

*В.А. УСИН, д-р техн. наук, В.И. МАРКОВ, С.В. ПОМАЗАНОВ,
А.В. УСИНА, канд. физ.-мат. наук, А.Б. ФИЛОНЕНКО*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАР

Введение. Постановка задачи

Вследствие высокой стоимости больших фазированных антенных решеток (ФАР) особое значение приобретает поиск путей снижения затрат на их разработку за счет замены физического (натурные испытания) на математическое моделирование. Это позволяет по заданным требованиям найти оптимальный вариант антенной системы, выбрать форму апертуры, ее структуру, тип излучающих элементов, их размещение и амплитудно-фазовое распределение (АФР) поля на апертуре, оценить параметры и энергетическую эффективность антенн. Такой подход позволяет на этапе проектирования оценить интегральные характеристики ФАР в секторе сканирования и выдвинуть требования к допускам на изготовление излучающей, распределительной, управляющей систем и их элементам (фазовращателям, усилителям, переключателям, элементам защиты и т.д.) [1 – 3]. Не менее важной задачей моделирования является обоснование требований к техническим характеристикам и составу автоматизированных измерительных комплексов (АИК), предназначенных для контроля технического состояния, измерения характеристик и проведения настройки ФАР. Использование моделирования позволяет выбрать параметры входящей в АИК измерительной аппаратуры, предложить алгоритмы обработки данных и обосновать выбор технологии проведения настройки и приемно-даточных испытаний (ПСИ) с учетом конструктивных особенностей конкретных образцов ФАР [4].

Следует отметить, что для автоматизации процесса настройки в конструкции ФАР должны быть предусмотрены соответствующие технологические возможности, а алгоритмы настройки должны учитывать особенности построения и элементную базу приемопередающих каналов (в частности, дискретность и амплитудно-фазовые характеристики антенноаторов и фазовращателей в диапазоне частот при переключении состояний), реализующих требуемое АФР на апертуре [5 – 7].

Математическое моделирование антенных решеток, базирующееся на строгих электродинамических методах, позволяет решать круг задач при разработке ФАР. В процессе математического моделирования либо полностью решается задача синтеза ФАР, либо вырабатывается перечень рекомендаций для экспериментальной доводки конструкции ФАР [8].

Подчеркнем, что даже при наличии высокопроизводительных компьютеров и быстром развитии строгих численных методов расчета, таких как Numerical Electromagnetics Code (1980-е годы), Sonnet (1989 г.), High Frequency Structure Simulator (HFSS), и последовавшими за ними Zeland's IE3D, Remcom's XFDTD, Agilent's ADS/Momentum, CST's Microwave Studio, EMPIRE (IMST GmbH), 4NEC2, FEKO от EM Software & Systems, Concept II и других [9 – 18] широко используются инженерные методики расчета характеристик ФАР. На их основе разработаны специализированные программы, в которых использован ряд физически обоснованных допущений для упрощения моделей антенных систем ФАР и АФАР [19 - 24].

Последнее обусловлено как высокой стоимостью, так и сравнительно высокой сложностью перечисленных программ, использующих строгие численные методы расчета. Более того, для получения корректных результатов при проведении строгого моделирования антенных устройств в ряде случаев необходимо использовать минимум два различных пакета программ [25, 26], что приводит к существенному увеличению затрат на разработку ФАР.

Относительно простые программы моделирования характеристик антенн широко используются в учебном процессе, например программно-методический комплекс AntMaster (Д.М. Сазонов), программа Fazar (О.Г. Вендик) [27] и др.

В статье рассмотрены основные вопросы создания специализированного программного обеспечения для решения задач проектирования, настройки и измерения параметров ФАР.

1. Технические требования к программному обеспечению

Минимальные требования к аппаратуре и программному обеспечению:

- операционная система – Microsoft Windows 98/ME/XP;
- процессор – Intel Pentium 300 МГц или выше;
- оперативная память – 64 Мб;
- монитор – SVGA 800*600 пикселей с цветовой палитрой Hi-Color или True-Color;
- наличие 100 Мб свободного пространства на диске, где расположена программа;
- наличие в системе пакета электронных таблиц Excel для редактирования АФР, представленного в виде таблиц.

В состав программного обеспечения (ПО) входят программные модули (ПМ), предназначенные:

- для формирования математической модели АФР на апертуре ФАР по требованиям к параметрам ДН и для статистического анализа устойчивости параметров ФАР к ошибкам реализации АФР;
- ввода библиотек данных с характеристиками стандартных излучающих элементов;
- ввода параметров при проведении измерений АФР;
- управления процессом измерения АФР, контроля технического состояния ФАР и тестирования аппаратуры измерительного комплекса;
- обработки данных измерений с представлением полученных результатов в графической и табличной формах и выдачей рекомендаций по настройке.

2. Основные программные модули ПО

Модуль формирования математической модели АФР должен обеспечивать:

- синтез амплитудно-фазового распределения (АФР) на апертуре ФАР по требованиям к параметрам диаграммы направленности (ДН), заданной геометрии ФАР и характеристикам управляющих элементов (фазовращателей и аттенюаторов);
- расчет АФР на планарной, цилиндрической и сферической поверхностях по распределению, синтезированному на апертуре ФАР в соответствии с заданными параметрами излучающих элементов (в аналитическом или табличном виде), положением луча в пространстве и режимом измерения;
- введение случайных фазовых и амплитудных ошибок в АФР на апертуре или моделируемой поверхности сканирования при заданном в меню значении среднеквадратичного отклонения фазы и амплитуды от требуемого распределения на апертуре. Закон распределения вносимых ошибок может быть равномерным или квазигауссовым;
- имитацию сосредоточенных и распределенных отказов приемо-передающих модулей;
- работу с моделями АФР и ДН (сложение, вычитание, умножение);
- имитацию ошибок АФР, вносимых измерительным оборудованием;
- определение ДН и интегральных параметров ФАР в соответствии с выбранным методом измерения АФР и способом расчета АФР на апертуре;
- сравнительную оценку эффективности применения различных методов измерения и обработки полученных данных для настройки и проведения приемо-сдаточных испытаний конкретных ФАР, выбор метода измерений и аппаратурной реализации АИК;
- выработку требований к стенду, измерительной аппаратуре, метрологическому обеспечению, методикам и программно-алгоритмическому обеспечению (ПАО) испытаний;
- оценку погрешностей определения характеристик ФАР в зависимости от характеристик АИК и используемых методов измерения и расчета параметров;
- имитацию всех режимов работы аппаратуры АИК и ФАР, выдаваемых ими сигналов для проверки предлагаемых технических решений и алгоритмов управления;
- имитацию работы АИК при отладке ПАО.

