

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Введение

Повышение требований к параметрам РЛС привело к широкому использованию в качестве антенных систем (АС) фазированных антенных решеток (ФАР), включая активные ФАР (АФАР) и цифровые антенные решетки (ЦАР). Это привело к соответствующему усложнению комплекса испытаний, проводимых с одним образцом антенны, к более жестким требованиям к точности и достоверности получаемых результатов и обязательному использованию автоматизированных измерительных комплексов (АИК).

Современное состояние вопроса и постановка задачи

При возникновении проблем с настройкой АС ни один из методов измерения параметров в дальней зоне излучения (или с помощью коллиматора) [1, 2] не дает возможности обнаружить причины отклонения параметров АС от расчетных. Поэтому основной объем измерений параметров ФАР стал выполняться апертурно-зондовым (фазометрическим) методом (АЗМ) в ближней зоне излучения в безэховой камере [3, 4]. Данный метод основан на измерении амплитудно-фазового распределения (АФР) ортогональных компонент электромагнитного поля вспомогательной антенной (измерительным зондом) с последующим расчетом параметров и восстановлением пространственной диаграммы направленности (ДН) в дальней зоне (ДЗ) и АФР на апертуре ФАР. Только использование АЗМ в сочетании с коммутационным методом [5 – 7] дает возможность с большой достоверностью определить причину несоответствия параметров антенн заданным требованиям и решить проблемы диагностики технического состояния и оптимизации настройки многофункциональных и многоканальных АС с эффективным устранением "узких мест" в конструкции АС.

Несмотря на большое число публикаций, в которых анализируются вопросы оценки характеристик сложных АС, в них отсутствует единый подход к методологии проведения настройки и измерений АС, требования к программному обеспечению автоматизированных измерительных комплексов (АИК), недостаточно ограждены пути повышения точности настройки и сокращения времени измерений ближнего поля. Некоторые из этих вопросов рассмотрены в данной работе.

Методология проведения настройки и испытаний АС

Следует отметить, что при необходимости получения полной и достоверной оценки технического состояния и параметров АС существенно увеличиваются затраты времени и средств на проведение испытаний из-за резкого роста объема измерений. Количество измеряемых ДН зависит от числа каналов, вида лучей (узкий, широкий, косеканс и т.д.), количества возможных положений луча в пространстве (в зависимости от сектора обзора и ширины луча), числа рабочих частот, режимов работы, адаптации к собственному техническому состоянию и помеховой обстановке. Возможность проведения измерений и анализа такого числа ДН (порядка $10^5 \div 10^{10}$ ДН в зависимости от АС) даже с помощью современных АИК и программного обеспечения типа MI-3000, 959 Spectrum, NSI 4.0, или «BP-UST», позволяющих проводить измерение 20 – 100 ДН за один цикл измерений, не представляется реальной. В связи с этим был осуществлен переход к статистическому подходу к оценке и настройке параметров ФАР [8], включающему в себя:

- максимально полную оценку технического состояния каналов (элементов входящих в канал: аттенуаторов, фазовращателей, смесителей и других элементов АС) для режимов ПЕРЕДАЧА и ПРИЕМ:

- выявление, при минимальном объеме измерений, неисправностей и технологических дефектов в каналах АС и взаимовлияния излучающих элементов (в режиме ПЕРЕДАЧА при изменении фазы в канале излучаемого сигнала изменяется его взаимодействие с соседними излучателями, а в режиме ПРИЕМ взаимодействие остается постоянным, за исключением слабого влияния изменения КСВ в канале на вносимый фазовращателем фазовый сдвиг);

- проведение моделирования (с использованием математической модели ФАР получены при проведении контроля результаты измерений и специализированный блок «BP-UST») и нахождение ожидаемых статистических характеристик с учетом реального технического состояния АС;

- проведение настройки, расчет и внесение необходимых поправок в АФР с учетом ограничений по возможности управления АФР;

- повторная оценка технического состояния каналов ФАР и их элементов (в зависимости от режима работы, охлаждения и т.д.) – поэлементный контроль;

- статистическая обработка и определение количества и пространственного положения ДН, которые нужно измерить для достоверной оценки параметров АС;

- выборочное измерение характеристик ФАР, накопление результатов в базе данных, статистическая обработка и заключение о соответствии АС исходным требованиям.

