

# Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, електроніка

УДК 621.396.677

Г.В. Ермаков, М.Н. Ясечко, А.В. Ирха

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ ФАЗ И НЕСУЩИХ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФАР ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПОРАЖЕНИИ БОРТОВЫХ РЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Предложен метод и получены оценки влияния ошибок расположения фазовых центров излучателей и установки начальных фаз и несущих частот на характеристики формируемых многочастотных пространственно-временных сигналов при пространственно-фазо-частотном способе управления для цилиндрических ФАР.

**Ключевые слова:** многочастотный пространственно-временной сигнал, дискретность установки, пространственно-фазо-частотное управление, цилиндрическая фазированная антенная решетка

### Введение

**Анализ литературы.** Развитие новых видов вооружения для борьбы с воздушным противником предусматривает создание многофункциональных радиотехнических систем (РТС), использующих фазированные антенные решетки (ФАР). В качестве одного из режимов работы таких РТС целесообразно использовать режим функционального поражения (ФП) [1]. При использовании многоэлементных ФАР возможно возникновение флуктуаций параметров сигналов, возникающих из-за различных случайных факторов. Наличие последних ограничивает потенциальные возможности средств ФП и может привести к существенным изменениям сформированных многочастотных пространственно-временных сигналов (МЧ ПВС), снижению их пиковой мощности и, в целом, к невозможности решения задач ФП бортовых радиоэлектронных систем (РЭС). Поэтому **целью статьи** является анализ влияния различных случайных и детерминированных изменений электрических и конструктивных параметров цилиндрических ФАР, систем управления излучаемыми сигналами и законов пространственно-фазо-частотного (ПФЧ) управления формированием МЧ ПВС.

### Основной раздел

Для формирования последовательности МЧ ПВС предполагается, что законы распределения определяется выражениями:

а) для амплитуд:

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

где  $\mu_x, \mu_y \in (0; 1)$ ;  $\alpha, \beta = 0, 1, 2, \dots$ ;  $x_{mn} = x_m = R_c \cos \alpha_m$ ,  $y_{mn} = y_n = n d_y$  – координаты  $mn$ -го излучателя;  $d_y$  – шаг решетки вдоль образующей;  $L_x, L_y$  – размеры апертуры вдоль направляющей и образующей,

б) для начальных фаз:

$$\varphi'_{0mn} = -\frac{2\pi f_{0mn}}{c} \times \left( t_{\hat{0}} - \sqrt{(x_{\hat{0}} - x_{mn})^2 + (y_{\hat{0}} - y_{mn})^2 + (z_{\hat{0}} - z_{mn})^2} \right), \quad (2)$$

где  $f_{0mn}$  – частота, подводимая к  $mn$ -му излучателю;  $x_{\hat{0}}, y_{\hat{0}}, z_{\hat{0}}, t_{\hat{0}}$  – координаты объекта и время излучения МЧ ПВС;  $c$  – скорость света;

в) для несущих частот:

– для одноступенчатого распределения

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + |m| \Delta F_x, \\ f_0 + |n| \Delta F_y, \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\Delta F_x, \Delta F_y$  – величина изменения частоты вдоль образующей и направляющей;  $d_x$  – шаг вдоль направляющей;  $\rho_{mn}^2 = x_{\hat{0}}^2 + y_{\hat{0}}^2$ ;

$$|m| \Delta F_x = f_0 \frac{\rho_{mn}^2}{2\gamma d_x^2 - \rho_{mn}^2}; \quad \gamma = 1 + f_0 / \Delta F_{n\max};$$

$$\Delta F_{n\max} = \max(\Delta F_x, \Delta F_y);$$

– для многоступенчатого распределения

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + v [m/v] \Delta F_{n\max}, \\ f_0 + v [n/v] \Delta F_{n\max}, \end{cases}, \quad (4)$$

$$\text{где } [m/v] \Delta F_{n\max} = \left[ \left( f_0 \frac{\rho_{mn}^2}{2\gamma d_x^2 - \rho_{mn}^2} \right) / v \right];$$

$v$  – коэффициент уменьшения скважности;

$[m/v]$ ;  $[n/v]$  – оператор округления результата до ближайшего большего целого числа.

