

*В.И. ГОМОЗОВ, д-р техн. наук, А.В. ГОМОЗОВ, канд. техн. наук, А.А. ЛОСКУТОВ,
С.В. ТИТОВ*

ПРОСТРАНСТВЕННО-ФАЗОВО-ЧАСТОТНАЯ ФОКУСИРОВКА СИГНАЛОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФАР ПРИ V-ОБРАЗНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ЧАСТОТ

Фокусировка электромагнитного излучения (ЭМИ) в зеркальных антеннах за счет выбора профиля зеркала или выноса облучателя из фокуса и, особенно, в плоских ФАР за счет использования различных способов управления параметрами непрерывных или импульсных сигналов излучателей вдоль апертуры рассматривалась сравнительно широко [1-17]. Фокусировка ЭМИ в антеннах, в которых тем или иным способом компенсируется квадратичная составляющая разности хода лучей от антенны до точки наблюдения, расположенной в ближней (френелевской) зоне, является уже классической и первоначально возникла в интересах решения задачи измерения параметров диаграмм направленности крупноапертурных остронаправленных антенн на сокращенных расстояниях [1-7]. В последние 10-15 лет снова заметно возрос интерес к сфокусированным системам, поскольку с их помощью оказалось возможным решать ряд таких важных задач, как создание высокоэффективных радиотехнических средств (РТС) локации и связи ближнего действия, специальных систем связи между объектами в заданных локальных областях пространства, систем передачи энергии СВЧ лучом и формирования в локальной области пространства высокой плотности электромагнитной энергии (электромагнитный снаряд) и т.д. [7-10,13]. Для решения последних задач предлагается ряд новых методов фокусировки ЭМИ, основанных на использовании как ранее применяемых отдельных, так и комбинированных степеней свободы при управлении параметрами непрерывных или импульсных сигналов излучателей вдоль апертуры плоских ФАР. В частности, оригинальные многостепенные способы управления для фокусировки ЭМИ с помощью плоских ФАР и разнесенных по пространству излучателей предлагаются в [11-18]. При этом обеспечивается формирование сфокусированных пространственно-временных импульсов (ПВИ) как с их сканированием по углам, так и без такого сканирования. Краткое обобщение известных к настоящему времени методов и их классификация по используемым способам управления при фокусировке ЭМИ приводится в [17,18].

Наиболее простой в реализации и перспективный для большинства указанных выше применений метод формирования ПВИ без сканирования по углам, основанный на пространственно-фазово-частотной фокусировке сигналов при V-образной дискретизации частот по обеим сторонам апертуры, для плоских ФАР предлагается в [18]. В связи с этим представляется весьма полезным рассмотреть особенности его использования в других применяемых на практике типах ФАР.

На практике широко применяются, в частности, выпуклые (конформные) ФАР: цилиндрические, кольцевые, конические, сферические, эллиптические и т.п. Выпуклые ФАР имеют особое практическое значение в интересах создания бортовых РТС для летательных аппаратов (самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты), а также наземных (танки, бронетранспортеры, автомобили) и надводных (корабли, катера, яхты) подвижных средств. В отличие от линейных и плоских, выпуклые ФАР имеют ряд особенностей: позволяют получить постоянство эквивалентного излучающего раскрытия, сохраняют при сканировании неизменность свойств направленности антенны, оси излучателей расположены вдоль нормалей к выпуклой поверхности и не параллельны друг другу, за счет выпуклости возможно увеличение шага излучателей до величины длины волны λ и более и др. [19]. Все это обуславливает специфические требования к амплитудно-фазово-частотному распределению поля излучателей и накладывает свои особенности при реализации фокусировки ЭМИ в выпуклых ФАР.

Фокусировка ЭМИ в выпуклых ФАР рассматривается в известной литературе недостаточно, изучен только ряд частных вопросов [19-21]. Так, в [19] рассматривается пространственно-фазовая фокусировка ЭМИ с помощью цилиндрической ФАР в зоне Френеля. В [20,21] предлагается способ быстрого сканирования лучом и параллельного обзора пространства за счет фокусировки ЭМИ в дальней (фраунгоферовской) зоне, по существу, на основе гармонического пространственно-фазово(или частотно)-временного управления сигналами излучателей в кольцевых ФАР. Других работ в этом направлении авторам не известно. В то же время, в [17] рассматривается обобщенный случай пространственно-фазово-частотной (ПФЧ) фокусировки ЭМИ в ближней и дальней зонах для произвольно распределенных по пространству источников излучения. На основе полученных в [17] соотношений ниже проводится анализ, как частного случая, ПФЧ-фокусировки сигналов в цилиндрических ФАР при двумерной V-образной дискретизации частот по апертуре.

Простейшим случаем выпуклых ФАР и в то же время позволяющим исключить второстепенные факторы и выявить основные физические зависимости и возможности по управлению фокусировкой ЭМИ в выпуклых ФАР, являются цилиндрические и кольцевые решетки.

