

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

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БЛИЖНЕЗОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН.

Ч. 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, НАСТРОЙКИ, КАЛИБРОВКИ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАР

Введение

В первой части статьи [1] были рассмотрены методы определения параметров антенн в ближней зоне, при этом структура антенны предполагалась произвольной. Повышение требований к техническим характеристикам радиотехнических систем (РТС) обусловило переход к использованию в качестве антенн РТС и систем связи многофункциональных фазированных антенных решеток (МФАР), в частности многоканальных активных и цифровых фазированных антенных решеток (АФАР, ЦАР) с низким уровнем боковых лепестков (УБЛ) и широкоугольным сканировании [2]. Следует отметить, что в настоящее время обычные ФАР с электрическим сканированием практически исчерпали свои технические возможности, поэтому во все перспективные проекты РТС включают АФАР или ЦАР [3].

Традиционные методы измерения диаграмм направленности (ДН) антенн в дальней зоне на открытых антенных полигонах [4 - 7], как отмечено в [8], становятся технически неприемлемыми. Это обусловлено как конструктивными причинами (весогабаритные характеристики, охлаждение и т.д.) и большой длительностью проведения измерений пространственных ДН (либо малой информативностью при измерении только главных сечений), так и значительной погрешностью определения амплитудно-фазовых распределений (АФР) на апертуре, обусловленной влиянием отражений сигналов от окружающих предметов и подстилающей поверхности. Методы определения параметров антенн в ближней зоне свободны от указанных недостатков и обеспечивают высокую технико-экономическую эффективность проведения настройки и приемосдаточных испытаний [9 - 14]. Следует отметить, что проведение испытаний ФАР должно не только обеспечить настройку и подтвердить расчетные характеристики, но и дать возможность выявить наиболее критические компоненты и размеры, определить влияние статистических комбинаций ошибок реализации заданных АФР на интегральные параметры, оценить качество и эффективность функционирования встроенной системы контроля и калибровки (ВСКК). Решение этих задач также ведет к росту объемов измерительных процедур.

При применении методов ближней зоны для проведения настройки АФАР необходимо учитывать следующие факторы: высокий уровень излучаемой мощности в режиме ПЕРЕДАЧА, особенности структуры приемопередающих модулей АФАР, использование интегральной электроники для построения схемы управления лучом (СУЛ) и реализации схем формирования суммарных, разностных, фоновых и компенсационных каналов [2, 3]. Таким образом, комплекс испытаний проводимых с каждым образцом МФАР усложняется, и, в ряде случаев, требуется существенный пересмотр состава измерительного оборудования и методов измерения, адаптация методик выполнения измерений и используемого программного обеспечения с учетом особенностей построения конкретных типов испытываемых МФАР [15 - 17].

В настоящей статье рассмотрены состояние и перспективы развития ближнезональных методов определения характеристик МФАР для проведения настройки, приемосдаточных испытаний и контроля технического состояния МФАР в процессе эксплуатации.

1. Методы оценки технического состояния и измерения характеристик ФАР

1.1. Внешние параметры ФАР

К внешним параметрам ФАР относятся характеристики, связанные с электромагнитным полем в свободном пространстве [7, 17 - 19]:

- комплексные векторные ДН и их параметры (ориентация направления главного максимума в пространстве, значения ширины главных лепестков, уровни и координаты боковых лепестков и нулей ДН, уровень фона в передней полусфере, коэффициенты накрытия);
- фоновые и компенсационные ДН;
- поляризационные характеристики;
- энергетические характеристики – энергетический потенциал, коэффициенты направленного действия (КНД), коэффициенты усиления (КУ), коэффициенты использования поверхности (КИП);
- пеленгационные характеристики (ПХ) и их параметры;
- фазочастотные характеристики;
- характеристики электронного сканирования (зависимость параметров ФАР от угла отклонения луча от нормали к апертуре в диапазоне рабочих частот).

Получить достаточно полное и объективное представление о работоспособности ФАР весьма затруднительно в силу ряда причин, из которых можно отметить следующие:

- при проектировании ФАР (даже при использовании пакетов современных математических программ - HFSS, FEKO, AWR Microwave Office, Cst Microwave Studio, ZELAND и др.) сложно аналитически учесть погрешности реализации АФР на апертуре возникающие вследствие взаимной связи излучающих элементов, частотной зависимости и неидентичности комплексных коэффициентов передачи (ККП) приемопередающих модулей (ППМ) антенной решетки;
- значительный объем данных, необходимых для оценки технического состояния и параметров МФАР при электрическом сканировании, в частности, для представления объемных одиночных и многолучевых ДН и пеленгационных характеристик моноимпульсных приемных систем в пространственном секторе углов при широкоугольном сканировании;
- резкое увеличение объема информации за счет числа основных и компенсационных каналов ФАР и специальных АФР на апертуре ФАР, обеспечивающих эффективную работу антенны в различных приемных и передающих режимах (узкие, расширенные, столбобразные, косекансные ДН, адаптивное формирование провалов ДН в заданных пространственных секторах и т.д.).

Задачи получения объективных характеристик антенных устройств в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА очень актуальны, а их решение носит комплексный характер и в существенной мере зависит от конструктивных решений антенн и используемой элементной базы [19 - 24].

1.2. Особенности измерения характеристик ФАР

Интегральную оценку технического состояния ФАР принимают по результатам анализа традиционных характеристик: диаграммы направленности, коэффициента усиления и др. Эти характеристики определяются с помощью различных методов [1, 17, 25 - 32]. Однако процесс измерений характеристик АФАР имеет существенные особенности, связанные с тем, что при сканировании характеристики АФАР зависят от установки положения луча в пространстве. Современные антенные решетки являются, как правило, многофункциональными, многоканальными, адаптивными и невзаимными, поэтому требуется определять их характеристики в различных режимах работы для множества положений луча в диапазоне рабочих частот, как для режима ПРИЕМ, так и для режима ПЕРЕДАЧА, что резко увеличивает объем измерений.

При проведении настройки ФАР необходимо определить фазовые и амплитудные поправки, которые зависят от положения луча в пространстве и частоты (в отличие от параметров зеркальных антенн и антенн с механическим сканированием) и нормирующие коэффициенты для встроенной системы контроля, что существенно увеличивает время проведения испытаний. Количество возможных реализаций ДН (порядка $10^5 \div 10^{10}$ ДН) зависит от числа каналов, вида лучей (узкий, широкий, косеканс и т.д.), количества положений луча в пространстве (в зависимости от ширины луча и сектора обзора), числа рабочих частот, режимов работы, адаптации к собственному техническому состоянию и помеховой обстановке.

Проведение измерений в полном объеме стало практически нереальным, да и нецелесообразным. Для получения достоверной оценки параметров ФАР в автоматизированных измерительных комплексах (АИК) стал использоваться статистический подход к минимизации объема измерений с комплексным применением коммутационного метода [7, 25 - 28]. Были разработаны методики, позволяющие радикально сократить объем измерений при испытаниях ФАР обеспечении требуемой статистической достоверности определения характеристик.

Основными тенденциями развития методов настройки и измерения параметров ФАР можно считать:

- повышение точности определения внешних параметров ФАР за счет внедрения амплитудных методов с реконструкцией фазы, комбинированных и динамических методов измерения, контроля и калибровки ФАР [33-37];
- проведение измерений АФР с использованием прецизионных анализаторов цепей в широкой полосе частот в одном цикле измерений методом смещенных матриц [27, 28];
- применение зондов с обработкой сигналов (пространственно разнесенные многозондовые системы, многоэлементные коммутируемые зонды, протяженные и дифференциальные зонды) для увеличения информативности и точности при уменьшении времени проведения измерений [38];
- повышение точности контроля технического состояния ППМ, расчета АФР и параметров ФАР в целом за счет измерения и алгоритмической компенсации ошибок позиционирования зонда, искажений в СВЧ тракте, систематических и случайных ошибок, вносимых измерительной аппаратурой.