Модуль ввода параметров для проведения измерения АФР. Для проведения измерений (или их имитации) необходимо определить начальные условия измерения АФР поля с помощью АИК и режимы работы ФАР в данном цикле измерений, которые сохраняются в файле справки и используются при обработке. При измерении АФР задаются следующие данные:

- тип и заводской номер измеряемого изделия, ответственный регулировщик;
- код режима измерения – прием/передача;
- вид сканирования – плоскость, цилиндр, сфера;
- тип сканирования – вертикальное/горизонтальное, старт-стопное/непрерывное;
- тип измерителя параметров электромагнитного поля (ФК2-33, Е8362В и др.);
- размер измеряемой матрицы АФР (при сканировании по плоскости – число точек измерения по X, Y);
- шаги между точками измерения АФР в заданной системе координат;
- начальные координаты первой точки измерений АФР в заданной системе координат;
- количество рабочих частот;
- значения рабочих частот;
- центр антенного устройства по X, Y, Z – координаты центра испытываемой антенны в системе координат сканера;
- количество измеряемых каналов ФАР;
- количество лучей;
- угловое положение лучей.

Модуль управления процессом измерения АФР. Программное обеспечение управления процессом измерения должно (согласно заданным в файле справки параметрам) обеспечивать:

- управление перемещением зондовой системы сканера по двум координатам с учетом разгона и торможения;
- контроль технического состояния ФАР;
- управление состоянием ФАР (каналы, лучи, частоты);
- управление измерительной аппаратурой (генератором СВЧ сигналов, амплифазометром или анализатором цепей);
- сбор и сохранения данных измерения АФР поля;
- сохранение при сбое в процессе измерения АФР массивов уже измеренных данных и продолжение по указанию оператора измерения с места сбоя;
- ввод в файл справки даты и времени проведения измерений (которые поступают от операционной системы);
- сортировку измеренных данных по каналам, лучам и частотам;
- запись измеренного АФР на магнитный диск с присвоением индивидуального имени.

Модуль расчета параметров ФАР должен обеспечивать:

- расчет объемной диаграммы направленности по измеренному АФР;
- компенсацию влияния диаграммы направленности измерительного зонда на расчетную ДН;
- определение ориентации главного луча ДН в пространстве;
- определение ширины ДН на заданных уровнях;
- определение координат и уровней заданного количества боковых лепестков;
- определение координат и уровней заданного количества нулей ДН;
- вычисление КНД (по сечениям и объемной ДН);
- вычисление интегрального фона боковых лепестков в заданном пространственном секторе (по сечениям ДН и в пространственном секторе углов);
- расчет пеленгационных характеристик;
- расчет амплитудно-фазовых поправок для оптимизации параметров ФАР. С этой целью выполняют:
- расчет АФР на элементах АУ;

- расчет комплексных весовых коэффициентов, минимизирующих отклонение АФР от теоретического (требуемого) по группе каналов или лучей;
- кодировку амплитуд и фаз для формирования матриц поправок, записываемых в программируемое запоминающее устройство ФАР.

Модуль представления результатов моделирования и измерений. Модуль должен обеспечивать вывод:

- параметров ФАР – в табличной форме;
- графиков:
 - главных сечений ДН в декартовой и полярной системах координат;
 - эквивалентных сечений АФР поля;
- изображений:
 - топограммы и аксонометрические проекции ДН;
 - топограмм АФР поля и амплитудных и фазовых аксонометрических проекций на апертуре;
- вывод полученных результатов на печать или дисплей;
- архивирование результатов измерений в виде протоколов, графиков, файлов электронных таблиц и изображений.

Для проведения детального анализа результатов моделирования и измерений должно быть предусмотрено:

- выделение и масштабирование участков ДН или эквивалентных АФР, представляющих интерес для разработчика с помощью мыши;
- экспорт и импорт результатов расчетов из различных реализаций измерений АФР;
- возможность индивидуального масштабирования в группе ДН в соответствии с поставленными задачами;
- смещение и наложение графиков ДН и АФР для различных положений лучей, каналов, частот и экземпляров испытываемых изделий.

3. Программа “Моделирование и расчет параметров ФАР”

Программа “*Моделирование и расчет параметров ФАР*” обеспечивает:

- синтез амплитудно-фазового распределения поля на апертуре ФАР в соответствии с предполагаемыми конструктивными размерами, конфигурацией апертуры антенны и характеристиками ее возбуждения;
 - расчет пространственных характеристик ДН, соответствующих заданному АФР на апертуре с учетом индивидуальных и коррелированных строчно-столбцевых ошибок реализации и дискретности управляющих элементов. Для суммарного канала амплитуда поля на апертуре может быть распределена по законам Тейлора, Блэкмана, Кайзера, Бесселя, косинус на пьедестале и др. ДН излучающих элементов может быть принята изотропной, в виде $\cos^N \theta$ или задана пользователем в табличном или аналитическом виде. Для разностных каналов амплитуда поля на апертуре может быть распределена по закону Бейлиса, нечетному закону Тейлора, нечетному треугольному или другим законам;
 - расчет АФР на заданной измерительной поверхности;
 - оценку влияния искажений АФР на измерительной поверхности и в апертуре на пространственные характеристики ДН. Искажения АФР могут вводиться как в ручном режиме путем редактирования таблиц исходного АФР, так и заданием возможных законов распределения ошибок возбуждения и радиусов их корреляции.

Рассмотрим описание основных пунктов меню программы. Многооконный графический интерфейс программы “*Моделирование и расчет параметров ФАР*” с вложенной системой меню и диалоговых окон обеспечивает эффективное интерактивное взаимодействие с пользователем и осуществляет взаимодействие между всеми подсистемами программного комплекса.

Основное меню программы представлено на рис. 1. Рассмотрим основные пункты, которые включает основное меню:

Файл – открыть файл – открытие файла из папки Afr, где хранятся файлы АФР рассчитанных ранее моделей. Наименование файла содержит дату и время создания модели.

Файл – экспорт таблицы – выполняет сохранение в папке Csv текущей директории файла открытой таблицы АФР в формате .csv или .xls.

Файл – импорт АФР – производится запись в открытую таблицу данных файла из папки Csv.

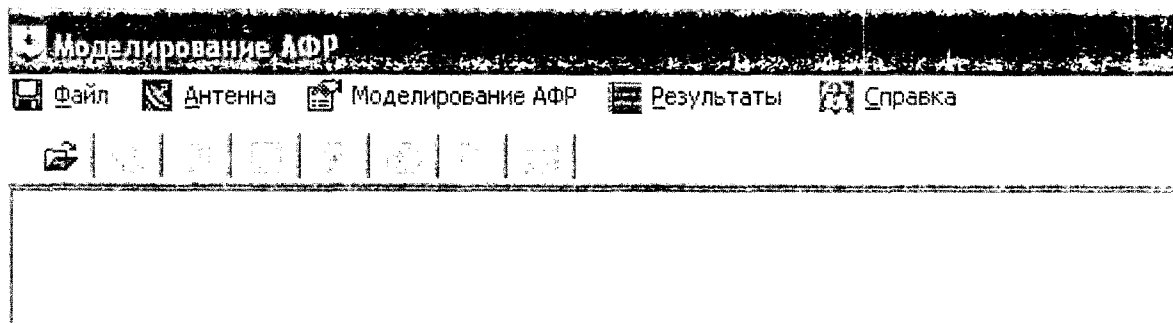


Рис. 1. Фрагмент главного окна многоцелевого моделирующего комплекса **“Моделирование и расчет параметров ФАР”**

Антенна – параметры АУ – предназначен для ввода структуры модулей, конфигурации апертуры антенны и характеристик возбуждения. При выборе этого пункта меню открывается окно, вид которого показан на рис. 2.