Автоматизированные измерительные комплексы

На предприятиях СНГ и ведущих зарубежных фирмах (Raytheon, RCA, Alenia Spazio, Hughes, Lockheed Martin, JPL, TWR, Matra Marconi) в течение последних десятилетий интенсивно используются десятки различных АИК – планарных, цилиндрических, сферических, плоско-полярных и специализированных, которые являются неотъемлемой частью проектов разработки современных АС. Основными производителями АИК за рубежом являются фирмы NSI, MI-Technologies и Orbit-FR [9 – 11]. Основным производителем-поставщиком АИК в СССР был ВНИИРИ (Ереван), а ряд предприятий для своих изделий разрабатывали специализированные комплексы. В Украине таким предприятием был НИИ «Квант», одно из подразделений которого, занимавшееся разработкой АИК и проведением настройки и испытаний АС с использованием АЗМ в безэховых экранированных камерах, ныне входит в состав ОАО «Укрспецтехника». Открытый антенный полигон НИИ «Квант» стал самостоятельным ООО «Научно-исследовательский центр радиотехнических и оптико-электронных систем «Обрий».

Начиная с 1975 года специалистами ОАО «Укрспецтехника» были разработаны, аттестованы и сданы в эксплуатацию ряд АИК (образцовые измерительные комплексы по ГОСТ 8.415-81 или первый класс по ГОСТ 8.309-78) [12]. В состав АИК входят механический сканер, опорно-поворотное устройство, векторный анализатор (измеритель разности фаз и отношения уровней), генераторное оборудование, комплект измерительных зондов, эталонных и вспомогательных антенн, ПЭВМ с принтером, устройства сопряжения ПЭВМ с аппаратурой АИК и ФАР. Для проведения калибровки и поверки АИК используются лазерная плоскость, теодолит, частотомеры, эталонные аттенюаторы, фазовращатели и т.д. и специальные программы [12].

Сочетание полностью автоматизированных режимов работы АИК с ручным управлением, цифровая индикация параметров измеряемых сигналов и использование ряда сервисных устройств предоставляют широкие возможности для проведения нестандартных многоцелевых исследований. Технические характеристики типовых АИК, разработанных ОАО «Укрспецтехника», приведены в таблице.

Программное обеспечение АИК

Программное обеспечение (ПО) АИК «BP-UST» имеет модульную структуру и состоит из базового и специализированных блоков программ.

Базовый блок «BP-UST» обеспечивает:

- управление режимами работы АИК и АС при измерении параметров АС, сбор, регистрацию полученных результатов и занесение их в базы данных для статистического анализа;

Наименование параметра	АИК-1	АИК-2
1	2	3
Размеры рабочей зоны измерения АФР, м ²	8,5x8,5+10x12	2x3+4x5
Среднеквадратическое отклонение рабочей поверхности сканирования от плоскости, мм	0,35	0,15
Скорость перемещения зонда, мм/с		
• по координате X	10 ÷ 50	10 ÷ 100
• по координате Y	150 ÷ 250	100 ÷ 200
Диапазон частот, ГГц	1 ÷ 10	1 ÷ 24
Суммарная среднеквадратическая ошибка измерения амплитуды в динамическом диапазоне, не более:		
• 0 ÷ минус 20 дБ	0,2 дБ	0,2 дБ
• -20 ÷ минус 50 дБ	0,5 дБ	0,5 дБ
Суммарная среднеквадратическая ошибка измерения фазы в динамическом диапазоне, град., не более:		
• 0 ÷ минус 20 дБ	3	3
• -20 ÷ минус 50 дБ	6	6
Максимальный размер измеряемой матрицы АФР	512 x 512	512 x 512
Количество матриц АФР, измеряемых за один рабочий цикл	1 ÷ 24	1 ÷ 24

- расчет интегральных характеристик АС: объемных амплитудных, фазовых, поляризационных и динамических диаграмм направленности ФАР, пеленгационных характеристик, КУ, КНД, определение параметров ДН ФАР (ширину и координаты главного луча, уровни и координаты боковых лепестков, интегральный уровень фона в заданном секторе, крутизну ПХ и т.д.);

- вывод результатов измерений и обработки на дисплей или принтер, работа с файлами и графиками;

- учет и компенсацию аппаратурных погрешностей АИК (систематическое отклонение зонда от измерительной поверхности, характеристики измерительного зонда и амплифазометра);

- выполнение технологических операций (для автоматизации процесса поверки АИК и последующей компенсации систематических составляющих погрешности аппаратуры, определения необходимости и частоты проведения калибровок с помощью введенных в состав аппаратуры АИК вспомогательных измерительных каналов).

