



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.6>

УДК: 519.876.5

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОПОМЕХ

И.М. Орошук, А.Н. Сучков, В.А. Кутерин

**Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С.О. Макарова,
690062, г. Владивосток, ул. Камский переулок, 6**

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2024 г.

Аннотация. В статье проведен анализ пространственно-корреляционных свойств скалярного электромагнитного поля радиосигналов ионосферных и поверхностных волн и естественных радиопомех декаметрового диапазона, полученных на основе экспериментальных исследований. На основе проведенного анализа разработан метод пространственной компенсации естественных радиопомех, определяющий концепцию построения цифровых антенных решеток (ЦАР) декаметрового (ДКМ) диапазона. Приведены оценки помехоустойчивости для радиотехнических систем (РТС) обнаружения декаметрового диапазона, построенных на основе разработанного метода, обеспечивающих повышенную чувствительность РТС при заданных направленности антенны и помехоустойчивости приема радиосигналов.

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, помехоустойчивость, естественные радиопомехи, пространственно-корреляционные свойства радиосигналов и радиопомех, компенсация естественных радиопомех.

Автор для переписки: Сучков Андрей Николаевич,

Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru.

Введение

Широкое внедрение антенных решеток (АР) позволяет за счет высоких направленных свойств и большого усиления существенно повысить помехоустойчивость и пространственную разрешающую способность современных радиотехнических систем обнаружения [1]. Достоинство АР в совокупности с новыми технологическими возможностями современной радиотехники дало толчок к разработке новых антенных систем [1].

Среди многих видов антенн следует выделить антенные решетки с обработкой сигналов, возможности применения которых в большей степени раскрылись с появлением цифровых устройств и электронных систем коммутации и управления [1,2].

С появлением микроконтроллеров и сигнальных процессоров возникла возможность создания АР с цифровой обработкой сигналов [1,3,4], основным достоинством которых стала возможность использования более широкого круга вычислительных операций, ранее ограниченных при использовании аналоговых способов обработки сигналов. Среди возможных вариантов построения АР с цифровой обработкой сигналов можно выделить те, в которых процесс формирования и управления диаграммами направленности выполняется непосредственно в цифровых трактах обработки сигналов. Такая антенная система в данной работе названа цифровой антенной решеткой [1,3,4], применение которой позволяет реализовать дополнительные возможности РТС обнаружения за счет совместного использования в одной антенной системе совокупности различных методов обработки и принципов построения антенн, учитывающих в том числе статистические характеристики радиосигналов и радиопомех [1,3-5].

Перспективный вариант построения РТС основан на использовании ЦАР с нелинейным методом обработки сигналов и применением неэквидистантного расположения элементов в пространстве, практическая апробация которых, согласно исследованиям ряда отечественных и зарубежных ученых, позволяет

реализовать остронаправленные антенные системы с меньшим числом элементов и ограниченными размерами апертуры по сравнению с традиционными эквидистантными фазированными АР [1,6-9].

Наибольшую актуальность применения ЦАР с нелинейным методом обработки сигналов и применением неэквидистантного расположения элементов в пространстве будут иметь в декаметровом диапазоне, прежде всего, из-за возможности снижения экономических затрат на дорогостоящие и громоздкие сооружения антенного оборудования, тракты обработки сигналов и вычислительные устройства [10].

Одним из частных вариантов нелинейной обработки сигналов является пространственно-корреляционный метод, экспериментальная апробация которого в ДКМ диапазоне показала возможность обеспечения повышенной помехоустойчивости, острой диаграммы направленности ЦАР и малых уровней боковых лепестков при меньших размерах апертуры АР и числе антенных элементов (меньше на 20-30 %), по сравнению с АР, построенными на классических принципах [11].

В данной статье показаны новые возможности применения ЦАР, апробированные на результатах экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и естественных радиопомех ДКМ диапазона, на базе которых обоснована концепция построения ЦАР с пространственным методом компенсации естественных пространственно-некоррелированных радиопомех, характерных для ДКМ диапазона [12,13]. Рассмотренный метод позволил дополнительно повысить чувствительность РТС обнаружения, обеспечивая прием сигналов ниже уровня радиопомех при ограниченных размерах апертуры и сложности всей конструкции ЦАР.

1. Пространственно-корреляционный метод обработки радиосигналов в ЦАР.

Сущность пространственно-корреляционного метода обработки сигналов сводится к определению пространственной функции взаимной корреляции радиосигналов на выходе всех пар элементов АР с последующим их суммированием и принятием решения об обнаружении сигнала в пороговом устройстве [11].

