

## **МЕТОД И АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ФАР К ИСКАЖЕНИЯМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТЬЮ СВЧ ТРАКТОВ И ВСИ**

У.Р. Лиепинь<sup>1</sup>, С.Д. Недзельский<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил,

<sup>2</sup>Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков)

*Предложен метод адаптации систем управления лучом (СУЛ) стационарных передающих фазированных антенных решеток (ФАР) к искажениям амплитудно-фазового распределения (АФР), вносимым СВЧ трактами и взаимной связью излучателей (ВСИ), реализуемый решеткой измерительных зондов (РИЗ), расположенной в ближней зоне ФАР. Приведен алгоритм адаптации, позволяющий корректировать АФР перед каждым новым излучением.*

*система управления лучом, фазированная антенная решетка, амплитудно-фазовое распределение, взаимная связь излучателей, решетка измерительных зондов*

**Введение.** Стремление увеличить точность радиолокационной информации приводит к необходимости увеличения точности сложения мощностей СВЧ сигналов передающими ФАР. Эффективное сложение сигналов в процессе сканирования луча ФАР осуществимо только в условиях предельно возможного сближения реализуемого и желаемого (требуемого) амплитудно-фазовых распределений (АФР).<sup>\*)</sup> До недавнего времени основными факторами, вызывающими дестабилизацию АФР в передающей ФАР, считались: неодинаковые изменения амплитуд и фаз сигналов в каналах усиления зондирующего сигнала (ЗС), вызванные изменениями температуры окружающей среды и частоты излучения [1, 2]. С этими явлениями в последнее время успешно справляются системы адаптации, включающие микропроцессоры и датчики температуры и частоты, устанавливаемые в трактах и на апертуре ФАР. По данным [3], ошибки фазирования активных ФАР (АФАР), вызванные изменением температуры в СВЧ трактах, такими устройствами адаптации могут быть снижены до единиц градусов по фазе и единиц процентов по амплитуде.

---

<sup>\*)</sup> Под желаемым будем понимать АФР, полученное по результатам синтеза ФАР. В реальной ФАР

В связи с этим в современных передающих ФАР на первый план выдвигаются ошибки управления излучением, вносимые фазовращателями (ФВ), управляемыми аттенюаторами (УА) и взаимной связью излучателей (ВСИ) в решетке.

**Анализ публикаций.** Задача контроля фазового распределения (ФР) в решетке перед каждым новым излучением решается методами встроенного низкочастотного (НЧ) контроля, описанного в [2]. Этим контролем проверяются: целостность цепей управления ФВ, УА, правильность цифровых кодов, формируемых СУЛ. Недостатком этих методов является то, что вне их контроля оказываются СВЧ устройства: ФВ, УА и излучатели, непосредственно превращающие команды управления АФР в реализованное АФР.

Методы автоматического фазирования антенны, обеспечивающие заданное ФР ЗС на входе излучателей, описаны в [1]. Недостатком их является то, что вне контроля оказываются искажения АФР, вносимые ВСИ и отличием ДН излучателей в составе решетки.

**Целью статьи** является разработка алгоритма обработки измерительной информации, полученной РИЗ, позволяющего в реальном масштабе времени оценивать действительно реализованное в передающей ФАР АФР после излучения каждого зондирующего импульса.

**Постановка задачи.** Задача адаптации управления излучением ФАР (управления ее АФР) может быть условно разделена на 3 этапа: измерение действительно реализованного АФР в решетке; вычисление разности между реализованным и желаемым АФР, а также расчет и реализация требуемых поправок, сближающих эти два АФР.

В статье задачу адаптации управления ФАР будем решать применительно к линейной эквидистантной антенной решетке. В качестве инструмента измерения действительно реализованного в решетке АФР предлагается использовать решетку измерительных зондов (РИЗ), применяемую в процессе диагностики для измерения коэффициентов матрицы ВСИ. Метод и алгоритм расчета такой задачи при помощи РИЗ описан в [4]. Естественно возложить на ту же РИЗ задачу контроля реализуемого в антенне АФР. Для пояснения возможности перевода алгоритма функционирования РИЗ от решения задачи определения матрицы ВСИ к оценке АФР при каждом зондировании пространства обзора вкратце опишем процедуры решения предыдущей задачи.

