

УДК 621.396.677

В.Д. Карлов¹, О.А. Окунев¹, Г.А. Головин²¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба²В/ч А4489

МЕТОД БЫСТРОГО РАСЧЕТА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ФАР, ФОРМИРУЮЩЕГО ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ С ПРОВАЛАМИ В ЗАДАННЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

В условиях воздействия помех в радиолокационных станциях с фазированными антенными решётками защите предполагается осуществлять путем расчета амплитудно-фазового распределения, который позволяет сформировать диаграмму направленности с провалами в заданных направлениях. Предлагается алгоритм быстрого расчёта амплитудно-фазового распределения. Алгоритм не содержит процедуры обращения матриц волновых фронтов, что значительно сокращает время расчётов. Проанализировано изменение направленных свойств антенны. Метод предполагается применять в радиотехнических системах с ФАР, где необходимо подавлять активные и пассивные помехи, принимаемые с неизвестных направлений в области боковых лепестков диаграммы направленности ФАР.

Ключевые слова: активные ФАР, защита от помех.

Введение

В современных ФАР и активных ФАР (АФАР) защите от помех предполагается осуществлять путем расчета АФР, формирующего диаграмму направленности (ДН) с провалами в заданных направлениях [1]. Направления прихода (НП) помех считаются известными по результатам работы специального анализатора помеховой обстановки.

Методы расчета АФР АФАР базируются на обращении (псевдообращении) матриц волновых фронтов сигналов и помех. Если антенная решетка состоит из $N = N_1 N_2$ излучателей, где N_1 – число подрешеток, N_2 – число излучателей в подрешетке, то для организации поэлементного адаптивного управления элементами (излучателями) ФАР или АФАР необходимо произвести расчеты, включающие обращение N элементной матрицы волновых фронтов. Обращение матриц, как известно, требует осуществления порядка N^3 операций умножения комплексных чисел. При $N = 4096$ излучателей, это потребует порядка $Q = 6,87 \cdot 10^{10}$ операций умножения комплексных чисел. Только при формировании антенной решеткой одного луча необходимо произвести $Q_g = 8Q = 5,5 \cdot 10^{11}$ операций умножения действительных чисел. Реальная производительность современных ЭВМ [1] $\Pi_g = 10^{11} \dots 10^{12}$ операций умножений действительных чисел в секунду. Это означает, что создание быстрых алгоритмов расчета АФР, время реализации расчетов в которых соизмеримо с временем расчета АФР, предназначенного для сканирования луча ФАР, весьма актуально.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2, 3] показано, что для целей расчета амплитудного и фазового распределений, форми-

рующих ДН с нулями в заданных направлениях можно использовать представление исходного АФР рядом Фурье по косинусам, синусам или дискретным экспоненциальным функциям. Это позволяет при адаптации к помеховой обстановке перейти от пространства каналов в пространство парциальных лучей и, тем самым, значительно сократить размерность обрабатываемых матриц (при известных направлениях прихода помех). Однако при этом снижается степень подавления помех.

Целью статьи является синтез алгоритма расчета АФР, формирующего провалы в диаграмме направленности, не требующего процедур обращения матриц, содержащих информацию о направлениях прихода сигналов и помех.

Основная часть

В статье искомое АФР представим в виде

$$a_i = 1 - \sum_{r=1}^{N-1} \alpha_r e_{ri}, \quad (1)$$

где $i \in 0, N-1$ – номер и число излучателей в решетке; $r \in 1, N-1$ – номера и число парциальных лучей; $e_{ri} = \exp(-jr\psi_0 i)$ – дискретные экспоненциальные функции; α_r – коэффициенты ряда Фурье, формирующего искомое АФР; $\psi_0 = 2\pi/N$.

Результирующая ДН ФАР, при таком представлении АФР, имеет вид

$$F(\psi) = \sum_i a_i \exp(ji\psi) = f_0(\psi) - \sum_r \alpha_r f_r(\psi), \quad (2)$$

где $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta - \theta_0)$; θ, θ_0 – углы отсчитываемые от нормали к апертуре антенны в направлении на точку наблюдения и на источник излучения; λ, d – длина волны и межэлементное расстояние в решет-

ке; $f_0(\psi), f_r(\psi)$ – парциальные лучи, образующие результирующую диаграмму направленности;

$$f_r(\psi) = \sum_i \exp(ji(\psi - \gamma\psi_0)) = f_0(\psi - \gamma\psi_0); \quad (3)$$

$$f_0(\psi) = \sum_i \exp(ji\psi). \quad (4)$$

В качестве функционала, минимизируемого в процессе поиска α_r , предлагается использовать диаграмму направленности по мощности, представленную в плоскости парциальных лучей

$$P(\psi) = |F(\psi)|^2 = \left| f_0(\psi) - \sum_r \alpha_r f_r(\psi) \right|^2. \quad (5)$$

Если необходимо проанализировать отклик антенны на U источников излучения, принимаемых с направления $\psi_u, u \in 1, U$, то

$$P = \sum_u \left| f_0(\psi_u) - \sum_r \alpha_r f_r(\psi_u) \right|^2. \quad (6)$$