Принцип работы ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов (рис. 1) строится на выполнении операций предварительного усиления в блоке усиления (в усилителях высокой частоты – УВЧ), оцифровки и фильтрации сигналов в многоканальном приемном тракте, состоящем из I-канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и блока фильтров, включающего полосовые фильтры (ПФ). После этого осуществляется виртуальное позиционирование элементов АР на одну линию, ортогональную направлению прихода сигнала за счет ввода временных задержек в оцифрованные выходные напряжения сигналов всех антенных элементов (АЭ), что определяет направление диаграммы направленности (ДН) антенны. Далее выполняется вычисление суммы взаимных корреляций оцифрованных напряжений между всеми парами АЭ. Затем сигнал поступает на устройство принятия решений (УПР), алгоритм работы которого определяется назначением ЦАР.

Таким образом, выходное напряжение ЦАР определяет ее отклик на радиосигналы, пришедшие с разных направлений [11].

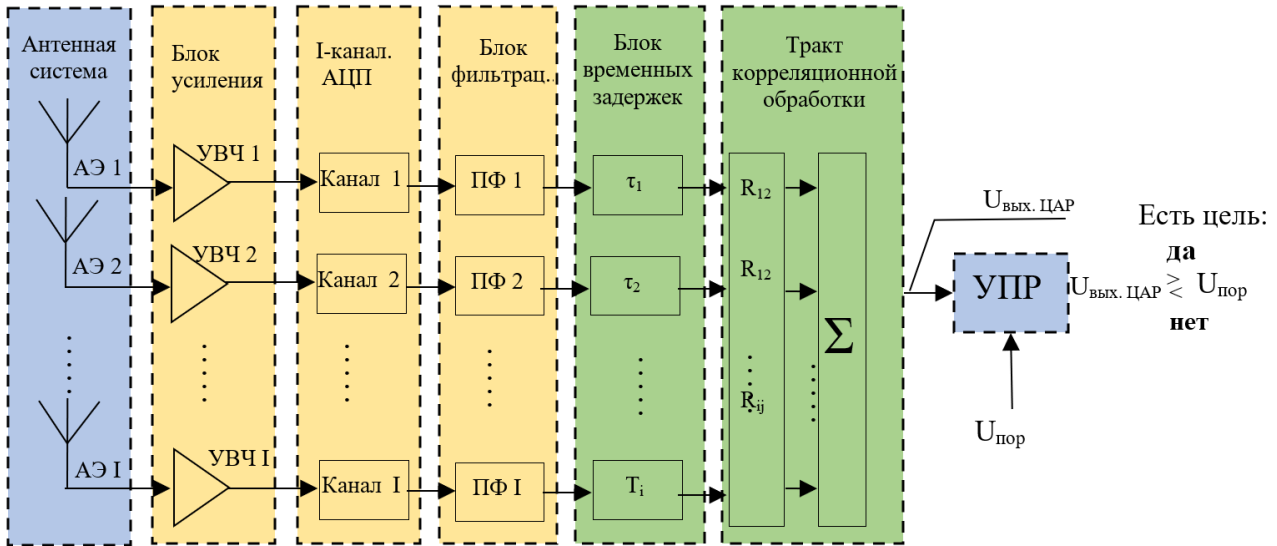


Рис. 1. Схема ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов.

С учетом корреляционного алгоритма обработки выходное напряжение ЦАР после ввода временных задержек в сигналы может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\text{вых.ЦАР}} = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^I R_{ij}, \quad i = \overline{0, I-1}; \quad j = \overline{0, I-1}, \quad (1)$$

где R_{ij} – оценка взаимной корреляции между радиосигналами, поступающими с i -го и j -го АЭ:

$$R_{ij} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=0}^{K-1} z_i(k) z_j(k), \quad (2)$$

где $z_i(k)$, $z_j(k)$ – соответствующие отсчеты мгновенных напряжений аддитивной смеси радиосигналов $s_i(k)$, $s_j(k)$ и естественных радиопомех $n_i(k)$, $n_j(k)$ на выходах трактов обработки i -го и j -го элементов АР, $z_i(k) = s_i(k) + n_i(k)$, $z_j(k) = s_j(k) + n_j(k)$; K – объем выборки (число отсчетов) сигналов, обрабатываемых в ЦАР; I – число АЭ в ЦАР.