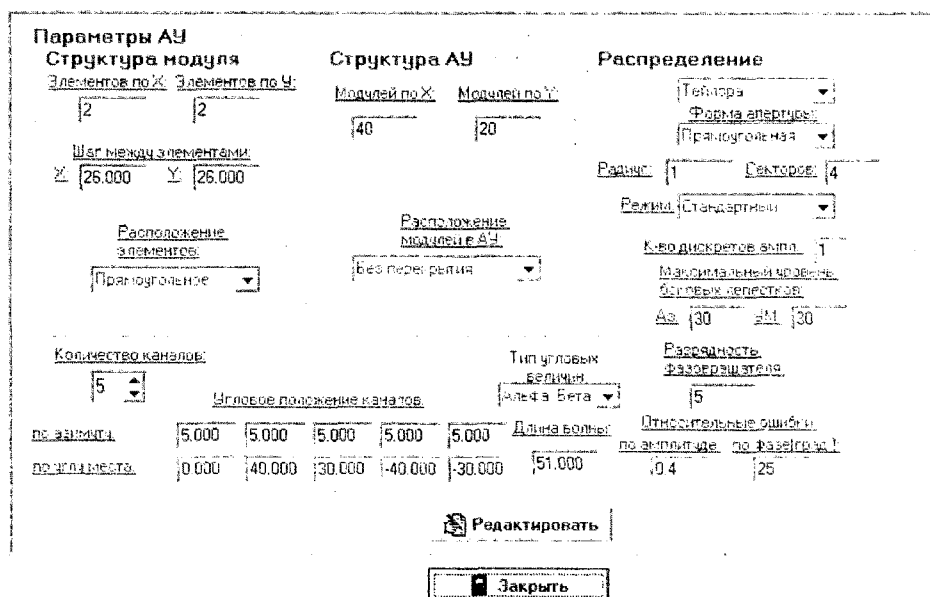


Рис. 2. Окно пункта меню **“Антенна – параметры АУ”**

В этом окне задаются параметры апертуры антенного устройства (АУ) (количество излучающих элементов и расстояния между ними в модуле, форма апертуры, количество модулей и их взаимное расположение), закон амплитудного возбуждения (тип распределения, уровни боковых лепестков, разрядность фазовращателя), количество каналов (лучей) и рабочая частота (длина волны). Возможное число каналов – до пяти с заданным пространственным положением лучей по азимуту и углу места в пределах $\pm 60^\circ$. Относительные ошибки амплитуды и фазы, устанавливаемые в этом окне, представляют поэлементные амплитудные и фазовые ошибки, общие для всех каналов анализируемой антенны, обусловленные конструктивными особенностями изготовления (деформациями) апертуры антенны.

Антенна – рассчитать модель АУ – проводится расчет исходных АФР для лучей (каналов) ФАР.

Антенна – просмотреть – рассчитанные данные можно просмотреть в *табличном* и в *графическом* видах. В табличном виде доступно редактирование исходных АФР на апертуре.

Антенна – работа с АФР (окно пункта приведено на рис. 3). В этом режиме доступна модификация исходных АФР рассчитанных ДН: может проводиться суммирование и вычитание выбранных амплитудно-фазовых распределений.

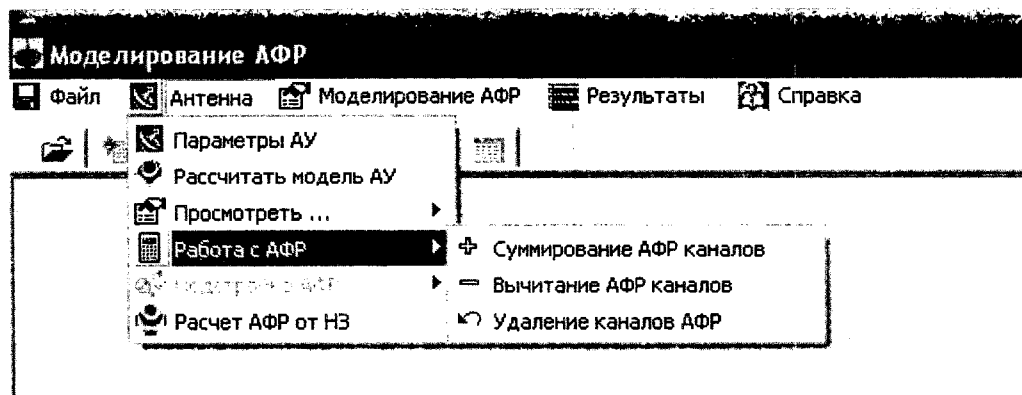


Рис. 3. Окно пункта “Антенна – работа с АФР”

Антенна – подстройка АФР – моделируется процесс настройки (коррекции) АФР с ошибками и отказами, введенными в канал 2, с целью приближения его к параметрам заданной ДН (АФР в канале 1 задано без ошибок). АФР, рассчитанное в результате подстройки, записывается в канал 3. В этом режиме в окне пункта меню **Антенна – параметры АУ** следует задавать только два канала, канал 3 формируется автоматически.

Моделирование АФР – моделирование на апертуре – параметры. Возможен ввод случайных независимых ошибок возбуждения с различными радиусами корреляции, ввод дополнительного отклонения положения луча для всех каналов в пространстве на заданную величину. Отклонение может задаваться в угловых градусах и в градусах дифференциального фазового сдвига. При этом открывается окно, вид которого показан на рис. 4. В этом окне вводят параметры для моделирования АФР с ошибками, которые задают в области окна, – *относительные ошибки*. Число реализаций этих ошибок лежит в пределах от 1 до 16.

Моделирование АФР – моделирование на апертуре – рассчитать модель. При этом рассчитываются АФР для всех лучей (каналов) и заданного числа реализаций ошибок. Результаты автоматически записываются в файл с расширением **AFR** и файл помещается в папку **Afr**.

Моделирование АФР – просмотреть – рассчитанные АФР можно проанализировать в табличном и в графическом виде. В табличном виде доступно редактирование исходных АФР.

Результаты – представляются в виде протокола и в графическом виде. Протокол содержит отчет об основных параметрах диаграммы направленности. В графическом виде предоставляется возможность просмотра и анализа *графиков ДН* (главные сечения) для каждого выбранного канала и его реализации, совмещенные графики ДН всех каналов (лучей) для выбранной реализации или всех реализаций для выбранного канала, статистически обработанные графики (средняя ДН и среднеквадратическое отклонение ДН выбранного канала).

