

УДК 621.396.677.494

Н.И. Свитенко<sup>1</sup>, Г.А. Головин<sup>2</sup><sup>1</sup>Научно-метрологический центр (военных эталонов), Харьков; <sup>2</sup>в/ч А-4489 «Б»

## МЕТОД И АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ И АДАПТАЦИИ ФАР К ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ И ВЛИЯНИЮ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

*Приведен план организации измерительных экспериментов в ближней зоне исследуемой антенны, позволяющий реализовать ее настройку с учетом взаимной связи излучателей. Показана возможность использования результатов настройки для адаптации ФАР к техническому состоянию и влиянию взаимной связи излучателей в процессе эксплуатации антенны.*

*алгоритм настройки, адаптация ФАР, взаимная связь, излучатели, диаграмма направленности, антенна*

### Введение

**Постановка задачи и анализ литературы.** Адаптация ФАР к техническому состоянию и ее настройка предполагают измерение ошибок, вносимых неисправными элементами СВЧ тракта в амплитудное и фазовое распределения (АФР), и расчет кодов корректирующих коэффициентов, компенсирующих эти ошибки [1]. Для максимально возможного сближения реализуемого и желаемого АФР в решетке, полученного в процессе синтеза антенны, необходимо к кодам желаемого АФР добавить (с обратным знаком) коды начального АФР в решетке, формируемые распределительной системой (РС) и начальным АФР фазовращателей (ФВ) [2], и коды корректирующих коэффициентов, найденные при диагностике. Ввиду того, что ошибки фазирования (дефекты АФР), вызванные неисправностями СВЧ трактов, как правило, в процессе сканирования луча антенны не меняются, то корректирующие коэффициенты останутся неизменными для всех направлений фазирования антенны. Это позволяет по одному измерительному эксперименту определить коэффициенты коррекции, сближающие желаемое и реализуемое АФР и диаграммы направленности (ДН) для всех углов сканирования луча. В качестве алгоритмов диагностики ФАР могут быть использованы алгоритмы, предложенные в [3, 4].

В решетках с существенной взаимной связью излучателей (ВСИ) такой метод не дает желаемого результата. Причина в том, что при наличии ВСИ начальное АФР становится различным для каждого угла фазирования антенны [5]. Обусловлено это тем, что амплитуда и фаза отраженной от излучателя волны, возбуждающей решетку (режим передачи), зависит от направления фазирования антенны [5, 6]. Это означает, что в таких решетках задача максимально возможного сближения желаемого и реализуемого АФР в процессе настройки и адаптации к техническому состоянию должна состоять из двух частей:

- измерения и компенсации дефектов АФР,

вносимых неисправными элементами СВЧ трактов питания излучателей;

– измерения и компенсации дефектов АФР, вносимых ВСИ для каждого из направлений фазирования и на каждой из рабочих частот.

**Целью статьи** является разработка метода и алгоритма настройки и адаптации ФАР к техническому состоянию, учитывающего дефекты АФР, вносимые не только неисправными элементами СВЧ трактов, но и ВСИ.

Новым в предлагаемом методе является то, что настройка антенны производится для всех углов сканирования луча, а измерительный эксперимент реализуется при неподвижных ФАР и измерительном зонде (ИЗ), расположенного в ее ближней зоне.

### Результаты исследований

Рассмотрим реализацию метода настройки и адаптации применительно к линейной эквидистантной ФАР, размещенной в безэховой камере. Приемный ИЗ расположен в ближней зоне ФАР на направлении нормали к ее апертуре. В качестве зондирующего сигнала (ЗС) используется непрерывное гармоническое колебание, излучаемое на одной из рабочих частот ФАР. Выход приемного ИЗ подключен к амплифазометру (АФМ). На вход опорного сигнала АФМ подается ЗС. АФМ определяет отношение комплексных амплитуд ЗС с выхода ИЗ и опорного входа.

Пусть структурная схема ФАР состоит из стандартного набора каскадно соединенных блоков: генератора ЗС, распределительной системы (РС), блока фазовращателей (ФВ) и излучающей системы (ИС) [6]. Отклик ИЗ на излучение ФАР представим в виде [3, 6]

$$Y = \sum_i y_i \rho_i, \quad i \in 0, N-1, \quad (1)$$

где  $i, N$  – номера и число излучателей исследуемой ФАР;

$$y_i = x K_i \Phi_i [1 - \Gamma_i] F_i, \quad (2)$$

где  $x$  – комплексная амплитуда ЗС;  $K_i$  – коэффициент передачи (КП) РС;  $\Gamma_i$  – коэффициент отражения (КО) от входа  $i$ -го излучателя;

$$\rho_i = \frac{\sqrt{G_3}}{2\eta\Gamma_i} g_3(-\theta_i) \exp[j\eta\Gamma_i] - \quad (3)$$

КП от входа  $i$ -го излучателя ФАР до выхода ИЗ [3];

$$F_i = \sqrt{G_i} g_i(\theta_i) - \quad (4)$$

ДН  $i$ -го излучателя;  $G_i$ , где  $g_i(\theta_i)$  – коэффициент усиления и нормированная ДН  $i$ -го излучателя, соответственно;  $\eta = 2\pi\lambda^{-1}$  – волновое число;  $\Gamma_i$  – расстояние от фазового центра  $i$ -го излучателя до фазового центра ИЗ;  $\theta_i$  – угол между нормалью к апертуре ФАР в центре  $i$ -го излучателя и направлением на ИЗ.

