

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Δ -СЛОЯ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ ДВОИЧНЫХ СИГНАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ СЛУЧАЙНЫХ И ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Негурица А. О.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-4-22-27

Ключевые слова: алгоритм формирования и приема сигналов, псевдослучайный сигнал, рандомизированное правило приема, гарантированная вероятность ошибки.

Аннотация

Цель работы: исследовать эффективность применения решающего правила приемника с Δ -слоем неразличимости двоичных сигналов в условиях воздействия на канал связи случайных и преднамеренных помех, уточнить оценку выигрыша, обеспечиваемого использованием Δ -слоя, с учетом аддитивного воздействия на передаваемый сигнал гауссовского шума, наличие которого в канале сокращает величину этого выигрыша.

Результаты: получены аналитические выражения для вероятности ошибочного приема ФМ-сигнала при использовании приемника с Δ -слоем, которые для заданных соотношений мощностей: сигнал-помеха-шум рассчитаны путем проведения вычислительного эксперимента, по результатам которого представлены графики зависимости вероятности ошибки бита сообщения от мощности преднамеренной помехи с наихудшим (оптимальным) распределением при различных уровнях гауссовского шума.

Установлено, что с ростом уровня шума выигрыш приемника с Δ -слоем сокращается, в канале при средней мощности шума (в полосе частот сигнала) $\sigma^2 > 0,1$ эффект практически отсутствует.

Научная новизна: определены условия эффективности использования решающего правила приема ФМ-сигналов с Δ -слоем неразличимости в условиях воздействия как преднамеренных, так и случайных помех.

Введение

Вопросы повышения помехозащищенности систем передачи информации (СПИ) обусловлены растущими угрозами целенаправленного радиоэлектронного подавления, которое может использоваться для нарушения работы каналов связи в критически важных сферах – от военных коммуникаций до промышленных и государственных систем управления. В современных условиях злоумышленники применяют оптимизированные помехи, способные анализировать параметры сигнала и подбирать оптимальные стратегии воздействия [1, с. 41; 2, с. 244; 3, с. 1522; 4, с. 457; 5, с. 79-80; 6, с. 41], что требует разработки более совершенных методов защиты.

Особую значимость приобретает обеспечение помехоустойчивости связи при ограниченных энергетических ресурсах, когда источник помех стремится минимизировать

эффективность передачи данных в рамках имеющегося ресурса мощности. В таких условиях классические алгоритмы приема не обеспечивают необходимый уровень помехоустойчивости, тогда как специализированные алгоритмы формирования и приема сигналов (АФПС) [1, с. 41; 3, с. 1522; 4, с. 457; 5, с. 79-80] позволяют повысить помехозащищенность систем передачи информации на основе совершенствования методов модуляции/демодуляции.

Таким образом, повышение помехозащищенности остается ключевой задачей, от решения которой зависит безопасность современных и перспективных систем связи и эффективность их функционирования.

Вопросам разработки способов передачи информации в условиях преднамеренных помех уделяется значительное внимание [2, с. 244; 4, с. 457-458; 7, с. 20-21; 8, арт.3348].

¹ Негурица Анастасия Олеговна, адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: LadyN98@yandex.ru

В основу этих способов в существующих СПИ положены методы модуляции с формированием псевдослучайных сигналов (ПСС) во временной области: фазомодулированный псевдослучайный сигнал (ФМ-ПСС), амплитудно-фазомодулированный псевдослучайный сигнал (АФМ-ПСС) [1, с. 41; 3, с. 1523], а также в частотной области – алгоритмы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [4, с. 458]. В настоящее время эти способы помехозащиты в сочетании с приемником Котельникова В. А. широко применяются в системах военной и коммерческой связи для передачи информации в условиях преднамеренных помех.

Вместе с тем в 1971 году Кан С.² сделал вывод, что приемник Котельникова не оптимален для приема двоичных ФМ ПСС в условиях преднамеренных помех при ограничении на среднюю мощность источника.