В настоящей статье рассматривается случай фокусировки ЭМИ за счет пространственно-фазово-частотного управления излучением сигналов в каналах цилиндрической ФАР (ЦФАР) с использованием дискретного V-образного закона распределения частот. Такое распределение, как указано выше, позволяет формировать в локальной области пространства ПВИ с высокой плотностью электромагнитной энергии (электромагнитный снаряд) и исключить нежелательное для ряда применений сканирование ПВИ по углам. Для расчета поля излучения, создаваемого цилиндрической ФАР, воспользуемся приближениями физической оптики [4].

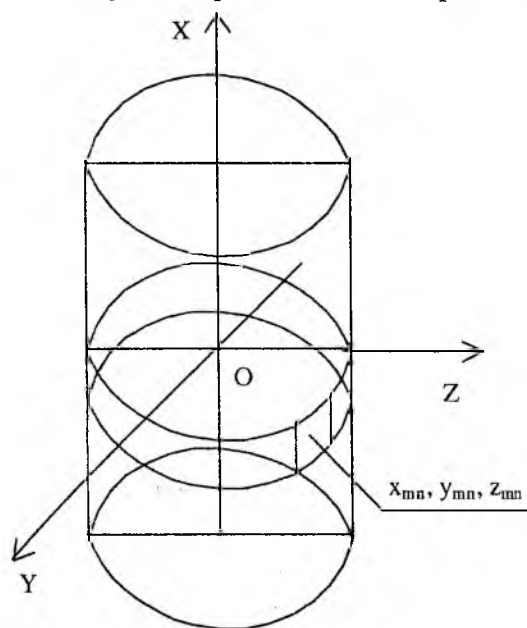


Рис. 1

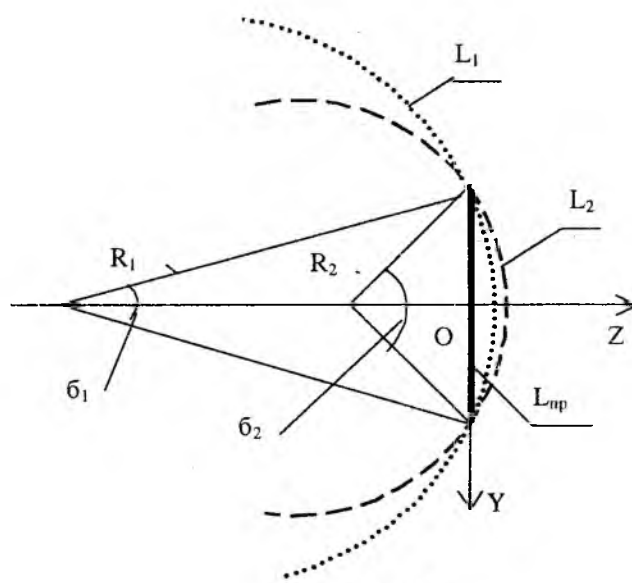


Рис. 2

Будем использовать предложенную в [17] обобщенную математическую модель для общего случая распределенных в пространстве $X Y Z$ (рис.1) излучателей с координатами (x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}) .

Для оценки возможностей взаимосогласованного ПФЧ-управления фокусировкой при излучении сигналов в каналах эквидистантной ЦФАР проведем математическое моделирование. Для анализа структуры поля будем рассчитывать напряженность поля $E(x, y, z, t)$ в районе точки фокусировки с координатами $Z_F(x_F=0; y_F=0; z_F)$, создаваемую излучающим раскрытием. Излучающий раскрытие представляет собой сегмент ЦФАР с

центральный углом α (рис.2). Центральный угол α выбирался для случаев, когда сегмент ЦФАР занимает соответственно часть поверхности ЦФАР $L_1 = L_{\text{ЦФАР}}/8$; $L_2 = L_{\text{ЦФАР}}/4$; $L_3 = L_{\text{ЦФАР}}/3$; $L_4 = L_{\text{ЦФАР}}/2$ ($L_{\text{ЦФАР}} = 2\pi R$, R - радиус ЦФАР) и, следовательно, составляет $\alpha_1=45^\circ$, $\alpha_2=90^\circ$, $\alpha_3=120^\circ$ и $\alpha_4=180^\circ$. При этом принимается условие равенства размеров проекции сегмента ЦФАР на плоскость XOY для всех значений α , т.е. равенства линейных размеров эквивалентного плоского раскрыва $L_{\text{ПР}}$. Такая постановка задачи позволяет в первом приближении выявить основные закономерности, сократив объем расчетов при сопоставительном анализе. Понятие эквивалентного плоского раскрыва описано в [19]. Выражение для расчета напряженности поля в точке фокусировки от распределенных в пространстве источников излучения имеет вид [17]:

$$E(x, y, z, t) = \sum_m \sum_n \sum_z \frac{I_{mn}}{z} \exp \left[-j \left[\begin{aligned} & 2\pi f_{0mn} \left(t - \frac{z}{c} - \frac{\rho_{mn}^2}{2cz} - \frac{\rho^2}{2cz} + \frac{x_{mn}x + y_{mn}y}{cz} \right) + \\ & + 2\pi f_{0mn} \left(\frac{z_{mn}}{c} + \frac{\rho_{mn}^2 + \rho^2}{2cz} z_{mn} - \frac{x_{mn}x + y_{mn}y}{cz} z_{mn} \right) + \varphi_{0mn} \end{aligned} \right] \right], \quad (1)$$

