

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ Δ -СЛОЯ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ НЕКОГЕРЕНТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННОЙ ПОМЕХИ

Негурица А. О.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2026-5-33-38

Ключевые слова: рандомизированное правило приема, псевдослучайная последовательность, приемник Котельникова, гарантированная вероятность ошибки, средняя мощность помехи, вычислительный эксперимент, радиоканал.

Аннотация

Цель работы: выполнить оценку эффективности применения приемника с Δ -слоем неразличимости при приеме фазоманипулированных сигналов в условиях некогерентного воздействия преднамеренной помехи. Рассматривается ситуация, когда источник помехи не обеспечивает строгого фазового согласования с полезным сигналом, а его воздействие после корреляционной обработки проявляется через проекцию помехи на решающее направление.

Результаты: предложена расчетная модель приема фазоманипулированного сигнала с Δ -слоем неразличимости при наличии фазового рассогласования между полезным сигналом и преднамеренной помехой. Показано, что некогерентность помехи сглаживает зависимость вероятности ошибки от текущей мощности помехового воздействия и снижает выраженность выигрыша, получаемого за счет введения Δ -слоя. Вместе с тем при малых и умеренных значениях фазового рассогласования область неразличимости сохраняет практический смысл, поскольку уменьшает чувствительность приемника к точному выбору мощности помехи источником. Выполнено сопоставление базового правила приема при $\Delta = 0$ и рандомизированного правила при $\Delta > 0$. Установлено, что эффективность Δ -слоя следует оценивать не только по вероятности ошибки при фиксированной мощности помехи, но и по гарантированной вероятности ошибки при ограничении источника помехи по средней мощности.

Научная новизна: уточнены условия целесообразности применения Δ -слоя неразличимости для приема фазоманипулированных сигналов в случае некогерентного воздействия преднамеренной помехи. Показано, что фазовое рассогласование должно учитываться при выборе параметра Δ , поскольку оно изменяет эффективную проекцию помехи на решающую статистику приемника.

Введение

Вопросы повышения помехозащищенности систем передачи информации сохраняют актуальность вследствие широкого применения средств радиоэлектронного подавления. Для каналов радиосвязи особое значение имеет не только энергетическое превосходство полезного сигнала над помехой, но и устойчивость алгоритма приема к изменению структуры помехового воздействия. В практических условиях источник помехи далеко не всегда может обеспечить строгую когерентность относительно принимаемого сигнала. Поэтому наряду с задачей оценки влияния мощности помехи возникает задача учета фазового рассогласования.

Для приема двоичных фазоманипулированных сигналов традиционно используется правило ближайшего решения, соответствующее

приемнику Котельникова. При воздействии гауссовского шума такое правило является естественным и обеспечивает оптимальность в классической постановке. Однако при наличии преднамеренной помехи, ограниченной по средней мощности, ситуация меняется. Источник помехи может распределять свой энергетический ресурс во времени и выбирать такие режимы воздействия, при которых вероятность ошибки приемника возрастает.

Одним из простых способов изменения решающего правила является введение Δ -слоя неразличимости. В этом случае приемник не принимает жесткое решение вблизи порога, а использует рандомизацию. При $\Delta = 0$ правило сводится к обычному пороговому приему. При $\Delta > 0$ появляется область, в которой решение принимается случайным образом. Такая область

¹ Негурица Анастасия Олеговна, адъюнкт Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: LadyN98@yandex.ru

снижает предсказуемость поведения приемника для источника помехи и может обеспечить выигрыш по гарантированной вероятности ошибки.

В ранее рассмотренных постановках [1, 2] основное внимание уделялось когерентному воздействию помехи, когда проекция помехового сигнала на решающее направление максимальна. Такой случай является важным, но не исчерпывает практическую ситуацию. При фазовом рассогласовании эффективная составляющая помехи, влияющая на решающую статистику, уменьшается. Это приводит к изменению вероятности ошибки и влияет на оценку эффективности Δ -слоя.

Цель настоящей работы состоит в анализе эффективности работы приемника с Δ -слоем неразличимости при приеме фазоманипулированных сигналов в условиях некогерентного воздействия преднамеренной помехи.