Направления фазирования антенны представим в виде массива дискретных направлений (направлений программного обзора, например)  $\theta_s = s\Delta\theta$ ;  $s \in 0, S-1$ , где  $s, S$  – номера и число направлений фазирования;  $\Delta\theta$  – минимальный угол переброса луча.

КП фазовращателей при перебросе луча в направлении  $\theta_s$  станут равными  $\Phi_i = \Phi_i(\theta_s)$ . КО, зависящие от направления фазирования антенны [5, 6], приобретают вид

$$\Gamma_i = \Gamma_i(\theta_s) = \left( \sum_k K_k \Phi_k(\theta_s) C_{ik} \right) \cdot (K_i \Phi_i(\theta_s))^{-1}, \quad (5)$$

где  $C_{ik}$  – коэффициенты матрицы рассеяния излучающей системы (ИС), зависящие от степени связи между излучателями ФАР.

Численные значения ДН излучателей и зонда, из-за неподвижности ФАР и зонда, остаются неизменными, зависящими только от углов  $\theta_i$

$$F_i(\theta_i) = \sqrt{G_i} g_i(\theta_i). \quad (6)$$

Неизменными в измерительном эксперименте остаются также значения  $\rho_i = \rho_i(\theta_i)$ .

Учитывая (5) и (6), отклик ИЗ на излучение ФАР представим в виде

$$Y(\theta_s) = x \sum_i K_i \Phi_i(\theta_s) [1 - \Gamma_i(\theta_s)] F_i(\theta_i) \rho_i(\theta_i). \quad (7)$$

Для реконструкции АФР в ФАР необходимо выделить из (4) вклад каждого канала в суммарное поле излучения. Это можно реализовать методом дискретного преобразования Уолша (ДПУ), предложенным в [4]. Кратко суть его состоит в следующем:

- последовательно во времени, для фиксированного  $\theta_s$ , производится  $N$  излучений ФАР, соответствующих  $N$  реализациям составляющих полного ряда прямого преобразования Уолша

$$Y_r(\theta_s) = \sum_i y_i(\theta_s) w_{ri} \rho_i(\theta_i), \quad r \in 0, N-1, \quad (8)$$

где  $w_{ri}$  – функции Уолша (принимаяющие только два значения (+1) или (-1), упорядоченные по Адамару или Пэли [2, 8]; реализуются они ФВ решетки,

сдвигающими фазу ЗС на  $0^\circ$  (+1) или  $180^\circ$  (-1);

– на выходе АФМ запоминаются  $N$  комплексных амплитуд ЗС, соответствующих прямому ДПУ

$$Y_r^\circ(\theta_s) = \sum_i y_i^\circ(\theta_s) \rho_i(\theta_i) w_{ri}, \quad (9)$$

где  $Y_r^\circ(\theta_s) = Y_r(\theta_s) x^{-1}$ ;  $y_i^\circ(\theta_s) = y_i(\theta_s) x^{-1}$  – комплексные амплитуды ЗС, нормированные в АФМ к опорному сигналу;

– спецпроцессором реализуется процедура обратного ДПУ и запоминаются  $N$  оценок произведений

$$z_i(\theta_s) = \sum_r Y_r^\circ(\theta_s) w_{ri} = y_i^\circ(\theta_s) \rho_i(\theta_i). \quad (10)$$

Для получения «чистых» оценок  $\hat{y}_i^\circ(\theta_s)$ , соответствующих полю излучения  $i$ -го канала при ориентации луча ФАР в направлении  $\theta_s$  дальней зоны, необходимо  $z_i(\theta_s)$  разделить на известные КП  $\rho_i(\theta_i)$  от входов излучателей до выхода ИЗ [4]

$$y_i^\circ(\theta_s) = z_i(\theta_s) [\rho_i(\theta_i)]^{-1}. \quad (11)$$

Полученные таким образом оценки парциальных излучений используются для определения АФР полей в апертуре

$$\tilde{a}_i(\theta_s) = \frac{y_i^\circ(\theta_s)}{y_0^\circ(\theta_s)} = \frac{K_i \Phi_i(\theta_s) [1 - \Gamma_i(\theta_s)] F_i(\theta_i)}{K_0 \Phi_0(\theta_s) [1 - \Gamma_0(\theta_s)] F_0(\theta_i)}, \quad (12)$$

где  $\hat{y}_0^\circ(\theta_s)$  – излучение из канала, выбранного опорным; в данном случае опорным выбран канал с номером  $i = 0$ .