где I_{mn} - амплитуда подводимых к mn -му источнику излучения (каналу ФАР) колебаний; x_{mn} , y_{mn} , z_{mn} - координаты излучателей; f_{0mn} , φ_{0mn} - частота и фаза подводимого к каждому излучателю сигнала; c - скорость света; $\rho_{mn} = \sqrt{x_{mn}^2 + y_{mn}^2}$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Дискретное V-образное распределение частот в выражении (1) определяется в виде:

$$\begin{cases} f_{0mn} = f_0 + |m|\Delta F_x, \text{ если } |m|\Delta F_x \geq |n|\Delta F_y, \\ f_{0mn} = f_0 + |n|\Delta F_y, \text{ если } |m|\Delta F_x < |n|\Delta F_y; \end{cases} \quad (2)$$

где m и n - порядковые номера излучателей по горизонтали и вертикали;

$$m \in \left[-\frac{N_x - 1}{2} \dots \frac{N_x - 1}{2} \right], \quad n \in \left[-\frac{N_y - 1}{2} \dots \frac{N_y - 1}{2} \right];$$

ΔF_x , ΔF_y - шаг частоты по осям OX и OY.

Закон ПФ управления в выражении (1) имеет вид:

$$\varphi_{0mn} = -\frac{2\pi f_{0mn}}{c} \left(z_F - \sqrt{(x_F - x_{mn})^2 + (y_F - y_{mn})^2 + (z_F - z_{mn})^2} \right). \quad (3)$$

При проведении расчетов выберем следующие исходные данные: максимальный разнос частот по апертуре ФАР $\Delta f_{\text{max}}=300\text{МГц}$ и $\Delta f_{\text{max}}=100\text{МГц}$, длина волны $\lambda=0,02\text{м}$, $N_x=N_y=51$, $\Delta F_x=\Delta F_y=\Delta F=8,5\text{МГц}$ - для $\Delta f_{\text{max}}=300\text{МГц}$, $\Delta F_x=\Delta F_y=\Delta F=2,8\text{МГц}$ - для $\Delta f_{\text{max}}=100\text{МГц}$. Расстояние между центрами излучающих элементов ФАР $d=\lambda$ для $R_1=64\lambda$, при уменьшении радиуса кривизны ЦФАР расстояние между излучателями увеличивается, например, при $R_4=25\lambda$ принималось $d=2\lambda$. В качестве излучателя примем изотропный излучатель. Начало системы координат совпадает с геометрическим центром ЦФАР (рис.1).

Координаты излучателей рассчитываются согласно выражениям:

$$y_{mn} = |R \cos \theta_{mn}|, \quad x_{mn} = |m \cdot d|, \quad z_{mn} = R \sin \theta_{mn}. \quad (4)$$

Пусть точка фокусировки находится на оси OZ и имеет координаты $Z_F(x_F=0; y_F=0; z_F)$. Для представления результатов моделирования в наиболее общем виде будем использовать

приведенные координаты: $x^{\Pi} = x/L_x$, $y^{\Pi} = y/L_y$, $z^{\Pi} = z/z_d$, где $z_d = 2L_x^2/\lambda$ - дальняя граница зоны Френеля; L_x и L_y - линейный размер плоского эквивалентного раскрыва ЦФАР по оси ОХ и ОУ соответственно.

На рис.3 показаны необходимые согласно выражению (3) распределения фаз сигналов в каналах ЦФАР радиусом $R_1=64\lambda$ (рис.3а) и $R_4=25\lambda$ (рис.3б) при $Z_F=0,05Z_d$ для $\Delta f_{max}=300\text{МГц}$. Из рис.3 видно, что при фокусировке в точку, находящуюся на дальности $0,05Z_d$, максимальное значение начальной фазы сигнала в каналах ЦФАР для $R_1=64\lambda$ составляет $\varphi_{0mnmax}=58\text{ рад}$, а для ЦФАР с радиусом $R_4=25\lambda$ имеем $\varphi_{0mnmax}=174\text{ рад}$, что существенно больше, чем в случае плоской ФАР [18].

