

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-1-22-29

УДК 629.12.001.2

МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОПОМЕХ

Игорь Михайлович Орошук

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова.

Андрей Николаевич Сучков

доктор технических наук, доцент, начальник кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова.

Владимир Александрович Кутерин

адъюнкт кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова.

Адрес: 690062, Российская Федерация, г. Владивосток, Камский переулок, д. 6.

E-mail для связи: oroshchuk@yandex.ru

Аннотация: В статье представлен метод пространственной компенсации естественных радиопомех в декаметровом канале связи и оценка его потенциальной помехоустойчивости. Метод компенсации базируется на результатах экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и естественных радиопомех декаметрового диапазона. Для реализации метода используется цифровая антенная решётка с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов. В канале также использована гауссова амплитудная модуляция, формирующая шумоподобный сигнал с расширенной базой. Оценка помехоустойчивости построена на модели ионосферного канала с релеевскими замираниями с учётом пространственно-корреляционных свойств сигналов и естественных помех. Анализ проведённых исследований показал возможность компенсации помех за счёт роста числа антенных элементов в антенной решётке, которая, как следствие, позволит повысить помехоустойчивость ионосферного декаметрового канала связи при низких отношениях уровней сигнал/шум на входе приёмного тракта. Возможность обеспечения высокой помехоустойчивости в ионосферных декаметровых каналах позволит использовать новые виды связи для обмена данными с судами и кораблями ВМФ в пределах акваторий Мирового океана.

Ключевые слова: декаметровый канал связи, антенная решётка, пространственная компенсация помех, модуляция, оценка помехоустойчивости.

Введение

Приоритет использования декаметровых (ДКМ) каналов для обеспечения дальней связи с судами и кораблями в море по сравнению со спутниковыми системами связи обусловлен прежде всего достаточно низкой стоимостью и меньшей уязвимостью к деструктивным преднамеренным воздействиям в условиях жёсткой конкуренции и высокой вероятности военных конфликтов между государствами.

Несмотря на указанные достоинства, ДКМ каналы имеют большие ограничения по помехоустойчивости из-за многолучевой структуры распространения ионосферных волн, вызыва-

ющей глубокие замирания, что ограничивает возможность применения в ДКМ диапазоне современных средств обмена информацией. Все это обосновывает актуальность применения альтернативных методов обработки сигналов, обеспечивающих повышение помехоустойчивости ДКМ каналов связи.

Проведённые исследования строятся на концепции применения оценочно-корреляционного приёма сигналов, изложенной в работе [1, 2], с учётом анализа пространственно-корреляционных свойств ДКМ ионосферных радиоволн. Для этого в статье приведены результаты экспериментальных исследований про-

пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех ДКМ диапазона, на основе которых разработан метод пространственной компенсации естественных радиопомех, построенный на основе цифровой антенной решётки (ЦАР) с пространственно-корреляционной обработкой сигналов.

Метод реализуется за счёт использования неэквидистантной конфигурации антенной решётки, построенной с учётом пространственно-корреляционных свойств радиосигналов и радиопомех ДКМ диапазона.

В конце статьи приведена оценка потенциальной помехоустойчивости ДКМ канала связи, построенного на использовании разработанного метода.

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 концентрации электронов в ионосфере на пути распространения радиоволн [3].

Из анализа экспериментальных данных в этой области в современной научной литературе отсутствовали однозначные данные о пространственно-корреляционных свойствах радиосигналов, что связано, скорее всего, с зависимостью свойств ионосферы от географических координат радиотрассы. Аналогично отсутствует точная информация о пространственно-корреляционных свойствах 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 радиопомех [4], частные результаты которых представлены на рис. 1 и рис. 2. Независимо аналогичные результаты исследований позже получены другим автором [5].