Если в исследуемой ФАР и РИЗ имеется  $N$  каналов<sup>\*)</sup>, то можно составить  $N$  уравнений зависимости комплексной амплитуды (КА) смеси прямого зондирующего сигнала и смеси эхо-сигналов (ЭС) от состояния СВЧ трактов ФАР в виде

$$X_n(t) = \sum_i \sum_k U_k \varphi_k(t) \rho_{in} C_{ik} + n_n, \quad i, k \in 0, N-1, \quad (1)$$

где  $X_n(t)$  – КА смеси прямого ЗС и ЭС в  $n$ -м зонде в момент времени, когда ФВ ФАР формируют коэффициенты передач  $\varphi_k(t)$ ;

$$U_k = U_0 + \Delta U_k;$$

$U_0$  – КА нормированного напряжения в падающей на ФВ излучателя ФАР волне (волна, возбуждающая ФАР);  $\Delta U_k$  – неизвестные КА смеси ЭС, порожденных излучением  $k$ -го канала, пересчитанные к входу ФВ  $k$ -го канала;

$$\varphi_k(t) = \exp[j\psi_k(t)]; \quad \psi_k(t) = \psi_k^{\circ}(t) + \xi_k(t), \quad (2)$$

$\varphi_k(t)$  – коэффициент передачи ФВ  $k$ -го канала;  $\psi_k^{\circ}(t)$  – желаемое фазовое распределение (ФР), рассчитываемое СУЛ для фазирования в момент времени  $t$ ;  $\xi_k(t)$  – погрешности, вносимые ФВ вследствие их неидентичности;  $\rho_{in}$  – коэффициент передачи (по пространству) от  $i$ -го излучателя до  $n$ -го зонда;

$$\rho_{in} = \frac{\sqrt{K_{zn}}}{2\eta b_{in}} \exp(j\eta b_{in}) G_i(\vec{b}_{in}) G_{zn}(-\vec{b}_{in}); \quad (3)$$

$K_z$  – коэффициент усиления (КУ) зонда;  $\eta = 2\pi\lambda^{-1}$ ;  $\lambda$  – длина волны ЗС;  $\vec{b}_{in} = \vec{r}_i - \vec{r}_{zn}$ ;  $\vec{r}_i$  – вектор, направленный от центра апертуры ФАР до фазового центра  $i$ -го излучателя;  $\vec{r}_{zn}$  – вектор, направленный от центра апертуры ФАР до фазового центра  $n$ -го зонда;  $G_i(\vec{b}_{in})$  – диаграмма направленности  $i$ -го излучателя ФАР, измеренная как ДН ФАР при возбуждении только  $i$ -го излучателя и подключении остальных к согласованным нагрузкам [4 – 6], далее именуемая как ДН излучателя (ДНИ) в составе решетки;  $G_{zn}(-\vec{b}_{in})$  – ДНИ  $n$ -го зонда в составе РИЗ;  $C_{ik}$  – коэффициенты матрицы ВСИ в ФАР;  $n_n$  – КА шума в  $n$ -м зонде.

После калибровки РИЗ и устранения в ней ВСИ, допустимо считать, что  $K_{zn} = K_z$ ;  $G_{zn}(-\vec{b}_{in}) = G_z(-\vec{b}_{in})$ .

<sup>\*)</sup> Под каналом ФАР здесь и далее будем иметь в виду совокупность излучателя и элементов СВЧ тракта от выхода генератора до выхода излучателя.

Суть процедур оценки коэффициентов матрицы ВСИ заключается в следующем. Последовательно во времени при помощи ФВ СУЛ ФАР на ее апертуре реализуется  $N$  фазирований вида  $\varphi_{kr} = w_{kr}$ , где  $w_{kr}$  – функции Уолша. Последовательно во времени в каждом зонде получим вектор отсчетов

$$X_{nr} = \sum_i \sum_k U_k w_{kr} \rho_{in} C_{ik} + n_{nr} . \quad (4)$$

Применив к (4) процедуру обратного ДПУ можно найти оценки откликов в каждом из зондов на ЗС и ЭС, формируемых каждым излучателем ФАР

$$y_{nk} = N^{-1} \sum_r X_{nr} w_{kr} = U_k \sum_i \rho_{in} C_{ik} + n_{nk} . \quad (5)$$

В [4] показано, что решением (5) является:

$$C_{ik} = C_{kk} \frac{H_{ik}}{H_{kk}} ; \quad C_{kk} = C_{ii} \frac{H_{kk} H_{ki}}{H_{ii} H_{ik}} , \quad (6)$$

где  $H = \text{ур}^{-1}$ .

