

УДК 519.876.5

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

И. М. Орощук¹, А. Н. Сучков², В. А. Жариков-Горский²

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

² Тихоокеанское высшее военно-морское училище им С.О. Макарова, г. Владивосток

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2016 г.

Аннотация. В статье представлена имитационная модель синтеза отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов в декаметровом диапазоне, используемых в приемных трактах радиолокационных систем. Моделирование основано на частных моделях пространственно-корреляционных характеристик радиосигналов и естественных радиопомех декаметрового диапазона, полученных экспериментальным путем. С учетом случайного характера зависимости пространственно-корреляционной связи естественных радиопомех с целью снижения затрат на экспериментальный исследования для синтеза отклика цифровых антенных решеток предложено использовать разработанную имитационную модель изотропного поля радиопомех

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, пространственно-корреляционные характеристики, помехоустойчивость, направленные свойства, имитационное моделирование, синтез, случайная реализация, изотропное поле, радиопомехи.

Abstract. The simulation model of decameter range digital antenna arrays response synthesis with spatially-correlated signal processing method used in reception path of radar systems is presented. Modeling is based on the particular patterns of spatially-correlation characteristics of decameter range radio signals and natural radio interfer-

ence received experimentally. The natural radio interference's spatially-correlated communication dependence has random character. For the purpose of decrease in expenses for experimental researches for digital antenna arrays response synthesis it is offered to use the developed simulation model of a radio interference isotropic field.

Key words: digital antenna array, spatially-correlation characteristics, interference immunity, directional properties, simulation modeling, random realization, synthesis, isotropic field, radio interference.

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 приемных 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 системы, прежде всего, из-за большей дальности действия. Одним из частных вариантов АР с нелинейным методом обработки сигналов является пространственно-корреляционный метод, экспериментальная апробация которого в декаметровом диапазоне показала перспективы повышения помехоустойчивости РЭС, в основном при малых отношениях уровней сигнал/шум ($q \leq 1$) [8–13] с возможностью обеспечения требуемых направленных характеристик.

Принцип функционирования ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов

Основными функциональными элементами ЦАР декаметрового диапазона с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов являются дискретная неэквидистантная АР с заданным числом элементов (I) и приемными трактами, включающими усилители (УС), многоканальный синхронный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и вычислительное устройство (ВУ) (рис. 1).

Вычислительное устройство функционально состоит из блока частотной фильтрации (БЧФ), блока временных задержек (БВЗ), корреляционного вычислителя (R_{ij}), сумматора (Σ) и устройства принятия решения (УПР) [8–13].

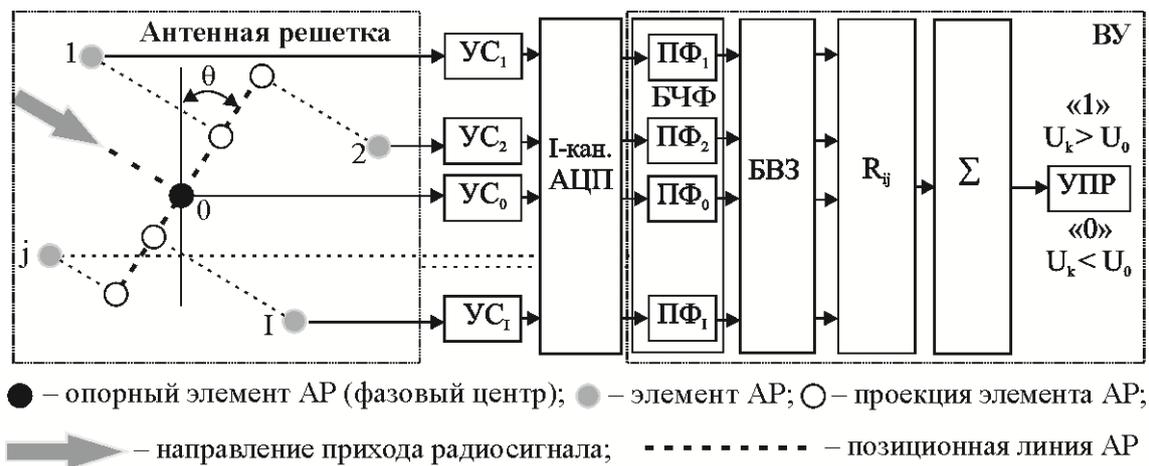


Рис. 1. ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов

С помощью АР выполняется пространственная рандомизация радиолокационного поля отраженного от цели. В результате на выходах всех элементов АР формируются сигналы, которые после усиления оцифровываются в многоканальном синхронном АЦП. Затем цифровые сигналы поступают в ВУ, где в БЧФ выполняется полосовая частотная фильтрация, после чего отфильтрованные сигналы поступают в БВЗ. В блоке временных задержек за счет временных сдвигов сигналов осуществляется формирование диаграммы направленности и сканирование пространства путем виртуального позиционирования всех элементов АР на одну линию ортогонально направлению прихода радиосигнала (см. рис. 1). Далее в корреляционном

вычислителе производится оценка функций взаимной корреляции радиосигналов с выходов всех пар элементов АР с последующим их суммированием в Σ . Свертка итогового напряжения на выходе такой ЦАР может быть представлена в виде [8–13]:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^{I-1} \left[\sigma_{s,i} \sigma_{s,j} \rho_{s,ij} (\tau - \tau_k) + \sigma_{n,i} \sigma_{n,j} \rho_{n,ij} (\tau - \tau_k) \right], \quad (1)$$

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; $\rho_{s,ij}(\tau - \tau_k)$, $\rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)$ – 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 вводимой задержкой и разностью времени распространения радиосигнала до элементов АР; I – количество элементов АР.

