

НАСТРОЙКА, КОНТРОЛЬ И КАЛИБРОВКА АФАР**Введение**

Современные активные фазированные антенные решетки (АФАР) включают в себя различные электронные компоненты (излучатели, фазовращатели, переключатели, вентили, усилители и т.д.) и специализированные вычислительные устройства. Такие элементы объединяются в приемопередающие модули (ППМ) [1]. Задачи диагностики технического состояния и калибровки ППМ АФАР, т. е. классификации неисправностей ППМ и их элементов, определения реального амплитудно-фазового распределения (АФР) на апертуре и расчет калибровочных поправок, являются приоритетными в процессе разработки, настройки и эксплуатации АФАР.

Постановка задачи

Используемые АФР поля в апертуре АФАР должны обеспечивать уровни боковых лепестков (УБЛ) приёмных диаграмм направленности (ДН) от минус 35 дБ до минус 60 дБ. Технологические допуски на изготовление ППМ, трактов передачи СВЧ сигналов и конструкции АФАР приводят к случайным ошибкам реализации АФР на апертуре и к существенному росту УБЛ. Требуемые технические характеристики (ТХ) АФАР можно обеспечить при настройке и поддерживать в течение срока эксплуатации с помощью встроенной системы контроля и калибровки (ВСКК), не предъявляя жесткие требования к элементам, входящим в ППМ [2].

Цель работы – анализ и решение проблемных вопросов, возникающих при создании ВСКК для контроля технического состояния и оценки интегральных характеристик АФАР, решение задач отслеживания изменения параметров элементов в каналах ППМ и проведения калибровки для коррекции параметров АФАР на уровне системы в процессе эксплуатации.

Основная часть

Виды контроля АФАР. Для обеспечения контроля и диагностики технического состояния АФАР целесообразно использовать три вида контроля:

- тестовый (контроль прохождения кодов на систему управления лучом (СУЛ) и проверка результатов расчета кодов фазовых сдвигов, выдаваемых на фазовращатели);
- низкочастотный (контроль обрывов и коротких замыканий в цепях управления фазовращателями и аттенюаторами);
- определение комплексных коэффициентов передачи каналов (ККПК) для всех рабочих частот.

Для своевременного обнаружения возникающих неисправностей и их устранения или алгоритмической компенсации влияния на характеристики антенны используется процедура калибровки ККПК, которую необходимо проводить как в режиме ПРИЕМ, так и режиме ПЕРЕДАЧА с использованием ВСКК. Необходимое качество настройки и калибровки АФАР обеспечивается комплексным подходом, включающим в себя входной контроль элементов, учет их характеристик при изготовлении и сборке модулей, соответствующими методиками выполнения измерений и программами корректировки систематических ошибок, вносимых ППМ, аппаратурой измерительного стенда и ВСКК.

Решение поставленных задач было обеспечено за счет размещения системы неподвижных зондов (НЗ) вблизи апертуры для ввода контрольного сигнала в ближней зоне излучения АФАР. Такое размещение НЗ дало возможность исключить затенение апертуры АФАР и резко снизить уровень суммарного сигнала за счет несинфазного суммирования сигналов отдельных каналов, а также обеспечить возможность проведения контроля и калибровки в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА. Следует отметить, что в режиме ПЕРЕДАЧА проведение

настройки и измерений параметров АФАР могут иметь свои особенности, обусловленные требованиями безопасности. Так, в ряде случаев нашли применение «метод перемещающегося пятна» и «техника наложения» [3, 4].

Методы получения информации об АФАР. Для настройки, контроля и диагностики АФАР наибольшее распространение получили амплифазометрический и коммутационный методы.

Заводскую настройку целесообразно начинать с проверки технического состояния АФАР: контроль прохождения сигналов управления; тесты каналов управления СУЛ по токам ФВ, индикаторным панелям и обратной связи (запись/чтение управляющих сигналов); выявление технологических дефектов сборки; контроль ККПК по СВЧ сигналу и определение реальных фазовых сдвигов и вносимых потерь при переключении состояний ФВ. Необходимо оценить стабильность работы СУЛ (оценить разброс параметров ФВ при многократных переключениях состояний) и сравнить характеристики ФВ и аттенюаторов, полученные на специализированном стенде при проведении индивидуальной проверки и подборе оптимальных кодовых комбинаций с данными контроля ККПК (в режимах прием/передача).

Первоначальная настройка АФАР проводится с помощью автоматизированного измерительного комплекса ближней зоны. Затем производится измерение комплексных коэффициентов передачи (ККП) между измерительным зондом, каждым из контрольных излучателей (КИ) и излучателями АФАР в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА. Далее проводится расчет нормирующих коэффициентов (НК), которые связывают ККП каналов при облучении плоской волной (измерительный зонд – излучатели АФАР) с ККП контролируемого канала при использовании контрольного излучателя (КИ – излучатели АФАР).

Полученные НК являются калибровочным стандартом (эталонными) для данной АФАР и обеспечивают поддержку требуемых параметров АФАР в процессе эксплуатации [5].

