

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 имелась 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 доходит 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 разнеса 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 разнеса в фокальной плоскости (разнеса 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 параболаидом 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 0^0 до 7^0 при горизонтальном и вертикальном разнесе облучателей. Величина корреляционного «расстояния» по углу оказалась на 60-ти км трассе порядка 6^0 и порядка 4^0 – на трассе ~ 200 км. При указанных выше угловых

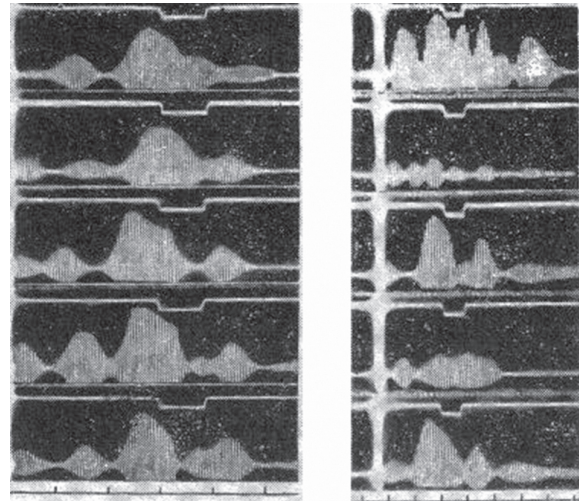
разносах снижение среднего уровня сигнала для 60 км трассы составило ~ 20 дБ, а для трассы в 200 км – около 7 дБ. Из приведенных цифр с учетом типичной глубины замираний сигнала (порядка 20 дБ) следует, что на 60-ти км трассе система, по-видимому, нецелесообразна, а на трассе 200 км она будет эффективной. 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 УРП. 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.

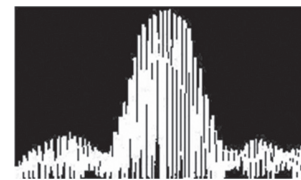
Исследования МДН проводилось в 10-ти см диапазоне волн на трех трассах (80, 200 и 250 км). Прием сигналов осуществлялся антенной в виде усеченного параболоида вращения с размерами 2×10 м с шириной ДН $2\theta_0 = 0,7^\circ$ в горизонтальной плоскости. На передающем конце использовалась аналогичная антенна. Приемная антенна вращалась со скоростью 3 и 6 об/мин ($18^\circ/\text{с}$ и $36^\circ/\text{с}$, соответственно). Запись ДН осуществлялась на фотопленку осциллографа МПО-2. Одновременно с сигналом на фотопленку 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.

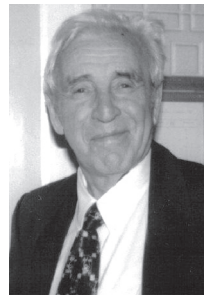
Полученный нами богатый материал существенно пополнил базу экспериментальных данных об особенностях ДТР, что оказалось важным для дальнейших попыток разобраться в сути явления ДТР. В этом плане представляются интересными работы, выполняемые в Харьковском национальном университете радиоэлектроники В.А. 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 редколлегия 4.02.2010.



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