

УДК 621.396.677

А.Ф. Шевченко

Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОЦЕНКА ГРАНИЦЫ ДАЛЬНЕЙ ЗОНЫ МНОГОЧАСТОТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ТОКОВ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Предложены критерии оценки границ дальней (фраунгоферовой) зоны антенных решеток с многочастотной модуляцией токов излучателей. На примере многочастотной линейной эквидистантной антенной решетки получены оценки границ дальней зоны при использовании ряда критериев. Полученные результаты могут быть использованы для выработки исходных данных на имитационное моделирование, а также при подготовке, планировании и проведении экспериментальных исследований многочастотных антенных решеток.

**Ключевые слова:** дальняя зона, многочастотная антенная решетка, пространственно-временной сигнал.

### Общая постановка задачи

Ряд перспективных направлений в развитии многофункциональных радиотехнических систем связан с применением фазированных антенных решеток (ФАР). Особое место среди таких антенн отводится многочастотным антенным решеткам (МЧАР), где каждый излучатель излучает парциальные сигналы с разными средними частотами. Анализ и сравнение таких систем с другими требует применения общепринятых характеристик и параметров, одним из которых является граница дальней зоны (ДЗ) антенны. Из-за существенной немонокromaticности токов в раскрыве МЧАР, эффектов пространственно-временного формирования сигналов, зависимости границ ДЗ от свойств антенны [1] оценивание данной характеристики имеет свои особенности и требует уточнения.

Это обуславливает актуальность цели статьи, которая состоит в выборе критериев оценки границ дальней (фраунгоферовой) антенных решеток с многочастотной модуляцией токов излучателей.

### 1. Выбор и анализ критериев оценки границ дальней зоны

Для определения границы ДЗ  $R_{FZ}$  МЧАР с пространственно-временной модуляцией известно несколько критериев, например [2, 3]:

$$R_{FZ} = \left\{ \begin{matrix} R_{FZ}^{(1)} \\ R_{FZ}^{(2)} \end{matrix} \right\} \geq L^2 \cdot \left\{ \begin{matrix} 2/\lambda_{med}, \lambda_{med} = c/f_{med} \\ 4/\lambda_{min}, \lambda_{min} = c/f_{max} \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где  $R_{FZ}^{(1)}$ ,  $R_{FZ}^{(2)}$  – граница ДЗ при разных критериях ее определения;  $L = (2N + 1) \cdot d$  – длина ФАР;  $d$ ,  $N$  – шаг и количество элементов ФАР;  $\lambda_{med}$ ,  $\lambda_{min}$ ,  $f_{med}$ ,  $f_{max}$  – средняя, минимальная и максимальная длина волны и частота, соответственно.

Использование любого из критериев (1) на практике осложняется способом выбора величин  $\lambda_{med}$ ,  $\lambda_{min}$ . Проиллюстрируем это на примере МЧАР с

эквидистантным частотным распределением (ЧР), когда средняя частота спектра сигнала, подводимого к излучателю, увеличивается или уменьшается вместе с его номером [2]. Тогда мгновенная частота сигнала в  $n$ -ом элементе ( $f_n$ ) будет изменяться в пределах ширины спектра сигнала ( $\Delta S_{part}$ ), подводимого к излучателю, и определяется выражением:

$$f_n = f_0 \pm n\Delta f \pm 0,5\Delta S_{part}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – средняя частота спектра центрального излучателя;  $n$  – порядковый номер излучателя;  $\pm\Delta f$  – шаг увеличения (уменьшения) частоты. Знак третьего слагаемого определяется выбором точки  $f_n$  относительно центра  $\Delta S_{part}$ .

Заметим, что для отсутствия отрицательных частот в спектрах аналитических сигналов, излучаемых МЧАР, должно выполняться неравенство:

$$f_0 \geq N\Delta f + 0,5\Delta S_{part}. \quad (3)$$

На рис. 1 приведен условный вид амплитудно-частотных спектров (АЧС) парциальных сигналов, подводимых к излучателям, по выражению (3).