В 1986 году Чуднов А. М.³ в более общей задаче синтеза АФПС установил оптимальность АФМ-ПСС и привел примеры более эффективных по отношению к приемнику Котельникова решающих правил приема сообщений в условиях преднамеренных помех. В это же время Жодзишский Ю. И.⁴ построил в аналитическом варианте оптимальное правило приема двоичных сигналов с базой $n = 1$, а также получил на основе вычислительных методов значения параметров, определяющие оптимальные решающие правила приема ФМ ПСС для относительно небольших значений базы n .

Актуальные на текущий момент границы гарантированной вероятности ошибки приведены: нижние, обеспечиваемые источником помехи, и верхние, гарантируемые СПИ – в [1, с. 45]. Для $n = 1$ верхняя граница определена в соответствии с результатами Жодзишского Ю. И. Для $n = 2$ – результатом, полученным в [1, с. 45; 6, с. 46] на основе использования АФМ сигнала и приемника с Δ -слоем, т. е. областью на плоскости, ограниченной двумя прямыми $x = \pm\Delta$, в которой приемник принимает равновероятно решение в пользу одного из сигналов ± 1 .

Относительно приемника с Δ -слоем следует отметить [1, с. 48-49]:

- при $\Delta = 0$ приемник с Δ -слоем становится приемником Котельникова, принимающим решение в пользу ближайшего в евклидовой метрике эталонного сигнала;
- оптимальные значения Δ^* параметра Δ -слоя равны: $\Delta_1^* = 3 - 2\sqrt{2} \approx 0,1716$ при $n = 1$ и $\Delta_2^* \approx 0,2584$ при $n = 2$;
- при оптимальном слое Δ^* приемник обеспечивает энергетический выигрыш в помехоустойчивости по отношению к приемнику Котельникова приблизительно на 1,38 дБ при $n = 1$ и 0,41 дБ при $n = 2$;
- для $n \geq 3$ приемник с Δ -слоем ($\Delta > 0$) оказывается неэффективным;
- приемник имеет простую реализацию.

Учитывая оптимальность приемника Котельникова в условиях гауссовской помехи, можно заключить о снижении выигрыша, обеспечиваемого приемником с Δ -слоем при повышении в канале уровня случайных шумов. Поскольку этот вопрос ранее не исследовался, он является предметом исследования настоящей работы. Рассматривается случай $n = 1$, представляющий наибольший теоретический и практический интерес.

В настоящей работе описана модель СПИ, а также поставлена задача на исследование, предложена методика оценки эффективности приемника с Δ -слоем с учетом воздействия как преднамеренных помех, так и случайных (гауссовских) шумов, подведены итоги, обозначены возможные пути применения полученных результатов, а также направления развития и обобщения решаемой задачи.

Модель СПИ и постановка задачи

Принцип работы СПИ иллюстрируется на рис. 1, где использованы обозначения:

\mathcal{A} – сообщение, поступающее от источника в канал канала связи, представлено случайной величиной (СВ) с равновероятными значениями из $\{\pm 1\}$;

\mathcal{V} – аддитивная преднамеренная помеха описывается СВ с наихудшим для системы распределением $F_V(\cdot)$, выбираемым источником помехи в рамках условия

$$\mathbf{E}[\mathcal{V}^2] = \mathbf{E}_{F_D}[\mathcal{D}] \leq \delta, \quad (1)$$

где $\mathbf{E}[\cdot]$ – математическое ожидание СВ, δ – максимально допустимое отношение средней мощности помехи к мощности сигнала,

2 Cahn C. Performance of Digital Matched Filter Correlator with Unknown Interference // IEEE Trans. Commun. Techn. 1971. V. 19. № 6. P. 1163–1172. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1971.1090760>

3 Чуднов А. М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Пробл. передачи информ. 1986. Т. 22. № 4. С. 49–54. <https://www.mathnet.ru/rus/ppi958>

4 Жодзишский Ю. И. Максимальная гарантированная помехоустойчивость приема сигналов при ограничении средней мощности мешающих воздействий // Радиотехника. 1986. № 10. С. 56–57.