В соответствии с [14] взаимную корреляцию между сигналами R_{ij} можно выразить через их среднеквадратические отклонения (СКО) $\sigma_{z,i}$, $\sigma_{z,j}$

и нормированные коэффициенты взаимной корреляции (КВК) $\rho_{z,ij}$:

$$R_{ij} = \sigma_{z,i} \sigma_{z,j} \rho_{z,ij}. \quad (1)$$

Отсюда с учетом некоррелированности радиосигналов и радиопомех выражение (1) можно представить в виде:

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

где $\sigma_{s,i}$, $\sigma_{s,j}$, $\sigma_{n,i}$, $\sigma_{n,j}$ – среднеквадратические отклонения напряжений радиосигналов и естественных радиопомех на выходах i -го и j -го АЭ АР; $\rho_{s,ij}(\tau - \tau_k)$, $\rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)$ – КВК напряжений радиосигналов и естественных радиопомех на выходах i -го и j -го АЭ АР; τ_k , τ – компенсационные и естественные временные задержки радиосигналов, определяемые вводимой задержкой и разностью времени распространения радиосигнала до элементов АР.

Из выражения (4) видно, что выходное напряжения ЦАР определяется входными уровнями радиосигналов и естественных радиопомех, а также зависит от их КВК – $\rho_{s,ij}(\tau - \tau_k)$, $\rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)$. С учетом этого для повышения помехоустойчивости РТС в процессе пространственно-корреляционной обработки в ЦАР исключаются диагональные значения корреляционной матрицы ($R_{11}, R_{22} \dots R_{II}$) – дисперсии радиосигналов и радиопомех [15], которые не зависят от КВК ($R_{ii} = \sigma_i^2$):

$$|R_{ij}| = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1I} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{(I-1)1} & R_{(I-1)2} & R_{(I-1)3} & \dots & R_{(I-1)I} \\ R_{I1} & R_{I2} & R_{I3} & \dots & R_{II} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

В этом случае повышается вероятность обнаружения полезных сигналов, особенно при малых отношениях уровней сигнала к помехе (ОСП) на входе ЦАР (менее 0 дБ) [16], за счет роста в данных условиях влияния КВК. Связано это с тем, что помехоустойчивость РТС обнаружения, основанных на ЦАР данного типа, определяется выходным откликом (4) и алгоритмом принятия решений, зависящим от назначений РТС.

Из выражения (4) видно, что доля полезного сигнала на выходе ЦАР перед устройством принятия решений, определяющая помехоустойчивость РТС, зависит не только от соотношения уровней радиосигналов и радиопомех, но и от значений их КВК. Это определило необходимость более детального исследования пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех для оптимизации построения ЦАР [11,12,16].

2. Пространственно-корреляционные свойства поля радиосигналов и естественных радиопомех ДКМ диапазона.

Основными факторами, влияющими на пространственно-корреляционные свойства скалярного электромагнитного поля радиосигналов ДКМ диапазона, являются, прежде всего, некоррелированные в пространстве неоднородности ионосферы на пути распространения радиоволн [10]. Точные данные об этих свойствах в начале исследований в научной литературе отсутствовали. Аналогично отсутствует точная информация о пространственно-корреляционных свойствах скалярного электромагнитного поля радиопомех. В этой связи для практической апробации и синтеза ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов были проведены экспериментальные исследования пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и естественных радиопомех [16], частные результаты которых представлены на рис. 2 и рис. 3.

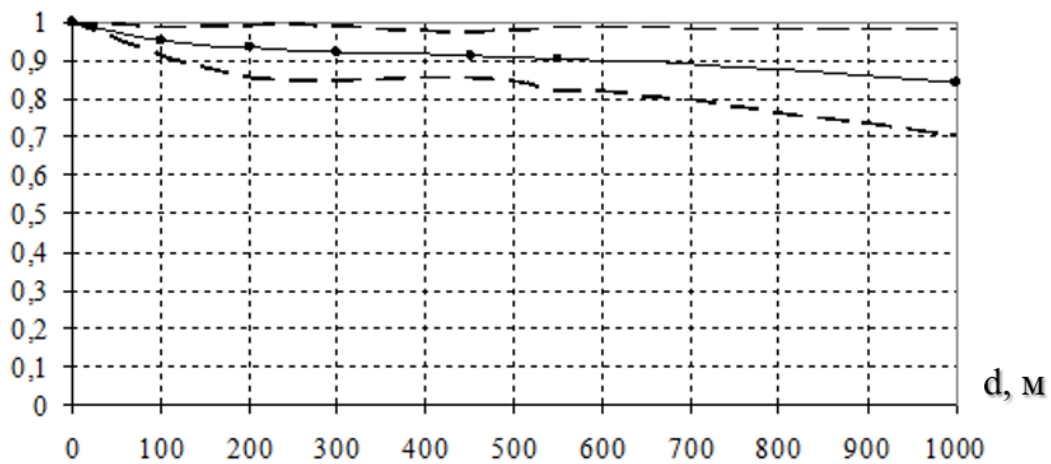


Рис. 2. Пространственно-корреляционная зависимость радиосигналов с границами доверительного интервала с вероятностью 0,9.