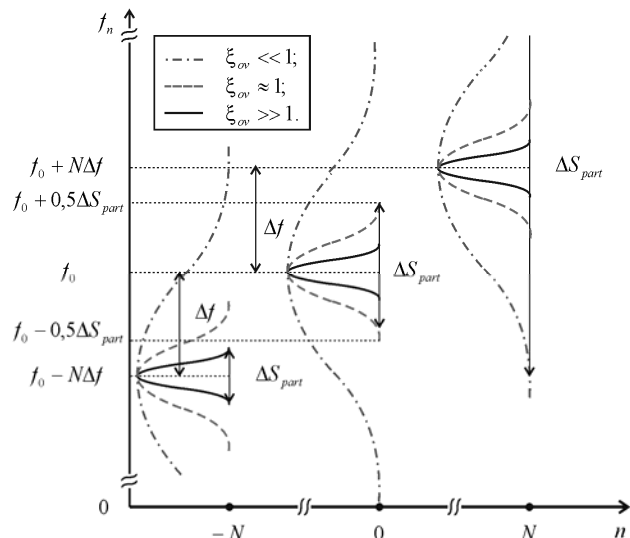


Рис. 1. Распределение спектров сигналов по излучателям решетки

Из рис. 1 следует, что суммарный амплитудно-частотный спектр сигнала существенно зависит от степени перекрытия парциальных спектров по частоте  $\xi_{ov}$ . Поэтому для анализа границ ДЗ необходимо использовать не только общепринятую для сверхширокополосных (СШП) антенн относительную полосу частот  $\delta f$  [2, 3], но и коэффициент перекрытия спектров парциальных сигналов излучателей  $\xi_{ov}$ . Эти величины с учетом (2, 3) могут быть определены в виде:

$$\delta f = \frac{f_L - f_H}{f_L + f_H} = \frac{N\Delta f + 0,5\Delta S_{part}}{f_0}, \quad \xi_{over} = \frac{\Delta f}{\Delta S_{part}}, \quad (4)$$

где  $f_L$ ,  $f_H$  - нижняя и верхняя частоты спектра, соответственно.

При заданном ЧР, на величину  $R_{FZ}$  будет влиять также вид амплитудно-фазового распределения (АФР) в решетке и параметр поля излучения по которому будет определяться граница ДЗ [1].

Оценку  $R_{FZ}$  проведем по величине относительной ошибки в определении границ ДЗ  $\Delta_{\chi,(v)}$  по  $v$ -му критерию и  $\chi$ -му параметру поля излучения от дальности до точки наблюдения  $R$ :

$$\Delta_{\chi,(v)} = 1 - \left| \chi(R) / \chi(R_{FZ}^{(v)}) \right|.$$

В качестве  $\lambda_{med}$ ,  $\lambda_{min}$  определим длину волны, соответствующую средней частоте спектра сигнала центрального излучателя и максимальной средней частоте спектра среди всех сигналов, подводимых к излучателям МЧАР, соответственно.

Поскольку поле МЧАР является зависимым от времени, то в качестве  $\chi(R)$  целесообразно выбрать величину мгновенного максимального коэффициента направленного действия (КНД)  $D_{max}(t, R)$ . По аналогии со случаем монохроматического возбуждения, величину  $D_{max}(t, R)$  ненаправленной в азимутальной плоскости линейной МЧАР можно определить в виде:

$$D_{max}(t, R) = 2 / \int_0^\pi \frac{|E^{\theta,\phi}(\theta, t, R)|^2}{\max |E^{\theta,\phi}(\theta, t, R)|^2} \sin \theta \, d\theta,$$

где  $E^{\theta,\phi}(\theta, t, R)$  - мгновенное распределение напряженности поля на главной поляризации.

Для проведения расчетов использовалась имитационная модель анализа пространственно-временных (частотных) характеристик МЧАР. Модель разработана в среде MATLAB с использованием приложения GUI. Программа позволяет проводить оценку характеристик МЧАР при различных видах, параметрах и типах детерминированных и случайных: амплитудных, фазовых, частотных, временных (спектральных) распределениях токов в излучателях линейной решетки, различной поляриза-

ции и геометрии решетки во всех зонах ее излучения. Расчеты организованы в частотной области, а излучатели решетки представляются в виде совокупности диполей Герца [6].

Как показали расчеты в моменты времени  $\Delta f(t - R/c) = 1, 2, 3 \dots$   $D_{max}(t, R)$  близка к максимальному КНД монохромной решетки, а у фронта и спада пространственно-временного сигнала, величина  $D_{max}(t, R)$  в несколько раз больше его. В первом случае это объясняется когерентным сложением сигналов излучателей в пространстве и времени [4], а во втором - дифференциальной зависимостью поля решетки от токов текущих в ее излучателях [5].

