

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

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СФОКУСИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО V-ОБРАЗНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРЕ ПЛОСКИХ ФАР

Исследование структуры поля излучающих систем, использующих различные методы фокусировки электромагнитного излучения (ЭМИ), имеет важное значение для решения многих актуальных задач радиоэлектроники, например, электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных систем, защиты различных объектов от ЭМИ, формирования мощных коротких импульсов, локации ближнего действия. В последнее время резко возрос интерес к созданию скрытых систем связи с объектами, расположенными в заданных точках пространства, а также к фокусировке ЭМИ с целью получить в ограниченном объеме пространства высокую плотность электромагнитной энергии [1-5].

Наибольшие возможности и гибкость управления параметрами сфокусированного ЭМИ обеспечиваются с помощью ФАР. При этом возможны различные способы управления фокусировкой ЭМИ, классификация которых дана в [6]. Как показал анализ различных методов управления пространственным распределением токов по апертуре ФАР для формирования пространственно-временных импульсов (ПВИ) в заданной точке наблюдения, проведенный в [5,6], наиболее эффективны методы фокусировки ЭМИ на основе взаимосогласованного пространственно-фазово-частотного (ПФЧ) и пространственно-фазово-частотно-временного управления. В [5] показано, что, начиная со второй половины зоны Френеля, протяженность ПВИ сфокусированного ЭМИ постоянна, не зависит от дальности до точки фокусировки, слабо зависит от размера ФАР, в основном определяется законом пространственно-частотного управления. Однако синтезированные в [5] квадратичные законы пространственно-фазового (ПФ) и пространственно-частотного (ПЧ) управления требуют достаточно сложной аппаратурной реализации. Также требуется использовать пространственно-временное управление сигналами в каждом канале для ограничения области сканирования, что приводит к увеличению габаритов и стоимости ФАР.

В [6] предложено симметричное одноступенчатое равнодискретное V-образное распределение несущих частот по апертуре ФАР, позволяющее формировать при непрерывных сигналах последовательность мощных коротких локальных ПВИ на любой дальности при отсутствии сканирования. Отсутствие дополнительного пространственно-временного управления и равнодискретное распределение частот приводит к упрощению построения каждого канала и системы управления, то есть к уменьшению габаритов и стоимости ФАР. Недостатком данного метода является сложность гибкого управления скважностью формируемой последовательности ПВИ.

Рассмотрим плоскую прямоугольную эквидистантную ФАР размером  $L_x=N_x d$ ,  $L_y=N_y d$ , где  $N_x \times N_y = N$  – количество излучателей,  $d$  – расстояние между центрами соседних излучателей. За начало системы координат примем центральный излучатель ФАР при нечетном количестве излучателей. Пусть точка фокусировки находится на оси  $OZ$ , проходящей по нормали к апертуре антенны, и имеет координаты  $P_F(x_F=0; y_F=0; z_F) = P_F(0; 0; z_F)$ . Расчет поля излучения в выбранной декартовой системе координат будем проводить для нечетного количества  $N_x$  и  $N_y$  в соответствии со следующим выражением [1,6,7]:

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

где  $J_{mn}(x, y, t)$  – амплитуда подводимого к элементарному источнику излучения гармонического сигнала;  $f_{0mn}$  – закон распределения несущих частот по апертуре ФАР;  $R_{mn} = \sqrt{(x - x_{mn})^2 + (y - y_{mn})^2 + z^2}$  – расстояние до точки наблюдения от каждого излучающего элемента;  $x_{mn}, y_{mn}$  – координаты излучающих элементов;  $\varphi_{0mn}$  – закон распределения начальных фаз по апертуре ФАР.