Решение о наличии или отсутствии полезного сигнала принимается на основе критерия Немана-Пирсона, по результатам сравнения свертки итогового напряжения ЦАР (см. выражение (1)) с пороговым уровнем. Потенциальная помехоустойчивость таких РЭС оценивается следующим выражением [8, 10]

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

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

$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – 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; $L = I^2 - I$.

Анализ выражений (1), (2) и дополнительные исследования [8–13] показали, что эффективность рассматриваемых ЦАР, в значительной степени зависит

от пространственно-корреляционных свойств радиосигналов ρ_s и естественных радиопомех ρ_n декаметрового диапазона.

Пространственно-корреляционные свойства радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона

В большинстве публикаций приводятся данные о свойствах ЦАР, применяемых в СВЧ диапазоне, а результаты исследований пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех в декаметровом диапазоне в печати весьма ограничены. Подробно эти данные приводятся, в основном, в частных отчетах о научно-исследовательских работах заинтересованных ведомств. В этой связи для исследования потенциальных возможностей ЦАР в декаметровом диапазоне были проведены экспериментальные исследования [14].

Результаты статистической обработки экспериментальных данных пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона показали, что значения ρ_s при пространственном разноразности приемных антенн до 1 км остаются высокими, незначительно уменьшаясь в пределах декаметрового диапазона (до 0,81) и носят детерминированный характер (рис. 2) [9, 14]:

$$\rho_s(d, f_0) = e^{-d(5,28 \cdot 10^{-3} f_0 + 0,18)}, \quad (3)$$

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

В свою очередь, величина ρ_n имеет иную тенденцию [9, 14]. Значение КВК радиопомех резко снижается при разноразности антенн на расстояние, превышающее пространственный интервал корреляции d_0 , составляющий не более нескольких метров. В дальнейшем происходит случайная осцилляция КВК радиопомех в небольших пределах вдоль оси пространственного разноразности антенн (d) (см. рис. 2). Мгновенное значение КВК радиопомех распределено по гауссовому закону [10]. Среднеквадратическое отклонение на участке осцилляции определяется несущей частотой f_0 и шириной полосы пропускания Δf трактов обработки сигналов.

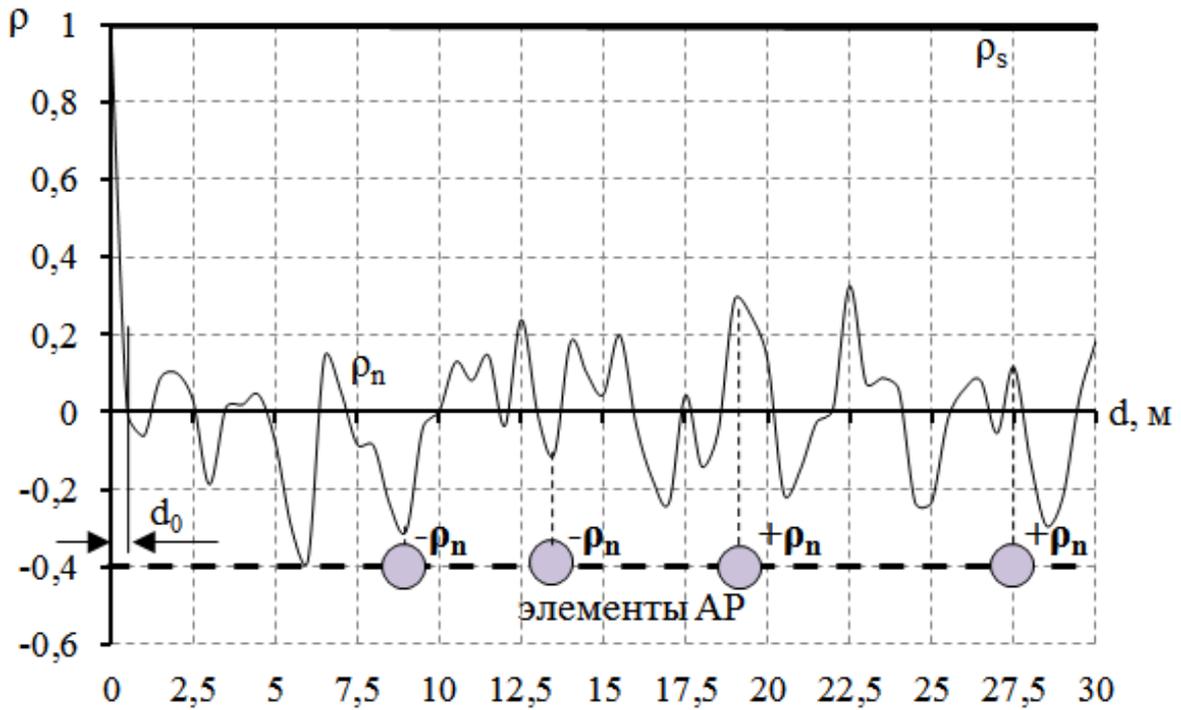


Рис. 2. Фрагмент реализации пространственно-корреляционной зависимости радиосигналов и радиопомех при $f_0 = 7$ МГц и $\Delta f = 10$ кГц

Способ компенсации радиопомех

Учитывая детерминированный характер и незначительные изменения значений КВК радиосигналов при ограничении разноса элементов АР до 1 км, выходные характеристики ЦАР, использующих пространственно-корреляционный метод обработки сигналов, в большей степени зависят от КВК радиопомех. Использование данной закономерности позволяет за счет разноса элементов АР на расстояния, превышающие пространственный интервал корреляции радиопомех обеспечивать существенный выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе РЭС с пространственно-корреляционной обработкой сигналов. При этом за счет случайного осциллирующего характера пространственной зависимости КВК радиопомех (см. рис. 2) и использования нерегулярного размещения элементов АР в отклике системы (см. выражение (1)) происходит компенсация влияния радиопомех, а с ростом числа элементов (I) в АР парциальная часть отклика ЦАР, возникающая за счет радиопомех, асимптотически

стремиться к нулю $\lim_{I \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^{I-1} \sigma_{n,i} \sigma_{n,j} \rho_{n,ij} (\tau - \tau_k) \rightarrow 0$, что дает возможность по-

вышать помехоустойчивость таких РЭС, и является основным достоинством таких ЦАР.