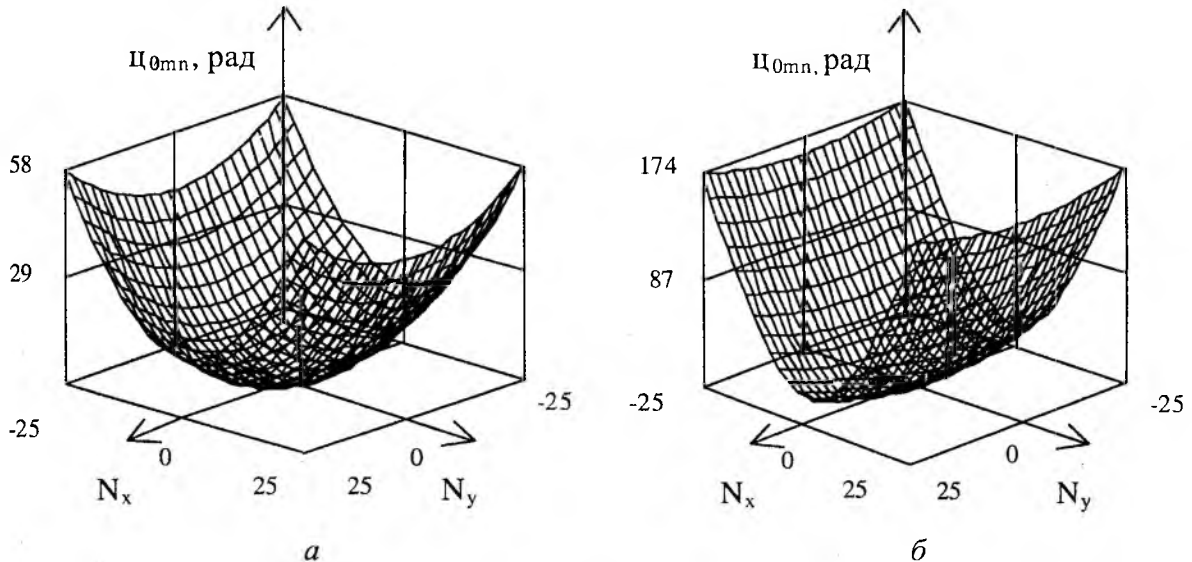


Рис. 3

На рис.4 показаны распределения частот сигналов в каналах ЦФАР, рассчитанные согласно выражению (2) для $\Delta f_{max}=300\text{МГц}$ (рис.4а) и $\Delta f_{max}=100\text{МГц}$ (рис.4б). Распределение частот по излучателям ЦФАР имеет вид четырехгранной пирамиды. Кроме такого распределения частот возможно применение распределений частот с равномерной дискретизацией в виде пирамиды с количеством граней восемь и более, в пределе стремящейся к конусу. Последние виды распределений частот в каналах ЦФАР, как показали предварительные расчеты, приводят к снижению уровня пространственных боковых лепестков и увеличению их количества. Более подробное изложение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

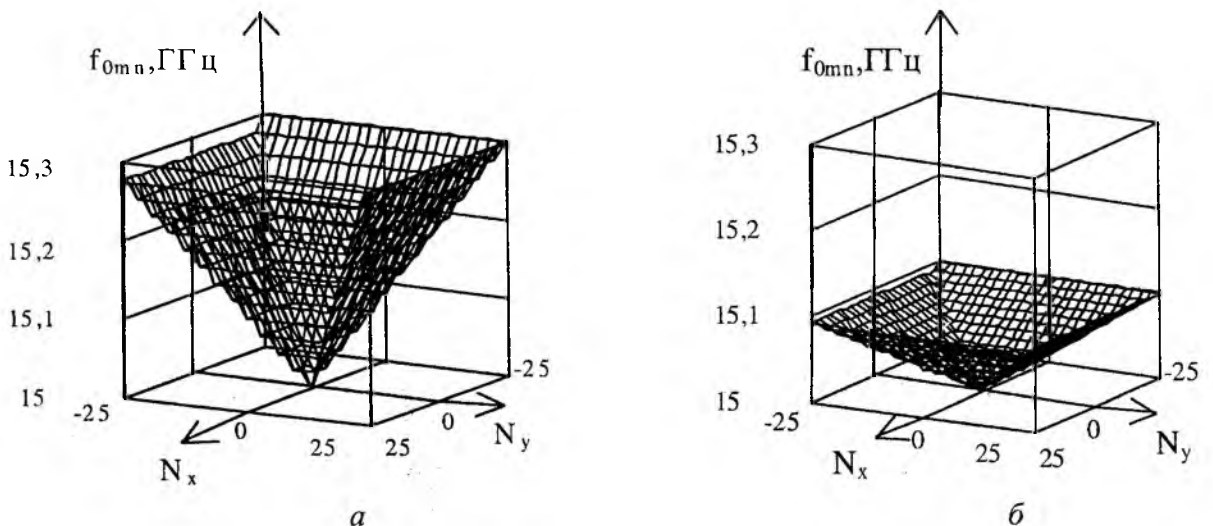


Рис. 4

На рис.5 и 6 представлены для случая взаимосогласованного ПФЧ-управления фокусировкой сечения ПВИ по оси OZ для ЦФАР с радиусами $R_1=64\lambda$, $R_4=25\lambda$ соответственно при разном частоте по апертуре $\Delta f_{max}=300\text{МГц}$ (штрих-пунктирная линия) и $\Delta f_{max}=100\text{МГц}$ (сплошная линия) на дальностях $Z_F=0,2Z_D$ (рис.5а, 6а), $Z_F=0,5Z_D$ (рис.5б, 6б), $Z_F=2Z_D$ (рис.5в, 6в).

