

Электродинамика и антенные системы

УДК 519.876.5

Моделирование пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в цифровых антенных решетках декаметровых радиоэлектронных систем

Орошук Игорь Михайлович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электроники и средств связи. ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет».

E-mail: Oroshchuk@yandex.ru.

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Сучков Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронного оборудования. ФГКВБОУ ВО «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова».

E-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru.

Жариков-Горский Василий Андреевич

адъюнкт кафедры боевого применения средств связи.

ФГКВБОУ ВО «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова».

E-mail: d4gvard@mail.ru.

Адрес: 690062, г. Владивосток, ул. Камский переулок, дом 6.

Аннотация: Предложен метод имитационного моделирования пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в цифровых антенных решётках декаметровых радиоэлектронных систем. Метод основан на результатах статистической обработки экспериментальных данных о пространственно-корреляционных характеристиках радиосигналов и радиопомех. Разработанный метод моделирования рекомендован для исследования помехоустойчивости и направленных характеристик радиоэлектронных систем, построенных на основе цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов.

Ключевые слова: декаметровый диапазон, пространственно-корреляционные характеристики, помехоустойчивость, направленные свойства, стохастическая имитационная модель, синтез, радиосигналы, радиопомехи.

Введение

Широкое внедрение в радиоэлектронные системы (РЭС) цифровых антенных решеток (ЦАР) позволяет в полной мере исследовать эффективность различных видов антенных решеток (АР) с обработкой сигналов [1]. В частности, интерес представляют возможности нелинейных методов обработки сигналов в приёмных АР с неэквидистантным вариантом расположения их элементов в пространстве, которые ввиду трудной реализуемости на основе аналоговой техники не были в полной мере

изучены. Такие РЭС согласно работам [2, 3] могут обладать некоторыми преимуществами по сравнению классическими методами обработки сигналов, применяемыми в АР. В частности, исследования ряда зарубежных [4–6] и отечественных ученых [1, 2, 7] показали возможность достижения высоких направленных свойств и снижения боковых лепестков диаграммы направленности при выгодном уменьшении числа элементов в АР.

Среди многих разновидностей РЭС большой интерес представляют декаметровые си-

стемы, прежде всего, из-за большей дальности действия. Эмпирическая апробация таких систем с применением пространственно-корреляционного метода обработки сигналов, как разновидности нелинейной обработки, показала перспективы улучшения направленных характеристик антенных систем и повышения помехоустойчивости РЭС, особенно при малых отношениях уровней сигнал/шум ($q \leq 1$) [8–14].

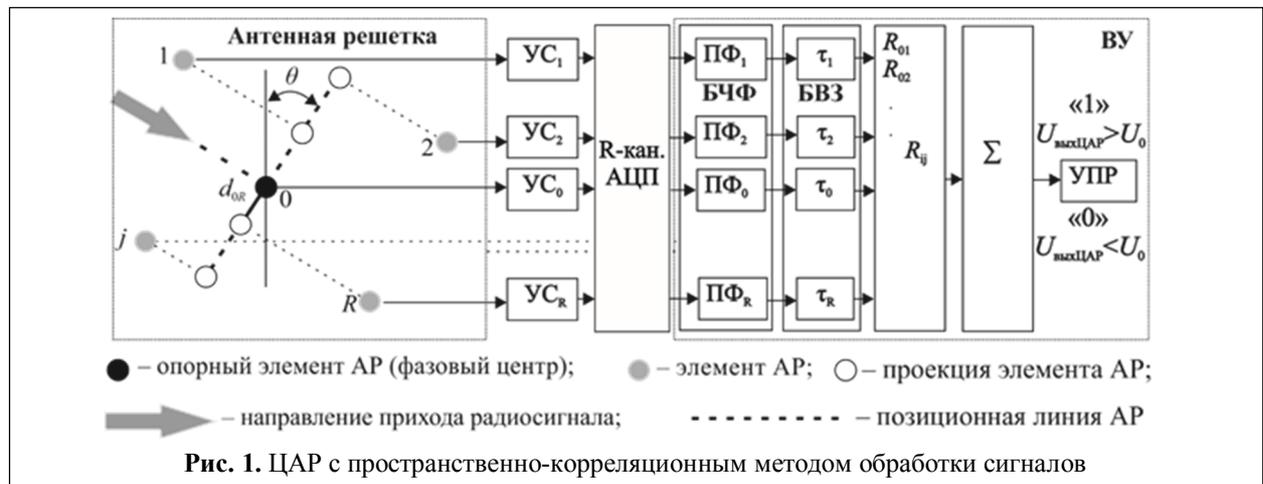
Для проведения экспериментальных исследований возможностей применения ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов в декаметровом диапазоне, необходимых для поиска оптимальных методов построения апертуры АР и выбора эффективного алгоритма обработки входных сигналов, требуются большие затраты на антенно-фидерное, приемное и вычислительное оборудование, а также на разработку программного обеспечения для анализа и обработки результатов исследований. В связи с этими ограничениями целесообразнее предварительно проводить численное имитационное моделирование работы ЦАР, основанное на моделях пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в пределах апертуры АР.