Модель СПИ и постановка задачи

Рассматривается система передачи информации, в которой двоичный символ представляется фазоманипулированным сигналом. После корреляционной обработки задача приема сводится к анализу решающей статистики. Передаваемый символ обозначается через a , где a принимает значения $+1$ и -1 с равными вероятностями. Преднамеренная помеха является аддитивной и ограничена по средней мощности. Некогерентность помехи учитывается через угол фазового рассогласования θ .

В нормированном виде решающая статистика на входе порогового устройства может быть представлена выражением

$$u = 1 + \sqrt{z} \cos \theta + \xi, \quad (1)$$

где u – значение входного сигнала; z – текущая мощность преднамеренной помехи, нормированная к мощности сигнала; θ – фазовое рассогласование полезного сигнала и помехи; ξ – гауссовская случайная составляющая с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ . Знак перед помеховой составляющей выбран для случая, когда источник помехи стремится сместить решающую статистику в сторону ошибочного решения.

При $\theta = 0$ помеха действует наиболее эффективно, так как ее проекция на решающее направление максимальна. При увеличении фазового рассогласования величина $\cos \theta$ уменьшается, поэтому воздействие помехи на результат приема ослабляется. В предельном случае, когда проекция помехи на решающее направление близка к нулю, ее влияние на пороговое решение существенно снижается.

Решающее правило приемника с Δ -слоем неразличимости задается следующим образом: если $u > \Delta$, принимается решение в пользу символа $+1$; если $u < \Delta$, принимается решение в пользу символа -1 ; если $|u| \leq \Delta$, решение принимается равновероятно в пользу одного из двух символов.

При $\Delta = 0$ приемник приравнивается к обычному приемнику Котельникова. При положительном значении Δ возникает область неразличимости, в которой приемник отказывается от жесткого решения. В этом состоит основное отличие рассматриваемого правила от классического порогового приема.

Для оценки эффективности Δ -слоя используется вероятность ошибочного приема символа. При фиксированных z , θ , σ и Δ вероятность ошибки определяется суммой вероятности попадания решающей статистики в область уверенно ошибочного решения и половины вероятности попадания в область неразличимости. Для переданного символа $+1$ математическое ожидание решающей статистики равно

$$\mu(z, \theta) = 1 - \sqrt{z} \cos \theta. \quad (2)$$

Тогда вероятность ошибки при фиксированном фазовом рассогласовании может быть записана через функцию распределения стандартной нормальной случайной величины $F(x)$:

$$P(z, \Delta, \theta, \sigma) = \frac{1}{2} \left[F\left(\frac{-\Delta - \mu(z, \theta)}{\sigma}\right) + F\left(\frac{\Delta - \mu(z, \theta)}{\sigma}\right) \right]. \quad (3)$$

Если фазовое рассогласование не контролируется приемником и источником помехи, то для оценки некогерентного воздействия целесообразно усреднить выражение (4) по θ :

$$P_{\text{ош}}(z, \Delta, \sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P(z, \Delta, \theta, \sigma) d\theta. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что некогерентная помеха действует на приемник не так, как когерентная. При когерентном воздействии вся мощность помехи используется в наиболее опасном направлении. При некогерентном воздействии только часть помехи попадает в решающее направление, поэтому зависимость вероятности ошибки от z становится менее резкой.

При ограничении источника помехи по средней мощности δ для оценки помехоустойчивости используется не только зависимость вероятности ошибки от текущей мощности помехи z , но и ее верхняя вогнутая оболочка [1]. Введем обозначение:

$$P_{\text{гип}}(\delta | \Delta, \sigma) = \hat{P}_{\text{ош}}(z, \Delta, \sigma),$$

где $\hat{P}_{\text{ош}}(z, \Delta, \sigma)$ – значение верхней вогнутой оболочки функции $P_{\text{ош}}(z, \Delta, \sigma)$ в точке $z = \delta$. Такая

величина характеризует гарантированную вероятность ошибки на бит при наихудшем распределении помехи.

Методика оценки эффективности

Для оценки эффективности приемника с Δ -слоем была использована расчетная процедура, основанная на последовательном варьировании мощности помехи, параметра Δ и уровня фазового рассогласования. На первом этапе для каждого значения z вычислялась вероятность ошибки при заданном Δ и σ . На втором этапе выполнялось усреднение по фазовому рассогласованию, что соответствовало некогерентному характеру помехового воздействия. На третьем этапе для полученной зависимости строилась оценка гарантированной вероятности ошибки при ограничении на среднюю мощность помехи.