Параметры закона ПФЧ управления должны быть стабильны в течение времени, равного усредненной длительности импульсов на выходе излучателей при формировании одиночного МЧ ПВС, а при формировании последовательности – в течение длительности пачки МЧ ПВС, т.е. за время  $T_{\delta\Sigma}$ . Это накладывает определенные требования к точности и

стабільності параметрів закона ПФЧ управління сигналами. Поэтому возникает необходимость исследования влияния различного рода отклонений от заданных значений параметров закона ПФЧ управления излучаемыми сигналами в каналах цилиндрической ФАР при формировании последовательностей МЧ ПВС. Кроме этого, необходимо исследовать также влияние ошибок в установке заданной дискретности начальной фазы и частоты на характеристики формируемых сигналов.

Влияние типовых ошибок изготовления традиционных антенн и элементов антенно-фидерного тракта на характеристики поля излучения достаточно хорошо изучено и рассмотрено в известной литературе [2 – 4] и может быть учтено при создании средств ФП. Поэтому в статье рассматриваются особенности требований к точности расположения фазовых центров излучателей и требования к дискретности и точности установки начальных фаз и несущих частот по апертуре цилиндрических ФАР, специфические для ПФЧ фокусировки на основе равнодискретных V-образных распределений частот.

Статистические параметры законов ПФЧ управления формированием МЧ ПВС (вид закона распределения ошибок, дисперсии и радиусы корреляции ошибок) являются при изучении статистики поля излучения исходными величинами. Однако из-за большого количества элементов в передающих каналах, видов и источников нестабильностей достаточно сложно определить вид закона распределения ошибок параметров сигналов в каждом канале ФАР. Учитывая конструктивную независимость передающих каналов и пренебрегая их взаимным влиянием, в дальнейшем будем предполагать, что ошибки установки параметров сигналов в каналах цилиндрической ФАР некоррелированы и равновероятны. В том случае, когда нет возможности установить закон распределения, целесообразно принять закон равной вероятности [5]. Можно показать, что в этом случае ошибка за счет отклонения действительного закона от выбранного закона равной вероятности в худшем случае не превысит  $\pm 20\%$  значения суммарной погрешности (если рассматриваемая погрешность доминирующая).

Анализ предложенного метода формирования последовательностей коротких МЧ ПВС при использовании одноступенчатых и многоступенчатых V-образных законов распределения несущих частот по апертуре цилиндрических ФАР проводился без учета возможных ошибок установки начальных фаз (2) и несущих частот (3), (4) в формирующих каналах. Однако при формировании МЧ ПВС для большого количества источников излучения за счет случайных неконтролируемых изменений параметров закона ПФЧ управления излучаемыми сигналами возможно существенное ухудшение характеристик средств ФП. Очевидно, что техническую реализацию средств ФП целесообразно проводить при использовании цифровой элементной базы. Имеющиеся при этом отклонения от заданной дискретности установки несущих

частот и начальных фаз излучаемых сигналов могут также существенно повлиять на процессы формирования последовательностей МЧ ПВС.