1 Пространственно-корреляционный метод обработки сигналов в ЦАР

Цифровая антенная решётка декаметрового диапазона с пространственно-корреляционным

методом обработки сигналов состоит из дискретной нерегулярной АР с R элементами и приемными трактами, включающими усилители (УС), многоканальный (R -канальный) аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и вычислительное устройство (ВУ) (рис. 1). Вычислительное устройство функционально состоит из блока частотной фильтрации (БЧФ), включающего набор полосовых фильтров (ПФ), блока временных задержек (БВЗ), корреляционного вычислителя (R_{ij}), сумматора (Σ) и устройства принятия решения (УПР) [8–14].

Полезный радиосигнал поступает на разнесенные в пространстве элементы АР. На выходах этих элементов формируются сигналы, которые проходят через усилительные тракты и далее – на АЦП, где они преобразуются в цифровую форму, а затем поступают в ВУ. В вычислительном устройстве в БЧФ происходит полосовая частотная фильтрация оцифрованных сигналов, которые затем поступают в БВЗ. В блоке временных задержек осуществляется формирование диаграммы направленности и сканирование пространства путем виртуального позиционирования всех элементов АР на одну линию ортогонально направлению прихода радиосигнала (см. рис. 1). В этом случае происходит сдвиг массивов оцифрованных сигналов между собой на величины компенсационных временных задержек τ_k , соответствующих заданному направлению позиционирования АР ($\tau_k = dsin\theta/c$ где θ – угол между линией позиционирования элементов и



направлением на элемент относительно фазового центра АР; d – расстояние между элементами; c – скорость света).

В корреляционном вычислителе производится оценка функций взаимной корреляции радиосигналов с выходов всех пар элементов АР с последующим их суммированием в сумматоре [8–14]:

$$U_{\text{выхЦАР}} = 2 \sum_{i=1}^{R-1} \sum_{j>i}^{R-1} [\sigma_{s,i} \sigma_{s,j} \rho_{s,ij}(\tau - \tau_k) + \sigma_{n,i} \sigma_{n,j} \rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)], \quad (1)$$

где $\sigma_{s,i}, \sigma_{s,j}, \sigma_{n,i}, \sigma_{n,j}$ – среднеквадратические отклонения (СКО) напряжений радиосигналов и радиопомех на выходах i -х и j -х элементов АР; $\rho_{s,ij}, \rho_{n,ij}$ – коэффициенты взаимной корреляции (КВК) напряжений радиосигналов и радиопомех на выходах i -х и j -х элементов АР; τ_k, τ – компенсационные и естественные временные задержки радиосигналов, обусловленные разностью времени распространения радиосигнала до элементов АР; R – количество элементов АР.

Выходное напряжение сумматора поступает на вход УПР. Решение о наличии или отсутствии полезного сигнала принимается по результатам сравнения выходного сигнала ЦАР [см. выражение (1)] с пороговым уровнем (U_0), величина которого определяется параметрами РЭС, соотношением энергетических уровней радиосигнала σ_s и радиопомехи σ_n , а также значениями корреляционной связи радиосигналов ρ_s и радиопомех ρ_n в зоне приема [8–14].

Анализ выражения (1) и дополнительные исследования показали [8–14], что эффективность рассматриваемых РЭС в немалой степени зависит от пространственно - корреляционной связи радиосигналов и радиопомех.

Следовательно, для оценки потенциальных возможностей РЭС, построенных на основе ЦАР, кроме энергетических параметров, необходимы реальные пространственно - корреляционные зависимости полей радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона. Однако данных об экспериментальных исследованиях

корреляционной связи радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона в современной литературе крайне мало, а в имеющихся источниках нет подробного их описания. Поэтому для более детального изучения пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех были проведены дополнительные экспериментальные исследования [9, 15].

2 Экспериментальные исследования пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона

Результаты экспериментов показали [9, 15], что значения ρ_s при пространственном разнесении приемных антенн до 1 км остаются высокими и в пределах декаметрового диапазона уменьшаются незначительно до 0,81.

