

УДК 621.396.677

М.Н. Ясечко, Г.В. Ермаков

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЧАСТОТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФАР

Рассмотрен метод формирования последовательностей многочастотных пространственно-временных сигналов на основе многоступенчатого V-образного распределения частот по апертуре цилиндрической фазированной антенной решетке. Проведено математическое моделирование процессов формирования в пространстве коротких сфокусированных импульсов при непрерывном излучении цилиндрической ФАР. Получена и проанализирована временная структура поля в точке фокусировки в зоне Фраунгофера в направлении нормали к оси антенны.

Ключевые слова: многоступенчатое V-образное распределение частот, многочастотный пространственно-временной сигнал, цилиндрическая фазированная антенная решетка.

Введение

Анализ литературы. Существенное влияние на ход боевых действий оказывают многофункциональные бортовые радиолокационные системы (БРЛС) средств воздушного нападения СВН, решающие задачи обнаружения, целеуказания, сопровождения и наведения летательных аппаратов.

Входящие в их состав радиоэлектронные системы как дистанционного управления бортовым оружием, так и самонаведения высокоточного оружия (головки самонаведения ракет различных классов, планирующих авиабомб, различные типы радиовзрывателей и т.д.) требуют наличия адекватных систем противодействия таким системам [1, 2].

На сегодняшний день имеется достаточно большое количество взаимодополняющих данных относительно типов БРЛС современных СВН, режимов их работы, различных характеристик излучения: несущая частота, длительность импульса, частота повторения импульсов.

Анализ литературы показывает, что несущие частоты подавляющего большинства находящихся на вооружении БРЛС СВН, сосредоточены в четырех диапазонах частот: 4,2 – 4,4 ГГц (радиовысотомеры),

8,5 – 10 ГГц (разведка воздушной и наземной обстановки), 13,2 – 13,3 ГГц (бортовые доплеровские навигационные РЛС), 15,5 – 17,2 ГГц (управление бортовым оружием), 8,0 – 10 ГГц (многофункциональные БРЛС).

Распределение несущих частот по назначению в достаточной мере условны, поскольку для различных типов СВН их БРЛС могут выполнять смежные функции.

Наиболее широко в БРЛС применяются простые импульсные сигналы с постоянной или дискретно от импульса к импульсу изменяющейся несущей частотой, а также непрерывные сигналы с гармонической частотной модуляцией.

Многообразие бортовых РЛС и использование в них мер радиоэлектронной защиты: расширение частотного диапазона, увеличение энергетического потенциала, повышение скрытности работы за счет сокращения времени работы, применения широкополосных сигналов, адаптивное управление видом, параметрами и способом обработки сигналов в зависимости от тактической ситуации и помеховой обстановки – приводит к снижению эффективности радиоэлектронного противодействия СВН.

В силу указанных причин возникает необходимость в поиске новых технических путей радиоэлектронного противодействия. В настоящее время одним из перспективных путей считается создание мощного электромагнитного излучения, способного решать задачу функционального поражения (ФП) БРЛС в заданном диапазоне частот [3 – 7].

Решение задачи ФП БРЛС возможно при использовании последовательностей ультракоротких сигналов наносекундной длительности, к которым относятся сверхширокополосные сигналы и многочастотные пространственно-временные (МЧ ПВС) сигналы. Последние имеют ряд преимуществ в силу того, что для их реализации можно использовать готовые радиоэлектронные узлы, выпускаемые промышленностью. При использовании МЧ ПВС возникает задача определения закона управления частотой по апертуре фазированной антенной решетки.

Проведенные исследования показали, что равнодискретное одноступенчатое V-образное распределение несущих частот по апертуре фазированной антенной решетки (ФАР) позволяет формировать последовательность коротких ПВС, однако обладает определенным недостатком, который заключается в невозможности управления скважностью формируемой пачки. Анализ параметров пачки МЧ ПВС показал, что изменение дискретизации частот между соседними излучающими элементами плоской ФАР, для чего целесообразно использовать многоступенчатое V-образное распределение частот по апертуре.