С учетом рассмотренных особенностей пространственно-корреляционных зависимостей радиосигналов и радиопомех (см. рис. 2) для оценки отклика декаметровых ЦАР определяющими являются пространственно-корреляционные зависимости радиопомех.

Детальные исследования потенциальных возможностей ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов с целью оптимизации их построения требуют дорогостоящих натуральных экспериментов, в связи с чем целесообразнее предварительно оценить их характеристики путем имитационного моделирования. Для чего необходимо синтезировать значения КВК радиосигналов с помощью эмпирического выражения (3), а для моделирования КВК радиопомех дополнительно была разработана имитационная модель изотропного поля радиопомех.

Моделирование изотропного поля радиопомех

Моделирование изотропного поля радиопомех декаметрового диапазона строится на основе полученных экспериментальных данных [9, 14].

Учитывая физическую особенность изотропной составляющей поля радиопомех, формируемого множеством естественных источников, для адекватности в модели заложена возможность синтеза случайных независимых полей равномерно рассредоточенных точечных источников радиопомех, количество которых с одной стороны ограничено вычислительными возможностями используемой для моделирования ЭВМ. С другой стороны, проведенные исследования показали, что для обеспечения достоверности моделирования число равномерно распределенных в пространстве точечных источников радиопомех определяется разрешающей способностью ЦАР. В частности, при разрешающей способности ЦАР – 1^0 достаточно более 360 равномерно распределенных в пространстве точечных некоррелированных источников радиопомех.

В данной модели [15] формируется независимое поле для всех удаленных точечных источников радиопомех расположенных равномерно с заданным угло-

вым шагом $\Delta_{\text{шаг}}$ относительно фазового центра (опорного элемента АР) (рис. 3). Далее на основе суперпозиции случайных полей радиопомех от каждого точечного источника формируется интерференционное изотропное поле на всех пространственно-разнесенных элементах ЦАР.

При этом полагается, что с учетом большой удаленности каждый точечный источник излучает в сторону фазового центра радиопомеху с плоским фронтом волны. Все формируемые поля радиопомех носят случайный характер с гауссовым распределением и между ними отсутствует корреляционная связь [16–17]. Угловое расположение каждого источника относительно фазового центра определяется заданным угловым шагом $\Delta_{\text{шаг}}$ и номером источника радиопомех r : $\alpha_r = \Delta_{\text{шаг}}(r - 1)$.

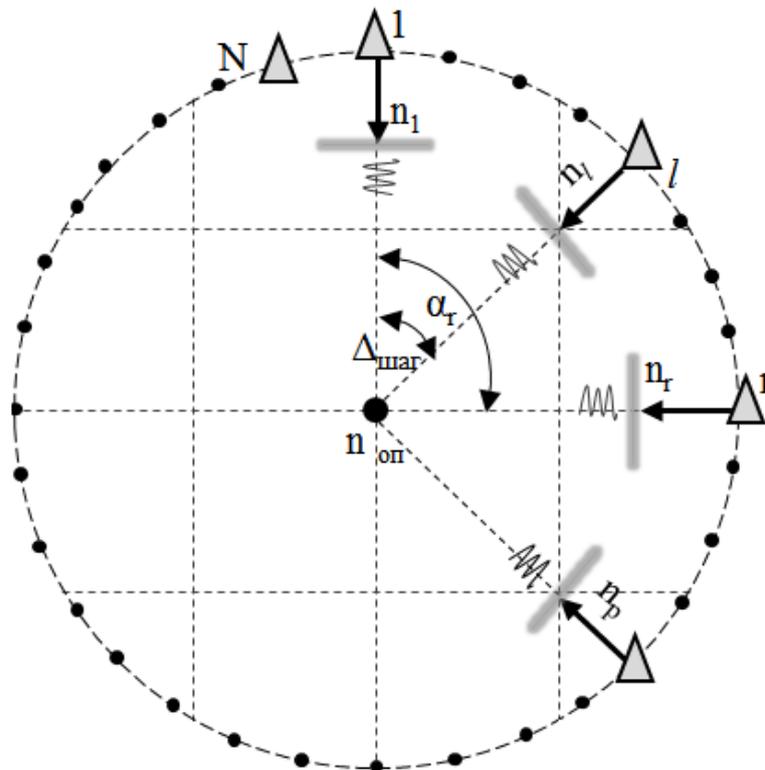


Рис. 3. Пояснение алгоритма формирования поля удаленных источников радиопомех

Учитывая частотные характеристики первичных трактов усиления ЦАР (см. рис. 1), на выходах ее элементов будут формироваться высокочастотные напряжения радиопомех в заданной полосе частот. На основании данных особенностей с учетом статистических свойств радиопомех [14] для их синтеза

используется модель белого шума [17], прошедшего через идеальный полосовой фильтр со средней частотой f_0 и полосой пропускания Δf (рис. 4).

