника нашей кафедры «Антенн и радиопередающих устройств» (АиРПУ) А.И. Семенихина. По просьбе нашего заведующего кафедрой Б.М. Петрова, он тогда выступил в качестве первого оппонента. В то время один из нас (Юханов Ю.В.) только что был избран на должность доцента, а на следующее утро первой парой у него была лекция. Интуиция подсказывала, что на лекцию с контрольным посещением должен прийти Б.М. Петров (и предчувствия меня, как оказалось, не обманули). Поэтому на банкет после защиты я не пошел. На следующий день мои товарищи мне сообщили, что Я.С. по поводу моего отсутствия сказал следующую фразу «Зачем нужен преподаватель, который после выпитого стакана водки не сможет на завтра превосходно прочитать лекцию?». Эту фразу я запомнил на всю жизнь.

Второй раз Яков Соломонович «напомнил» о себе, когда я (Ю.Ю.) приехал в г. Москву в МНИ-ИП к Л.Д. Бахраху в 1985 г. с целью заключения договора о НИР. Увы, Льва Давидовича я в Москве не застал. Как сказали мне его сотрудники, он уехал в Харьков на юбилей Я.С. Шифрина. Тогда я и узнал, что Яков Соломонович и Лев Давидович — по жизни большие друзья.

В 1989 г. Яков Соломонович приехал в г. Таганрог для участия во всесоюзном совещании по «Комплексной программе «Излучение», которое проводилось на базе отдыха завода «Прибой», располагающейся на живописнейшем берегу лимана реки Миус. В Таганрог тогда съехалось много видных ученых СССР: Васильев Е.Н., Корогодов В.С., Поповиди-Заридзе Р.С., Еремин Ю.А., Ерохин Г.А. и др. Из-за суматохи, связанной с приемом гостей, организацией заседаний и других организационных дел, я (Ю.Ю.), являвшийся тогда заместителем председателя совещания (Б.М. Петрова) мало что запомнил. Но приезд Якова Соломоновича я запомнил отчетливо, ибо мне было поручено его опекать.

Хорошо запомнились нам и международная научная конференция ICATT'1999 в сентябре 1999 г. в г. Севастополе, слегка уставший, но довольный Яков Соломонович — её руководитель

и его неизменная спутница Нона Григорьевна. Помним совещание председателей секций, где Яков Соломонович попросил нас «не выпендриваться», пытаясь говорить на плохом английском, а вести заседания на русском языке, тем более, что у каждого иностранца был личный переводчик из студентов, хорошо знавших английский язык. Особо теплое впечатление на нас произвел банкет, на котором Яков Соломонович, вместе с киевлянами при поддержке других участников конференции пели русские и украинские песни. Конференция собрала выдающихся ученых России, Украины, ближнего и дальнего зарубежья и прошла с большим успехом (впрочем, как и все МНК, организованные Я.С.). На этой конференции хозяева подарили Якову Соломоновичу адмиральскую фуражку, признав за ним первенство среди антенщиков. На этой фуражке с удовольствием расписались почти все участники конференции.

С 2001 г. Яков Соломонович регулярно посещал Таганрог, принимая самое активное участие в конференциях (МНК) «Излучение и рассеяние электромагнитных волн — ИРЭМВ-2001, 2003 и 2005», являясь бессменным сопредседателем её программного комитета вместе с Б.М. Петровым и Л.Д. Бахрахом. Эти конференции мы всегда проводили в июне—июле нечетных годов (2001—2009 гг.), а осенью (в сентябре) мы, как правило, ехали с ответным визитом на Международные конференции ICATT или UWBUSIS к Я.С. в г. Севастополь или г. Киев (2005 г.).



В гостях у Я.С., сентябрь 2007 г. — г. Севастополь (слева направо: Н.Г.С.Максимова, Я.С.Шифрин, А.В. Юханова, Ю.Ю.Юханов, А.Б.Гершман, Кейс ван'т Клоостер)

Конференция ИРЭМВ-2001 оказалась самой представительной из всех проводимых в г.Таганроге. На неё съехались такие ученые, как Л.Д.Бахрах, Я.С.Шифрин, Е.Н. Васильев, Д.М. Сазонов, Д.И.Воскресенский, Г.П.Синявский и многие другие. Заседания проводились в корпусах ТРТУ. Один из дней конференции проходил на пляже спортивного лагеря ТРТУ «Скиф» в по-

селке Рожок на берегу Азовского моря. Подобного рода встречи «под шашлычок» пользовались неизменным успехом.

Обаяние и невероятно широкий круг интересов Якова Соломоновича, его эрудиция притягивали к нему участников конференции. Неизменно он оказывался в центре внимания. Не можем не согласиться с Яковом Соломоновичем, что, вероятно, главным на научных форумах являются не доклады, хотя они и очень важны, а личные встречи и беседы в непринужденной обстановке, на научные, да и житейские темы

Подобные встречи объединяют, а зачастую и делают впоследствии участников конференций большими друзьями.



В лаборатории антенн ТРТУ
(слева направо: Ю.В. Юханов, В.А.Обуховец,
Я.С.Шифрин, Е.Н.Васильев)

В 2003 г. Яков Соломонович на МНК ИРЭМБ-2003 в Таганроге на пленарном заседании выступил с лекцией «Методологические основы фундаментального инженерного образования». Эта лекция была посвящена вопросам постановки высшего инженерного образования. В ней обобщен его многолетний опыт преподавательской деятельности. Участники конференции, признавая богатейший опыт Якова Соломоновича в подготовке высококлассных специалистов, поддерживали обеспокоенность Якова Соломоновича возникающими неблагоприятными тенденциями в области фундаментального радиотехнического образования. Поскольку объем лекции оказался значительным и она не могла быть полностью опубликована в трудах конференции, программный комитет счел необходимым опубликовать её отдельной книгой. Нам приятно осознавать, что эта книга, на столь актуальную тему, впервые была опубликована в типографии ТРТУ в 2004 г. и её тираж мгновенно разошелся не только в Таганроге, но и в вузах России. Книга оказалась настольной для многих молодых (и не очень) преподавателей

В 2005 г. Яков Соломонович посещал ТРТУ дважды. Летом в качестве почетного председателя МНК ИРЭМБ-2005.

Он поселился в ректорском домике спортивного лагеря «Скиф». Домик поделен на две части. На второй половине домика жил профессор Сест-

рорецкий Б.В. Как всегда, Яков Соломонович был душой сообщества ученых, поселившихся в лагере. Каждый вечер, как радушный хозяин, Яков Соломонович приглашал всех желающих (желающими оказывались практически все) к себе в домик на различного рода тематические вечера. В отдельные дни по вечерам было не по летнему прохладно (хотя днем практически все купались в море) и в домике Шифрина Я.С. топили камин. Это создавало особый уют, и все мы с удовольствием собирались у Якова Соломоновича.

Осенью 2005 г. за исключительные заслуги в области подготовки инженерных и научных кадров Ученым советом ТРТУ Якову Соломоновичу было присуждено звание «Почетный профессор» нашего университета.



Ректор ТРТУ Захаревич В.Г.
поздравляет Шифрина Я.С. с присвоением
звания Почетного профессора

Выступая с ответным словом на соответствующем заседании ученого совета, Яков Соломонович рассказал о наиболее важных результатах его научной деятельности и о весьма продуктивных контактах с учеными ТРТУ, что вызвало большой интерес у присутствующих.

Следует отметить, что Я.С. всегда всячески поддерживал и поддерживает нас на различных научных форумах, что, в частности, отражено в его книге «Как мы жили».

К сожалению, из-за большой занятости с 2005 г. Яков Соломонович больше не приезжал в Таганрог ни на МНК ИРЭМБ-2007, ни на ИРЭМБ-2009. Но мы практически ежегодно видимся с ним на организуемых им престижных международных научных форумах ICATT и UWBUSIS. Мы очень надеемся и впредь иметь счастье общаться с этим выдающимся человеком, ученым, подвижником и учителем как на наших МНК ИРЭМБ-2011, 2013, 2015 и так далее (как можно далее), так и МНК, организуемых самим Я.С. и его учениками

Хочется накануне столь замечательного юбилея пожелать Якову Соломоновичу крепкого здоровья, неиссякаемого оптимизма, творческих успехов, благодарных учеников, любви родных и близких и много-много счастья по самым разнообразным поводам.

ОТ КОЛЛЕКТИВА ОАО «РАДИОФИЗИКА» (к 90-летию Я.С.Шифрина)

КОЛЛЕГИ ИЗ ОАО «РАДИОФИЗИКА»

В настоящей заметке нам хотелось бы рассказать о многолетних деловых дружеских связях, которые установились у коллектива нашего предприятия с Яковом Соломоновичем. Эти связи завязались практически с момента создания нашего предприятия, т.е. в 1960 г., когда, по инициативе А.А. Расплетина, было создано СКБ-38, призванное решить ряд назревших к тому времени практических задач в области радиолокации. Затем название предприятия несколько раз менялось. Сейчас это — ОАО «Радиофизика». Первым и бессменным директором предприятия до конца своей жизни был Георгий Григорьевич Бубнов. На его плечи легла реализация в производстве ряда смелых проектов. До него производство крупных антенных систем осуществлялось на заводах авиационной промышленности. Однако для этих заводов антенны являлись побочным продуктом. Поэтому и оборудование, и технологические разработки, присущие этим заводам, не могли отвечать в должной мере высоким требованиям к разрабатываемым в лучших НИИ новым крупным антенным системам. Решение этой задачи требовало создания специальных мощных антенных заводов и приданных им специализированных КБ. И за решение этой тяжелой задачи взялся Г.Г. Бубнов. Именно им, по существу, была создана новая отрасль промышленности — крупное антенностроение. Вместе с тем, Г.Г. Бубнов хорошо понимал, что только конструкторская и организационно-производственная деятельность не позволят решить поставленные задачи. Нужна и хорошая наука по разным аспектам теории и техники антенн. Последнее, в частности — требовало самых тесных научных связей коллектива предприятия с лучшими учеными антенной отрасли: с А.А. Пистолькорсом, Л.Д. Бахрахом и со многими другими ведущими антенными специалистами. Среди них почетное место занимает Я.С. Шифрин. С ним у Г.Г. Бубнова установились дружественные доверительные отношения, которые продолжались вплоть до ухода Г.Г. из жизни. Г.Г. Бубнов всегда внимательно прислушивался к его мнению по наиболее острым вопросам разработок, тем более что Я.С. Шифрин — создатель статистической теории антенн (СТА) — является наиболее авторитетным специалистом по вопросам влияния случайностей, неизбежных в производстве и сборке крупных антенн, на характеристики разрабатываемых антенных систем. Значительное внимание Г.Г. уделял укомплектованию предприятия специалистами с большим опытом работы и воспитанию молодых кадров инженеров и научных работников. С этой целью он организовал на базе предприятия мощный информационный центр, регулярно издававший библиографические журналы по широкому спектру вопросов в области прикладной электродинамики, которыми, с благодарностью к Г.Г. Бубнову, широко

пользовались специалисты многих вузов, НИИ и промышленности. Другим аспектом работы Г.Г. по повышению квалификации молодых кадров являлись стимулирование разных молодежных школ и приглашение ведущих антенщиков для прочтения лекций его сотрудникам. В этой работе он пользовался всяческой поддержкой Я.С. Шифрина, которого он пару раз приглашал в Гомель для повышения квалификации своих сотрудников и руководящего инженерного звена Гомельского антенного завода, Яков Соломонович читал им лекции по СТА и другим вопросам теории и техники антенн.



Г.Г. Бубнов и Я.С. Шифрин. Ереван, май 1968 г.

Позднее по инициативе Г.Г. Бубнова и Я.С. Шифрина, возглавлявшего в то время кафедру в Харьковском институте радиоэлектроники, проводились совместные исследования по созданию системы беспроводной передачи энергии на СВЧ. Результаты этих исследований не теряют своей актуальности и сегодня.

Большое значение Г.Г. Бубнов и Я.С. Шифрин придавали проведению регулярных научно-технических конференций по теории и технике антенн. Пожалуй, не было ни одной конференции, где Яков Соломонович не принимал бы активное участие в составе Оргкомитета и как докладчик. И сейчас Яков Соломонович является организатором Международных конференций по теории и технике антенн в разных городах Украины, на которых неизменно выступают специалисты «Радиофизики». Яков Соломонович — один из наиболее авторитетных представителей СНГ на многих международных конференциях и симпозиумах в других странах.

90-летие само по себе — выдающееся событие. Особую гордость всех друзей и коллег Якова Соломоновича вызывают его неисчерпаемый творческий потенциал и неиссякаемая энергия, способствующие дальнейшему развитию антенной науки как в СНГ, так и в мире.

От всей души поздравляем Якова Соломоновича со славным Юбилеем, желаем ему здоровья, долгих лет жизни, новых научных достижений!

ИЗ ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА

Ю.Ю.РАДЦИГ

Я знаю Якова Соломоновича более 35-ти лет, иногда встречаясь на защитах диссертаций или после них, когда он был оппонентом, ну и, конечно, постоянно переписываясь, все эти годы. В первый раз я помню, мы встречались в 1972 или 73 годах после защиты моей докторской диссертации, оппонентами по которой были профессора: Л.Д.Бахрах, А.Р. Вольперт и Д. И. Воскресенский, а Яков Соломонович, как я позднее узнал, был «черным» оппонентом ВАК.

Хочу сразу отметить главные черты характера Якова Соломоновича — это обязательность во всех делах и простота общения, благожелательность. Причем, если даже он знает, что ответ на данное обращение не требует срочного ответа, то все равно немедленно напишет ответ. Будь это отзыв на диссертацию, автореферат или письмо друга.

Другой замечательной чертой характера Якова Соломоновича является удивительная коммуникабельность в общении. Я помню со слов жены Любовь Александровны, когда у нас в гостях, в Казани, после какой-то защиты, были профессора Л.Д. Бахрах, А.Р. Вольперт и Яков Соломонович и мы вели общую беседу за столом, причем Яков Соломонович больше молчал, т.к. был мало знаком и со мной и с моей женой, а потом зачем-то вышел на кухню вместе с Любовью Александровной. И там, по ее словам, у них завязался общий оживленный разговор по разным вопросам, как будто они были старые друзья. Жена была поражена такой открытостью и доброжелательностью в общении, в общем-то, неожиданной, о чем вспоминает до сих пор.



На фото (справа налево):
Я.С. Шифрин, А.Р. Вольперт, Ю.Ю. Радциг

Хочу также отметить Якова Соломоновича, как прекрасного педагога-воспитателя молодых специалистов — слушателей Артиллерийской радиотехнической академии, где он преподавал многие годы. Об этом я могу судить, в частности, по учебнику «Антенны», написанному по конспектам лекций, который выгодно отличается от

всех мне известных учебников и пособий по этой дисциплине. Он по-военному строг, четок и на удивление краток. Но позволяет быстро, а главное правильно, усвоить эту дисциплину, в общем-то, достаточно сложную. И это очень отличает его от всех мне известных учебников и пособий, которых великое множество и все еще появляющихся даже в наше «кризисное» время.

