

УДК 621.396.6

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, О.О. Окунєв<sup>1</sup>, Г.А. Головін<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>В/ч А4489

## МЕТОД І АЛГОРИТМ ШВИДКОГО РОЗРАХУНКУ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО РОЗПОДІЛУ АКТИВНИХ ФАР, ЩО ФОРМУЄ ДІАГРАМУ СПРЯМОВАНІСТІ З ШИРОКИМИ ПРОВАЛАМИ В ЗАДАНИХ НАПРЯМАХ

Відомим методом боротьби з перешкодами є формування провалів в діаграмі спрямованості. Алгоритми, які були раніше розроблені забезпечують формування вузьких провалів. У статті запропонований алгоритм, який на основі реалізації методу швидкого розрахунку амплітудно-фазового розподілу (АФР) дозволяє сформувати діаграму спрямованості (ДС) багатоелементних антенних решіток з широкими провалами у відомих напрямках приходу завад. Це дає можливість проводити адаптацію (або предадаптацію) ФАР в реальному масштабі часу за даними зовнішнього або внутрішнього вказівок цілі.

**Ключеві слова:** розрахунок амплітудно-фазовий розподіл (АФР), формування ДС.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Відомі методи формування глибоких провалів діаграми спрямованості (ДС) в заданих напрямках [1, 2]. Недоліком приведених там методів є «вузькість» провалів, що формуються. Помилки вказівки цілі, які викликані помилками у визначенні координат джерел радіовипромінювання (ДРВ) або їх рухом приводять до зсуву напрямку формування нуля щодо напрямку на ДРВ. Це може помітно зменшити глибину провалу і ступінь придушення завади. Для усунення цього недоліку застосовують різні методи розширення провалів, зберігаючи при цьому їх глибину.

З [3] відомий метод формування глибокого і широкого провалу в ДС ФАР. Але для реалізації розрахунків АФР по цьому методу потрібно застосовувати процедури звернення матриць і їх диференціювання. Це ускладнює розрахунки і вимагає багато часу. У [4, 5] розширення провалів, що формуються навколо очікуваних напрямів приходу завад, здійснюють шляхом рішення задачі синтезу АФР з навмисно збільшеною кількістю джерел завад, які розташовуються симетрично щодо напрямку приходу завади.

Для оцінки такого способу розширення провалів необхідно вирішити задачу синтезу алгоритму швидкого розрахунку АФР, приведеного в [2], для формування двох і більш провалів в ДС ФАР.

**Метою статті** є синтез алгоритму розрахунку АФР, що формує широкі провали у напрямі безлічі джерел завад.

### Основна частина

Амплітудний розподіл, як і в [2], представимо у вигляді ряду Фур'є

$$a_i = 1 - \sum_r \alpha_r e_{ri}, \quad (1)$$

де  $i \in 0, N-1$  – номер та число випромінювачів в решітці;  $r \in 1, N-1$  – номери і число парціальних променів;  $e_{ri} = \exp(-j r \psi_0 i)$ , або  $e_{ri} = w_{ri}$ ,  $w_{ri}$  – функції Уолша, які приймають два значення  $\pm 1$  [6];  $\psi_0 = 2\pi/N$ ;  $\alpha_r$  – коефіцієнти ряду Фур'є, який формує результуюче АФР.

ДС ФАР за полем і потужністю мають вигляд:

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

$$P(\psi) = |F(\psi)|^2 = \left| f_0(\psi) - \sum_r \alpha_r f_r(\psi) \right|^2, \quad (3)$$

де

$$f_0(\psi) = \sum_i \exp(ji\psi), \quad f_r(\psi) = \sum_i \exp(ji\psi) e_{ri}; \quad (5)$$

$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta - \theta_0)$ ;  $\theta, \theta_0$  – кути, які відлічуються від нормалі до апертури антени в напрямі на точку спостереження і на джерело випромінювання;  $\lambda, d$  – довжина хвилі і міжелементна відстань в решітці.