Для математического моделирования на основе статистической обработки полученных экспериментальных данных определено обобщающее аппроксимирующее выражение, отражающее общий характер изменения пространственно-корреляционной связи радиосигналов в декаметровом диапазоне для заданного разнесения между антеннами d с погрешностью не более 3,53 % [9, 11, 15]:

$$\rho_s(d, f_0) = \exp[-d(5,28 \cdot 10^{-3} \cdot f_0 + 0,138)], \quad (2)$$

где f_0 – частота сигнала, МГц, d – расстояние между элементами АР, км.

Величина ρ_n имеет иную тенденцию [9, 15]. Большие значения КВК радиопомех сохраняются только в пределах небольшого интервала корреляции d_0 , величина которого составляет несколько метров, а затем при увеличении разнесения между антенн ρ_n резко снижаются и осциллируют по случайному закону в небольших пределах вдоль оси абсцисс (рис. 2).

Как показали исследования, амплитуда флуктуаций КВК зависит от средней частоты f_0 и ширины полосы пропускания Δf трактов обработки сигналов.

В силу случайного характера, зависимость амплитуды флуктуационной составляющей КВК радиопомех от f_0 и Δf определяется

функцией СКО КВК $\sigma_n(f_0, \Delta f)$, для которой получено аппроксимирующее эмпирическое выражение [11, 16]:

$$\sigma_n(f_0, \Delta f) = 7,2 \cdot 10^{-3} f_0 + 1,3 \cdot 10^{-4} \Delta f + 0,118, \quad (3)$$

где Δf – полоса пропускания трактов обработки сигналов, кГц,

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что для радиосигналов зависимость их пространственно-

ной по гауссовому закону $N(\rho_n, \sigma_n)$, при разносе на большие расстояния $d > d_0$ (см. рис. 2):

$$\rho_n(d) = \begin{cases} \sin(\pi d/d_0)/(\pi d/d_0), & 0 \leq d \leq d_0, \\ N(\rho_n, \sigma_n), \rho_n \in (-1; 1), & d > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

$f_0 \in (3; 30 \text{ МГц}),$

где $N(\rho_n, \sigma_n) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_n)\exp[-(\rho_n^2/2\sigma_n^2)]$

Алгоритм формирования случайной реализации зависимости $\rho_n \text{случ}(d)$ на расстояниях больше пространственного интервала корреляции $d > d_0$ заключается в следующем.

В качестве исходных данных берется усредненная пространственно-корреляционная зависимость КВК радиопомех $\rho_n(d)$, полученная в ходе натурных экспериментов в заданном поддиапазоне частот (см. рис. 2).

На ее основе путем прямого дискретного преобразования Винера-Хинчина определяется спектральная плотность мощности нормированных радиопомех [17]:

$$G_n(m) = 4 \sum_{k=0}^{K-1} \rho_n(\Delta dk) \cos(2\pi \Delta F_d m \Delta dk), \quad (5)$$

где $G_n(m)$ – амплитуда m -ой гармоники пространственного спектра мощности нормированной радиопомехи; $\rho_n(\Delta dk)$ – дискретное значение ρ_n для k -го отсчета пространственно-корреляционной зависимости; K – объем всей выборки, $k = \overline{0, K}$; Δd – шаг дискретизации исходной функции $\rho_n(d)$; M – количество гармоник пространственного спектра, $m = \overline{0, M}$, определяемое максимальной частотой $F_{d \max} = 1/K$ и частотным разрешением пространственного спектра $\Delta F_d = 1/2\Delta dK$, $M = F_{d \max}/\Delta F_d$.

Далее по полученным значениям $G_n(m)$ находятся эффективные значения напряжений гармоник радиопомех:

$$N_{nm} = \sigma_{nm} = \sqrt{|G_n(m)|}, \quad (6)$$

После этого производится синтез случайной реализации пространственного спектра радиопомехи, для чего используется генератор слу-

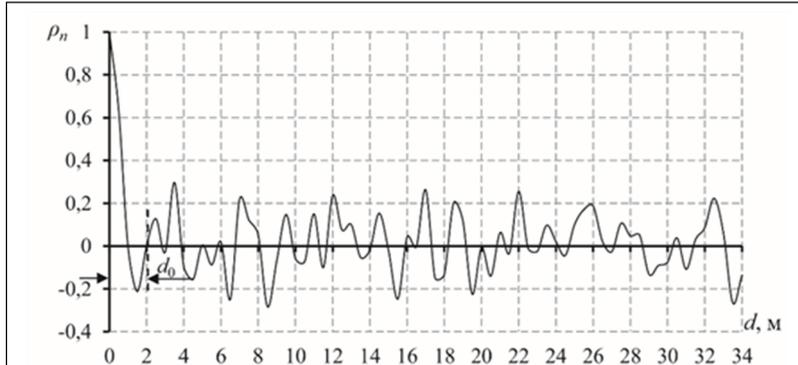


Рис. 2. Фрагмент реализации экспериментальной пространственно-корреляционной зависимости поля радиопомех декаметрового диапазона на частоте $f_0 = 10 \text{ МГц}$ при полосе обработки $\Delta f = 10 \text{ кГц}$

корреляционной связи носит детерминированный, а для радиопомех – случайный характер. С учетом этого при моделировании пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов используется детерминированная модель (2), а для радиопомех дополнительно разработана стохастическая имитационная модель, учитывающая аппроксимирующие эмпирическое выражение (3).