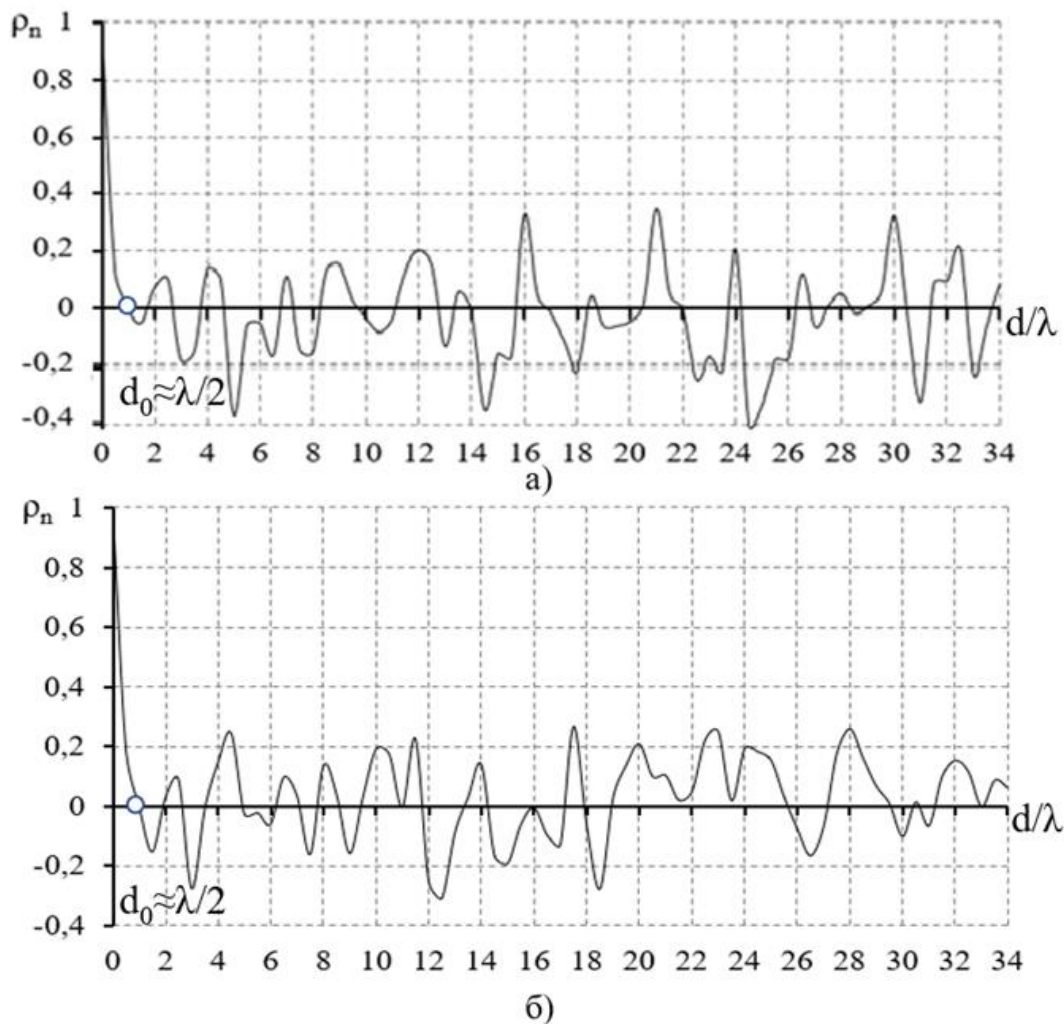


Рис. 3. Пространственно-корреляционная зависимость естественных радиопомех при полосе приемного тракта: а) 10 кГц; б) 30 кГц.

Результаты экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств скалярного электромагнитного поля радиосигналов поверхностных и ионосферных волн и естественных радиопомех ДКМ диапазона показали

следующие результаты: пространственно-корреляционная связь скалярного электромагнитного поля радиосигналов снижается при увеличении расстояния между элементами ЦАР по детерминированному экспоненциальному закону [16]. Анализ зависимостей показал, что при разноте антенн до 1000 м КВК сохраняет высокие значения: для поверхностных волн – до 0,85, а для ионосферных волн – до 0,6. Наличие спада КВК ограничивает максимальные размеры апертур ДКМ ЦАР, а следовательно, и ее направленные свойства. Данные пространственные зависимости КВК позже независимо получены австралийским ученым [10], что также дополнительно подтверждает достоверность авторских экспериментальных исследований.