Якщо на антену впливають  $U$  незалежних ДРВ, то

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

де  $u \in 1, U$   $\psi_u$  – напрям приходу сигналів (завад).

Коефіцієнти  $\alpha_r$ , які створюють АФР  $a_i$ , що формує провали в  $U$  напрямках ДС ФАР, можуть бути знайдені шляхом диференціювання (6) по  $\alpha_p$  ( $p \in 1, N-1$ ) і прирівнюючи результат нулю, тобто з вирішення такої системи рівнянь

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

Представив (7) в матричній формі і вирішуючи отримане рівняння відносно  $\alpha_p$  при  $e_{ri} = w_{ri}$ , отримаємо, що при  $U = 1$

$$\alpha_p(\psi_1) = \frac{f_0(\psi_1) f_p^*(\psi_1)}{N^2 - f_0^2(\psi_1)}, \quad (8)$$

а при  $U = 2$

$$\alpha_p(\psi_1, \psi_2) = \frac{e_p(\psi_1) + e_p(\psi_2)}{D}, \quad (9)$$

де  $e_p(\psi_1) = f_p(\psi_1) \cdot D_1$ ;

$$e_p(\psi_2) = f_p(\psi_2) \cdot D_2; \quad (10)$$

$$D_1 = f_0(\psi_1) - f_0(\psi_2) f(\psi_2 - \psi_1); \quad (11)$$

$$D_2 = f_0(\psi_2) - f_0(\psi_1) f(\psi_2 - \psi_1); \quad (12)$$

$$D = 1 - f_0^2(\psi_1) - f_0^2(\psi_2) - f^2(\psi_2 - \psi_1) + 2f(\psi_2 - \psi_1) f_0(\psi_1) f_0(\psi_2); \quad (13)$$

$$f(\psi_2 - \psi_1) = N^{-1} \sum_i \exp[ji(\psi_2 - \psi_1)]. \quad (14)$$

У співвідношеннях (8), (9), (12), (13) парціальні промені  $f_0(\psi)$  і  $f_r(\psi)$  нормовані до  $N$ .

Залежність  $\alpha_p$ , яка визначена в (8)–(13) від впливу взаємного розташування ДРВ через функції  $f(\psi_2 - \psi_1)$  дозволяє спрогнозувати формулу для розрахунку  $\alpha_p$  при дії на антенну двох и більше джерел завад. Якщо  $(\psi_2 - \psi_1) = r\psi_0$ , де  $r = 1, 2, 3, \dots$  то  $f(\psi_2 - \psi_1) = 0$  і  $D_1 = f_0(\psi_1)$ ,  $D_2 = f_0(\psi_2)$ ,  $D = 1 - f_0^2(\psi_1) - f_0^2(\psi_2)$  та

$$\alpha_p(\psi_1, \psi_2) = \alpha_p(\psi_1) + \alpha_p(\psi_2). \quad (15)$$

Експерименти на моделях ФАР показують, що для багатoelementних решіток, де  $\psi_0 \ll 1$  для ситуацій, коли  $\psi_u - \psi_v \gg \psi_0$   $u, v \in 1, U$

$$\alpha_p(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_U) \approx \sum_u \alpha_p(\psi_u). \quad (16)$$

АФР, що шукається, при цьому визначається за формулою

$$a_i = 1 - \sum_r \sum_u \alpha_r(\psi_u) e_{ri}. \quad (17)$$

Аналіз результатів. Ключовим моментом в роботі є перехід від виразу (7) до (8) і (9). Аналітичне звернення матриці, отриманої з (7), для випадків  $U = 1$  і  $U = 2$  дозволяє значно скоротити об'єм обчислень при розрахунку АФР (приблизно замість  $N^3$  операцій множень комплексних чисел потрібно виконати  $(3 \dots 6)N$  таких операцій).

Формули для аналітичного звернення матриць приведені, наприклад, в [7].