Методические погрешности получаемых оценок значений ККПК обусловлены приближениями, принятыми в математических моделях АФАР и фазовращателя (ФВ). В модели АФАР поле излучения представляется в виде суперпозиции полей излучения каналов АФАР, каждый из которых независимо управляется ФВ своего канала и не зависит от состояния соседних излучателей. Предположение о независимости поля излучения канала от состояния других каналов является достаточно сильным, а ухудшение характеристик АФАР при широкоугольном сканировании является одним из признаков нарушения этого требования.

Методическая погрешность оценки ККПК связана с предположением о независимости вносимого затухания от реализуемого фазового сдвига в модели ФВ. Для повышения точности оценки ККПК необходимо использовать априорную информацию о модуле коэффициента передачи каждого фазовращателя в зависимости от его состояния на всех рабочих частотах. При отсутствии такой априорной информации (хотя бы о среднем по ансамблю изменении модуля коэффициента передачи от состояния фазовращателей данного типа) оценки ККПК ФАР оказываются смещенными.

Методика расчета ККПК АФАР. Для выделения сигнала контролируемого канала и определения вносимых реальных фазовых сдвигов и потерь при переключении дискретов фазовращателя при наличии отказов и зависимости вносимого затухания от реализуемого фазового сдвига разработан алгоритм, который обеспечивает высокую эффективность и точность за счет максимального использования априорной информации, полученной на этапе входного контроля параметров ППМ.

Рассмотрим суть предлагаемого метода. Пусть $\dot{A}_\ell$ – результат измерений (амплитуда и фаза) комплексного коэффициента передачи между излучающим элементом приемопередающих каналов ППМ АФАР и контрольным излучателем, где $|\dot{A}_\ell| = \sqrt{A_{\ell \sin}^2 + A_{\ell \cos}^2}$, $\varphi_\ell = \arctg(A_{\ell \sin}/A_{\ell \cos})$.

Представим $\dot{A}_\ell$ в виде $\dot{A}_\ell = \dot{P}_0 + \dot{p}_0 \dot{q}_\ell$.

где $\dot{P}_0$ – вектор суммарного сигнала всех неконтролируемых каналов (комплексная подставка); $\dot{P}_0 \dot{q}_\ell$ – вектор сигнала контролируемого канала при ℓ -м состоянии ФВ, для которого измеряется $\dot{A}_\ell$; $\ell = \overline{0, L-1}$, L – возможное число состояний ФВ, $L = 2^p$, p – число разрядов ФВ; $\dot{P}_0 = \dot{A}_0 - \dot{P}_0$ – комплексный масштабирующий множитель, согласующий фазу и амплитуду контролируемого ФВ при $\ell=0$ и $q_0=1$; $\dot{q}_\ell$ – значения ККП контролируемого ППМ, $|\dot{q}_\ell| = q_1 \dots q_{N-1}$ – значения модулей вносимых потерь на рабочих частотах при переключении состояний фазовращателя относительно $|\dot{q}_0|=1$ (нулевой дискрет ФВ). Величины $|\dot{q}_\ell|$ известны из протоколов предварительных испытаний (входной контроль ФВ) или из справочных данных фирмы изготовителя [6].

Процесс определения $\dot{q}_\ell^k$ является итерационным, где $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер итерации. Итерационная оценка величины $\hat{P}_0^k$ при наличии ошибок измерений δ_ℓ должна обеспечить минимум отклонений оценок $\hat{A}_\ell^k$ от реальных значений $\dot{A}_\ell$ для всех состояний фазовращателя в которых измеряется $\dot{A}_\ell$:

$$\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell - \dot{P}_0 (1 - \dot{q}_\ell) = \delta_\ell, \quad \sum_{\ell=0}^{L-1} |\delta_\ell|^2 = \sum_{\ell=0}^{L-1} |\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell - \dot{P}_0 (1 - \dot{q}_\ell)|^2 \rightarrow \min.$$

Итерационный процесс начинается с расчета $\dot{q}_\ell^0 = |\dot{q}_\ell| e^{j\varphi_\ell^0}$. Для выбора начального приближения можно использовать $\varphi_\ell^0 = \frac{2\pi\ell}{L}$ (начальное приближение реализации заданных фазовых сдвигов), затем расчет ведется по формулам:

$$\hat{P}_0^{k+1} = \frac{\sum_{\ell=0}^{L-1} (\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell^k) (1 - \dot{q}_\ell^k)^*}{\sum_{\ell=0}^{L-1} |1 - \dot{q}_\ell^k|^2},$$