При проведении расчетов среднего нормированного значения напряженности электрического поля цилиндрической ФАР с учетом ошибок установки несущих частот и начальных фаз излучаемых сигналов использовались исходные данные, приведенные выше. В качестве расчетного использовалось выражение:

$$\langle \hat{A}(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{A_{\max}} \sum_{m=-(M_x-1)/2}^{(M_x-1)/2} \sum_{n=-(N_y-1)/2}^{(N_y-1)/2} A_{mn} \times \right. \\ \left. \times \cos(\pi y_{mn}/L_H) \times \cos(\alpha_{\hat{O}} - \alpha_m) \sin \beta_{\hat{O}} \times \hat{O}_{mn}^{i\sigma} \right\rangle, \quad (5)$$

где  $E_{\max}$  – максимальное значение напряженности электрического поля;

$$A_{mn} = A(m, n) \sqrt{60 P_{mn} G_{\max mn} / R_{mn}};$$

$A(m, n)$  – амплитуда  $mn$ -го излучателя;  $P_{mn}$  – мощность, подводимая к  $mn$ -му элементу;  $G_{\max mn}$  – коэффициент усиления  $mn$ -го излучателя;  $R_{mn}$  – расстояние от  $mn$ -го излучателя до точки положения объекта;  $\alpha_{\hat{O}}, \beta_{\hat{O}}$  – направляющие углы точки положения объекта;  $\alpha_m$  – угол места излучателя;

$$\hat{O}_{mn}^{i\sigma} = \exp\left(-j\left[2\pi f_{0mn}^{i\sigma} \left[t - R_{mn}^{i\sigma}/c\right] + \varphi_{0mn}^{i\sigma}\right]\right);$$

$f_{0mn}^{i\sigma}, R_{0mn}^{i\sigma}, \varphi_{0mn}^{i\sigma}$  – частота, дальность, фаза с учетом ошибок.

С учетом случайных ошибок в установке заданной дискретности, закон распределения начальных фаз имеет вид:

$$\varphi_{0mn}^{i\sigma} = -2\pi f_{0mn}^{i\sigma} (z_F / \tilde{n} - R_{Fmn} / \tilde{n}) + \Delta\varphi\Psi_1, \quad (6)$$

где  $\Delta\varphi$  – максимальное значение ошибки установки начальной фазы в каждом излучающем элементе ФАР;  $\Psi_1$  – случайная величина, равномерно распределенная в пределах интервала  $[-1, 1]$ .

При этом одноступенчатый V-образный закон распределения несущих частот (3) с учетом ошибок можно записать в виде:

$$f_{0mn}^{i\sigma} = \begin{cases} f_0 + |m| \Delta F_x + \Delta f\Psi_2, \\ f_0 + |n| \Delta F_y + \Delta f\Psi_2, \end{cases} \quad (7)$$

а многоступенчатый V-образный закон распределения несущих частот (4) с учетом ошибок будет иметь вид:

$$f_{0mn}^{i\sigma} = \begin{cases} f_0 + v[m/v] \Delta F_{n \max} + \Delta f\Psi_2, \\ f_0 + v[n/v] \Delta F_{n \max} + \Delta f\Psi_2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Delta f$  – максимальное значение ошибки установки несущей частоты в каждом излучающем элементе ФАР;  $\Psi_2$  – случайная величина, равномерно распределенная в пределах интервала  $[-1, 1]$ .

На рис. 1 приведены значения математического ожидания нормированной напряженности электрического поля излучения цилиндрической ФАР

$\bar{A}_1 = \langle \hat{A}(x, y, z, t) / \hat{A}_{\max} \rangle$  в напрямленні нормалі к раскрыву без учета ошибок установки несущих частот и начальных фаз ( $\Delta\varphi=0; \Delta f=0; Q=32$ ), с учетом максимального значения ошибки установки начальных фаз  $\Delta\varphi=\pi/2$  и с учетом максимального значения ошибки установки несущих частот  $\Delta f=\Delta F_x/8=\Delta F_y/8$  при использовании одноступенчатого V-образного закона распределения частот по апертуре  $z=1$  км.

