

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

К настоящему времени известны уже различные и рассматриваемые, как правило, независимо друг от друга методы фокусировки электромагнитного излучения (ЭМИ), реализуемые с помощью как зеркальных антенн, так и фазированных антенных решеток (ФАР) [1-9]. Наибольшие возможности и гибкость управления параметрами сфокусированного ЭМИ обеспечиваются с помощью ФАР. При этом возможны различные способы управления фокусировкой [3-9]. Каждому из них присущи свои достоинства и недостатки. Классифицировать методы фокусировки ЭМИ, в первую очередь, целесообразно по этим способам управления.

Рассмотрим поле излучения ФАР в точке наблюдения в заданный момент времени, для описания которого и определения возможностей по управлению его структурой будем использовать математическую модель вида скалярного дифракционного поля по Кирхгофу [2,10,11]. Результирующее поле в точке наблюдения $P(x_n, y_n, z_n)$ той же поляризации что и излучателей описывается скалярным полем $E(x_n, y_n, z_n)$ и находится путем интегрирования элементарных излучающих элементов на площадке $dx dy$ по всей апертуре S . Скалярное поле дифракции Френеля-Кирхгофа выражается уравнением [10]:

$$E(x_n, y_n, z_n) = \frac{1}{4\pi} \int_S G(x, y) \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\left(jk + \frac{1}{r} \right) \cdot \cos(n, r) + jk \cdot \cos(n, s) \right] dx dy, \quad (1)$$

где $G(x, y)$ – распределение поля в плоскости апертуры; (n, r) – угол между нормалью к плоскости апертуры и направлением r ; (n, s) – угол между нормалью к плоскости апертуры и вектором Пойтинга поля на апертуре; $k = 2\pi/\lambda = \omega/C$, где λ – длина волны; ω – круговая частота излучения; C – скорость распространения ЭМИ.

Почти для всех распределений поля по апертуре, при которых энергия концентрируется вдоль оси Z , угол (n, s) очень близок к нулю и $\cos(n, s) \approx 1$. При интегрировании для получения поля в зоне Френеля и Фраунгофера можно также использовать следующие упрощения: членом $1/r$ в круглых скобках выражения (1) можно пренебречь по сравнению с $k = 2\pi/\lambda$; множитель $1/r$, стоящий перед скобками, приближенно равен $1/R$. В свою очередь, $\cos(n, r) = \cos(n, R) = \cos \theta$, где θ – угол между направлением в точку, в которой определяется поле, и осью OZ . Поэтому с целью упрощения выкладок без ущерба для выявления основных закономерностей управления размерами сфокусированного ЭМИ аддитивные фазовые добавки (или временные и частотные) также можно не учитывать и принять $\cos \theta \approx 1$.

С учетом вышесказанного выражение (1) для напряженности электрического поля в точке наблюдения в заданный момент времени можно представить в виде суперпозиции полей, создаваемых каждым источником излучения [2,10]:

$$E(x, y, z, t) = \left\| \sum_{n=1}^N \frac{J_n(x, y, z, t)}{R} \exp \left\{ -j \left(2\pi f_n(x, y, z, t) \left(t - \frac{R}{C} \right) + \varphi_n(x, y, z, t) \right) \right\} \right\|, \quad (2)$$

где $R = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2}$ – расстояние между точкой наблюдения с координатами (x, y, z) и центром n -го источника излучения с координатами (x_n, y_n, z_n) ; $J_n(x_n, y_n, z_n, t)$, $f_n(x_n, y_n, z_n, t)$, $\varphi_n(x_n, y_n, z_n, t)$ – соответственно амплитуда, частота и начальная фаза подводимых к n -му источнику излучения (каналу ФАР) колебаний, N – общее количество излучателей. Выражение (2) получено без учета взаимных связей между излучателями и с учетом формул запаздывающих потенциалов [8].

Из (2) видно, что с точки зрения возможных степеней свободы могут быть использованы следующие виды управления пространственным распределением токов для формирования пространственной структуры ЭМИ в заданной точке наблюдения:

- пространственно-амплитудное (ПА);
- пространственно-частотное (ПЧ);
- пространственно-временное (ПВ);
- пространственно-фазовое (ПФ);
- взаимосогласованные комбинированные с одновременным использованием соответствующих комбинаций из четырех предыдущих.