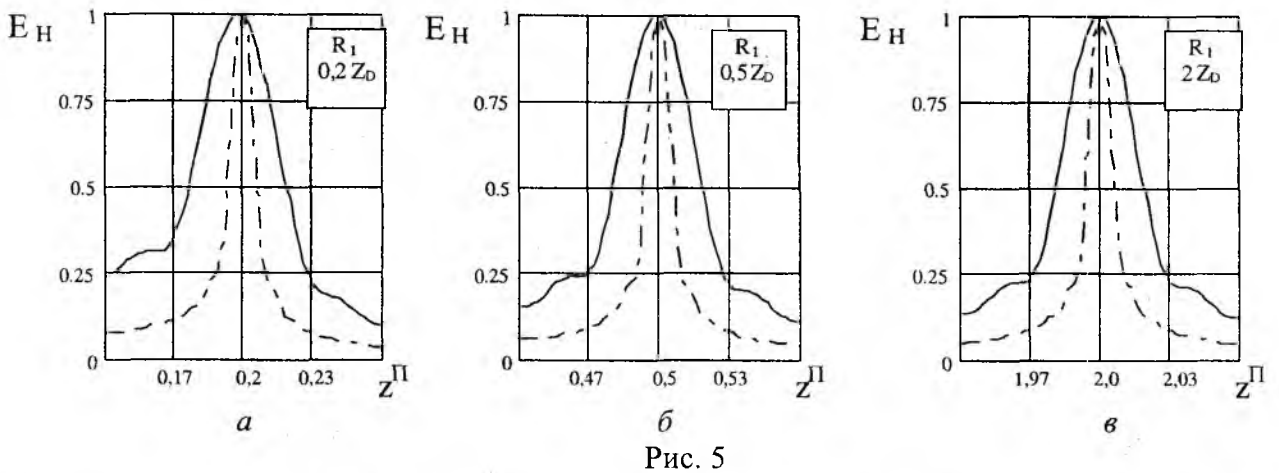


Рис. 5

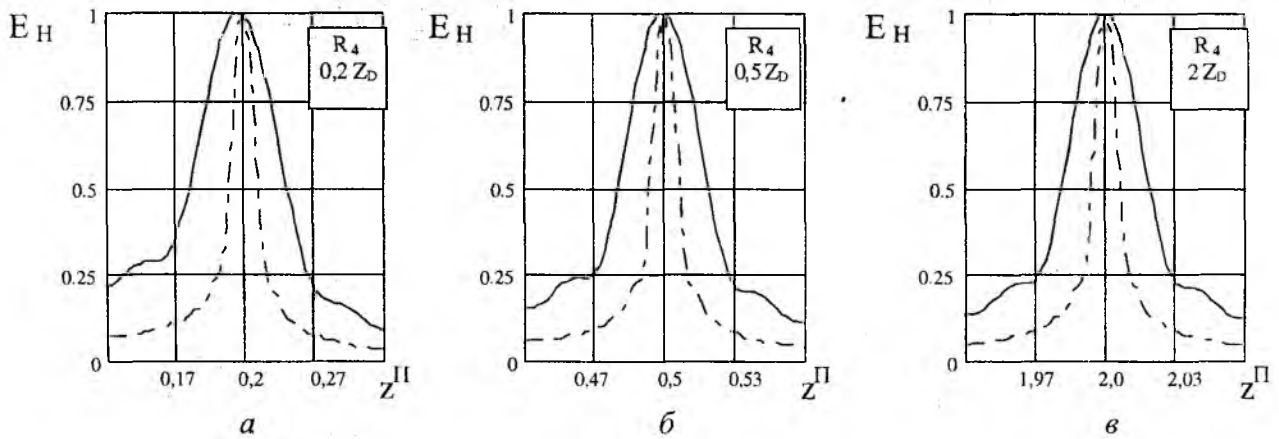


Рис. 6

Из графиков на рис.5 и 6 видно, что протяженность ПВИ по дальности не зависит от расстояния до точки фокусировки Z_F и от кривизны ЦФАР при условии сохранения размеров эквивалентного плоского раскрыва, а зависит от максимального разноса частот по апертуре Δf_{max} и определяется:

$$\Delta Z_F \approx \frac{C}{\Delta f_{max}} \quad (5)$$

ПВИ сохраняет свою протяженность по дальности не только в зоне Френеля, но и в зоне Фраунгофера. Для дальности фокусировки $0,2Z_D$ наблюдается сдвиг максимума ПВИ из точки фокусировки к апертуре. При увеличении максимального разноса частот по апертуре ЦФАР этот сдвиг уменьшается.

Рассмотрим поле в точке фокусировке для случаев наличия и отсутствия дополнительного ПФ управления фокусировкой. На рис.7 приведены графики зависимости нормированного поля при отсутствии (сплошная линия) дополнительного фазового управления фокусировкой и при взаимосогласованном ПФЧ-управлении фокусировкой (пунктирная линия) для ЦФАР с радиусом $R_4=25\lambda$ при $\Delta f_{max}=300\text{МГц}$ на дальностях $Z_F = 0,2Z_d$ (рис.7а), $Z_F = 0,5Z_d$ (рис.7б) и $Z_F = Z_d$ (рис.7в). Нормировка в общих случаях производилась к максимальному значению ПВИ в точке фокусировки при взаимосогласованном ПФЧ-управлении.