1.3. Статистический подход к измерению параметров ФАР

Метод выборочных измерений характеристик направленности ФАР основан на методах статистической теории антенн и заключается в определении средних значений характеристик и пределов возможных их изменений для множества положений луча в секторе сканирования по результатам измерения ограниченного числа ДН. Статистические характеристики диаграммы направленности ФАР в секторе сканирования зависят от структуры антенны, дискретности фазирования, случайных ошибок реализации дискретных состояний, разброса потерь в каналах решетки и различий в форме ДН отдельных излучателей. ДН ФАР предлагается рассматривать как случайные функции, а усредненную по ансамблю элементов решетки суммарную ДН ФАР представить в виде суммы детерминированной и случайной (фоновой) составляющих [7, 39].

Детерминированные составляющие ДН (и других характеристик антенны) совпадают с их средними значениями, а пределы возможных изменений определяются средним уровнем фоновой составляющей. Задачей выборочных измерений является определение этого уровня, оценки средних значений ДН ФАР и определение необходимого объема контрольных измерений для оценки технического состояния ФАР. Рекомендации по формированию выборок независимых значений ДН в области главного лепестка, первых боковых лепестков и в области дальних лепестков, которые необходимы для определения указанных среднего уровня фоновой составляющей и средних значений ДН, можно найти в работе [7].

Определив детерминированную составляющую ДН, вычисляют "неискаженные" значения ширины главного лепестка, крутизны разностных диаграмм в равносигнальном направлении, уровни первых боковых лепестков, соответствующие неотклоненному лучу и пределы изменений перечисленных характеристик направленности в секторе сканирования луча ФАР.

Значения КУ и коэффициента эллиптичности также необходимо определять для различных положений луча. При этом объем измерений также можно существенно уменьшить, если учесть, что для определения пределов изменения этих параметров в секторе сканирования достаточно измерить их значения лишь для отдельных плоскостей сканирования, в которых они достигают максимального и минимального значений. Например, для решеток с размещением излучателей в узлах квадратной и треугольной сеток КУ достигает указанных значе-

ний в тех плоскостях сканирования, по отношению к которым решетки имеют соответственный наибольший и наименьший периоды.

Для аттестации точности установки луча ФАР во всем секторе сканирования по ограниченным фрагментам измеренных АФР, необходимо разделить измеренные погрешности установки луча на случайную и систематическую составляющие и по виду систематической составляющей определить причины ее появления. После этого, по ограниченной выборке характеристики случайной составляющей и функциональной зависимости систематической составляющей от угла отклонения луча, можно прогнозировать точность установки луча в секторе сканирования. Анализ слагаемых систематической составляющей погрешности позволяет достоверно определить точность установки луча в секторе сканирования по ограниченной выборке измеренных значений ДН и контролировать качество изготовления и настройки ФАР.

2. Настройка ФАР

Для проведения настройки АФАР используются амплифазометрический и коммутационный методы [9, 25, 41, 42].

При разработке методик проведения настройки и испытаний АФАР для получения достоверной оценки технических характеристик был проанализирован многолетний опыт проведения антенных измерений и осуществлен практический подход с выделением ключевых характеристик подлежащих контролю и полной автоматизации процесса измерений. Такой подход к оценке ТХ включает в себя:

- максимально полную оценку технического состояния элементов входящих в состав ППМ: аттенуаторов, фазовращателей (ФВ), смесителей и других элементов АФАР для режимов ПЕРЕДАЧА и ПРИЕМ;
- выявление неисправностей и технологических дефектов в каналах АФАР, а также взаимного влияния излучающих элементов коммутационным методом;
- проведение математического моделирования (с использованием математической модели АФАР и данных, полученных при контроле и измерениях) с нахождением и последующим подтверждением ожидаемых статистических характеристик;
- проведение настройки АФР в полном пространственном секторе углов, расчет и внесение необходимых фазовых и амплитудных поправок для пространственных угловых секторов на которые разбит полный сектор с учетом ограничений по возможности управления и юстировки для всех ППМ АФАР;
- повторную оценку технического состояния ППМ АФАР и их элементов (выявление зависимости от режима работы, охлаждения и т.д.) с помощью поэлементного контроля;
- статистическую обработку полученных данных и определение объема выборки АФР достаточной для достоверной оценки параметров АФАР;
- выборочное измерение характеристик АФАР, накопление результатов в базе данных, статистическая обработка и заключение о соответствии АФАР техническим требованиям.

Заводскую настройку АФАР целесообразно начинать с контроля технического состояния (КТС) включающего в себя [28, 40, 41]: контроль прохождения сигналов управления; тесты каналов управления СУЛ с помощью обратной связи (запись/чтение управляющих сигналов); выявления технологических дефектов сборки АФАР; измерение комплексных коэффициентов передачи ППМ на СВЧ сигнале, определение реальных фазовых сдвигов и вносимых потерь приемопередающими модулями при переключении состояний ФВ и аттенуаторов.

При проведении КТС АФАР необходимо провести оценку стабильности работы СУЛ (оценить разброс параметров ФВ при многократных переключениях состояний) и сравнить характеристики ФВ и аттенуаторов полученные на специализированном стенде при проведении индивидуальной проверки и подборе оптимальных кодовых комбинаций с данными контроля ККП ППМ (в режимах прием/передача) [41].

Основными методами настройки и определения характеристик АФАР являются методы ближней зоны (амплифазометрические, амплитудные с реконструкцией фазы, комбиниро-

ванные, динамические и коммутационные) [9 - 14, 33-37, 41, 42], которые в настоящее время считаются наиболее перспективными и основаны на измерении распределения ближнего поля антенны на определенной измерительной поверхности [11]. АФР ближнего поля антенны на измерительной поверхности (планарной, цилиндрической, сферической, плоско-полярной, биполярной) может быть измерено как путем механического сканирования измерительным зондом или многозондовой системой, так и модуляционным методом (за счет рассеивания излучаемого антенной поля одиночным перемещаемым отражателем или решеткой зондов) [9, 38]. АФР на апертуре АФАР можно определить методом переключений (коммутационным), модуляционным, динамическим методами или их сочетанием с использованием различных способов ввода контрольного сигнала [28, 41, 42].

Метод определения характеристик АФАР по измерениям поля в ближней зоне включает в себя следующие операции: измерение АФР, коррекцию измеренных данных, расчет АФР на апертуре и последующий расчет параметров антенны. Измерения проводятся автоматизированным измерительным комплексом, как правило, в безэховой экранированной камере (БЭК). В режиме ПРИЕМ используется технология проведения настройки и измерений параметров АФАР отработанная при настройке ФАР [9, 43].

В состав стенда для калибровки АФАР методом ближнего поля, должна входить специализированная измерительная аппаратура, адаптированная к техническим решениям аппаратной реализации испытуемой АФАР, и аппаратура встроенной системы контроля и калибровки (ВСКК), которая используется для проведения калибровки АФАР в процессе эксплуатации. В программе управления режимами работы АФАР должен быть предусмотрен режим КАЛИБРОВКА.

На рис.1, а представлено окно программы настройки волноводно-щелевой АФАР. Программа рассчитывает фазовые поправки и ДН, которая выводится в виде графика в окне программы. Программа настройки хранит предыдущие фазовые поправки для того, чтобы можно было вернуться к предыдущему состоянию, если новые поправки окажутся хуже предыдущих.