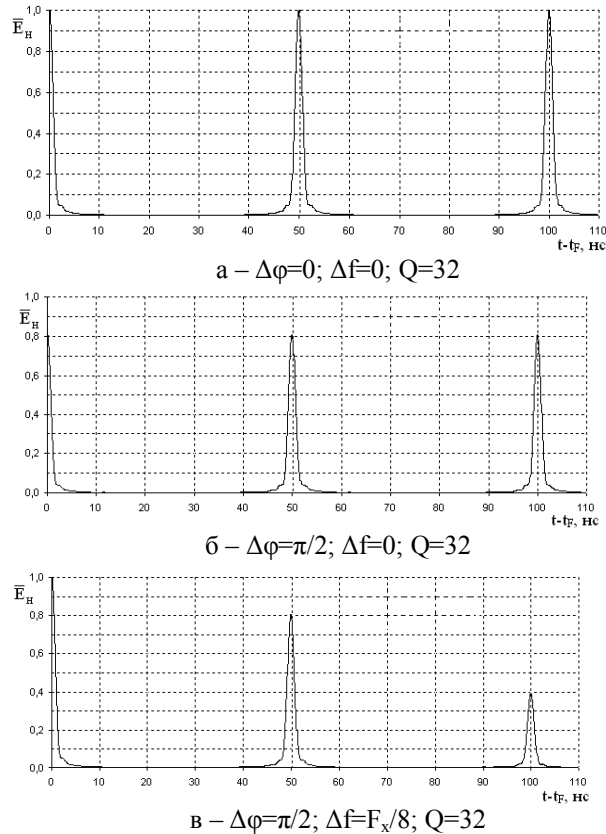


Рис. 1. Зависимости математического ожидания нормированной напряженности электрического поля, излучаемого цилиндрической ФАР от ошибок

На рис. 2 приведены значения  $\bar{A}_1$  для аналогичных предыдущему случаю условий, но при использовании многоступенчатого V-образного закона распределения частот по апертуре.

Как видно из рис. 1 и 2, влияние ошибок в установке заданных дискретностей несущих частот и начальных фаз для одноступенчатого и многоступенчатого V-образных законов распределения частот по апертуре цилиндрической ФАР имеет идентичный характер. При этом влияние ошибок в установке заданной дискретности начальных фаз на характеристики сформированной последовательности МЧ ПВС не зависит от времени излучения (рис. 1, б и 2, б). Влияние ошибок в установке заданной дискретности несущих частот зависит от времени излучения (рис. 1, в и 2, в), поскольку фазовые ошибки

$$\Delta\varphi_{0mn} = 2\pi f_{0mn}^i (t - t_0),$$

обусловленные неточностью установки несущих частот излучаемых сигналов, нарастают со временем.