Специализированный блок «BP-UST» связан с испытуемой АС и включает в себя:

- программы контроля технического состояния ФАР на уровне элементов и системы, расчета АФР на апертуре ФАР и определения величин необходимых фазовых поправок для проведения настройки системы управления лучом (с учетом влияния обтекателя) и приемосдаточных испытаний (ПСИ) ФАР [13];

- технологические программы (синтез АФР на апертуре ФАР по заданным параметрам, оценку реализуемости и устойчивости синтезированного АФР к ошибкам реализации, оценку погрешности определения характеристик ФАР в зависимости от используемых методов измерения и расчета параметров ФАР для определения требований к измерительной аппаратуре, метрологическому обеспечению, методикам и ПО АИК);

- имитацию всех режимов работы аппаратуры АИК и АС, выдаваемых ими сигналов для проверки закладываемых технических решений и отладки ПО.

Для примера на рис. 1 приведены результаты итерационного процесса настройки ФАР на стенде БП-УСТ.

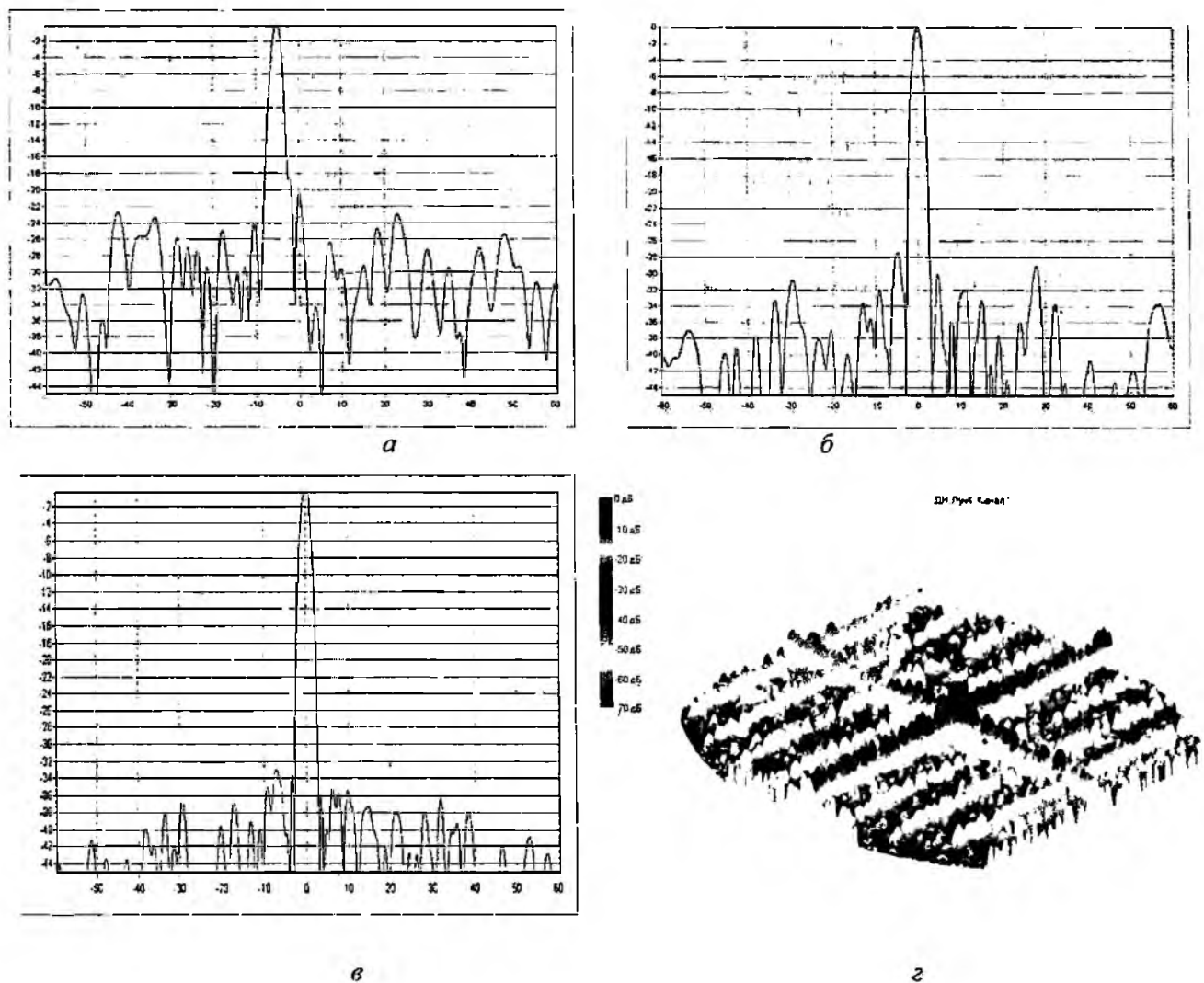


Рис. 1

На рис. 1, а показано основное сечение ДН в угломестной плоскости полученное сразу после сборки ФАР. Наличие случайных погрешностей комплексных коэффициентов передачи каналов, обусловленных различием электрических длин каналов из-за погрешностей изготовления, разбросом начальных фазовых сдвигов фазовращателей и т.д., привели к отклонению характеристик ФАР от расчетных значений. В частности, направление главного максимума отклонено от нормали более чем на 5 градусов, уровень боковых лепестков (УБЛ) составляет минус 20 дБ (при расчетном значении минус 35 дБ). На рис. 1, б приведены результаты внесения фазовых поправок, полученных при первой итерации. Из сравнения ДН на рис. 1, а и б видно, что луч уже на первой итерации установлен в заданное положение (по нормали к апертуре), а УБЛ уменьшился до минус 27,5 дБ. На рис. 1, в приведен результат четвертой итерации. Максимальный УБЛ близок к расчетному и составляет минус 33 дБ. Дальнейшие итерации практически не сказываются на УБЛ. При необходимости проводится дополнительная настройка ФАР (расчет и внесение необходимых фазовых и амплитудных поправок) в полном пространственном секторе углов по пространственным угловым секторам, на которые разбит полный сектор с учетом конструктивных и технологических ограничений по управлению АФР на апертуре. Пример формы представления объемной ДН приведен на рис. 1, г. Особенности итерационного процесса настройки многоканальной ФАР с помощью фиксированных фазовых поправок (ФП), общих для всех каналов, подробно описаны в [13].