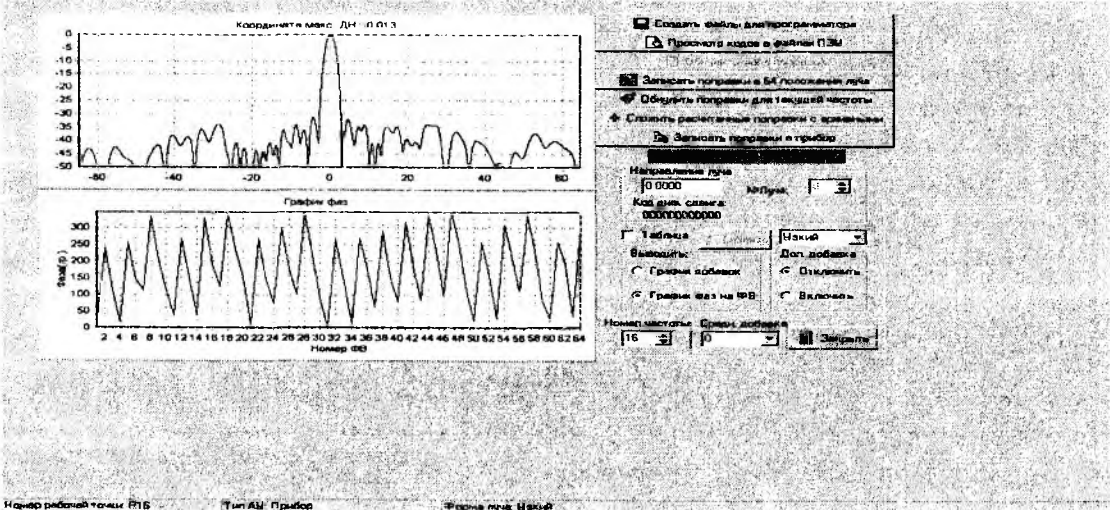
Процесс настройки является итерационным, поскольку каждое новое состояние фазовращателей может нелинейно влиять на общую результирующую ДН.

Программа позволяет вместо прогнозируемой ДН просмотреть на дисплее таблицу кодовых комбинаций для устройства управления ФВ и коды фаз в десятичной, двоичной и шестнадцатеричной системе. Пример окна с таблицей кодовых комбинаций приведен на рис. 1, б.

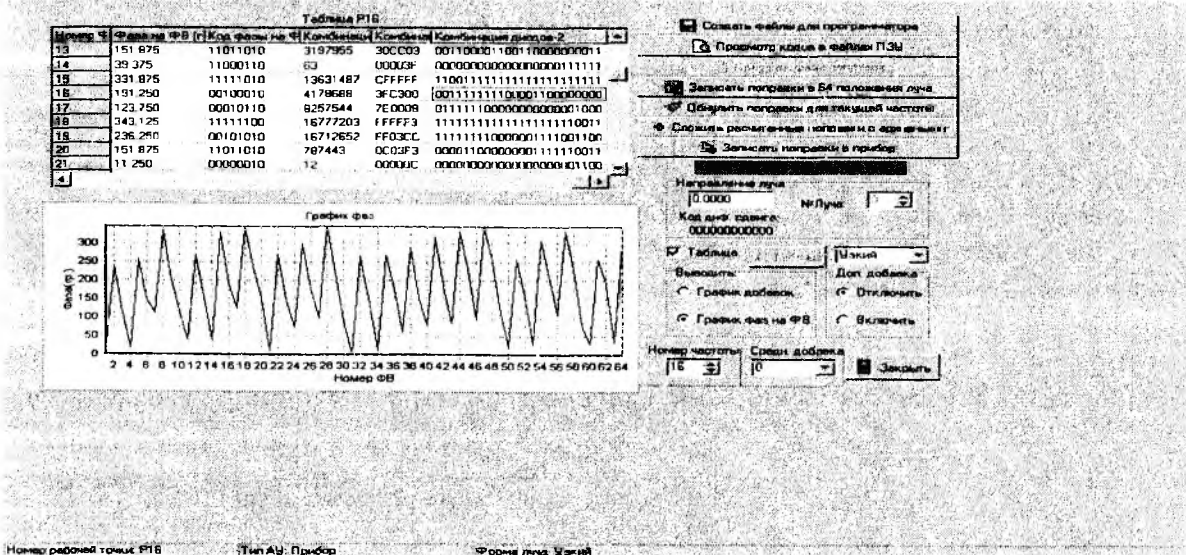
В режиме ПЕРЕДАЧА технология проведения настройки и измерений параметров АФАР имеет свои особенности, в частности, обусловленные требованиями безопасности. Для измерений АФР на апертуре АФАР нашли применение «метод перемещающегося пятна» рис. 2 и «техника наложения» рис. 3 [44, 45]. В отличие от измерения диаграмм направленности в режиме ПРИЕМ, когда группа или все ППМ АФАР включены с соответствующим амплитудным и фазовым распределением, при измерении параметров или калибровке АФАР в режиме ПЕРЕДАЧА в каждый момент времени включён только калибруемый или измеряемый ППМ. Измерения производятся при последовательной установке зонда против каждого из модулей, пока не будут получены калибровочные данные по всей АФАР.

При проведении настройки АФАР необходимо оценить зависимость амплитудно-фазового распределения токов на апертуре от влияния взаимной связи излучателей (ВСИ) и зависимости диаграмм направленности излучателей решетки от их координат в апертуре антенны при широкоугольном сканировании. На практике это проявляется в том, что АФР токов возбуждения решетки отличается от желаемого (полученного при синтезе) для каждого из направлений фазирования антенны. Для алгоритмической компенсации этих отличий при проведении настройки необходимо измерить параметры суммарной ДН АФАР для ряда угловых направлений на каждой из рабочих частот и, соответственно, рассчитать поправки для коррекции АФР на апертуре. Если такой компенсацией пренебречь, то может оказаться, что стремление увеличить точность функционирования АФАР за счет повышения требований к параметрам ее элементной базы (включая фазовращатели и аттенюаторы) не приведет к же лаемому ре-

зультату, так как ошибки фазирования, искажающие АФР на апертуре за счет ВСИ и отличий ДН излучателей, останутся на прежнем уровне. Поэтому требование обеспечения точности фазирования АФАР при широкоугольном сканировании учитывающие влияние ВСИ и ДН излучателей может привести к необходимости разбивки полного сектора сканирования на ряд секторов и введения для них различных фазовых поправок (ФП) [25]. Пример одномерного сечения ДН для отклоненного луча до и после дополнительной подстройки приведен на рис. 4.