В качестве базового варианта использовался приемник с $\Delta = 0$. Он соответствует жесткому пороговому решению. Все остальные варианты сравнивались с ним по двум признакам: по изменению формы зависимости вероятности ошибки от мощности помехи и по изменению гарантированной вероятности ошибки. Такой подход позволяет не ограничиваться сравнением отдельных точек графика, а оценивать устойчивость правила приема к изменению стратегии источника помехи.

Параметр Δ рассматривался как настраиваемый параметр приемника. При слишком малом Δ правило практически не отличается от классического порогового приема. При чрезмерно большом Δ область рандомизации становится слишком широкой, что приводит к росту случайных решений даже тогда, когда решающая статистика содержит достаточно информации о переданном символе. Поэтому эффективность Δ -слоя связана с поиском промежуточного значения, при котором рандомизация снижает влияние преднамеренной помехи, но не разрушает полезное решение приемника.

Некогерентное воздействие помехи учитывалось не как отдельный вид шума, а как изменение эффективной проекции помехового сигнала на решающее направление. Это важно, поскольку при одинаковой полной мощности помехи результат ее воздействия на приемник может существенно различаться в зависимости от фазового рассогласования. В практическом отношении это означает, что один и тот же уровень помехового воздействия не всегда приводит к одинаковой вероятности ошибки.

Критерием эффективности использовалось наличие выигрыша относительно варианта $\Delta = 0$. Если при $\Delta > 0$ гарантированная вероятность

ошибки меньше, чем при $\Delta = 0$, применение слоя неразличимости считается целесообразным. Если же различие между кривыми оказывается малым, то введение Δ -слоя может быть признано избыточным для рассматриваемых условий приема.

Основные результаты

Для оценки эффективности применения Δ -слоя неразличимости при некогерентном воздействии преднамеренной помехи был проведен вычислительный эксперимент. Рассматривались зависимости вероятности ошибки $P(z|\Delta)$ от текущей мощности помехи z , а также зависимости $\hat{P}(\delta|\Delta)$, характеризующие гарантированную вероятность ошибки при ограничении источника помехи по средней мощности δ .

В расчетах сравнивались три варианта решающего правила: $\Delta = 0$, $\Delta = 0,2584$ и $\Delta = 0,33$. Случай $\Delta = 0$ соответствует базовому правилу приема без области неразличимости. Значения $\Delta = 0,2584$ и $\Delta = 0,33$ использовались для оценки влияния ширины слоя неразличимости на вероятность ошибки при некогерентном воздействии преднамеренной помехи.

На рисунке 1 представлены зависимости $P(z|\Delta)$ и $\hat{P}(\delta|\Delta)$ при отсутствии гауссовского шума, то есть при $\sigma = 0$. Сплошные линии соответствуют вероятности ошибки при фиксированной текущей мощности помехи z , пунктирные линии – гарантированной вероятности ошибки при ограничении источника помехи по средней мощности δ .

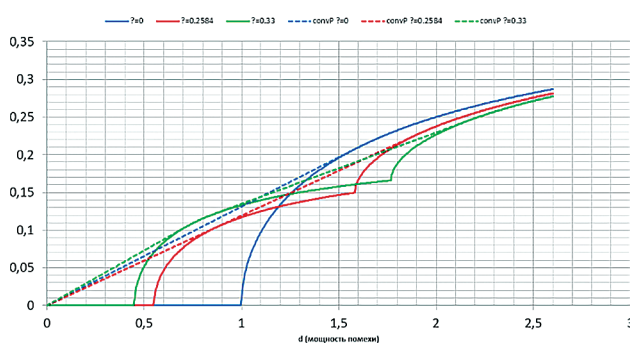


Рис. 1. Зависимость величин $P(z|\Delta)$, $\hat{P}(\delta|\Delta)$ от значений текущей и средней мощности некогерентной преднамеренной помехи при $\sigma = 0$.