Использование технологических программ на этапе разработки ФАР дает возможность, в результате многовариантного моделирования, обосновать требования к техническим харак-

характеристикам АИК, его составу, параметрам измерительной аппаратуры и алгоритмам обработки данных, выбрать оптимальные технологии проведения настройки и ПСИ АС, оценить степень точности и достоверность получаемых результатов.

Программное обеспечение АИК «BP-UST» открыто для модернизации и позволяет оперативно включать в свой состав вновь разработанные специфические или универсальные программные модули и вносить требуемые изменения и дополнения по результатам проведенных исследований.

Повышение точности измерения параметров АС

Опыт работы показал, что критическими факторами с точки зрения получения требуемой точности для АИК ближней зоны являются ошибки измерения фазовых распределений, вносимые механическими сканирующими устройствами, подвижными трактами передачи СВЧ-сигналов, особенно при изменении температуры в стендовом зале за время измерения, а также технические возможности измерителя разности фаз. Поэтому для повышения точности был предложен и отработан комбинированный метод измерения параметров антенн, сочетающий элементы апертурно-зондового и амплитудного методов (АМ).

Суть АМ состоит в восстановлении характеристик антенн по результатам измерения амплитудных распределений $|\dot{E}_{S1}|$, $|\dot{E}_{S2}|$ на двух поверхностях S_1 и S_2 вблизи антенны и использовании априорной информации об антенне.

Вначале выбирается некоторое начальное фазовое приближение $\varphi_{S1}^{(1)}$ к измерениям амплитуды $|\dot{E}_{S1}|$ на поверхности S_1 . Поле $|\dot{A}_2| e^{j\varphi_{S2}^{(1)}}$ пересчитывают по известным алгоритмам на поверхность S_2 :

$$|\dot{A}_2|^{(1)} e^{j\varphi_{S2}^{(1)}} = G \left\{ |\dot{E}_{S1}| e^{j\varphi_{S1}^{(1)}} \right\}, \quad (1)$$

где G — некоторое линейное преобразование, переводящее поле \dot{E}_{S1} в поле на S_2 .