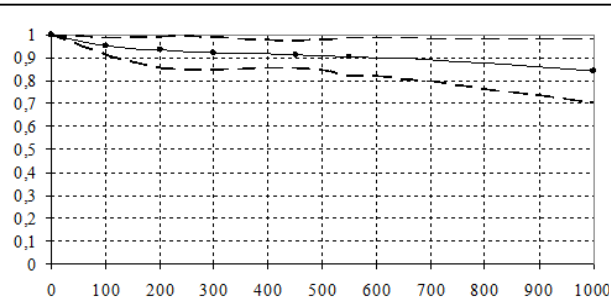
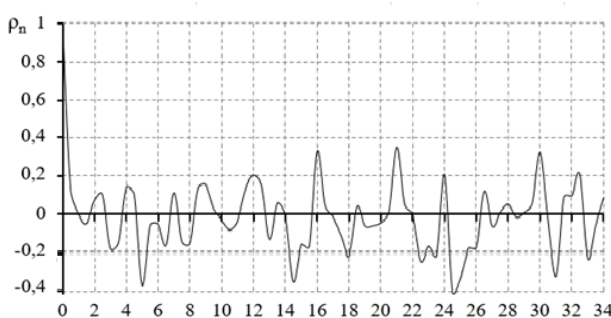


Рис. 1. Пространственно-корреляционная зависимость радиосигналов с границами доверительного интервала с вероятностью 0,9



а) — при полосе приёмного тракта 10 кГц



б) — при полосе приёмного тракта 30 кГц

Результаты экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств скалярного электромагнитного поля радиосигналов ионосферных и поверхностных волн и радиопомех ДКМ диапазона показали следующие результаты: пространственно-корреляционная связь скалярного электромагнитного поля радиосигналов снижается при увеличении расстояния между элементами ЦАР по экспоненциальному закону. Анализ зависимостей показал, что при разnose антенн до 1000 м коэффициент взаимной корреляции (КВК) сохраняет высокие значения:

для поверхностных волн — до 0,85; для ионосферных волн — до 0,6. Спад КВК ограничивает максимальные размеры апертур ДКМ АР, а следовательно, и её направленные свойства.

Пространственно-корреляционные свойства электромагнитного поля радиопомех имеют иную тенденцию: большие значения КВК радиопомех сохраняются только в пределах небольшого ин-

тервала корреляции, примерно равного половине длины волны ($d_0 \approx \lambda/2$), а при больших разносах зависимость КВК носит случайный осциллирующий характер. При этом с расширением полосы пропускания приёмного тракта снижётся среднеквадратическое отклонение (средняя амплитуда осцилляции) КВК за пределами пространственного интервала корреляции, что даёт приоритет применения широкополосных сигналов для обеспечения помехоустойчивости ДКМ радиоканалов при возможности обеспечения соответствующей широкополосности используемых антенных элементов (АЭ).

Пространственно-корреляционный способ компенсации естественных радиопомех

Разработанный способ компенсации естественных радиопомех реализуется на базе применения неэквидистантных цифровых антенных решёток (ЦАР), позволяющих после аналого-цифрового преобразования (АЦП) использовать нелинейную обработку сигналов (рис. 3) [6–8]. В качестве нелинейной обработки в исследованном методе использована корреляционная обработка сигналов со всех пар антенных элементов ЦАР с последующим суммированием, после чего вычисленное значение поступает на устройство принятия решений (УПР), алгоритм работы которого определяет помехоустойчивость радиоканала (см.

