

УДК 621.396.677.494

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, Н.Н. Петрушенко<sup>2</sup>, Д.В. Карлов<sup>1</sup>, Г.А. Головин<sup>3</sup><sup>1</sup> Харківський університет Воздушних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Главная инспекция Министерства обороны Украины, Киев<sup>3</sup> В/ч А-0156

## КОМПЕНСАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ ОТКАЗОВ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ПЛОСКИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Приведен метод адаптации плоской фазированной антенной решетки к амплитудным отказам с использованием предложенной методики моделирование отказовых ситуаций в линейной решетке. Путем анализа результатов моделирования сформулированы возможности предложенной методики. Показано, что в результате применения предложенной методики при использовании её в плоской фазированной антенной решетке можно получить оптимальную (желаемую) диаграмму направленности в плоскости адаптации, при этом показано, что в ортогональной плоскости диаграмма направленности остается неизменной и ровной искаженной. Показано преимущество адаптации в эквивалентных линейных ФАР.

**Ключевые слова:** амплитудные отказы, адаптация к амплитудным отказам, плоская фазированная антенная решетка.

### Введение

При организации адаптации к амплитудным отказам в плоской фазированной антенной решетке (ФАР) необходимо обратить внимание на способ управления решеткой. В ФАР со строчно-столбцевым управлением реализуется адаптация только в эквивалентных строках и столбцах. В решетках с поэлементным управлением реализуется адаптация в эквивалентных строках (столбцах) и поэлементная адаптация в строках (столбцах).

Распределение в эквивалентной строке (столбце) представляет собой сумму распределений вдоль столбца (строки). При этом необходимо иметь в виду, что поэлементная адаптация реализуется в отдельной строке (столбце), а строка (столбец) представляет собой линейную антенную решетку. Это накладывает ограничение на количество компенсируемых амплитудных отказов. Их число ограничено возникновением сверхнаправленности. Токи в отдельных строках (столбцах) становятся чрезмерно большими. Этого допустить нельзя, поэтому обращать внимание будем только на адаптацию в эквивалентных строках (столбцах) решетки, представляющих собой линейную антенную решетку.

**Анализ публикаций.** В [1, 2] приведен метод компенсации амплитудных отказов в плоских ФАР. Недостаток этого метода – в адаптации участвуют только два ближайших от отказавшего излучателя. В [3] рассмотрен метод адаптации, где участвуют все оставшиеся управляемые излучатели. Анализ ограничен только линейной решеткой. В [4] доказано, что наихудшей ситуацией для решетки являются рядом расположенные отказы излучателей.

**Целью статьи является** анализ метода компенсации отказов излучателей в плоских ФАР.

### Основной материал

Суть метода синтеза адаптированного к отказам амплитудного распределения (АР) в эквивалентной строке (столбце) остается прежней, формируется модель подпространства, в котором размещается  $R$  принудительно формируемых нулей  $\psi_r$ .

Для задания направления нулей образуется  $N \times R$  матрица волновых фронтов, где  $R = N - 1$  управляемых каналов в эквивалентной строке (столбце) [4]

$$\mathbf{F}e_R = [\mathbf{f}e_1 \dots \mathbf{f}e_R], \quad (1)$$

где

$$\mathbf{f}e_r^T = [\dots E_i \exp(ji\psi_r) \dots], \quad r \in 1, R. \quad (2)$$

Множители  $E_i$  описывают искажения амплитудно-фазового распределения (АФР) в эквивалентных строках (столбцах). Численные значения  $E_i$  можно определить по результатам диагностики

$$E_i = \left( \sum_k B_{i,k} \right) \cdot \left( \sum_k A_{i,k} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Если суммирование сначала ведем по  $i$ , то

$$E_k = \left( \sum_i B_{i,k} \right) \cdot \left( \sum_i A_{i,k} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Матрица проектирования представляется как [4]

$$\mathbf{P}e_R = \mathbf{F}e_R \mathbf{F}e_R^{-1} \mathbf{F}e_R^H, \quad (5)$$

где  $\mathbf{F}e_R = \mathbf{F}e_R \mathbf{F}e_R^H$ .

Искомый вектор, который учтет все отказы в АР [4]

$$\mathbf{w} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}e_R) \mathbf{E}. \quad (6)$$

Количество реставрируемых нулей в сечении диаграммы направленности (ДН) ФАР

$R \leq N - m_e - 1$ , где  $m_e$  – число отказавших строк (столбцов), а требуемый уровень боковых лепестков (УБЛ) определяется подбором  $\psi_r$ .

Здесь необходимо заметить, что вероятность появления события  $m_e \geq 1$  в плоской ФАР гораздо меньше такого же события ( $m_e \geq 1$ ) в ЛАР.

Если в плоской или линейной ФАР необходимо восстановить плотность потока мощности, излучаемой в направлении главного максимума (НГМ), полученное согласно (6) АР необходимо пронормировать следующим образом:

$$\mathbf{w}' = \mathbf{w} \cdot \mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}_0 = \sum_i \sum_k \mathbf{A}_{i,k}$ ,  $\mathbf{B}_0 = \sum_i \sum_k \mathbf{B}_{i,k}$ .

Вектор АФР, полученный умножением  $w_i E_i$ , или  $w_k E_k$ , сформирует желаемое АР  $D_i$  или  $D_k$ , где

$$D_i = w_i E_i; \quad D_k = w_k E_k; \quad (8)$$

Результаты моделирования отказовых ситуаций в линейной антенной решетке (ЛАР) позволяет сделать следующие предварительные замечания:

1. Предлагаемый метод адаптации к отказам в плоской ФАР позволяет:

а) регулировкой весов в эквивалентных строке (столбце) производить адаптацию плоской ФАР к отказам;

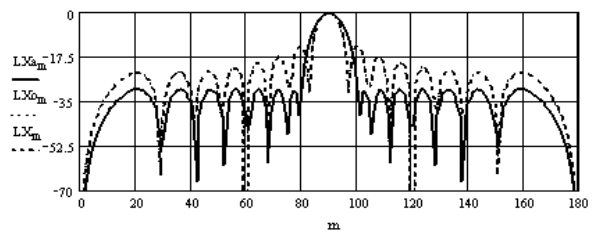
б) синтезировать несимметричную ДН, сечения которой равны желаемой ДН в плоскости адаптации и искаженной ДН – в плоскости, ортогональной плоскости адаптации;

в) для изменения плоскости адаптации необходимо изменить порядок суммирования (разделения) сигналов.

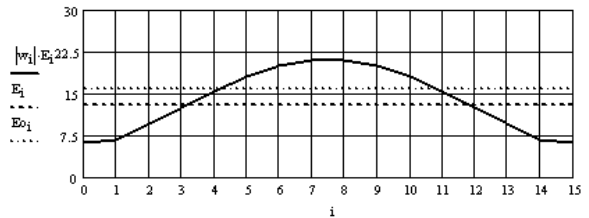
Для подтверждения сказанного на рис. 1, 2 показаны результаты синтеза АФР к отказовым ситуациям.

Предварительное суммирование (без адаптации) произведено в каждой строке. На рисунках  $LX_{am}$  – сечения ДН в плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  после адаптации,  $LX_m$  – до адаптации и  $LX_{0m}$  – желаемая ДН. На рис. 1, б и рис. 2, б показаны АР, реализующие эти ДН:  $D_i = w_i E_i$  и  $D_k = w_k E_k$ . Рис. 1, а показывает полную адаптацию к желаемой ДН  $LX_{0m}$  даже в условиях отказов трех строк излучателей, что составляет примерно 19 % от их общего числа. Синтезированная ДН несколько шире невозмущенной, так как мы заказали ДН с пониженным УБЛ.

Несомненный интерес представляет поведение ДН ФАР при изменении плоскости прихода радиоволны и фиксированном АР, полученном для адаптации управления ФАР к отказам в азимутальной плоскости (X0Z).



а



б

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

в

Рис. 1. Адаптация в плоскости X0Z  
а – сечения ДН; б – АР между элементами эквивалентного столбца; в – искаженное отказами АР;  $\varphi = n = 0^\circ$

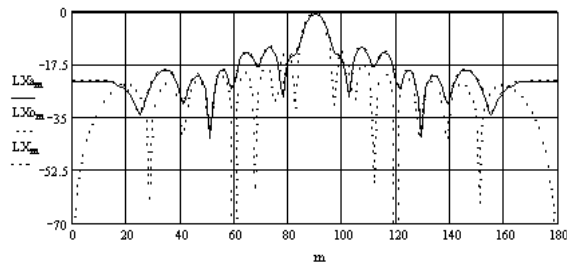
На рис. 3 показаны сечения ДН ФАР в плоскостях  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi = 130^\circ$  и том же АР (в эквивалентном столбце вдоль  $i$ ), показанное на рис. 1, б. Из рисунка видно, что ДН нельзя назвать оптимальной, т.к. сама ДН искажена и УБЛ в ней выше желаемого. Но при этом во всех плоскостях (при изменении  $\varphi$ ), УБЛ в адаптированной к отказам ДН ниже УБЛ искаженной ДН (на рис. 1, 2 –  $LX_m$ ), а ширина ДН увеличена незначительно. В результате такой адаптации к отказам в плоской ФАР достигается:

а) оптимальная (желаемая) ДН в плоскости адаптации;

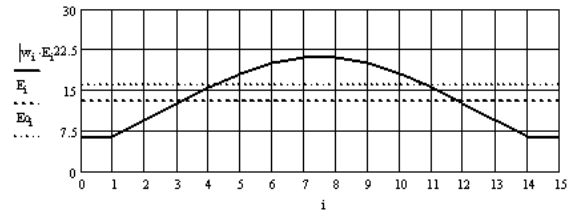
б) в ортогональной плоскости ДН остается неизменной (равной искаженной);

в) ДН в промежуточных областях сканирования не хуже искаженной (без адаптации).

В [6] для уменьшения последствий адаптации в другой плоскости (ортогональной) применяют дополнительное фазовое регулирование на взятую наугад фазовую подставку. Другие плоскости сканирования луча вообще не анализируются.



а



б

$B =$

0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

в

Рис. 2. Влияние адаптации в плоскости X0Z на ДН в плоскости Y0Z: а – сечения ДН; б – АР в эквивалентной линейке, ортогональной плоскости Y0Z; в – искаженное отказами АР;  $\varphi = n = 90^\circ$

**Выводы**

Предложенный метод адаптации плоской ФАР к амплитудным отказам позволяет регулировкой АР в эквивалентной линейной строке (столбце) осуществиться адаптация ДН плоской ФАР к отказам в плоскости адаптации (плоскости, совпадающей с плоскостью эквивалентной линейки). При этом в других плоскостях ДН ФАР после адаптации будет не хуже искаженной отказами ДН. Выбором плоскости адаптации можно синтезировать (восстановить) ДН, минимально отличающуюся от желаемой, не вторгаясь в область АР, ограниченных сверхнаправленностью.

**КОМПЕНСАЦІЯ АМПЛІТУДНИХ ВІДМОВ ВИПРОМІНЮВАЧІВ У ПЛОСКИХ ФАР**

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Д.В. Карлов, Г.А. Головін

Наведено методіку організація адаптації плоскої фазованої антенної решітки (ФАР) до амплітудних відмов. Показано перевагу адаптації в еквівалентних лінійних ФАР.

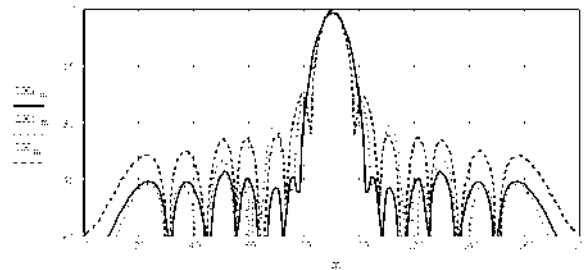
**Ключові слова:** амплітудні відмови, адаптація до амплітудних відмов, плоска фазована антенна решітка.

**COMPENSATE FOR AMPLITUDE FAULT RADIATORS IN THE PLANAR PHASED ARRAY ANTENNA**

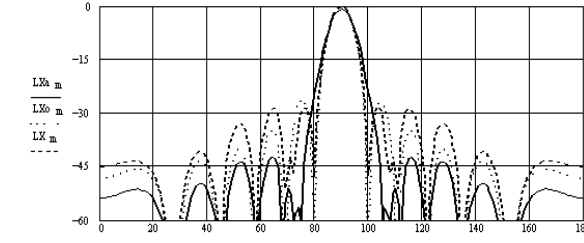
V.D. Karlov, M.M. Petrushenko, D.V. Karlov, G.A. Golovin

The technique of adapting the organization flat phased array antenna (PAR) to amplitude failures. The advantage of the adaptation of the equivalent linear phased array

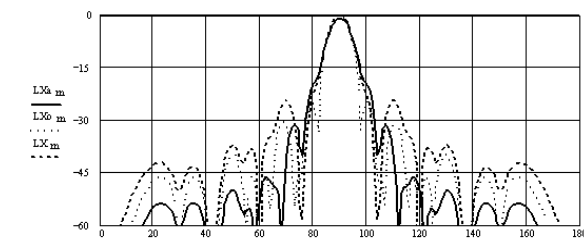
**Keywords:** amplitude failures, failures of adaptation to amplitude, flat phased array.



а



б



в

Рис. 3. Адаптация АФР при: а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 45^\circ$ ; в –  $\varphi = 60^\circ$ .

**Список литературы**

1. Levitas H., Horton D.A., Cheston T.C. Practical failure compensation in active phased arrays / Levitas H., Horton D.A., Cheston T.C. // IEEE Trans. AP. – 1999. – v. 47, N3. – P. 524-534.
2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова, гл.13. – М.: Радиотехника, 2004. – С. 351-370.
3. Шифрин Я.С. Об одном методе компенсации влияния отказов части каналов ФАР / Я.С. Шифрин, У.Р. Липинь, Г.А. Головин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №5. – С. 29-35.
4. Бейдер А.Б. Статистический анализ ДН ФАР при отказах излучателей / А.Б.Бейдер // Изв.вузов, Радиоэлектроника. – 1990. – №2. –С. 28-33.

Поступила в редколлегию 14.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.