а



б

Рис. 1

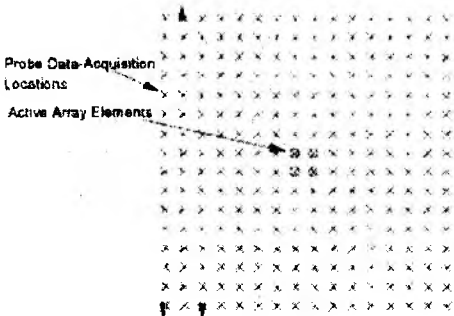


Рис. 2

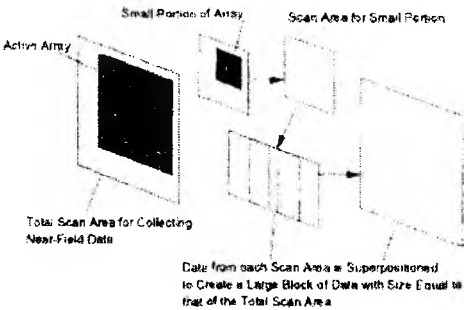


Рис. 3

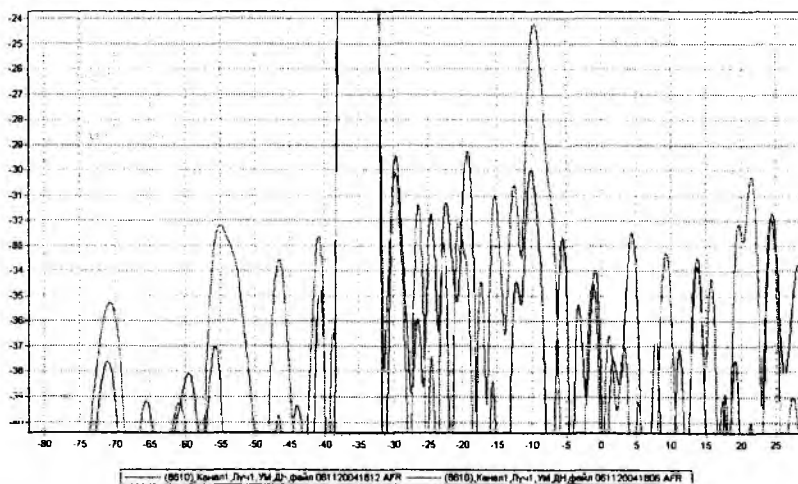
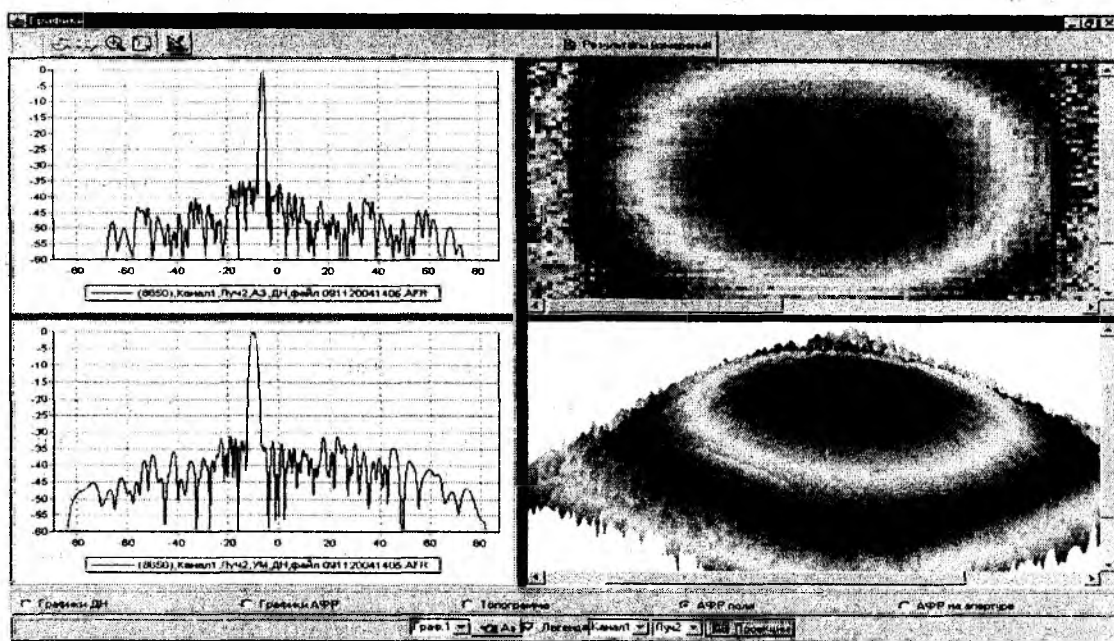


Рис. 4

После проведения настройки проводятся контрольные измерения параметров АФАР. Так, на рис. 5. изображены азимутальное сечение ДН (рис. 5, а), угломестное (рис. 5, б), топология АР ближнего поля антенны (рис. 5, в) и пространственное распределение амплитуды. Пример протокола, фиксирующего результаты испытаний, приведен на рис. 6.



а, б

в, г

Рис. 5

ПРОТОКОЛ

испытаний антенного устройства SeaLion заводской № 0001

Дата проведения испытаний: 09.11.2004 Время: 14:05:00

Рабочая частота: P11 Количество ДН в сеансе измерения: 8 Форма луча: Нормальный

Параметры ДН2 Таблица 2

Параметр	Измер. значение	Нормир. значение	Требования ТУ	Отклонение	Удовлетворяет ТУ (Да/Нет)
1 Угол откл. ДН (гр.)	-10.00				
2 Ширина ДН АЗ (гр.)	1.18	1.191	1.2 ± 0.2	-0.009	Да
3 Ширина ДН УМ (гр.)	2.08	2.077	2 ± 0.2	0.077	Да
4 Коорд. максимума					
4.1 по азимуту (гр.)	-5.705		-5.736 ± 0.2	0.031	Да
4.2 по углу места (гр.)	-9.990		-10.000 ± 0.2	0.010	Да
5 Значение КНД (дБ)	41.71	41.766	> 39.500	2.266	Да
6 Макс. УБЛ АЗ (дБ)	-34.980		< -32	-2.980	Да
7 Макс. УБЛ УМ (дБ)	-31.170		< -27	-4.170	Да
8 Макс. сигнал (дБ)	72.48				
9 Угол альфа (гр.)	0				
10 Угол бета (гр.)	0				
11 Угол гамма (гр.)	-0.205				

Ответственный за проведение испытаний: _____

→ Следующая ДН Печать протокола

Закреть

Рис. 6

3. Методы контроля характеристик ФАР

Современные МФАР включают в себя пассивные и активные электронные устройства (фазовращатели, СВЧ-переключатели, вентили, малошумящие усилители в приемных и мощные усилители в передающих каналах, преобразователи частоты и т.д.), частотно-зависимые СВЧ-тракты, схемы формирования ДН и специализированные вычислительные устройства. Повышение технических требований к параметрам АФАР в части снижения уровня боковых лепестков до значений минус 35-50 дБ, точности пространственной установки луча и увеличению излучаемой мощности, приводит к увеличению количества приемопередающих модулей, входящих в состав АФАР, и обострению проблем, связанных с настройкой и проведением калибровок таких систем.

Отказы ППМ и постепенное изменение параметров вследствие старения элементов, изменения температурного режима и напряжения источников питания приводят к деградации технических характеристик АФАР (росту УБЛ, падению коэффициента усиления и снижению точности установки положения луча в пространстве). Степень ухудшения параметров зависит от технологии изготовления ППМ и элементов СВЧ-трактов, их температурной стабильности, числа отказавших ППМ, типов отказов и их расположения в апертуре АФАР [2, 15 - 19].

С целью своевременного обнаружения и устранения возникающих изменений и неисправностей или компенсации их влияния на ДН в процессе эксплуатации необходимо периодически проводить КТС калибровку АФР. Сложность решения этой задачи при размещении АФАР на объекте обуславливается отсутствием возможности проведения прямых измерений ККП ППМ [41].

Появление надежных, экономичных и малогабаритных вычислительных средств (DSP, FPGA, PLIS) позволило изменить подход к решению всего комплекса вопросов контроля и поддержания параметров АФАР в течение периода эксплуатации. Вместо предъявления чрезмерно жестких требований к частотной и температурной стабильности и идентичности параметров ППМ для своевременного обнаружения и компенсации возникающих отклонений целесообразно оперативно проводить регулярную калибровку амплитудно-фазовых распределений на апертуре и КТС ППМ для определения амплитудных и фазовых поправок, обеспечивая адаптивную подстройку параметров АФР к возникающим изменениям [46 - 48].