В [6] показано, что при использовании одноступенчатого V-образного распределения несущих частот по апертуре ФАР и согласованного с ним закона распределения начальных фаз следующего вида:

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

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

где  $\Delta F_x, \Delta F_y$  – разнос частот между соседними излучающими элементами по осям 0X и 0Y;

$$\varphi_{0mn} = -2\pi f_{0mn} \left( t_F - \frac{R_{Fmn}}{c} \right); \quad (3)$$

$$t_F = \frac{\sqrt{x_F^2 + y_F^2 + z_F^2}}{c}; \quad R_{Fmn} = \sqrt{x_{mn}^2 + y_{mn}^2 + z_F^2},$$

в пространстве формируется последовательность ПВИ, распространяющихся по нормали к ФАР. Их характеристики определяются выражениями:

размер ПВИ по оси 0X и 0Y, как и для синфазных ФАР [1,5]

$$\Delta x_F \approx \frac{\lambda}{L_x} z_F; \quad \Delta y_F \approx \frac{\lambda}{L_y} z_F; \quad (4)$$

протяженность ПВИ по дальности определяется максимальным разносом несущих частот по апертуре  $\Delta F_{x \max}$  (или  $\Delta F_{y \max}$ ) [5]

$$\Delta z_F \approx \frac{c}{\Delta F_{x \max}}; \quad (5)$$

период следования импульсов [6]

$$T_{\text{ПВИ}} = \frac{1}{\Delta F_x}. \quad (6)$$

С учетом выражений (5) и (6) скважность сформированной последовательности ПВИ рассчитывается следующим образом:

$$Q = \frac{T_{ПВИ}}{\tau_{ПВИ}} = \frac{\Delta F_{x \max}}{\Delta F_x} = \frac{N_x - 1}{2}. \quad (7)$$

Для решения многих задач радиоэлектроники необходимо оперативно изменять параметры последовательности импульсов при постоянной длительности последних, т.е. изменять скважность. Анализ выражения (7) показывает, что при использовании одноступенчатого V-образного распределения несущих частот по апертуре ФАР скважность сформированной последовательности импульсов жестко связана с количеством излучающих элементов ФАР, если требуется сохранять неизменной длительность  $\tau_{ПВИ}$ . С учетом этого условия, как видно из выражения (7), при использовании закона распределения частот вида (2), для изменения скважности потребуется изменять количество элементов ФАР (либо изменять конструкцию ФАР, либо отключать часть излучающих элементов). Подобные решения нецелесообразны.

При используемом в настоящее время большом количестве излучающих элементов ФАР увеличение скважности реализуется менее сложно. Сложнее обстоит вопрос, когда требуется уменьшить скважность. Как видно из выражения (6), период следования ПВИ определяется разномом частот между соседними излучающими элементами. Следовательно, для уменьшения скважности необходимо увеличивать шаг частот между соседними излучающими элементами ФАР. При этом максимальный разнос несущих частот по апертуре  $\Delta F_{x \max}$  (или  $\Delta F_{y \max}$ ) должен оставаться фиксированным для сохранения выбранной длительности ПВИ (см. выр. (5)). Эти противоречивые требования могут быть удовлетворены при использовании следующего предлагаемого многоступенчатого V-образного закона распределения несущих частот по апертуре ФАР вида:

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + \gamma \left\lfloor \frac{m}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_x, & \text{если } \gamma \left\lfloor \frac{m}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_x \geq \gamma \left\lfloor \frac{n}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_y, \\ f_0 + \gamma \left\lfloor \frac{n}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_y, & \text{если } \gamma \left\lfloor \frac{m}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_x < \gamma \left\lfloor \frac{n}{\gamma} \right\rfloor \Delta F_y, \end{cases} \quad (8)$$

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

где  $\gamma$  – коэффициент уменьшения скважности;  $\lfloor \dots \rfloor$  – оператор округления результата до ближайшего большего целого числа. Коэффициент уменьшения скважности

$$\gamma = \frac{\Delta F_{x \max}}{\Delta F_x Q} = \frac{N_x - 1}{2Q} \quad (9)$$

показывает, во сколько раз увеличивается шаг частоты между соседними ступенями закона частотного распределения (или определяет количество излучающих элементов с одинаковыми несущими частотами в одной ступени частотного распределения). Одноступенчатый V-образный закон распределения несущих частот по апертуре ФАР (см. выр. (2)) является частным случаем выражения (8) при  $\gamma=1$ .

