

УДК 621.396.677

М.Н. Ясечко, Г.В. Ермаков

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## ИЗЛУЧЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МНОГОЧАСТОТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Определены временные характеристики последовательности многочастотных пространственно-временных сигналов, при которых достигается функциональное поражение радиоэлементов входных трактов приемных устройств бортовых РЛС. Проанализирован их амплитудно-частотный спектр при излучении цилиндрической ФАР для различных углов места точки поражения. Предложен метод расчета дополнительного линейного фазового распределения для осуществления сканирования диаграммой направленности цилиндрической ФАР по углу места.*

**Ключевые слова:** *многочастотный пространственно-временной сигнал, цилиндрическая фазированная антенная решетка, функциональное поражение.*

### Введение

**Анализ литературы.** Результатом воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на входные тракты приемного устройства бортовых РЛС с целью решения задачи их функционального поражения (ФП), является необратимый вывод из строя радиоэлементов функциональных устройств: маломощных антенных усилителей, кристаллических смесителей, транзисторных усилителей промежуточной частоты и детекторов. При этом должны выполняться определенные требования к временным и энергетическим параметрам поражающего сигнала [1, 2].

При оценивании временных параметров ЭМИ для ФП необходимо учитывать, что в ряде случаев для защиты входных цепей могут применяться специальные устройства защиты с малым временем срабатывания, блокирующие приемные устройства при наличии на их входе не только сигнала собственного передатчика (при совмещенной приемо-передающей антенне), но и большого уровня любых других входных сигналов. Время срабатывания лучших устройств защиты составляет величину порядка 10 нс [2]. Следовательно, длительность разрушающего сигнала  $\tau_p$  должна соответствовать условию:

$$\tau_p \leq \tau_k = 10 \text{ нс}, \quad (1)$$

где  $\tau_k$  – время срабатывания устройств защиты при превышении заданного максимального уровня сигнала во входных цепях приемников поражаемых РЭС.

**Целью статьи** является оценивание временных характеристик последовательностей многочастотных пространственно-временных сигналов (МЧ ПВС), излучаемых цилиндрической фазированной антенной решеткой (ФАР), достаточных для функционального поражения бортовых РЛС.

### Основной материал

Из обзора литературы известны два варианта воздействия ЭМИ на приемные устройства БРЛС:

внутриполосное и внеполосное. Внутриполосное воздействие требует точных разведывательных данных о поражаемой РЛС, например, о рабочей частоте и полосе пропускания приемника, тактовой частоте компьютера или спецвычислителя, резонансной частоте конструкций крепежа радиоэлектронных элементов на платах и т.д., а также соответствующей настройки на заданную частоту средства ФП. Внутриполосное воздействие наиболее эффективно при осуществлении функционального поражения приемных трактов бортовых РЛС. Потери энергии воздействующего ЭМИ при прохождении через входные цепи приемного тракта в данном случае зависят от соотношения между полосой пропускания приемного тракта  $\Delta f_{\Pi}$  и шириной спектра воздействующего разрушающего импульса  $\Delta f_p \approx 1/\tau_p$ . В большинстве случаев эти потери не превышают –10...–15 дБ [2].

Внеполосное воздействие не требует точных разведанных по диапазону частот. Воздействие на приемные тракты может осуществляться через монтажные отверстия на любых частотах вне их полосы пропускания. Результирующие потери в этом случае могут достигать величины –30...–40 дБ [2].

Функциональное поражение БРЛС может быть осуществлено за счет вывода из строя входных сверхвысокочастотных элементов и других функциональных устройств. В современных бортовых РЛС широко используются полупроводниковые приборы (транзисторы, микроволновые диоды, микросхемы и т.д.). Что касается бортовых спецвычислителей и ЭВМ, то кроме теплового пробоя микросхем, к ФП таких устройств условно можно отнести также сбой тактовой частоты и, как следствие, так называемое "зависание" выполняемой программы. Последнее обеспечивается при меньших энергетических затратах. Энергетический порог для достижения эффекта деградации различных радиоэлектронных устройств должен определяться с учетом

характерного времени релаксации тепловых процессов, которое для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем оказывается довольно большим  $\tau_T \geq 10 \dots 100$  нс [3]. При выполнении условия  $\tau_p \leq \tau_k$  очевидно выполняется и условие  $\tau_p \leq \tau_T$ . Суммарный эффект при этом можно оценивать, используя суммарное время всей последовательности воздействующих импульсов за вычетом интервалов между ними, если период их повторения  $T_p < \tau_T$ .