На рис. 2 приведена зависимость  $D_{max}(t, R_{FZ}^1)$ , рассчитанная для МЧАР с характеристиками: тип поляризации - вертикальная, амплитудное распределение в решетке - равномерное, тип парциальных сигналов - прямоугольный радиоимпульс,

$$2N + 1 = 11; d = 0,5\lambda_{med}; \delta_f = 0,25;$$

$$\xi_{ov} = 10; R = 50R_{FZ}^{(2)}.$$

Для простоты анализа при оценке ошибки в определении ДЗ использовался среднее значение мгновенного КНД за время  $\tau_s$  существования пространственно-временного сигнала:

$$\bar{D}_{max}(R) = \tau_s^{-1} \int_{t-R/c}^{t-R/c+\tau_s} D_{max}(R, t) dt.$$

где  $c$  - скорость света.

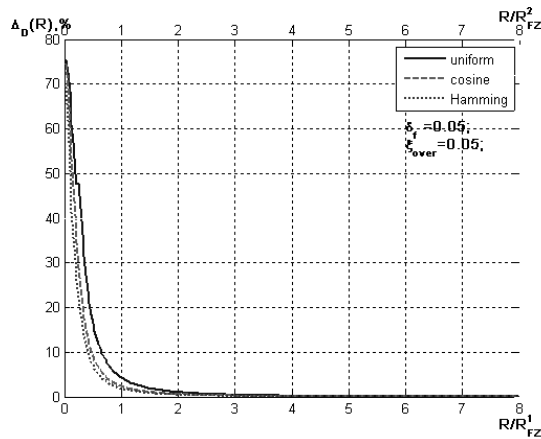
Была проведена серия расчетов  $\bar{D}_{max}(R)$  и  $\Delta_{D,(1,2)}(R)$  с использованием имитационной модели синфазной эквидистантной МЧАР с вертикальной поляризацией при симметричном амплитудном и равномерном частотном распределении (2) и  $d = 0,5\lambda_{med}$ ,  $2N + 1 = 11$ .

В результате расчетов установлено, что зависимость относительной ошибки в определении границ ДЗ монотонно убывает с расстоянием до точки наблюдения. Эта зависимость для всех рассмотренных исходных данных носит характер близкий к  $R^{-1}$ , что объясняется зависимостью амплитуды поля от расстояния в главном максимуме пространственно-временного сигнала МЧАР в окрестности ДЗ. При этом протяженность области монотонного убывания  $\Delta_{D,(1,2)}(R)$  с расстоянием тем больше, чем меньше относительная полоса частот  $\delta_f$ . На расстояниях  $R \leq R_{FZ}^{(1)}$  наблюдается область осцилляций  $\Delta_{D,(1,2)}(R)$ , что может соответствовать переходам точки наблюдения по дальности в промежуточную зону МЧАР и через границы зон Френеля. При этом глубина осцилляций растет вместе с относительной полосой частот сигнала  $\delta_f$ .

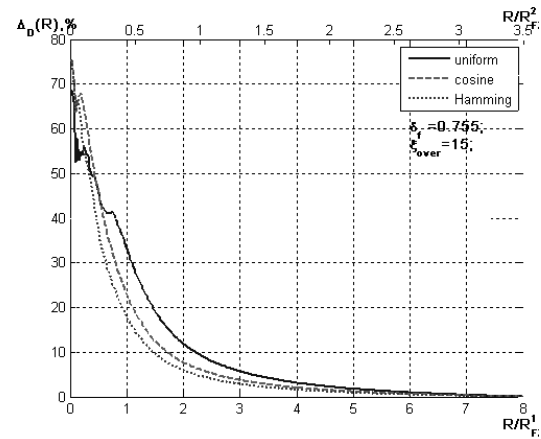
В ходе расчетов установлено, что наибольшая величина относительной ошибки в определении границ ДЗ по величине  $\bar{D}_{\max}(R)$  соответствует критерию  $R_{FZ}^{(1)}$ , а его использование, по сравнению с критерием  $R_{FZ}^{(2)}$ , оправдано для относительно узкополосных МЧАР и в случае большого перекрытия парциальных сигналов излучателей по частоте  $\delta f \approx \xi_{ov} \ll 1$ . При этом величина относительной ошибки не превышает 5%. Это объясняется бли-

зостью абсолютных значений  $\lambda_{med}$  и  $\lambda_{min}$ . Для обоих критериев оценки при  $\delta f \leq 0,9$  величина относительной ошибки  $\Delta_{D,(1,2)}$  тем больше, чем меньше амплитудное распределение спадает к краю решетки. Последнее связано с уменьшением эквивалентного электрического размера МЧАР за счет уменьшения ее геометрической длины и подавления высокочастотных компонент спектра парциальных сигналов излучателей.