Анализ рисунка 1 показывает, что при $\Delta = 0$ вероятность ошибки имеет выраженный пороговый характер. При малых значениях текущей мощности помехи ошибка практически отсутствует, однако после достижения определённого уровня мощности наблюдается резкий рост вероятности ошибочного приёма. При введении Δ -слоя неразличимости характер зависимости

изменяется: рост вероятности ошибки становится более плавным, а поведение гарантированной вероятности ошибки становится более благоприятным в области средних значений мощности помехи.

Следует отметить, что применение Δ -слоя не приводит к равномерному снижению вероятности ошибки при всех значениях z . При малых значениях текущей мощности помехи введение слоя неразличимости может увеличивать вероятность ошибки, поскольку часть реализаций попадает в область случайного выбора решения. Однако при оценке помехоустойчивости в условиях ограничения источника помехи по средней мощности основное значение имеет не только сама зависимость $P(z|\Delta)$, но и её верхняя вогнутая оболочка $\hat{P}(\delta|\Delta)$. Именно по этой зависимости оценивается гарантированная вероятность ошибки.

Из рисунка 1 видно, что при $\Delta = 0,2584$ гарантированная вероятность ошибки в области средних значений δ оказывается ниже, чем для базового варианта $\Delta = 0$. Это свидетельствует о наличии энергетического выигрыша при использовании Δ -слоя неразличимости. Для рассматриваемого случая выигрыш составляет порядка 0,4 дБ. Значение $\Delta = 0,33$ также изменяет форму зависимости, однако чрезмерное увеличение ширины слоя неразличимости не даёт однозначного улучшения, поскольку расширение области случайного решения одновременно увеличивает вероятность ошибочного приёма внутри самой области неразличимости.

На рисунке 2 приведены аналогичные зависимости для случая наличия гауссовского шума с параметром $\sigma = 0,1$.

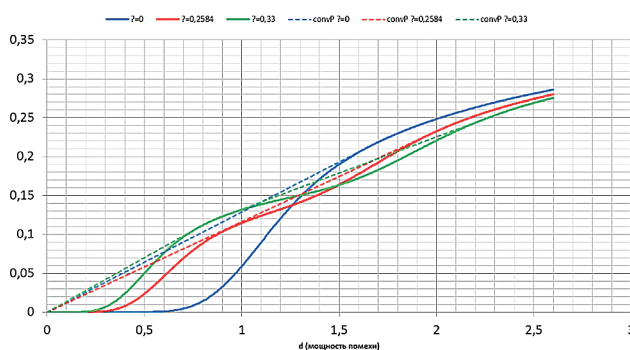


Рис. 2. Зависимость величин $P(z|\Delta)$, $\hat{P}(\delta|\Delta)$ от значений текущей и средней мощности некогерентной преднамеренной помехи при $\sigma = 0,1$.

Сравнение рисунка 1 и рисунка 2 показывает, что наличие гауссовского шума сглаживает зависимости вероятности ошибки от мощности преднамеренной помехи. При $\sigma = 0,1$ резкие

переходные участки становятся менее выраженными, а различия между вариантами $\Delta = 0$, $\Delta = 0,2584$ и $\Delta = 0,33$ уменьшаются. Это объясняется тем, что случайная шумовая составляющая дополнительно влияет на решающую статистику приёмника и частично снижает эффект, достигаемый за счёт введения области неразличимости.

Вместе с тем из рисунка 2 видно, что применение Δ -слоя сохраняет практический смысл и при наличии умеренного уровня гауссовского шума. Для $\Delta = 0,2584$ зависимость $\hat{P}(\delta|\Delta)$ остается сопоставимой или более благоприятной по сравнению с базовым вариантом $\Delta = 0$ в области средних значений δ . Это показывает, что некогерентность преднамеренной помехи и наличие гауссовского шума не устраняют полностью эффект от использования слоя неразличимости, хотя уменьшают его выраженность.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что эффективность Δ -слоя неразличимости необходимо оценивать не только по вероятности ошибки при фиксированной текущей мощности помехи z , но и по гарантированной вероятности ошибки $\hat{P}(\delta|\Delta)$, учитывающей ограничение источника помехи по средней мощности. Такой подход позволяет корректно сравнивать базовое правило приёма и приёмник с Δ -слоем в условиях некогерентного воздействия преднамеренной помехи.