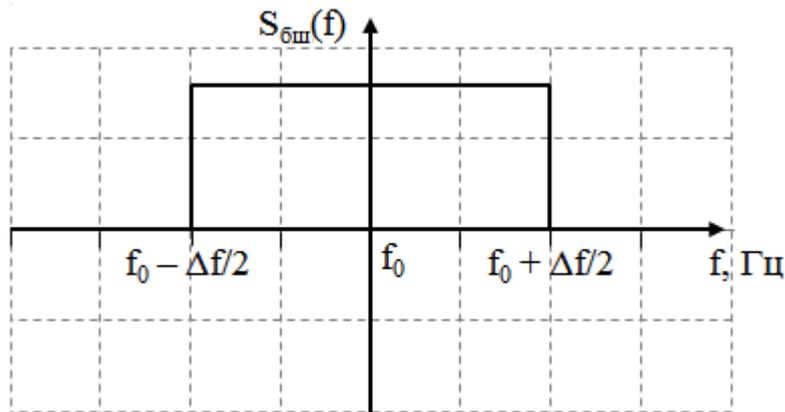


Рис. 4. Спектр белого шума, прошедшего через идеальный полосовой фильтр со средней частотой f_0 и полосой пропускания Δf

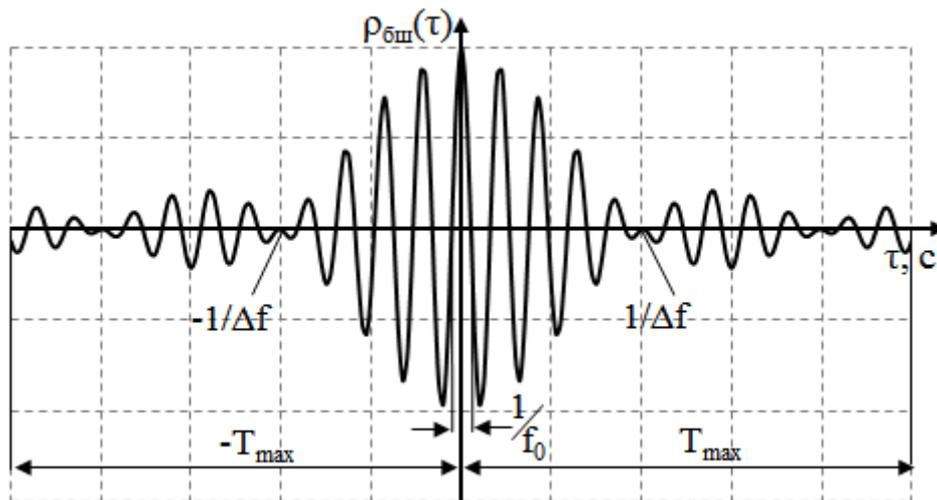


Рис. 5. Нормированная функция автокорреляции высокочастотного белого шума на выходе идеального узкополосного фильтра

Известно, что на практике, чаще всего, используются узкополосные фильтры ($\Delta f \ll f_0$). Поэтому при прохождении белого шума через такие фильтры формируются узкополосные высокочастотные сигналы, определяемые нормированной автокорреляционной функцией (АКФ) (рис. 5) [18–19]:

$$\rho_{\text{бш}}(\tau) = \frac{\sin(\pi\Delta f\tau)}{\pi\Delta f\tau} \cos(2\pi f_0\tau), \quad (4)$$

где τ – временная задержка АКФ, $\tau = \Delta t k$ (Δt – шаг дискретизации АКФ; k –

номер отсчета выборки АКФ, $k = \overline{0, K}$; K – объем всей выборки АКФ); $T_{\text{реал}}$ – длительность реализации АКФ, $T_{\text{реал}} = 2T_{\text{max}} = K\Delta\tau$.

Для обеспечения требуемой точности синтеза реализаций напряжений радиопомех с заданными пространственно-корреляционными связями в начале имитационного моделирования определяется минимальный объем выборки исходной АКФ [20]:

$$K > \frac{8\Delta\tau}{\tau_0(1 - P_{\text{дов}})\varepsilon^2}, \quad (5)$$

где τ_0 – временной интервал корреляции радиопомехи, $\tau_0 = \frac{1}{2\Delta f}$; ε – допустимая абсолютная погрешность отклонения КВК между синтезируемыми реализациями радиопомех; $P_{\text{дов}}$ – доверительная вероятность обеспечения допустимой погрешности, $P_{\text{дов}} = P(\Delta \leq \varepsilon)$; Δ – абсолютное отклонение между экспериментальными и синтезированными значениями КВК поля радиопомех, $\Delta = \rho_{\text{п экс}} - \rho_{\text{п им}}$.

Далее на основе синтезированной реализации АКФ узкополосного высокочастотного шума (см. выражение (4)) путем прямого преобразования Винера-Хинчина рассчитывается его спектральная плотность мощности:

$$G_{\text{бш}}(m) = 4 \sum_{k=0}^{K-1} \rho_{\text{бш}}(\Delta\tau k) \cos(2\pi\Delta F m \Delta\tau k). \quad (6)$$

где $G_{\text{бш}}(m)$ – амплитуда m -ой гармоники спектра мощности узкополосного шума, $m = \overline{0, M}$; M – количество гармоник спектра, определяемое максимальной частотой F_{max} , пропускаемой трактами усиления и аналогово-цифровым преобразователем, $M = F_{\text{max}}/\Delta F$; ΔF – частотное разрешение спектра, $\Delta F = 1/\Delta\tau K$.

После этого по полученным значениям $G_{\text{бш}}(m)$ находятся эффективные значения напряжений гармоник, определяемые СКО напряжений радиопомех (шума):

$$N_{\text{бш } m} = \sigma_{\text{бш } m} = \sqrt{|G_{\text{бш}}(m)|}. \quad (7)$$

Из полученного спектра узкополосного высокочастотного шума производится формирование случайной реализации спектра радиопомехи, для чего используется генератор случайных чисел $\text{Ra}\{x\} \in (0, 1)$, распределенных по равномерному закону, что обеспечивает равновероятный синтез возможных значений вероятностей в пределах от 0 до 1.