Использование цилиндрических ФАР в качестве антенных систем МЧ средств ФП вызывает необходимость уточнения параметров пространственно-частотного управления по ее апертуре.

Поэтому целью данной статьи является оценивание характеристик МЧ ПВС при многоступенчатом распределении частот по апертуре.

Основной текст

В [8] для изменения скважности пачки МЧ ПВС для плоской ФАР предлагается использовать многоступенчатое V-образное распределение частот по апертуре:

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + v \lfloor m/v \rfloor \Delta F_x, & \text{если } v \lfloor m/v \rfloor \Delta F_x \geq v \lfloor n/v \rfloor \Delta F_y, \\ f_0 + v \lfloor n/v \rfloor \Delta F_y, & \text{если } v \lfloor m/v \rfloor \Delta F_x < v \lfloor n/v \rfloor \Delta F_y; \end{cases}$$

где f_{0mn} – частота в mn-м излучателе; f_0 – средняя частота спектра; $\Delta F_x, \Delta F_y$ – величина дискретизации частоты вдоль осей Ox и Oy ;

$$m \in [-(M_x - 1)/2, \dots, 0, \dots, (M_x - 1)/2];$$

$$n \in [-(N_y - 1)/2, \dots, 0, \dots, (N_y - 1)/2];$$

v – коэффициент уменьшения скважности; $\lfloor m/v \rfloor$, $\lfloor n/v \rfloor$ – оператор округления результата до ближайшего большего целого числа.

Коэффициент уменьшения скважности

$$v = \frac{\Delta F_{\max}}{\Delta F_1 Q} = \frac{N_i - 1}{2Q}$$

показывает, во сколько раз увеличивается дискретизация частоты между соседними ступенями закона частотного распределения (или определяет количество излучающих элементов с одинаковыми несущими частотами в одной ступени частотного распределения).

В случае использования цилиндрической ФАР (рис. 1) закон изменения частот вдоль направляющей (ось Oy) будет аналогичным закону изменения частот для плоской ФАР. Закон изменения частот вдоль образующей будет зависеть от радиуса цилиндра и шага решетки d_x .

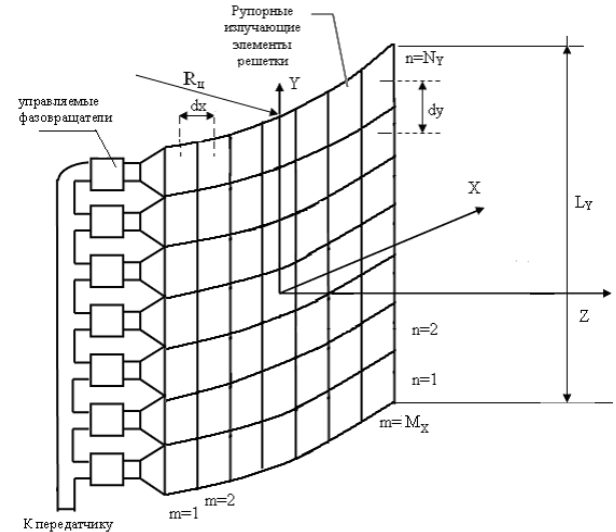


Рис. 1. Сегмент цилиндрической ФАР

Общий закон изменения частот по апертуре цилиндрической ФАР будет иметь вид:

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + v \lfloor m/v \rfloor \Delta F_{n \max}, \\ f_0 + v \lfloor n/v \rfloor \Delta F_{n \max}, \end{cases} \quad (1)$$

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

$\gamma = 1 + f_0 / \Delta F_{n \max}; \Delta F_{n \max} = \max(\Delta F_x, \Delta F_y).$

