

УДК 621.396.677.494

С.В. Титов<sup>1</sup>, Е.В. Титова<sup>2</sup><sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков<sup>2</sup> Харьковская государственная академия культуры, Харьков

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО V-ОБРАЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

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

Системы связи между объектами в заданных локальных областях пространства, системы передачи энергии СВЧ-лучом и формирования в локальной области пространства высокой плотности электромагнитной энергии [1 – 5] могут быть созданы на базе радиотехнических систем, осуществляющих фокусировку электромагнитного излучения (ЭМИ). Большинство задач, решаемых системами с фокусировкой излучения, требуют большую мощность излучения, что дополнительно накладывает жесткие требования к электрической прочности отдельных элементов и учету их взаимного влияния. В связи с этим представляет интерес исследование методов пространственно-амплитудно-фазово-частотной фокусировки сигналов в многопозиционной системе излучателей (МСИ).

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что фокусировка в зеркальных антеннах и фазированных антенных решетках (ФАР) достаточно хорошо изучена и стала классической. Для осуществления фокусировки используются различные методы управления параметрами излучаемых сигналов.

В [5] предложена классификация методов фокусировки электромагнитного излучения по используемым степеням свободы при управлении излучением сигналов в каналах фазированных антенных решеток.

При этом возможны различные методы управления фокусировкой.

**Цель статьи** – развитие методов фокусировки ЭМИ на основе управления параметрами излучаемых сигналов в каналах пространственно-распределенных передающих систем.

### Основные расчетные соотношения

Рассмотрим систему из произвольно распределенных в пространстве источников излучения (рис. 1). Учитывая условие  $|z_n| \ll R$  (ограничение области расположения излучателей) в [1, 5] получено следующее выражение для напряженности электрического поля, создаваемого МСИ в точке наблюдения в заданный момент времени:

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

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

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  $|E(x_n, y_n, z_n, t)|$ . Таким образом, условием существования фокусировки ЭМИ в многопозиционных передающих системах является максимизация фазового множителя (синфазное сложение полей отдельных источников излучения соответствующих частот  $f_n(x_n, y_n, z_n, t)$ ).

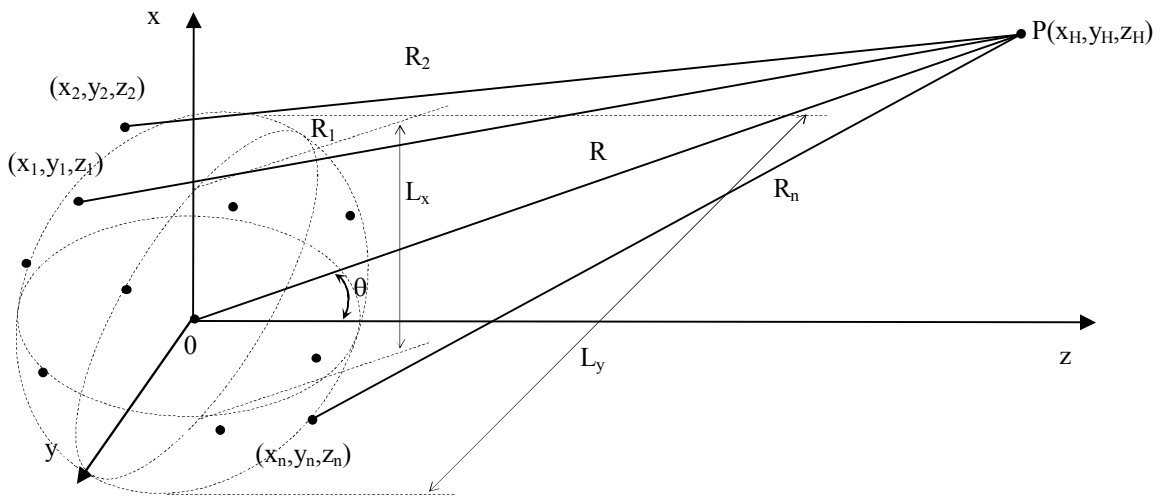


Рис. 1. К расчету поля излучения МСИ

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 [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 калиброванного 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  $L_{\text{эф}}$ . При этом необходимо учиты-

вать 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 ( $P_{\text{изл.}} = P_n N = 330$  кВт). Рассмотрим функционирование источников излучения, распределенных по случайному закону внутри сферы с диаметром 10000 м. Для обеспечения требований к точности 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:

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

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]:

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

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 как

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

где  $n \in [-(N-1)/2, \dots, 0, \dots, (N-1)/2]$ ;  $\gamma$  – коэффициент уменьшения скважности;  $\left[ |n| / \gamma \right]$  – оператор округления результата до ближайшего большего целого числа. Коэффициент уменьшения скважности  $\gamma = \Delta F_{\max} / (\Delta F_n Q) = (N-1) / (2Q)$  определяет количество излучателей 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:

$$\phi_{0n} = -2\pi f_{0n} (z_F / c - R_{Fn} / c); \quad (5)$$

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  $L_{эф} = 10000$  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.

Для представления результатов моделирования в общем виде были введены приведенные координаты:  $x^M = x / L_{эф}$ ,  $y^M = y / L_{эф}$ ,  $z^M = z / L_{эф}$ .

На рис. 4 приведен вид нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ по оси OZ  $S_n = S(x, y, z, t) / S_{\max}$  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 многоступенча-

тым V-образным распределением частот, формируется локализованный ПВИ, продольный размер которого соответствует  $\Delta z_F \approx c / \Delta F_{\max}$ .

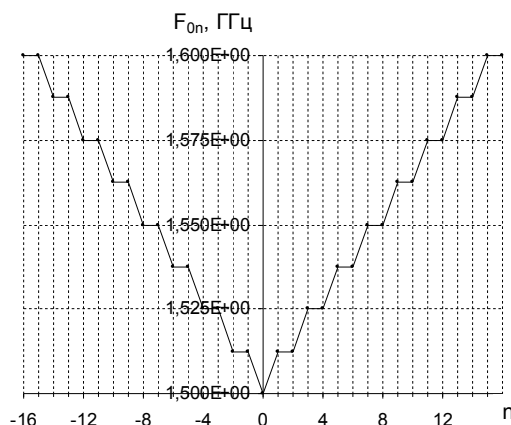


Рис. 2. Распределение несущих частот в МСИ

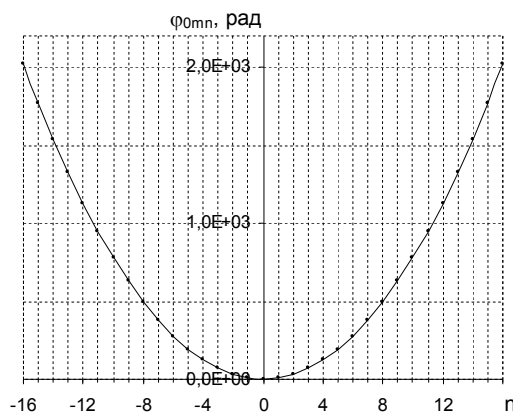


Рис. 3. Распределение начальных фаз в МСИ

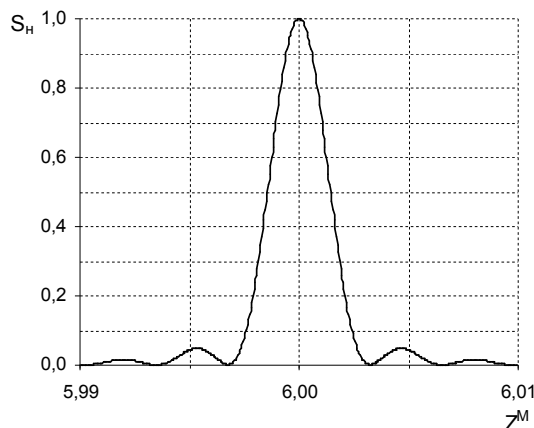


Рис. 4. Распределение нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ

На рис. 5, а приведено распределение плотности потока мощности МСИ в плоскости X0Z (горизонтальная), 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

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

На рис. 5, б приведено распределение плотности потока мощности излучения МСИ в плоскости ХОZ 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.

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.