Система (6) имеет решение, если известны  $C_{kk}$  или хотя бы одно из их значений, полученное устройствами встроенного контроля СВЧ трактов ( $C_{kk}$  – коэффициент прохождения ЗС на вход  $k$ -го излучателя в клеммной плоскости). Далее, если известны  $C_{ik}$ ,  $C_{kk}$ , не составляет труда найти  $U_k = H_{ik}/C_{ik}$  или  $U_k = H_{kk}/C_{kk}$ . Имея достоверные оценки коэффициентов матрицы ВСИ в ФАР  $C_{ik}$  и КА смеси прямого ЗС и ЭС  $U_k$ , попадающих в тракт приемного зонда, можно организовать контроль АФР ФАР при каждом ее излучении.

**Основная часть.** В [4] при реализации процедур оценивания  $C_{ik}$  сделано два допущения:  $U_k$  в процессе измерений не меняется и  $\varphi_{kr} = w_{kr}$ .

Первое условие  $U_k(t) = U_k$  справедливо в ситуациях, когда в процессе измерений метеоусловия не меняются. Ввиду того, что самой «медленной» процедурой в (4) является переброс фазы на  $180^\circ$ , можно считать, что время реализации измерений  $N$  значений  $X_{nr}$  не превышает  $T_u \leq N\tau_\varphi$ , где  $\tau_\varphi$  – время переброса ФВ в другое состояние. Учитывая, что для ферритовых ФВ [7]  $\tau_\varphi \leq 100 \cdot 10^{-6}$  с,  $T_u \approx 10^{-4}$  Нс. Даже при  $N = 10^3$ ,  $T_u \leq 0,1$  с. Так что это допущение можно считать вполне оправданным практически в любую погоду.

Другое допущение связано с наличием или отсутствием информации об АФР при обнулении сигналов управления ФВ. В [4] считается, что  $\varphi_{kr} = \varphi_{k0} w_{kr} = w_{kr}$ , т.е., что  $\varphi_{k0} = \exp(j\psi_{k0}) = 1$ , где  $\psi_{k0}$  – фазовый сдвиг, вносимый ФВ  $k$ -го канала при обнуленном управлении (исходное состояние ФВ, его электрическая длина). В этой статье будем считать, что  $U_k(t) = U_k$ , а  $\varphi_{km} = \varphi_{k0} \Delta\varphi_{km}$ , где  $\varphi_{k0} \neq 1$ ;  $\Delta\varphi_{km}$  – коэффициент передачи ФВ  $k$ -го канала при переводе его в  $m$ -ое состояние;  $m \in 0, M-1$ ;  $M = 2^g$ ;  $g$  – разрядность ФВ.

С учетом сделанных выше замечаний КА смеси прямого ЗС и ЭС в  $n$ -м канале РИЗ представим в виде

$$X_{nm} = \sum_i \sum_k \rho_{in} C_{ik} U_k \varphi_{km} + n_m, \quad i, k, n \in 0, N-1, \quad (7)$$

где  $n_m$  – КА шума в РИЗ при переводе ФВ ФАР в  $m$ -ое состояние; остальные множители (7) пояснены после (1) и (2).

Объединим множители, величина которых известна и не зависит от состояния ФВ ФАР. Обозначим

$$B_{kn} = \sum_i C_{ik} \rho_{in}. \quad (8)$$

Тогда из (6) получим

$$X_{nm} = \sum_k B_{kn} U_k \varphi_{km} + n_m. \quad (9)$$

В векторно-матричной форме это соотношение имеет вид

$$\mathbf{X} = \mathbf{B} \text{diag} \mathbf{U} \varphi + \mathbf{n}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{X}$  –  $N \times M$  матрица  $X_{nm}$ ;  $\mathbf{B}$  –  $N \times N$  матрица  $B_{kn}$ ;  $\text{diag} \mathbf{U}$  –  $N \times N$  матрица с известными из предыдущего эксперимента диагональными элементами  $U_k$ ;  $\varphi$  –  $N \times M$  матрица  $\varphi_{km}$ .