Поражает также армейская дисциплина Якова Соломоновича во всех делах и начинаниях. Помню, как я ездил в Харьков с моим аспирантом Стефаном Эминовым, по работе которого я назначал Якова Соломоновича первым оппонентом будущей кандидатской диссертации. Меня поразила эрудиция Якова Соломоновича не только в нашей области — электродинамика и антенны, но и во всех других областях физики и в других науках по вопросам, часто «каверзным», которые он задавал диссертанту, а затем — советам по всей его работе.

Затем, получив согласие на оппонирование, мы уехали в свой Великий Новгород, вспоминая теплоту, простоту, искреннее расположение и благожелательность Якова Соломоновича. Я до сих пор вспоминаю эту поездку, т.к. она была, как говорят сейчас, в первые «лихие» годы эры Ельцина. Ведь моя юность прошла в Харькове, у моего дяди Владимира Антоновича Радцига, в его доме на улице Иванова — это рядом с площадью Дзержинского и Сумской улицей Харькова. Помню, как мы с братом ходили по всем улицам и достопримечательностям города.

Ну, да я отвлекся от того, что начал писать. Думаю многие, кто общался с Яковым Соломоновичем знают, какой колоссальный научный вклад он внес в теорию и практику, как выдающийся ученый в этой области.

Особенно хочу подчеркнуть, что он впервые создал, а затем развил и довел до практического применения вместе со своими учениками статистическую теорию антенн. И это не только его заслуга как ученого, но и как талантливого руководителя коллектива специалистов. Его монографии и научные работы в этом направлении представляются мне классическими. Их отличает строгость, четкость и в то же время простота и целостность изложения.

В заключение хотел бы отметить жизнерадостность и оптимизм во всем у Якова Соломоновича, даже в наши «окайнные» годы. И это, конечно, роднит его с нашим известным юмористом и сатириком Ефимом Шифриным (может родственником?!).

Желаю ему оставаться таким же, как мы его знаем сегодня, еще долгие-долгие годы.

НЕ ТОЛЬКО НАУКОЙ СЛАВЕН ЮБИЛЯР

Ю.Н. СЕДЫШЕВ

Выдающемуся ученому в области теории и техники антенн, блестящему организатору научных и экспериментальных исследований, внедрения полученных результатов в радиолокационную технику и практику войск ПВО Я.С. Шифрину исполняется 90 лет.

Мне посчастливилось служить, работать и ощущать поле тяготения этой неординарной личности с 1952 г. Причем по мере моего карьерного роста влияние этого поля возрастало отнюдь не по линейному закону.

В те годы на специально-технических и профилирующих кафедрах Академии им.Л.А. Говорова (АРТА) шел активный процесс разработки учебных планов и программ, отвечающих требованиям развития радиолокационного вооружения для всех родов войск ПВО. Фундаментальность преподавания, военно-техническая направленность требовала развертывания научных исследований с целью подготовки научных кадров, расширения творческих связей с предприятиями промышленности и оказания помощи войскам в освоении новой техники.

Бурная и целеустремленная научно-педагогическая деятельность на этих кафедрах, которая всячески стимулировалась командованием Академии, вовлекала в этот процесс не только преподавателей, но и слушателей, среди которых были не только офицеры, но и курсанты, принятые в академию по специальным наборам. В числе последних был и я. Приобщаться к азам радиолокационной науки я начал почти с первых дней обучения в академии через военно-научный кружок на кафедре ВНОС (с 1953 г. кафедра вооружения РТВ ПВО), которой командовал назначенный сразу после защиты кандидатской диссертации майор В.И. Кузнецов (впоследствии генерал-лейтенант) — выпускник первого набора адъюнктуры академии. Нужно сказать, что обстановка на нашей и смежных кафедрах была тогда достаточно демократической. Проблемные вопросы обучения и науки обсуждались открыто, критически, часто в присутствии начальника, преподавателей (как правило, офицеров с боевым опытом), инженеров и нас, «кружковцев». Поэтому мы, в общем-то, были хорошо осведомлены о научных успехах старших товарищей, знали их в лицо. Имена первых семи адъюнктов В.Я. Аверьянова, Я.С. Шифрина, О.Н. Баранова и др. были на слуху, вызывали интерес к их личностям, работам, путям в науку.

В то время для личных контактов с Я.С. у меня — слушателя (младшего лейтенанта) — не было никаких поводов, так как он не проводил занятия на нашем факультете. О тематике и направленности работ Я.С. я узнавал из докладов его учеников на научных конференциях слушателей и научно-

технических комиссиях по обсуждению рационализаторских предложений. Поражал широкий спектр исследований в области электродинамики в приложении к распространению радиоволн различных диапазонов, теории антенн, технологиям их построения и контроля параметров.

Еще большее внимание к личности Я.С. привлекло мое знакомство с кандидатской диссертацией его первого ученика С.И. Красногорова. Это была первая диссертация, которую я держал в руках, и посвящена она была в основном проблемам выбора позиций РЛС с учетом свойств подстилающей поверхности в метровом диапазоне волн (МДВ). Эти вопросы были близки теме моей дипломной работы, связанной с комплексной кафедральной темой того времени по разработке обзорной РЛС МДВ с моноимпульсным методом измерения угловых координат целей. При проверке на полигоне академии предложенных нами технических решений угловых моноимпульсных дискриминаторов в РЛС МДВ П - 8 возникли сложности с интерпретацией экспериментальных результатов из-за влияния неустойчивости каналов на точность угловых измерений по одиночной и групповым целям на фоне шумов. Осталось чувство неудовлетворенности и желание получить все же ответы на неясные вопросы. И у меня впервые перед выпуском из академии появилась мысль об адъюнктуре. Таким образом, косвенное знакомство с Я.С. через ознакомление с работой его ученика С.И. Красногорова сильно повлияло на выбор моих приоритетов дальнейшей службы.

Более существенной в дальнейшем была поддержка Я.С. по становлению научных исследований на нашей специально-технической кафедре «Радиоприемные устройства РЛС», которой руководил тогда мой научный руководитель по кандидатской диссертации А.А. Письменецкий.

Дело в том, что в годы становления академии не все кафедры быстро находили свою нишу в научных исследованиях, так как не имели достаточного кадрового потенциала и научных заделов в области военной радиолокации. Хотя на нашей кафедре и защищались кандидатские диссертации, их тематика имела частный, разрозненный характер, так как научные руководители диссертаций зачастую были людьми внешними по отношению к кафедре и даже академии. Продолжение этих работ отсутствовало, потребители результатов работ тоже не было. Все это не способствовало созданию крупного научного направления и, тем более, научной школы. Хотя, справедливости ради, нужно отметить работу на кафедре В.Я. Аверьянова (выпускника адъюнктуры первого набора), впервые предложившего в 1953 г. направление, связанное с применением

многопозиционных методов радиолокации. Его предложения, к сожалению, не нашли должной поддержки на кафедре, и это послужило одной из причин его переезда в Минск начальником кафедры, где он защитил докторскую диссертацию и создал достаточно мощную научную школу, которая существует и по настоящее время.

В этих условиях прибытие нового адъюнкта на кафедру в 1959 г. из войск со своей темой в области малошумящих параметрических усилителей в РЛС с широкополосными сигналами было встречено настороженно, тем более что возможности реализации этой темы вызвали сомнения из-за отсутствия в Академии соответствующей элементной базы и технологии. И вот на одном из регулярно проводившихся в то время межкафедральных семинаров, на которых, в частности, рассматривалось и состояние дел у адъюнктов, встал Я.С. и в свойственной ему манере весьма категорично поддержал мое направление исследований, добавив при этом, что мне нельзя сидеть сиднем, нужно наладить творческие связи как в Харькове (ХГУ, ИРЭ АН УССР), так и в Москве, Ленинграде, Горьком. В результате действия этого «научного скиппидара» мною были установлены личные контакты, некоторые из которых действуют и поныне. В очень сжатые сроки в радиофизической лаборатории ХГУ были изготовлены для нас высококлассные параметрические диоды СВЧ (В.И. Борзенко). В ИРЭ АН УССР (В.П. Шестопалов) мы «разжились» двумя малогабаритными маломощными магнетронами непрерывного действия, что обеспечило проведение необходимых экспериментов и выходы для обсуждения результатов исследований на всесоюзных и ведомственных семинарах и конференциях.

После моей защиты диссертации в 1963 г. события на кафедре разворачивались как снежная лавина. В результате перехода на новые программы обучения некоторые профилирующие кафедры меняли свою направленность и, на наше счастье, в 1959 г. у нас появился новый заместитель начальника кафедры — к.т.н. довоенного времени Л.Г. Писаревский, который был научным руководителем составной части правительственной темы в области многопозиционных систем пассивной радиолокации постановщиков активных помех. Для выполнения работ был выделен личный состав отделения НИЛ, а также преподаватели-соискатели, в том числе и с нашей кафедры. Кафедра разделилась во мнениях — то ли заниматься совершенствованием элементов радиолокационных приемников, то ли переходить к серьезному системному исследованию многоканальных систем с когерентной обработкой сложных сигналов.

В результате бурных обсуждений было принято соломоново решение об использовании в наших исследованиях системного подхода с обязательной разработкой конкретных технических

решений для их практического воплощения. Это, в конечном счете, привело к формированию на кафедре мощного научного направления, в рамках которого впоследствии было защищено 10 докторских и более 150 (!) кандидатских диссертаций, а также к разработке множества изобретений, направленных на совершенствование РЛС различного назначения.

Трудности становления направления состояли в том, что резкий всплеск успешной научно-практической деятельности на кафедре, повышения ее авторитета во внешних организациях всегда приводит к здоровой конкуренции со стороны родственных кафедр, защита от которой состоит в строгом обосновании физических ограничений и научной достоверности полученных результатов. В наших исследованиях базово-корреляционных систем пассивной радиолокации при выборе исходных данных и потенциальных ограничений очень ко времени оказались научные результаты работ Я.С., связанные с учетом влияния на корреляцию сигналов условий распространения радиоволн на различных трассах к разнесенным приемникам. После конфиденциального обсуждения Л.Г. Писаревским и Я.С. этого вопроса в 1962 г. нами был обоснованно выбран для дальнейших исследований класс малобазовых многопозиционных когерентных систем. Такой выбор оказался продуктивным и остается актуальным и по сегодняшний день. Впоследствии исходные данные на разработки базировались на статистической теории антенн с использованием ее методов при определении свойств разнесенных в пространстве парциальных антенн. Это позволило учесть влияние различий сигналов, обусловленных условиями распространения, в частности, влияние уменьшения пространственной корреляции сигналов активных и пассивных излучателей электромагнитных волн.

После представления докторской диссертации в 1970 г. по рекомендации А.А. Письменецкого меня назначили начальником нашей кафедры, и я стал младшим коллегой Я.С. И, работая в этой новой должности, я широко использовал опыт Я.С., которым он щедро и бескорыстно делился. Его советы по организации и проведению на кафедре учебной и научно-исследовательской работы, взаимодействию с начальством, реагированию на бесконечные письменные указания и на всю повседневную мишуру и т.п. оказали мне большую пользу. Рекомендации всегда были побоевому конкретны и просты. Ничего лишнего не делать! Важные бумаги сами о себе напоминают. Не отвлекать преподавателей и адъюнктов от основной их работы. Обязательно фиксировать «исполнение» в протоколах заседаний кафедры!

Как-то получилось так, что с временным сдвигом на разницу в возрасте я почти повторил карьерные вехи Якова Соломоновича.

Командовал кафедрой 23 года, кафедра непрерывно росла «вширь». Была создана уникальная

учебно-лабораторная и научно-исследовательская база на основе промышленных технологий, образованы устойчивые связи с ведущими учеными, промышленностью, войсками и полигонами. Вместе с научными лабораториями и приданными подразделениями кафедра в лучшие времена насчитывала свыше 130 человек. Число адъюнктов на кафедре иногда доходило до 28. Еще более укреплялись наши дружеские отношения с Я.С. Его поддержка и часто нелицеприятная, но конструктивная критика способствовали интересам дела.

Импонировала жизненная философия и оптимизм Я.С., его умение с достоинством выйти из самой сложной ситуации. Это проявлялось не только в «трудовые будни», но и на отдыхе. Как-то совершенно случайно мы вместе оказались в санатории Черноморского Флота в Ялте, широко «освоенном» в те годы офицерами-преподавателями академии. Мы с Яковом Соломоновичем жили в одной палате с просторным балконом, который находился прямо над входом приемного отделения санатория. Жен с нами не было, но были наши малые дети, которые жили и кормились где-то рядом. Их проникновение в санаторий по установленному кем-то глупому порядку считалось недопустимым. Время на организацию питания и отдыха детей затрачивалось нами немалое, что отвлекало нас от решения важнейшей задачи — тотального контроля приезжающих на отдых коллег-преподавателей из академии. Их прибытие мы фиксировали, сидя в уютных креслах на балконе. Обязательно следовал вечерний ритуал «прописки» и планирование других коллективных мероприятий, например, проведение послеобеденных симпозиумов в первозданном понимании этого слова в прекрасном парке на набережной Ялты, где в изобилии продавались на разлив отличные крымские вина. А дети? Я.С. мастерски отвлекал персонал приемного отделения, дети проникали в палату на наши кровати и укладывались спать.

В реакции Я.С. на различные жизненные ситуации всегда проявлялась его гуманная жизненная позиция, нетерпимость к лентяям, стимулирование и поддержка товарищей, друзей и коллег, когда они этой поддержки заслуживали или очень

в ней нуждались. Личное общение с Я.С. на протяжении последних почти четырех десятилетий показало, что в науке он последовательно выполняет библейские заповеди. Как бы многие отнеслись к ученому, который в своей работе грубо допустил плагиат и не сослался на первоисточник, в данном случае на работу Я.С.? С 1976 по 1992 гг. я работал в экспертном совете ВАК СССР. Однажды мне пришлось рассматривать докторскую работу одного ученого из Томска, посвященную исследованию явления дальнего тропосферного распространения радиоволн (ДТР). Просматривая эту работу, я увидел до боли знакомый текст и графики, приведенные в монографии Я.С. по ДТР 1964 г.(!). Естественно, я эту работу направил на повторную защиту в нашу академию. Как я узнал позднее, в 60-х годах, когда в академии активно велись исследования ДТР, ученые из Томска приезжали неоднократно в академию, где обстоятельно знакомились с проводимыми работами. Более того, Я.С. подарил им немало важных экспериментальных записей и написанную им монографию по ДТР, которые томичами широко использовались. Узнав о таком явном плагиате, Яков Соломонович вначале был резко возмущен, и все же, увидев в диссертации томича и ряд новых интересных моментов, он решил не портить ему жизнь и просто не пришел на заседание ученого совета, где решалась судьба этой диссертации. Поскольку эта история все же была известна ряду членов совета, то при голосовании чуть ли не половина голосов была подана против, но все же работу пропустили. Ясно, что результат был бы иным, если бы Я.С. выступил бы на совете против этой работы. Недавно в трудах международной конференции «Радар-2007» я встретил добротную статью этого ученого, связанную с явлениями ДТР при пеленговании излучающих объектов над поверхностью океана. Таким образом, Я.С. подтвердил принцип, который я также исповедую: если наука настоящая, в ней не может быть тесно.