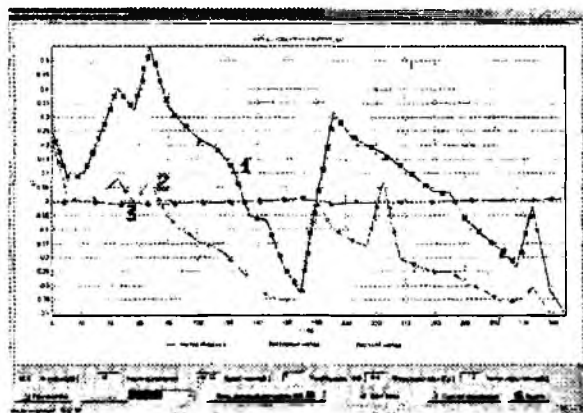
$$e^{j\varphi_\ell^{k+1}} = \frac{\dot{A}_\ell - \hat{P}_0^{k+1}}{(\dot{A}_0 - \hat{P}_0^{k+1}) |\dot{q}_\ell|}, \quad \dot{q}_\ell^k = |\dot{q}_\ell| e^{j\varphi_\ell^k}.$$

Итерационный процесс заканчивается при выполнении условия

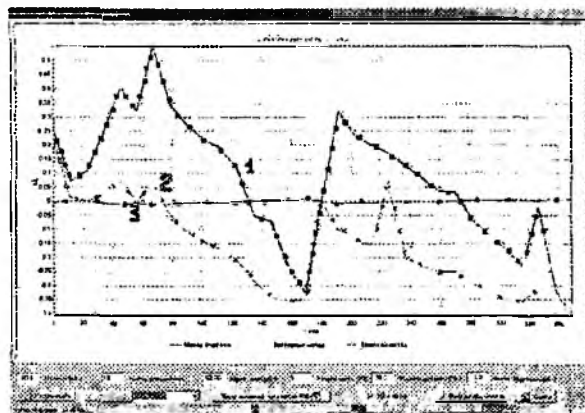
$$|\hat{P}_0^{k+1} - \hat{P}_0^k| \leq \varepsilon, \quad (\varepsilon \approx 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-13}).$$

Результаты моделирования. Результаты моделирования и экспериментальной проверки предложенного алгоритма для контроля, диагностики технического состояния и калибровки ФАР показали, что учет априорной информации, полученной при входном контроле фазовращателей, позволяет существенно повысить точность калибровки и получить несмещенные оценки ККПК.

На рисунке приведены полученные тремя методами оценки модуля (a) и фазы ККП (b) пятиразрядного ФВ с погрешностью установки заданного фазового сдвига $\pm 5^\circ$ и изменением вносимых потерь ± 1 дБ при переключении дискретов [6]. Кривые 1 получены при обработке измеренных данных в соответствии с методикой, изложенной в [7], кривые 2 – по методу, предложенному в [8], кривые 3 – по алгоритму, учитывающему априорную информацию, рассмотренному в данной работе.



а



б

Выводы

При разработке ВСКК были решены следующие задачи:

- выбрано место размещения источников контрольного сигнала, обеспечивающих эффективное выделение сигнала контролируемого канала из суммарного сигнала на выходе АФАР при работе в режимах ПРИЕМ и ПЕРЕДАЧА;
- решена задача определения реальных ККПК при изменении величины вносимых потерь, наличия ошибок отработки заданных фазовых сдвигов, полных и частичных отказов фазовращателей (ФВ) в процессе переключения дискретов;
- обеспечена калибровка ККПК АФАР при облучении апертуры неплоской волной;
- получены оценки интегральных параметров АФАР с учетом взаимного влияния излучающих их элементов.

Следует отметить, что проблемы, возникающие при диагностике технического состояния, измерении параметров, настройке, калибровке и поддержании технических параметров АФАР в заданных пределах, могут быть решены только при реализации ВСКК, которая во многом определяется технологическими особенностями контролируемой АФАР.

Список литературы: 1. *Активные фазированные антенные решетки* / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004, 488 с. 2. *Markov V.I. Built-In Performance Monitoring System For Active Phased-Array Antennas* // Proc. of the 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine. P. 483-485. 3. *Couper P.; Thompson K.; Davis R.; Barnes T. Active Array High-Power Superposition Near-Field Measurement Technique: Results, Analysis, and Practical Considerations.* // Proc. of the AMTA 2000, p. 198, 2000-06-07. 4. *Hoffman J.; Galebach B.L.; Thompson K. High power superposition for active array transmit pattern measurement* // Proc. of the AMTA 1995. p. 300, 1995-09-02. 5. Марков В.И. Встроенная система контроля АФАР // Вісник Київ. Нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ: Київ. ун-тет, 2006. Вип. 2 С.94-100. 6. <http://www.hitite.com/products/view.html/view/HMC643LC5>. 7. *Коммутационный метод измерения характеристик ФАР* / Г.Г.Бубнов, С.М. Никулин, Ю.Н. Серяков, С.А. Фурсов. М.: Радио и связь, 1988. 120с. 8. *Markov V. I., Kozlov A.F. 2003-16-06 - A03-063. Built-In Performance Monitoring Systems for Phased-Array Antennas with Binary Phase Shifters.* AMTA 2003. P. 560-565.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники,
Харьковский государственный
университет питания и торговли,
ОАО Холдинговая компания «Укрспецтехника»

Поступила в редколлегию 13.04.2009