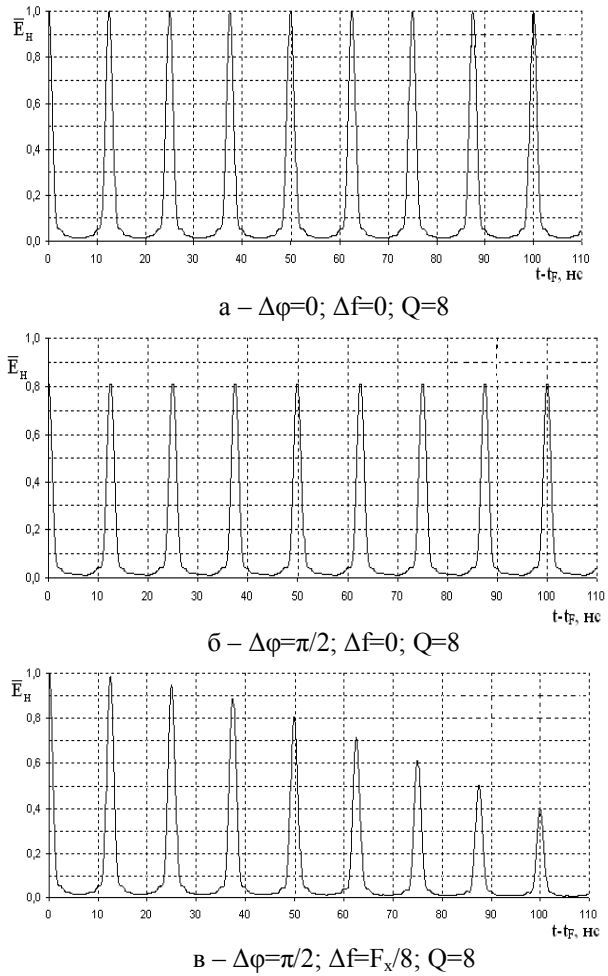


Рис. 2. Зависимости математического ожидания нормированной напряженности электрического поля, излучаемого цилиндрической ФАР мощности ФАР от ошибок при уменьшении скважности

На рис. 3 приведены зависимости математического ожидания нормированного значения напряженности электрического поля, излучаемого цилиндрической ФАР  $\bar{A}_1$  от времени наблюдения с учетом максимального значения ошибки установки несущих частот  $\Delta f=2,0$  МГц при использовании многоступенчатого V-образного закона распределения частот по апертуре с максимальным разносом несущих частот  $\Delta F_{\max} = 2\Delta\tilde{A}\tilde{\omega}$ .

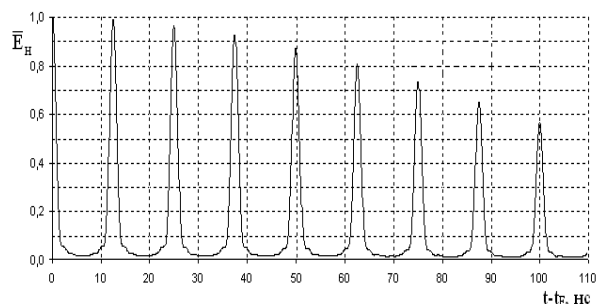


Рис. 3. Зависимость математического ожидания нормированного значения напряженности электрического поля от времени излучения при  $\Delta f=2,0$  МГц для  $\Delta F_{\max}=2$  ГГц

Анализ рис. 3 показывает, что влияние ошибок установки несущих частот не зависит от выбранного значения максимального разноса несущих частот по апертуре и определяется значением ошибки установки несущей частоты в излучающих элементах  $\Delta f$  (или абсолютной нестабильностью частоты).

На рис. 4 представлена зависимость математического ожидания нормированного значения плотности потока мощности излучения плоской ФАР от значений абсолютной нестабильности частоты  $\Delta f$  и разных значений длительности пачки ПВИ и ее сечения для разных значений  $\Delta f$  и длительности пачки.

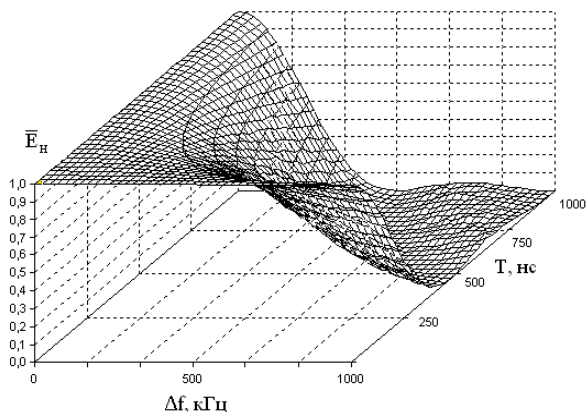


Рис. 4. Зависимость математического ожидания нормированного значения напряженности электрического поля, излучаемого цилиндрической ФАР от  $\Delta f$  и длительности пачки МЧ ПВС

Как видно из рис. 4, при учете влияния ошибок установки несущей частоты в излучающих элементах необходимо учитывать длительность формируемой пачки МЧ ПВС. Как известно [6], в существующих передающих устройствах сантиметрового диапазона волн значение долговременной (за несколько часов и до суток) относительной нестабильности частоты обеспечивается на уровне  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ , а кратковременной (за время до единиц минут) – может достигать значений  $10^{-10} \dots 10^{-12}$ . С учетом этого длительность пачки МЧ ПВС, при которой напряженность электрического поля снижается не более чем на 10% из-за ошибок установки несущей частоты в излучающих элементах ФАР может выбираться из условия  $\Delta f T \leq 0,1$  (рис. 4), где  $T = n T_1 \times \bar{A} \bar{N}$  – длительность пачки периодической последовательности  $n$  воздействующих ПВИ для функционального поражения РЭС.