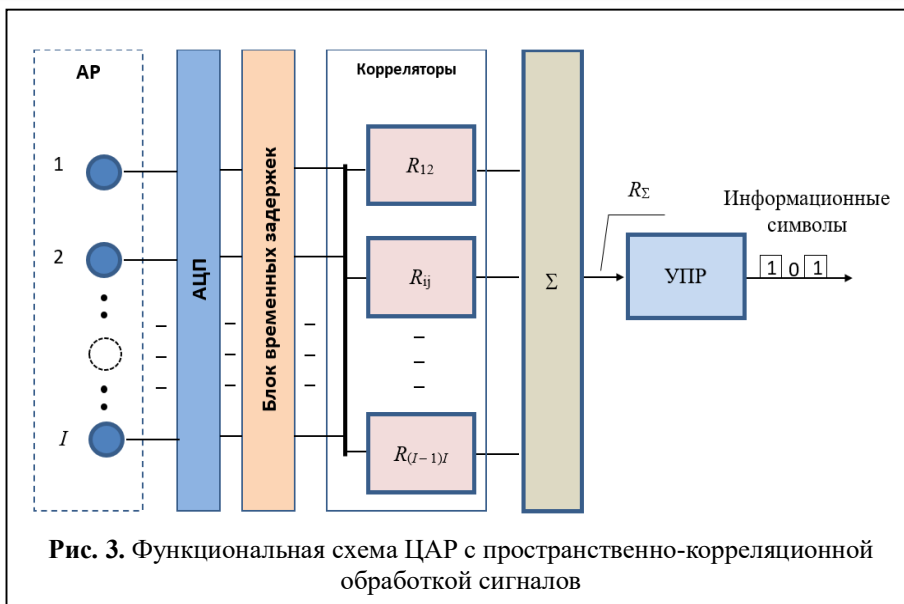


Рис. 3. Функциональная схема ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов

рис. 3). Выходной отклик ЦАР, оценивающий сумму взаимных корреляций со всех пар антенных элементов, определяется выражением

$$R_{\Sigma} = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>1}^I \left[\hat{\sigma}_{s,i} \hat{\sigma}_{s,j} \hat{\rho}_{s,ij}(\tau_k) + \hat{\sigma}_{n,i} \hat{\sigma}_{n,j} \hat{\rho}_{n,ij}(\tau_k) \right], \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}_{s,i}$, $\hat{\sigma}_{s,j}$, $\hat{\sigma}_{n,i}$, $\hat{\sigma}_{n,j}$ — оценки среднеквадратических отклонений (СКО) напряжений сигналов и помех на выходах i -го и j -го элементов АР; $\hat{\rho}_{s,ij}(\tau_k)$, $\hat{\rho}_{n,ij}(\tau_k)$ — оценки коэффициентов взаимной корреляции напряжений сигналов и помех на выходах i -го и j -го элементов АР; τ_k — компенсационные временные задержки сигналов, определяющие позиционирование элементов антенной решётки (АР) в заданное направление.

Из выражения (1) видно, что уровень сигналов и помех в выходном напряжении ЦАР определяется их пространственно-корреляционными свойствами, на основании чего снижение значений $\hat{\rho}_{n,ij}(\tau_k)$ будет повышать помехоустойчивость работы приёмника.

Пространственный способ компенсации естественных радиопомех построен с учётом исследованных экспериментальным путём пространственно-корреляционных свойств радио-

сигналов и естественных помех ДКМ диапазона [4, 5]. В данном случае пространственная компенсация естественных радиопомех достигается за счёт рандомизации поля этих помех при позиционировании элементов ЦАР в неэквидистантную линейную АР (рис. 4) и последующей когерентной обработки сигналов.

В результате неэквидистантного размещения элементов АР, на расстояниях, превышающих пространственный интервал корреляции радиопомех $d_0 > \lambda/2$, происходит случайная выборка значений взаимной корреляции радиопомех, принимающих разнознаковые величины (рис. 5). После суммирования вычисленных значений взаимной корреляции радиопомех происходит их компенсация, которая с ростом числа элементов имеет ограниченное значение: $\sum_{l \uparrow} \hat{\rho}_{n,ij} \approx 0$.

Иную тенденцию имеет сигнальная составляющая. С учётом позиционирования диаграммы направленности ЦАР в направлении передающей станции взаимная корреляция радиосигналов будет всегда положительной и принимать в пределах апертуры антенны максимальные значения (см. рис. 5), что при суммировании приведёт к росту сигнальной составляющей в выходном напряжении ЦАР $\sum_{l \uparrow} \hat{\rho}_{s,ij} \uparrow$ [см. выражение (1)]. В результате этого после компенсации радиопомех возрастёт отношение сигнал/помеха на входе устройства принятия решения (см. рис. 2), что, как следствие, повысит помехоустойчивость канала связи.