Таким образом, можно предложить следующую классификацию для рассмотренных в [3-9] методов фокусировки ЭМИ по используемым степеням свободы при управлении:

- 1) фокусировка ЭМИ на основе ПВ управления;
- 2) фокусировка ЭМИ на основе ПФ управления;
- 3) фокусировка ЭМИ на основе взаимосогласованного пространственно-фазово-частотного (ПФЧ) управления;
- 4) фокусировка ЭМИ на основе взаимосогласованного пространственно-фазово-частотно-временного (ПФЧВ) управления;
- 5) фокусировка ЭМИ на основе взаимосогласованного пространственно-амплитудно-фазово-частотно-временного (ПАФЧВ) управления.

Фокусировка в зоне Френеля непрерывных монохроматических и длинных простых импульсных сигналов с помощью зеркальных антенн и плоских ФАР конечных размеров на основе ПФ и ПВ управления относится к традиционной и классической. Используемая при этом ПФ степень свободы для управления фокусировкой ЭМИ является также одной из основополагающих при всех других известных методах. Основное достоинство в случае длинноимпульсных сигналов состоит в относительной простоте технической реализации. Основными недостатками являются необходимость использования весьма крупноапертурных антенн для обеспечения фокусировки ЭМИ на больших дальностях, существенная зависимость протяженности сфокусированного ЭМИ от дальности до точки фокусировки и возможность фокусировки только в первой половине зоны Френеля.

Взаимосогласованное ПАФЧВ управление, рассмотренное в [4-6], показало, что при возбуждении антенны короткими (вплоть до пикосекундных) импульсами стороннего тока с задержками, квадратично зависящими от координат x_n и y_n излучателей в плоскости ФАР ($z_n=0$) в сочетании со специальными амплитудно-частотными мерами можно обеспечить фокусировку ЭМИ на большие расстояния с сохранением их формы в выбранной точке или заданном угловом направлении. Основным недостатком является то, что при этом необходимы принципиально новые разработки сверхширокополосных устройств формирования сигналов и элементов каналов передающих ФАР, техническая реализация которых на современном уровне развития техники пока невозможна.

Более эффективны методы фокусировки ЭМИ на основе взаимосогласованного ПФЧ и ПФЧВ управления, которые лишены большинства недостатков и объединяют основные достоинства указанных выше методов. Основными достоинствами этих методов являются не только то, что они обеспечивают высокую концентрацию энергии сфокусированных ЭМИ в узких пространственно-временных интервалах (вплоть до наносекундных) в первой половине зоны Френеля и сохраняют их форму при распространении в заданном угловом направлении во второй половине зоны Френеля и в зоне Фраунгофера при несущественной для практики зависимости от размеров апертуры плоской ФАР, но и то, что они обеспечивают высокую скорость сканирования сфокусированного ЭМИ (за время усредненной длительности импульсов излучателей ФАР) в пределах заданного в пространстве отрезка прямой. Причем все это реализуется при практически освоенных традиционных типах элементов трактов плоских ФАР и технических требованиях к их параметрам. В [7] показано, что, начиная со второй половины зоны Френеля, протяженность пространственно-временного импульса (ПВИ) сфокусированного ЭМИ постоянна, не зависит от дальности до точки фокусировки, слабо зависит от размера ФАР, в основном определяется законом ПЧ управления и обратно пропорциональна максимальному разнесу несущих частот сигналов излучателей по раскрытию ФАР. Выигрыш в величине напряженности электрического поля в максимуме ПВИ по сравнению с ФАР только с ПФ управлением на расстояниях до точки фокусировки 0,01...0,25 от дальней границы зоны Френеля несколько выше за счет дополнительной ПЧ фокусировки. Однако синтезированные в [7] квадратичные законы ПФ и ПЧ управления требуют все таки достаточно сложной аппаратной реализации. Так же требуется для ограничения области сканирования использовать ПВ управление сигналами в каждом канале, что приводит к увеличению габаритов и стоимости ФАР.