С учетом гауссового закона распределения плотности распределения вероятностей напряжений радиопомех (шума) [17], процесс синтеза амплитуд случайных гармоник производится с помощью обратной интегральной функции гауссового распределения с нулевым средним при полученных значениях СКО каждой гармоники $\sigma_{\text{бш } m}$ (рис. 6):

$$N_{\text{случ } m} = F^{-1}\{\text{Ra}(x), \sigma_{\text{бш } m}\}. \quad (8)$$

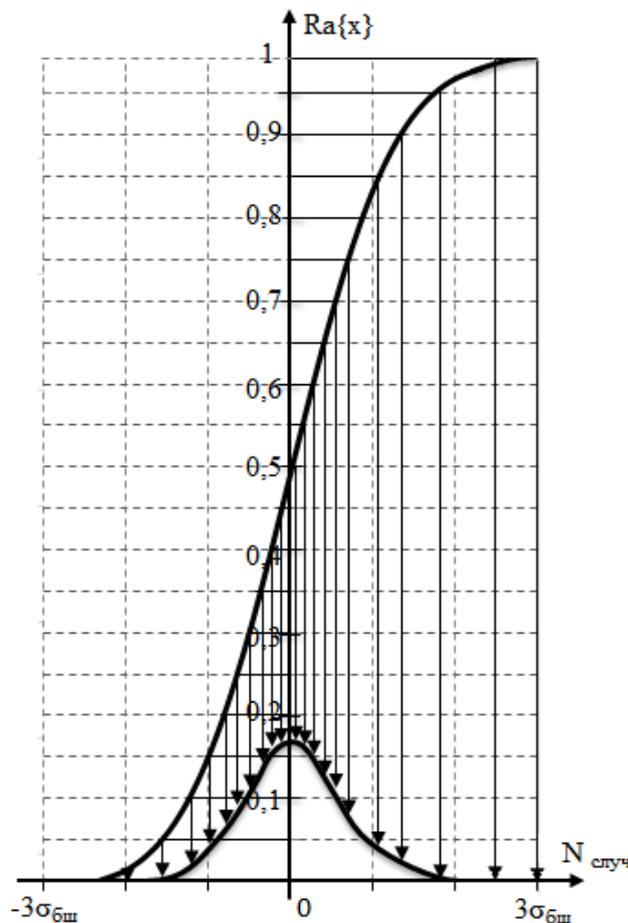


Рис. 6. Пояснение к синтезу амплитуд случайных гармоник спектра радиопомехи

Аналогично формируются случайные реализации амплитудного спектра радиопомех для каждого пространственно-разнесенного точечного источника $N_{\text{случ } m}(\alpha_r)$ (см. рис. 3).

Фазовый спектр радиопомех синтезируется таким же генератором случайных чисел $Ra(x) \in (0, 1)$, использование которых, с учетом равномерного распределения фаз в пределах $[0, 2\pi]$, позволяет определять соответствующие значения фазовых сдвигов для всех гармоник спектра:

$$\varphi_{\text{случ } m} = 2\pi Ra(x). \quad (9)$$

Таким же образом синтезируется фазовый спектр для каждого пространственно-разнесенного источника излучения радиопомех $\varphi_{\text{случ } m}(\alpha_r)$.

По полученным реализациям случайного спектра радиопомех $N_{\text{случ } m}(\alpha_r)$ и $\varphi_{\text{случ } m}(\alpha_r)$ формируются случайные реализации напряжений для каждого пространственно-разнесенного источника радиопомех путем обратного дискретного преобразования Фурье:

$$n_r(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} N_{\text{случ } m}(\alpha_r) \cos\left(\frac{2\pi km}{M} + \varphi_{\text{случ } m}(\alpha_r)\right). \quad (10)$$

После получения реализаций напряжений радиопомех для всех точечных источников $n_r(k)$ производится синтез интерференционного поля радиопомех, формируемого в фазовом центре, которое определяется суммой всех полученных напряжений радиопомех (см. рис. 3):

$$n_{\text{оп}}(k) = \sum_{r=1}^N n_r(k). \quad (11)$$

Далее синтезируется поле радиопомех для смещенных в пространстве элементов АР, которое производится путем виртуального позиционирования (пространственного смещения) элемента АР в заданные i -е положения (рис. 7). Для этого рассчитываются временные задержки прихода фронтов электромагнитных волн с каждого пространственно-разнесенного точечного источника

радиопомех, зависящие от их углового расположения α_r и расстояния d_i , на которое виртуально сдвигается элемент AP относительно фазового центра:

$$\Delta t_{ir}(d_i, \alpha_r) = \frac{\Delta d_{ir}}{c} = \frac{d_i \sin(\alpha_r)}{c}. \quad (12)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны ($3 \cdot 10^8$ м/с).

После временного сдвига каждой реализации радиопомехи $n_{ir}(k)$ на соответствующие временные задержки Δt_{ir} происходит их суммирование, в результате формируются случайные реализации напряжений радиопомех на выходах всех пространственно-смещенных виртуальных элементов AP:

$$n_i(k) = \sum_{r=1}^N n_{ir}(k\Delta\tau - \Delta t_{ir}). \quad (13)$$

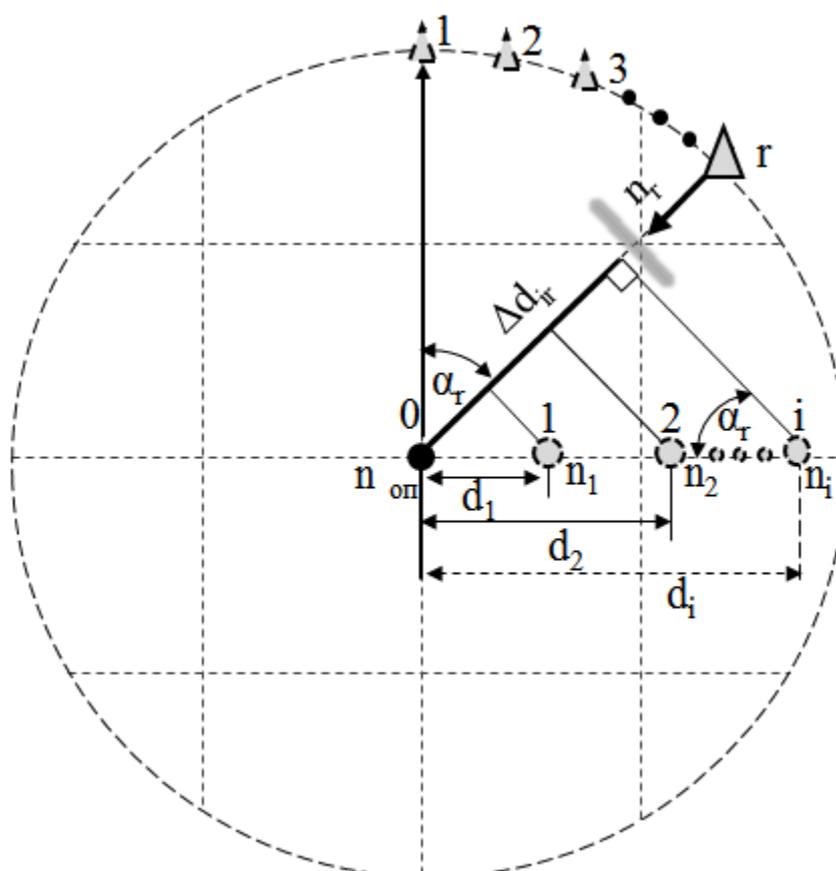


Рис. 7. Пояснение к определению временной задержки радиопомех для смещенных элементов антенной решетки

Таким образом моделируется изотропное пространственно-корреляционное поле радиопомех декаметрового диапазона, рандомизированное пространственным размещением элементов в АР.

В конце производится расчет КВК между напряжениями опорного и смещенных элементов АР:

$$\rho_{n_{им}}(d_i) = \frac{1}{\sigma_{n_{оп}} \sigma_{n_i} K} \sum_{k=0}^{K-1} n_{оп}(k)n_i(k), \quad (14)$$

где $\sigma_{n_{оп}}, \sigma_{n_i}$ – СКО напряжений радиопомех опорного и пространственно-смещенного в i -е положение элементов АР.

В результате выполнения рассмотренных операций моделируются случайные реализации пространственно-корреляционных характеристик радиопомех при заданном положении элементов исследуемой ЦАР.

Результаты расчета заносятся в базу данных имитационной модели. На основе моделирования для наглядности построена полученная зависимость значений $\rho_{n_{им}}$ от разноса между опорным и пространственно-разнесенными элементами АР d_i (рис. 8).

Для оценки адекватности разработанной имитационной модели поля радиопомех проведено сравнение экспериментальных и полученных в результате имитационного моделирования пространственно-корреляционных зависимостей КВК радиопомех (см. рис. 8). Результаты анализа показали, что смоделированная зависимость КВК имеет те же тенденции, что и экспериментальная функция КВК, а отклонения интервала корреляции и средней амплитуды осцилляции, определяемой СКО КВК радиопомех, не превышают заданную погрешность ε , заложенную при синтезе поля радиопомех: $|d_{0_{им}} - d_{0_{экс}}| \leq \varepsilon$ и $|\rho_{n_{им}} - \rho_{n_{экс}}| \leq \varepsilon$. Все это подтверждает адекватность разработанной модели поля радиопомех.

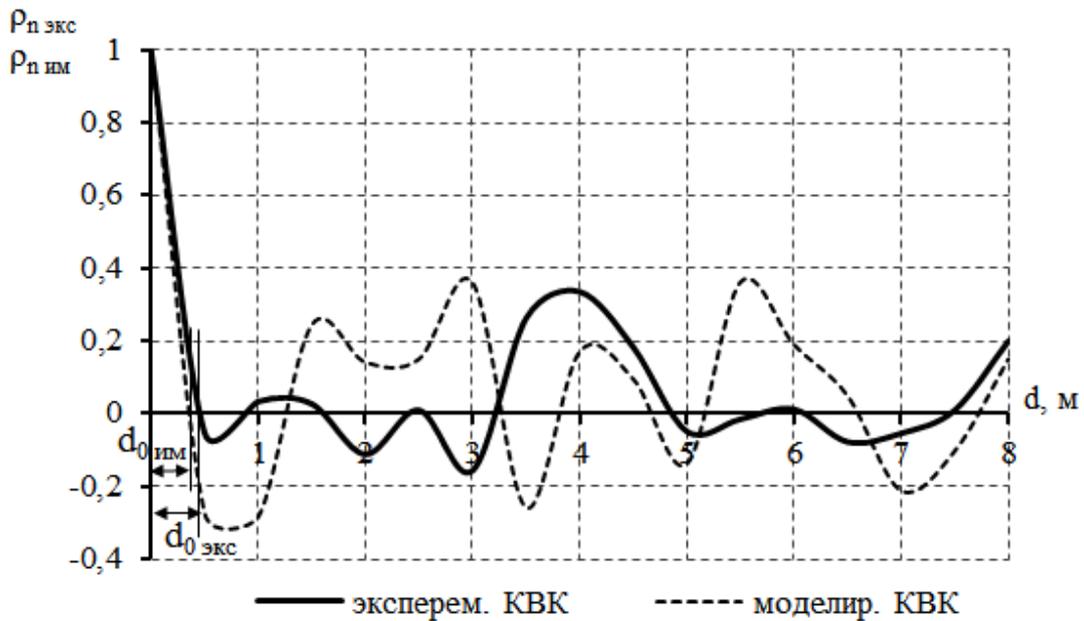


Рис. 8. Экспериментальная и смоделированная случайные реализации пространственно-корреляционные зависимости КВК радиопомех ($f_0 = 10$ МГц, $\Delta f = 10$ кГц)

Таким образом, представленный вариант имитационного моделирования позволяет адекватно синтезировать пространственно-корреляционные характеристики изотропного поля радиопомех декаметрового диапазона в пределах заданных пространственных расстояний между элементами АР.