В заключение хотелось бы пожелать моему старшему другу и наставнику в день 90-летия, крепкого здоровья, бодрости, семейного благополучия и неувядаемой научной молодости.

ПРОФЕССОРУ ШИФРИНУ С БЛАГОДАРНОСТЬЮ

ТАДАШИ ТАКАНО

Мои искренние поздравления профессору Шифрину в связи с его 90-летним юбилеем!

У нас в Японии 90-летие называют годом окончания обучения. Как бы, однако, эту дату не именовали, дата эта очень солидная, и мне хочется передать проф. Шифрину мои самые хвалебные слова.

Я встречал Якова Шифрина несколько раз на разных международных конференциях. Он всегда выглядел весьма внушительно, но в общении был очень дружелюбен. Мы не раз разговаривали с ним на разные темы, по-английски, и хотя оба с сильным акцентом (он с русским, а я с японским), мы, тем не менее, прекрасно понимали друг друга.

На ISAP (международном симпозиуме по антеннам и распространению радиоволн) в Саппоро (Японии) в 1992 г. мы пригласили его сделать заказной доклад с тем, чтобы он на пленарном заседании познакомил участников конференции со своей знаменитой статистической теорией антенн. Созданная им столь обобщенная и многоплановая теория произвела на всю аудиторию, включая и меня, глубокое впечатление, тем более, что и у нас были те же технические проблемы, связанные с влиянием случайных ошибок на параметры крупных зеркальных антенн (чем я в то время вплотную занимался).

Остановлюсь немного на вопросах личного плана. В 1997 г. меня попросили поддержать избрание проф. Шифрина в действительные члены (Fellow) IEEE. Такие дела официально считаются закрытыми, но прошло уже много времени, и можно приоткрыть завесу. Я тогда был простым членом IEEE, но, поскольку я очень уважал проф. Шифрина, то мне хотелось участвовать в этой процедуре. Для этого мне надо было быть рангом выше (senior member), и я быстро сделал все, чтобы им стать. В этом новом качестве я имел право поддержать избрание проф. Шифрина. Результат оказался вполне успешным благодаря его фундаментальному вкладу в антенную науку. Таким образом, весь этот процесс оказался счастливым не только для него, но и для меня. А через несколько лет проф. Шифрин, зная мои работы в области зеркальных антенн, поддержал мое выдвижение на Fellow IEEE, и думаю, что это способствовало получению мною этого наивысшего статуса в IEEE.

В 2003 году проф. Шифрин пригласил меня на международную конференцию по теории и технике антенн, которые проводилась в г. Севастополе, в Крыму. Поскольку я очень интересуюсь географией и историей, то я был рад впервые посетить Украину. Мне конференция очень понравилась, тем более что Яков организовал для участников конференции интереснейшую экскурсию



ISATT-03. В Национальном космическом центре. Слева направо: я, М. Боцци (Италия), И. Лихтхардт, Я.С. Шифрин, Н.Г. Максимова, Л. Лихтхардт (Нидерланды), А. Кремонини (Италия)

в Национальный космический центр Украины, где нам показали ряд крупных антенных систем (фото 1), в частности уникальную антенну РТ-70 с ее семидесятиметровым параболоидом. Для меня рассмотрение конструкции этой гигантской антенны прямо внутри

нее представляло особый интерес. Кроме интересной научной части конференции, нам организовали и экскурсии по Крыму. Мне доставило большое удовольствие и радость то, что я получил возможность одновременно познакомиться с украинскими людьми и увидеть греческие развалины и татарские деревни. Мне также пришлось по душе прекрасные крымские вина из Инкермана и Массандры. Но, может быть, более важно то, что на этой конференции я в полной мере осознал вес и авторитет проф. Шифрина. Он исключительный организатор и прославленный ученый и педагог. А на банкете в морской фуражке, подаренной ему хозяевами конференции, он выглядел как настоящий командир (фото 2).

Благодаря его разносторонней деятельности у него много друзей во всем мире, включая Японию. И мне доставляет удовольствие передать проф. Шифрину от нашего общего друга Хироши Шигесавы, который сейчас лежит в больнице, слова поздравления и благодарности к его юбилею.

На конференции ISATT-03 у меня произошел эпизод, о котором, возможно, и не стоило бы говорить, но я пишу о нем, поскольку он доста-



вил беспокойство проф. Шифрину. Как-то получилось так, что при регистрации на конференции у меня еще был паспорт, но потом, из-за своей невнимательности, я его где-то выронил. Я не придавал этому особого значения, надеясь, что паспорт вскоре найдется. Но проф. Шифрин отнесся к этому очень серьезно, видимо, понимая, какие трудности могут возникнуть у меня в связи с этой потерей. Как я узнал позднее, по его просьбе хозяева конференции за один день(!) оформили мне через соответствующие службы такие бумаги, которые позволили бы мне спокойно добраться домой и уже там, в Японии, решать свои паспортные дела. Двумя днями позднее проф. Шифрин радостно сообщил мне: «Вы можете получить свой паспорт. Его нашел у входа в университет один из студентов». Я сразу же встретился с этим студентом и его отцом и с искренней благодарностью получил свой паспорт. На фотографии, сделанной сразу же после получения мною паспорта, видно, как Яков и Нона рады благополучному завершению этой истории.



В заключение я хочу поблагодарить редактора юбилейного выпуска журнала «Прикладная радиоэлектроника» за любезно предоставленную мне возможность со страниц журнала сердечно поздравить проф. Шифрина с его замечательным юбилеем и пожелать ему всего наилучшего на долгие годы.

О КАФЕДРЕ Я.С. ШИФРИНА В АРТА

Г.Н. ТКАЧЕВ

Ностальгия присуща всем людям старшего возраста. Не обходит она стороной и меня. Работая уже более 10 лет в НИИ дальней радиосвязи в Москве, далеко от родного Харькова, я с превеликим удовольствием вспоминаю годы своей военной службы в Академии им. Л.А. Говорова.

Особенно приятны воспоминания о работе с 1964 г. по 1979 г. на кафедре № 15 «Антенны и распространение радиоволн» в качестве научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории №2. Все мы: преподаватели, инженеры, научные сотрудники, лаборанты, — участвовали в научно-исследовательских работах по профилю кафедры № 15. Мы были молоды, полны сил, амбициозны. Работали с огромным энтузиазмом. Радовались, как дети, удачному эксперименту, выступлению на научной конференции, публикации в солидном журнале и т.д. Руководил кафедрой № 15 в эти годы Я.С. Шифрин.

Я.С. Шифрин каким-то «непостижимым» образом создал на кафедре атмосферу доброты, взаимного уважения и одновременно дух конкуренции (соревнования в то время). Каждому из нас была поставлена своя научная задача (тема научной работы), при этом мы взаимно дополняли один другого своими результатами и одновременно не мешали друг другу.

На кафедре № 15 было принято правило: участвовать во всех научных конференциях (ведомственных и Всесоюзных) по профилю кафедры. Темы докладов обсуждались, доклады тщательно

готовились, результаты конференций обсуждались на заседаниях кафедры.

Созданная Я.С. Шифриным на кафедре обстановка доброжелательной научной работы давала отличные результаты: все адъюнкты, без исключения, успешно защищали кандидатские диссертации. Одновременно на кафедре № 15 защищались и докторские диссертации. В мою бытность было успешно защищено 9 докторских диссертаций.

С Яков Соломоновичем можно было спорить и шутить, соглашаться и не соглашаться. А если по условиям армейской службы нужно было быть на работе в сапогах и в ремнях, то исключений для себя Я.С. Шифрин не делал.

Подготовка молодых преподавателей. Это особая статья. Адъюнкт кафедры № 15 должен был прослушать определенный курс лекций, досконально усвоить этот материал, провести по данному курсу лекций лабораторные, а затем и практические занятия, подготовить и прочитать пробную лекцию, выслушать на заседании кафедры массу замечаний по своей работе и только после этого этот офицер переходил в категорию молодых преподавателей. Так Я.С. Шифрин готовил преподавателей для своей кафедры и для других вузов ПВО страны.

Лично для меня Я.С. Шифрин был и остается примером для подражания и как успешный администратор, и как крупный ученый.

ЧЕТЫРЕ ЖИЗНИ ЯКОВА ШИФРИНА

ВАЛЕРИЙ ТЫРНОВ

Написать статью к 90-летию юбилею Якова Соломоновича Шифрина я решился очень легко, сразу, как только узнал, что к этой дате готовится юбилейный сборник. Хотя личное наше знакомство состоялось с большим опозданием (лет 5 тому назад), имя его было у меня на слуху, можно сказать, всю жизнь.

Заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор, лауреат премии им. А. С. Попова, действительный член американского IEEE, соровский профессор, академик и член президиума АН прикладной радиоэлектроники — один только этот неполный список титулов и званий говорит о том, что в его лице мы имеем дело с человеческим и научным явлением очень неординарного масштаба.

Но, говоря о его научных занятиях, я хотел бы не упустить из виду и нечто совсем другое, может быть, для оценки личности даже более важное, чем все заслуги и достижения. К своему 85-летию он написал и издал за свой счет книгу для друзей и родственников. Не для тех, с кем рядом прожитая жизнь — тех уже нет — для тех, кто помоложе, кто жив и будет жить, когда его уже не станет. Книга называется очень незатейливо: «Как мы жили». Не «Как Я жил», а «Как МЫ жили». Это очень важный нюанс. Для человека его генерации первый вариант — абсолютно невозможен. И дело вовсе не в скромности навынос. Никакой демонстративной скромности у проф. Я. С. Шифрина нет, он хорошо знает свою немалую цену, и, в общем-то, от нее не отказывается. Дело в том этическом кодексе, которому подчинено личное поведение таких, становящихся все большей редкостью, людей. Главная его аксиома: если ты видишь, что можешь помочь — помоги. Если можешь сделать — сделай. Не жди, пока тебя позовут. Иди сам.

В его жизни большая часть времени и усилий потрачены на помощь людям, вероятно, даже в ущерб себе, причем не только в науке, но и в чисто житейских делах. Он подготовил чуть ли не 50 кандидатов и 25 докторов наук, без малого тридцать лет руководил кафедрами в Военно-инженерной радиотехнической академии (ВИРТА) и Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ), оказывал разностороннюю помощь вузам, НИИ и другим организациям в различных городах СССР. Не случайно он избран почетным профессором четырех вузов России и Украины. Им были созданы Украинская Национальная ассоциация антенн (1993 г.) и два отделения Американского общества радиоинженеров (1995 и 2000 гг.), которыми он же и руководил. Эти организации сыграли огромную роль в консолидации усилий антенщиков Украины и интеграции украинской науки в мировую. Он организовал и был руководителем более чем десят-

ка международных научных конференций, проведенных в Украине за последние 15 лет. Много усилий потрачено им и на общественно-политическую деятельность. Обо всем этом он подробно рассказывает в своей книге...

Двум словам в русском языке сильно не повезло. Это слова «коллективизм» и «индивидуализм». Они имеют совершенно разный смысл в словаре теоретиков идеологий и в народном словаре. И, когда «теоретики» ругают коллективизм, они, в сущности, дезориентируют людей в их понимании добра и зла. Двойственность смысла этих двух слов играет над русскоязычной частью человечества злую шутку. Коллективизм Шифрина прекрасен. А помимо эстетической стороны, я всерьез думаю, что без коллективизма этого сорта не бывает и больших успехов. Ни у личности, ни у общества. Потому что, если каждый из группы людей в силу своей внутренней потребности стремится поддержать всех остальных, эффективность их совместного труда может быть чрезвычайно высокой. В противном же случае она близка к нулю или даже отрицательна.

Наукой Яков Соломонович начал заниматься всерьез поздно, лет с 40. Значит, на роду ему было написано стать ученым. В этом возрасте нынешние офицеры уже подумывают об отставке — отставной возраст подполковника — 42 года.

Обычно к этому возрасту ученый уже проходит пик научной активности, уже сделаны основные открытия, уже пришло признание, и молодые аспиранты смотрят на него, как на Мафусаила. Однако у Шифрина жизнь сложилась иначе. Кто-то другой, скорее всего, нашел бы способ уклониться от исполнения гражданского (да и просто мужского) долга и спрятаться в тихом кабинете от житейских бурь и невзгод. Но только не он. И летом 41 года, вместо того, чтобы начать заниматься теоретической физикой, Яков Соломонович ушел в народное ополчение Ленинграда и задержался в армии на 40 лет. Война внесла в жизнь много перипетий. Лишь лет через 10 после ее окончания (в должности командира радиолокационной батареи) с переездом в Харьков и началом службы в Артиллерийской радиотехнической академии (АРТА) жизнь его приобрела устойчивые формы. В стенах этого военного учебного заведения после назначения начальником кафедры антенн и распространения радиоволн Я. С. Шифрин сумел внести крупный вклад в создание и развитие ряда важных новых направлений в прикладной электродинамике. Десяток первоклассных монографий, включая широко используемый многие годы в ряде вузов СНГ учебник, сотни опубликованных научных работ, десятки учеников, ученики учеников. Что же это за проблематика?

В жизни своей он работал в четырех научных направлениях, и в каждое из них внес вклад, более

чем достаточный для мирового признания, вклад, которого хватило бы на целую жизнь.

Во-первых, это дальнейшее тропосферное распространение (ДТР) ультракоротких радиоволн. Долгое время считалось, что эти радиоволны распространяются только в пределах прямой видимости, а за горизонт попадают лишь благодаря дифракционным эффектам, в свое время рассчитанным акад. В.А.Фоком. Однако в начале 50-х годов было экспериментально установлено, что значение интенсивности поля радиоволн за горизонтом, значительно, в сотни тысяч раз, превосходит интенсивность, рассчитанную по формулам Фока. Дело в том, что в тропосфере имеются многочисленные неоднородности, на которых рассеиваются радиоволны. Это рассеянное поле и уходит далеко за горизонт. Здесь много красивых эффектов, имеющих важное значение для радиотехники. Радиолокацию здесь, правда, реализовать практически невозможно, потому что волна должна пройти туда и обратно, и затухание поля при этом оказывается слишком большим. А вот односторонние линии связи или радиоразведку реализовать можно. Работы по изучению ДТР выполнялись тогда в СССР по правительственным постановлениям, т.е. имели особый приоритет и финансирование. Обычно такую тему брали на 2-3 года, и, сняв с нее «сливки», искали что-то новое. Были такие научные «эскадроны». Кафедра Шифрина, в силу большой (и, к сожалению, все реже встречающейся даже среди ученых) обстоятельности своего шефа, занималась ею экспериментально более 6 лет (антенны его кафедры на крыше Академии знал весь город). Благодаря этому удалось впервые в мире выявить многие важные закономерности и особенности явления ДТР. Эти результаты были изложены в двух монографиях. Первая из них (изд. АРТА, 1964 г.), к сожалению, широкой известности не получила из-за того, что имела гриф типа ДСП (Для служебного пользования). Но это была первая в мире монография по ДТР. Вторая монография (изд. «Советское радио», 1965 г), написанная совместно с москвичами, хорошо известна всем специалистам в области распространения радиоволн.