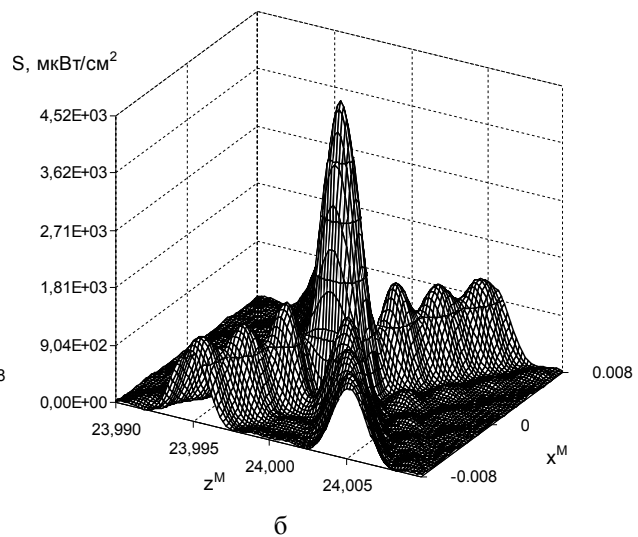
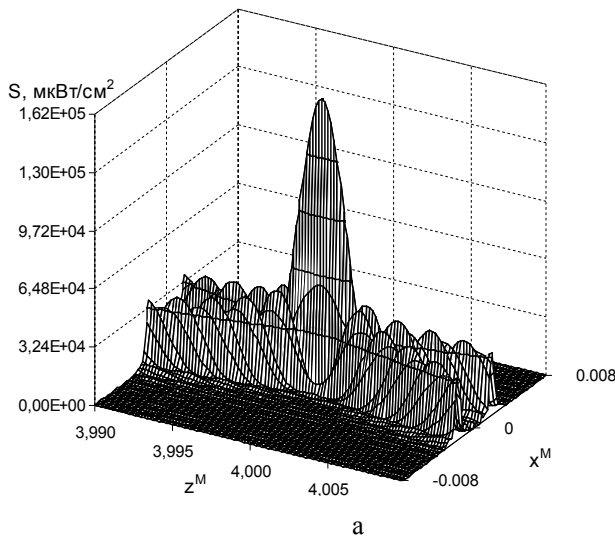


Рис. 5. Плотность потока мощности излучения МСИ в окрестности точки фокусировки: а –  $z_F=4,0L_x$ ; б –  $z_F=24,0L_x$

Исследование 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 этом существенно сказывается влияние ПФ управления фокусировкой на формирование последовательности ПВИ. Моделирование показало возможность формирования одиночного ПВИ на дальности  $z \geq 3,0L_x$  и последовательности ПВИ на дальности  $z \geq 10,0L_x$ .

### 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 задан-

ном угловом направлении формируется последовательность сфокусированных ПВИ, длительность и период следования которых определяются как  $\tau_{пви} \approx 1/\Delta F_{max}$

$$\text{и } T_{пви} = 1/\Delta F_n, \text{ скважность } Q = \frac{\Delta F_{max}}{\gamma \Delta F_i} = \frac{N_i - 1}{2\gamma}, \text{ а}$$

количество импульсов этой периодической последовательности увеличивается с увеличением значения  $z_F$ . Как показали дополнительно проведенные расчеты, для формирования периодической последовательности ПВИ, состоящей из не менее k импульсов, необходимо выполнить условие

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

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

ном 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 0X и 0Y определяются, независимо от выбранного закона ПЧ управления сигналами в первом приближении известными соотношениями:  $\Delta x_F \approx (\lambda/L_x) \cdot z_F$ ;  $\Delta y_F \approx (\lambda/L_y) \cdot z_F$ . Количество импульсов этой пе-

риодической 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. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ. / Под ред. В.И. Гомозова. – 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. – 2002. – Вып. 125. – С. 139-144.

5. Гомозов В.И. Новый метод фокусировки электромагнитных излучений / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов // Антенны. – 2001. – Вып. 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. – 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. – 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. – 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 28.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Гребенник, национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОСТУПІНЧАСТОГО V-ОБРАЗНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТОЮ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

С.В. Тітов, О.В. Тітова

Проводиться короткий огляд методів фокусування електромагнітного випромінювання радіотехнічними системами на основі взаємоузгодженого 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-часовий імпульс, багатопозиційна система випромінювачів, скважність, фокусування.

## MATHEMATICAL AND INFORMATION SUPPORT OF MULTISTAGE V-SHAPED FREQUENCY CONTROL FOR SPATIALLY DISTRIBUTED TRANSMISSION SYSTEM

S.V. Titov, O.V. Titova

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 law 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, multiway system emitters, porosity, focus.