Имитационная модель отклика ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов

Основываясь на разработанной имитационной модели поля радиопомех, с учетом зависимости пространственно-корреляционной связи радиосигналов (см. выражение (3)), существует возможность оценки отклика ЦАР (см. выражение (1)) и оценки помехоустойчивости, построенной на ее основе РЭС (см. выражение (2)) для различных вариантов конфигурации АР, частоты сигнала f_0 и полосы пропускания трактов обработки сигналов Δf .

В качестве примера рассмотрен алгоритм моделирования данных характеристик для 16-элементной ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов ($f_0 = 9$ МГц, $\Delta f = 10$ кГц) при неэквидистантной

конфигурации апертуры АР, элементы которой расположены по спирали (рис. 9).

Для рассматриваемой антенной системы (см. рис. 9) определяется матрица взаимных расстояний $\|d_{ij}\|$ между элементами АР после их позиционирования в направлении полезного радиосигнала (см. рис. 1 и 9).

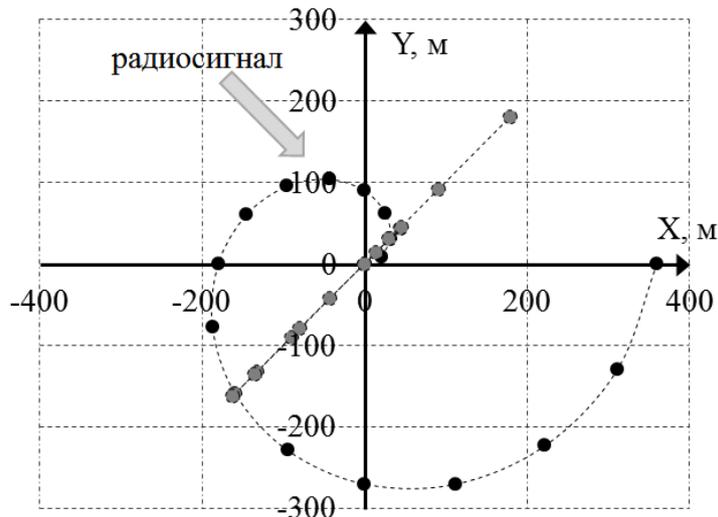


Рис. 9. Вариант размещения элементов ЦАР по спирали с примером ее позиционирования в заданном

На основе полученной матрицы $\|d_{ij}\|$ после наложения расстояний на зависимости КВК радиосигналов и радиопомех, смоделированные соответственно с помощью выражения (3) и модели изотропного поля радиопомех определяются матрицы взаимных корреляций радиосигналов $\|\rho_{s,ij}\|$ и радиопомех $\|\rho_{n,ij}\|$ (рис. 10).

По результатам вычисленных матриц $\|\rho_{s,ij}\|$ и $\|\rho_{n,ij}\|$ с помощью выражения (1) для заданных СКО напряжений радиосигналов и радиопомех на выходах элементов АР определяется отклик проектируемой ЦАР (рис. 11).

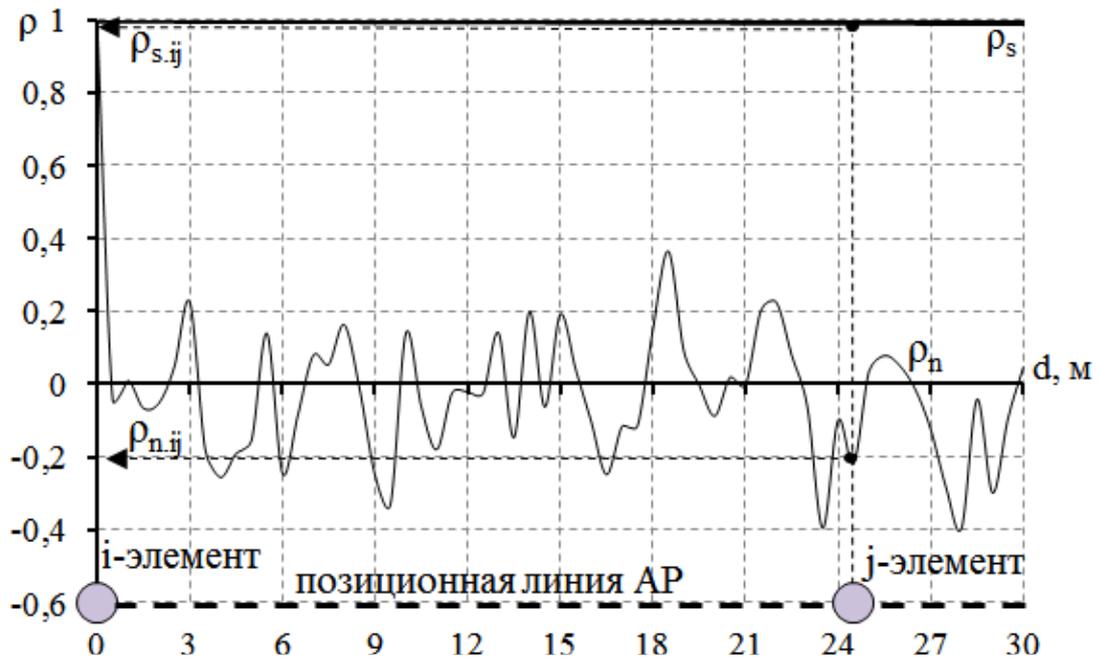


Рис. 10. Вариант моделирования пространственно-корреляционных характеристик радиосигналов и радиопомех