В графическом виде предоставляется возможность просмотра и анализа *графиков амплитудно-фазовых распределений, топограмм и амплитудно-фазовых распределений* выбранных каналов и их реализаций.

Параметры для моделирования

Направление луча		Тип угловых величин:	Число реализаций:
Альфа:	Бета:	<input type="text" value="По фазе, град"/>	<input type="text" value="4"/>
<input type="text" value="5,000"/>	<input type="text" value="0,000"/>		

Относительные ошибки			
Поэлементные		По подрешетке	
По амплитуде:	По фазе, град:	По амплитуде:	По фазе, град:
<input type="text" value="0,000"/>	<input type="text" value="15,00"/>	<input type="text" value="0,000"/>	<input type="text" value="0,00"/>

Строчно-столбцовые р-ки		Коррелир по 1/2 подр-ки	
По строке:	По столбц:	По амплитуде:	По фазе, град:
По амплитуде:	По амплитуде:	<input type="text" value="0,000"/>	<input type="text" value="0,00"/>
<input type="text" value="0,000"/>	<input type="text" value="0,000"/>		
По фазе, град:	По фазе, град:	Строчно-столбцовые подр-ки	
<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	По строке:	По столбц:
		По амплитуде:	По амплитуде:
		<input type="text" value="0,000"/>	<input type="text" value="0,000"/>
		По фазе, град:	По фазе, град:
		<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>

Рис. 4. Окно пункта меню “*Моделирование АФР – моделирование на апертуре – параметры*”

4. Работа с программой “Моделирование и расчет параметров ФАР”

Работа с программой “Моделирование и расчет параметров ФАР” начинается с задания параметров антенного устройства (АУ), необходимых для проведения моделирования (верхнее меню “*Антенна*”, подменю “*Параметры АУ*”).

Модель АФР рассчитывается по заданным параметрам АУ.

Пункт меню *Параметры АУ* включает в себя данные о структуре АУ, структуре модулей, законе распределения и некоторые другие данные.

Для расчета АФР необходимо задать:

- расположение излучающих элементов в модуле АУ;
- тип излучающих элементов (для учета диаграмм излучателей, данных в аналитическом или табличном виде);
- количество модулей;
- взаимное расположение модулей в апертуре АУ.

Расположение элементов в модуле может быть прямоугольным, треугольным по горизонтали или треугольным по вертикали.

Структура модуля включает в себя:

- количество излучающих элементов по горизонтальной и по вертикальной оси (может принимать значение от 1 до 254);
- шаг между элементами – расстояние между двумя соседними элементами (задается в миллиметрах и принимает значение от 1 до 1000).

Структура АУ включает в себя:

- количество модулей от 1 до 254;
- расположение модулей в АУ:
- без смещения;
- со смещением по горизонтали;
- со смещением по вертикали.

Смещение реализуется путем сдвига соседних строк (столбцов) друг относительно друга на половину шага между излучателями.

Форма апертуры – в программе предусмотрена реализация прямоугольной или эллиптической формы апертуры.

Распределение – АР задается по закону Тейлора или Чебышева. В программе есть возможность изменения значения *максимального уровня боковых лепестков в пределах от минус 13 до минус 99 дБ*.

Прореживание – применяется для расчета координат элементов, которые должны находиться в активном состоянии с целью получения ДН с заданным уровнем боковых лепестков, и может использоваться для изменения формы диаграммы направленности или снижения излучаемой мощности.

Параметры, необходимые для расчета амплитудно-фазового распределения:

- количество каналов (меняется в пределах от 1 до 5);
- *угловое положение луча* для каждого канала как по *азимуту*, так и по *углу места* (можно задавать в пределах от минус 60 градусов до 60 градусов для каждого канала);
- длина волны* (может принимать значения от 15 до 200 мм);
- разрядность фазовращателя* (в пределах от 2 до 12 бит).

В программе предусмотрена возможность наложения случайных ошибок с равномерным законом распределения на заданное амплитудно-фазовое распределение с разбросом *относительных ошибок по амплитуде* (диапазон от 0 до 2) и по *фазе* (в градусах от 0 до 90).

По заданным параметрам АУ рассчитывается модель АУ (меню **Антенна**, подменю **Расчет модели АУ**).

Просмотреть... – следующий пункт меню **Антенна**. Данный пункт меню позволяет просмотреть результаты расчетов (моделирования), в *табличном* (Таблица АФР) или в *графическом* (Изображение АФР) виде для каждого канала соответственно.

В *табличном виде* данные представлены в виде значений амплитуд и фаз, в соответствии с числом реализаций для каждого канала. Предусмотрена возможность модификации табличных данных в электронных таблицах.

В *табличном виде* есть возможность просмотра *амплитудного* (в *линейном* и в *логарифмическом масштабе*) и *фазового распределения*.

Примеры изображения амплитудно-фазового распределения в графическом виде приведены на рис. 5 (амплитудное распределение) и рис. 6 (фазовое распределение).

Данные рисунки показывают амплитудное и фазовое распределения на апертуре только для луча в первом канале. В зависимости от количества каналов и положений луча в пространстве для каждого из них рассчитывается свое амплитудно-фазовое распределение. При моделировании амплитудно-фазового распределения учитываются все данные, определенные на панели **Моделирование на апертуре – параметры**.

Параметрами для моделирования являются направление луча и число реализаций.

Предел изменения направлений луча *по азимуту* и *по углу места* составляет 45 – 50 градусов. **Число реализаций** может быть до 16.

Программа позволяет рассчитывать модель амплитудно-фазового распределения при учете следующих типов ошибок:

- поэлементные (ошибки, индивидуальные для каждого элемента АУ). Разброс множителей мультипликативных ошибок по амплитуде – от 0 до 1, по фазе – от 0 до 180 градусов;
- строчно-столбцевые ошибки индивидуальные для строки и столбца: *по строкам* множители мультипликативных ошибок по амплитуде могут принимать значения от 0 до 1, по фазе – 0 – 180 градусов; *по столбцам* ошибки могут изменяться по амплитуде – от 0 до 1, по фазе – 0 – 180 градусов;
- коррелированные по половинам подрешетки (разные реализации ошибок для верхней и нижней половины подрешетки): по амплитуде 0 – 1, по фазе 0 – 180°;
- строчно-столбцевые подрешетки (ошибки индивидуальные для строки и столбца мо-

дуля): *по строке*: по амплитуде могут принимать значения от 0 до 1, по фазе – 0 – 180 градусов; *по столбцу*: по амплитуде – от 0 до 1, по фазе – 0 – 180 градусов;

В соответствии с этими данными рассчитывается модель амплитудно-фазового распределения (второй пункт меню *Моделирование АФР/Рассчитать модель*). Результирующие файлы имеют расширение *.AFR и хранятся в папке Afr.