Ниже предлагается более простой в реализации модифицированный метод фокусировки на основе ПФЧ управления с использованием дискретного V-образного закона распределения частот. Ис-

пользование дискретного V-образного закона ПЧ управления как при непрерывных, так и при любой длительности импульсных сигналах позволяет осуществить фокусировку ЭМИ в заданном угловом направлении, которое, в свою очередь, определяется законом ПФ управления.

Рассмотрим плоскую прямоугольную эквидистантную ФАР размером $L_x=N_x \cdot d$, $L_y=N_y \cdot d$, где $N_x \times N_y=N$ – количество излучателей, d – расстояние между центрами соседних излучателей. Пусть точка фокусировки находится на оси OZ и имеет координаты $P_F(x_F=0; y_F=0; z_F) = P_F(0; 0; z_F)$. Расстояние до точки P_F от каждого излучающего элемента равно:

$$R_{Fmn} = \sqrt{(x_F - x_{mn})^2 + (y_F - y_{mn})^2 + (z_F - z_{mn})^2}.$$

Для плоской прямоугольной ФАР ($z_{mn}=0$) и выбранной точки фокусировки

$$R_{Fmn} = \sqrt{x_{mn}^2 + y_{mn}^2 + z_F^2}.$$

С учетом выражения (2) расчет в декартовых координатах поля излучения, создаваемого плоской квадратной ФАР с апертурными излучателями при V-образном законе распределения частот, будем проводить по формуле для нечетного количества N_x и N_y [12]:

$$E(x, y, z, t) = \left\{ \sum_{m=-\frac{N_x-1}{2}}^{\frac{N_x-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N_y-1}{2}}^{\frac{N_y-1}{2}} \frac{J_{mn}(x, y, t)}{z} \cdot \exp \left[-j \left(2\pi f_{0mn} \left(t - \frac{R_{mn}}{c} \right) + \varphi_{0mn} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где $J_{mn}(x, y, t)$ – амплитуда подводимого к элементарному источнику излучения гармонического сигнала;

$$\begin{cases} f_{0mn} = f_0 + m \Delta F_x, \text{ если } m \Delta F_x \geq n \Delta F_y, \\ f_{0mn} = f_0 + n \Delta F_y, \text{ если } m \Delta F_x < n \Delta F_y; \end{cases} \quad (4)$$

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

$R_{mn} = \sqrt{(x - x_{mn})^2 + (y - y_{mn})^2 + z^2}$ – расстояние до точки наблюдения от каждого излучающего элемента;

$$t_F = \frac{\sqrt{x_F^2 + y_F^2 + z_F^2}}{c}; \quad t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{c};$$

$$\varphi_{0mn} = -2\pi f_{0mn} \left(t_F - \frac{R_{Fmn}}{c} \right). \quad (5)$$

Рассмотрим закон ПФ управления сигналами в каналах выбранной ФАР. Условия когерентного сложения сигналов в заданной точке фокусировки выполняются в случае:

$$2\pi f_{0mn} \left(t_F - \frac{R_{Fmn}}{c} \right) + \varphi_{0mn} = 0,$$

$$\text{где } t_F = \frac{z_F}{c}; \quad \varphi_{0mn} = -2\pi f_{0mn} \left(\frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fmn}}{c} \right).$$

Разложим R_{Fmn} в ряд Тейлора в точке фокусировки и ограничимся первыми двумя членами разложения:

$$R_{Fmn} = z_F \cdot \sqrt{\frac{x_{mn}^2 + y_{mn}^2}{z_F^2} + 1} = z_F + \frac{x_{mn}^2 + y_{mn}^2}{2z_F}$$

С учетом этого имеем:

$$\varphi_{0mn} = -\frac{2\pi f_{0mn}}{C} \left(z_F - z_F - \frac{x_{mn}^2 + y_{mn}^2}{2z_F} \right) = \frac{\pi f_{0mn}}{z_F C} (x_{mn}^2 + y_{mn}^2). \quad (6)$$

Выражение (6) является каноническим уравнением параболоида вращения вокруг оси OZ.