3 Стохастическая имитационная модель пространственно-корреляционных характеристик поля радиопомех декаметрового диапазона

Стохастическая имитационная модель пространственно-корреляционных характеристик поля радиопомех декаметрового диапазона построена на основе рассмотренных выше результатов экспериментов [см. раздел (2)], после статистической обработки которых [9, 11, 15-16] был выявлен детерминированный закон изменения ρ_n при разносе антенн до пространственного интервала корреляции d_0 и случайный характер зависимости КВК, распределён-

чайных чисел $Ra\{x\} \in (0, 1)$ с равномерным законом распределения, который обеспечивает равновероятный синтез возможных значений вероятностей в пределах от 0 до 1.

Учитывая гауссовый закон распределения пространственно-корреляционной зависимости КВК радиопомех $N(\rho_n, \sigma_n)$ [15], процесс синтеза реализации его случайного спектра производится с помощью обратной интегральной функции гауссового распределения с нулевым средним [18-19] при полученных значениях амплитуд каждой гармоники $\sigma_{n m}$ (рис. 3):

$$N_{n \text{ случ } m} = F_N^{-1}\{Ra\{x\}, \sigma_{n m}\} \quad (7)$$

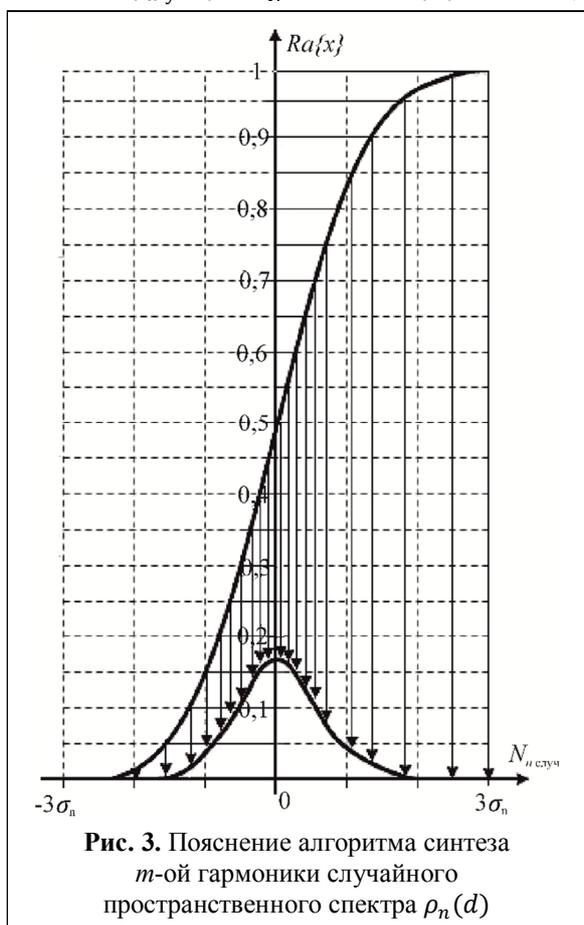


Рис. 3. Пояснение алгоритма синтеза m -ой гармоники случайного пространственного спектра $\rho_n(d)$

Таким образом формируется случайная реализация пространственного спектра радиопомех (рис. 4).

Далее путём обратного преобразования Винера-Хинчина синтезируется случайная реализация пространственно-корреляционной зависимости поля радиопомех:

$$\rho_{n \text{ случ}}(\Delta dk) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} N_{n \text{ случ } m} \cos(2\pi \Delta F_d m \Delta dk). \quad (9)$$

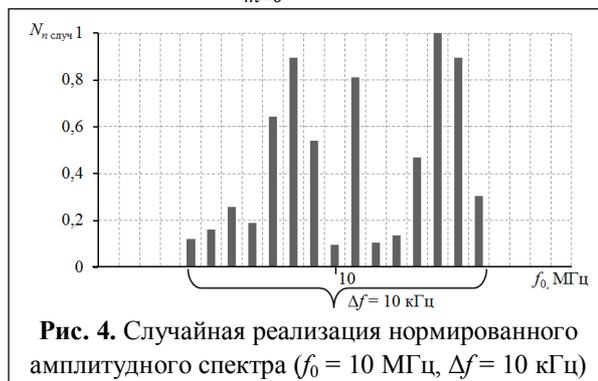


Рис. 4. Случайная реализация нормированного амплитудного спектра ($f_0 = 10$ МГц, $\Delta f = 10$ кГц)