Рассчитанные данные можно проанализировать в табличном и в графическом виде. В табличном виде данные представляются в виде значений амплитуд и фаз в соответствии с числом реализаций для каждого канала.

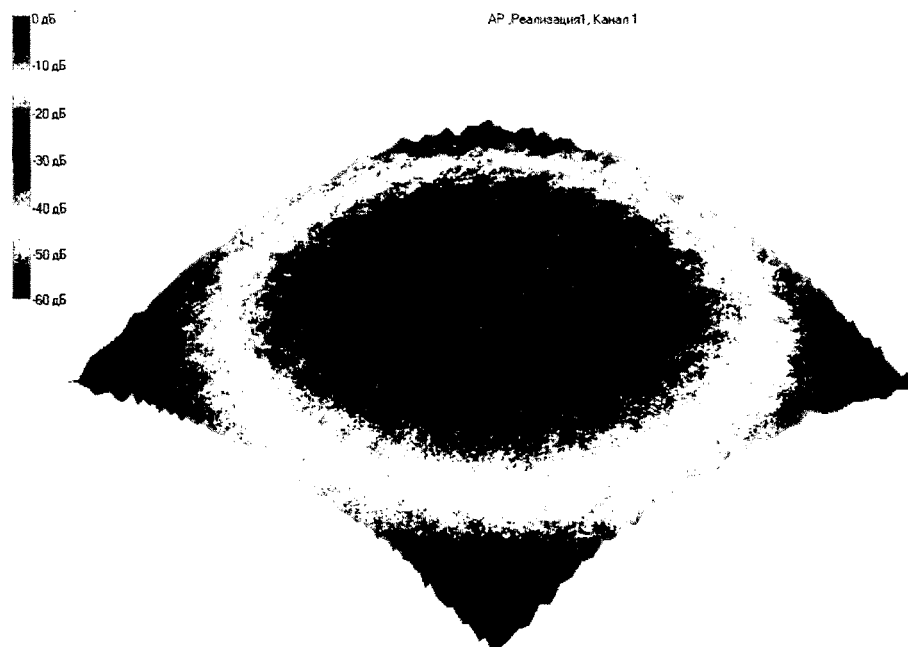


Рис. 5. Амплитудное распределение на апертуре

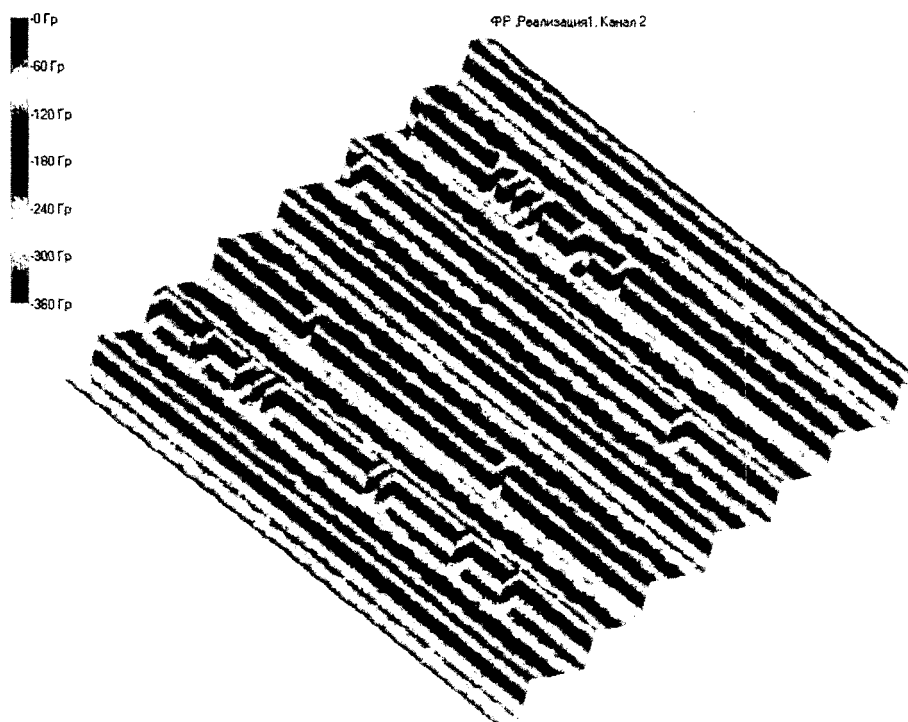


Рис. 6. Фазовое распределение на апертуре

При моделировании количество реализаций АФР может быть до 16 для каждого канала. Таким образом, для одного и того же канала можно моделировать до 16 амплитудно-фазовых распределений с различными реализациями ошибок.

Результаты выполнения программы приведены в пункте меню *Результаты*, которые представляются в протоколе и в графическом виде.

Протокол содержит отчет об основных параметрах диаграммы направленности. Одна из возможных форм протокола приведена на рис. 7.

```

*****
*           РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ           *
*****
Дата моделирования:                25.06.2002
Время моделирования:              9:24:00
Частота:                            3000
Число матриц:                       7
*****
                ПАРАМЕТРЫ ДН: 1
*****
Ширина ДН, АЗ (гр.):                2.22
Ширина ДН, УН (гр.):                2.22
Коорд. максимума по азимуту (гр.):  1.10
Коорд. максимума по углу места (гр.): 0.00
Значение КНД (дБ):                  38.92
УБЛ (левый) (дБ):                   -30.84
Коорд. (лев.) (гр.):                 -27.26
УБЛ (правый) (дБ):                   -31.04
Коорд. (пр.) (гр.):                  29.74
УБЛ (нижний) (дБ):                   -30.94
Коорд. (ниж.) (гр.):                 -28.46
УБЛ (верхний) (дБ):                   -30.94
Коорд. (верх.) (гр.):                 28.46
Макс. сигнал (дБ):                   63.01

```

Рис. 7. Форма протокола

При проведении приемосдаточных испытаний ФАР в диапазоне частот и широкоугольном сканировании ряд параметров (например, ширина луча, КНД) изменяются в соответствии с рабочей частотой и положением луча в пространстве. Для автоматической оценки соответствия параметров заданным в ТУ удобнее воспользоваться данными, нормированными (приведенными) к центральной частоте и нормальному положению луча.

Например, нормированная ширина ДН по уровню минус 3 дБ определяется по формуле

$$\theta_{\text{норм}}(\alpha, \beta) = \theta_{\text{изм}}(\alpha, \beta) * [(\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{р}}) * \cos\alpha(\cos\beta)],$$

где $\theta_{\text{норм}}(\alpha, \beta)$ – нормированное значение ширины ДН по уровню минус 3 дБ в горизонтальной $\theta_{\text{норм}} \alpha$ или вертикальной $\theta_{\text{норм}} \beta$ плоскости, $\theta_{\text{изм}}(\alpha, \beta)$ – измеренное значение ширины ДН по уровню минус 3 дБ в горизонтальной $\theta_{\text{изм}} \alpha$ или вертикальной $\theta_{\text{изм}} \beta$ плоскости; $\lambda_{\text{н}}$ – значение рабочей длины волны, к которой осуществляется нормировка; $\lambda_{\text{р}}$ – значение рабочей длины волны, на которой проводится измерение; α (β) – угол отклонения ДН в горизонтальной α или в вертикальной β плоскости.