Встроенная система калибровки и контроля. Встроенная система калибровки и контроля (ВСКК) должна обеспечивать требуемые характеристики АФАР как в режиме прием, так и в режиме передача. Это обусловлено тем, что комплексные коэффициенты передачи ППМ и соответствующие АФР на апертуре в различных режимах работы могут отличаться и при калибровке необходимо определить индивидуальные фазовые и амплитудные поправки.

Существенной и важной информацией, которая может быть использована при контроле параметров АФАР, являются априорные сведения о геометрии решетки, типе и направленных свойствах излучателей, устройстве приемопередающих модулей и т.д. Использование такой информации позволяет повысить эффективность, полноту и достоверность контроля [41 - 43].

Основными проблемами при разработке ВСКК являются:

- выбор способа ввода калибровочного сигнала;
- выбор метода выделения сигнала отдельного ППМ;
- выбор алгоритма вычисления амплитуды и фазы сигнала калибруемого ППМ;
- выбор алгоритма расчета и ввода поправок при автоподстройке ККП ППМ.

Ввод калибровочного сигнала. Для обеспечения калибровки АФР на апертуре АФАР наиболее широко применяются следующие способы ввода калибровочного сигнала (КС):

- облучение апертуры и прием сигналов от излучающих элементов АФАР с помощью внешних контрольных излучателей (КИ) [49 - 51];
- ввод контрольного сигнала с помощью направленных ответвителей (НО) или специальных линий передачи [52 - 54];
- последовательное измерение взаимных связей в АФАР между соседними излучателями [55 - 58];
- ведение специальных пассивных каналов в апертуру АФАР [15, 16].

В ряде ВСКК используется ввод КС с помощью направленных ответвителей. Отсутствие активных элементов в системе разводки КС обеспечивает относительную стабильность КС и хорошую точность калибровки (слабая подверженность влиянию температуры и старения). Количество дополнительных элементов для реализации ВСКК данного типа незначительно, но, тем не менее, конструкция антенны усложняется.

Более перспективным, с точки зрения стоимости и простоты реализации, является проведение КТС и калибровки АФАР по сигналу от вынесенного неподвижного калибровочного излучателя. Размещение в ближней зоне излучения жестко зафиксированных КИ для ввода КС дает возможность исключить затенение апертуры и обеспечить возможность проведения калибровки и КТС АФАР в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА. Рациональный выбор размещения КИ позволяет (за счет некогерентного суммирования сигналов на выходе суммарного канала от всех ППМ) уменьшить уровень поступающего на вход измерительной схемы сигнала от неконтролируемых каналов и снизить погрешности определения параметров калибруемого ППМ [49, 51, 59].

На практике нашли применение различные конструктивные варианты размещения внешних калибровочных излучателей. Например, в РЛС THAAD (Raytheon, USA) используются шесть рупоров, сосредоточенных по периметру апертуры АФАР, а в РЛС SAMPSON, четыре излучателя, размещенные под обтекателем.

Недостатком использования внешнего расположения рупоров, при низкой их установке и больших размерах апертуры может являться сильная неравномерность засветки апертуры (большой динамический диапазон измеряемых сигналов) и, соответственно, малое отношение сигнал/шум при измерении коэффициента связи с удаленными элементами решетки.

Режимы КАЛИБРОВКА и КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ в АФАР. Для поддержания технических параметров АФАР при эксплуатации на объекте используются два режима с разными задачами и трудоемкостью выполнения:

- Режим **КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ** АФАР (полный или сокращенный);
- Режим **КАЛИБРОВКА** по полной и/или сокращенной программе.

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АФАР производится в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА. КТС может проводиться только на одной рабочей частоте. Задачами КТС являются:

1. Контроль параметров ППМ на уровне элементов:

— измерение массивов амплитуд и вносимых фазовых сдвигов регулируемых фазовращателями (ФВ) и аттенюаторами (Атт) для каждого элемента ППМ методом коммутации фазы (амплитуды) для всех состояний ФВ и Атт на заданной рабочей частоте;

— накопление данных измерений в устройстве контроля;

— обработка измеренных данных и оценка технического состояния элементов ППМ.

2. Поиск и обнаружение неисправностей:

— измерение амплитуды и фазы каждого элемента АФАР методом коммутации фазы и амплитуды для всех состояний ФВ и Атт на заданной частоте;

— сравнение массивов полученных параметров ФВ и Атт с эталонными (ранее измеренными или справочными по партии);

— сравнение ККП ППМ, полученных при калибровке, с данными измерений полученными при проведении настройки;

— сравнение распределений амплитуд и фаз на апертуре антенны с эталонными АФР (ранее измеренными при настройке);

— проверка отработки заданных поправок к АФР;

— поиск отказов и их классификация;

— локализация неисправностей до уровня типового элемента замены.

КАЛИБРОВКА АФАР производится в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА на всех рабочих частотах или на заданной группе рабочих частот. Задачами КАЛИБРОВКИ являются:

1. Оценка работоспособности АФАР на системном уровне:

— восстановление АФР на апертуре по данным измерений ККП между излучателями АФАР и контрольными излучателями с использованием нормирующих коэффициентов, полученных при заводской настройке;

— восстановление ДН АФАР;

— оценка КНД, КУ;

— оценка уровней и положений боковых лепестков и нулей ДН.

2. Автоподстройка ККП ППМ, вызванных изменением температуры, старением и др. факторами в случае выхода параметров за пределы допусков:

— расчет новых поправок (фазовых и амплитудных) с учетом полученной информации о реальных ККП определенных по контрольным сигналам.

3. Коррекция отказов и неисправностей:

— проведение измерений ККП ППМ;

— при обнаружении отказов выдача запроса на запуск программы корректировки и расчет АФР с учетом полученной информации о реальном АФР, типах и месте отказов элементов;

— расчет новых фазовых поправок АФР на апертуре;

— расчет параметров АФАР (возможен итерационный процесс подстройки).

КТС и калибровка ППМ АФАР могут проводиться в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА как при «нулевом» состоянии окружения излучающего элемента (ИЭ) АФАР (луч, установленный по нормали к апертуре), так и при луче, отклоненном в заданное положение (при проведении калибровки по секторам).

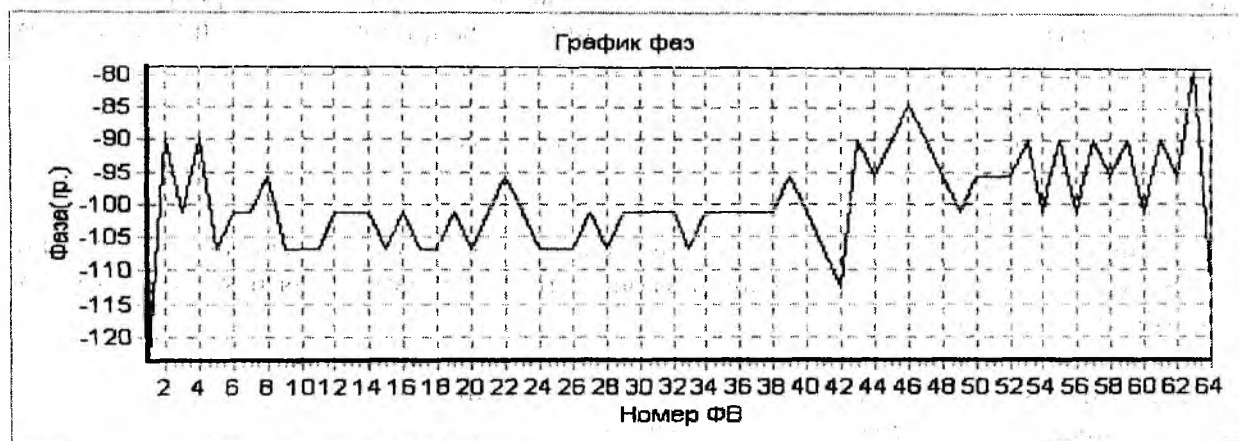
Особенности режимов КТС и КАЛИБРОВКА

Цель режима КТС – выявить отказавшие элементы, определить тип и место отказа, оценить техническое состояние ППМ для принятия решения о его замене. В режиме КТС проверяется прохождение команд и отработка заданных кодов аттенюаторами и фазовращателями ППМ АФАР на заданной рабочей частоте.