Параллельно с работами по ДТР, примерно с 1959 года, Яков Соломонович начал заниматься основным делом своей жизни — разработкой статистической теории антенн (СТА). СТА — это теория больших и сложных антенн, которые к тому времени уже стали широко внедряться, в частности, в войсках ПВО страны и в радиоастрономии. И, когда их стали строить и эксплуатировать, то оказалось, что они далеко не в полной мере оправдывают возлагавшиеся на них надежды. В чем дело? А дело в том, что в таких системах всегда имеют место случайности в распределении источников (токов или полей). Добрая доля этих случайностей возникает внутри самой антенны: неточности изготовления отдельных элементов антенны, их нестабильность, выход из строя не-

которых из них и т.д. Не менее важную роль играют также и внешние случайности: атмосферные неоднородности искажают фронт падающей на антенну волны, он становится не плоским, как нам хотелось бы, а сильно изрезанным. Вместо синфазных сигналов от отдельных элементов антенны идут сигналы со случайными фазами. Параметры антенны от этого существенно ухудшаются. Иногда, при сильных случайностях, диаграмма направленности антенны вообще «разваливается». А это ведь антенны стоимостью порою в сотни миллионов долларов. Такая антенна для загоризонтной радиолокации, в частности, была построена под Николаевом. И имела, если только мне не изменяет память, размеры 500 м по ширине и более 100 м по высоте. Она должна была «замечать» запуски ракет на расстояниях 10-12 тыс. км. Пробные пуски делали во Владивостоке. Иногда их «ловили», но по большей части это не удавалось. И во многом потому, что антенна была спроектирована для идеальных условий падения на нее плоской волны и плохо работала в реальной ситуации, когда падающая на нее волна существенно искажена. Сходные проблемы испытывали и американские радиолокаторщики. Поэтому, когда проф. Шифрин в 1970 г. издал свою фундаментальную, теперь уже ставшую широко известной во всем мире, монографию по статистической теории антенн, в США ее мгновенно перевели на английский язык.

И все же неясно, почему при всей широте признания достижений Я.С. в научных кругах его заслуги не были своевременно должным образом оценены официально. Так, звание Заслуженного деятеля науки и техники Украины он получил на 15-20 лет позже многих своих учеников, не говоря уже о правительственных наградах или выборе в Академию наук СССР или Украины. Почему? Самый простой, сам собой напрашивающийся, ответ — потому что еврей. Честно скажем — да, и поэтому тоже. Даже в 80-е годы, при увольнении из армии всемирно известный ученый, профессор Шифрин испытал значительные трудности при устройстве на работу. Но не только поэтому. Есть и более основательные причины, мешавшие не только евреям.

В одном умном анекдоте некий старик захотел от Золотой рыбки, чтобы она сделала его Героем Советского Союза. Тут же грянул гром, и старик увидел себя в окопе: в руках у него две гранаты, а на него ползут три танка. То есть в нравственном плане высокая оценка деятельности того или иного человека должна быть побочным результатом его истинной работы, наградой за реальные подвиги, труды и свершения, а не быть самоцелью, предметом его вожделений.

Харьков же не был тем местом, где эти награды «раздавались». Таким местом была Москва (а в Украине теперь — Киев), но для столицы мало было потрудиться, надо было еще и «быть на виду» — таковы уж были давно установив-

шиеся законы, традиции в СССР (а теперь и в Украине) Кстати, коллега Я. Шифрина капитан Н. Моисеев, возглавлявший после войны учебный отдел в ХВАИВУ в пяти минутах ходьбы от артиллерийской академии, при первой же возможности перевелся в Москву и никаких проблем с академической карьерой не имел. Впоследствии он руководил разработкой теории “ядерной зимы”, принесшей ему мировую известность. Не хочу сказать в его адрес ни одного худого слова: академик Никита Моисеев был очень талантливым и порядочным человеком, но фактор столицы остается весьма существенным. Да тут уж ничего не поделаешь. Вообще, тема “научной провинции” — практически не поднятая целина для историка отечественной науки. Да и для просто историка.

Достигнув предельного для армии возраста (60 лет) и уволившись из армии в звании полковника в 1980 году, Я. С. Шифрин пришел в ХНУРЭ, называвшийся тогда ХИРЭ — Харьковский институт радиоэлектроники. Кафедры антенн и распространения радиоволн в то время в ХИРЭ не было. Цикл электродинамических дисциплин преподавался почему-то на кафедре радиоизмерений. Преподаватели кафедры тянули учебную нагрузку, но научная жизнь еле-еле теплилась. Почти все кафедральные антеннщики, пройдя аспирантуру, так и не защитили диссертации. Да и на радиофакультете в целом положение оставляло желать лучшего. За несколько лет Я. С. сумел разгрести кафедральные и факультетские завалы. Кандидатские диссертации защитили один за другим шесть человек. Сдвинулись с мертвой точки и защиты докторских на факультете. Но не менее важным было инициировать на кафедре настоящую серьезную науку. Поэтому помимо «своей» науки по СТА, Яков Соломонович приложил много усилий к тому, чтобы поддержать и резко поднять имевшиеся научные заделы. Он сформулировал и возглавил новое научное направление — антенны с нелинейными элементами (АНЭ). Эти антенны могут очень многое, в зависимости от типа нелинейности, присутствующей в них, потому что на своем выходе они порождают поле не только той частоты, которая на них упала, но и поля кратных частот. Интерес к АНЭ возник лет 40 тому назад, когда в радиотехнике появились новые задачи, без нелинейных антенн просто не решаемые. Такие антенны могут быть выпрямителями — преобразовывать энергию СВЧ-волн в энергию постоянного тока (так называемые ректенны, о них речь пойдет ниже). Могут быть умножителями частоты: принимая поле некоторой частоты, преобразовывать его в токи или поле кратной частоты. Они могут быть также смесителями полей, принимая некоторую сумму полей ряда частот и выдавая на выходе поля комбинационных частот, т.е. частот, равных суммам и разностям частот падающих на них волн. Есть очень интересная область радиотехники, называемая нелинейной радиолокацией. Дело в том,

что обнаружению низколетящего самолета сильно мешает сигнал, отраженный от Земли, а если самолет сделан по стелсовской технологии, то его на этом фоне обнаружить очень трудно. Но на самолете этом всегда есть антенны, а они обязательно имеют какие-то непредусмотренные нелинейности, которые создают, кроме поля основной частоты, еще и поле удвоенной частоты. И вот, обнаружению цели на этой частоте Земля уже не мешает, потому что в падающей, а значит, и в отраженной от Земли волне сигнала удвоенной частоты нет...

Есть у нелинейности антенны и неприятная сторона. Дело в том, что в реальных антеннах зачастую есть какие-то паразитные нелинейности и поэтому в излучении антенны присутствуют излучения нежелательных кратных частот, ухудшающие общую электромагнитную обстановку. Поэтому возникают задачи определения и минимизации паразитных излучений, тоже связанные с теорией АНЭ.

В сущности, под руководством проф. Шифрина и при его участии на кафедре была построена достаточно общая теория антенн с нелинейными элементами. Полученные результаты опубликованы в большом количестве статей, ряде депонированных монографий и в вышедшем в 1997 г. антенном справочнике (изд. ИПРЖР, 1997 г., гл.10).

Четвертое направление научной деятельности проф. Шифрина — это ФАРы — фазированные антенные решетки. ФАРы состоят из большого числа независимых элементов, амплитудой и фазой токов в которых можно управлять, формируя таким образом желаемую диаграмму направленности в очень широком диапазоне возможностей. Эту диаграмму (луч) можно быстро «качать» электрическими методами, «железо» при этом остается неподвижным. ФАРы — это очень сложные и дорогие системы. Поэтому при включении их надо обязательно определить их исходное реальное состояние — как говорят, провести их диагностику. Я. С. и его сотрудниками предложены два новых весьма перспективных метода диагностики ФАР, разработан оригинальный метод компенсации отказов части каналов ФАР и решен ряд других важных задач, примыкающих к проблеме диагностики ФАР.

По собственной оценке Якова Соломоновича, самый большой и важный вклад его в науку — это создание и развитие статистической теории антенн. Именно за работы по СТА он был удостоен премии им. А. С. Попова АН СССР и избран действительным членом американского общества радиоинженеров. В обоих случаях с практически одинаковой формулировкой: «За работы в области СТА, внесшие фундаментальный вклад в теорию и технику антенн».

Но я — журналист, в значительной мере читательский, так сказать, угодник, а с этой точки зрения особый интерес для меня представляла

проблема, к которой Шифрин имел непосредственное отношение. Это проблема БПЭ — беспроводной передачи энергии. Вот о ней и скажем немного подробней.

Первым осознал важность проблемы БПЭ великий изобретатель Никола Тесла, серб по происхождению. Он же и попытался первым ее решить с помощью изобретенного им резонансного трансформатора, известного сегодня как трансформатор Тесла. Для этого он строил огромные резонансные трансформаторы, помещая их в фантастические многодесятиметровые башни с медными куполами, с которых соскакивали искусственные молнии. Ему удавалось поддерживать полноценное горение 200 ламп накаливания без проводов на расстоянии 42 км. Кпд его беспроводной линии передачи составлял всего 4%, но для начала неплохо было и это. Гораздо хуже было то, что по-настоящему адекватных технических средств для решения этой задачи во времена Тесла еще не существовало и созданы они тогда быть не могли.

Потом этой проблемой занимались разные люди. Заслуживают упоминания две фигуры. Во-первых, это конструктор ракетных двигателей академик Глушко, который пытался «приспособить» энергию Солнца для питания ракетоплана. Во-вторых, это профессор Киевского университета С.И. Тетельбаум, добившийся осязаемых результатов по беспроводной передаче энергии в разных диапазонах длин волн с хорошим КПД 40-60%. Это был 1945 год. Но ни работы Глушко, ни работы Тетельбаума продолжения не получили. Поэтому пионером практической разработки БПЭ СВЧ-лучом считается американец Вильям Браун. В 1964 году он продемонстрировал вертолет, висящий на высоте 10 км и питающийся с Земли СВЧ-лучом. Это был первый крупный эксперимент такого рода. Браун многое сделал в области БПЭ. Он рассматривал два аспекта этой проблемы. Первый — это передача энергии Солнца сверху вниз, и второй — передача преобразованной энергии снизу вверх. Он расчленил всю проблему на три части. Первая часть — это передающее устройство, создающее СВЧ-луч, вторая — это собственно СВЧ-луч, участок прохождения его, и третья — оконечная часть, т.е. устройство преобразования энергии принятого СВЧ-луча в энергию постоянного тока. Вот тут-то и выступают ректенны, предложенные тем же Брауном. Он оценил ориентировочно КПД всех трех частей системы.

А в 1968 году его друг Петер Глезер предложил первый проект солнечной космической электростанции, проработанный им во всех деталях. Согласно его проекту солнечная полупроводниковая батарея размером в 50 кв. км., расположенная на геостационарной орбите, вырабатывает электроэнергию и питает огромную фазированную антенную решетку диаметром порядка 1 км на частоте 2,45 ГГц. Созданный решеткой СВЧ-луч

падает вниз на Землю и принимается ректенной с диаметром около 7 км, состоящей из нескольких миллиардов ректенн малых размеров, которые выпрямляют возбуждающиеся в них токи и отдают их в систему сбора энергии постоянного тока. Последняя питает двигатели постоянного тока. Эта система должна была вырабатывать мощность в 5 ГВт — примерно столько же, как и Красноярская ГЭС. Уже в то время не существовало никаких технических препятствий для реализации этого проекта. Поэтому вокруг него сразу возник бум, в первую очередь, конечно, у американцев. Были тщательно проработаны все детали, не только технические, но и вопросы экологии, влияние линии БПЭ на радиоастрономию, на связь, в общем — все-все-все. В начале 80-х годов американцы создали маленький макет системы и, убедившись, что реализация замысла Глезера обойдется более чем в 100 млрд. долларов, дело это надолго прикрыли. Но! Они-то прикрыли, но проектом и идеей БПЭ заинтересовались всерьез другие страны. Среди них Франция, Россия, Украина и особенно — Япония.

«Ну, и мы тоже влезли в эти дела, — замечает Шифрин. — Почему мы решили, что этим надо заниматься? Во-первых, альтернативы столь чистой энергии, как солнечная, нет. Даже получение ядерной энергии сопряжено с возникновением разной гадости. Во-вторых, \$100 млрд. — это не окончательная цена. Технологии не стоят на месте. Если в 60-е годы КПД полупроводниковых преобразователей составлял 8-12%, то сегодня он достиг 30-35%. Быстро развивается и радиоэлектроника, в частности, техника антенн. Все это приведет к качественному изменению стоимости проекта и сроков его реализации. А в-третьих, есть множество куда более скромных задач по линии БПЭ, приниматься за решение которых можно уже сегодня. Например, переброска энергии через болота или из энергоизбыточных районов в энергонедостаточные, обмен энергией между космическими объектами — там вообще маленькие расстояния. Все эти «мелкие» задачи не требуют 100 лет для своей реализации. Они могут быть решены значительно быстрее. Надо заметить, что реализация упомянутых выше, да и других скромных проектов требует решения некоторых специфических задач. Так, в проекте Глезера положение передающей ФАР относительно наземной ректенны фиксировано. Космические же объекты сложным образом движутся друг относительно друга. Как это учесть? В силу трех отмеченных обстоятельств мы и стали активно заниматься проблемой БПЭ».

В 1994 году Шифриным с сотрудниками были представлены на антенную конференцию в Ницце (Франция) два солидных доклада. Один из них назывался «Антенны с нелинейными элементами». В нем излагались основы разработанной в ХНУРЭ общей теории таких антенн. Второй доклад был посвящен ректеннам, являю-

шимся частным случаем АНЭ. Эти доклады были опубликованы в трудах конференции и получили высокую оценку специалистов. В частности, они попали в руки Глезеру. Глезер передал их Брауну (а это — фигура №1) и прислал Шифрину письмо с предложением сотрудничать. Я. С. ответил на это приглашением приехать с докладом в 1995 году на первую в СНГ антенную конференцию, организацией которой он в тот момент занимался, возрождая тем самым традиции прежних антенных конференций в СССР, организатором которых был глава советских антенщиков чл.-кор. АН СССР А. А. Пистолькорс. Глезер доклад прислал. А кроме того, он предложил Я.С. и его сотрудникам две вещи. Первая — написать большую обзорную статью о работах ХНУРЭ по БПЭ для издаваемого в США журнала по этой проблеме, а вторая — принять участие в написании международной книги по БПЭ. К сожалению, из-за пассивности сотрудников Я. С., недопонимания ими ценности предложений Глезера, они не были приняты. Я. С. с горечью называет это первой важной упущенной возможностью. Ведь уже в 1995 году Украина могла бы занять почетное место в международном разделении труда по этой проблематике и зафиксировать мировое лидерство ХНУРЭ в создании теории антенн с нелинейными элементами. В последующие годы были и другие упущения, о которых Яков Соломонович подробно рассказывать не захотел. Остановился лишь на одном. В 2002 году в Маастрихте проходила Генеральная ассамблея Международного радиосоюза, в рамках которой работала специальная секция по солнечным космическим электростанциям, на которую пригласили и проф. Шифрина с заказным обзорным докладом. К слову, в Маастрихте Я.С. Шифрину довелось прослушать доклад профессора Мацумото из Японии, занимающей сегодня лидирующее положение в реализации проекта Глезера. Сам Мацумото — крупный ученый и организатор науки, на протяжении ряда лет возглавлявший URSI — Международный радиотехнический союз — и его японское отделение. Он рассказал о японском сценарии реализации этого проекта, на который Япония возлагает большие надежды и в который она вкладывает большие деньги. Этот сценарий предполагает поэтапную реализацию проекта. В 2007-10 гг. в Космосе должна быть сгенерирована и передана на Землю мощность в 50 кВт, в 2012-15 гг. — 10 МВт. 2020-2025 — это годы реализации пилотного проекта мощностью 250 МВт, а в период с 2030 по 2040 должна быть сооружена уже коммерческая система мощностью 1 ГВт.