Таким образом, вычислительный эксперимент подтверждает, что применение Δ -слоя неразличимости может обеспечивать повышение помехоустойчивости приёма фазоманипулированных сигналов при некогерентном воздействии преднамеренной помехи. Наиболее выраженный эффект наблюдается при отсутствии или умеренном уровне гауссовского шума. При увеличении шумовой составляющей выигрыш сокращается, что должно учитываться при выборе параметра Δ и оценке целесообразности применения такого решающего правила в реальных радиоканалах.

Заключение

В работе выполнен анализ эффективности работы Δ -слоя неразличимости при приеме фазоманипулированных сигналов в условиях некогерентности преднамеренных помех. Показано, что фазовое рассогласование изменяет эффективную мощность помехи, действующую на решающую статистику приемника, и поэтому должно учитываться при оценке целесообразности применения Δ -слоя.

Основной достигнутый эффект состоит в уточнении условий применения рандомизированного решающего правила. Установлено, что Δ -слой

наиболее полезен при малом и умеренном фазовом рассогласовании, когда помеха сохраняет заметную проекцию на решающее направление. При сильной некогерентности выигрыш уменьшается, поскольку сама помеха становится менее опасной для порогового решения.

В научной области теории помехоустойчивого приема полученные результаты позволяют связать выбор параметра Δ не только с мощностью помехи, но и с фазовыми условиями ее воздействия. Практическая достоверность

предложенных решений подтверждается расчетной процедурой, основанной на вычислении вероятности ошибки, усреднении по фазовому рассогласованию и сравнении гарантированной вероятности ошибки для случаев $\Delta = 0$ и $\Delta > 0$.

Дальнейшее развитие работы может быть связано с учетом нестационарного фазового рассогласования, многолучевого распространения, ошибок синхронизации и переходом от приема одиночных символов к оценке эффективности Δ -слоя при обработке кодовых блоков.

Литература

1. Чуднов А. М., Сазонов В. В., Бикбулатов В. Р. Оптимизация области неразличимости приемником двоичных сигналов, передаваемых по каналу с преднамеренной помехой // Проблемы передачи информации. – 2025. – Т. 61. – № 1. – С. 47–59.
2. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the decisive rule for a receiver with a Δ -layer of indistinguishability of binary signals in a channel with intentional interference // Problems of Information Transmission. – 2025. – Vol. 61. – No. 1. – Pp. 41–55.
3. Чуднов А. М., Сапунова Л. П., Бикбулатов В. Р. Модель канала передачи данных с обратной связью в условиях воздействия преднамеренных помех с ограниченной средней мощностью // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2025. – Вып. 2. – С. 243–249.
4. Чуднов А. М., Кирик Д. И., Ермакова Е. М. Оптимизация параметров кода и режима обработки сигналов в условиях преднамеренных помех // Труды учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 79–86. – DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-79-86.
5. Чуднов А. М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1991. – Т. 27. – № 3. – С. 57–65.
6. Чуднов А. М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1986. – Т. 22. – № 4. – С. 49–54.
7. Жодзишский Ю. И. Максимальная гарантированная помехоустойчивость приема сигналов при ограничении средней мощности мешающих воздействий // Радиотехника. – 1986. – № 10. – С. 56–57.
8. Савищенко Н. В. Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигналов КАМ и ФМ при неидеальной синхронизации // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 1 (44). – С. 53–63.
9. Nguyen B. V., Nguyen M. T., Jung H., Kim K. Designing Anti-Jamming Receivers for NRDCSK Systems Utilizing ICA, WPD, and VMD Methods // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2019. – Vol. 66. – No. 9. – Pp. 1522–1526. – DOI: 10.1109/TCSII.2019.2891254.
10. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27. – No. 2. – Pp. 457–461. – DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3224381.
11. Негурица А. О. Оценка эффективности использования Δ -слоя неразличимости двоичных сигналов, принимаемых в условиях случайных и преднамеренных помех // Телекоммуникации и связь. – 2025. – № 4 (07). – С. 22–27.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY OF PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS RECEIVED UNDER NONCOHERENT INTENTIONAL INTERFERENCE

Neguritsa A. O.²

Keywords: randomized reception rule, pseudorandom sequence, Kotelnikov receiver, guaranteed error probability, average interference power, computational experiment, radio channel.