Наименьшая излучаемая плотность потока мощности, необходимая для ФП, может быть обеспечена путем создания пространственно-временных периодических коротких сигналов, приводящих к самовозбуждению входных каскадов или приемных устройств в целом.

При ФП последовательностью МЧ ПВС для поддержания устойчивого самовозбуждения приемных устройств поражаемых бортовых РЛС длительность воздействующих импульсов следует выбирать из указанного выше условия (1). Предположим, что выполняется условие  $\tau_p \leq 5$  нс.

В свою очередь, период следования  $T_p$  таких воздействующих импульсов следует выбирать таким образом, чтобы колебания самовозбуждения к приходу каждого последующего импульса затухали не более чем на 50...70%, то есть

$$T_p \leq (0,7 \dots 1,2) \tau_{\Pi} \approx \frac{0,7 \dots 1,2}{\pi \Delta f_{\Pi}} \approx \frac{0,22 \dots 0,38}{\Delta f_{\Pi}}, \quad (2)$$

где  $\Delta f_{\Pi}$  и  $\tau_{\Pi}$  – полоса пропускания и постоянная времени установления собственных колебаний приемного устройства подавляемых электронных систем.

Поскольку для реальных приемных устройств бортовых РЛС в подавляющем большинстве полоса пропускания  $\Delta f_{\Pi} \leq 10$  МГц [4], то с учетом (2) получим  $T_p \leq 220 \dots 380$  нс и, соответственно, значение скважности таких периодических последовательностей воздействующих импульсов при  $\tau_p \leq 5$  нс будет составлять  $Q = T_p / \tau_p \leq 50 \dots 80$ . Для дальнейших расчетов выберем количество импульсов  $N_{\text{имп}} = 100$  при скважности  $Q < 10$ .

Для определения структуры поля, излучаемого цилиндрической ФАР с рупорными излучателями, воспользуемся следующим выражением:

$$\dot{E}(P, t) = \sum_{m=1}^{M_x} \sum_{n=1}^{N_y} \frac{\dot{F}_{mn}(\beta_{\Phi}, \alpha_{\Phi})}{R_{mn}} \sqrt{60 P_{mn} G_{\text{maxmn}}} \times \exp \left\{ j \left[ 2\pi f_{0mn} \left( t - \frac{R_{mn}}{c} \right) + \varphi_{0mn} \right] \right\}, \quad (2)$$

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;  $\beta_{\Phi}, \alpha_{\Phi}$  – углы, определяющие направление на точку фокусировки;  $R_{mn}$  – расстояние от излуча-

теля до точки фокусировки;  $P_{mn}$  – мощность, подводимая к  $mn$ -му элементу ФАР;  $G_{mn}$  – коэффициент усиления одиночного излучателя;  $f_{0mn}, \varphi_{0mn}$  – частота и начальная фаза спектральной составляющей МЧ сигнала, подводимая к элементу ФАР;  $t$  – момент времени наблюдения.

Закон изменения частот по апертуре цилиндрической ФАР будет иметь вид:

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + v[m/v] \Delta F_{n \text{ max}}; \\ f_0 + v[n/v] \Delta F_{n \text{ max}}, \end{cases} \quad (3)$$

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

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

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

$\rho_{mn}^2 = x_{mn}^2 + y_{mn}^2$ ;  $v$  – коэффициент уменьшения скважности

Анализ расчетов 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.

Для примера на рис. 1 представлено нормированное значение напряженности электрического поля для ПВС со значением скважности  $Q=8$  для дальности 1 км и ширины спектра сигнала 2 ГГц.

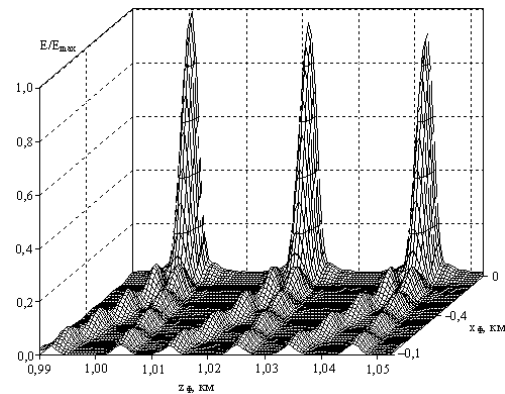


Рис. 1. Нормированное значение напряженности электрического поля ( $Q = 8$ )

Из рис. 1 следует, что пространственная длительность ПВС по уровню 0,5 составляет величину порядка 1 м, т.е.  $\tau_{\Pi} = 3$  нс, крутизна переднего фронта – 1 нс, уровень первого бокового лепестка – порядка  $-10$ дБ. Поперечный размер «пятна»  $x_{\Phi} = 7$  м.

В окрестности точки поражения ( $R = 1$  км) уровень первого бокового лепестка не превышает  $E_{\text{бок}} < 0,3 E_{\text{max}}$ . 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 также 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. На рис. 2 представлен амплитудно-частотный спектр излучаемого сигнала вдоль нормали к ФАР для  $Q = 8$ .

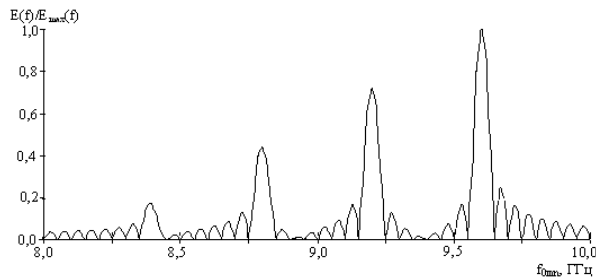


Рис. 2. Амплитудно-частотный МЧ ПВС сигнала вдоль нормали к ФАР ( $Q = 8$ )

На рис. 3 представлен амплитудно-частотный спектр излучаемого сигнала при смещении направления фокусировки вдоль образующей на величину, равную поперечному линейному размеру ПВС  $d = x_{\text{Ф}}$  при формировании его вдоль нормали к решетке для  $Q = 8$ .

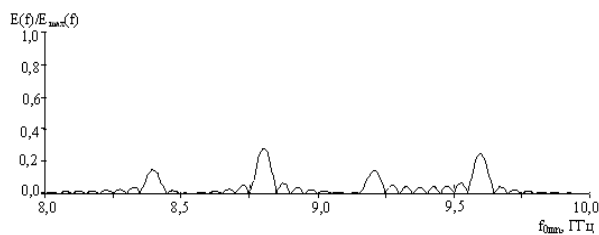


Рис. 3. Амплитудно-частотный МЧ ПВС для  $d = x_{\text{Ф}}$  ( $Q = 8$ )

На рис. 4 представлен амплитудно-частотный спектр излучаемого сигнала при смещении направления фокусировки вдоль образующей на величину, равную двум поперечным линейным размерам ПВС  $d = 2x_{\text{Ф}}$  при формировании его вдоль нормали к решетке для  $Q = 8$ .

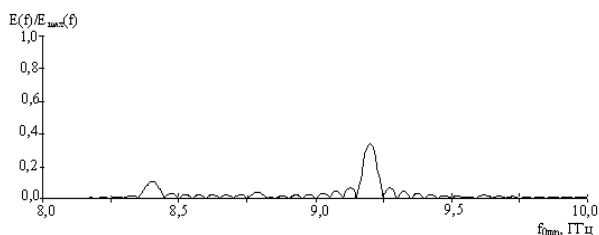


Рис. 4. Амплитудно-частотный МЧ ПВС для  $d = 2x_{\text{Ф}}$  ( $Q = 8$ )

Аналогичные результаты были получены для скважности  $Q = 4$ . На рис. 5 представлен амплитудно-

но-частотный спектр излучаемого сигнала вдоль нормали к ФАР для  $Q = 4$ .