Дифференцируя P по $\alpha_p, p \in 1, N-1$, и приравнявая результат нулю, получим систему уравнений

$$\sum_u \sum_r \alpha_r f_r(\psi_u) f_p^*(\psi_u) = \sum_u f_0(\psi_u) f_p^*(\psi_u). \quad (7)$$

В матричной форме соотношение (7) можно представить в виде [4]

$$\mathbf{M}\mathbf{b} = \mathbf{V}, \quad (8)$$

$$\text{где } \mathbf{b} = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_p \dots \alpha_{N-1}]^T - \quad (9)$$

вектор-столбец неизвестных коэффициентов α_p ;

$$M_{rp} = \sum_u f_r(\psi_u) f_p^*(\psi_u) + p_n \delta_{rp}, \quad r, p \in 1, N-1, \quad (10)$$

δ_{rp} – дельта-функция Кронекера; $p_n \ll 1$ – регулирующий множитель;

$$V_p = \sum_u f_0(\psi_u) f_p^*(\psi_u). \quad (11)$$

Решение (7) для $U (U \leq N-1)$ направлений

$$\mathbf{b} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{V}. \quad (12)$$

При $U=1$

$$\alpha_p(\psi) = \frac{f_0(\psi) f_p^*(\psi)}{\sum_r |f_r(\psi)|^2} = \frac{f_0(\psi) f_p^*(\psi)}{N^2 - f_0^2(\psi)}. \quad (13)$$

Если теперь α_p подставить в (1) и произвести соответствующие расчеты сразу получим

$$a_i = 1 - \Delta_i = 1 - \frac{f_0}{N^2 - f_0^2} [N \exp(-ji\psi) - f_0], \quad (14)$$

$$\text{где } \Delta_i = \frac{f_0}{N^2 - f_0^2} [N \exp(-ji\psi) - f_0]; \quad (15)$$

$$\sum_r |f_r(\psi)|^2 = N^2 - f_0^2(\psi). \quad (16)$$

Из (15) видно, что для получения численных значений Δ_i необходимо рассчитать: $f_0(\psi)$; $N \exp(-ji\psi)$ и частное $f_0 / (N^2 - f_0^2)$, что потребует порядка $3N$ операций умножения комплексных чисел (вместо $(N-1)^3$ при решении (12)).

Несложно показать, что если найденные a_i подставить в (2), то

$$F(\psi) = \sum_i (1 - \Delta_i) e^{ji\psi} = f_0 - \frac{f_0(N^2 - f_0^2)}{N^2 - f_0^2} \equiv 0. \quad (17)$$

Таким образом, в принципе степень подавления помех ограничена только точностью расчетов a_i и точностью аппаратуры, реализующей найденные a_i .

Практический интерес представляет степень снижения КНД антенны при адаптации по такой формуле расчета АФР. Будем считать, что относительный КНД в направлении главного максимума определяется по формуле [5]

$$D_0 = \left| \sum_i a_i \right|^2 / \left(N \sum_i |a_i|^2 \right). \quad (18)$$

Подставив сюда $a_i = 1 - \Delta_i$, получим, что

$$D_0 = 1 - \frac{1}{N} \sum_i \Delta_i^2 = 1 - \frac{f_0^2}{N^2 - f_0^2}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что, подавляя помеху, приходящую из области боковых лепестков, где f_0^2 намного меньше N^2 , $D_0 \approx 1$. Это означает, что формирование провалов в области боковых лепестков не сопровождается возмущением главного лепестка (рис. 1).

Анализ результатов

На графиках приведенного рисунка показаны:

- амплитудное и фазовое распределения $|a_i|$, $\arg(a_i)$, рассчитанные по формуле (14) для формирования провала в направлении f_{u_0} ;
- диаграмма направленности 64 элементной решетки при идеальном фазировании $F_0(fs)$;
- диаграмма направленности $F_a(fs)$ с провалом в направлении f_{u_0} .

Для удобства анализа ДН представлены в двух масштабах.

Из графиков и формул (14), (15), (19) видно, что после формирования провалов в диаграмме направленности:

- а) главный максимум не искажается;
- б) уровень боковых лепестков во всей диаграмме направленности остается прежним, что говорит о том, что уровень подавления пассивных помех остается прежним.