Abstract

The purpose of the work: to evaluate the efficiency of applying a receiver with a Δ -layer of indistinguishability for the reception of phase-shift keyed signals under noncoherent deliberate interference. The case is considered in which the interference source does not provide strict phase alignment with the useful signal, and its effect after correlation processing is manifested through the projection of the interference onto the decision direction.

² Anastasia O. Neguritsa, adjunct of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: LadyN98@yandex.ru

Results: a computational model for the reception of a phase-shift keyed signal using a Δ -layer of indistinguishability in the presence of phase mismatch between the useful signal and deliberate interference is proposed. It is shown that the no coherence of the interference smooths the dependence of the error probability on the current interference power and reduces the pronounced nature of the gain achieved by introducing the Δ -layer. At the same time, for small and moderate values of phase mismatch, the indistinguishability region retains practical significance, since it reduces the receiver sensitivity to the exact choice of interference power by the source. A comparison is performed between the basic reception rule at $\Delta = 0$ and the randomized rule at $\Delta > 0$. It is established that the efficiency of the Δ -layer should be evaluated not only by the error probability at a fixed interference power, but also by the guaranteed error probability under a constraint on the average power of the interference source.

Scientific novelty: the conditions for the expediency of applying a Δ -layer of indistinguishability for the reception of phase-shift keyed signals under noncoherent deliberate interference are refined. It is shown that phase mismatch should be taken into account when choosing the parameter Δ , since it changes the effective projection of the interference onto the receiver decision statistic.

References

1. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimizatsiya oblasti nerazlichimosti priemnikom dvoichnyh signalov, peredavaemyh po kanalu s prednamerennoy pomehoy // Problemy peredachi informatsii. – 2025. – V. 61. 2 No. 1. – Pp. 47–59.
2. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the decisive rule for a receiver with a Δ -layer of indistinguishability of binary signals in a channel with intentional interference // Problems of Information Transmission. – 2025. – Vol. 61. – No. 1. – Pp. 41–55.
3. Chudnov A. M., Sapunova L. P., Bikbulatov V. R. Model' kanala peredachi dannyh s obratnoj svyaz'yu v usloviyah vozdeystviya prednamerennyh pomeh s ogranichennoj srednej moshchnost'yu // Izvestiya TulaGU. Tehnicheskie nauki. – 2025. – Vyp. 2. – Pp. 243–249.
4. Chudnov A. M., Kirik D. I., Ermakova E. M. Optimizatsiya parametrov koda i rezhima obrabotki signalov v usloviyah prednamerennyh pomeh // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. – 2019. – V. 5. – No. 4. – Pp. 79–86. – DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-79-86.
5. Chudnov A. M. Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniya i priema signalov // Problemy peredachi informatsii. – 1991. – V. 27. – No. 3. – Pp. 57–65.
6. Chudnov A. M. O minimaksnyh algoritmah formirovaniya i priema signalov // Problemy peredachi informatsii. – 1986. – V. 22. – No. 4. – Pp. 49–54.
7. Zhodzishskij Yu. I. Maksimal'naya garantirovannaya pomehoustojchivost' priema signalov pri ogranichenii srednej moshchnosti meshayushchih vozdeystvij // Radiotekhnika. – 1986. – No. 10. – Pp. 56–57.
8. Savishchenko N. V. Pomehoustojchivost' kogerentnogo priema mnogopozitsionnyh signalov KAM i FM pri neideal'noj sinhronizatsii // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. – 2010. – No. 1 (44). – Pp. 53–63.
9. Nguyen B. V., Nguyen M. T., Jung H., Kim K. Designing Anti-Jamming Receivers for NRDCSK Systems Utilizing ICA, WPD, and VMD Methods // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2019. – Vol. 66. – No. 9. – Pp. 1522–1526. – DOI: 10.1109/TCSII.2019.2891254.
10. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27. – No. 2. – Pp. 457–461. – DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3224381.
11. Negurica A. O. Ocenka ehffektivnosti ispol'zovaniya Δ -slova nerazlichimosti dvoichnyh signalov, prinimaemyh v usloviyah sluchajnyh i prednamerennyh pomeh // Telekommunikatsii i svyaz'. – 2025. – No. 4 (07). – Pp. 22–27.