Истинные значения АФР от восстановленных из (12) отличаются тем, что в этом соотношении вместо  $F_i(\theta_i)$  надо подставить  $F_i(\theta_s)$ . Численные значения  $F_i(\theta)$  могут быть получены методами, описанными в [3, 5, 6]. Учитывая это, можно записать, что

$$a_i(\theta_s) = \frac{\hat{y}_i^\circ(\theta_s) F_i(\theta_s) F_0(\theta_i)}{\hat{y}_0^\circ(\theta_s) F_i(\theta_i) F_0(\theta_s)} = \frac{K_i \Phi_i(\theta_s) [1 - \Gamma_i(\theta_s)] F_i(\theta_s)}{K_0 \Phi_0(\theta_s) [1 - \Gamma_0(\theta_s)] F_0(\theta_s)}. \quad (13)$$

Рассчитанные, используя (13), отсчеты АФР  $a_i(\theta_s)$  позволяют:

– оценить поправки, необходимые для максимального сближения реализуемого и желаемого АФР

$$\beta_i(\theta_s) = \frac{a_i(\theta_s)}{a_i^\circ(\theta_s)}, \quad (14)$$

где  $a_i^\circ(\theta_s)$  – желаемое АФР в решетке, полученное в результате синтеза исследуемой антенны;

– осуществить коррекцию АФР к дефектам, вносимым РС ( $K_i$ ), ФВ ( $\Phi_i(\theta_s)$ ), ВСИ ( $1 - \Gamma_i(\theta_s)$ ), отличиями ДН отдельных излучателей ( $F_i(\theta_s)$ ) путем умножения  $y_i(\theta_s)$  на  $[\beta_i(\theta_s)]^{-1}$ , реализуемое соот-

вствующим изменением КП ФВ  $\Phi_i(\theta_s)$  и управляемых аттенуаторов, если они имеются в составе СВЧ трактов ФАР;

– завершить процесс настройки и адаптации ФАР к техническому состоянию измерением скорректированного АФР

$$\hat{a}_i(\theta_s) = \hat{y}_i^c(\theta_s) / \hat{y}_0^c(\theta_s) \cdot [\beta_i(\theta_s)]^{-1} / [\beta_0(\theta_s)]^{-1}, \quad (15)$$

и реконструкцией отсчетов ДН ФАР после коррекции АФР

$$F_k(\theta_s) = \sum_i \hat{a}_i(\theta_s) \exp[ji\psi_m(\theta_s)], \quad (16)$$

где  $\psi_m(\theta_s) = \frac{2\pi}{\lambda} d(\sin \theta_m - \sin \theta_s)$ ;  $\theta_m = m\delta$ ;

$m \in 0, M-1$ ;  $M$  – число отсчетов, необходимое для реконструкции ДН.

Наличие  $F_k(\theta_s)$  позволяет рассчитать параметры реализуемой после коррекции АФР ДН решетки и оценить эффективность настройки и адаптации по критерию достижения допустимой разности между желаемым и реализуемым параметром ДН.

Если цель настройки достигнута, поправки  $\beta_i(\theta_s)$  заносятся в NS таблицу для каждой из рабочих частот. Эти таблицы в процессе эксплуатации используются для учета влияния ВСИ и других факторов, искажающих АФР, на форму и параметры ДН.

Практическая ценность предлагаемого метода настройки ФАР состоит в том, что:

– измерительный эксперимент настройки ФАР по критерию соответствия параметров ДН желаемым в дальней зоне, реализуется в ближней зоне, что позволяет размещать измерительный комплекс в безэховой камере;

– полученные в результате экспериментов настройки таблицы корректирующих коэффициентов позволяют в процессе эксплуатации антенны осу-

ществлять ее адаптацию к техническому состоянию и влиянию ВСИ наиболее «быстрым» табличным способом.

## Выводы

1. Разработан метод и алгоритм настройки и адаптации к техническому состоянию, позволяющий компенсировать дефекты АФР, возникающие вследствие взаимной связи излучателей антенны и неисправностями СВЧ трактов их питания;

2. Показана возможность использования результатов настройки в процессе эксплуатации антенны.

## Список литературы

1. Адаптация управления ФАР по результатам встроенного контроля / Ю.А. Шишов, А.М. Голик и др. // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1990. – № 9. – С. 69-89.
2. Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
3. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР / Г.Г. Бубнов и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.
4. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
5. Шифрин Я.С., Лиетинь У.Р., Головин Г.А. Экспериментальная оценка и использование матрицы взаимных связей излучателей в ФАР // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 7. – С. 3-10.
6. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ / Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.

Поступила в редакцию 2.08.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.