В данном случае для эффективной работы метода пространственной компенсации радиопомех в обработке используются значения взаимной корреляции между всеми элементами ЦАР, за исключением диагональных значений корреляционной матрицы, определяемых дисперсиями напряжений смеси сигналов и помех на выходе каждого АЭ:

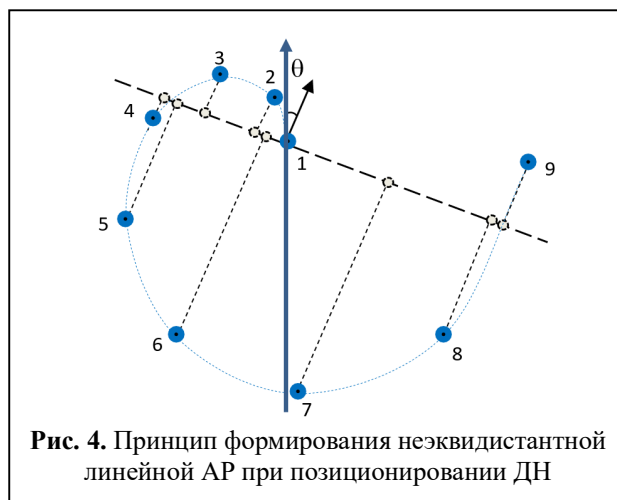


Рис. 4. Принцип формирования неэквидистантной линейной АР при позиционировании ДН

$$[R_{ij}] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1l} \\ \cdot & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & R_{(l-1)l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & R_{ll} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В этом случае, в силу чётности функции R_{ij} , при реализации ЦАР достаточно вычислить одну зеркальную часть матрицы относительно диагонали (2).

Статистическая модель приёмного тракта ЦАР ДКМ канала связи

Для реализации пространственного метода компенсации радиопомех исследован ДКМ канал связи с гауссовой амплитудной модуляцией (ГАМ), обеспечивающей шумоподобность и расширение базы сигнала [9].

Сущность ГАМ заключается в наложении

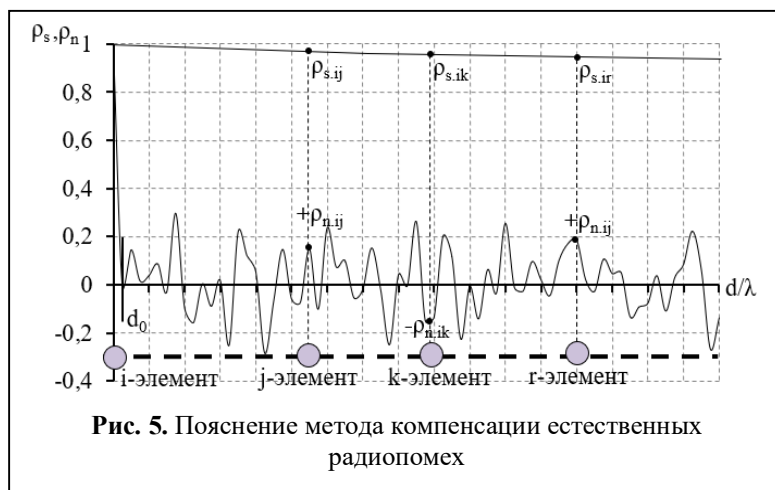


Рис. 5. Пояснение метода компенсации естественных радиопомех

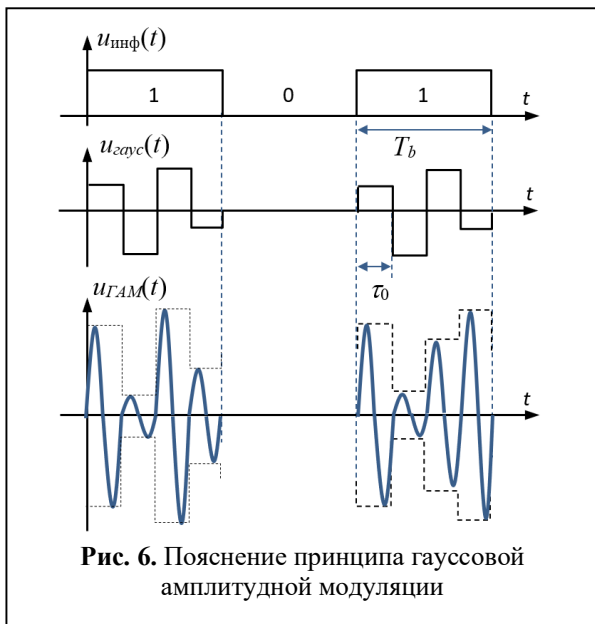


Рис. 6. Пояснение принципа гауссовой амплитудной модуляции

на информационный символ «1» огибающей, распределённой по псевдослучайному гауссову закону (рис. 6), количество временных тактов которой τ_0 определяется установленной базой сигнала $N = T_b / \tau_0$, где T_b — длительность одного бита.