Пространственно-корреляционные свойства скалярного электромагнитного поля естественных радиопомех имеют иную тенденцию: большие значения КВК радиопомех сохраняются только в пределах небольшого интервала корреляции, примерно равного половине длины волны ($d_0 \approx \lambda / 2$), а при больших разнотах зависимость КВК носит случайный осциллирующий характер [16]. При этом с расширением полосы пропускания приемного тракта снижется среднеквадратическое отклонение (средняя амплитуда осцилляции) КВК за пределами пространственного интервала корреляции, что дает приоритет использования широкополосных сигналов для обеспечения помехоустойчивости РТС при возможности обеспечения соответствующей широкополосности используемых АЭ.

3. Метод пространственной компенсации естественных радиопомех ДКМ диапазона.

С учетом полученных пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и естественных радиопомех и особенностей пространственно-корреляционной обработки сигналов в ЦАР разработан метод пространственной компенсации естественных радиопомех ДКМ диапазона [13,16].

В основу метода положена концепция неэквидистантного построения конфигурации АР, определяющая формирование линейной АР при

позиционировании антенных элементов ортогонально направлению прихода радиосигнала, и выявленные особенности пространственно-корреляционных свойств скалярного электромагнитного поля радиосигналов и радиопомех ДКМ диапазона [10,13,16].

Предложенная концепция построения АР с учетом полученных зависимостей КВК позволяет повысить уровень радиосигналов и компенсировать влияние естественных радиопомех, в результате чего после пространственно-корреляционной обработки сигналов на выходе ЦАР повышается отношение уровней ОСП и, как следствие, помехоустойчивость РТС обнаружения. Исследования показали, что таким требованиям с учетом обеспечения компактности АР в большей степени отвечают антенны с формой апертуры в виде линейной спирали [16].

Для исследований потенциальных возможностей метода компенсации естественных радиопомех использовались эмпирические модели, описывающие КВК радиосигналов и радиопомех, на основе которых выполнялись операции позиционирования ДН и пространственно-корреляционной обработки сигналов в ЦАР следующим образом [16].

С учетом выбранной конфигурации АР определяется матрица взаимных расстояний между ее элементами после их позиционирования (формирования неэквидистантной линейной АР в направлении прихода сигнала θ) (рис. 4):

$$|d_{ij}(\theta)| = \begin{vmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & \dots & d_{0\,I} \\ & 0 & d_{23} & \dots & d_{2\,I} \\ & & \cdot & \dots & \cdot \\ & & & \dots & d_{(I-1)I} \\ & & & & 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

На основе полученной матрицы $|d_{ij}(\theta)|$ после наложения расстояний на зависимости КВК радиосигналов (см. рис. 3) и естественных радиопомех (см. рис. 4) ДКМ диапазона определяются матрицы взаимных корреляций

радиосигналов $|\rho_{s,ij}(\theta)|$ и радиопомех $|\rho_{n,ij}(\theta)|$, при этом для компенсации естественных радиопомех в АР необходимо, чтобы минимальное расстояние между антенными элементами превышало пространственный интервал корреляции радиопомех $d_0 \geq \lambda / 2$, что выводит это расстояние на осциллирующий (некоррелированный) участок зависимости КВК радиопомех (рис. 5).