Обозначим произведение  $B_{kn} U_k = V_{kn}$  и преобразуем (10) к виду

$$\mathbf{X} = \mathbf{V} \varphi + \mathbf{n}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{V}$  –  $N \times N$  матрица  $V_{kn}$  с известными коэффициентами.

Из (11) получим, что

$$\mathbf{V}^{-1} \mathbf{X} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{V} \varphi + \mathbf{V}^{-1} \mathbf{n}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что, если за оценку  $\varphi$  принять  $\mathbf{V}^{-1} \mathbf{X}$ , и учесть, что  $\mathbf{V}^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица, то

$$\hat{\varphi} = \varphi + \mathbf{V}^{-1} \mathbf{n}. \quad (13)$$

Матрица  $\mathbf{V}$  составлена из коэффициентов  $B_{kn} = \sum_i C_{ik} \rho_{in}$ , не зависящих от фазирований ФАР и метеоусловий на месте измерений. Вектор

$U$ , из которого формируется  $\text{diag}U$  зависит от метеоусловий. Однако если между ФАР и РИЗ нет участков земли с кустарниками и высокой травой,  $U_k$  можно считать постоянными величинами в пределах времени измерения АФР. Для учета влияния обратной матрицы  $V^{-1}$  на уровень, «зашумленности» получаемых из (13) оценок  $\varphi_{km}$ , необходимо иметь априорные сведения о свойствах матриц  $C$ ,  $\rho$ ,  $n$  и их статистических характеристиках. Эта задача выходит за рамки данной статьи и должна решаться отдельно.

Ценность полученной матрицы оценок  $\varphi = \{\varphi_{km}\}$  в том, что она дает информацию о реализуемых коэффициентах передачи ФВ всех каналов при любом фазировании и на любой из рабочих частот. Изменяется при сканировании луча ФАР и при изменении рабочей частоты только номера  $m$  состояний ФВ в каналах. Покажем процесс адаптации на примере линейной эквидистантной ФАР. Из [4, 5] следует, что ДН ФАР в режиме передачи описывается соотношением

$$f_j(\theta) = U_0 \sum_i \sum_k C_{ik} \varphi_{km(j)} G_k(\theta), \quad i, k \in 0, N-1; \quad m \in 0, M-1, \quad (14)$$

где  $j$  – номер зондирования пространства при фазировании антенны в направлении  $\theta$ ;  $\varphi_{km(j)}$  – коэффициент передачи ФВ  $k$ -го канала, находящегося в  $m$ -м состоянии при  $j$ -м зондировании в направлении  $\theta$ ;  $G_k(\theta)$  – ДН  $k$ -го излучателя ФАР.

Изменив порядок суммирования в (14) и учитывая, что в решаемой задаче  $C_{ik}$  – известные из предыдущего эксперимента коэффициенты, это выражение можно представить в виде

$$f_j(\theta) = U_0 \sum_k \varphi_{km(j)} \gamma_k G_k(\theta), \quad k \in 0, N-1, \quad (15)$$

где  $\gamma_k = \sum_i C_{ik}$  – известные коэффициенты.

Из (15) следует, что АФР в решетке формируется произведением коэффициентов передачи ФВ и множителей, учитывающих ВСИ. Процедуры, решающие задачу адаптации ФАР к искажениям АФР фазовращателями и ВСИ (через  $\gamma_k$ ), могут быть описаны следующим образом.

1. Измерение  $\varphi_{km(j)}$  при  $j$ -м зондировании;
2. Расчет  $\Psi_{km(j)} = -j \ln \{\varphi_{km(j)}\}$ ; (16)
3. Определение поправок к  $\Psi_{km(j)}$ , необходимых для получения при  $j+1$  зондировании желаемого  $\Psi_{km(j+1)}^\circ$  ФР

$$\Delta\Psi_{km(j+1)} = \Psi_{km(j+1)}^{\circ} - \Psi_{km(j+1)} - \arg(\gamma_k); \quad (17)$$

4. Расчет кодов управления ФВ СУЛ для  $j+1$  зондирования

$$\Psi_{km(j+1)} = \Psi_{km(j)} + \Delta\Psi_{km(j+1)}. \quad (18)$$

В ФАР, где имеется возможность управлять не только фазовым, но и амплитудным распределением (АР), уравнение адаптации, базируясь на (15), получится в виде

$$A_k(j+1) = A_k(j)\alpha_k(j+1), \quad (19)$$

где  $A_k(j) = |\varphi_{km(j)}|$ ;

$$\alpha_k(j+1) = A_k^0(j+1)(A_k(j)|\gamma_k|)^{-1}; \quad (21)$$

$\alpha_k(j+1)$  – поправка к измеренному при  $j$ -м зондировании АР сближающего на  $j+1$  зондировании желаемое АР  $A_k^0(j+1)$  с реализуемым  $A_k(j+1)$ .