При проведении расчетов были выбраны следующие исходные данные: $\lambda = 0,02\text{ м}$; $N_x = N_y = 33$; $\Delta F_x = \Delta F_y = 10\text{ МГц}$; расстояние между центрами излучающих элементов ФАР равно λ . Для представления результатов моделирования в наиболее общем виде используем также приведенные координаты:

$$x^{\text{II}} = x/L_x, \quad z^{\text{II}} = z/z_d,$$

где $z_d = 2L_x^2/\lambda$ - дальняя граница зоны Френеля; L_x - размер апертуры ФАР по оси OX.

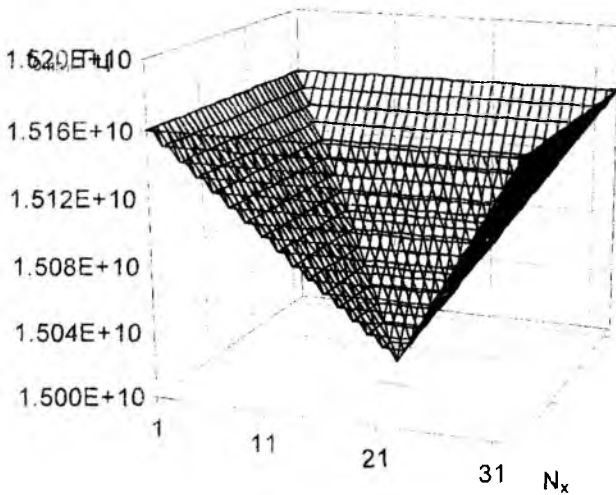


Рис. 1

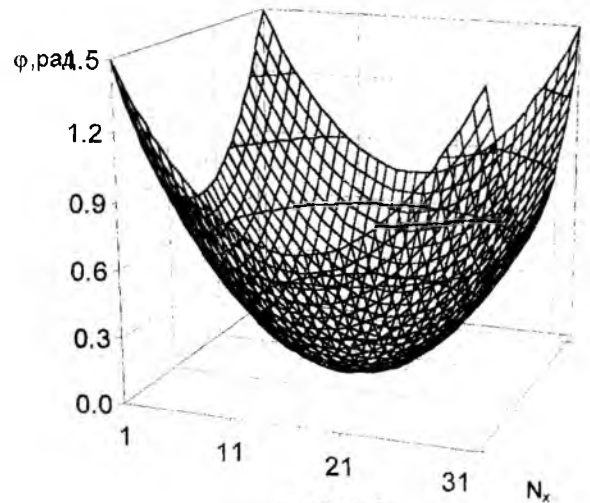


Рис. 2

На рис. 1 и 2 приведен вид распределения несущих частот и начальных фаз по апертуре ФАР в соответствии с выражениями (5) и (6) при $Z_F = 0,5Z_d$. Максимальная разность фаз между излучателями при пространственно-фазово-частотной фокусировке на дальность $Z_F = 0,5Z_d$ составляет $\pi/2$. Соответственно, при увеличении дальности фокусировки $Z_F > 0,5Z_d$ разность фаз между излучателями уменьшается и ПФ управление не оказывает существенного влияния на форму ПВИ (т.е. приближается к случаю, когда $\varphi_{0mn} = 0$).

На рис. 3 и 4 приведен вид нормированного поля излучения плоской ФАР $E_n = E(x, y, z, t)/E_{\text{max}}(x, y, z, t)R_{mn}$, рассчитанного по выражению (3) при $J_{mn}(x, y, t) = 1$ для $Z_F = 0,2Z_d$ и $Z_F = Z_d$ соответственно. За счет использования V-образного закона ПЧ управления произошла локализация излучаемого поля в заданном угловом направлении. Уровень первого бокового пика не превышает $E_{\text{бок}} = 0,35E_{\text{max}}$.

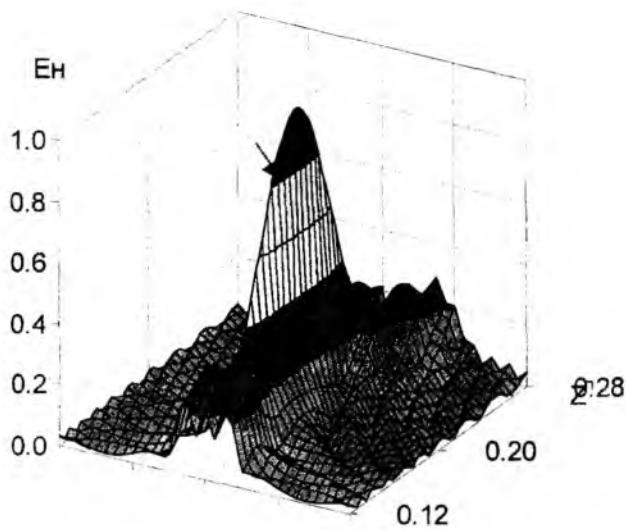


Рис. 3

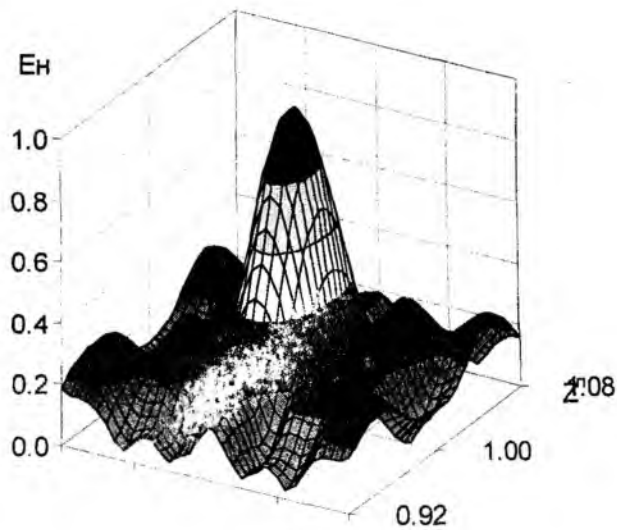


Рис. 4

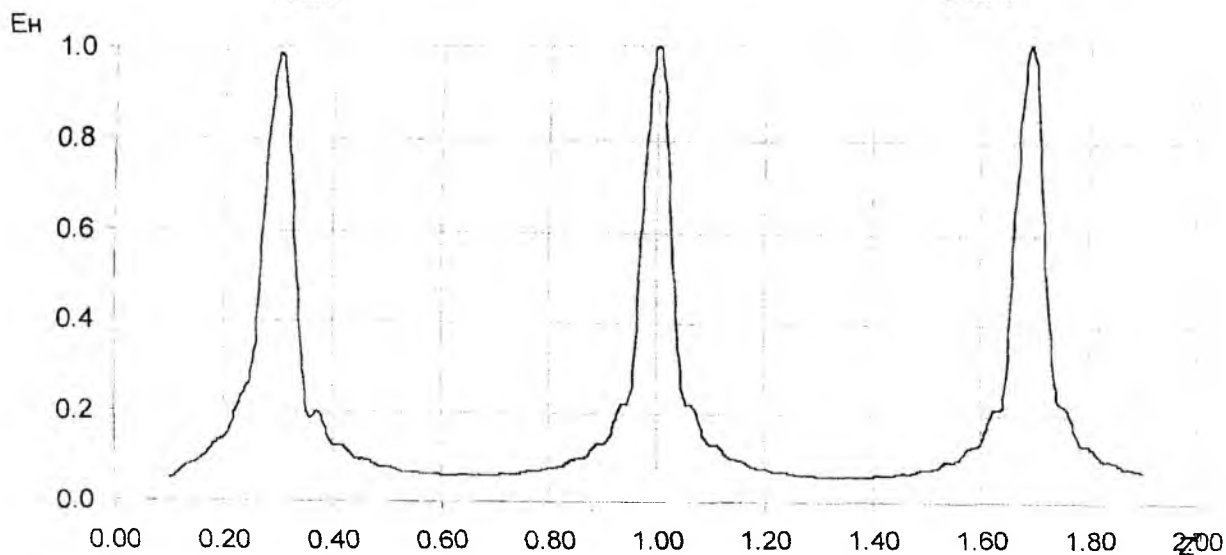


Рис. 5

Рассмотрим структуру поля излучения по нормали к апертуре ФАР. Как видно из рис 5, нормированное поле излучения плоской ФАР при симметричном V-образном распределении частот представляет собой периодическую последовательность коротких пространственно-временных импульсов при непрерывном излучении ФАР. Амплитуда ПВИ убывает с расстоянием пропорционально $1/R$. Период следования импульсов определяется как

$$T_{\text{ПВИ}} = \frac{Dz}{C} = \frac{1}{\Delta F_x}, \quad (7)$$

где Dz – расстояние между ПВИ.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости нормированного поля от дальности для $Z_F = 0,2Z_d$ и $Z_F = 0,5Z_d$ соответственно. Из графиков видно несущественное смещение максимума ПВИ в сторону апертуры при отсутствии фазовой фокусировки, что является одним из свойств сфокусированных полей [13]. Отсутствие ПФ управления ($\varphi_{0mn} = 0$) приводит к снижению уровня максимума ПВИ, но только в первой половине зоны Френеля.

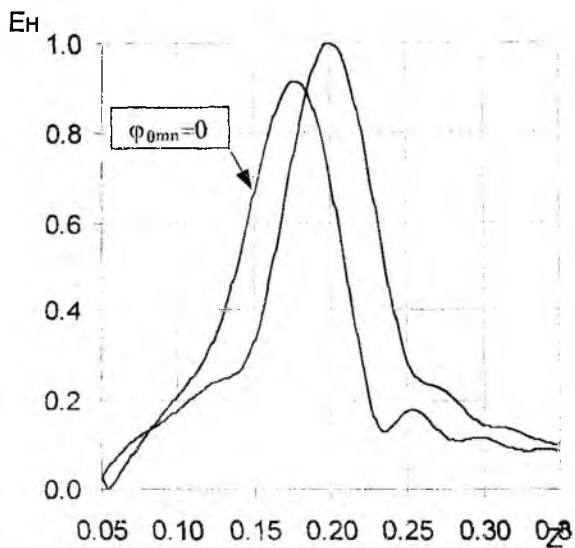


Рис. 6

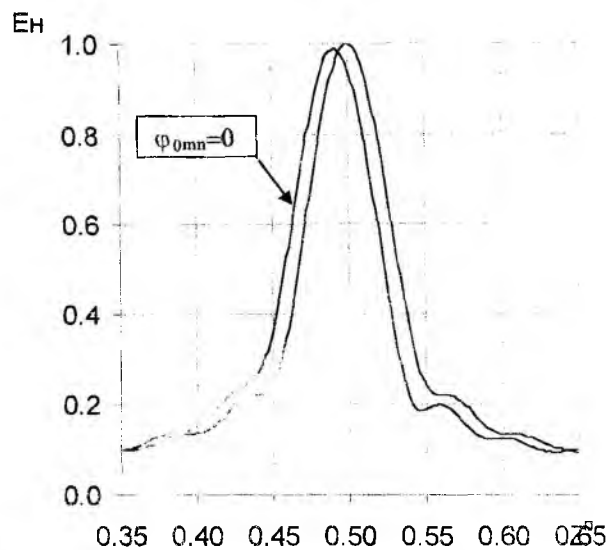


Рис. 7

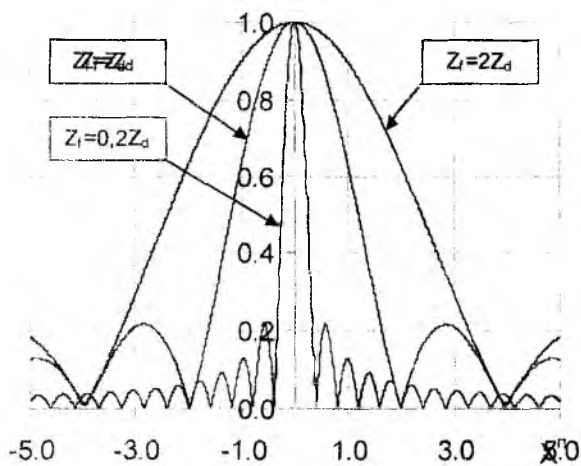


Рис. 8

Протяженность ПВИ по дальности определяется только максимальным разносом несущих частот по апертуре $\Delta F_{x \max}$ и равна

$$\Delta Z_F = \frac{C}{\Delta F_{x \max}} \quad (8)$$

На рис. 8 приведены зависимости нормированного поля от дальности по оси OX^{II} для $Z_F = 0,2Z_d$, $Z_F = Z_d$ и $Z_F = 2Z_d$. Как видно из рис. 8, размер ПВИ по оси OX^{II} зависит от линейных размеров антенны и расстояния до точки фокусировки z_f . Он определяется, как и для синфазных ФАР [2]:

$$\Delta x_F \approx \frac{\lambda}{L_x} \cdot z_f \quad (9)$$

Выводы: 1. Анализ известных методов фокусировки ЭМИ показал, что более эффективны методы фокусировки на основе взаимосогласованного ПФЧ и ПФЧВ управления. Однако сложные законы ПФ и ПЧ управления требуют достаточно сложной аппаратной реализации. Предложенный модифицированный метод фокусировки на основе ПФЧ управления с использованием дискретного V-образного закона ПЧ управления позволяет осуществить локализацию ЭМИ в заданном угловом направлении без сканирования, присущего ранее предложенным в [7] методам ПФЧ и ПФЧВ управления фокусировкой.

2. Применение дискретного V-образного закона ПЧ управления позволяет формировать ПВИ на любой дальности без дополнительного использования ПВ управления, что приводит к упрощению каждого канала и, в целом, к уменьшению габаритов и стоимости ФАР.

3. Предлагаемое взаимосогласованное ПФЧ управление фокусировкой ЭМИ при непрерывных и импульсных сигналах в каналах плоской эквидистантной ФАР (выражения (4) и (5)) может быть достаточно просто технически реализовано при использовании освоенных промышленностью узкополосных СВЧ-трактов.

4. Методом математического моделирования проведен анализ влияния дополнительного ПФ управления фокусировкой ПВИ в зоне Френеля. Исследования показали, что использование взаимосогласованного ПФЧ управления при дискретном V-образном распределении несущих частот по апертуре ФАР позволяет сформировать сфокусированный ПВИ уже в зоне Френеля на расстоянии $Z_f \geq 0,1 Z_d$.

5. Использование симметричного дискретного V-образного распределения несущих частот по апертуре ФАР при непрерывных сигналах позволяет формировать последовательность мощных коротких локальных радиоимпульсов, параметры которых определяются по выражениям (7), (8) и (9) при отсутствии сканирования.

Список литературы: 1. Антенны и устройства СВЧ: Проектирование фазированных антенных решеток / Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Грановская Р.А. и др.; Под ред. Д.И. Воскресенского М.: Радио и связь, 1981. 431 с. 2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с. 3. Лебедев А.Н. Управление пространственными характеристиками излучения в РЛС с антенными решетками // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 1987. Т.30, № 11. С. 9-15. 4. Зиолковски Р.В. Новые импульсы направленной электромагнитной энергии // SPIE. Vol.873. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. 5. Фельсен Л.В., Хейшан Е. Методы фокусировки луча от распределенных апертур // SPIE. Vol.873. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. 6. Содин Л.Г. Фокусировка электромагнитного снаряда // Радиотехника и электроника. 1998. № 2. С. 238-243. 7. Гомозов В.И., Гомозов А.Е. Новый метод фокусировки электромагнитного излучения // Вестник междунар. славянского ун-та. 2000. Т.2, № 3. С. 38-39. 8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля, т.2. М.: Наука. 1988. 510 с. 9. Замятин В.И., Батулин О.В., Толокнеев Э.А., Левагин Г.А., Яловега Н.А. Гармоническая пространственно-временная модуляция сигналов в кольцевых антенных решетках параллельного обзора пространства // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та. 2000. Вып.125. С. 61-66. 10. Сколник М. Справочник по радиолокации. Т.2. М.: Сов. радио, 1977. 408 с. 11. Сильвер С. Антенны сантиметровых волн: Пер. с англ. Под ред. Я.Н.Фельда. М.: Сов. радио, 1950. 12. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977. 440 с. 13. Ваганов Р.Б. Свойства сфокусированных полей // Радиотехника и электроника. 1983. № 5. С. 834-842.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.10.2001