

УДК 621.396.677.494

В.Д. Карлов¹, Н.Н. Петрушенко², Д.В. Карлов¹, Г.А. Головин³¹ Харківський університет Воздушних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків² Главная инспекция Министерства обороны Украины, Киев³ 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 ψ_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]

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

где $\Gamma e_R = F e_R F e_R^H$.

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

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

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 ψ_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;

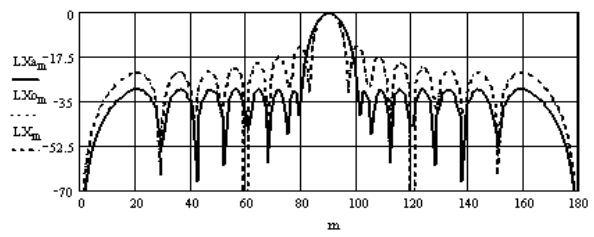
б) синтезировать несимметричную ДН, сечения которой равны желаемой ДН в плоскости адаптации и искаженной ДН – в плоскости, ортогональной плоскости адаптации;

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

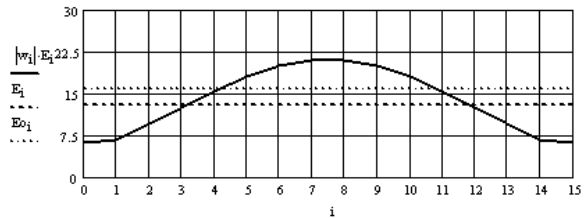
Для подтверждения сказанного на рис. 1, 2 показаны результаты синтеза АФР к отказовым ситуациям.

Предварительное суммирование (без адаптации) произведено в каждой строке. На рисунках LX_{a_m} – сечения ДН в плоскостях $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ после адаптации, LX_m – до адаптации и LX_{o_m} – 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_{o_m} 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 (XOZ).



а



б

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\mathbf{B} =$	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. 1. Адаптация в плоскости XOZ
а – сечения ДН; б – АР между элементами эквивалентного столбца; в – искаженное отказами АР; $\varphi = n = 0^\circ$

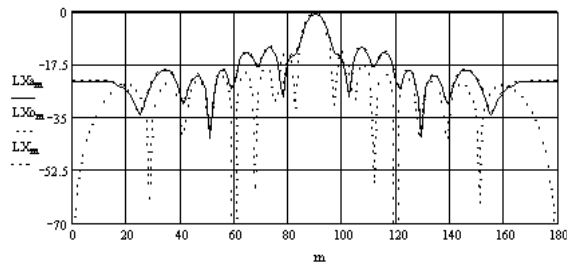
На рис. 3 показаны сечения ДН ФАР в плоскостях $\varphi = 30^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 130^\circ$ и том же АР (в эквивалентном столбце вдоль i), показанное на рис. 1, б. Из рисунка видно, что ДН нельзя назвать оптимальной, т.к. сама ДН искажена и УБЛ в ней выше желаемого. Но при этом во всех плоскостях (при изменении φ), 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;

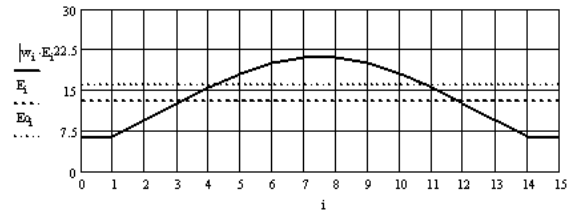
б) в ортогональной плоскости ДН остается неизменной (равной искаженной);

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.

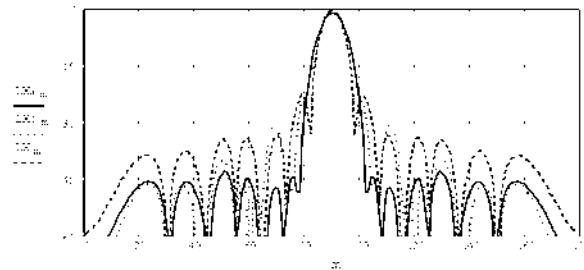
Ключові слова: амплітудні відмови, адаптація до амплітудних відмов, плоска фазована антенна решітка.

COMPENSATE FOR AMPLITUDE FAULT RADIATORS IN THE PLANAR PHASED ARRAY ANTENNA

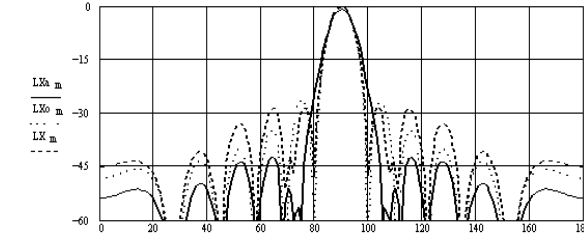
V.D. Karlov, M.M. Petrushenko, D.V. Karlov, G.A. Golovin

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

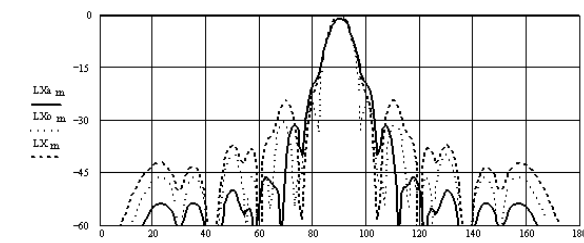
Keywords: amplitude failures, failures of adaptation to amplitude, flat phased array.



а



б



в

Рис. 3. Адаптация АР 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.