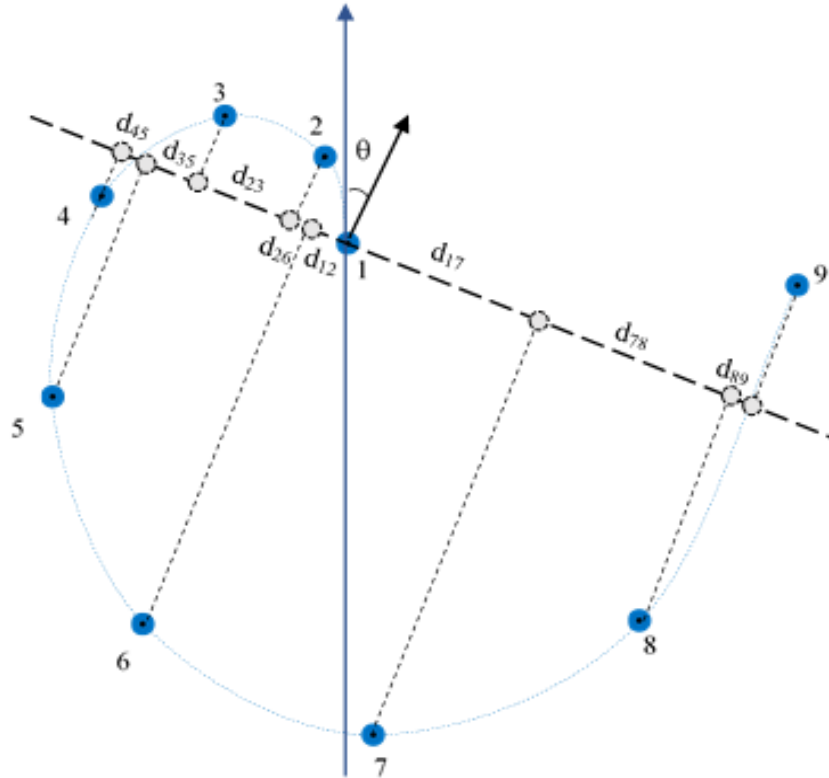


Рис. 4. Принцип формирования неэквидистантной линейной АР при позиционировании ДН.

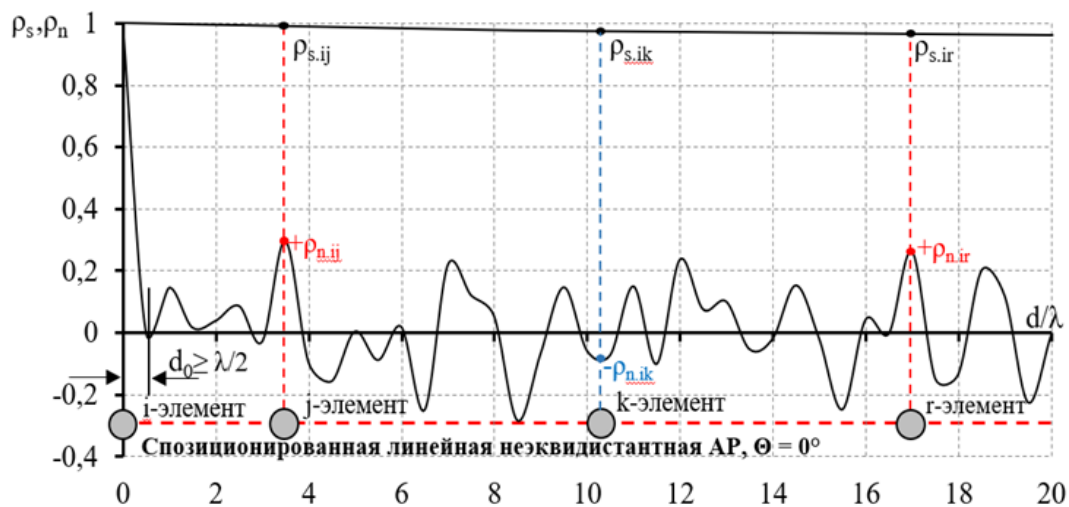


Рис. 5. Принцип пространственной компенсации естественных радиопомех ДКМ диапазона.

При таком размещении антенных элементов происходит рандомизация скалярного электромагнитного пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех, в результате чего вычисленные мгновенные значения их КВК между каждой парой антенных элементов $\rho_{n,ij}$ за счет разных расстояний и осциллирующей зависимости будут принимать разнознаковые значения. После суммирования результирующая сумма КВК естественных радиопомех будет всегда ограничена и стремиться к нулю с ростом числа элементов:

$$\lim_{I \uparrow} \sum_I \rho_n(I) \rightarrow 0 \text{ (см. рис. 5).}$$

Напротив, в силу ортогонального позиционирования элементов АР к направлению прихода полезного радиосигнала значения его КВК будут всегда положительны и принимать наибольшие значения при разносе в пределах больших значений КВК радиосигнала – до $\rho_s \geq 0,6$ (см. рис. 5), в результате чего их сумма с ростом числа элементов будет всегда возрастать: $\lim_{I \uparrow} \sum_I \rho_s(I) \uparrow$.

Таким образом, при заданных в методе условиях разноса АЭ с ростом их числа (I) в АР после пространственно-корреляционной обработки сигналов влияние естественных радиопомех на выходе ЦАР будет компенсироваться, а сигнальная составляющая будет расти. Это приведет к возрастанию ОСП в выходном отклике ЦАР [см. выражение (4)].