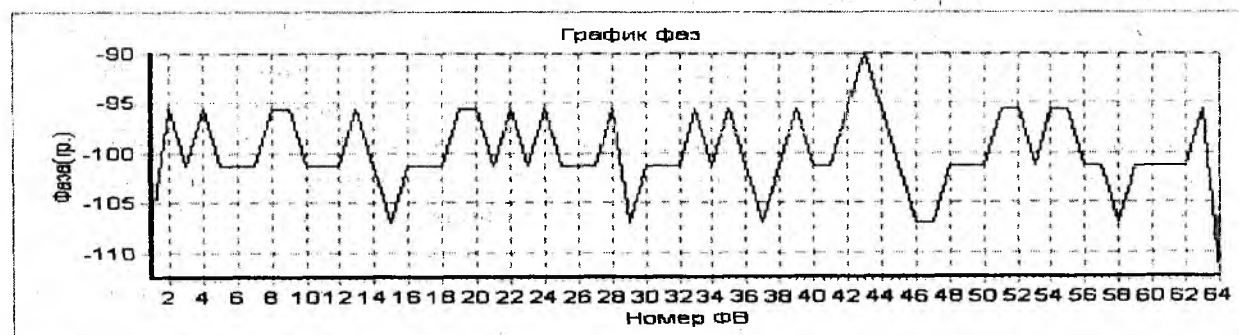
В режиме КАЛИБРОВКА оценивается техническое состояние АФАР в целом (на уровне системы), проводится измерение ККП ППМ, рассчитывается АФР на апертуре на всех рабочих частотах, определяются поправки к АФР и принимается решение о замещении используемых фазовых добавок $\Delta\varphi(m)$, полученных при настройке АФАР на заводе-изготовителе на добавки, рассчитанные по результатам калибровки. Точность настройки АФАР с помощью процедуры калибровки практически ограничивается ошибками отработки заданных поправок элементами ППМ (фазовращателями и аттенюаторами) и взаимной связью излучателей. Примеры реальных фазовых распределений на апертуре до и после проведения калибровки приведены на рисунках 7, а, б.

Определение нормирующих коэффициентов для встроенной системы контроля и калибровки. Определение нормирующих коэффициентов (НК) проводится после настройки антенны на автоматизированном измерительном комплексе ближней зоны. При использовании ввода КС с помощью внешних калибровочных излучателей (ВКИ) необходимо провести измерение комплексных коэффициентов передачи между измерительным зондом стенда и всеми ППМ АФАР (для различных состояний фазовращателей и аттенюаторов ППМ) и аналогичные измерения ККП между ВКИ и каналами ППМ АФАР в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА. Калибровочные сигналы проходят через все соответствующие данному режиму аппаратные компоненты ППМ АФАР и поступают в устройство контроля (УК) АФР, где производится выделение сигнала калибруемого канала из принятого суммарного сигнала и определение ККП для каждого из каналов ППМ в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА.

Определение амплитуды и фазы для каждого состояния фазовращателя и аттенюатора ППМ (при выключенных остальных модулях) проводятся путем последовательного позиционирования измерительного зонда перед каждым излучателем ППМ.



а



б

Рис. 7

Калибровочный фактор C (фазовая поправка) определяется по результатам обработки измеренных данных. Данные измерений величин вносимых фазовых сдвигов при переключении состояний ФВ обрабатываются с использованием метода наименьших квадратов (линейным регрессионным методом, процедурой) для получения наилучшего соответствия следующему уравнению:

$$C = \theta_{изм} - n(\Delta\phi), \quad n = 2^p,$$

где p — число разрядов фазовращателя.

АФАР может калиброваться на всех рабочих частотах или на нескольких частотах (распределенных по диапазону частот) в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА.

Полученные результаты заносятся в таблицу калибровочных поправок. При работе из таблицы поправок выбирается поправка на частоте, наиболее близкой к рабочей [60].

По результатам измерений ККП проводится расчет нормирующих коэффициентов (НК), которые связывают ККП каналов при облучении плоской волной (измерительный зонд — ППМ АФАР) с ККП контролируемого канала при использовании КС от ВКИ (ВКИ — ППМ АФАР). Полученные НК являются калибровочным стандартом (эталонными) для данной АФАР и обеспечивают проведение калибровки для поддержки параметров АФАР на заданном уровне. В процессе эксплуатации должны производиться регулярные калибровки АФАР и, в случае выявления отклонений АФР, в постоянное запоминающее устройство антенны вводятся рассчитанные корректирующие поправки по амплитуде и фазе. Одновременно производятся КТС и диагностирование отказов, а после замены неисправных узлов повторная калибровка АФАР.

Общее управление процессом калибровки и контроля антенны осуществляют устройство контроля АФР (по получению разрешения на проведение калибровки от пульта оператора изделия).

Выдача результатов анализа технического состояния, контроля и калибровки антенны в центральную ЭВМ осуществляется по штатным линиям межприборных связей в промежутки времени, свободные от передачи рабочей информации.

Точность калибровки

Погрешности функционирования устройства калибровки АФР включают в себя:

- погрешность формирования эталонного сигнала;
- погрешность определения ККП ППМ;
- погрешность расчета и ввода добавок (погрешность реализации расчетного ККП ППМ).

К числу основных факторов, ограничивающих точность измерения и калибровки параметров АФАР относятся:

- взаимовлияние излучающих элементов;
- паразитные связи через ППМ в выключенном состоянии;
- погрешности рассогласования в СВЧ трактах АФАР;
- методические погрешности определения ККП ППМ;
- погрешности калибровки ККП ППМ и определения НК в стендовом зале.

Методические погрешности получаемых оценок значений ККП ППМ обусловлены приближениями, принятыми в математических моделях АФАР и функционировании фазовращателей и аттенюаторов. В модели АФАР поле излучения представляется в виде суперпозиции полей излучения приемопередающих модулей АФАР, комплексные коэффициенты передачи которых независимо управляются ФВ в своих каналах и не зависят от состояния соседних излучателей. Предположение о независимости поля излучения калибруемого канала от состояния других каналов является достаточно сильным, а ухудшение характеристик АФАР при широкоугольном сканировании является одним из признаков нарушения признаков нарушения этого требования. Методическая погрешность оценки ККП каналов ППМ связана с принятыми в моделях ФВ и Атт гипотезами о независимости затухания, вносимого фазовращателем, от реализуемого фазового сдвига и постоянном фазовом сдвиге при различных состояниях аттенюатора.