Формули для розрахунку  $\alpha_p(\psi_1)$  (8) і  $\alpha_p(\psi_1, \psi_2)$  (9) надають наступні можливості:

Якщо напрям приходу завад  $f_{iu}$  такі, що  $(f_{iu} - f_{iv}) \gg \psi_0$ , а помилки вказівки на цілі не перевершують  $0,02\psi_0$  (приблизно два відсотки від ширини ДС), то у напрямку кожної завади можна формувати вузький глибокий провал, розраховуючи  $\alpha_p$  згідно (8), (15), (16).

В тому випадку, якщо вказівки на цілі проводиться з великими помилками, у напрямі кожної завади потрібно формувати широкий провал, застосовуючи формулу (9). Хай напрям приходу завад  $f_{iu}$ , тоді напрям формування нулів

$$\psi_1 = f_{iu} + 0,2\psi_0 \text{ а } \psi_2 = f_{iu} - 0,2\psi_0. \quad (18)$$

Приклад формування такого провалу показаний на рис.1,2. На цих малюнках  $F_0(fs)$  – ДС ФАР, яка складається з 64 елементів при ідеальному фазуванні, а  $F_a(fs)$  – ДН цієї ФАР при розрахунку  $\alpha_p$  згідно (9).  $f_{i2}$  – відповідає напрямку одиночного нуля. Реальна глибина провалу може бути розрахована згідно формулі [1]:

$$\delta = 10 \lg \Delta a + 10 \lg \Delta \varphi - 10 \lg N, \quad (19)$$

де  $\Delta a, \Delta \varphi$  – ціна молодших розрядів в пристроях управління амплітудою і фазою.

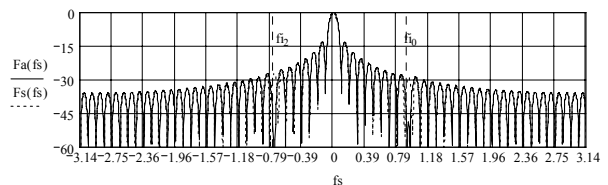


Рис. 1. Діаграма спрямованості ФАР, яка містить 64 елемента

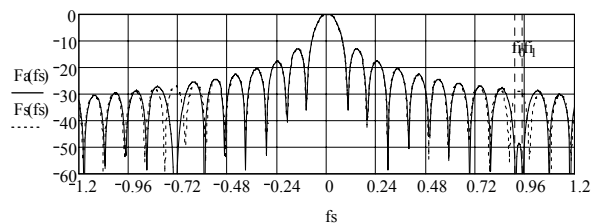


Рис. 2. Фрагмент діаграми спрямованості ФАР, яка містить 64 елемента

Численні експерименти на моделях ФАР показують, що відстань, яка прийнята між двома спареними нулями  $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 \approx 0,4\psi_0$ . Глибина широкого провалу, шириною не менше  $0,5\psi_0$  при цьому мало залежить від  $N$ . Для прикладу на рис.3,4 показані «спарені» нулі для  $N = 32$  і  $N = 128$ .

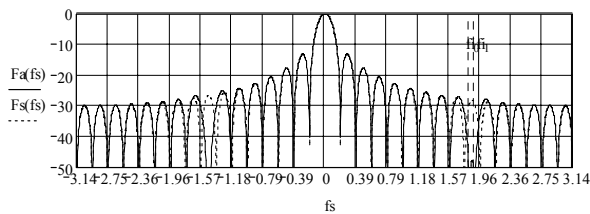


Рис. 3. Діаграма спрямованості ФАР, яка містить 32 елемента.

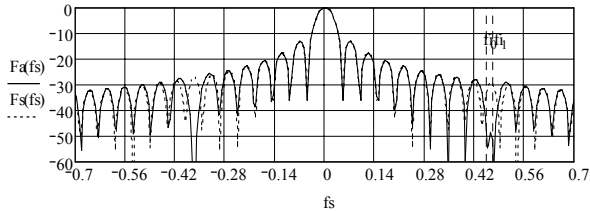


Рис. 4. Фрагмент діаграми спрямованості ФАР, яка містить 128 елементів

Якщо вказівки цілі на різні джерела завад різні, допускається змішаний розрахунок  $\alpha_p$  згідно (8) і (9), а  $a_i$  – згідно (1) для сумарного  $\alpha_p$ .