Закон многоступенчатого V-образного распределения частот по апертуре цилиндрической ФАР (1) позволяет проанализировать пространственно-временные характеристики МЧ ПВС с использованием выражения для поля, излучаемого цилиндрической ФАР:

$$\dot{A}(\mathbf{R}, t) = \sum_{m=1}^{M_x} \sum_{n=1}^{N_y} \frac{\dot{F}_{mn}(\beta \hat{O}, \alpha \hat{O})}{R_{mn}} \sqrt{60 P_{mn} G_{\max mn}} \times \exp \left\{ j \left[2\pi f_{0mn} (t - R_{mn} / \dot{n}) + \phi_{0mn} \right] \right\}, \quad (2)$$

где m и n – индексы, определяющие номер излучателя; M_x, N_y – количество излучающих элементов вдоль направляющей и образующей цилиндра соответственно; $\dot{F}_{m,n}(\beta_\Phi, \alpha_\Phi)$ – значение комплексной ДН излучателя ВФАР в направлении на точку фокусировки; β_Φ, α_Φ – углы, определяющие направление на точку фокусировки; R_{mn} – расстояние от излучателя до точки фокусировки; P_{mn} – мощность, подводимая к mn -му элементу ФАР; G_{mn} – коэффициент усиления одиночного излучателя; f_{0mn}, φ_{0mn} – частота и начальная фаза спектральной составляющей МЧ сигнала, подводимая к элементу ФАР; t – момент времени наблюдения.

В качестве излучателей в синфазной цилиндрической ФАР используются рупорные антенны, диаграмма направленности которых определяется в виде [9]:

$$F_A(\Theta) = \frac{1 + \cos \Theta \sin \Psi}{2 \Psi},$$

$$F_i(\Theta) = \frac{1 + \cos \Theta}{2} \frac{\pi}{4} \left[\frac{\sin(\Psi + \pi/2)}{\Psi + \pi/2} + \frac{\sin(\Psi - \pi/2)}{\Psi - \pi/2} \right], \quad (3)$$

где $F_E(\Theta)$ – угломестная ДН $|\dot{F}_{mn}(\beta_\Phi)|$; $F_H(\Theta)$ – азимутальная ДН $|\dot{F}_{mn}(\alpha_\Phi)|$; Θ – угол места точки наблюдения (фокусировки); $\Psi = \frac{\pi L_{E,H}}{\lambda} \sin \Theta$ – обобщенный угол; L_H – размер раскрытия рупора.

Как было показано выше, для внутриполосного функционального поражения СВН целесообразно использовать диапазон частот от 8 ГГц до 10 ГГц. Предположим, что дальность действия $R=1$ км, максимальный размером апертуры цилиндрической ФАР – $L=3$ м. Учитывая, что для конформных ФАР шаг решетки может быть $d \leq 1,1\lambda$ вдоль направляющей, зададимся $d_x=1,0\lambda$, где $\lambda \approx 0,03$ м. Если ограничить размеры сектора излучения цилиндрической ФАР по углу места до величины $\pm 30^\circ$ (с учетом использования направленных излучающих элементов), то вдоль образующей шаг решетки выберем $d_y=0,7\lambda$. Предположим, что количество излучателей будет $N=M_x \times N_y=100 \times 100=10000$. Радиус цилиндра при этом составит 0,5 м. Для достижения внутриполосного ФП на дальности 1 км необходимая мощность будет 440 кВт, т.е. при 100 импульсах в пачке к каждому элементу цилиндрической ФАР будет подводиться мощность $P_{изл}=0,44$ Вт.

С учетом выбранного для ФП диапазона длин волн, дискретность частоты между соседними излучателями $\Delta F_x = \Delta F_y = 2 \text{ ГГц} / 100 = 20 \text{ МГц}$, максимальный разнос несущих частот по апертуре ФАР составляет $\Delta F_{x \max} = \Delta F_{y \max} = 2 \text{ ГГц}$.

На рис. 2 приведено распределение несущих частот по апертуре цилиндрической ФАР.

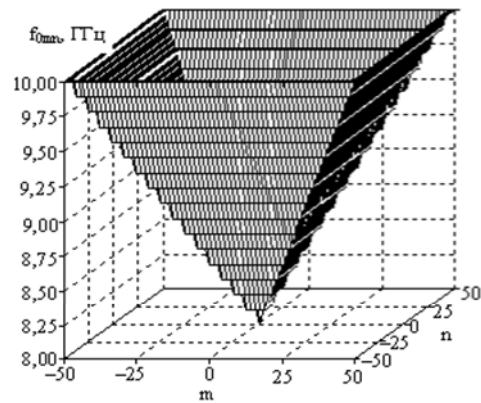


Рис. 2. Распределение несущих частот по апертуре цилиндрической ФАР ($Q=16$)

На рис. 3 представлено нормированное значение напряженности электрического поля для ПВС с $v=2$ (скважность $Q=16$) для дальности 1 км и ширины спектра сигнала 2 ГГц.

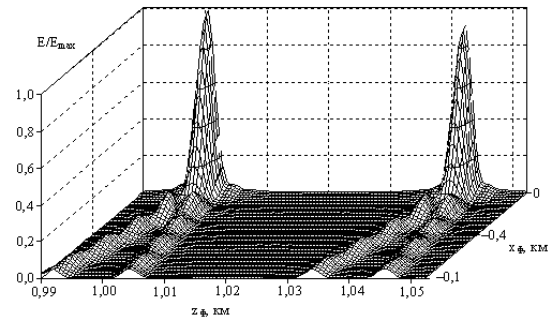


Рис. 3. Нормированное значение напряженности электрического поля ($Q=16$)

Из рис. 3 следует, что пространственная длительность ПВС по уровню 0,5 составляет величину порядка 1 м, т.е. $\tau_{и}=3$ нс, крутизна переднего фронта – 1 нс, уровень первого бокового лепестка – порядка -10 дБ. Поперечный размер «пятна» $x_\Phi=7$ м. Аналогичные расчеты были проведены для $Q=8$ (рис. 4), $Q=4$ (рис. 5). Анализ рисунков показывает, что в случае использования многоступенчатого V-образного закона распределения несущих частот при уменьшении скважности сформированной последовательности ПВС не изменяются параметры импульсов, изменяется только структура боковых пиков.

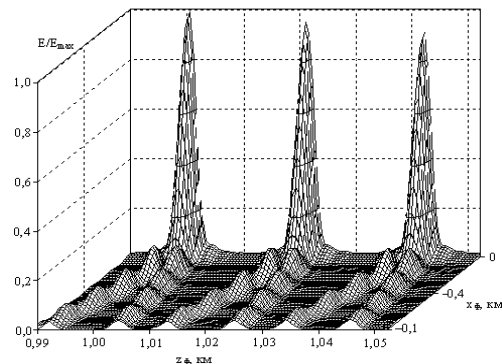


Рис. 4. Нормированное значение напряженности электрического поля ($Q=8$)

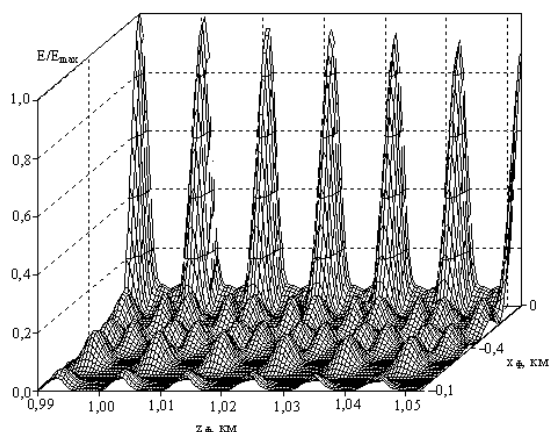


Рис. 5. Нормированное значение напряженности электрического поля ($Q=4$)

Кроме этого, в окрестности точки фокусировки ($R=1$ км) уровень первого бокового лепестка не превышает $E_{бок} < 0,3E_{max}$. Уменьшение скважности приводит к частичному перекрытию дальних боковых лепестков и снижению их уровня по сравнению с полем излучения при использовании одноступенчатого V-образного распределения частот по апертуре.

Анализ результатов расчетов показал, что временная структура МЧ сигнала, излучаемого цилиндрической ФАР в азимутальной плоскости вдоль нормали к решетке, не зависит от величины азимута поражаемой цели, так как пространственно-частотный спектр сигнала не изменяется. В то же время при изменении угла места наблюдаемого объекта изменяются условия формирования ПВС, что приводит к изменению его амплитудного спектра.

Выводы

Предложенное многоступенчатое распределение частот по апертуре цилиндрической ФАР дает возможность оперативно управлять параметрами пространственно-частотного управления: увеличивать количество импульсов при неизменной длительности самой последовательности МЧ ПВС.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть спектральный состав излучаемого сигнала при отклонении точки поражения от нормали к оси цилиндрической ФАР.

Список литературы

1. Горелов А.В. Югославия – полигон для проверки эффективности вооружений НАТО / А.В. Горелов // Зарубежное военное обозрение. – 1999. – № 6. – С. 55-56.
2. Алексеев А.П. Анализ боевого применения авиации США в ходе операции "Решительная сила" / А.П. Алексеев // Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 1. – С. 20-26.
3. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
4. Кучер Д.Б. Особенности воздействия мощных электромагнитных помех на радиоприемные средства / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко и др. // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 1(19). – С. 85-87.
5. Кучер Д.Б. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, А.И. Харланов, Ю.М. Бусяк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 4(78). – С. 86-90.
6. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения / В.В. Панов, А.П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10-12. – С. 3-11.
7. Коробко А.И. Принудительный останов двигателей внутреннего сгорания движущихся автомобилей с помощью сверхмощного генератора импульсного электромагнитного поля субнаносекундного диапазона «Автомарштор БД» / А.И. Коробко // 3-й Межд. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Т. VI. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 173-174.
8. 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 // Радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – № 130. – С. 33-38.
9. Шифрин Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. – Х.: Изд-во ВИРТА, 1976. – 407 с.

Поступила в редколлегию 15.12.2010

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

ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОЧАСТОТНИХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ ПРИ БАГАТОСХОДИННОМУ РОЗПОДІЛІ ЧАСТОТ ПО АПЕРТУРІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФАР

М.М. Ясечко, Г.В. Єрмаков

Розглянутий метод формування послідовностей багато частотних просторово-часових сигналів на основі багатосходного V-подібного розподілення частот по апертурі циліндричної фазованої антенної решітки. Проведено математичне моделювання процесів формування в просторі коротких імпульсів при безперервному випромінюванні циліндричної ФАР. Отримана і проаналізована часова структура поля в точці фокусування в зоні Фраунгофера в напрямку нормалі до осі антени.

Ключові слова: багатосходне V-подібне розподілення частот, багато частотний просторово-часовий сигнал, циліндрична фазована антенна решітка.

ESTIMATION OF MANYFREQUENCIES SPACE-TIME SIGNAL CHARACTERISTICS WITH MANYSTAGE OF FREQUENCY DISTRIBUTION AT CYLINDRICAL PHASED ARRAY APERTURE

M.N. Yasechko, G.V. Yermakov

A method of forming sequences manyfrequencies space-time signals based on many-stage V-shaped frequency distribution over the aperture of a cylindrical phased array are considered. Mathematical modelings of the formation processes in space of the short pulses with continuous radiation of cylindrical phased array are held. The temporal structure of the field at the observation point in the Fraunhofer zone in the normal direction for antenna axis.

Keywords: many-stage V-shaped distribution of frequencies, manyfrequencies space-time signal, cylindrical phased array.