При этом эффективность метода пространственной компенсации зависит от коэффициента усиления пространственно-корреляционной обработки, который с учетом идентичности антенно-фидерных и приемных трактов ($\sigma_{s,i} = \sigma_{s,j}$, $\sigma_{n,i} = \sigma_{n,j}$) будет определяться отношением:

$$K_{\text{ЦАР}} = \frac{\sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^{I-1} \rho_{s,ij}(\tau - \tau_k)}{\sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^{I-1} \rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)}. \quad (4)$$

На рисунке 6 представлены возможности достижения выигрыша ОСП за счет компенсации естественных радиопомех ДКМ при различном числе АЭ в ЦАР.

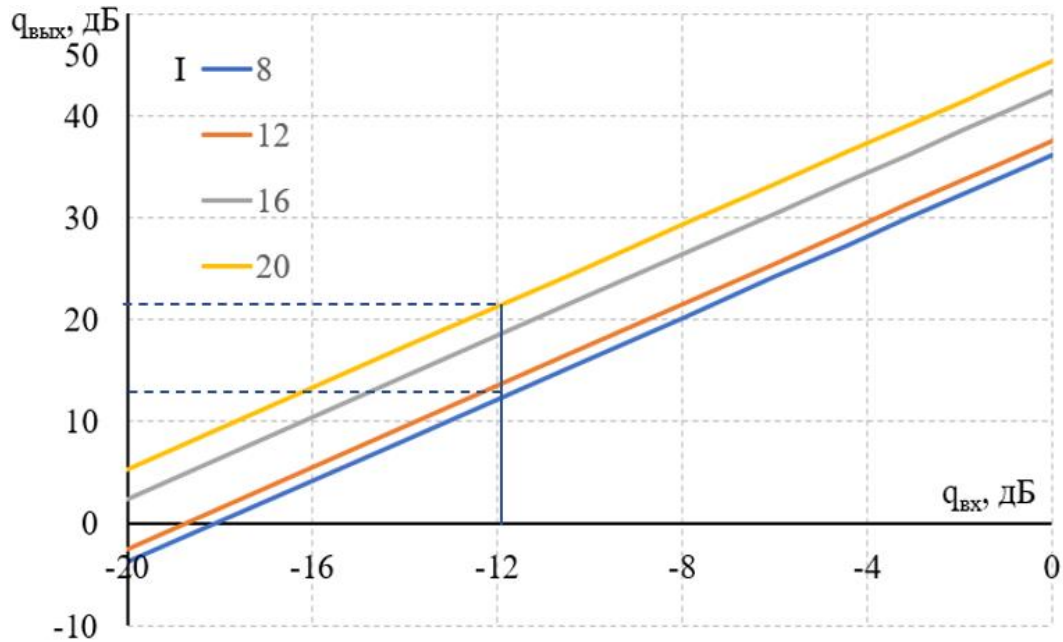


Рис. 6. Выигрыш ОСП за счет использования пространственного метода компенсации естественных радиопомех.

4. Помехоустойчивость РТС с пространственной компенсацией естественных радиопомех.

Для РТС обнаружения, использующих алгоритм принятия решений об обнаружении полезного сигнала, основанного на критерии Неймана-Пирсона, помехоустойчивость определяется вероятностью пропуска цели [14,17,18]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\operatorname{erf}^{-1}[1 - 2P_{\text{лт}}] \sqrt{\frac{K}{2} + \sum_{i \leq j} \rho_{n,ij}^2} - \sqrt{K} q_{\text{вх}}^2 \sum_{i \leq j} \rho_{s,ij}}}{\sqrt{\frac{B}{2} (q_{\text{вх}}^2 + 1)^2 + \sum_{i \leq j} (q_{\text{вх}}^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij})^2}} \right) \right), \quad (8)$$

где $\operatorname{erf}^{-1}[x]$ — обратная функция интегралу вероятностей; $P_{\text{лт}}$ — заданная вероятность ложной тревоги; $q_{\text{вх}}^2$ — ОСП на входе АЭ; B — количество корреляторов, $B = I^2 - I$.

По выражению (8) проведен расчет помехоустойчивости РТС обнаружения на основе ЦАР с конфигурацией апертуры в виде линейной спирали при разном числе АЭ (рис. 7).