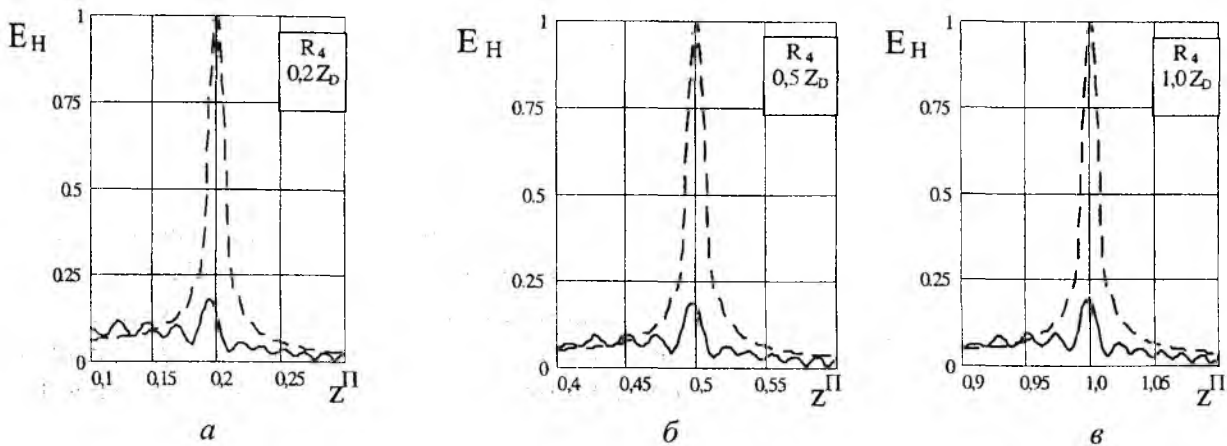


Рис. 7

Из графиков рис.7а, б видно несущественное смещение максимума ПВИ в сторону апертуры при расположении точки фокусировки в пределах зоны Френеля, что является одним из свойств сфокусированных полей как только при ПФ, так и при взаимосогласованном ПФЧ управлении [6,17,18]. Отсутствие ПФ-управления ($\varphi_{0mn} = 0$) в ЦФАР приводит к существенному снижению амплитуды ПВИ и росту относительного уровня пространственных боковых лепестков не только в первой половине зоны Френеля, как для плоских ФАР [18], но и во второй половине зоны Френеля и в зоне Фраунгофера. Это обусловлено тем, что без ПФ-управления фокусировкой в ЦФАР на любых дальностях до точки фокусировки только за счет двумерного V-образного изменения частоты по апертуре нельзя скомпенсировать полностью фазовые набеги, вызванные кривизной ЦФАР. Таким образом, в отличие от плоских ФАР, в ЦФАР рассмотренный метод фокусировки на всех дальностях принципиально может быть реализован только при использовании взаимосогласованного ПФЧ-управления.