Далее сформированный гауссов сигнал $u_{завс}(t)$ подвергается амплитудной модуляции на заданной несущей частоте. В этом случае при передаче символа «0» распределение выходных напряжений определяется распределением гауссовых помех на выходах всех пар АР:

$$\mathcal{N}(n_i, n_j) = \frac{\exp\left(-\frac{n_i^2 - 2\rho_{n,ij}n_in_j + n_j^2}{2\sigma_n^2(1 - \rho_{n,ij})}\right)}{2\pi\sigma_n^2\sqrt{1 - \rho_{n,ij}^2}}, \quad (3)$$

где $\rho_{n,ij}$ — коэффициент взаимной корреляции и помех на выходах i -го и j -го элементов АР; σ_n^2 — дисперсия помехи.

В случае передачи символа «1» с учётом применения ГАМ распределение сигналов также будет иметь гауссов закон:

$$\mathcal{N}(s_i, s_j) = \frac{\exp\left(-\frac{s_i^2 - 2\rho_{s,ij}s_is_j + s_j^2}{2\sigma_s^2(1 - \rho_{s,ij})}\right)}{2\pi\sigma_s^2\sqrt{1 - \rho_{s,ij}^2}}, \quad (4)$$

где $\rho_{z,ij}$ — коэффициент взаимной корреляции сигналов на выходах i -го и j -го элементов АР; σ_s^2 — дисперсия сигнала.

В дальнейших аналитических преобразованиях во время передачи информационного символа «1» в точке приёма рассматривается аддитивная смесь сигнала и помехи $z = s + n$, а при передаче «0» — только помеха n .

С учётом использования корреляционной обработки выходной отклик ЦАР (R_Σ) будет определяться выражением

$$R_\Sigma = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^I R_{ij}, \quad (5)$$

где R_{ij} — оценка функции взаимной корреляции между выходными напряжениями i -й и j -й пары элементов АР ($U_{i,k}, U_{j,k}$),

$$R_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} U_{i,k} U_{j,k}, \quad (6)$$

где N — объём выборки, используемый в корреляторах и определяемый заданной базой сигнала.

На основании приведённого выражения (6) для корреляционной обработки сигналов и гауссовых распределений входных процессов (3) и (4) плотность распределения вероятностей на выходе одного коррелятора при передаче символа «0» будет иметь вид

$$w_n(R_{ij}) = \frac{\exp\left(-\frac{(R_{ij} - M_n)^2}{2D_n}\right)}{\sqrt{2\pi D_n}}, \quad (7)$$

где M_n — математическое ожидание напряжения на выходе коррелятора при приёме помехи, $M_n = 2\rho_{n,ij}\sigma_n^2$; D_n — дисперсия напряжения на выходе коррелятора при приёме помехи, $D_n = \frac{4\sigma_n^4(1 + \rho_{n,ij}^2)}{N}$.

В случае передачи символа «1» плотность распределения вероятностей будет определяться обработанной смесью сигнала и помехи:

$$w_z(R_{ij}) = \frac{\exp\left(-\frac{(R_{ij} - M_z)^2}{2D_z}\right)}{\sqrt{2\pi D_z}}, \quad (8)$$

где M_z — математическое ожидание напряжения на выходе коррелятора при приёме смеси сигнала и помехи, $M_z = 2(\rho_{s,ij}\sigma_s^2 + \rho_{n,ij}\sigma_n^2)$; D_z — дисперсия напряжения на выходе коррелятора при приёме смеси сигнала и помехи,

$$D_z = \frac{4\left[(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + (\rho_{s,ij}\sigma_s^2 + \rho_{n,ij}\sigma_n^2)^2\right]}{N}.$$