На рис. 5 приведена зависимость  $\bar{A}_1$  в направлении нормали к раскрытию ФАР от максимальных

значений ошибок установки начальных фаз для  $z=1$  км. Как видно из рис. 5, область допустимых значений максимальных ошибок установки начальных фаз  $\Delta \varphi$  по апертуре цилиндрической ФАР, в которой уменьшение значения  $\bar{A}_1$  не превышает 10%, определяется из условия:  $\Delta \varphi \leq \pi/3$ .

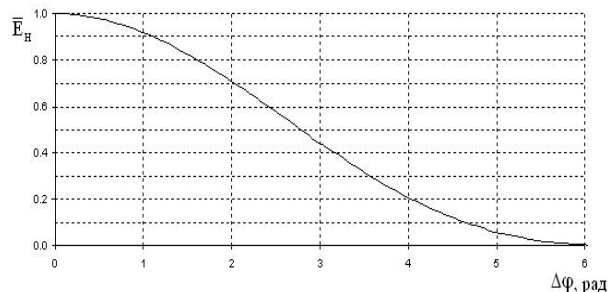


Рис. 5. Зависимость математического ожидания нормированного значения напряженности электрического поля от ошибки установки фаз

## Вывод

Проведенное математическое моделирование показывает, что дискретность и случайные ошибки установки начальных фаз сигналов в передающих каналах цилиндрической ФАР, равные  $\Delta \varphi = \pi/3$ , практически не оказывают влияния на длительность и период повторения последовательности МЧ ПВС.

## Список литературы

1. 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. Гомозова. – Х.: КП "Городская типография", 2011. – 330 с.
2. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. I: пер. с англ. / под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
4. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.
5. Маляревский Н.М. Погрешность измерения вероятностей / Н.М. Маляревский // Известия вузов. – 1962. – № 2. – С. 73-76.
6. Уманский В.С. Усилительный тракт импульсных передающих устройств СВЧ / В.С. Уманский. – М.: Сов. радио, 1973. – 256 с.

Поступила в редколлегию 24.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ УСТАНОВКИ ФАЗ І НЕСУЧИХ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФАР ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ВРАЖЕННІ БОРТОВИХ РЕС З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ

Г.В. Єрмаков, М.М. Ясечко, А.В. Ірха

Запропонований метод і отримані оцінки впливу помилок розташування фазових центрів випромінювачів і установки початкових фаз і несучих частот на характеристики формуємих багаточастотних просторово-часових сигналів при просторово-фазо-частотному способі керування для циліндричних ФАР.

**Ключові слова:** багаточастотний просторово-часовий сигнал, дискретність установки, просторово-фазо-частотне керування, циліндрична фазована антенна решітка.

**ANALYSIS OF PHASES AND BEARINGS FREQUENCIES SETTING EXACTNESS ON CYLINDRICAL PHASED ARRAY AT FUNCTIONAL DEFEAT OF SIDE RADIOELECTRONIC SYSTEM WITH THE USE OF SPATIO-TEMPORAL SIGNALS**

G.V. Yermakov, M.N. Yasechko, A.V. Irkha

*A method is offered and the estimations of phase centers of emitters and setting of initial phases and bearings frequencies location errors influence are got on characteristics of the formed multifrequency spatio-temporal signals at the spatio-phase-frequency method of management for cylindrical phased array.*

**Keywords:** *multifrequency spatio-temporal signal, discreteness of setting, spatio-phase-frequency management, cylindrical phased array*