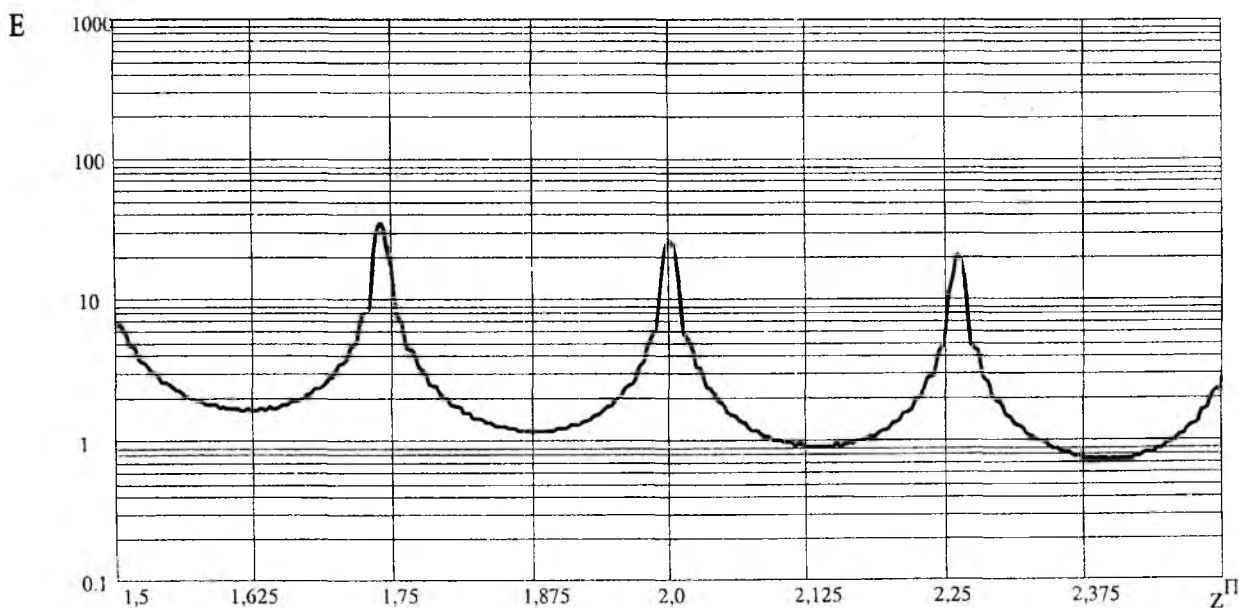


Рис. 8

Рассмотрим структуру поля излучения ЦФАР по нормали к апертуре ФАР. На рис.8 представлен график распределения поля излучения ЦФАР по оси OZ для сигналов с амплитудой $I_{mn}=1$ при ПФЧ-управлении фокусировкой ($\Delta f_{max}=300\text{МГц}$, $\Delta F=\Delta F_x=\Delta F_y=8,5\text{МГц}$). Как видно из рис.8, поле излучения цилиндрической ФАР при V-образном распределении частот представляет собой периодическую последовательность коротких ПВИ при непрерывном излучении ФАР. Амплитуда ПВИ убывает с расстоянием

пропорционально $1/z$. Период следования импульсов определяется как

$$T_{ПВИ} = \frac{Dz}{C} = \frac{1}{\Delta F}, \quad (6)$$

где Dz – расстояние между ПВИ.

Трехмерные графики нормированного поля излучения цилиндрической ФАР, рассчитанные по выражению (3) при $I_{min}=1$ для $Z_F = Z_d$ и $Z_F = 2Z_d$ при $R_l=64\lambda$ приведены на рис. 9 и 10 соответственно. За счет использования V-образного закона ПЧ-управления произошла локализация ЭМИ в заданном угловом направлении. При уменьшении радиуса кривизны происходит увеличение уровня пространственных боковых лепестков. Уровень первого пространственного бокового лепестка для ЦФАР с $R_l=64\lambda$ не превышает $E_{ПБЛ}=0,38E_{max}$.

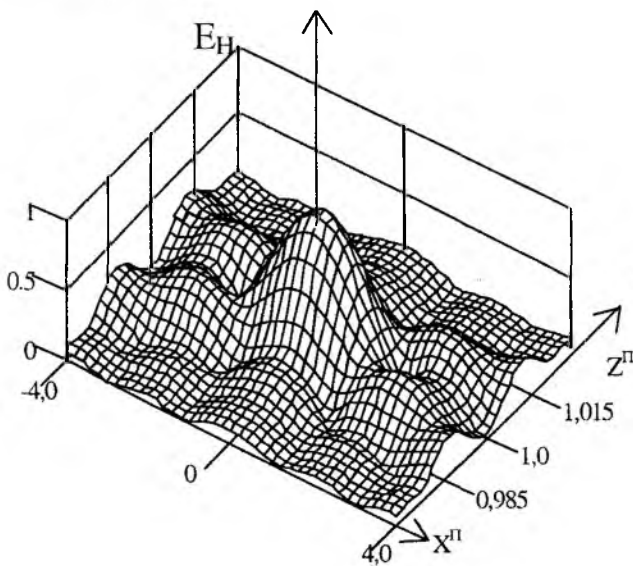


Рис. 9

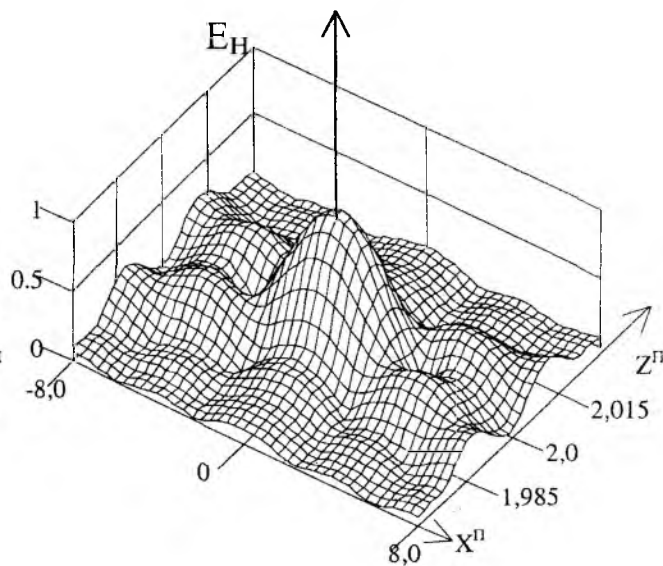


Рис. 10

Проведенное математическое моделирование эквидистантной цилиндрической ФАР с излучающим раскрытием в виде сегмента при взаимосогласованном пространственно-фазово-частотном методе управления фокусировкой ЭМИ в каналах цилиндрической ФАР показывает, что дискретное V-образное распределение частот позволяет формировать в пространстве последовательность коротких сфокусированных импульсов без сканирования по углам.