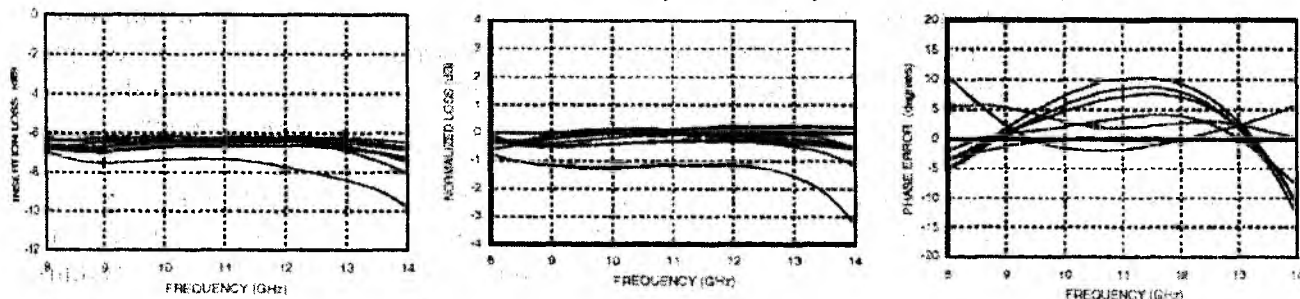


Рис. 8

На рис. 8 приведены примеры зависимостей вносимых потерь и ошибок реализации заданных фазовых сдвигов для чипов GaAs MMIC 6-BIT Digital Phase Shifter, 8 - 12.5 ГГц (hmc642, HMC642LC5) ППМ [17], представленные фирмой Hittite.

Как следует из приведенных технических данных на чипы фазовращателей и аттенюаторов при их использовании в системах управления лучом, при проведении контроля технического состояния и калибровки АФАР может возникнуть необходимость программного учета потерь, вносимых фазовращателями, и фазового сдвига, вносимого аттенюаторами, при переключении их состояний.

Современные автоматизированные измерительные комплексы, использующие прецизионные анализаторы цепей и лазерные интерферометры, обеспечивают высокую точность калибровки АФР с погрешностью порядка 1 градуса по фазе и 0,1 дБ по амплитуде (см. <http://www.nearfield.com>, <http://www.mi-technologies.com>, <http://www.orbitfr.com>).

При проведении настройки АФАР с помощью АИК «БП-УСТ» ОАО «Укрспецтехника» суммарная среднеквадратическая погрешность определения амплитуды для всех ККП ППМ (при любом наборе включенных дискретов фазовращателей или аттенюаторов) не более 0,3 дБ в динамическом диапазоне 0÷20 дБ и не более 0,6 дБ в динамическом диапазоне 20÷40 дБ. Суммарная среднеквадратическая погрешность определения фазового сдвига, вносимого ФВ в ППМ при переключении дискретов не более 2° в динамическом диапазоне 0÷20 дБ.

При использовании АИК «БП-УСТ» ОАО «Укрспецтехника» суммарная среднеквадратическая погрешность расчета фазовых поправок не превышает 2°.

Следует отметить, что суммарная ошибка АФР на апертуре АФАР после калибровки состоит из большого числа составляющих, в которых ошибки ППМ являются доминирующими. При разработке антенн обычно предполагается, что все ошибки носят случайный характер. Однако, как отмечено в литературе, при испытаниях ряда АФАР было выявлено, что отражения от выходов ППМ приводят к периодическому возмущению АФР всей антенны. Такой коррелированный эффект может привести к возникновению боковых лепестков с высоким уровнем. Было также отмечено, что эффективность калибровки в значительной степени зависит от качества согласования между ППМ и приемной диаграммообразующей системой. Отключение питания ППМ в ряде случаев приводит к возрастанию рассогласования, а улучшение согласования достигается путем установки всех аттенюаторов неконтролируемых ППМ в положение максимального затухания.

Для обеспечения заданной точности ВСКК должна проходить периодическую самокалибровку, чтобы точность проведения калибровки не ухудшалась со временем и поддерживалась на высоком уровне.

Заключение

Рассмотренные в статье современные методы измерений, настройки и контроля технического состояния ФАР показали, что настройку и измерение характеристик ФАР целесообразно проводить ближнезонными методами. При проведении настройки АФАР необходимо учитывать ряд специфических факторов связанных с высоким уровнем излучаемой мощности в режиме ПЕРЕДАЧА, особенностями структуры приемо-передающих модулей АФАР, использованием интегральной электроники для построения схемы управления лучом (СУЛ)

и реализацией схем формирования суммарных, разностных, фоновых и компенсационных каналов. В ряде случаев, требуется существенный пересмотр состава измерительного оборудования и методов измерения, проведения адаптации методик выполнения измерений и используемого программного обеспечения для учета особенностей построения конкретных типов испытываемых ФАР.

Обеспечение долговременной работы ФАР с требуемыми качественными показателями может быть достигнуто лишь при наличии в ФАР встроенных систем калибровки и контроля (ВСКК). Использование АИК ближней зоны для настройки ФАР с использованием амплитудного, коммутационного и динамического методов измерений, отработки и определения нормирующих коэффициентов для ВСКК обеспечивает выполнение заданных технических характеристик и возможность контроля технического состояния с автоподстройкой параметров ФАР в процессе эксплуатации.

Список литературы: 1. Усин В.А., Марков В.И., Губарь В.А., Ковальчук В.А., Рожнятовская Л.В., Усина, Филоненко А.Б. Основные тенденции развития ближнезонных методов измерения характеристик антенн. Ч. 1. Методы измерений линейных и апертурных антенн // Радиотехника. 2006. Вып. 146. С. 102-120. 2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Воскресенского Д.И. и Канащенкова А.И. М.: Радиотехника, 2004. 488 с. 3. Вопросы перспективной радиолокации / Под ред. Соколова А.В. М.: Радиотехника, 2003. 512 с. 4. Hollis J.S., Lyon T.J., Clayton J.L. Microwave Antenna Measurements / Atlanta: Scientific Atlanta Inc., 1970. 5. Test Procedures for Antennas. ANSI/IEEE Std 149-1979. 6. Antenna measurement techniques / Gary E. Evans. Boston: Artech House, 1990. 229 p. 7. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеглов К.С. М.: Радио и связь, 1985. 368 с. 8. Усин В.А., Марков В.И., Рожнятовская Л.В. Анализ структуры электромагнитного поля облучающего апертуру ФАР из дальней зоны излучения // 15 Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'05). Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.: Материалы конф.: В 2 т. Т. 1. С. 360-361. 9. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П., Усин В.А., Шифрин Я.С. Л.: Наука, 1985. 272 с. 10. Near-field antenna measurements / Dan Slater. Boston: Artech House, 1991. 310 p. 11. An overview of near-field antenna measurements / Yaghjian A.D. // IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, pp. 30-45, Jan. 1986. 12. Special Issue on Near-Field Scanning Techniques // IEEE Trans. on Ant. and Prop. Vol. AP-36, No. 6, June 1988. 13. Теория и техника антенных измерений / Курочкин А.П. // Антенны. 2009. №7. С. 39-44. 14. ГОСТ 8.309-78 Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве. 15. Phased array antenna handbook / Robert J. Mailloux. 2nd ed. Boston: Artech House, 2005. pp. 515. 16. Modern antenna design / Thomas A. Milligan. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005. pp. 633. 17. Modern antenna handbook / Constantine A. Balanis John Wiley & Sons, Inc., 2008. p. 1700. 18. Phased array antennas: floquet analysis, synthesis, BFNs, and active array systems / Arun K. Bhattacharyya John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. pp. 516. 19. Communication satellite antennas: system architecture, technology, and evaluation / Robert Dybdal. The McGraw-Hill Companies, 2009, p.345. 20. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / Григорьев Л.Н. Радиотехника, 2009. 144 с. 21. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки / Пономарев Л.И., Степаненко В.И. М.: Радиотехника, 2009. 328 с. 22. Антенные системы с электронным управлением лучом для бортовых РЛС / Синани А.И. // Антенны. 2008. №9. С. 4-14. 23. Фазированная антенная решетка для современного истребителя // Белый Ю.И., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф., Алексеев О.С., Баринев Н.Н., Блохин А.Е., Митин В.А., Ястребов Б.П., Старшинова Е.И., Вороженцев А.В. // Антенны. 2008. №9. С. 4-14. 24. Многоканальные приемопередающие модули для АФАР X-диапазона / Белый Ю.И., Синани А.И., Алексеев О.С., Кузьменков В.М., Винярский В.Ф., Бушкин С.С., Королев А.Н., Малыщик В.М., Далингер А.Г. // Антенны. 2008. №9. С. 55-60. 25. Автоматизированная система для контроля и настройки ФАР. / Гузь В.И., Марков В.И., Зайцев А.А., Мартынов В.А., Филоненко А.Б. // Известия вузов. Радиоэлектроника. Киев. Т. 50, №1, январь 2007. С46-51. 26. Применение автоматизированных измерительных комплексов для оценки параметров сложных антенных систем / В.А. Усин, В.И. Марков, В.А., С.В. Помазанов, А.В. Усина // Радиотехника. 2008. Вып. 154. С. 172-178. 27. 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. трудов. Т. 1. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 2. с. 27-30. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. 272 с. 28. Настройка, контроль и калибровка АФАР/ В.А. Усин, В.И. Марков, В.А., С.В. Помазанов, А.В. Усина // Радиотехника. 2009. Вып. 157. С. 86-90. 29. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн. Общее описание / Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. // Антенны. 2008. №6. С. 59-66. 30. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн. Измерительное оборудование/ Ба-

лабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. // Антенны. 2008. №6. С. 67-73. 31. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн. Результаты испытаний / Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. // Антенны. 2008. №6. С. 74-80. 32. Антенный полигон для измерения параметров антенн с электронным управлением лучом / Синани А.И., Симованьян С.В., Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. // Антенны. 2008. №9. С. 75-80. 33. *Markov V. I., Filonenko A. B.* Implementation of phase retrieval techniques for improving the results of phased array antennas near-field measurements, ММЕТ, 2004, pp.177-179. 34. *Markov V. I., Filonenko A. B.* Implementation of phase retrieval techniques for phased-array antennas measurements, АМТА 2004. 35. *Расчетно-экспериментальный метод настройки многоканальных ФАР / Усин В. А., Марков В. И., Филоненко А. Б.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. Т.9, №3-4. С. 94-100. 36. *Комбинированный метод измерения характеристик антенн / Усин В.А., Ковальчук В.А., Марков В.И., Филоненко А.Б.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 5. С. 65-71. 37. *Применение комбинированного метода измерения характеристик антенн / Усин В.А., Ковальчук В.А., Марков В.И., Филоненко А.Б.* // 15 Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'05). Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.: Материалы конф. В 2 т. Т.2. С. 723-725. 38. *Применение пространственно разнесенной многозондовой системы для измерения параметров ФАР / Усин В.А., Марков В.И., Рожнятовская Л.В., Усина А.В.* // 16 Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'06). Севастополь, 11-15 сентября 2006 г.: Материалы конф. В 2 т. Т. 2. С. 821-822. 39. *Шифрин Я.С., Усин В.А.* Статистическая теория антенных измерений // Антенны. 2000. Вып. 1 (44). С.27-62. 40. Формирование перспективного технологического маршрута настройки АС с ЭУЛ / Алексеев О.С. // Антенны. 2008. №9. С. 29-39. 41. *Марков В.И.* Встроенная система контроля ФАР // Вісник Київ. Нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ.: Київський університет, 2006. Вип. 2. С. 94-100. 42. *Коммутационный метод измерения характеристик ФАР/ Бубнов Г.Г., Никулин С.М., Серяков Ю.Н., Фурсов С.А.* М.: Радио и связь, 1988. 120 с. 43. *Near-Field Alignment of Phased-Array Antennas / Patton, W.T., Yorinks, L.H.* // IEEE Trans. on AP, 1999, vol. 47, no. 3, pp. 584-591. 44. *Active Array High-Power Superposition Near-Field Measurement Technique: Results, Analysis, and Practical Considerations. / Couper, P.; Thompson, K.; Davis, R.; Barnes, T.* // Proc. of the AMTA 2000, p. 198, 2000-06-07. 45. *High power superposition for active array transmit pattern measurement. / Hoffman, J.; Galebach, B.L.; Thompson, K.* // Proc. of the AMTA 1995, p. 300. 46. *Built-In Performance Monitoring System For Active Phased-Array Antennas / Markov V.I.* // Proc. of the 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine. pp.483-485. 47. *Built-in performance monitoring system for high power transmitting phased-array antennas. / Markov V.I.* // ММЕТ, 2004, pp.327-329. 48. *Fast Measurement Technique for Phased Array Calibration / Toru Takahashi, Yoshihiko Konishi, Shigeru Makino, Hiroyuki Ohmine and Hiromasa Nakaguro* // IEEE Trans. on Ant. and Prop., Vol. 56, No. 7, July 2008. pp. 1888-1899. 49. *The Design, Development and Testing of the THAAD (Theater High Altitude Area Defense) Solid State Phased Array (formerly Ground Based Radar) / M. Sarcione, J. Mulcahey, D. Schmidt, K. Chang, M. Russell, R. Enzmann, P. Rawlinson, W. Guzak, R. Howard, M. Mitchell* // IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 1996, pp.260-265. 50. *Calibration and Diagnostics of the THAAD Solid State Phased Array in a Planar Nearfield Facility / J.K.Mulcahey, M.G.Sarcione* // IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 1996, pp.322-326. 51. *SAMPSON MFR active phased array antenna / Scott, M.* // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003. 14-17 Oct. 2003 Page(s): 119 – 123. 52. *Calibration aspects of the APAR antenna unit / G.H.C. van Werkhoven, A.K. Golshayan* // IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 2000. pp.425-428. 53. *A Built-In Performance-Monitoring/Fault Isolation and Correction (PM/FIG) System for Active Phased Array Antennas / Lee, K.M., Chu, R.S. and Liu, S.C.* // IEEE Trans. on AP, 1993, vol. 41, no. 11, pp.1530-1540. 54. *A performance monitoring/fault isolation and correction system of a phased array antenna using transmission-line signal injection with phase toggling method / K.M. Lee, R.S. Chu, and S.C. Liu* // IEEE AP-S 1992 Symposium Digest (Chicago, IL), July 18-25, 1992, vol. 1, pp.429-432. IEEE Cat. No.92CH43178-1. 55. *Phased Array Antennas Calibration and Pattern Prediction Using Mutual Coupling Measurements / H.M. Aumann, A.J. Fenn, F.G. Willwerth* // IEEE Trans. AP, v.37, №7 July 1989, pp.844-850. 56. *Mutual Coupling-Based Calibration of Phased Array Antennas / C. Shipley, D. Woods* // IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 2000, pp.529-532. 57. *Large active phased array antenna calibration using MCM / Tie Gao, Yanchang Guo, Jinyuan Wang, Xueli Chen* // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. Volume 2, 8-13 July 2001. P.606 – 609. vol.2. 58. *A Calibration Technique for Active Phased Array Antennas / A. Agrawal, A. Jablon* // IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 2003, pp.223-228. 59. *Digital Beamforming and Calibration for Smart Antennas Using Real-Time FPGA Processing / T.W. Nuteson, J.S. Clark, D.S. Haque, G.S. Mitchell* // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. 2002. pp. 307-310. 60. *AESA diagnostics in operational environments / Hull, W.P.* // Radar Conference, 1989., Proceedings of the 1989 IEEE National 29-30 March 1989 Page(s):107 – 112.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники,
НИИ «Квант»

Поступила в редколлегию 12.01.2010