Яков Соломонович сделал обстоятельный доклад о работах ХНУРЭ по проблеме БПЭ. Этот доклад был высоко оценен присутствующими. Одним из важных результатов выступления Я. С. стали тесные контакты, завязавшиеся между ним и канадским специалистом по ректеннам А. Альденом. Однако из-за той же пассивности и

медлительности сотрудников Я. С. это дело было погублено, хотя Альден прислал в ХНУРЭ много интересных материалов. Альден активно работал на американцев, разрабатывающих интереснейший летательный аппарат, получающий энергию по радиолучу с использованием крупной ректенной системы. Проф. Шифрин называет такой аппарат «радиолётом». Можно было выйти на этот крупный американский проект со сроком окончания в 2019 году и поучаствовать в нем. Очень жаль, но и эта интереснейшая возможность была упущена. Поэтому с 2003 года Я. С. от работ по БПЭ отошел, хотя интереса к этой проблеме он не потерял.

Вернемся, однако, к проекту Глезера, из-за его дороговизны давно ставшему научным долгом. В 2009 году, несмотря на истощающий госбюджет кризис, японское правительство приняло решение о его финансировании. Японское космическое агентство JAXA занимается разработкой проекта с 1998 года, однако теперь к созданию солнечных панелей в космосе присоединились отобранные правительством крупные компании: NEC, Sharp, Mitsubishi Electric и Fujitsu. Несмотря на сопряженные с проектом колоссальные затраты, ученые из JAXA намерены довести его до реализации. Основной целью является создание дешевого электричества (предполагается, что мегаватт-час полученного из космоса будет стоить в шесть раз дешевле текущей средней цены) источника энергии. Для Японии, которая в существенной мере зависит от импорта углеводородов, создание подобных источников является первоочередной задачей.

Яков Соломонович уже вступил в возраст, обозначенный Виктором Шкловским грустными словами: «кончается старость». Увы. И нечего лукавить, думая, что все еще впереди. Но если оглянуться, — жизнь-то прожита героическая. За такую жизнь не стыдно перед Богом и людьми. Так Геракл оглядывался с последнего порога: вон лежит поверженный Немейский лев, сверкают чистотой Авгиевы конюшни, Стимфалийские птицы больше не роняют на головы людей своих смертоносных перьев и яблоки Гесперид сверкают золотой кожурой.

Но точка в жизни все равно не поставлена. Есть люди, не ставящие ее никогда. Они, оптимисты, и не мыслят поставить для себя эту точку. Коллега Я. С. Шифрина профессор Б.З. Каценеленбаум, которого Я. С. в ноябре 2009 г. поздравлял с 90-летием, метко заметил: «Таких, как мы с Вами, теперь принято называть не стариками, а долгожителями». И это правильно. В планах Якова Соломоновича — написание новых статей, проведение в 2010 году очередной научной конференции UWBUSIS-10 и, конечно, как и всю жизнь, помощь подрастающим молодым научным кадрам. Так что, пожелаем Якову Соломоновичу плодотворной пятой жизни, новых успехов в его многоплановой работе, крепкого здоровья, счастья и разных радостей, больших и малых.

ВСТРЕЧИ С ПРОФЕССОРОМ ШИФРИНЫМ

М. ХАЯКАВА

Когда я много лет назад увидел название пионерской монографии «Статистическая теория антенн», для меня оно показалось очень странным, потому что до этого никто не думал о статистических эффектах в антеннах. Такое название побудило меня заглянуть в эту монографию, и я обнаружил, что она очень интересная и единственная в своем роде. Это был мой первый опыт общения с профессором Шифриным.



В гостях у профессора А. Кимпара, Токио, 1992 г.

В 1992 г. мы, японцы, организовали в Саппоро (Хоккайдо) большую международную конференцию (так называемую ISAP — международную конференцию по антеннам и распространению). При обсуждении того, кого пригласить в числе нескольких приглашенных докладчиков, я порекомендовал профессора Шифрина в качестве одного из возможных спикеров с тем, чтобы он объяснил значение своей монографии с таким странным названием. Большинство японских инженеров даже не знали о существовании его монографии, за исключением д-ра Т. Катаги (в то время из компании Мицубиси). После пространственных дискуссий программного комитета мы пришли к выводу, что нам надо пригласить д-ра Х. Харингтона (США), д-ра П.Кларикоатса. (Великобритания), д-ра Д. Позара (США) и д-ра Я. Шифрина (Украина) как возможных приглашенных докладчиков. Доклад профессора Шифрина был очень успешным, так что многие в мире смогли понять идею созданной им статистической теории антенн. После симпозиума было организовано несколько семинаров в нескольких основных электротехнических компаниях, включая Мицубиси, благодаря любезной помощи д-ра Т. Катаги, а также в NTT с помощью д-ра Кеничи Кагошимы, и многие японские ученые и инже-

неры проявили большой интерес к статистической теории антенн профессора Шифрина. Кроме того, позже профессор А. Кимпара (основатель нашего научно-исследовательского института атмосферы при университете Нагойи) был настолько любезен, что пригласил профессора Шифрина к себе домой, и я помню, что у нас там была замечательная беседа, растянувшаяся на несколько часов. Впоследствии у меня было несколько возможностей встретиться с проф. Шифриным, и я имел честь видеть его на различных конференциях, в частности на Генеральных ассамблеях URSI в Торонто (1999 г.).

Я и моя жена Норико очень хорошо помним прогулки с профессором Шифриным по Токио, особенно посещение Императорского дворца. Кроме того, когда я в 1992 г. попал в Ленинград (это родной город Якова), он проявил любезность, показав различные интересные места города, и мы оба получили от этого огромное удовольствие. Чудесные воспоминания.

Профессор Шифрин — это выдающийся ученый в области антенн, и я очень уважаю его за его пионерские работы. Он до сих пор еще активен, и трудно следовать его примеру, хотя я этого и хотел бы. Как человек он очень добросердечен, поэтому мне хочется поблагодарить его за то, что он подарил нам так много чудесных впечатлений, запомнившихся на всю жизнь.



С Норико и Масаши Хаякава в Токио, 1992 г.

Я рад возможности поздравить профессора Шифрина с его замечательным юбилеем и хочу пожелать ему здоровья, хорошего настроения и дальнейших успехов.

ОТ КИТАЙСКИХ ДРУЗЕЙ

ВЕН ШУН ЦАН

Яков Соломонович Шифрин — общепризнанный новатор в области статистической теории антенн, создатель антенной ассоциации и организатор международных конференций по антеннам и электромагнетизму, всеми уважаемый активный член всемирного антенного сообщества.

Я рано узнал его знаменитую монографию по статистической теории антенн (английскую редакцию), но первая возможность встретиться с ним у меня появилась в сентябре 1992 г. в Саппоро, Японии во время конференции (ISAP), когда мы оказались соседями в недорогом отеле. Несколько раз мы случайно встречались в вестибюле отеля, но при этом просто кивали друг другу, улыбаясь. Я был намного младше его, и тогда стеснялся спросить, как его зовут. Но как-то утром Яков выписывался из отеля, тяжело нагруженный большим чемоданом и сумкой через плечо, нос при этом у него был заклеен пластырем из-за неосторожного столкновения со стеклянной дверью. Я предложил ему помочь нести багаж. Пока мы шли, он представился, сказал, что он из бывшего СССР и сообщил мне, что раньше уедет с конференции, так как у него в другом месте заказная лекция. Таким образом, я нашел автора знаменитой монографии! С тех пор прошло восемнадцать лет, я стал таким же, как Яков во время визита Саппоро, ну, а ему уже девяносто. И все эти годы мы поддерживаем нашу чистосердечную дружбу поколений.

Двумя годами позже я встретил его в Ницце (Франция) во время другой конференции (JINA), и мы сфотографировались на память на горе Гнездо. Возможно, это было символом того, что мы вместе поднимемся по ступеням с широкой платформы на более высокий уровень, и вместе будем избраны действительными членами IEEE, вначале он (в 1998 г.), а потом я (в 1999 г.). Позже мы встречались и на других конференциях, проводившихся в Атланте (США, 1998 г.), Торонто (Канада, 1999), и т.д. Мы всегда искали возможности посетить друг друга. Наконец, такая возможность представилась в 2003 г. благодаря ISAPE (Пекин, Китай) и в 2009 благодаря PIERS (Москва, Россия).

ЯКОВ И НОНА В КИТАЕ (2003)

После серии переговоров я послал Якову и Ноне формальное приглашение от имени Объединенного Нанкинского отделения AP-MTT-EMC IEEE и Государственной проблемной лаборатории миллиметровых волн Юго-Восточного университета, спланировав программу их двухнедельного визита в Китай. В то время авиалиния из Украины в Китай проходила через Москву, а рейсы были только на Пекин или Шанхай. Поэтому мы выбрали Шанхай (что ближе к Нанкину), а отлет назад был намечен из Пекина, т.е. из места проведения конференции, на Москву. В Китае было решено воспользоваться экспрессами из



Ницца, 1994 г.

Шанхая в Нанкин (со временем в пути около 2 часов) и из Нанкина в Пекин (целую ночь и даже больше в мягком вагоне). Помимо поездок, все проживание гостей взяли на себя хозяева: Шанхайский университет, Юго-восточный университет, Оргкомитет конференции, и Пекинский институт электроники Китайской АН.

Перед их визитом и у Якова, и у меня было весьма напряженное время. Яков затратил огромные усилия на организацию ICATT'03, состоявшуюся в сентябре, потом он провел неделю в госпитале, чтобы поправить свое пошатнувшееся здоровье. А я уехал из Китая на конференцию PIERS'03 на Гавайи и 19 октября вечером вернулся в Шанхайский международный аэропорт, переночевал одну ночь в аэропортовской гостинице, а затем пришел в тот же аэропорт, чтобы встретить утром 20 октября Якова и Нону. За час мы добрались в Шанхайский университет, где я познакомил их с профессором Шанхайского университета С.С.Цоном, и я уехал в Нанкин, чтобы подготовить там для них прием. У Якова было всего пара дней на посещение самого современного города Китая, который раньше был более развитым, чем Токио и Гонконг, но отстал было после 2 мировой войны. Днем 21 октября Яков прочитал лекции по беспроводной передаче

энергии и по антеннам с нелинейными элементами, а затем вечером они выехали в Нанкин.

Нанкин — знаменитый город, расположенный в прекрасных природных условиях, и обладающий множеством исторических реликвий. Он находится у подножия Пурпурной горы и, окруженный самой длинной в мире городской стеной (33,7 км), стоит на берегах реки Янцзы. Город очень зеленый, весь покрытый деревьями и цветниками. За восемнадцать столетий он десять раз был столицей Китая, а с конца сороковых стал колыбелью китайской электронной промышленности. Погода в октябре, когда наступает сезон «Золотой осени», здесь прекрасная, вот и на этот раз вся атмосфера радовалась приезду Якова. На пять дней в Нанкине было запланировано, что Яков прочитает 4 лекции (две — такие же, как в Шанхае, плюс «Статистическая теория антенн» и «Диагностика фазированных антенных решеток»), и осмотр нескольких интересных мест. Эти исключительные лекции привели в восторг всех, кто их слушал; а Якову и Ноне очень понравились чудесные виды города.

Мы посетили мавзолей Сун Ят Сена с его бесподобной архитектурой, построенный в очень красивом месте восточнее Нанкина. Д-р Сун — отец нации, признанный по обе стороны Тайваньского пролива. У подножия мавзолея Мин, где похоронен первый император династии Мин, лежит пышно-цветущая долина с каменными скульптурами последователей и животных. А, кроме того, следы от ног Якова, в сопровождении 8 ассистентов и выпускников из моей группы (которые сменяли друг друга) отпечатались в местном музее, Храме Конфуция, у Пагоды с видом на реку, на берегу озера Шуанву, и т.д.

А еще была замечательная поездка в город Янцоо. Яков и Нона увидели еще одно озеро Западный Слендер и окружающий его парк, где все так и дышит традиционной китайской культурой.



У входа в парк в г. Янцоо, 2003 г.

Кстати, мы воспользовались возможностью посетить там мою тетю, которая на год старше Якова: в то время она еще была способна принять нас и срезать в саду свежую розу для Ноны. Сейчас, увы, ее жизнь зависит от инвалидной коляски. Программа в Нанкине завершилась вечером 27 октября, и в поезде на Пекин для каждого пассажира были подготовлены по паре домашних тапочек.

Конференция ISAPE'03 начиналась 28 октября, а Яков был приглашен для представления заказного доклада по статистической теории антенн перед 200 ее участниками. За время проведения симпозиума Яков встретил нескольких старых знакомых, а его самого узнали многие специалисты по антеннам. Помимо этого, его пригласили посетить Институт электроники Китайской Академии наук и прочитать там лекцию. После конференции Яков с Ноной отправились на Великую Китайскую стену и, как герои (в соответствии с китайской пословицей, которая гласит: «Кто не поднимался на Великую Китайскую стену, тот не может быть героем»), поднялись по ее ступенькам.

ВЕН ШУН И ЦУ РЭЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ (2009)

Конференция PIERS'09 (в Москве 18-21 августа) предоставила мне с моей женой Цу Рэй шанс посетить Якова в России и/или Украине. Регистрационная процедура в оргкомитете началась еще в феврале, но, по их приглашению, мы могли получить визу только через турагентство, что исключало возможность продления времени нашего визита. С одной стороны, визы в Россию и в Украину можно было получить только отдельно, причем процедуры получения отличались друг от друга. С другой стороны, мое заявление на визу по «служебному паспорту» должно было пройти через местные органы в отличие от заявления по «частному паспорту» моей жены, направляемого напрямую в Генеральное консульство (в Шанхае). Сложные и взаимо-исключающие требования казались невыполнимыми! Чтобы преодолеть все препятствия, Яков с Ноной потратили огромные усилия, взывая о помощи ко всем, кто мог только помочь, да и нам пришлось несколько раз съездить в Шанхай в самые жаркие (с температурой воздуха 36-39 °С) летние дни. Да и потом, когда мы были уже в Санкт-Петербурге, из-за безответственности клерка нашей московской гостиницы и нашего непонимания того, что происходит, Ноне пришлось потратить еще много усилий, чтобы получить для нас разрешение на выезд.