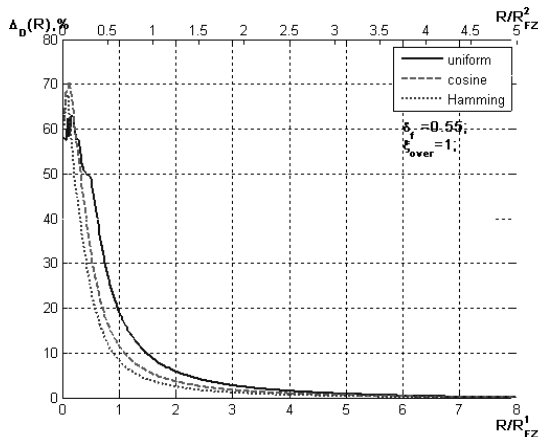
На рис. 2 приведены зависимости  $\Delta_{D,(1)}(R)$ .



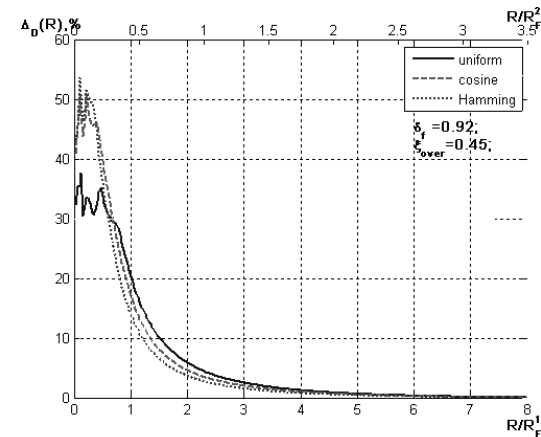
а –  $\delta f=0,05; \zeta_{ov}=0,05$



б –  $\delta f=0,75; \zeta_{ov}=15$



в –  $\delta f=0,55; \zeta_{ov}=1$



г –  $\delta f=0,92; \zeta_{ov}=0,45$

Рис. 2. Зависимости относительной ошибки определения границ дальней зоны от расстояния до точки наблюдения при различных амплитудных распределениях: uniform – равномерное АР; cosine – косинусное; Hamming – распределение Хэмминга

Это свидетельствует о наличии тонких взаимосвязей пространственных и временных характеристик антенн с модуляцией токов в раскрыве.

В табл. 1 приведены значения относительных ошибок определения границ ДЗ. Результаты полученные с помощью имитационной модели МЧАР, для различных амплитудных распределений и значений  $\delta f, \xi_{ov}$ .

Из анализа рис. 2 видно, что величина  $\Delta_{D,(2)}$  растет с расширением относительной полосы частот, однако для наиболее важных случаев  $\delta f < 0,9$ ;

Таблица 1

Относительные ошибки в определении границ ДЗ МЧАР

$\delta f$	$\xi_{ov}$	$\Delta_{D,(1)}, \%$			$\Delta_{D,(2)}, \%$		
		1	2	3	1	2	3
0,05	0,05	4,5	3,5	3	4,5	3,5	3
0,55	1	20	12	9,8	10	6	5
0,76	15	32	22	18	10	6	5
0,92	0,45	20	17	15	5	4	3
0,93	0,93	16,8	18,4	16,3	1,4	1,4	2,7
0,96	13	18,1	37,5	39,1	1,2	1,2	1,2
0,97	$5 \cdot 10^{-4}$	20	11	9	20	11	9

АР: 1 – равномерное; 2 – косинусное; 3 – Хемминга.

$\xi_{ov} > 1$ , когда реализуются достоинства МЧАР (сверхбыстрое сканирование лучом, пространственно-временное формирование СШП сигналов), ошибка не превышает 5-10%, а расстояние  $R_{FZ}^{(2)}$  может быть использовано для грубой оценки границы ДЗ.

Наибольшие ошибки в определении границ дальней зоны  $\Delta_{D,(2)}$  соответствуют случаям сильного перекрытия спектров парциальных сигналов по частоте  $\xi_{ov} \leq 1$ , целесообразность применения которых на практике пока не определена.

## Выводы

1. Предложен подход к оценке границ дальней зоны многочастотных антенных решеток с пространственно-временной модуляцией токов в раскрыве по величине мгновенного КНД и относительной ошибке в определении этого параметра от расстояния до точки наблюдения.