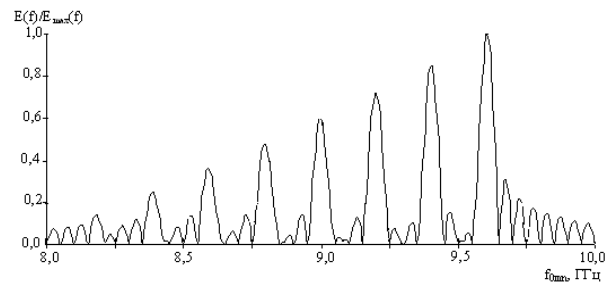


Рис. 5. Амплитудно-частотный МЧ ПВС сигнала вдоль нормали к ФАР ( $Q = 4$ )

На рис. 6 представлен амплитудно-частотный спектр излучаемого сигнала при смещении направления фокусировки вдоль образующей на величину, равную поперечному линейному размеру ПВС  $d = x_{\text{Ф}}$  при формировании его вдоль нормали к решетке для  $Q = 4$ . На рис. 7 представлен амплитудно-частотный спектр излучаемого сигнала при смещении направления фокусировки вдоль образующей на величину, равную двум поперечным линейным размерам ПВС  $d = 2x_{\text{Ф}}$  при формировании его вдоль нормали к решетке для  $Q = 4$ .

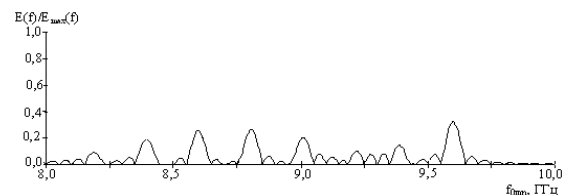


Рис. 6. Амплитудно-частотный МЧ ПВС для  $d = x_{\text{Ф}}$  ( $Q = 4$ )

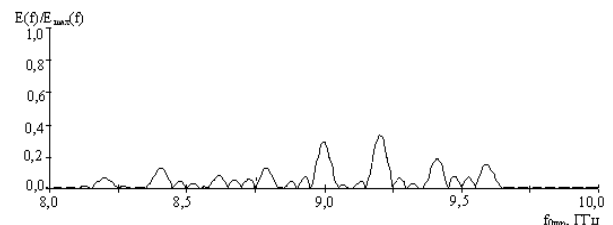


Рис. 7. Амплитудно-частотный МЧ ПВС для  $d = 2x_{\text{Ф}}$  ( $Q = 4$ )

Из анализа рис. 2 – 7 следует, что при удалении точки фокусировки от направления нормали к оси ФАР происходит «размытие» МЧ ПВС, напряженность электрического поля существенно снижается (до 70%), структура амплитудно-частотных спектров становится нерегулярной и стремится к шумоподобной. В этом случае уровень сигнала не позволяет говорить о ФП бортовых РЛС СВН.

Для того, чтобы появилась возможность осуществлять ФП в направлениях, отличных от направления нормали к оси ФАР, необходимо предусмотреть дополнительное линейное фазовое распределение, позволяющее осуществлять сканирование ДН.

Для осуществления ФП бортовых РЛС СВН в любой точке траектории ее движения на определенном расстоянии целесообразно предусмотреть возможность создания последовательности МЧ ПВС в направлениях, отличных от направления нормали к оси цилиндрической ФАР. Координаты объекта в общем случае могут быть рассчитаны, если в заданный момент времени проводить экстраполяцию координат траектории движения сопровождаемого объекта на основе радиолокационной информации, полученной в предыдущие временные отсчеты, или с помощью целеуказания. По известным прямоугольным координатам точки фокусировки в заданный момент времени новые их значения в сферической системе координат, связанной с ФАР, могут быть рассчитаны как:

$$\begin{cases} R(t) = \sqrt{x_{\Phi}(t)^2 + y_{\Phi}(t)^2 + z_{\Phi}(t)^2}; \\ \varepsilon(t) = \arccos[z_{\Phi}(t)/R_n(t)]; \\ \beta(t) = \arctg[z_{\Phi}(t)/y_{\Phi}(t)], \end{cases} \quad (3)$$

где  $R$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  – сферические координаты СВН;  $x_{\Phi}$ ,  $y_{\Phi}$ ,  $z_{\Phi}$  – декартовы координаты СВН.

Знание угловой координаты по углу места позволяет задать дополнительное фазовое распределение в виде линейного члена к выражению (2), обеспечивающей отклонение диаграммы направленности от направления нормали к ФАР по углу места. Добавку в плоскости образующей (азимутальном направлении) задавать нецелесообразно в силу осесимметричной конструкции цилиндрической ФАР.

Известно [5], что для осуществления сканирования необходимо задавать дополнительное линейное фазовое распределение вдоль апертуры ФАР. В рассматриваемом случае добавка в угломестной плоскости  $\varphi_{0\varepsilon}$  имеет вид:

$$\varphi_{0\varepsilon}(x_n) = -a(t)x_n,$$

где  $a(t) = (\pi L/\lambda) \cdot \sin \varepsilon(t) \cos \beta(t)$  – крутизна фазового распределения в угломестной плоскости.

В случае фокусировки в подвижную точку коэффициенты  $a(t)$  будет зависеть от времени в соответствии с заданным законом движения объекта, определяемого (3). В этом случае, выражение для напряженности электрического поля (2) для фокусировки в точку траектории будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{E}(P, t) = & \sum_{m=1}^{M_x} \sum_{n=1}^{N_y} \frac{\dot{F}_{mn}(\beta_{\Phi}, \alpha_{\Phi})}{R_{mn}} \sqrt{60 P_{mn} G_{\max mn}} \times \\ & \times \exp \left\{ j \left[ 2\pi f_{0 mn} \left( t - \frac{R_{mn}}{c} \right) + \varphi_{0 mn} + a(t)x_n \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) описывает напряженность электрического поля в направлении, отличном от нормали к оси цилиндрической ФАР. Очевидно, что амплитудно-частотный спектр МЧ ПВС в этом случае не изменяется и появляется возможность ФП радиоэлектронных систем СВН в любой точке траектории в пределах заданных углов сканирования.

## Выводы

Проведен расчет амплитудно-частотных спектров МЧ ПВС при различных углах места СВН. При удалении точки поражения от направления нормали к оси ФАР происходит «размытие» МЧ ПВС, напряженность электрического поля существенно снижается (до 70%), структура амплитудно-частотных спектров становится нерегулярной и стремится к шумоподобной. В этом случае уровень сигнала не позволяет говорить о ФП бортовых РЛС СВН.

Предложен метод расчета дополнительного линейного фазового распределения для осуществления сканирования диаграммой направленности цилиндрической ФАР по углу места с целью решения задачи ФП.

## Список литературы

1. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
2. 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.
3. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
4. Небабин В. Радиоэлектронные средства ПРП / Виктор Небабин, Игорь Кузнецов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1997. – № 2. – С. 44-57.
5. Шифрин Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. – Х.: Изд-во ВИРТА, 1976. – 407 с.

Поступила в редколлегию 2.03.2011

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

## ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ ЦИЛІНДРИЧНИМИ ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ З ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.М. Ясечко, Г.В. Єрмаков

Визначені часові характеристики послідовності багато частотних просторово-часових сигналів, при яких досягається функціональне ураження радіоелементів вхідних трактів приймальних пристроїв бортових РЛС. Запропонований метод розрахунку додаткового лінійного фазового розподілення для здійснення сканування діаграмою спрямованості циліндричної ФАР по куту місця.

**Ключові слова:** багаточастотний просторово-часовий сигнал, циліндрична фазована функціональне ураження.

## RADIATION OF MULTIFREQUENCY SPATIO-TEMPORAL SIGNALS SEQUENCES BY CYLINDRICAL ARRAYS WITH THE SET DESCRIPTIONS

M.N. Yasechko, G.V. Yermakov

Temporal characteristics of multifrequency spatio-temporal signals sequence at which the functional defeat of received de-fined input circles entrance is arrived radioelements at radar are certain. The method of calculation of additional linear phase distributing is offered for realization of scan-out the patten of cylindrical array on the elevation.

**Keywords:** multifrequency spatio-temporal signal, cylindrical array, functional defeat.