Представлення АФР  $a_i$  у базисі функцій Уолша значно скорочує час розрахунку АФР (в порівнянні з представленням в базисі дискретних експоненціальних функцій.), оскільки  $w_{ii}$  – дійсні числа і є можливість застосувати для розрахунку  $f_T(\psi)$  алгоритми швидкого перетворення Уолша.

## Висновки

Запропонований алгоритм, що реалізує метод швидкого розрахунку АФР, що формує ДС з широкими провалами у відомих напрямках приходу завад. Це дозволяє проводити адаптацію (або передадаптацію) ФАР в реальному масштабі часу формування її

ДС за даними зовнішніх або внутрішніх вказівок цілі.

Ширина формованого провалу складає не менш 0,5 ширини ДС антени, а глибина провалу визначається розрядністю фазообертачів, керованих атенюаторів і числом випромінювачів решіток.

## Список літератури

1. Активные фазированные антенные решетки: под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
2. Карлов В.Д. Метод быстрого расчета амплитудно-фазового распределения активных ФАР, формирующего диаграммы направленности с провалами в заданных направлениях / В.Д. Карлов, О.А. Окунев, Г.А. Головин // Системы обработки информации. – 2008. – №6(73). – С. 59-61.
3. Agrawal M. Robust adaptive beam forming for Wide-Band, Moving, and Coherent Jammers via Uniform Linear Arrays, *IEEE Trans / M. Agrawal, S. Prasad. – On AP, V. 47, N8, August 1999. – Pp. 1267-1375.*
4. Лиупинь У.Р. Минимизация мощности помех в ФАР с пространственным питанием / У.Р. Лиупинь, Л.В. Головина, И.В. Коваленко // Антенны. – 2001. – №1(47). – С. 17-24.
5. Лиупинь У.Р. Адаптация к помеховой обстановке ФАР с пространственным питанием / У.Р. Лиупинь, Л.В. Головина, О.Н. Ставицкий // Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 44, №1. – С. 25-32.
6. Хармут Х. Теория секвентного анализа. Основы ее применения: пер. с англ. / Х. Хармут. – М.: Мир, 1980. – 574 с.
7. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Надійшла до редколегії 11.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МЕТОД И АЛГОРИТМ БЫСТРОГО РАСЧЁТА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ФАР, ФОРМИРУЮЩЕГО ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ С ШИРОКИМИ ПРОВАЛАМИ В ЗАДАННЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

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

Известным методом борьбы с помехами является формирование провалов в диаграмме направленности. Алгоритмы, которые были ранее разработаны обеспечивают формирование узких провалов. В статье предложен алгоритм, который на основе реализации метода быстрого расчета амплитудно-фазового распределения (АФР) позволяет сформировать диаграмму направленности (ДН) многоэлементной антенной решётки с широкими провалами в известных направлениях прихода помех. Это даёт возможность производить адаптацию (или предадаптацию) ФАР в реальном масштабе времени по данным внешнего или внутреннего целеуказания.

**Ключевые слова:** расчета амплитудно-фазового распределения (АФР), формирование ДН.

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

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

The known method of fight against hindrances is forming of failures in the diagram of orientation. Algorithms which were before developed provide forming of narrow failures. A new algorithm is offered in the article. This algorithm is based on method of rapid calculation peak - phase distributing (AFR). This calculation allows to form the diagram of orientation (DN) of array with wide failures for the known directions of arrival of hindrances. It enables to make adaptation (or pre-adaptation) of PAA in real-time on the basis of the internal or external pointing about a purpose.

**Keywords:** calculation of the amplitude-phase distributing (AFR), forming of DN.