Для адекватного имитационного моделирования пространственно-корреляционной зависимости поля радиопомех отклонение амплитуд осцилляции синтезированных реализаций $\rho_{n \text{ случ}}(d)$ от соответствующей исходной экспериментальной функции $\rho_n(d)$ не должно превышать заданную при моделировании относительную погрешность δ_ϵ : $|\rho_{n \text{ случ}} - \rho_n| \leq \delta_\epsilon$ (для КВК относительная погрешность равна абсолютной $\epsilon = \delta_\epsilon$). С этой целью для синтеза случайной реализации $\rho_{n \text{ случ}}(d)$ задается минимальный объем выборки [14]:

$$K > \frac{8\Delta d}{d_0(1-P_{\text{дов}})\epsilon^2} \quad (9)$$

где ϵ – допустимая погрешность отклонения между синтезированной и экспериментальной зависимостями КВК радиопомех; $P_{\text{дов}}$ – доверительная вероятность обеспечения допустимой погрешности, $P_{\text{дов}} = P(\Delta \leq \epsilon)$; Δ – абсолютное отклонение между экспериментальными и синтезированными значениями КВК поля радиопомех, $\Delta = |\rho_{n \text{ случ}} - \rho_n|$.

В качестве примера на рис. 5 представлена экспериментальная пространственно - корреляционная зависимость поля радиопомех $\rho_{n \text{ эксп}}(d)$ при $f_0 = 8$ МГц, $\Delta f = 10$ кГц и синтезированная на ее основе случайная реализация КВК поля радиопомех $\rho_{n \text{ случ}}(d)$.

При численном моделировании было обработано 67 синтезированных реализаций пространственно-корреляционной зависимости поля радиопомех, анализ которых показал, что относительное взаимное отклонение между

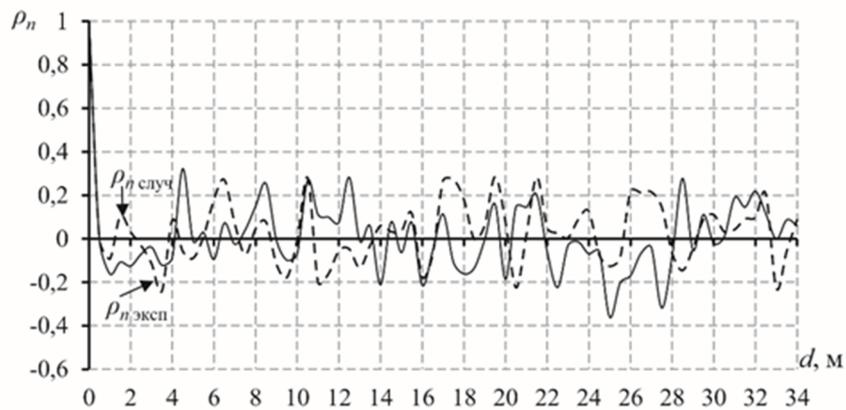


Рис. 5. Экспериментальные и смоделированные пространственно-корреляционные зависимости поля радиопомех

ними не превышала заданную: $\delta_\varepsilon \leq 3\%$, что подтвердило адекватность разработанной имитационной модели.

4 Моделирование характеристик ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов

На базе полученной стохастической имитационной модели пространственно - корреляционных характеристик поля радиопомех декаметрового диапазона и детерминированной модели пространственно-корреляционной зависимости поля радиосигналов [см. выражение (2)], можно производить численное моделирование работы ЦАР для различных вариантов конфигурации АР, частоты сигнала f_0 и полосы пропускания трактов обработки сигналов Δf .

На рис. 6 представлен вариант моделирования

пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех, по которым можно оценивать значения КВК при различном разноразности элементов АР.

На основе полученных характеристик $\rho_s(d)$ и $\rho_{n\text{случ}}(d)$ (см. рис. 6) можно исследовать помехоустойчивость и направленные характеристики анализируемых РЭС.