**Анализ результатов.** Оценим качество предлагаемого способа адаптации по двум критериям качества – эффективности и стоимости. Эффективность системы адаптации складывается из двух показателей качества – точности и быстродействия.

Начнем с быстродействия. Из анализа основных соотношений, описывающих процесс адаптации (11) ... (21) следует, что наиболее длительной является процедура умножения известной обратной  $N \times N$  матрицы  $\mathbf{V}^{-1}$  на  $N \times M$  матрицу измеренных КА  $\mathbf{X}$  в (12). Это умножение ориентировано эквивалентно  $N^2M$  умножениям комплексных чисел, где  $N$  – число каналов ФАР,  $M$  – число состояний ФВ в них. Нужно для перемножения время  $T_n = N^2MQ^{-1}$ , где  $Q$  – производительность процессора (количество операций умножения комплексных чисел в секунду). Если  $N \leq 10^2$ ,  $M = 32$ ,  $Q \approx 10^{10}$ , то  $T_n \leq 32 \cdot 10^{-6}$  с, что значительно меньше периода повторения импульсов в РЛС, обнаруживающей цели на расстояниях более 100 км. Точность адаптации, в основном, определяется точностью измерения реализуемого в ФАР АФР и точностью реализации поправок, сближающих реализованное и желаемое АФР. В предлагаемом методе поправки вычисляются точнее потому, что измеряется АФР излученного поля, а не АФР сигналов на входах излучателей. Реализация поправок точнее потому, что в них (в формулах (17) ... (21) учитываются ВСИ.

Наиболее выгодной для предлагаемого способа адаптации является сравнительная оценка стоимости его реализации. Сравним предлагаемый

метод с наиболее точным из известных методов настройки передающих ФАР, заключающийся в создании передающей ФАР, содержащей в себе дополнительную приемную антенную решетку, предназначенную исключительно для контроля излучателей передающей ФАР [1, 2]. Ввиду того, что «контролирующая» решетка должна быть намного точнее контролируемой, это дорогостоящий проект.

Предлагаемый метод гораздо проще и дешевле, так как в качестве РИЗ можно использовать компактные цифровые решетки, состоящие из элементарных диполей, методы высокоточной калибровки которых известны и описаны, например в [8].

**Заключение.** Разработан метод адаптации передающей ФАР к искажениям АФР, вносимым устройствами СВЧ трактов и ВСИ. Приведено аналитическое описание метода. Показано, что предлагаемый метод имеет преимущество перед известными как по критерию эффективности (дополнительно учитываются ВСИ), так и по критерию стоимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Есин С.В., Каганов В.И. Системы автоматического фазирования в передающих ФАР и устройствах сложения мощностей СВЧ сигналов // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1986. – № 8. – С. 39 – 48.
1. Шишов Ю.А., Голик А.М., Клейменов Ю.А. и др. Адаптация управления ФАР по результатам встроенного контроля // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1990. – № 9. – С. 69 – 89.
2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с. – Гл. 13. Диагностика антенных решеток. – С. 387 – 427.
3. Лиепине У.Р., Недзельский С.Д. Метод и алгоритм оценки матрицы взаимной связи излучателей в стационарных передающих ФАР // *Системы обработки информации*. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 12 (40). – С. 128 – 135.
4. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ / Д.И. Воскресенский, С.Д. Кременецкий, А.Ю. Гринёв, Ю.В. Котов. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
6. Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками – М.: Радио и связь, 1983. – 238 с.
7. Ng B.C., See C.M.S. Maximum Likelihood Sensor Array Calibration // *IEEE Trans. AR*. – June 1996. – V. 44, N 5. – P. 827 – 837.

Поступила 10.05.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор О.И. Сухаревский,  
Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков.