

УДК 621.396.677.494

А.И. Коваленко, С.В. Титов

*Харьковская государственная академия культуры, Харьков*

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СФОКУСИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ V-ОБРАЗНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРЕ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

*Проводится краткий обзор методов фокусировки электромагнитного излучения радиотехническими системами на основе взаимосогласованного пространственно-амплитудно-фазово-частотного управления излучаемыми сигналами. Рассмотрен метод формирования последовательностей сфокусированных пространственно-временных импульсов при использовании многоступенчатого V-образного закона распределения несущих частот в многопозиционной системе излучателей. Проведен анализ параметров полученных последовательностей сфокусированных радиоимпульсов и возможностей изменения их скважности.*

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, радиотехнические системы, пространственно-временной импульс, многопозиционная система излучателей, скважность, фокусировка.

### Введение

Создание высокоэффективных радиотехнических средств локации 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 [1 – 5] возможно на базе радиотехнических систем, осуществляющих фокусировку электромагнитного излучения. Для большинства задач, решаемых радиотехническими системами с фокусировкой электромагнитного излучения (ЭМИ) необходима достаточно большая мощность излучения, что дополнительно накладывает жесткие требования к электрической прочности отдельных излучающих элементов и учету их взаимного влияния. В связи с этим представляет интерес исследование методов пространственно-амплитудно-фазово-частотной фокусировки сигналов в многопозиционной системе излучателей.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что фокусировка в зеркальных антеннах и фазированных антенных решетках (ФАР), на сегодняшний день, достаточно хорошо изучена и стала классической. Для осуществления фокусировки используются различные методы управления параметрами излучаемых сигналов. В [5] предложена классификация методов фокусировки ЭМИ по используемым степеням свободы при управлении излучением сигналов в каналах ФАР. При этом возможны различные методы управления фокусировкой.

**Цель статьи** – развитие методов фокусировки электромагнитного излучения на основе пространственно-амплитудно-фазово-частотного управления параметрами излучаемых сигналов в каналах многопозиционных передающих систем.

### Основные расчетные соотношения

Рассмотрим систему из произвольно распределенных в пространстве источников излучения, т.е. многопозиционную передающую систему (рис. 1).

Учитывая условие  $|z_n| \ll R$  (ограничение области расположения излучателей) в [1, 5] получено следующее выражение для напряженности электрического поля, создаваемого многопозиционной системой излучателей (МСИ) в точке наблюдения в заданный момент времени:

$$E(x, y, z, t) = \left| \sum_{n=1}^N \frac{J_n(x_n, y_n, z_n, t)}{R_n} \times \right. \\ \left. \times e^{-j\{2\pi f_n(x_n, y_n, z_n, t)(t-R_n/c) + \varphi_n(x_n, y_n, z_n, t)\}} \right|, \quad (1)$$

где  $R_n = \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2}$  – расстояние между точкой наблюдения с координатами  $(x_n, y_n, z_n)$  и центром n-го излучателя 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 распределение амплитуд, частот и начальных фаз колебаний, подводимых к n-му излучателю; N – общее количество излучателей многопозиционной системы.

Из анализа выражения (1) следует, что за счет специального выбора взаимосогласованного распределения амплитуд, частот и начальных фаз или времен задержки сигналов можно добиться того, что в выбранной точке пространства с координатами  $(x_n, y_n, z_n)$  в окрестности момента времени  $t_f$  возможен скачок функции  $|E(x_n, y_n, z_n, t)|$ . В случае коротких простых сигналов такая фокусировка дости-

гается за счет возбуждения источников излучения импульсами с задержками, обеспечивающими одновременный приход в точку  $P(x_H, y_H, z_H)$  сигналов от всех излучателей.

В случае же длинных радиоимпульсов фокусировка достигается за счет установки преднаме-

ренных фазовых распределений по апертуре. Скачок модуля напряженности поля в локальной области пространства приводит также к скачку значения модуля вектора Умова-Пойтинга, т.е. возможно создание большой плотности потока мощности ЭМИ.

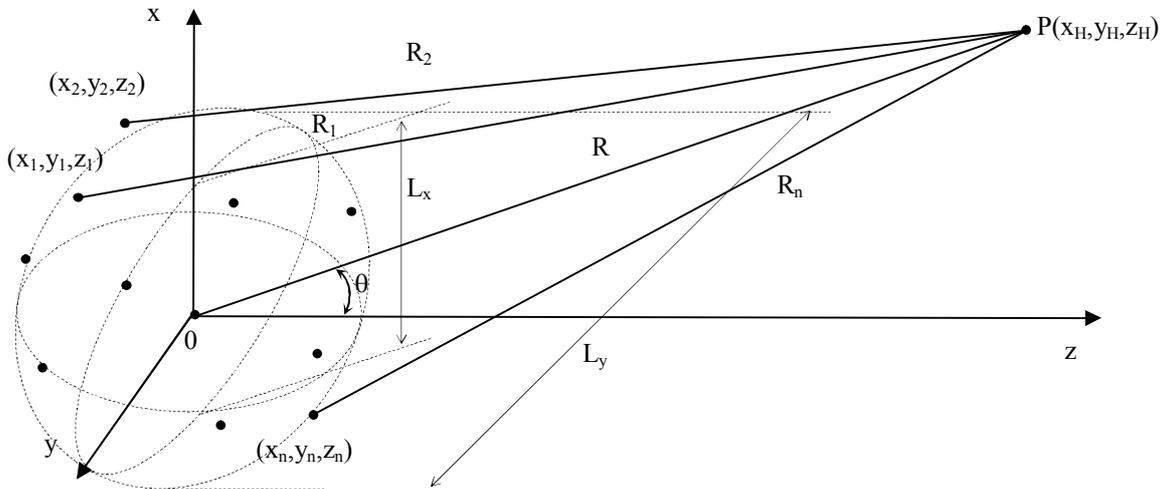


Рис. 1. К расчету поля излучения МСИ

Таким образом, условием существования фокусировки ЭМИ в многопозиционных передающих системах является максимизация фазового множителя (синфазное сложение полей отдельных источников излучения соответствующих частот  $f_n(x_n, y_n, z_n, t)$ ). Этого можно добиться за счет управления параметрами излучаемых сигналов в передающих каналах МСИ, т.е. заданием распределений начальных фаз, несущих частот и управлением временем излучения в различных каналах с учетом распределения источников излучения в пространстве и вида излучаемых сигналов.

### Постановка задачи моделирования

Как показано в [5 – 11] обязательным условием фокусировки (синфазного сложения полей от всех источников излучения в заданной точке пространства) является задание закона пространственно-фазового (ПФ) управления (т.е. обеспечение когерентности излучения). Исходя из этого, МСИ должна быть пространственно-когерентной, т.е. фазовые сдвиги излучаемых сигналов должны быть известны и сохраняться практически неизменными в течение времени, намного превышающем длительность формируемых пространственно-временных импульсов (ПВИ) [10]. Если МСИ рассчитана на работу в определенных интервалах времени, то пространственная когерентность должна сохраняться в каждом из этих интервалов. Периодически необходимо проводить корректировку фазовых сдвигов с помощью какого-либо опорного сигнала, например, от калиб-

рованного источника излучения [11] или точечного отражателя [12].

Пространственно-когерентную МСИ можно рассматривать как единую разреженную антенную решетку заданной пространственной конфигурации. При этом для получения приемлемой структуры сфокусированных ПВИ требуется достаточно большое количество позиций (порядка нескольких десятков и более [5, 11]). Кроме того, для пространственно-когерентных МСИ должны выбираться такие базы между позициями, при которых еще не нарушается пространственная когерентность излучаемых сигналов, либо принимать специальные меры по обеспечению последней.

Как было показано в [10, 13], расчет поля излучения МСИ можно проводить на дальностях, превышающих размер эффективной (эквивалентной апертуры) базы  $L_{эф}$ . При этом необходимо учитывать в амплитудном множителе выражения (1) расстояние  $R_n$  от каждого источника излучения до точки фокусировки.

Для сокращения вычислительных затрат без ущерба для выявления основных физических закономерностей проведем математическое моделирование поля излучения МСИ с параметрами: количество источников излучения  $N=33$ ; излучаемая мощность  $P_n = 10$  кВт ( $P_{изл.} = P_n N = 330$  кВт). Рассмотрим совместное функционирование источников излучения, распределенных по случайному закону внутри сферы с диаметром 10000 м. Для практического обеспечения требований к точности коорди-

натной привязки и союстировки позиций выберем  $\lambda=0,2$  м. Расположим начало прямоугольной системы координат в центре МСИ (см. рис. 1). Ось  $OY$  расположена по вертикали к поверхности земли. При распределении источников излучения по случайному закону внутри выбранной сферы можно предположить, что эффективная база МСИ  $L_{\text{эф}}$  при выборе точки фокусировки в любом направлении будет равна диаметру сферы.

В соответствии с (1) выражение для расчета плотности потока мощности, создаваемой МСИ, имеет вид:

$$S(x, y, z, t) = \left[ \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{A^2(x, y) P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \times \exp\left\{-j \left[ 2\pi f_{0n} \left( t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n} \right] \right\} \right]^2; \quad (2)$$

где  $P_n$  и  $G_n$  – излучаемая мощность и коэффициент усиления отдельного источника излучения;  $A(x, y)$  – амплитудное распределение поля по элементам МСИ.

Относительно функции амплитудного распределения поля по элементам МСИ обычно делают предположение, что она является разделяющейся, т.е.  $A(x, y) = A(x)A(y)$ . В этом случае наиболее общей, традиционной и широко используемой функцией амплитудного распределения поля по излучателям является [14]:

$$A(x, y) = \left[ \mu_x + (1 - \mu_x) \cos^{\alpha} \frac{\pi x_{mn}}{L_x} \right] \times \left[ \mu_y + (1 - \mu_y) \cos^{\beta} \frac{\pi y_{mn}}{L_y} \right]; \quad (3)$$

где  $\mu_x, \mu_y \in (0; 1)$ ;  $\alpha, \beta = 0, 1, 2, \dots$ .

Выбирая параметры  $\mu_x, \mu_y, \alpha, \beta$ , можно с достаточной для практики точностью аппроксимировать всевозможные реальные распределения.

Многоступенчатый V-образный закон пространственно-частотного (ПЧ) управления сигналами в МСИ, при учете сравнительно небольшого количества источников излучения, записывается в следующем виде:

$$f_{0n} = f_0 + \gamma \left[ \frac{|n|}{\gamma} \right] \Delta F_n; \quad (4)$$

где  $n \in \left[ -\frac{N-1}{2}; \dots; 0; \dots; \frac{N-1}{2} \right]$ ;  $\gamma$  – коэффициент уменьшения скважности;  $\left[ \frac{|n|}{\gamma} \right]$  – оператор округления результата до ближайшего большего целого числа.

Коэффициент уменьшения скважности

$$\gamma = \frac{\Delta F_{\text{max}}}{\Delta F_n Q} = \frac{N-1}{2Q} \quad \text{определяет количество излу-}$$

телей с одинаковыми несущими частотами в одной ступени частотного распределения.

Закон распределения начальных фаз для осуществления когерентного сложения полей в выбранной точке фокусировки будет иметь вид:

$$\varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right); \quad (5)$$

где  $R_{Fn} = \sqrt{(x_F - x_n)^2 + (y_F - y_n)^2 + (z_F - z_n)^2}$  – расстояние между точкой фокусировки с координатами  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  и центром  $n$ -го источника излучения с координатами  $(x_n, y_n, z_n)$ .

### Результаты математического моделирования

Распределения несущих частот и начальных фаз в МСИ с  $L_{\text{эф}}=10000$  м, рассчитанных в соответствии с выражениями (4) и (5), при равномерном расположении излучателей по оси  $Ox$  и выборе точки фокусировки с координатами  $(x_F=0, y_F=0, z_F=4,0L_x)$ , приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

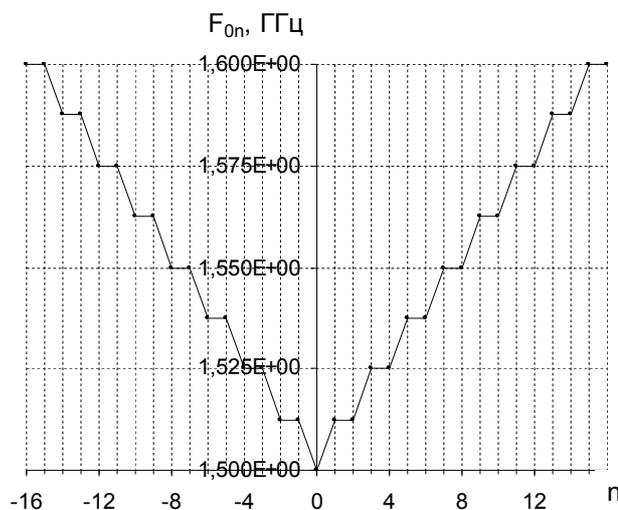


Рис. 2. Распределение несущих частот в МСИ

Для представления результатов моделирования в наиболее общем виде были введены приведенные координаты:

$$x^M = \frac{x}{L_{\text{эф}}}, \quad y^M = \frac{y}{L_{\text{эф}}}, \quad z^M = \frac{z}{L_{\text{эф}}}.$$

На рис. 4 приведен вид нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ по оси  $Oz$   $S_n = S(x, y, z, t) / S_{\text{max}}$  при равномерном распределении излучающих элементов внутри сферы для точки фокусировки  $z_F = 6,0L_x$  при

$x_F = 0$  и  $y_F = 0$ . Анализ результатов проведенного математического моделирования показывает, что при выборе точки фокусировки на дальностях  $z_F \geq 3,0L_x$ , при использовании взаимосогласованного ПФЧ управления сигналами с многоступенчатым V-образным распределением частот, формируется локализованный ПВИ, продольный размер которого соответствует  $\Delta z_F \approx c/\Delta F_{\max}$ .

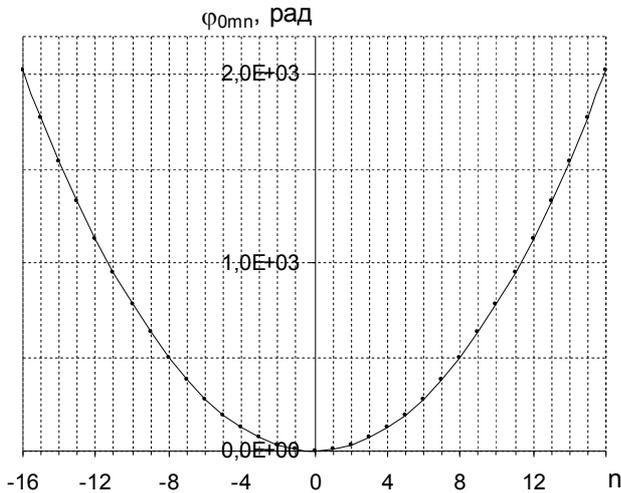


Рис. 3. Распределение начальных фаз в МСИ (для  $z_F=4,0L_x$ )

На рис. 5, а приведено распределение плотности потока мощности МСИ в плоскости X0Z (горизонтальная плоскость), рассчитанное по (2) с учетом (4) и (5), при использовании многоступенчатого V-образного распределения несущих частот по элементам системы в плоскости X0Z для точки фокусировки с координатами

$$P_F(x_F = 0; y_F = 0; z_F = 4,0L_x).$$

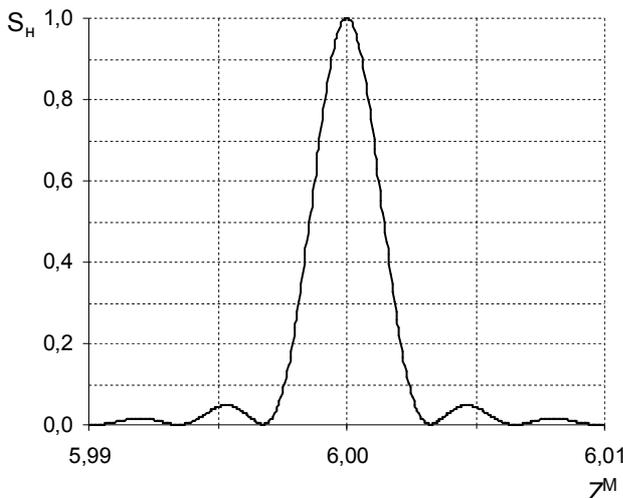


Рис. 4. Распределение нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ в окрестности точки фокусировки

На рис. 5, б приведено распределение плотности потока мощности излучения МСИ в плоскости X0Z для точки фокусировки  $z_F = 24,0L_x$ . Анализ результатов математического моделирования, представленных на рис. 5, показывает возможность формирования коротких ПВИ на дальности  $z \geq 3,0L_x$ . Достаточно большой уровень боковых максимумов определяется разреженностью МСИ и сравнительно небольшим количеством излучателей.

Рассмотрим влияние амплитудного распределения на форму ПВИ.

На рис. 6 представлены значения нормированной напряженности поля МСИ в окрестности точки фокусировки при разных амплитудных распределениях:

1 – равномерное амплитудное распределение  $A(x,y)=1$  с параметрами  $\mu_x = \mu_y = 1, \alpha = \beta = 1$ ;

2 –  $\mu_x = \mu_y = 0,5, \alpha = \beta = 1$ ;

3 –  $\mu_x = \mu_y = 0,2, \alpha = \beta = 1$ .

Как видно из рис. 6, а, применение амплитудного распределения, спадающего к краям, приводит к снижению относительного уровня бокового излучения по оси 0Z, который определяется параметрами  $A(x,y)$ .

На рис. 6, б представлены абсолютные значения напряженности поля МСИ в окрестности точки фокусировки. Из рис. 6, б видно, что снижение уровня бокового излучения сопровождается уменьшением значения максимума ПВИ вследствие снижения коэффициента направленного действия передающей системы при отличии амплитудного распределения от равномерного [1].

Анализ результатов моделирования показывает, что при выборе точки фокусировки на дальности  $z_F = 4,0L_x$  и использовании взаимосогласованного ПФЧ управления сигналами с многоступенчатым V-образным распределением частот вида (4) с  $\Delta F_{\max} = 100$  МГц формируется только один локализованный ПВИ без углового сканирования. С увеличением дальности до точки фокусировки в пространстве формируется последовательность сфокусированных ПВИ, длительность и период следования которых определяются как

$$\tau_{\text{пви}} \approx 1/\Delta F_{\max}$$

и

$$T_{\text{пви}} = 1/\Delta F_n,$$

скважность

$$Q = \frac{\Delta F_{\max}}{\gamma \Delta F_i} = \frac{N_i - 1}{2\gamma},$$

а количество импульсов этой периодической последовательности увеличивается с увеличением значения  $z_F$ .

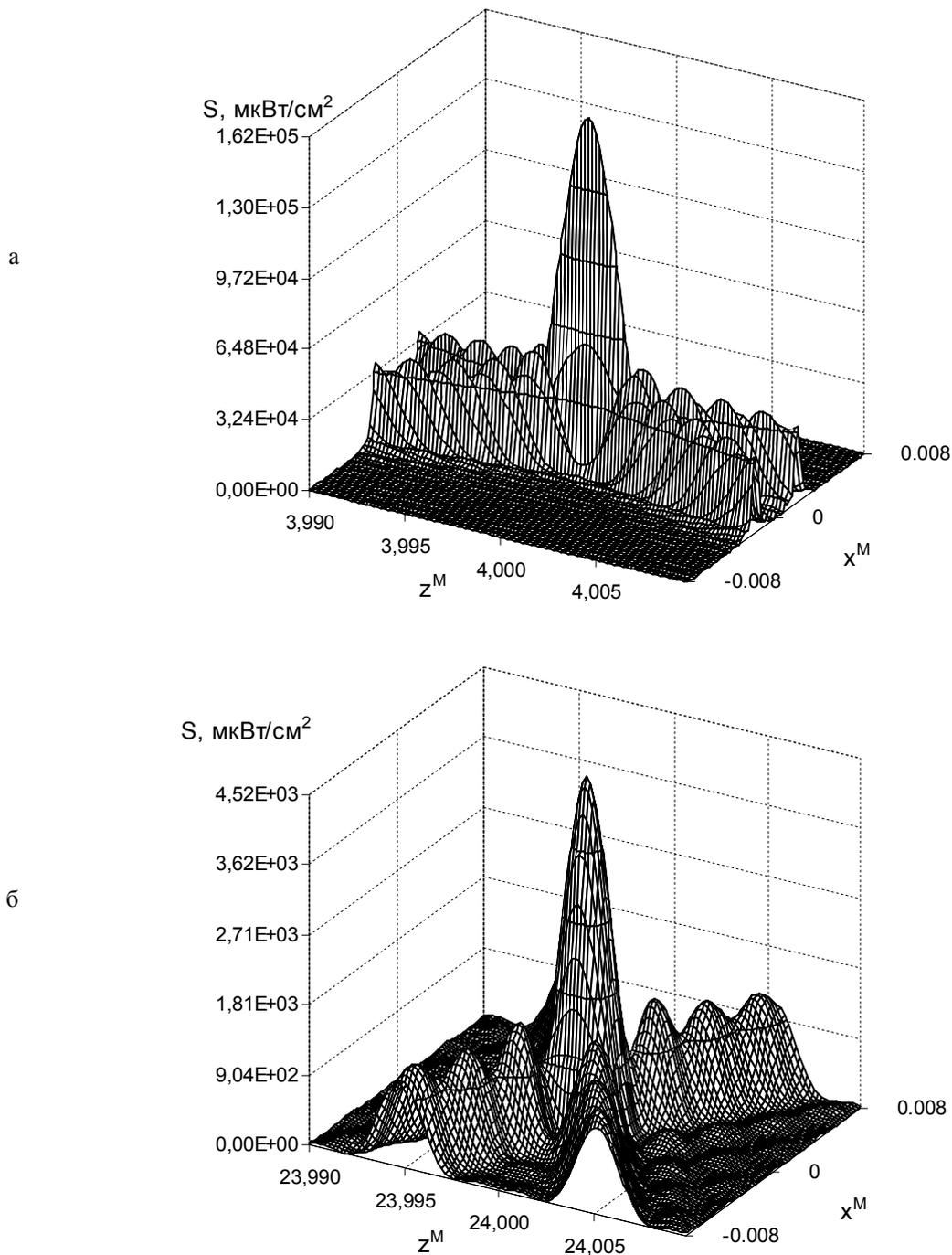


Рис. 5. Распределение плотности потока мощности излучения МСИ в окрестности точки фокусировки:  
 а – для  $z_F=4,0 L_x$ ; б – для  $z_F=24,0 L_x$

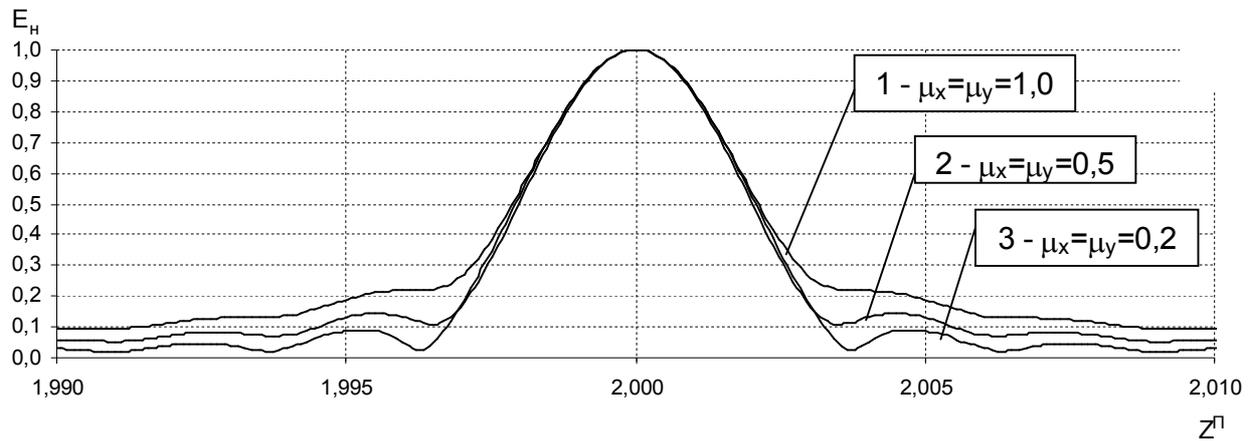
Как показали дополнительно проведенные расчеты, для формирования периодической последовательности ПВИ, состоящей из не менее  $k$  импульсов, необходимо выполнить условие

$$\frac{k c Q}{\Delta F_{\max}} \leq \frac{k_F^2 \lambda z_F^2}{k_{\text{на}} L_{\text{эф}}^2},$$

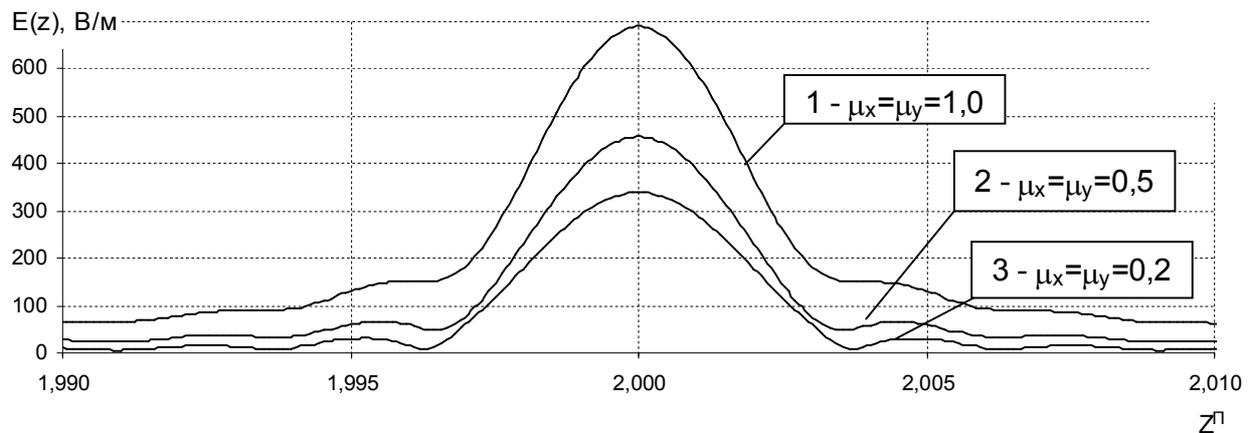
где  $k$  - количество импульсов периодической последовательности;  $k_F \approx 4$ ;  $k_{\text{на}} \approx 0,8$ .

Таким образом, исследование ПФЧ фокусировки

сигналов в МСИ показало, что особенности формирования последовательностей ПВИ определяются, в основном, небольшим количеством позиций и малыми дальностями до точки фокусировки (сравнимыми с размерами эффективной базы МСИ). При таких условиях существенно сказывается влияние ПФ управления фокусировкой на формирование последовательности ПВИ. Проведенное моделирование показало возможность формирования одиночного ПВИ на дальности  $z \geq 3,0 L_x$  и последовательности ПВИ на дальности  $z \geq 10,0 L_x$ .



а



б

Рис. 6. Поле излучения плоской ФАР в окрестности точки фокусировки при разных амплитудных распределениях:

а – нормированные значения;

б – абсолютные значения

## Выводы

1. Анализ результатов математического моделирования поля излучения МСИ при использовании многоступенчатого V-образного распределения несущих частот по апертуре показал, что при излучении непрерывных сигналов в каналах МСИ в заданном угловом направлении формируется последовательность сфокусированных ПВИ.

2. Проведенные исследования показали, что при использовании многоступенчатого V-образного распределения несущих частот в МСИ на дальности  $z_F \geq 3,0L_{эф}$  формируется локализованный ПВИ без углового сканирования и его продольный размер определяется как  $\Delta z_F \approx c/\Delta F_{max}$ . С увеличением дальности до точки фокусировки в пространстве формируется последовательность сфокусированных ПВИ, длительность и период следования которых определяются как  $\tau_{пви} \approx 1/\Delta F_{max}$  и  $T_{пви} = 1/\Delta F_n$ . Размеры сформированных ПВИ по осям OX и OY определяются, независимо от выбранного закона ПЧ

управления сигналами в первом приближении известными соотношениями:

$$\Delta x_F \approx \frac{\lambda}{L_x} z_F; \quad \Delta y_F \approx \frac{\lambda}{L_y} z_F.$$

Количество импульсов этой периодической последовательности увеличивается с увеличением значения  $z_F$ . При произвольном неэквидистантном размещении источников излучения МСИ происходит существенное снижение уровня боковых максимумов.

3. Предложенный метод формирования последовательностей сфокусированных ПВИ на основе использования многоступенчатого V-образного распределения несущих частот по каналам МСИ позволяет формировать в пространстве последовательности сфокусированных ПВИ с заданной длительностью, определяемой максимальным разносом несущих частот по передающим каналам, и любой заданной скважностью.

Гибкое управление скважностью

$$Q = \frac{\Delta F_{\max}}{\gamma \Delta F} = \frac{N-1}{2\gamma}$$

осуществляется за счет увеличения шага частоты между соседними ступенями закона частотного распределения (или увеличения количества передающих каналов с одинаковыми несущими частотами в одной ступени частотного распределения) при сохранении неизменной длительности

$$\tau_{\text{пви}} \approx 1/\Delta F_{\max}.$$

### Список литературы

1. Гомозов А.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, Г.В. Ермаков, С.В. Титов. Под ред. В.И. Го-мо-зова. – Х.: КП «Городская типография», 2011. 330 с.
2. Зиолковски Р.В. Новые импульсы направленной электромагнитной энергии / Р.В. Зиолковски // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. – Vol. 873.
3. Фельсен Л.В. Методы фокусировки луча от распределенных апертур / Л.В. Фельсен, Е. Хейшан // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation, 1988. – Vol.873.
4. Моделирование крупноапертурных ректенн космических энергосистем / В.М. Шокало, А.М. Рыбалко, М.А. Омаров, Д.В. Грецих // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – Вып. 125. – С. 139-144.
5. Гомозов В.И. Новый метод фокусировки электромагнитных излучений / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов // Антенны. – 2001. – № 3(49). – С. 54-60.
6. Гомозов В.И. Пространственно-амплитудно-фазово-частотная фокусировка излучения при многоступенчатом V-образном распределении частот по апертуре многопозиционных систем излучателей / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, С.В. Титов // Прикладная радиоэлектроника.

Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 2006. – Т. 5, № 2. – С. 21-27.

7. Гомозов В.И. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в плоских ФАР при V-образной дискретизации частот / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, С.В. Титов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 2001. – Вып. 122. – С. 201-207.

8. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в цилиндрических ФАР при V-образной дискретизации частот / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, А.А. Лоскутов, С.В. Титов // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – Вып. 127. – С. 42-49.

9. Гомозов В.И. Метод формирования последовательностей сфокусированных пространственно-временных импульсов при использовании многоступенчатого V-образного распределения частот по апертуре плоских ФАР / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, С.В. Титов // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 130. – С. 33-38.

10. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

11. Napier P.J. The Very Large Array: design and performance of a modern synthesis radio telescope / P.J. Napier, A.R. Thompson, R.D. Ekers // Proc. IEEE. – 1983. – Vol. 71, № 11. – P. 1295-1320.

12. Steinberg B.D. First experimental results from the Valley Forge radio camera program / B.D. Steinberg, E.N. Powers, D. Carlson // Proc. IEEE. – 1979. – Vol. 67, № 9. – P. 1370-1371.

13. Многопозиционные РТС / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков/ Под ред. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

14. Шелухин О.И. Радиосистемы ближнего действия / О.И. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1989. – 237 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Ермаков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### МЕТОД ФОРМУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ СФОКУСОВАНИХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ІМПУЛЬСІВ ПРИ БАГАТОСТУПІНЧАТОМУ V-ОБРАЗНОМУ РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРІ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

А.І. Коваленко, С.В. Титов

Проводиться короткий огляд методів фокусування електромагнітного випромінювання радіотехнічними системами на основі взаємозгодженого просторово-амплітудно-фазово-частотного управління випромінюваними сигналами. Розглянуто метод формування послідовностей сфокусованих просторово-часових імпульсів при використанні багатоступеневого V-образного закону розподілення несучих частот в багатопозиційній системі випромінювачів. Проведено аналіз параметрів отриманих послідовностей сфокусованих радіоімпульсів і можливостей зміни їх скважності.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, радіотехнічні системи, просторово-часової імпульс, багатопозиційна система випромінювачів, скважність, фокусування.

### METHOD OF FORMING SEQUENCES FOCUSED SPACETIME IMPULSES AT THE MULTI V-SHAPED FREQUENCY DISTRIBUTION OF MULTI SYSTEMS IN APERTURE EMITTERS

A.I. Kovalenko, S.V. Titov

The brief review of the electromagnetic radiation focusing methods for radio-technical systems on the base of agreed space-amplitude-phase-frequency control by signals radiated is done. We also consider a method of focusing space-time impulses sequences forming when used multi-step V-shape distribution low of the carrying frequencies in multi-position radiators system. The analysis of parameters of obtained focused radio-impulses sequences and possibilities of their porosity changing is done.

**Keywords:** electromagnetic radiation, radio systems, space-time pulse, bahatopozy-ment system emitters, porosity, focus.