Примеры представления результатов в графическом виде приведены на рис. 8 - 12.

Графики ДН представлены на рисунках в декартовой (рис. 8) и полярной (рис. 9) системе координат соответственно.

Графики эквивалентных амплитудно-фазовых распределений в апертуре приведены на рис. 10, 11.

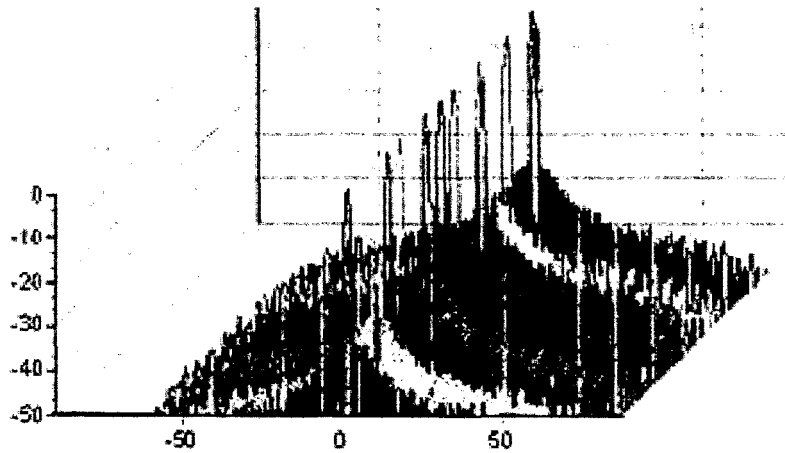


Рис. 8. Графики ДН по азимуту (количество каналов 1, количество реализаций 16)

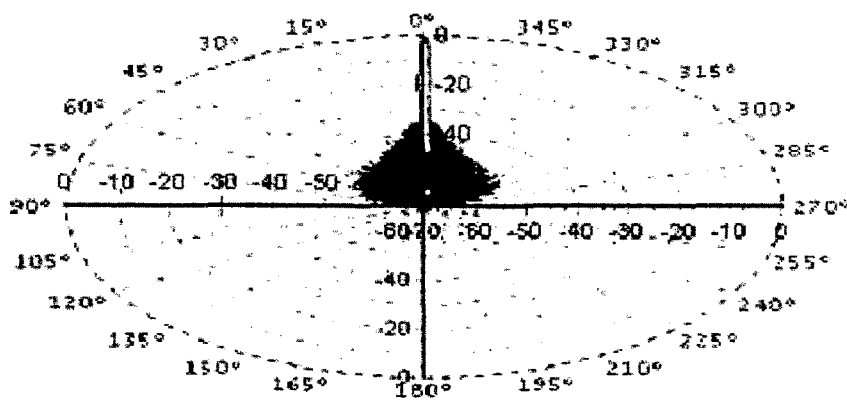


Рис. 9. График ДН в полярной системе координат (количество каналов 1, количество реализаций 1)

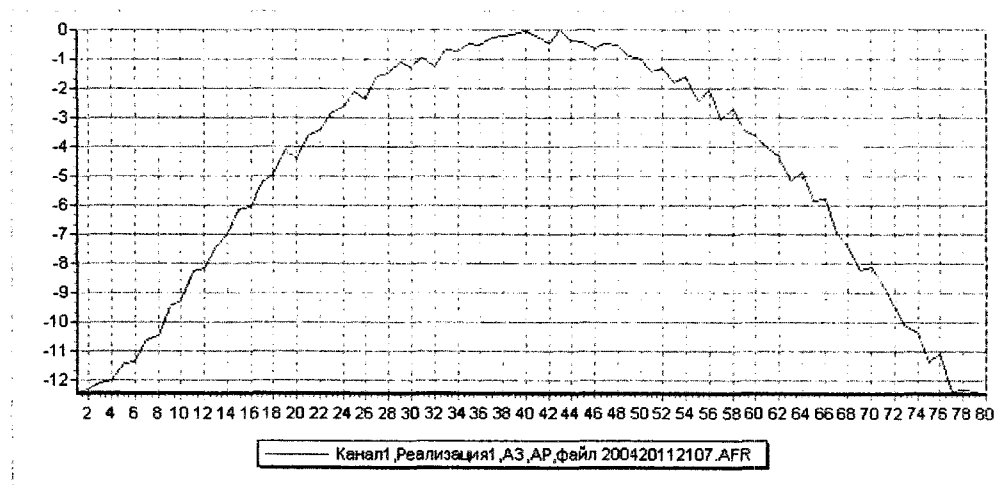


Рис. 10. Эквивалентное амплитудное распределение на апертуре в горизонтальной плоскости (единицы измерения по оси ординат, дБ, по оси абсцисс – номер излучателя)

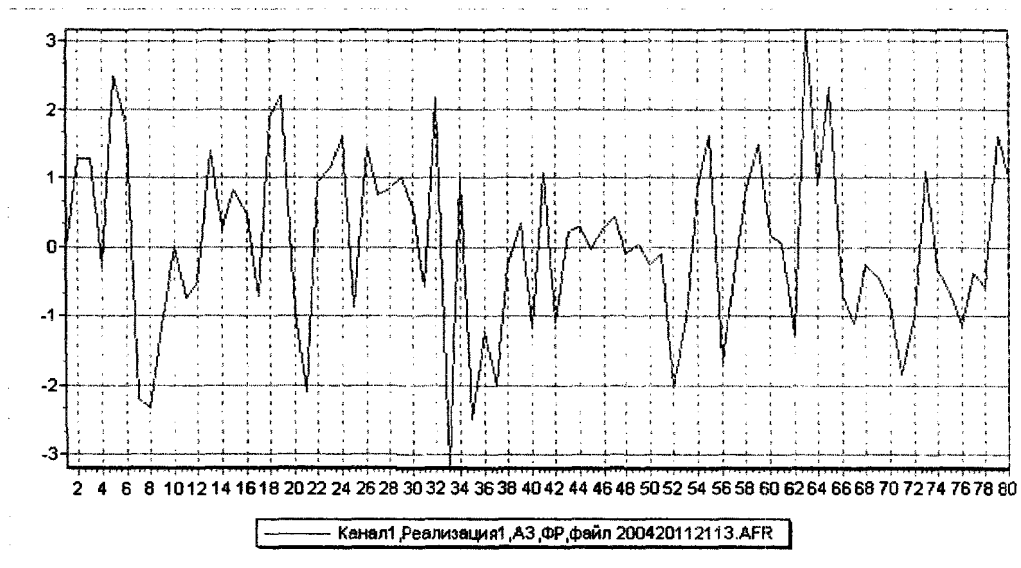


Рис. 11. Эквивалентное фазовое распределение на апертуре в горизонтальной плоскости (единицы измерения по оси ординат, градусы, по оси абсцисс – номер излучателя)

