

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

У.Р. Лиепинь¹, С.Д. Недзельский²

(¹Харьковский университет Воздушных Сил,

²Объединенный 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).^{*)} 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.

^{*)} 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^{*)}, 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); ΔU_k – неизвестные КА смеси ЭС, порожденных излучением k -го канала, пересчитанные к входу ФВ k -го канала;

$$\varphi_k(t) = \exp[j\psi_k(t)]; \quad \psi_k(t) = \psi_k^0(t) + \xi_k(t), \quad (2)$$

$\varphi_k(t)$ – коэффициент передачи ФВ k -го канала; $\psi_k^0(t)$ – желаемое фазовое распределение (ФР), рассчитываемое СУЛ для фазирования в момент времени t ; $\xi_k(t)$ – погрешности, вносимые ФВ вследствие их неидентичности; ρ_{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; $\eta = 2\pi\lambda^{-1}$; λ – 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 $K_{zn} = K_z$; $G_{zn}(-\vec{b}_{in}) = G_z(-\vec{b}_{in})$.

^{*)} 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 $N = \nu \rho^{-1}$.

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° , можно считать, что время реализации измерений N значений X_{nr} не превышает $T_u \leq N\tau_\varphi$, где τ_φ – 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 ψ_{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 ; φ – $N \times M$ матрица φ_{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 φ 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 φ_{km} , необходимо иметь априорные сведения о свойствах матриц C , ρ , 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 θ ; $\varphi_{km(j)}$ – коэффициент передачи ФВ k -го канала, находящегося в m -м состоянии при j -м зондировании в направлении θ ; $G_k(\theta)$ – 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 γ_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. *Лиепинь 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.