Тогда с учётом выражения (5) плотность распределения на выходе ЦАР будет определяться свёрткой распределений (7) и (8):

$$\mathcal{W}(R_\Sigma) = \underbrace{w(R_{12}) \otimes w(R_{13}) \otimes \dots \otimes w(R_{ij}) \otimes \dots \otimes w(R_{I(I-1)})}_B, \quad (9)$$

где R_Σ — выходной отклик ЦАР; B — количество корреляторов, $B = I^2 - I$.

В случае приёма помехи результирующая плотность распределения вероятностей на выходе ЦАР принимает вид

$$W_n(R_\Sigma) = \frac{\exp\left(-\frac{(R_\Sigma - M_{n\Sigma})^2}{2D_{n\Sigma}}\right)}{\sqrt{2\pi D_{n\Sigma}}}, \quad (10)$$

где $M_{n\Sigma}$ — математическое ожидание сигнала на выходе сумматора ЦАР при наличии на входе только помехи; $M_{n\Sigma} = 4\sigma_n^2 \sum_{i<j} \rho_{n,ij}$, $i = \overline{1, I}$ и

$j = \overline{1, I}$; $D_{n\Sigma}$ — дисперсия сигнала на выходе сумматора ЦАР при наличии на входе только помехи, $D_{n\Sigma} = \frac{4\sigma_n^4}{N} \left(B + 2 \sum_{i<j} \rho_{n,ij}^2 \right)$, $i = \overline{1, I}$ и $j = \overline{1, I}$.

Для случая приёма смеси сигнала и помехи выходное распределение вероятностей будет иметь вид

$$W_z(R_\Sigma) = \frac{\exp\left(-\frac{(R_\Sigma - M_{z\Sigma})^2}{2D_{z\Sigma}}\right)}{\sqrt{2\pi D_{z\Sigma}}}, \quad (11)$$

где $M_{z\Sigma}$ — математическое ожидание сигнала на выходе сумматора ЦАР при наличии на входе смеси сигнала и помехи,

$$M_{z\Sigma} = 4 \sum_{i<j} (\rho_{s,ij}\sigma_s^2 + \rho_{n,ij}\sigma_n^2), \quad i = \overline{1, I} \text{ и } j = \overline{1, I};$$

$D_{z\Sigma}$ — дисперсия сигнала на выходе сумматора ЦАР при наличии на входе смеси сигнала и помехи;

$$D_{z\Sigma} = \frac{4}{N} \left[B(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + 2 \sum_{i<j} (\rho_{s,ij}\sigma_s^2 + \rho_{n,ij}\sigma_n^2)^2 \right],$$

$$i = \overline{1, I} \text{ и } j = \overline{1, I}.$$

Оценка помехоустойчивости декаметрового канала связи с пространственной компенсацией помех

Полученные выражения (10) и (11) являются функциями правдоподобия для двух гипотез:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{W}(R_\Sigma | H_0) &= W_n(R_\Sigma), \\ \mathcal{W}_z(R_\Sigma | H_1) &= W_z(R_\Sigma), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где H_0 — гипотеза о передаче символа «0»; H_1 — гипотеза о передаче символа «1».

Пользуясь критерием максимума правдоподобия, по которому работает устройство принятия решений (см. рис. 3), на основании выражений (12) определена битовая вероятность ошибки приёма информации в ДКМ канале связи с ГАМ и релейскими замиряниями, использующая пространственную компенсацию помех:

$$BER = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \Phi \left[\frac{\sqrt{NB} \left(Q_0 - \frac{2}{B} \sum_{i<j} \rho_{n,ij} \right)}{\sqrt{1 + \frac{2}{B} \sum_{i<j} \rho_{n,ij}^2}} \right] \right\} +$$