К недостаткам метода следует отнести:

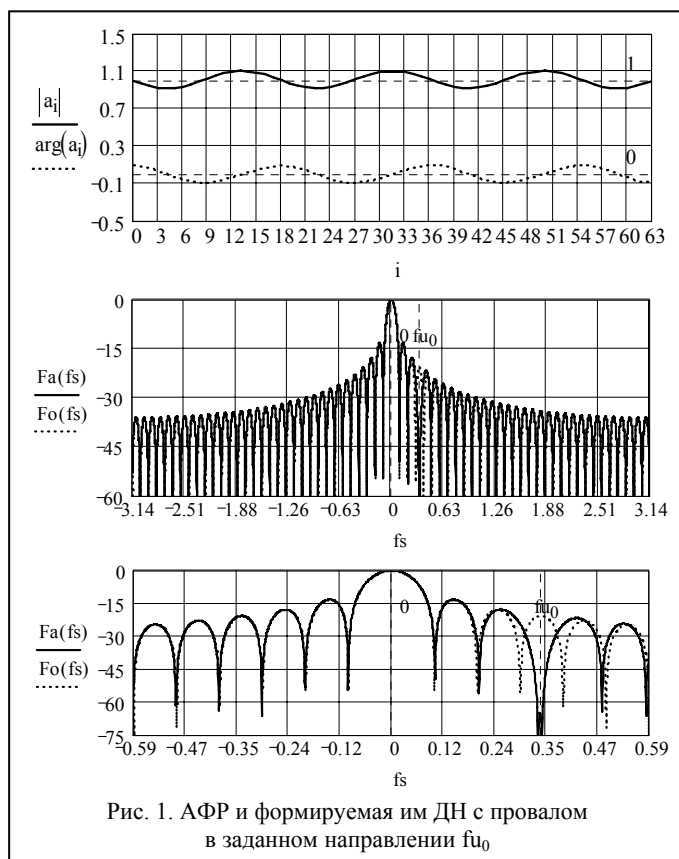


Рис. 1. АФР и формируемая им ДН с провалом в заданном направлении fs_0

- необходимость иметь точное целеуказание на источники помех;
- необходимость точного (не менее пяти-шести разрядов) регулирования амплитудного и фазового распределений;
- невозможность формирования провалов в главном максимуме, что следует из (13) и (19). При приближении ψ к нулю $f_0^2 \rightarrow N^2$ и $\alpha_p \rightarrow \infty$, что

приводит к заметному снижению КНД (в пределах $0 < |\psi| < 0,5\psi_0$).

Выводы

Синтезирована простая формула расчета АФР, формирующая провал в области боковых лепестков ДН ФАР. Расчеты по ней не включают процедур обращения матриц, что значительно сокращает время расчетов.

Метод применим в РТС с ФАР, где необходимо подавлять активные и пассивные помехи, принимаемые с неизвестных направлений в области боковых лепестков ДН ФАР.

Список литературы

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Каначенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
2. Маслов А.Ф., Лиепинь У.Р. ФАР с адаптивной регулировкой амплитудного распределения // Радиотехника. – X. – 2003. – № 75. – С. 3-12.
3. Лиепинь У.Р., Головина Л.В., Ставицкий О.Н. Адаптация к помеховой обстановке ФАР с пространственным питанием // Изд. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 44, № 1. – С. 25-32.
4. Лиепинь У.Р., Головина Л.В., Коваленко И.В. Минимизация мощности помех в ФАР с пространственным питанием // Антенны. – 2001. – № 1 (47). – С. 17-24.
5. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1968. – Т. 2. – 496 с.

Поступила в редколлегию 15.08.2008

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

МЕТОД ШВИДКОГО РОЗРАХУНКУ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО РОЗПОДІЛУ АКТИВНИХ ФАР, ЯКИЙ ФОРМУЄ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ З ПРОВАЛАМИ В ЗАДАНИХ НАПРЯМКАХ

В.Д. Карлов, О.О. Окунев, Г.А. Головин

В умовах дії перешкод в радіолокаційних станціях з фазованими антенними решітками захист передбачається здійснювати шляхом розрахунку амплітудно-фазового розподілу, який дозволяє сформувати діаграму спрямованості з провалами в заданих напрямках. Пропонується алгоритм швидкого розрахунку амплітудно-фазового розподілу. Алгоритм не містить процедури звернення матриць хвильових фронтів, що значно скорочує час розрахунків. Проаналізована зміна спрямованих властивостей антени. Метод передбачається застосовувати в радіотехнічних системах з ФАР, де необхідно пригнічувати активні і пасивні перешкоди, що приймаються з невідомих напрямків в області бічних пелюсток діаграми спрямованості ФАР.

Ключові слова: активні ФАР, захист від перешкод.

METHOD OF RAPID CALCULATION OF THE AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTING OF ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAYS (PAA), FORMING THE DIAGRAMS OF ORIENTATION WITH FAILURES IN THE SET DIRECTIONS

V.D. Karlov, O.A. Okunev, G.A. Golovin

In the conditions of influence of hindrances in the radio-location stations with phased antenna arrays it is assumed to carry out defence by a calculation peak-phase distributing, which allows to form the diagram of orientation with failures in the set directions. The algorithm of rapid calculation is offered peak-phase distributing. An algorithm does not contain procedure of appeal of matrices of wave fronts, that abbreviates time of calculations considerably. The change of the directed properties of aerial is analysed. It is assumed to apply a method in the radio engineering systems with phased antenna arrays, where it is necessary to repress active and passive hindrances, accepted from unknown directions in area of sidelobes of diagram of orientation of phased antenna arrays.

Keywords: active PAA, protecting from hindrances.