Несмотря на все трудности с визами, мы, очень довольные, благополучно вылетели 14 августа из Нанкина на Пекин, а оттуда на Москву.

Приземлились мы в Московском международном аэропорту Шереметьево и поселились в гостинице вечером 15 августа. У нас было 2 сво-

бодных дня, чтобы посмотреть Москву перед симпозиумом. Яков с Ноной позвонили нам в гостиницу 16 августа, а 18-го мы встретились на конференции. Они уехали в СПб вечером 20-го, а мы задержались в Москве еще на один день. С того момента, как мы встретились рано утром 22 августа на вокзале в СПб, и до нашего отъезда из этого города у нас была богатая, красочная «Золотая неделя», во время которой мы были очень заняты, но это был и прекрасный отдых.



Цу Рэй и Нона, Санкт-Петербург, 2009 г.

Обе наши семьи поселились вместе в двухкомнатной квартире, в которой очень долго никто не жил, так как старший брат Якова уехал в США, но к нашему приезду квартира была приведена в порядок дочерью Якова, специально приезжавшей туда из Украины. По утрам и вечерам Нона и Цурэй управлялись на кухне, а мы с Яковом разговаривали на самые разные темы от технических до общественных, касающихся и отдельных городов и всего мира, от воспоминаний до ожиданий. Днем мы осматривали достопримечательности СПб и его пригороды. Мы посетили Исаакиевский собор и Спас на Крови, прошли по Невскому, побывали на Дворцовой площади и т.д. Можно сказать, что почти весь Санкт-Петербург — это огромный музей архитектуры и истории под

открытым небом! Яков оказался очень хорошим экскурсоводом, потому что много лет прожил в этом городе до войны и часто приезжал сюда все эти годы после нее. Нас поразило большое количество более чем превосходных дизайнов и технологий, изысканных картин и скульптур. Очень жаль, что время у нас было так ограничено, и мы ждем следующей возможности посетить другие интересные места. С неохотой мы распрощались с нашими гостеприимными хозяевами 28 августа, чтобы съездить еще в Киев, а Яков с Ноной остались по своим личным делам в СПб.

В Киеве мы гостили 4 дня. Принимал нас профессор Федор Дубровка, любезно спланировавший для нас посещение самых интересных мест Киева в сопровождении его молодых сотрудников. Он организовал мою лекцию по сложным печатным антенным решеткам. Яков звонил Федору каждый день, заботясь о том, насколько хорошо мы разместились и какова наша программа визита, вплоть до того, как мы благополучно вылетели из Киева 3 ноября.

23 апреля 2005 мы услышали, что Бог Долголетия сказал: «Яков будет праздновать свое столетие в 2020 году!»

Сейчас, во время празднования 90-летнего юбилея Якова, мы вновь услышали, что Счастливый Будда сказал: «Яков должен быть здоров и счастлив каждый день!»



Yakov must be healthy & joyous everyday!"

ЖИЗНЬ, ДОСТОЙНАЯ ПОДРАЖАНИЯ (к 90-летию Я.С. Шифрина)

В.ЦЫПИН

Я всегда считал, что настоящая дружба возникает в детстве или в юности. Только она, скреплённая и проверенная долгими годами привязанности, взаимного интереса и искренности, увлечениями и мечтами, сохраняется до конца и согревает тебя всю жизнь. Большинство наших друзей из молодости — школьных или студенческих лет. Всё труднее возникают дружеские отношения в зрелом возрасте и тем более в старости. И это не теоретические измышления. Все мои сохранившиеся друзья — из юности.

Но, перешагнув через порог семидесятилетия, я познакомился с Яковом Соломоновичем Шифриным, взаимоотношения с которым сравнительно быстро переросли в настоящую дружбу, которой я очень горжусь. И самым удивительным

в наших отношениях является то, что мы никогда не встречались и видели друг друга только на фотографиях. А познакомились мы виртуально, с помощью всемогущего интернета. Произошло это так.

Я собирал материалы по истории Мстиславля — маленького белорусского городка, где жили мои предки, и где в первые месяцы войны было уничтожено всё еврейское население. Там вместе со всеми погиб и мой дед Цыпин Борух. Интересовался я и тем, кто из известных людей родился и жил в этом городе и прославил его.

Я узнал, что в Мстиславле жила семья, давшая стране трёх прекрасных учёных — Фридриха, Кусиеля и Якова Шифриных. О братьях Шифриных я опубликовал статью в газете АМИ, ко-

торая попала в поле зрения Якова Соломоновича и привела к нашему знакомству и многолетней переписке. Привлекли нас друг к другу не только Мстиславские корни, но и то, что наши жизни проходили где-то в очень близких географических точках, хотя и в некотором временном отдалении (я моложе Якова Соломоновича на двенадцать лет). И его, и мои родители в 20-х годах прошлого столетия покинули Мстиславль и переехали в Ленинград, где прошли наши детские и юношеские годы. Там, в городе высочайшей культуры, мы получили образование и узнали горечь потерь ленинградской блокады. Мы рано потеряли родителей. Воспоминания об этих годах и утратах нас очень сближают.

Яков Соломонович с отличием окончил физический факультет Ленинградского университета и радио факультет Академии связи. Он стал крупнейшим учёным в области прикладной электродинамики и радиолокации. Я.С. Шифрин прошёл войну и награждён многими военными наградами.

Мы оба долгие годы жили на Украине, любим Севастополь, где я проектировал и принимал участие в строительстве кораблей, а Яков Соломонович организовывал и проводил крупнейшие международные конференции по теории и технике антенн. Он является почётным профессором Севастопольского технического университета, где ряд лет преподавал и я.

Точек пересечений было много... Мы несколько раз намечали встретиться, но по разным причинам встреча так и не состоялась. А вот переписка продолжается уже много лет и позволяет нам не только общаться друг с другом, но и узнавать о жизни, работе и увлечениях каждого из нас. Благодаря ей, нашей переписке, а также интереснейшей автобиографической книги Якова Соломоновича «Как мы жили», я и узнал много об этом замечательном человеке.

Я мало понимаю в радиоэлектронике, но одно даже перечисление его должностей и званий вызывает у меня глубочайшее почтение: доктор наук и профессор, причём, почетный доктор наук и почетный профессор нескольких университетов. Заслуженный деятель науки и техники. Создатель нового научного направления — статистической теории антенн. Академик Академии наук прикладной радиоэлектроники. Президент Украинской национальной ассоциации «Антенны». Думаю, справедливо, что в книге по истории Второй Санкт-Петербургской гимназии (в довоенные годы — Первой образцовой школы Октябрьского района г. Ленинграда) среди выпускников, которые прославили Родину, стоит и имя её выпускника 1937 года Якова Соломоновича Шифрина.

Но мне больше всего хочется отметить чисто человеческие качества Якова Соломоновича и среди них, в первую очередь, его удивительное трудолюбие и активность, память о своих корнях, заботу о близких и их поддержку, стремление к справедливости и желание помочь нуждающимся.

прекрасное владение русским языком и почтительнейшее отношение к книге, как средству передачи знаний и памяти, щедрость и стремление донести до других известные ему знания.

Ему до всего есть дело и, если это дело достойное, он борется до конца за его осуществление.

Он вступает в борьбу и добивается успеха в вопросе об улучшении медицинского обеспечения участников Великой отечественной войны. Пишет властям г. Харькова о достойном захоронении воинов Советской Армии, погибших в войну на территории Харьковщины, об оказании всемерной помощи инвалидам войны. Приложил немало усилий, чтобы в Харькове была восстановлена памятная доска легендарному подводнику, Герою Советского Союза Израилю Фисановичу на том доме, где он жил. Возможно благодаря и его усилиям, в Харькове появилась улица Фисановича.

Он помогает мне в моей нескончаемой борьбе за то, чтобы на памятнике, установленном на месте расстрела наших земляков — мстиславчан осенью 1941 г., было указано количество погибших и их национальность, а не только то, что они были советскими людьми.

За сравнительно небольшой период нашего знакомства, уже в возрасте старше 80 лет Яков Соломонович издал три книги — о своей жизни, а также жизни и трудах своих родственников. Причём это была не только работа за письменным столом, но и большая переписка и неоднократные поездки в Санкт-Петербург для поиска и отбора материалов. Он разобрал большой архив своего брата, профессора Кусиеля Соломоновича, проживающего сейчас в США, и передал наиболее ценные материалы в академические институты России, где тот работал в прошлые годы. Проведя эту огромную работу, он совершил на мой взгляд, подвиг, издав книгу «Кусиель Соломонович Шифрин. Учёный, Учитель и Человек», в которую включил его избранные работы, автобиографические заметки и воспоминания об известном учёном.

Он отредактировал, подготовил к печати и опубликовал ранее не изданную книгу своего дальнего родственника Бориса Барткова (Айзенберга) «33 месяца в тылу врага». Издав книгу Барткова, он пошёл дальше и добился того, что в музей «Истории и культуры евреев Белоруссии» появился стенд, посвящённый героическому военному прошлому этого человека, и выслал туда его правительственные награды. Кроме того, в музей он послал альбом партизанских зарисовок Бориса Айзенберга, среди которых есть уникальный портрет Петра Мироновича Машерова (бывшего комиссара его партизанской бригады).

Яков Соломонович не только завершил работу над этими книгами, но и подарил их знакомым и родственникам, а также разослал их в наиболее известные библиотеки СНГ и дальнего зарубежья, где они, безусловно, найдут своего читателя. Я был невольным свидетелем того, с какой настойчивостью он доводил начатое дело до конца, пока

не убедился, что книги появились на полках Израильской русской библиотеки.

Я благодарен Якову Соломоновичу за то, что, прочитав мои первые статьи по истории Мстислава, он убедил меня в необходимости развития их и издать книгу, посвященную прошлому этого города. И в процессе написания книги я постоянно пользовался его советами и учитывал замеча-

ния, которые всегда были правильными и удивительно корректными.

Поздравляя Якова Соломоновича с прекрасным юбилеем, я желаю ему крепкого здоровья, радости семейной жизни, бодрости и новых, творческих свершений.

И, как у нас говорят, — до 120 !

О ВСТРЕЧАХ С ЮБИЛЯРОМ

А.Г. ШУБОВ

Как представитель старшего поколения инженеров-антенщиков, хотя мне «всего лишь» 79, расскажу о самых ранних встречах с Яковом Соломоновичем.

Мне довелось познакомиться с Яковом Соломоновичем, когда он был еще довольно молодым. Слово «познакомиться» здесь довольно условное. В этой связи вспоминаю эпизод, связанный с другим событием.

На один из объектов под Москвой приехал Маршал Дмитрий Федорович Устинов. Ему представили Главного Конструктора Владимира Пантелеймоновича Сосульникова.

Поздоровавшись, Д.Ф. Устинов заметил: «Мы с Вами где-то уже встречались — Ваше лицо мне знакомо», — на что Владимир Пантелеймонович мгновенно отреагировал: «Конечно, встречались! Вы тогда стояли на трибуне Мавзолея, а я шел по Красной площади в колонне демонстрантов».

Действительно, Яков Соломонович выступал тогда с докладом на научно-технической конференции по теории и технике антенн, а я в числе многих других инженеров с огромным интересом его слушал. Это сейчас конференции и симпозиумы, как правило, международные, стали обычным будничным делом, и специалисты едва успевают переезжать с докладами из одной страны в другую. В то далекое время информация о работах, проводимых даже в смежном НИИ, была сильно ограничена, конференции по антеннам были большей частью закрытыми. Тем не менее, для молодых сотрудников, только что вышедших из стен учебных заведений, они были настоящим праздником. Здесь можно было услышать доклады о фундаментальных основах техники антенн и о новых прорывах в этой области, самому выступить с сообщением, а главное, — пообщаться с коллегами, обсудить актуальные проблемы разработок.

Пожалуй, первое, что для меня поначалу стало наиболее притягательным в личности Якова Соломоновича, связано именно с его неповторимым искусством очень четко, убедительно и ярко излагать свои мысли. В кулуарах конференций он всегда охотно и исчерпывающе отвечал на возникшие вопросы, независимо от того, кто к нему обращался.

Потом пришло понимание того, что стоит за этими яркими докладами.

С тех пор прошло более 50 лет. Неоднократно мы встречались с ним на антенных конференциях, в НИИ радиофизики, где проводилась совместная работа с возглавляемыми им кафедрой ВИРТА, а позднее кафедрой Харьковского национального университета радиоэлектроники. За эти годы Яков Соломонович создал новые научные направления в теории и технике антенн, получил всеобщее признание как выдающийся Ученый, вырастил многих талантливых специалистов, которые, в свою очередь, стали маститыми Учеными. И вместе с тем он остается доступным в общении, всегда готов помочь в трудную минуту своим мудрым советом и разрядить накал страстей добрым юмором и оптимизмом.

За эти годы НИИ дальней радиосвязи и НИИ радиофизики, в которых я проработал фактически всю свою жизнь, создали целый ряд антенных устройств. От крупных сооружений высотой 100 м и выше на дециметровых и более длинных волнах, для оборонных комплексов, до миниатюрной антенны для автомобильного радиолокатора в диапазоне 76 ГГц, которая умещается на ладони. В этих разработках, несомненно, есть вклад Якова Соломоновича, почерпнутый из его книг и статей. И все же не это главное. Следует ли искать прямую связь между тем, чему учили в институте, и тем, чем приходится заниматься после получения диплома? Как и учебный ВУЗ, которым гордится каждый из нас, труды Якова Соломоновича, его выступления — это, прежде всего, школа, которая закладывает основы знаний и стимулирует тягу к самостоятельной работе на протяжении всей жизни. Отрадно, что эта школа динамично развивается и опережает в различных направлениях других исследователей.

На Ленте Новостей прочел сообщение:

«Старейшим человеком на планете признан буддийский монах, которому исполнилось 115 лет.

По словам монаха, который родился в 19 веке, пережить бурный XX век ему помогло то, что он мало ест, мало говорит и при этом никогда не врет. Во время трапезы монах пьет не больше девяти глотков и не добавляет в еду ни перец, ни соль. Правда, он не может отказаться от десерта из сладкого риса».

Верю в то, что Якову Соломоновичу представится возможность рассказать в будущем, как

ему удалось побить рекорд буддийского монаха. Полагаю, что это произойдет не только благодаря режиму питания и сладкому рису. Залогом этого являются: увлеченность любимым делом, постоянное внимание учеников, гордость за их достижения, приверженность к открытому общению с

людьми. И, конечно, исключительная честность и обязательность по отношению ко всем окружающим и при любых обстоятельствах.

С глубокой признательностью Юбиляру и наилучшими ему пожеланиями здоровья и творческого долголетия.

ВСПОМИНАЯ ПРОШЛОЕ

К.С.ЩЕГЛОВ

Вспоминая 50–60-е годы — годы становления и укрепления основ современных радиотехнических систем, нельзя не думать о Харькове с его научно-техническим потенциалом в этой области — ХГУ, ИРЭ АН УССР и, конечно, АРТА им. Л.А. Говорова. С ведущими специалистами академии по ряду направлений: распространению радиоволн, общей теории радиолокации, антенной техники — многим специалистам страны, в том числе и мне, неоднократно приходилось встречаться, в том числе и в стенах академии.