$$+ \frac{1}{q^2} \int_0^\infty q \exp\left(-\frac{q^2}{q^2}\right) \times$$

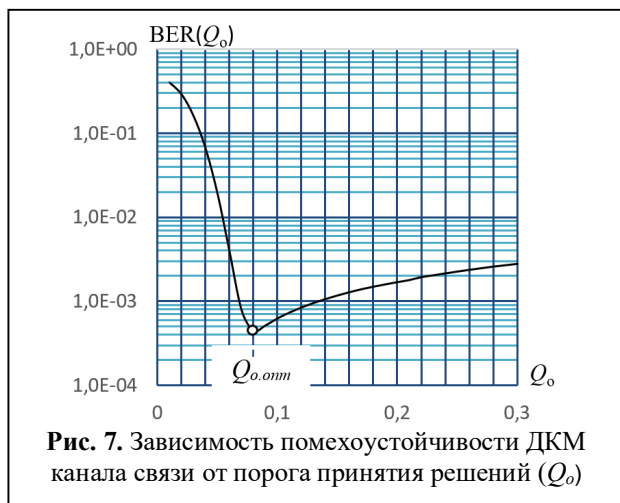
$$\times \Phi \left[\frac{\sqrt{NB} \left(Q_0 - \frac{2}{B} \sum_{i<j} (q^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij}) \right)}{\sqrt{(q^2 + 1)^2 + \frac{2}{B} \sum_{i<j} (q^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij})^2}} \right] dq, \quad (13)$$

где $i = \overline{1, I}$ и $j = \overline{1, J}$; q — отношение уровней сигнал/помеха на входе ЦАР; $q = \sigma_s / \sigma_n$; \bar{q} — среднее отношение уровней сигнал/помеха на входе ЦАР в канале с замираниями; Q_0 — относительный порог принятия решений УПР; $Q_0 = \frac{R_0}{4B\sigma_n^2}$, R_0 — пороговое значение выходного отклика ЦАР, определяющее принятие решения о символе «0» или «1» ($R_\Sigma > R_0 \rightarrow \langle 1 \rangle$,

$$R_\Sigma < R_0 \rightarrow \langle 0 \rangle$$
; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$.

Анализ выражения (13) показал, что для ГАМ существует оптимальный порог принятия решения (рис. 7), относительное значение которого в основном определяется параметрами ЦАР. С учётом данного порога проведены расчёты помехоустойчивости ДКМ канала с релейскими замираниями в оптимальном режиме при использовании в ЦАР различного числа антенных элементов (рис. 8).

Анализ приведённых на рис. 8 зависимостей показал, что с ростом числа антенных элементов повышается помехоустойчивость ДКМ канала связи, что связано с улучшением компенсационных свойств ЦАР. При этом применение пространственного метода компенсации помех позволяет обеспечивать высокую помехоустойчивость ДКМ каналов связи с замираниями при малых отношениях сигнал/шум на входе приёмной системы, что повышает энергетическую эффективность канала.

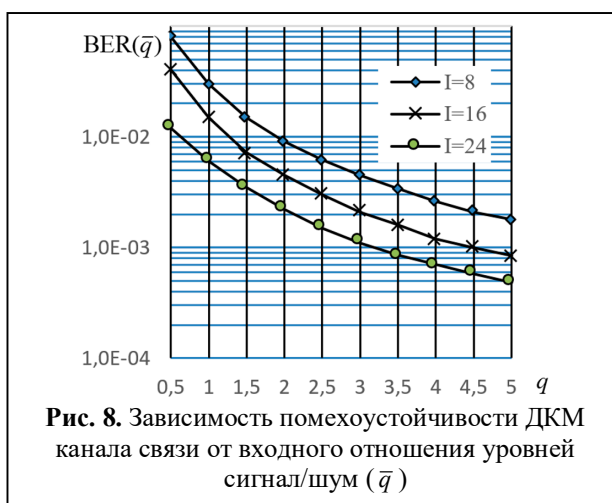


Заключение

Результаты проведённых исследований пространственного метода компенсации естественных помех показали возможность достижения высокой помехоустойчивости в ДКМ каналах связи даже при глубоких рлеевских замираниях. Это позволит использовать новые виды связи в таких каналах для организации обмена данными с судами и кораблями ВМФ в пределах акваторий Мирового океана.