Выводы:

1. Применение ПФЧ-управления излучением сигналов при V-образной дискретизации частот по апертуре ЦФАР позволяет формировать последовательность коротких ПВИ с заданной протяженностью по дальности, не зависящей от размеров апертуры и расстояния до точки фокусировки без сканирования по углам с относительно малым уровнем пространственных боковых лепестков как в ближней (френелевской), так и в дальней (фраунгоферовской) зонах.

2. Протяженность ПВИ по дальности не зависит также от кривизны ЦФАР и размеров эквивалентного плоского раскрытия, а зависит от максимального разноса частот по апертуре Δf_{max} . Сфокусированный ПВИ сохраняет свою протяженность по дальности при распространении в зоне Френеля и в зоне Фраунгофера.

3. Применение дополнительного ПФ-управления одновременно с взаимосогласованным ПЧ-управлением фокусировкой в ЦФАР, в отличие от плоских ФАР, необходимо для фокусировки ЭМИ как в ближней, так и в дальней зонах.

4. Требуемые законы пространственно-частотного и пространственно-фазового управления, как при непрерывных, так и при длинноимпульсных сигналах, для формирования последовательностей мощных коротких локальных радиоимпульсов определяются из выражений (2) и (3), а параметры таких сфокусированных радиоимпульсов определяются по выражениям (5) и (6).

5. Предлагаемое взаимосогласованное ПФЧ-управление фокусировкой ЭМИ при излучении непрерывных и импульсных сигналов в каналах ЦФАР может быть достаточно просто технически реализовано при использовании освоенных промышленностью элементов СВЧ-трактов.

Список литературы: 1. *Саломонович А.Е., Брауде Б.В., Есепкина Н.А.* К вопросу об измерении параметров остронаправленных антенн в ближней зоне // Тр. Физич. ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. XXVIII. 1965. С. 116-128. 2. *Саломонович А.Е., Брауде Б.В., Есепкина Н.А.* Об измерении параметров остронаправленных антенн в ближней зоне // Радиотехника и электроника. 1969. № 6. С. 67-78. 3. *Вольперт А.Р.* К измерению диаграмм направленности сфокусированных антенных решеток в ближней зоне // Антенны. Сб. статей / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1969. Вып. 6. С. 79-88. 4. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1970. 5. *Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л. и др.* Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1981. 431 с. 6. *Ваганов Р.Б.* Свойства сфокусированных полей // Радиотехника и электроника. 1983. № 5. С. 834-842. 7. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа, 1988. 432 с. 8. *Шелухин О.И.* Радиосистемы ближнего действия. М.: Радио и связь, 1989. 237с. 9. *Гомозов А.В.* Корабельный радиолокатор предупреждения о столкновении с надводными объектами в ближней передней зоне // Вестник междунар. славянского ун-та. Сер. "Технические науки". Харьков. 2000. Т. 3, № 3. С. 19-22. 10. *Лебедев А.Н.* Управление пространственными характеристиками излучения в РЛС с антенными решетками // Радиоэлектроника. 1987. Т. 30, № 11. С. 9-15. (Изв. высш. учеб. заведений). 11. *Циолковски Р.В.* Новые импульсы направленной электромагнитной энергии // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol. 873. 12. *Фельсен Л.В., Хейшан Е.* Методы фокусировки луча от распределенных апертур // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol. 873. 13. *Содин Л.Г.* Импульсное излучение антенны (электромагнитный снаряд) // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 5. С. 1014-1022. 14. *Содин Л.Г.* Характеристики импульсного излучения антенн (электромагнитного снаряда) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, вып. 5. С. 849-857. 15. *Gomozov V.I.* Spatial-Frequency-Phase-Time Modulation of radio Pulses in transmitting PPA // Тез. докл. Междунар. конф. "Теория и техника антенн" (МКТТА-95). Харьков. Ноябрь 1995. 137с. 16. *Gomozov V.I.* Technology of Microwave Radiation Focusing. 6th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology (ISRAMT-97), Beijing, China, 1997, A1-6. 17. *Гомозов В.И., Гомозов А.В.* Новый метод фокусировки электромагнитных излучений // Антенны. 2001. Вып. 3(49). С. 54-60. 18. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в плоских ФАР при V-образной дискретизации частот // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып.122. С. 201-207. 19. *Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И., Филипов В.С.* Выпуклые сканирующие антенны (основы теории и методы расчета). М.: Сов. радио, 1978. 301 с. 20. *Замятин В.И., Батурич О.В., Толкнеев Э.А., Перекабий А.В.* Сверхбыстрое сканирование лучом кольцевой антенной решетки // Радиотехника: Всеукр. межвед. научно-техн. сб. 1999. Вып.109. С. 92-97. 21. *Замятин В.И., Батурич О.В., Толкнеев Э.А. и др.* Гармоническая пространственно-временная модуляция сигналов в кольцевых антенных решетках параллельного обзора пространства // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. 2000. Вып. 125. С. 61-66.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 18.01.2002