Тогда-то мне и довелось познакомиться с Яковом Соломоновичем Шифриным. Он произвел на меня самое благоприятное впечатление своим дружелюбием, уважительным отношением к коллегам, эрудицией и участием, готовностью оказать необходимую помощь консультациями, добрым советом.

Выход в свет в 1962 г. его первой книги по статистике поля линейной антенны стал событием. Для меня, недавнего выпускника института, а особенно для моих родственников, стала большой неожиданностью посылка из Харькова от Якова Соломоновича с авторским экземпляром книги. Возможно, это ещё больше укрепило во мне интерес к этой области антенной техники. Так что года через три Яков Соломонович дал мне очень хоро-

ший отзыв на автореферат кандидатской диссертации, значительная часть которой была посвящена статистической теории антенн.

Яков Соломонович Шифрин, несомненно, относится к когорте ученых, создававших прочный фундамент советской прикладной науки и современной техники радиотехнических систем. Много сил отдал делу воспитания новых поколений специалистов высшей квалификации.

Непременный участник и организатор совещаний, научно-технических конференций и семинаров по антенно-фидерной тематике Яков Соломонович внес большой вклад в формирование в нашей общей стране сообщества специалистов-высокочастотников, тесно связанных профессиональными и дружественными отношениями.

Последние годы, несомненно, затруднили связи между учёными и специалистами наших стран, однако, в том числе и благодаря активной позиции Якова Соломоновича Шифрина, эти затруднения не стали началом катастрофического их разрыва.

Желаем уважаемому Якову Соломоновичу хорошего здоровья, долгих лет жизни, творческого настроения и дальнейшего участия в развитии и укреплении теоретических основ и техники антенных систем.

ПОЗДРАВЛЕНИЕ ИЗ БЕЛОРУССИИ

ПОКЛОННИКИ ИЗ МИНСКА

Дорогой Яков Соломонович! Вас приветствует и поздравляет с Юбилеем Белоруссия и Минск в лице Ваших учеников, почитателей и друзей из Военной академии и Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Вспоминаются многие яркие эпизоды из далекого и недалекого прошлого, когда Вы часто бывали в Минске, а мы — в Харькове или на конференциях, которые Вы организуете и проводите. В памяти крепко держатся эпизоды из совместной работы и общения с Вами. Это — лекции, беседы, которые Вы проводили в МВИЗРУ для сотрудников кафедры антенн, Ваши приезды в качестве оппонента на защиту диссертаций, Ваши рассказы о жизни. Обо всем не напишешь, да и Вы это помните хорошо. Но о некоторых эпизодах хочется вспомнить и написать для тех, кто сейчас вы-

ходит на защиту кандидатских диссертаций и их руководителей, и, может быть, даже для тех молодых сотрудников, которые Вас сейчас окружают. Сейчас защита диссертации — сугубо личное дело, поэтому все дела по подготовке диссертации, многочисленных сопровождающих документов, включая отзывы на авторефераты, отзывы оппонентов, ложатся на плечи научного руководителя и, отчасти, — на автора диссертации.

Что было тогда? В начале 60 годов один сотрудник кафедры антенн МВИЗРУ (Минск) послал свою диссертацию к Вам на кафедру антенн (в Харьков). Через некоторое время этот сотрудник был приглашен в Харьков. Сделав довольно скверный доклад, он уехал в Минск, а через некоторое время был опять приглашен уже на защиту на ученом совете в ВИРТА. В промежутке между двумя приездами в Харьков упомянутый сотруд-

ник не знал, что происходит в Харькове на Вашей кафедре. А за это время Вами и сотрудниками Вашей кафедры были подготовлены все документы для защиты, включая написание автореферата, его рассылку, получение отзывов на автореферат. После защиты, упомянутый выше сотрудник опять уехал на работу в Минск, а Ваша кафедра подготовила все документы по итогам защиты и отправили их в ВАК СССР.

Дорогой Яков Соломонович, спасибо Вам за все. Мы преклоняемся перед Вашим талантом, энергией, настойчивостью, трудолюбием и жела-

нием помочь людям. Высоко ценим Ваш вклад в Победу в Великой Отечественной войне, в решение многих сложных организационных вопросов, в мировую науку — в электродинамику, теорию и технику антенн.

Дорогой Яков Соломонович, примите наши теплые и искренние поздравления с 90-летием, желаем Вам здоровья, бодрости и необходимых сил для решения многочисленных задач, которые стоят перед Вами. Уверены, что непрерывная цепь этих задач будет и впредь вести Вас в будущее.

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ ЧЕЛОВЕК

Л.П.ЯЦУК

Живет рядом с нами замечательный человек — Яков Соломонович Шифрин, представитель старой гвардии с высокими идеалами, которыми пропитаны мы, родившиеся в первой половине прошлого века. Именно потому он так дорог нам. Ясный ум, четкость мысли, увлеченность наукой, неукротимая энергия по-прежнему свойственны ему, несмотря на весьма солидный возраст. Еще 10 лет назад, когда мы праздновали 80-летие Якова Соломоновича, его друг, видный ученый Лев Давидович Бахрах так описал динамику научного потенциала Якова Соломоновича. Для сравнения он нарисовал на доске две кривые в системе координат «годы человеческой жизни» (ось абсцисс) «потенциал» (ось ординат). Одна из них (стандартная) достигает максимума в районе 40-50 лет, потом после 60 более или менее круто спадает. Другая кривая монотонно поднимается вверх, не достигая насыщения даже к 80-ти. Это кривая научных достижений Якова Соломоновича, сказал он. Самое потрясающее то, что прошло еще 10 лет, а характер этой кривой не изменился. Недавно мой однокурсник В.А.Петров рассказал мне, что он очень сдружился на научной почве с Я.С.Шифриным. Представляешь, говорил он, Я.С. досконально изучил мою новую статью, просмотрел все предыдущие работы, на которые у меня даны ссылки, и сказал, о чем я хорошо написал, а что плохо и непременно надо исправить. Я белой завистью ему позавидовала. К сожалению, круг задач, которыми я занимаюсь, лежит в стороне от научных интересов Якова Соломоновича, поэтому мне не пришлось тесно взаимодействовать с ним. Тем не менее, когда Яков Соломонович писал отзыв оппонировавшей организации на мою докторскую диссертацию, он очень тонко подметил все ее плюсы и минусы, за что я была ему очень благодарна. Самое интересное, что именно Яков Соломонович как бы благословил меня на защиту этой диссертации. Это получилось так. В середине 90-х годов в Харьковском государственном университете проходила организованная им антенная конференция. Я делала обзорный до-

клад по нашим разработкам в области щелевых антенн. Хотелось рассказать многое, а Яков Соломонович торопил меня, мол, время истекает. Я даже обиделась на него. Казалось, как это часто бывает, что другим он давал больше времени на выступление. На этой секции присутствовала известный ученый в области антенн и распространения радиоволн профессор Лобкова Любовь Михайловна из Севастополя. Она единственная задала мне несколько вопросов по существу, за что я ей была очень благодарна. Позже она сказала Якову Соломоновичу, что ей понравился доклад этой женщины. «Да это докторская диссертация», — ответил он. Я тогда еще и не помышляла о защите. У меня тогда в принципе была решена очередная задача, но никак не удавалось довести до конца соответствующие расчеты. А тут меня подталкивают к защите. И я решилась. Любовь Михайловна согласилась быть моим оппонентом. Все прошло хорошо. Если бы не это кулуарное замечание Якова Соломоновича, я не знаю, сколько времени я бы еще тянула. Так что можно считать его крестным отцом моей диссертации.

Круг научных познаний Якова Соломоновича чрезвычайно широк. Это ярко проявляется в процессе участия его в работе специализированного докторского Ученого совета ХНУРЭ по защита диссертаций, членом которого я являюсь. Он внимательно слушает доклад диссертанта, задает ему уточняющие вопросы. А потом, по какой бы специальности ни велась защита диссертации (а их в совете 3 или 4), во время дискуссии показывает место данной работы в круге исследований по данной специальности, обосновывает актуальность работы и научные достижения диссертанта, позволяющие присвоить ему искомую степень наук. Мне всегда доставляло огромное удовольствие слушать выступления Якова Соломоновича. Четкость и ясность мысли, краткость высказываний при их большой информативности, благожелательность по отношению к молодым ученым, которые в наше непростое время самоотверженно отдают себя науке, — от всего этого становится

светло на душе. Хочется и дальше работать не-взирая ни на какие тяготы, овладевать глубинами знаний, хочется быть похожими на Якова Соломоновича, сохранить, подобно ему, творческое долголетие.

Можно позавидовать его энергии. Сколько научных конференций организовано им! Не говоря уже о их ценности с научной точки зрения, хотелось бы отметить и культурную программу. Экскурсии по городу, в музеи... Мне вспоминается конференция по дифракции волн во Львове в 1981 г. После заседания на секции пошла я в художественный музей. Закончив осмотр экспозиции, на выходе встретила Якова Соломоновича и... начала с ним осмотр заново. Какое я при этом получила удовольствие! Яков Соломонович комментировал буквально каждую картину, анализировал ее, рассказывал о творческом пути художника. Там он познакомил меня и с полотнами художника Матейко. А на следующий день пригласил меня в числе немногих на организованную им экскурсию в зал заседаний Ученого совета политехнического института, расписанный под полотном картинами этого художника. Было очень интересно. Я искренне восхищаюсь широкими познаниями Якова Соломоновича и в области искусства. С этих пор я вижу его не только как большого ученого на вершине антенного Олимпа, а и как человека, обладающего энциклопедическими знаниями. Благодаря глубокой интеллигентности, несмотря на огромную дистанцию в научном уровне, Яков Соломонович располагает к себе тем, что разговаривает с каждым, как с равным.

Как-то за столом в гостях у Лобковой Любови Михайловны в Севастополе присутствующие там женщины, шутя, признавались, когда они влюбились в Якова Соломоновича. Я назвала время экскурсий во Львове. Но не могу забыть и прогулку по Волге на яхте под парусом, которую он организовал для нескольких участников конференции ФАР-94 под Казанью.

А как он поет! Мы узнали об этом благодаря традиционным банкетам, посвященным успешному завершению работы конференции. Голос и слух изумительные, а репертуар какой! — любимые песни нашей молодости; просто дух захватывает,

когда слушаешь это пение. На нескольких банкетах в Севастополе и на его юбилеях севастопольцы подарили ему в несколько этапов адмиральскую форму (сначала фуражку, а потом китель, брюки и две портупеи, не забыв о хрустальном кортике), которая ему очень к лицу. Поговаривают, что китель для него расшил своими руками проректор СевНТУ Александр Григорьевич Лукьянчук.

Яков Соломонович — не сторонник порицать все, что относится к советскому периоду времени, например, систему образования он оценивает очень высоко. Когда пошли разговоры о том, что лекции нам придется читать на украинском языке, он стал горячо протестовать. Помню, как он шел по берегу Волги со Львом Давидовичем Бахрахом и очень эмоционально высказывался по этому поводу. «Ну, чего ты кипятишься? — смеялся Лев Давидович, — все будет хорошо». Мы тогда еще не знали, как далеко зайдут все эти дела...

Бывали и веселые эпизоды на конференциях. Ведет Яков Соломонович секцию на конференции ММЕТ-98, которая проходила у нас в университете в Малом актовом зале. Рабочий язык английский, которым он свободно владеет. Это теперь молодежь в большинстве своем хорошо говорит по-английски. А тогда многие испытывали большие затруднения. Я пришла с небольшим опозданием на эту секцию послушать доклад моей сестры К.П.Яцук. Фамилия ее соавтора, аспиранта Р.Швелидзе стояла по алфавиту на первом месте, но он тогда плохо знал язык, потому попросил Клару Прокофьеву сделать доклад вместо него. Яков Соломонович, увидев, что к трибуне идет женщина, объявил, что докладчик — мадам Швелидзе. Когда я появилась на секции, Я.С. со смехом сразу же рассказал мне об этой ситуации. Он-то прекрасно знал Клару Прокофьевну, и получилось очень комично.

Известно, что жизнь — штука сложная. Из-за умственных, нервных и физических перегрузок ему пришлось перенести и инфаркт. Но жизнелюбие и сила воли помогли преодолеть все. Яков Соломонович и по сей день заражает всех окружающих радостью жизни. Я благодарна судьбе за то, что она одарила меня счастьем общения с таким человеком. Впору спеть ему «Многие лета!»

ИЗ ЛИЧНОГО АРХИВА Я.С. ШИФРИНА

Настоящий раздел содержит некоторые материалы из личного архива Я.С. Шифрина — персоналии о нем из энциклопедий, копии дипломов научных наград юбиляра и его почетных званий.

ПЕРСОНАЛИИ

РОССИЙСКАЯ ЕВРЕЙСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ (Т.3, Изд. «Энос», Москва, 1997 г.)

ШИФРИН Яков Соломонович (р. 1920 г., Мстиславль Могилевской губ.), специалист в области теории антенн и распространения радиоволн. Д-р техн. наук (1965), проф. (1966). Инж.-полк. (1961). Брат К.С.Шифрина. Окончил в 1941 физ. ф-т ЛГУ, в 1944 — Военную академию связи. В 1944-1945 — на фронте. В 1945-1980 в Военн.радиотехн. академии Вооруженных Сил (с 1968 — Военн.-инж. Радио-техн. Академия ПВО им. Л.А.Говорова), с 1957 зав. кафедрой техн. электродинамики. С 1980 — в Харьковском ин-те радиоэлектроники, в 1991-1996 зав. кафедрой техн. электродинамики и антенн. Оsn. направления иссл. связаны с приоритетными разработками статистич. теории антенн, необходимой для расчета и проектирования кр. антенн с иссл. дальнего тропосферного распространения радиоволн и разработкой теории антенн с нелинейными элементами и, в частн., теории антенн-выпрямителей (ректенн), используемых для передачи энергии эл.-магн. лучом. Автор более 170 науч. печатных работ и ряда изобретений. През. Украинской нац. ассоциации «Антенны» (1993). Засл. деятель науки и техники УССР (1991). Пр. им. А.С.Попова АН СССР (1983).

Соч.: Вопросы статистической теории антенн. М., 1970; Антенны. Харьков, 1976; Проблемы антенной техники. М., 1989 (соавт.); Справочник по антенной технике. М., 1997 (1-й т, соавт.).