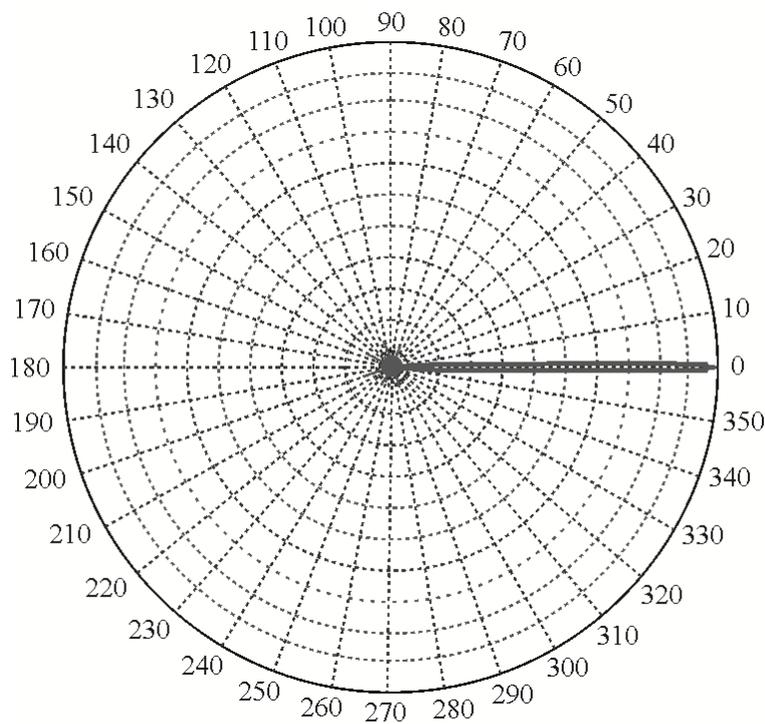


Рис. 11. Пример отклика 16-элементной ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов

Аналогично, с помощью выражения (2) для требуемого отношения эффективных значений напряжений радиосигналов к радиопомехам на входах элементов АР (q), заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ и объема выборки

сигналов K производится численная оценка помехоустойчивости моделируемой ЦАР (рис. 12).

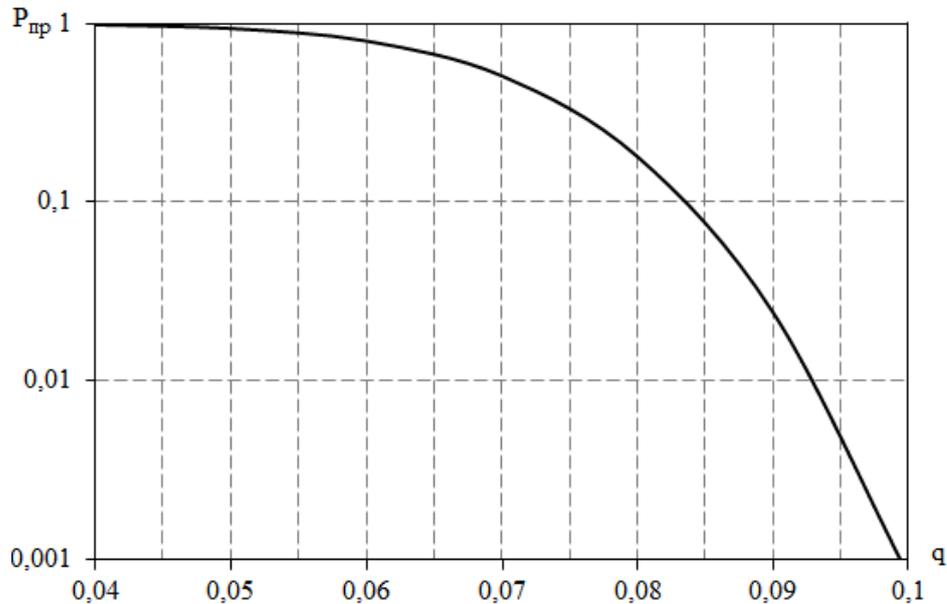


Рис. 12. Оценка помехоустойчивости 16-элементной ЦАР

Результаты предварительного анализа ЦАР декаметрового диапазона с пространственно-корреляционной обработкой сигналов (см. рис. 11 и рис. 12) показали возможность обеспечения высокой пространственной селекцией, прежде всего, при малых отношениях уровней сигнал/шум на фоне естественных радиопомех. Эти потенциальные возможности в настоящее время актуальны, в частности, для обнаружения объектов с малой эффективной площадью рассеяния, например, построенных по технологии «стелс», а также малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

Следует отметить, что данное направление использования ЦАР в совокупности с новыми методами компенсации искусственных радиопомех [21] может быть предметом дополнительных исследований для повышения эффективности применения РЭС в сложной радиоэлектронной обстановке.

Таким образом, с помощью разработанной имитационной модели изотропного поля радиопомех декаметрового диапазона и детерминированной зависимости пространственно-корреляционной связи радиосигналов существует возможность синтеза откликов ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов.

На основе данной модели можно оценивать направленные свойства и помехоустойчивость РЭС с различным размещением элементов в используемой ЦАР. Это позволяет исследовать и проводить поиск оптимальных конфигураций апертур ЦАР в проектируемых РЭС дециметрового диапазона, обеспечивающих требуемую помехоустойчивость с заданными направленными характеристиками при минимизации числа элементов и общей площади апертуры АР.

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

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

15. Орощук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Моделирование изотропного поля радиопомех декаметрового диапазона // 9-я Международная научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Секция 1 «Математические методы моделирования физических процессов в оптике, радиолокации. R-функции,

атомарные функции, вейвлеты, фракталы и хаос». – Суздаль, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2016. – С. 39–43.

16. Кловский Д.Д., Сойфер В.А. Обработка пространственно-временных сигналов. – М.: Связь, 1976.

17. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. – М.: Связь, 1972. – 360 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.

20. Орощук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Алгоритм синтеза поля статистически связанных в пространстве радиопомех декаметрового диапазона // 18-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. 2016. – С. 551–556.

21. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. – М.: Радиотехника, 2014. – 632 с.