Фазу поля $\varphi_{S2}^{(1)}$ принимают в качестве начального приближения фазового распределения поля \dot{E}_{S2} , амплитуду которого измерили на S_2 . Далее поле $|\dot{A}_1| e^{j\varphi_{S1}^{(1)}}$ пересчитывают на S_1 :

$$|\dot{A}_1|^{(1)} e^{j\varphi_{S1}^{(1)}} = G^{-1} \left\{ |\dot{E}_{S2}| e^{j\varphi_{S2}^{(1)}} \right\}, \quad (2)$$

где G^{-1} — преобразование, обратное G . Вид преобразований G и G^{-1} определяется типом поверхности сканирования.

Полученное фазовое распределение $\varphi_{S1}^{(2)}$ используется в качестве следующего приближения фазы на S_1 и т.д.

Далее процесс циклически повторяется, при этом в каждом цикле находится величина невязки. В качестве невязки может быть использована норма отличия итерационных функций $|\dot{A}_1|^{(k)}$, $|\dot{A}_2|^{(k)}$ от измеренных амплитудных распределений $|\dot{E}_{S1}|$, $|\dot{E}_{S2}|$ в какой-либо метрике

$$\delta_k = \left\| |\dot{A}_1|^{(k)} - |\dot{E}_{S1}|, |\dot{A}_2|^{(k)} - |\dot{E}_{S2}| \right\|, \quad (3)$$

где δ_k — величина невязки, которая характеризует степень отличия измеренных и найденных в результате k -й итерации амплитудных распределений на S_1 , S_2 .

Итерационный процесс заканчивается при выполнении условий $\delta_k \leq \varepsilon$, где величина ε должна учитывать точность измерений $|\dot{E}_{S1}|$, $|\dot{E}_{S2}|$.

Суть комбинированного метода заключается в том, что в качестве начального приближения $\varphi_{S1}^{(1)}$ используют фазовое распределение, полученное АЗМ. Комбинированный метод

существенно облегчает решение задачи достоверного восстановления ДН и настройки ФАР при достаточно умеренных требованиях к точности измерений фазы поля на измерительной поверхности [14].

Уменьшение времени измерения ближнего поля антенн

Существенным недостатком рассматриваемых методов является большое время сканирования (до нескольких часов в зависимости от размеров апертуры и требований к точности определения ДН в заданном секторе углов). При этом увеличивается вероятность возникновения отказов в АИК и возникает необходимость периодической калибровки измерительного канала для уменьшения погрешности за счет нестабильности частоты, величины излучаемой мощности, коэффициента усиления и т.д. Уменьшение времени измерений ближнего поля антенн может быть достигнуто за счет применения в АИК многоэлементных зондов (МЗ).

Многоканальность может быть использована в различных типах МЗ по-разному.

Во-первых, использовать МЗ можно как аналоговый координатор ближнего поля антенн [4].

Это следует из того, что при вычислении ДН по измерениям ближнего поля на плоской или цилиндрической поверхности необходимо вычислять интегралы вида

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \iint_{D_{изм}} \dot{E}_{x,y}(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy, \quad (4)$$

где \dot{E}_x, \dot{E}_y – тангенциальные компоненты поля на поверхности измерений $D_{изм}$ или

$$\dot{S}(\psi, \theta) = \int_{L_{изм}} \dot{E}_\psi(\psi, z) e^{jkz \cos\theta} dz, \quad (5)$$

где \dot{E}_z, \dot{E}_ψ – тангенциальные компоненты электрического поля на поверхности измерения; $L_{изм}$ – область измерений ближнего поля по образующей цилиндра; θ – сферическая координата точки наблюдения.

При этом интегрирование по x или y в (4), или по z в (5) замещается взвешенным суммированием откликов всех зондов, а МЗ представляет линейную ФАР. Точность суммирования определяется дискретностью фазирования и может быть достаточно высокой.

Во-вторых, можно осуществлять электронное переключение каналов МЗ и производить модуляционное выделение сигнала каждого канала, что позволяет измерить двумерное АФР на измерительной поверхности, а также существенно уменьшает время измерений.

Наконец, можно реализовать МЗ в виде разнесенной в пространстве системы излучателей (измерительных зондов) [15, 16], что повышает эквивалентную плотность размещения излучателей, приводит к уменьшению времени измерений и ослабляет влияние МЗ на поле исследуемой ФАР. Как показывают оценки, применение МЗ уменьшает время измерений ближнего поля минимум на порядок.