Показано, что при определении границы важно учитывать относительную полосу частот, степень перекрытия спектров парциальных сигналов излучателей и вид амплитудно-фазового распределения в решетке.

2. Для решеток с эквидистантными частотными распределениями целесообразно оценивать границу дальней зоны по электрическим размерам на длине волны, соответствующей максимальной средней частоте из спектров парциальных сигналов излучателей. В этом случае величина ошибки в определении границ не превышает 5-10% в широком диапазоне относительной полосы частот и степени перекрытия спектров парциальных сигналов. Оценки с использованием средней частоты спектра МЧАР дают сравнимо большие ошибки в определении границ дальней зоны.

3. В ходе расчетов установлено, что ошибки в определении дальней зоны тем больше, а ее граница тем ближе к МЧАР, чем больше спадает амплитудное распределение к краям раскрыва. При этом протяжен-

ность промежуточной (френелевой) зоны тем больше, а флуктуации мгновенного КНД тем выше, чем больше относительная полоса частот сигналов решетки.

4. Полученные результаты могут быть полезны для правильной выработки исходных данных на имитационное моделирование пространственно-временных характеристик радиолокационных систем на базе ФАР с многочастотной модуляцией токов в раскрыве, а также при подготовке, планировании и проведении экспериментальных исследований таких систем.

## Список литературы

1. Шифрин Я.С. Статистика линейной антенны в зоне Френеля / Я.С. Шифрин, Ю.М. Бородавко, В.А. Назаренко. – Х.: ХИРЭ, 1986. – 162 с.
2. Формирование мощных СШП радиоимпульсов методом пространственно-временного преобразования многочастотного сигнала / Н.В. Воробьев, В.А. Грязнов, А.Н. Иванова, Г.В. Трофимова // Радиоэлектроника. – 2003. – № 4. – С. 21-29.
3. Воробьев Н.В., Грязнов В.А. Формирование СШП импульсных сигналов многочастотными антенными решетками со случайным распределением частот сигналов по элементам апертуры / Н.В. Воробьев, В.А. Грязнов // Сб. трудов 4 Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». – ИРЭ РАН, 2010. – С. 649-653.
4. Особенности использования пространственно-временных многочастотных сигналов для быстрого электронного сканирования РЛС с активной фазированной антенной решеткой / Ю.Н. Седышев, П.Ю. Седышев, В.А. Тютюнник, А.Ф. Шевченко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53, № 4. – С. 5-17.
5. Хармут Х Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи / Х. Хармут. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
6. Shevchenko A.F. Peculiarities of numerical simulation of directional characteristics of antenna array with multi-frequency aperture currents / A.F. Shevchenko, A.V. Bezverkhii, V.I. Samokvit, Yu.N. Sedyshev, etc. [8th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques]. – K.: Ukraine, 2011. – P. 233 – 235.

Поступила в редколлегию 1.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.Н. Седышев, Академия наук прикладной радиоэлектроники, Харьков.

## ОЦІНКА МЕЖ ДАЛЬНОЇ ЗОНИ БАГАТОЧАСТОТНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ З ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ СТРУМІВ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

А.Ф. Шевченко

*Запропоновані критерії оцінки меж дальньої (фраунгоферової) зони антенних решіток з багаточастотною модуляцією струмів випромінювачів. На прикладі багаточастотних лінійних еквідистантних антенних решіток отримані оцінки меж дальньої зони при використанні ряду критеріїв. Отримані результати можуть бути використані для вироблення початкових даних на імітаційне моделювання, а також при підготовці, плануванні і проведенні експериментальних досліджень багаточастотних антенних решіток.*

**Ключові слова:** дальня зона, багаточастотна антенна решітка, просторово-часовий сигнал.

## THE ESTIMATION OF FAR ZONE BOUNDARY OF MULTIFREQUENCY ANTENNA ARRAY WITH SPACE-TIME MODULATION OF RADIATING ELEMENTS CURRENTS

A.F. Shevchenko

*The criteria of estimation of far (Fraunhofer) zone boundary of multifrequency antenna array with multifrequency modulation of currents of radiating elements are offered. On the example of multifrequency linear equidistant array the estimations of boundary of far zone had gotten by using of the several criteria. The finding results will be able to using for preparing of basic data from imitation modeling, and also at preparation, planning and realization of multifrequency arrays experimental researching.*

**Keywords:** the far zone, multi-frequency antenna array, space-time signal.