Для расчета помехоустойчивости вначале определяется матрица взаимных расстояний между элементами АР $\|d_{ij}\|$ после их позиционирования в направлении полезного радиосигнала (см. рис. 1):

$$\|d_{ij}\| = \begin{pmatrix} d_{00} & d_{01} & d_{02} & \dots & d_{0R} \\ & d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1R} \\ & & d_{22} & \dots & d_{2R} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & & d_{RR} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

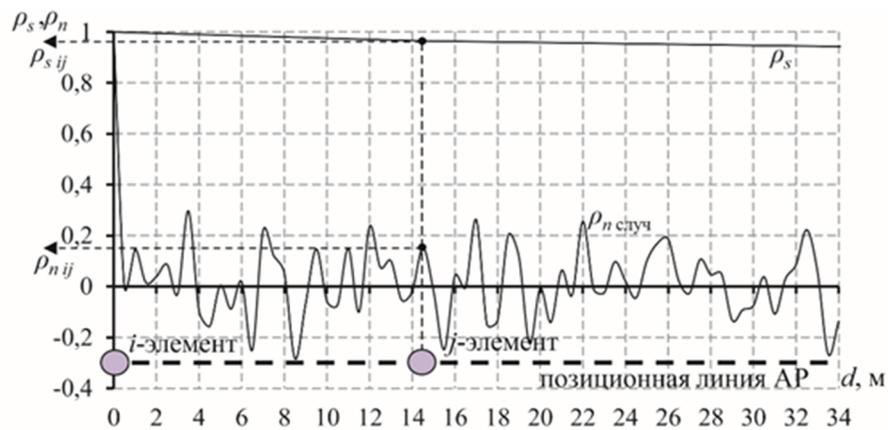


Рис. 6. Вариант моделирования пространственно-корреляционных характеристик радиосигналов и радиопомех

исходя из которой после наложения расстояний на зависимости КВК радиосигналов и радиопомех (см. рис. 6) определяются соответствующие матрицы взаимных корреляций:

$$\begin{aligned} \|\rho_{s,ij}\| &= \begin{vmatrix} 1 & \rho_{s,01} & \rho_{s,02} & \dots & \rho_{s,0R} \\ & 1 & \rho_{s,12} & \dots & \rho_{s,1R} \\ & & 1 & \dots & \rho_{s,2R} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & & 1 \end{vmatrix}, \\ \|\rho_{n,ij}\| &= \begin{vmatrix} 1 & \rho_{n,01} & \rho_{n,02} & \dots & \rho_{n,0R} \\ & 1 & \rho_{n,12} & \dots & \rho_{n,1R} \\ & & 1 & \dots & \rho_{n,2R} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

По результатам вычислений значений КВК [см. выражение (10)] производится оценка помехоустойчивости для заданного варианта построения апертуры ЦАР при различных значениях уровней радиосигнала и радиопомехи на входах элементов АР.

В частности, для РЭС обнаружения пространственных объектов помехоустойчивость определяется выражением [8, 10, 12]

$$P_{пр} = \Phi \left(\frac{\Phi^{-1}[1 - P_{лт}] \sqrt{L + \sum_{i<j} \rho_{n,ij}^2} - 2\sqrt{K}q^2 \sum_{i<j} \rho_{s,ij}}{\sqrt{L(q^2 + 1)^2 + 2 \sum_{i<j} (\rho_{s,ij}q^2 + \rho_{n,ij})}} \right), \quad (11)$$

где $P_{пр}$ – вероятность пропуска цели; $P_{лт}$ – вероятность ложной тревоги;

$\Phi(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – интеграл вероятности; $\Phi^{-1}(z)$ – функция обратная интегралу вероятности; q – отношение эффективного значения напряжения радиосигнала к радиопомехе на входах элементов АР, $q = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}$; K – объем выборки; $L = R^2 - R$.

На рис. 7 показан пример полученной зависимости $P_{пр}$ от отношения уровней радиосигнала к радиопомехе q на входах элементов АР для одного из вариантов конфигурации АР.

Аналогичным образом, путем определения значений КВК радиосигналов и радиопомех в различных направлениях позиционирования АР [см. выражения (10)] производится оценка направленной характеристики ЦАР, определяемой выражением (1) для заданного соотношения уровней радиосигнала к радиопомехе (q).

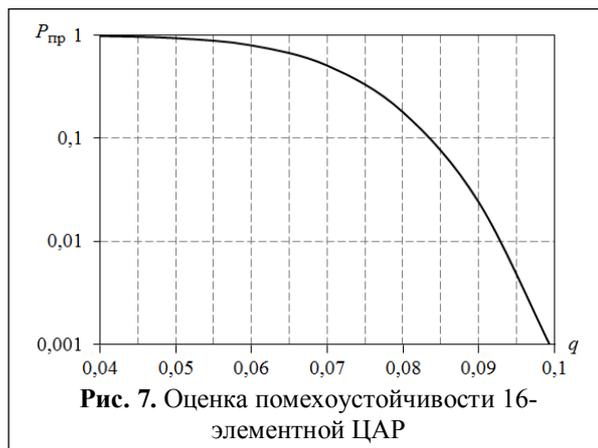


Рис. 7. Оценка помехоустойчивости 16-элементной ЦАР

В качестве примера на рис. 8 представлен смоделированный нормированный отклик 16-элементной ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов на частоте 12 МГц для одного из вариантов конфигурации АР.