Комплексирование различных типов МЗ позволяет существенно повысить эффективность применения АИК.

Преимущества и отличительные черты разработанных АИК:

- высокая степень автоматизации процесса контроля технического состояния и измерения параметров ФАР, автоматический контроль АИК и изделия в процессе измерения, автоматизация операций аттестации и поверки;

- сканеры АИК собраны из унифицированных секций, позволяющих набрать заданный размер зоны сканирования, и полностью укрыты радиопоглощающим материалом;

- обеспечение снижения динамических нагрузок сканера;

- подвижные линии передачи СВЧ-сигнала убраны из зоны сканирования и вносят малые фазовые искажения в результаты измерений;

- высокая надежность, производительность и эффективность работы АИК за счет сочетания апертурно-зондового, амплитудного и коммутационного методов при проведении измерений и обработке полученных данных.

Технические и программные решения, разработанные специалистами ОАО "Укрспецтехника", были внедрены в ряд АИК и использовались для настройки и измерения параметров АС, выпускаемых предприятиями Украины и России.

Выводы

Показано, что применение АИК с многоэлементными зондами при использовании апертурно-зондового, амплитудного, коммутационного и динамического методов измерений существенно повышает точность измерений, сокращает время их проведения, обеспечивает возможность глубокого контроля технического состояния и эффективной настройки на этапе изготовления.

В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть электродинамический анализ взаимных связей излучающих элементов многозондовой измерительной системы и оценить влияние этого взаимодействия на точность измерений, оценки взаимной связи многозондовой измерительной системы с испытуемой АС, возможности получения оперативной оценки индивидуальных ДН излучающих элементов АС.

Перечисленные вопросы представляют значительный интерес для дальнейшего повышения точности измерений и отработки встроенных систем для контроля и автоподстройки параметров ФАР в процессе эксплуатации и проведения настройки после ремонтно-профилактических работ.

Список литературы: 1. *Gant E. Evans. Antenna measurement techniques / Boston: Artech House, 1990, 229 p. 2. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Н.М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985. 3. Slater Dan. Near-field antenna measurements / Boston: Artech House, 1991, 310 p. 4. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. и др. Л.: Наука, 1985. 272 с. 5. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР/ Г.Г. Бубнов, С.М. Никулин и др. М.: Радио и связь, 1988. 6. Марков В.И. Встроенная система контроля ФАР // Вісник Київського Національного університету імені Тараса Шевченка. К.: Київ. ун-т, 2006. Вип. 2. С. 94-100. 7. Markov V.I. Built-In Performance Monitoring System For Active Phased-Array Antennas // Proc. of the 6-th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine. Pp. 483-485. 8. Shifrin Ya. S., Usin V. A. Statistic theory of antenna measurements. // Telecommunications and Radio Engineering, 2002. v.58. №8. Pp. 34-83. 9. <http://www.nearfield.com>. 10. <http://www.nu-technologies.com>. 11. <http://www.orbitr.com>. 12. Автоматизированный измерительный комплекс для измерений характеристик антенных устройств в ближней зоне излучения // Специальная техника и вооружение. 2002. № 1-2. С. 45-46. 13. Усин В.А., Марков В.И., Филошенко А.Б. Расчетно-экспериментальный метод настройки многоканальных ФАР // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. Т.9. №3-4. С. 94-100. 14. Усин В.А., Ковальчук В.А., Марков В.И., Филошенко А.Б. Комбинированный метод измерения характеристик антенн // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 5. С. 65-71. 15. Усин В.А., Марков В.И., Анохина О.Д., Рожнятовская Л.В., Усина А.В. Многоканальный зонд для измерения параметров антенн апертурно-зондовым методом // 15-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Севастополь, 12-16 сент. 2005 г.: Матер. Конф. в 2-х т. Т. 2. С. 713-714. 16. Усин В.А., Марков В.И., Рожнятовская Л.В., Усина А.В. Применение пространственно разнесенной многозондовой системы для измерения параметров ФАР // 16-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006). Севастополь. 11-15 сент. 2006. // Матер. конф. в 2-х т. Т. 2. С. 821-822.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Харьковский государственный университет питания и торговли
ОАО Холдинговая компания «Укрспецтехника»
Антрацитовский техникум
радиоэлектронного приборостроения

Поступила в редколлегию 05.06.2008