БЕЛАРУСКАЯ ЭНЦЫКЛАПЕДЫЯ (Изд. «Беларуская энциклапедыя», Минск, 2004, Т.18, книга 1, стр. 22)

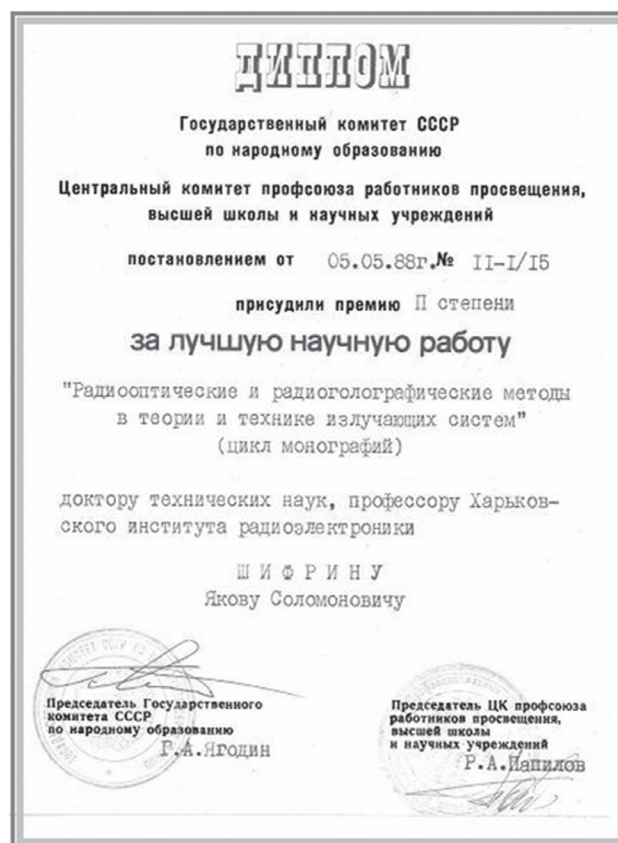
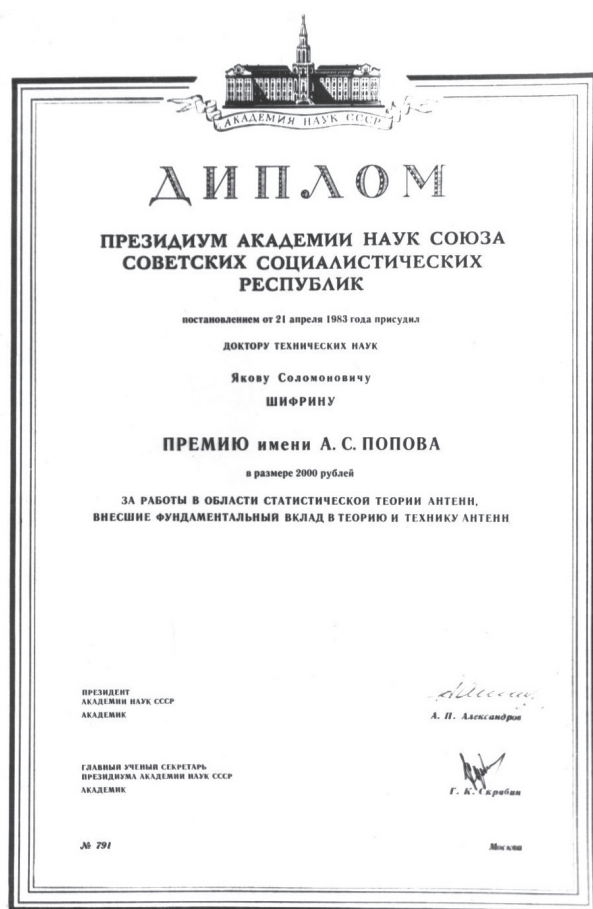
Шыфрын Якаў Саламоновіч (н. 23.4.1920, г. Мсціслаў Магілёўскай вобл.), украінскі вучоны ў галіне радыёфізікі і прыкладной электрадынамікі; стваральнік навук. школы па тэорыі антэн і распаўсюджвання радыёхваль. Правадз. чл. Міжнар. т-ва электра- і радыёінженераў (IEEE; 1998). Д-р тэхн. н. (1965), праф. (1966). Інжынер-палкоўнік (1961). Засл. дз. нав. і тэхн. Украіны (1991). Брат К.С. Шыфрына. Скончаў Ленінградскі ун-т (1941), Ваен. акадэмію сувязі (1944). З 1948 у Ваенна-інж радыётэхн. акадэміі (з 1957 заг. кафедры). З 1980 у Харкаўскім нац. ун-це радыёэлектронікі (у 1991-96 заг. кафедры). З 1993 прэзідэнт Укр. нац. асацыяцыі «Антэны». З 1995 прэзідэнт Усходне-Укр. аб'яднанага аддз. IEEE. Навук. працы па тэорыі антэн, даследаванні ультракароткіх радыёхваль. Заснаваў статыст. тэорыю антэн. Стварыў агульную тэорыю антэн з нелінейнымі элементамі (з А.І. Лучанінавым). Прэмія імя А.С.Папова АН СССР 1983.

Тв.: Вопросы статистической теории антенн. М., 1970; Антенны. Харьков, 1976; Справочник по антенной технике; В 5 т., т. I. М., 1997 (у сааўт.).

Літ.: Я..С. Шифрин //Антенны. 2000. Вып.1 (44).

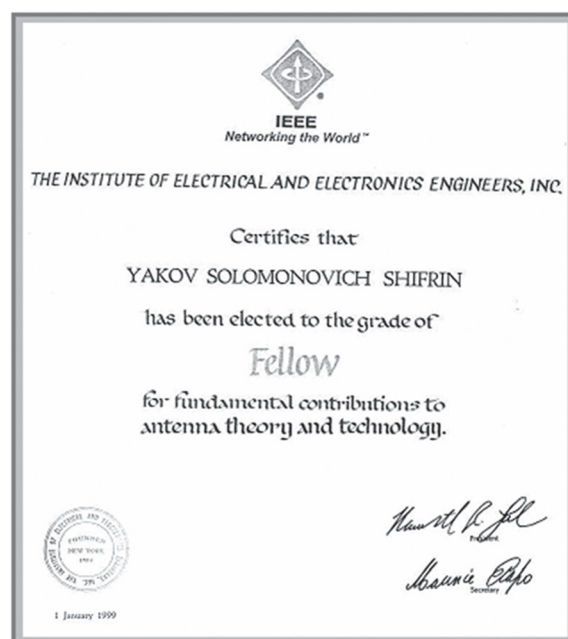
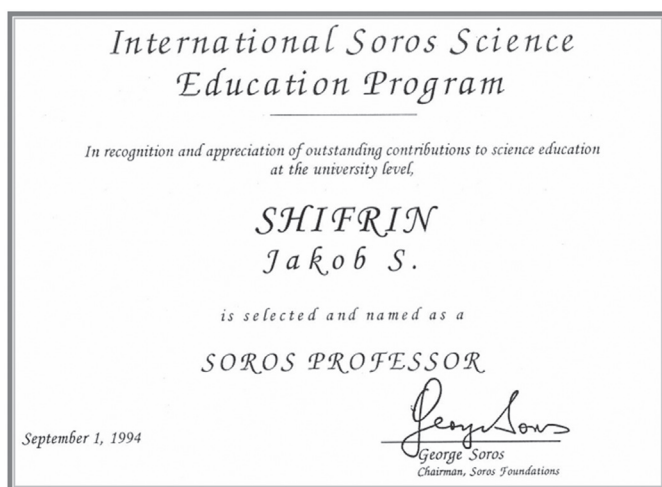
М.М. Касцюковіч

КОПИИ ДИПЛОМОВ НАУЧНЫХ НАГРАД

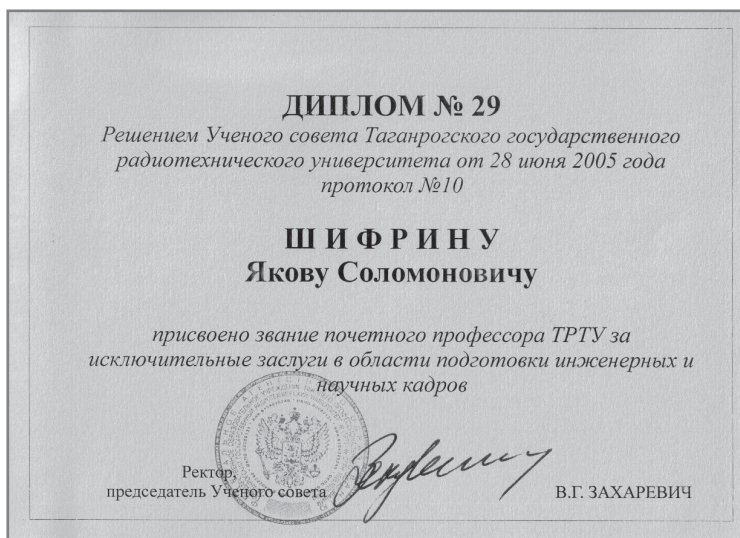


КОПИЯ СЕРТИФИКАТА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЧЛЕНА IEEE

КОПИЯ СЕРТИФИКАТА СОРОСОВСКОГО ПРОФЕССОРА



КОПИИ ДИПЛОМОВ ПОЧЕТНОГО ПРОФЕССОРА И ПОЧЕТНОГО ДОКТОРА



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ВОСПОМИНАНИЙ

- БАШУК Елена Борисовна** — доцент Севастопольского национального технического университета (СевНТУ), кандидат техн. наук, доцент.
- ГОМОЗОВ Владимир Иванович** (р. 1935 г.) — Главный научный сотрудник ОАО «АО НИИРИ» (г. Харьков), лауреат Государственной премии СССР, Заслуженный изобретатель УССР, доктор техн. наук, профессор.
- ГОРОБЕЦ Николай Николаевич** (р. 1940 г.) — заведующий кафедрой прикладной электродинамики Харьковского национального университета (ХНУ) им. В.Н. Каразина, доктор физ.-мат. наук, профессор.
- ГРАБИНА Валентин Андреевич** (1920 г.) — старший научный сотрудник ХНУ им. В.Н. Каразина, кандидат техн. наук, доцент.
- КАПЛУН Всеволод Александрович** (р. 1923 г.) — профессор Московского открытого университета, доктор техн. наук, профессор.
- КАТРИЧ Виктор Александрович** (р. 1944 г.) — Заместитель проректора по научной работе ХНУ им. В. Н. Каразина, Вице-президент Украинской национальной ассоциации «Антенны», доктор физико-математических наук, профессор.
- КАШИН Валерий Акимович** (р. 1938 г.) — Главный конструктор АФАР ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей» (г. Москва), доктор техн. наук, профессор.
- КОЛЧИГИН Николай Николаевич** (р. 1942 г.) — заведующий кафедрой теоретической радиофизики ХНУ им. В. Н. Каразина, лауреат Государственной премии Украины, Председатель Харьковского отделения (чаптера) IEEE, доктор физ.-мат. наук, профессор.
- КОРНИЕНКО Леонид Григорьевич** (р. 1937 г.) — профессор Харьковского университета Воздушных Сил (ХУВС) им. Ивана Кожедуба, доктор технических наук, профессор.
- КУРОЧКИН Александр Петрович** (1941 г.) — начальник антенного отдела ОАО «Концерн «Вега» (г. Москва), главный редактор журнала «Антенны», лауреат премии Совета Министров, доктор технических наук, профессор.
- ЛОБКОВА Любовь Михайловна** — профессор СевНТУ, доктор техн. наук, профессор.
- ЛУКЬЯНЧУК Александр Григорьевич** (р. 1948 г.) — первый проректор СевНТУ, кандидат техн. наук, доцент.
- ЛУЧАНИНОВ Анатолий Иванович** (р. 1949 г.) — профессор Харьковского национального технического университета (ХНУРЭ), доктор техн. наук, профессор.
- МАКСИМОВА Нина (Нона) Григорьевна** — старший научный сотрудник ХНУРЭ, кандидат техн. наук.
- МАЛЕХАНОВ Александр Игоревич** (р. 1960 г.) — ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), кандидат физ.-мат. наук.
- МИНКОВИЧ Борис Михайлович** (р. 1930 г.) — доцент Харьковского высшего военного командно-инженерного училища им. Н.И. Крылова, кандидат техн. наук, ныне пенсионер.
- ОБУХОВЕЦ Виктор Александрович** (р. 1946 г.) — первый зам руководителя Таганрогского технологического института Южного Федерального университета (РФ), доктор техн. наук, профессор.
- РАДЦИГ Юрий Юрьевич** (р. 1936 г.) — Заслуженный деятель науки РФ, Советник ректора Новгородского государственного университета им. Я. Мудрого (г. Великий Новгород), доктор техн. наук, профессор.
- СЕДЫШЕВ Юрий Николаевич** (р. 1934 г.) — профессор ХУВС им. Ивана Кожедуба, Заслуженный деятель науки Украины, доктор техн. наук, профессор.
- ТАКАНО Тадаши** (Takano, Tadashi) (р. 1945 г.) — профессор НИИ космоса и астронавтики, профессор Токийского и Нихон университетов (Япония), лауреат ряда научных премий, Fellow IEEE
- ТКАЧЕВ Геннадий Николаевич** (р. 1938 г.) — Главный конструктор ОАО НПК НИИДАР (г. Москва), лауреат Государственной премии Украины, Заслуженный учитель Украины, доктор техн. наук, профессор, генерал-майор (в отставке).
- ТЫРНОВ Валерий Федорович** (р. 1944 г.) — журналист (г. Харьков), кандидат физ.-мат. наук.
- ХАЯКАВА Масаши** (Hayakawa, Masashi) (р. 1944 г.) — профессор Токийского Университета электросвязи, Япония (подробнее см. с. 60)
- ЦАН Вен Шун** (Zhan, Wen Xun) (р. 1937 г.) — профессор Юго-Восточного университета в Нанкине, Китай, Председатель Нанкинского объединенного отделения (чаптера) IEEE, Fellow IEEE.
- ЦЫПИН Владимир Маркович** (р. 1932 г.) — корабельный инженер-механик. Работал в Севастопольском ЦКБ «Коралл». Заслуженный изобретатель Украины. Сейчас пенсионер, живет в Израиле.
- ШУБОВ Анатолий Григорьевич** (р. 1930 г.) — работал в московских НИИ — НИИДАР и ОАО «Радиофизика», кандидат технических наук. Сейчас пенсионер, живет в США.
- ЩЕГЛОВ Казимир Сергеевич** (р. 1935 г.) — начальник отдела ФГУП «ЦНИИ «Комета» (г. Москва), доктор техн. наук, профессор.
- ЮХАНОВ Юрий Владимирович** (р. 1952 г.) — зав каф. Антенн и радиопередающих устройств. Таганрогского технологического института Южного федерального университета, доктор техн. наук, профессор.
- ЯЦУК Людмила Прокофьевна** — профессор ХНУ им. В. Н. Каразина, доктор физ.-мат. наук, профессор.

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Ответственный секретарь

Е. Б. Исаева

Корректор

А. И. Шахова

Перевод на английский язык

Н. Г. Максимова

Компьютерный дизайн и верстка

Е. Б. Исаева

Рекомендовано засіданням Бюро Президії Академії наук прикладної радіоелектроніки
(протокол № 1 від 25.03.2010 р.).

Рекомендовано Вченою радою Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол № 61 від 26.03.2010 р.).

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 6037 від 09.04.2002 р.

Підписано до друку 19.03.2010. Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$.
Папір офсет. Друк офсет. Умов.-друк. арк. 21,2. Облік.-вид. арк. 21,0.
Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Надруковано ФОП Андрєєв К.В.
61166, м. Харків, просп. Леніна, 14. Тел. 757-63-27