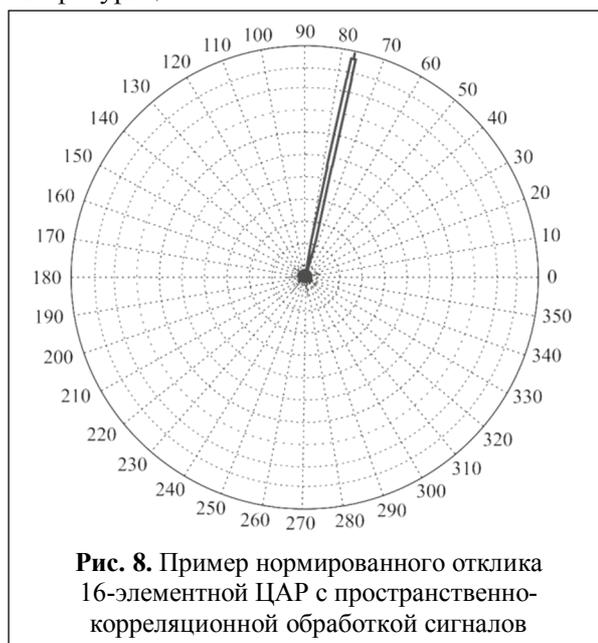


Рис. 8. Пример нормированного отклика 16-элементной ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов

Таким образом, разработанные модели синтеза пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех позволяют проводить численные исследования характеристик декаметровых РЭС, построенных на ЦАР с пространственно - корреляционным способом обработки сигналов.

На основе полученных результатов моделирования возможна выработка практических рекомендаций по оптимизации построения апертуры ЦАР, обеспечивающей наибольшую помехоустойчивость для перспективных РЭС

декаметрового диапазона при заданных направленных свойствах АР без существенных затрат на экспериментальные исследования.

Полученные имитационные модели также могут быть использованы для моделирования и разработки различных РЭС декаметрового диапазона, учитывающих при обработке значения КВК радиосигналов и радиопомех.

Литература

1. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / Л. Н. Григорьев. – М. : Радиотехника, 2010. – 144 с.

2. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. – М: Радиотехника, 2012. – 744 с.

3. Хансер Р.К. Сканирующие антенные системы: монография / под ред. Г. Т. Маркова и А. Ф Чаплина. – М. : Советское радио, 1966. – 496 с.

4. Y. Tang, B. Jiang, T. Zhou and T. Mao. Multi-resolution composite array based radar with adaptive beamforming. IET International Radar Conference 2015, 14-16 Oct. 2015, pp. 1-4.

5. L.C. Stange, C. Metz, E. Lissel and A.F. Jacob. Multiplicatively processed antenna arrays for DBF radar applications. IEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, 2002. Volume 149, Issue 2, pp. 106-112.

6. Weib, M. (2009) Digital Antennas, In Multistatic Surveillance and Reconnaissance: Sensor, Signals and Data Fusion (pp. 5-1 – 5-29). Educational Notes RTO-EN-SET-133, Paper 5. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: www.rto.nato.int/abstracts.aps (date of access: 26.11.16).

7. Бенесон Л.С. Антенные решетки. – М.: Советское радио, 1966. – 367 с.

8. Dolgikh V.N., Oroshchuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. Acoustical Physics. 2007(53); 2:190-196. New York (in engl.).

9. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Пространственно-корреляционные свойства радиосигналов декаметровых волн // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 34–39.

10. Орошук И.М., Долгих В.Н., Сучков А.Н. Вероятностные характеристики пространственно-корреляционного метода обнаружения сигналов в декаметровом диапазоне // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2013. – № 12. – Режим

доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html>.

11. Орошук И.М., Сучков А.Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2015. – № 2. С. 17–26. URL: <http://vestnikis.dvfu.ru/images/2015-2-3.pdf>.

12. Орошук И.М., Сучков А.Н. Пространственно-корреляционный метод обработки сигналов декаметрового диапазона // 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Секция 4 «Обработка сигналов в радиотехнических системах». – Москва, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2014. – С. 302–305.

13. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Пространственно-корреляционный метод обработки сигналов в неэквидистантных цифровых антенных решетках // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2015. – С. 385–389.

14. Орошук И.М., Жариков-Горский В.А., Сучков А.Н. Имитационное моделирование отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов декаметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2016. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/10/text.pdf>.