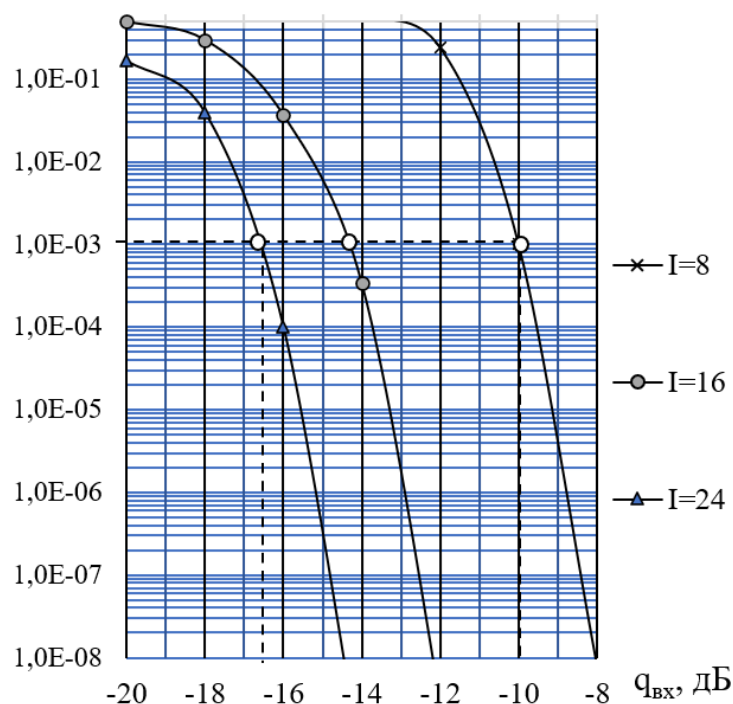


Рис. 7. Помехоустойчивость ЦАР с пространственным методом компенсации естественных радиопомех при $P_{лт} = 0,01$.

Как видно из рис. 7, разработанный метод компенсации естественных радиопомех при росте числа АЭ позволяет повысить помехоустойчивость РТС. В данном случае, к примеру, для обеспечения $P_{пр} = 10^{-3}$ при числе АЭ от 8 до 24 чувствительность приема будет находиться в пределах $q_{вх.min}^2 = -10 \dots -16,6$ дБ.

Заключение

Таким образом, исследования показали, что предложенная концепция построения ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов позволяет компенсировать влияние естественных радиопомех ДКМ диапазона, что даст возможность обеспечить прием и обработку низкоуровневых радиосигналов ниже уровня естественных радиопомех.

Рассмотренный метод может быть реализован в качестве дополнительного способа к хорошо зарекомендовавшим себя традиционным методам повышения помехоустойчивости РТС ДКМ диапазона [10], а также в радиосистемах

других диапазонов радиоволн, с учетом дополнительного исследования пространственно-корреляционных свойств некоррелированных естественных радиопомех и акустических шумов моря [15].

Литература

1. Воробьев Н.В., Грязнов В.А. Многочастотные антенные решетки и их применение в радиотехнических системах Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 204 с.
2. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. – М: Радиотехника, 2012. – 744 с.
3. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. Москва, Радиотехника, 2010.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – Киев: Издательство КВІЦ, 2000. – 428
5. Слюсар В. И. Цифровое формирование луча в системах связи: Будущее рождается сегодня / В. И. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – № 1. – С. 6–12.
6. 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.
7. 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.
8. Легкий Н.М., Михеев Н.В. Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке. Российский технологический журнал. 2020;8(6):54-62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-54-62>
9. Bevelacqua P.J. Antenna arrays: performance limits and geometry optimization. – Arizona State University, 2008. – 156 p.

10. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. Москва, Техносфера, 2018. 936 с.
11. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Пространственно-корреляционных метод обработки сигналов в неэквидистантных цифровых антенных решетках. XVII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и их применение» Российское НТОРЭС им. А.С. Попова «Обработка сигналов в радиотехнических системах». Москва. 2015. С.385-389.
12. Сучков А.Н., Орошук И.М., Соловьев М.В., Мельник С.Л. Метод компенсации поля естественных радиопомех в цифровых антенных решетках с нелинейной обработкой сигналов. с. 2020. №1(47), Т.2. С.157-162. Режим доступа: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1616402275журнал147т.22020ТРУДЫМГУим.им.адм.Г.И.НевельскогоиТОВВМУим.С.О.Макарова.pdf.
13. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех / Ю.Г. Сосулин, В.В. Костров, Ю.Н. Паршин. – Москва : Радиотехника, 2014. – 626
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва, Сов. Радио, 1968.
15. 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.).
16. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Методы синтеза цифровых антенных решеток дециметрового диапазона с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов. Владивосток, ТОВВМУ. 2019. 188 с.
17. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Москва, Радио и связь, 1982.

18. Орощук И.М., Сучков А.Н., Кадочников М.М. Статистическая модель высоконаправленной цифровой антенной решетки с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. № 12. Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.1>.

Для цитирования:

Орощук И.М., Сучков А.Н., Кутерин В.А. Концепция построения цифровых антенных решеток с пространственной компенсацией естественных радиопомех. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.6>