Рассмотрим структуру поля излучения плоской квадратной ФАР (см. выр. (1)) при использовании закона распределения несущих частот по апертуре вида (8) и непрерывных сигналах в каналах ФАР. 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 излу-

чающих элементов ФАР равно  $\lambda$ . Для представления результатов моделирования в наиболее общем виде используем также приведенные координаты:

$$x^\Pi = x/z_d; \quad y^\Pi = y/z_d; \quad z^\Pi = z/z_d,$$

где  $z_d = 2L_x^2/\lambda$  - дальняя граница зоны Френеля.

На рис. 1 и 2 приведен вид распределения несущих частот по апертуре ФАР в соответствии с выражением (8) при  $\gamma=2$  и  $\gamma=4$ . На рис. 3 приведен вид распределения начальных фаз по апертуре ФАР в соответствии с выражением (3) для  $z_F = 0,5z_d$ . Закон распределения начальных фаз одинаков для рассматриваемых случаев частотного распределения и зависит только от дальности до точки фокусировки. Как было показано в [6], при увеличении дальности фокусировки  $z_F > 0,5z_d$  разность фаз между излучателями уменьшается и ПФУ-управление не оказывает существенного влияния на форму ПВИ (т.е. приближается к случаю, когда  $\varphi_{0mn} = 0$ ).

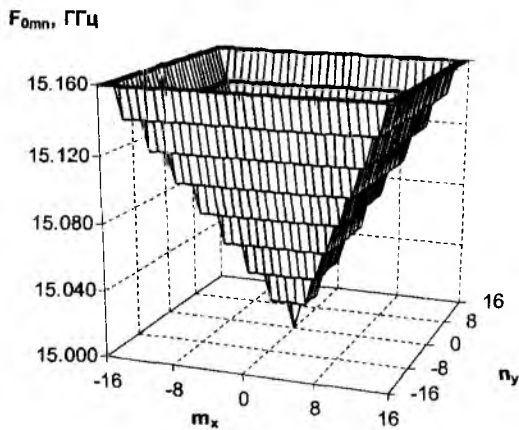


Рис. 1

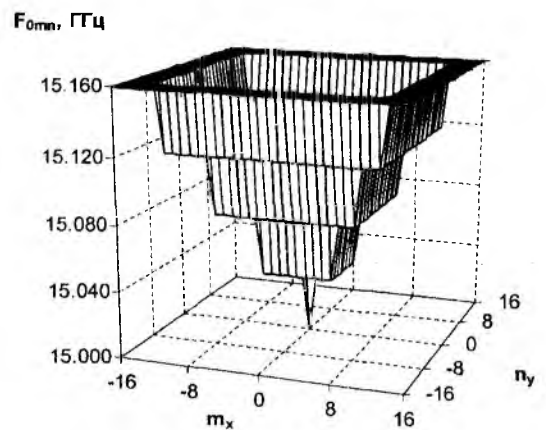


Рис. 2

На рис. 4 и 5 приведен вид нормированного поля излучения плоской ФАР  $E_n = E(x, y, z, t)/E_{\max}(x, y, z, t)R_{mn}$ , рассчитанного по выражению (1) при  $J_{mn}(x, y, t) = 1$ ,  $f_{0mn}$  выр. (8),  $\varphi_{0mn}$  выр. (3) для  $z_F = 0,2z_d$  при  $\gamma=2$  и  $\gamma=4$  соответственно. Использование взаимосогласованного ПФУ-управления распределением токов по апертуре ФАР позволяет сфокусировать ПВИ на расстояниях  $z_F \geq 0,1z_d$ .

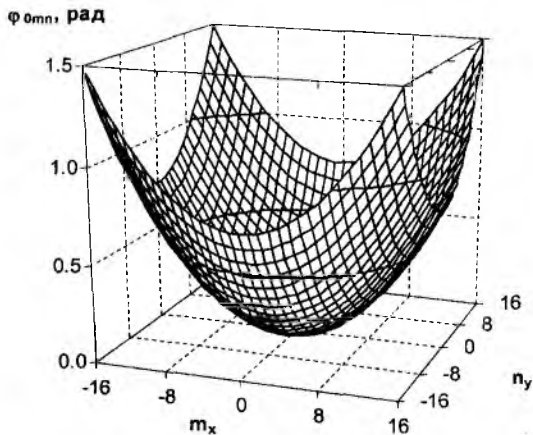


Рис. 3

На рис. 6 и 7 приведен вид нормированного поля излучения плоской ФАР при аналогичных законах распределения частот и фаз для  $z_F = z_d$  при  $\gamma=2$  и  $\gamma=4$  соответственно. Использование многоступенчатого V-образного закона распределения несущих частот по апертуре ФАР позволяет уменьшить скважность сформированной последовательности ПВИ. Уровень первого бокового пика не превышает  $E_{\text{бок}} = 0,35E_{\text{max}}$  и снижается с уменьшением скважности. Период следования ПВИ и их протяженность по дальности определяются, как и в случае одноступенчатого V-образного распределения несущих

щих частот по апертуре ФАР, соответственно только максимальным разном несущих частот по апертуре  $\Delta F_{x\max}$  (или  $\Delta F_{y\max}$ ) и шагом частоты между соседними ступенями закона частотного распределения

$$T_{ПВИ} = \frac{1}{\gamma \Delta F_x} \quad (10)$$

С учетом выражений (7) и (10) скважность сформированной последовательности ПВИ рассчитывается следующим образом:

$$Q = \frac{T_{ПВИ}}{\tau_{ПВИ}} = \frac{\Delta F_{x\max}}{\gamma \Delta F_x} = \frac{N_x - 1}{2\gamma} \quad (11)$$

Как видно из рис. 4-7, размер ПВИ по оси  $OX^{\Pi}$  зависит от линейных размеров антенны и расстояния до точки фокусировки  $z_F$  и определяется, как и для синфазных ФАР (см. выр. (4)).

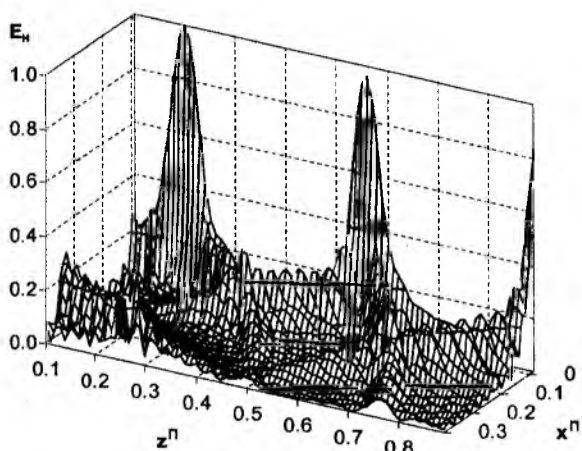


Рис. 4

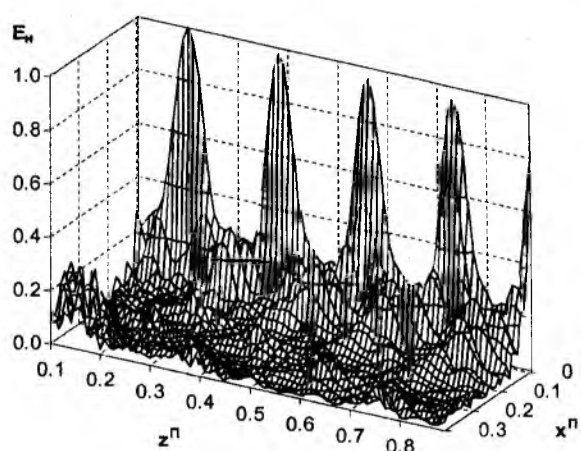


Рис. 5

**Выводы:** 1. Более эффективны методы фокусировки на основе взаимосогласованного ПФЧ- и ПФЧВ-управления. Однако сложные законы ПФ- и ПЧ-управления требуют достаточно сложной аппаратной реализации. Проведенный анализ показал, что предложенный метод фокусировки на основе ПФЧ-управления с использованием многоступенчатого V-образного закона ПЧ-управления позволяет осуществить локализацию ЭМИ в заданном угловом направлении без сканирования, присущего ранее предложенным в [5] методам ПФЧ- и ПФЧВ-управления фокусировкой.

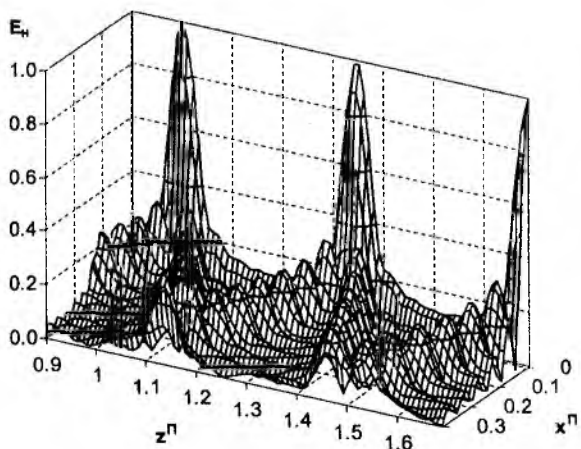


Рис. 6

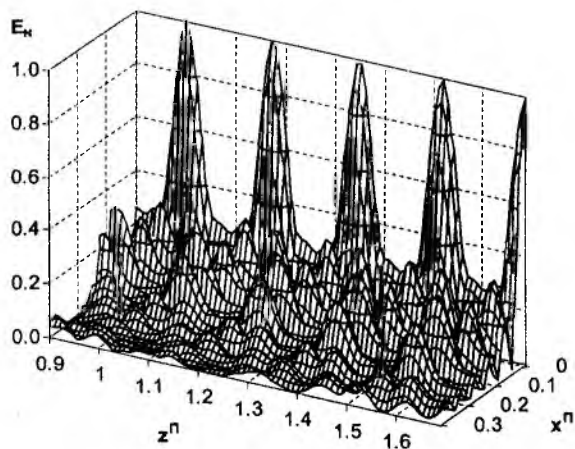


Рис. 7

2. Применение многоступенчатого равнодискретного V-образного закона ПЧ-управления позволяет формировать ПВИ на любой дальности без дополнительного использования ПВ-управления, что приводит к упрощению построения каждого канала и системы управления, то есть к уменьшению габаритов и стоимости ФАР.

3. Предлагаемое взаимосогласованное ПФЧ-управление фокусировкой ЭМИ при непрерывных сигналах в каналах плоской эквидистантной ФАР (выражения (3) и (8)) позволяет регулировать скважность сформированной последовательности ПВИ при неизменной длительности  $\tau_{ПВИ}$  и может быть достаточно просто технически реализовано при использовании освоенных промышленностью узкополосных СВЧ-трактов.

4. Использование симметричного многоступенчатого V-образного распределения несущих частот по апертуре ФАР при непрерывных сигналах позволяет формировать последовательность мощных коротких локальных радиоимпульсов, параметры которых определяются по выражениям (4), (5), (10) и (11).

**Список литературы:** 1. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа, 1988. 432 с. 2. *Зюлковски Р.В.* Новые импульсы направленной электромагнитной энергии // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol. 873. 3. *Фельсен Л.В., Хейшан Е.* Методы фокусировки луча от распределенных апертур // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol.873. 4. *Содин Л.Г.* Характеристики импульсного излучения антенн (электромагнитного снаряда) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 5. С. 849 – 857. 5. *Гомозов В.И., Гомозов А.В.* Новый метод фокусировки электромагнитных излучений // Антенны. 2001. Вып. 3 (49). С. 54 – 60. 6. *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. 7. *Фрадин А.З.* Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977. 440 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 25.09.2002*