15. Долгих В.Н. Пространственно-корреляционные свойства сигналов и помех декаметрового диапазона / В.Н. Долгих, И.М. Орошук, А.Н. Сучков; под ред. В.С. Колмогорова. – Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова», 2013. – 112 с.

16. Орошук И.М., Сучков А.Н. Стохастическая имитационная модель пространственно-корреляционных характеристик поля радиопомех декаметрового диапазона // 8-я Международная научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». – Суздаль, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2015. – С. 90–94.

17. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: учебник / пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.

18. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

19. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. Радио, 1968. – 360 с.

Поступила 02 марта 2017 г.

English

Simulation of space and correlation characteristics of radio signal and radio interference field in digital antenna arrays of decameter radio-electronic systems

Igor Mikhaylovich Oroshchuk – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electronics and Communication Facilities Far Eastern Federal University.

E-mail: Oroshchuk@yandex.ru.

Address: 690091, Vladivostok, Sukhanov St., 8.

Andrey Nikolaevich Suchkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electronic Equipment The Pacific Higher Naval Academy named after S. O. Makarov.

E-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru.

Vasily Andreevich Zharikov-Gorsky – Post-graduate, Department of Communication Combat Employment The Pacific Higher Naval Academy named after S. O. Makarov.

E-mail: d4gvard@mail.ru.

Address: 690062, Vladivostok, Kamsky Lane St., 6.

Abstract: Development of digital technologies enables to evaluate perspectives of using nonlinear antenna arrays with their unequally spaced elements which have certain advantages as compared with equally spaced arrays with gainful reduction of their elements number according to the research of some domestic and foreign scientists. The work examines digital antenna arrays with a signal spatial correlation processing method, testing of which in the decameter range showed perspective improvement of directional characteristics for noise immunity with low signal-to-noise ratio. The efficiency of these antenna arrays largely depends on radio signal and radio noise spatial correlation. To carry out more detailed analysis of their characteristics, the costly live experiments are required and thus it is more reasonable to solve these problems by the simulation modeling based on models of spatial and correlation characteristics of the radio signal and radio noise field obtained as a result of statistical analysis of experimental data. Experiment results manifested that values of spatial and correlation relationship of radio signals with receiving antennas space separation up to 1 km remain high and slightly decrease within decameter range. The deterministic model of space and correlation dependence of radio signal field is given. The value of spatial and correlation relationship of radio noise has other tendency. Big correlation values hold true only within a small correlation interval the value of which is a few meters, and if antennas space separation grows then correlation values sharply drop and oscillate under the Gaussian law within narrow limits. The algorithm for obtaining the stochastic simulation model is given in detail enabling to synthesize adequately spatial and correlation characteristics of radio field noise to the accuracy specified. The concept for numerical modeling of noise immunity and the directional characteristics of digital antenna arrays with a signal spatial and correlation processing method is revealed in regard to the obtained models. Some results of simulation modeling are given that confirm high directional characteristics and noise immunity of the systems in question.

Key words: decameter range, spatial and correlation characteristics, noise immunity, directional properties, stochastic simulation model, synthesis, radio signals, radio noise.

References

1. Grigoriev L.N. Digital beamforming in phased antenna arrays. - M Radiotekhnika, 2010. - 144 p.
2. Voskresensky D. I. Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays. – M: Radiotekhnika, 2012. – 744 p.
3. Hanser R. K. The scanning antenna systems: the monograph / Ed. by G. T. Markov and A. F Chaplin. - M.: Soviet radio, 1966. - 496 p.
4. Y. Tang, B. Jiang, T. Zhou and T. Mao. Multi-resolution composite array based radar with adaptive beamforming. IET International Radar Conference 2015, 14-16 Oct. 2015, pp. 1-4.
5. L.C. Stange, C. Metz, E. Lissel and A.F. Jacob. Multiplicatively processed antenna arrays for DBF radar applications. IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, 2002. Volume 149, Issue 2, pp. 106-112.
6. Weib, M. (2009) Digital Antennas, In Multistatic Surveillance and Reconnaissance: Sensor, Signals and Data Fusion (pp. 5-1 - 5-29). Educational Notes RTO-EN-SET-133, Paper 5. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: www.rto.nato.int/abstracts.aps (date of access: 26.11.16).
7. Beneson L.S. Antenna arrays. - M.: Sovetskoye radio, 1966. - 367 p.
8. Dolgikh V.N., Oroshchuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. Acoustical Physics. 2007(53); 2:190-196. New York (in engl.).
9. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Spatial and correlation properties of decameter wave radio signals. - Elektrosvyaz. - 2015. - No. 7. – P. 34-39.