Топограммы ДН показаны на рис. 12, а (пространственное изображение) и 12, б (картографическая проекция)

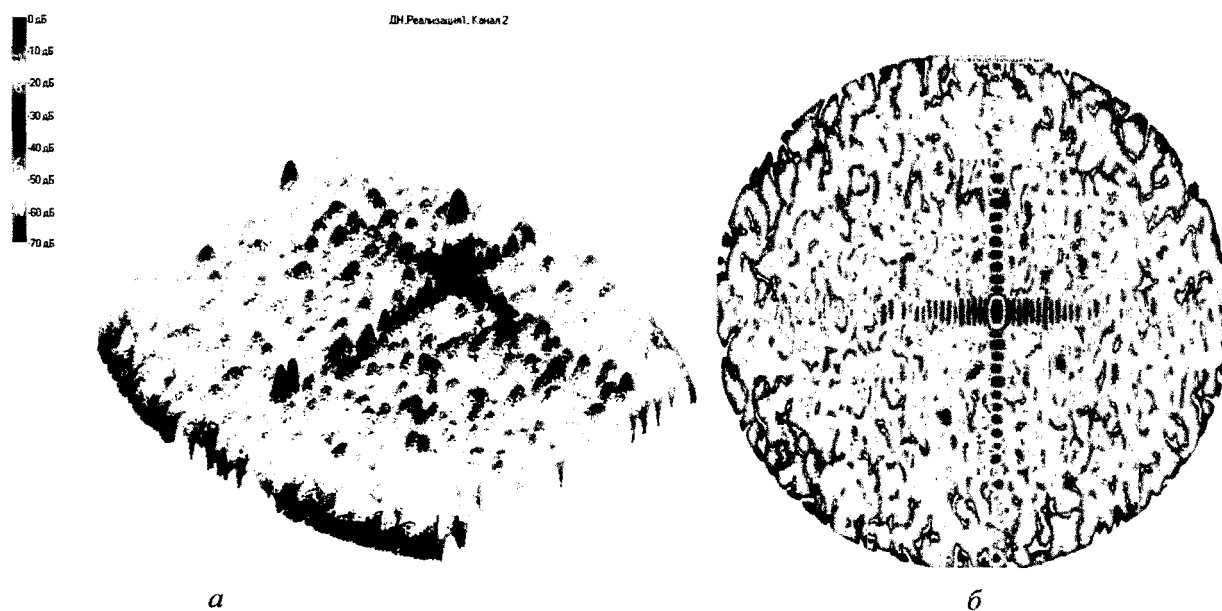


Рис. 12. Топограммы ДН

5. Анализ результатов моделирования

Для анализа результатов моделирования выбирают файл амплитудно-фазового распределения (*Файл/Открыть файл*) для модели АУ и нажатием кнопки *Открыть* запускают обработку выбранного файла (см. рис. 13).

После окончания обработки в выпадающем меню *Результаты* выбирают тип отображения результатов: *Протокол* или *Графики*. Используя широкие экспортные возможности программного пакета, можно выводить в файл или на принтер все результаты моделирования (в том числе и полученное амплитудное распределение в формате *.csv*). При этом экспорт таблицы амплитудного распределения производится в следующей последовательности:

- открывают таблицу амплитудного распределения (*Антенна / Просмотреть / Таблица АФР*);
- экспортируют выбранную таблицу (*Файл / Экспорт таблицы* в папку Csv текущего каталога или в любую по выбору оператора).

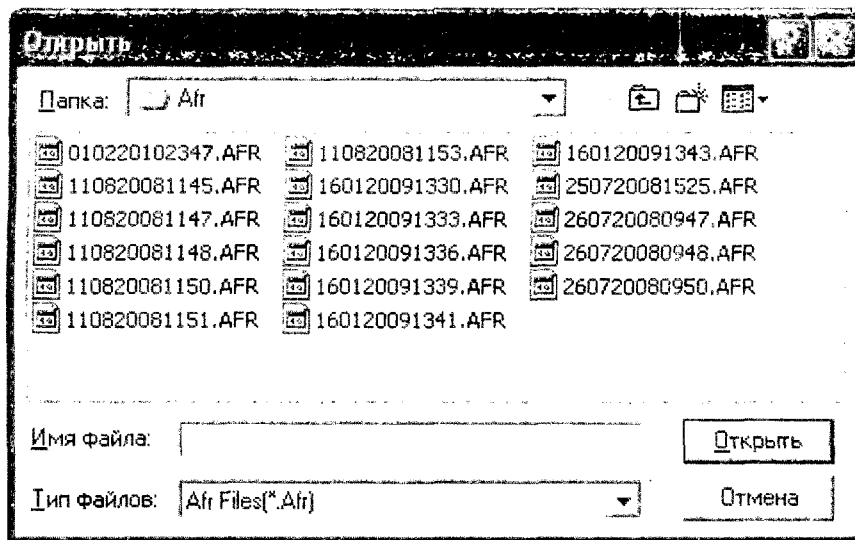


Рис.13. Выбор файла АФР

Программа “Моделирование и расчет параметров ФАР” входит в состав автоматизированного измерительно-моделирующего комплекса (АИМК) и представляет пользователям широкие возможности для решения задач, возникающих при проектировании и испытании современных антенных систем различного назначения.

Развитый интерфейс программы и оперативный контроль вводимых данных на принадлежность к заданному интервалу значений устраняет при моделировании большинство грубых ошибок, вносимых обслуживающим персоналом.

Результаты использования данной программы показали целесообразность ее применения практически без ограничений для оценки параметров автоматизированных измерительных комплексов, предназначенных для настройки и измерения характеристик ФАР. Программы, имитирующие работу аппаратуры АИК, позволили провести отладку ПО и определить точностные требования к аппаратуре стенда. По результатам моделирования был произведен выбор методов и объем измерений характеристик ряда ФАР; определен структурный состав АИК, входящей в него аппаратуры и методов компенсации аппаратурных погрешностей, методик выполнения измерений и метрологической аттестации, определена необходимость и частота проведения калибровок с помощью введенных в состав аппаратуры стенда вспомогательных измерительных каналов [28, 29].

Было проведено моделирование компенсации ошибок вносимых подвижным СВЧ-трактом, отражениями от апертуры ФАР и несущих конструкций безэховой камеры при использовании пространственно разнесенной зондовой системы и комбинированного метода измерений [30, 31].

Заключение

Автоматизированный измерительно-моделирующий комплекс предоставляет пользователям широкие возможности для решения достаточно большого круга задач в области проектирования и испытания современных антенных систем различного назначения.