Литература

1. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паришин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника. 2014. 632 с.
2. Костров В.В. Компенсация помех в радиотехнических системах: оценочно-корреляционный подход // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. №1. С. 21–34.
3. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. 1971. 183 с.
4. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Пространственно-корреляционные свойства радиосигналов декаметровых волн // Электросвязь. 2015. №7. С. 34–39.
5. Фабрицио Д.А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. М.: Техносфера. 2018. 936 с.
6. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Моделирование пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в цифровых антенных решётках декаметровых радиоэлектронных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №3 (27). С. 60–68.
7. Орошук И.М., Сучков А.Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных



решеток в декаметровом диапазоне // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2015. №2 (23). С. 17–26.

8. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Имитационное моделирование отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов

декаметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники. 2016. №12. С. 1–21.

9. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Методика оценки помехоустойчивости декаметровых радиоканалов поверхностной волны // Техника радиосвязи. 2017. №3 (34). С. 19–29.

Поступила 31 июля 2025 г.

English

METHOD FOR SPATIAL COMPENSATION OF NATURAL RADIO INTERFERENCE

Igor Mikhailovich Oroshchuk — Grand Doctor in Engineering, Professor, The Makarov Pacific Higher Naval School.

Andrey Nikolaevich Suchkov — Grand Doctor in Engineering, Associate Professor, the Head of the Department, The Makarov Pacific Higher Naval School.

Vladimir Alexandrovich Kuterin — Postgraduate Student, The Makarov Pacific Higher Naval School.

Address: Russian Federation, Vladivostok, Kamskij lane, 6.

E-mail: oroashchuk@yandex.ru

Abstract: The article presents a method for spatial compensation of natural radio interference in a decameter communication channel and an assessment of its potential noise immunity. The compensation method is based on the results of experimental studies of the spatial-correlation properties of radio signals and natural radio interference in the decameter range. A digital antenna array with a spatial-correlation method of signal processing is used to implement the method. The channel also utilizes Gaussian amplitude modulation, which generates a noise-like signal with an expanded base. The noise immunity assessment is built on a model of an ionospheric channel with Rayleigh fading, taking into account the spatial-correlation properties of the signals and natural interference. Analysis of the conducted research has shown the possibility of interference compensation due to an increase in the number of antenna elements in the array, which, as a consequence, will improve the noise immunity of the ionospheric decameter communication channel at low signal-to-noise ratios at the input of the receiving path. The possibility of ensuring high noise immunity in ionospheric decameter channels will allow the use of new types of communication for data exchange with vessels and Navy ships within the waters of the World Ocean.

Keywords: decameter communication channel, antenna array, spatial interference compensation, modulation, noise immunity assessment.

References

1. Sosulin Yu.G., Kostrov V.V., Parshin Yu.N. Estimation-correlation signal processing and interference compensation. Moscow: Radiotekhnika, 2014. 632 p.
2. Kostrov V.V. Compensation of interferences in radio engineering systems: the estimation-correlation approach. 2014. No. 1. Pp. 21–34.
3. Dolukhanov M.P. Fluctuation processes during radio wave propagation. 1971. 183 p.
4. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Spatial-correlation properties of decameter wave radio signals. *Electrosvyaz*. 2015. No. 7. Pp. 34–39.
5. Fabrizio G.A. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. Moscow: Tekhnosfera, 2018. 936 p.
6. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorsky V.A. Modeling of spatial-correlation characteristics of the radio signal and radio interference field in digital antenna arrays of decameter radio-electronic systems. *Radio and telecommunication systems*. 2017. No. 3 (27). Pp. 60–68.
7. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N. Capabilities of non-linear digital antenna arrays application in the decameter wave band. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2015. No. 2 (23). Pp. 17–26.
8. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorsky V.A. Simulation of the response of digital antenna arrays with the spatial-correlation method for processing decameter band signals. *Journal of Radio Electronics*. 2016. No. 12. Pp. 1–21.
9. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorsky V.A. Method for assessing the noise immunity of decameter surface wave radio channels. *Radio communication technology*. 2017. No. 3 (34). Pp. 19–29.