Внедрение базового варианта АИМК позволяет в результате выполнения многовариантного моделирования провести оптимальный выбор формы апертуры и амплитудно-фазового распределения, определить требования к допускам изготовления и параметрам излучающей, распределительной и управляющей систем и к их элементам (фазовращателям, вычислитель-

ному устройству управления лучом, вычислительному устройству распределения фаз, излучателям и т.д.) и обеспечить:

- оценку искажений АФР, возникающих на апертуре ФАР за счет ошибок реализации заданного АФР (ошибок и отказов в излучающей и диаграммообразующей системах, дискретности команд устройства управления лучом и др.);

- оценку влияния отдельных ошибок измерений и их комбинаций на результаты измерений АФР;

- обосновать требования к метрологическим характеристикам АИК.

Сочетание режимов оперативного моделирования, синтеза ДН и измерения АФР, расчета и внесения фазовых поправок в АФР, с контролем их реализации и определением влияния на параметры ФАР, способствует выработке детального понимания физики процесса настройки и открывает пути совершенствования ФАР. Это приводит к существенному сокращению сроков разработки, изготовления, настройки и проведения приемо-сдаточных испытаний ФАР с соответствующей экономией ресурсов, повышению качественного уровня выполнения измерений параметров, эффективности, глубине и оперативности диагностики технического состояния ФАР.

Список литературы: 1. *Balanis Constantine A. Modern antenna handbook.* John Wiley& Sons, Inc., 2008. – Р. 1700. 2. Автоматизированный имитационно-измерительный комплекс для разработки и измерения характеристик ФАР / *Усин В. А., Марков В. И., Помазанов С. В., Усина А. В., Филоненко А. Б.* // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – Киев. – Т. 54, №5, май 2011 г. – С. 47-54. 3. *Гостюхин В.Л., Гринева К.И., Трусов В.Н.* Вопросы проектирования активных ФАР с использованием ЭВМ / Под ред. В.Л. Гостюхина. – М. : Радио и связь, 1983. – 248 с. 4. *Усин В. А., Марков В. И., Помазанов С. В., Усина А. В., Филоненко А. Б.* Применение автоматизированных измерительных комплексов для оценки параметров сложных антенных систем // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. – Вып. 154. – С. 172-178. 5. Проблемные вопросы технологии настройки и калибровки ФАР / *В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко* // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 161. – С. 64-71. 6. *В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина.* Системы встроенного контроля активных ФАР // 20-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Севастополь, 13-17 сентября 2010 : материалы конф. – С. 965-966. – Севастополь : Вебер, 2010. – 57 с. 7. *Системы* контроля и диагностики технического состояния ФАР / *Усин В. А., Марков В. И., Помазанов С. В., Усина А. В., Филоненко А. Б.* // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – Киев. – Т. 54, №2, февр. 2011. – С. 44-53. 8. *Kogure H., Kogure Y., Rautio J.* Introduction to Antenna Analysis Using EM Simulators. Artech House, 2011. – P.250. 9. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР – М. : ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 276 с. 10. *Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.* Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / под ред. проф. Банкава С.Е. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. 11. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS. – М. : ЗАО «НПП «Родник», 2009. – 736 с. 12. *Разевиг В.Д., Потатов Ю.В., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / под ред. В.Д. Разевига. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 493 с. 13. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М. : ЗАО «НПП «Родник». 2009. – 256 с. 14. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет излучающих структур с помощью FEKO. – М. : ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с. 15. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO. – М. : ЗАО «НПП «Родник». 2009. – 200 с. 16. *Дмитриев Е.Е.* Основы моделирования в Microwave Office. – М. : ЗАО «НПП «Родник». 2010. – 176 с. 17. *Курушин А.А., Пластиков А.Н.* Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. : Изд-во МЭИ, 2010. – 160 с. 18. *Gustrau Frank, Manteuffel Dirk.* EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. – pp. 276. 19. *Visser H.J.* Approximate Antenna Analysis for CAD. John Wiley&Sons, New York, 2009. – pp.304. 20. *Makarov S.N.* Antenna and EM modeling with Matlab. John Wiley&Sons, New York, 2002. – pp.274. 21. *Keizer Will P. M. N.* APAS: An Advanced Phased-Array Simulator // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – Vol. 52, No. 2, April 2010. – pp. 40-56. 22. *Усин В. А., Марков В. И., Помазанов С. В., Усина А. В.* Измерительно-моделирующие комплексы для настройки и измерения параметров антенн // 18-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь, 8-12 сен-

тября 2008 : Материалы конф. в 2-х т. – Т. 2. – С. 726-727. – Севастополь : Вебер, 2008. – 939 с. 23. *Усин В. А., Марков В. И., Помазанов С. В., Усина А. В., Филоненко А. Б.* Применение автоматизированных имитационно-измерительных комплексов для оценки характеристик излучающих систем // 3-й Междунар. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008 : Сб. науч. тр. – Т. 1. Междунар. конф. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». – Ч. 2. – С. 27-30. – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – 272 с. 24. *Keizer Will P.M.N.* Low Sidelobe Pattern Synthesis Using Iterative Fourier Techniques Coded in MATLAB // IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 51, Issue: 2. 2009. – P. 137-150. 25. *Vasylychenko, A., Schols, Y., De Raedt, W., Vandenbosch, G.A.E.* Quality Assessment of Computational Techniques and Software Tools for Planar-Antenna Analysis // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – Vol. 51, Issue: 1 : 2009. – P. 23 – 38. 26. *Mitra R.* A look at some challenging problems in computational electromagnetics // IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 46, Issue: 5 : 2004. – P. 18 – 32. 27. *Вендик О.Г., Парнес М.Д.* Антенны с электрическим сканированием / под ред. Л.Д. Бахраха. – М. : Радио и связь, 2001. – 250 с. 28. *Основные тенденции развития ближнезонных методов измерения характеристик антенн. – Ч.1. Методы измерений линейных и апертурных антенн / В.А. Усин, В.И. Марков, В.А. Губарь, В.А. Ковальчук, Л.В. Рожнятовская, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – Вып. 146. – С. 107-120.* 29. *Основные тенденции развития ближнезонных методов измерения характеристик антенн. – Ч.2. Методы контроля, настройки и измерения параметров ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 160. – С. 213-227.* 30. *Усин В.А., Марков В.И., Рожнятовская Л.В., Усина А.В.* Применение пространственно разнесенной многозондовой системы для измерения параметров ФАР // 16 Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'06). Севастополь, 11-15 сентября 2006 : Материалы конф. в 2-х т. – Т. 2. – С. 821-822. 31. *Усин В.А., Ковальчук В.А., Марков В.И., Филоненко А.Б.* Комбинированный метод измерения характеристик антенн // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №5. – С. 65-71.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники,
ГП «НИИ «Квант»,
Антрацитовский техникум
радиоэлектронного приборостроения,
Харьковский государственный
университет питания и торговли*

Поступила в редколлегию 25.03.2011