определенное имеющимся ресурсом источника помехи, $\mathcal{D} = \mathcal{V}^2$ – мощность помехи, выделяемая источником на сигнал; $\sigma\xi$ – случайная аддитивная помеха – белый гауссовский шум (БГШ) с дисперсией σ^2 ; $\mathcal{W} = \mathcal{A} + \mathcal{V} + \sigma\xi$ – сигнал на выходе физического канала (входе приемника); РПР – решающее правило различения сигналов с Δ -слоем, определенное выражением

$$\mathcal{B} = (1 + \text{sgn}_{\Delta}(\mathcal{W}))/2, \quad (2)$$

где \mathcal{B} – выдаваемое получателю сообщение,

$$\text{sgn}_{\Delta}(z) = \begin{cases} -1, & \text{если } z < -1, \\ 0, & \text{если } |z| \leq \Delta, \\ 1, & \text{если } z > 1. \end{cases} \quad (3)$$

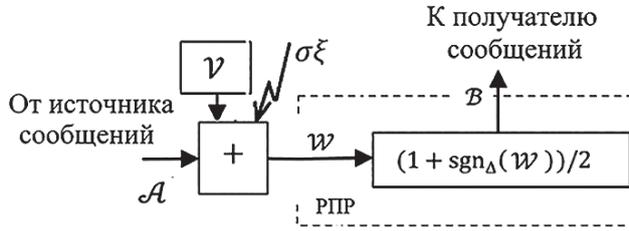


Рис. 1. Функциональная схема СПИ

Вероятность ошибки бита сообщения при фиксированной мощности помехи $d = \mathcal{V}^2$ в СПИ при $\sigma > 0$ определяется соотношением

$$\begin{aligned} P(d, \sigma^2, \Delta) &= \Pr\{\mathcal{B} \neq \mathcal{A}\} = \\ &= \frac{1}{4} \Pr\{1 - \Delta < -1 - \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\} + \\ &\quad + \frac{1}{2} \Pr\{-1 - \sqrt{d} + \sigma\xi > 1 + \Delta\} + \\ &+ \frac{1}{4} \Pr\{1 - \Delta < -1 + \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\} + \\ &\quad + \frac{1}{2} \Pr\{-1 + \sqrt{d} + \sigma\xi > 1 + \Delta\} = \\ &= \frac{1}{4} [\Pr\{-1 - \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\} - \\ &\quad - 1 + \Pr\{-1 - \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 - \Delta\}] + \\ &\quad + \frac{1}{2} [1 - \Pr\{-1 - \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\}] + \\ &\quad + \frac{1}{4} [\Pr\{-1 + \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\} - \\ &\quad - 1 + \Pr\{-1 + \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 - \Delta\}] + \\ &\quad + \frac{1}{2} [1 - \Pr\{-1 + \sqrt{d} + \sigma\xi \leq 1 + \Delta\}] = \\ &= \frac{1}{4} [F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) - 1 + F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta + \sqrt{d}))] + \\ &\quad + \frac{1}{2} [1 - F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d}))] + \\ &\quad + \frac{1}{4} [F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta - \sqrt{d})) - 1 + F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta - \sqrt{d}))] + \\ &\quad + \frac{1}{2} [1 - F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta - \sqrt{d}))] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) + \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta + \sqrt{d})) - \\ &\quad - \frac{1}{4} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) + \\ &+ \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta - \sqrt{d})) - \frac{1}{4} + \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta - \sqrt{d})) + \\ &\quad + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta - \sqrt{d})) = \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) + \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta + \sqrt{d})) - \\ &- \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta - \sqrt{d})) + \frac{1}{4} F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta - \sqrt{d})) = \\ &= \frac{1}{2} (1 + \frac{1}{2} [F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) - F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 + \Delta + \sqrt{d})) \\ &\quad - F_{\xi}(\frac{1}{\sigma}(2 - \Delta - \sqrt{d}))]), \quad (4) \end{aligned}$$

которое дополнительно по отношению к [1, с. 44] учитывает воздействие на переданный сигнал случайного шума.

По определению

$$P^-(\delta, \sigma^2, \Delta) = \max_{F_d \in \mathbb{F}(\delta)} E_{F_d} [P(d, \sigma^2, \Delta)], \quad (5)$$

и поскольку максимум в (5) достигается при $E[\mathcal{D}] = \delta$, корректным является определение наилучшего (оптимального) распределения помехи (т. е. наилучшей стратегии ИП) в виде

$$F_d^* = \text{argmax}_{F_d \in \mathbb{F}(\delta)} P(d, \sigma^2, \Delta). \quad (6)$$

На основе методики, описанной в [9, с. 129], устанавливается равенство

$$P^-(d, \sigma^2, \Delta) = P^{\wedge}(d, \sigma^2, \Delta), \quad (7)$$

где $P^{\wedge}(\cdot)$ – вогнутая (выпуклая вверх) оболочка функции $P(d, \sigma^2, \Delta)$ по первому аргументу.

Таким образом, исследуемая в работе задача состоит в построении вогнутой оболочки функции $P(d, \sigma^2, \Delta)$ и проведении анализа на этой основе эффективности приемника с Δ -слоем в канале с преднамеренными помехами и случайным шумом.

Основные результаты

Расчеты по формулам (4) осуществлялись путем проведения вычислительного эксперимента средствами Excel-VBA с оценкой значений параметров методом Монте-Карло. Для каждого из 51 значений d от 0 до 2 (значения равномерно распределены) в процессе расчетов осуществляется прогон 100000 случайных наборов данных, соответствующих формируемым данным объектам СПИ и ИП для 4-х значений Δ :

$$\Delta = 0; \Delta = 0,1; \Delta = \Delta^* = 0,1716 \text{ и } \Delta = 0,3.$$

Время расчетов составляет 15–30 с.

Построение выпуклой оболочки функции $P(d, \sigma^2, \Delta)$ по $d \in [0, \infty)$ осуществлялось на основе

рекуррентной процедуры (обобщающей соответствующую процедуру [1, с. 45]) поочередной коррекции трех точек d_1, d_2, d_3 касания прямых к зависимости $P(d, \sigma^2, \Delta)$, в промежутках $[0, d_1], [d_2, d_3]$, в результате чего функции $P(d, \sigma^2, \Delta)$ были представлены в общем случае в виде:

$$P^{\wedge}(\delta, \sigma^2, \Delta) = \begin{cases} k_1 \delta, & \delta \in [0, d_1), \\ P(\delta, \sigma^2, \Delta), & \delta \in [d_1, d_2), \\ k_2 \delta, & \delta \in [d_2, d_3), \\ P(\delta, \sigma^2, \Delta), & \delta \in [d_3, \infty), \end{cases}$$

При этом точки d_1, d_2, d_3 определяют оптимальную стратегию ИП, а именно:

- при $\delta \in [0, d_1)$ ИП с оптимальной стратегией формирует помеху в импульсном режиме с мощностью импульса d_1 и вероятностью его выдачи $p(d_1) = \delta / d_1$;
- при $\delta \in [d_1, d_2)$ в непрерывном режиме с мощностью δ ;
- при $\delta \in [d_2, d_3)$ в биимпульсном режиме с мощностями импульсов d_2, d_3 и их вероятностями $p(d_2), p(d_3)$, определяемыми из условия

$$p(d_2) + p(d_3) = 1, p(d_2)d_2 + p(d_3)d_3 = \delta;$$

- при $\delta \in [d_3, \infty)$ в непрерывном режиме с мощностью δ .

На рисунках 2–4 показаны зависимости $P(d|\Delta) = P(d, \sigma, \Delta)$ (сплошные линии) и $P^{\wedge}(\delta|\Delta) = P^{\wedge}(\delta, \sigma, \Delta)$ (пунктирные линии) построенные соответственно для $\sigma = 0; 0,1; 0,2$, которые, с одной стороны, показывают примеры и результаты расчетов по оценке помехоустойчивости СПИ при использовании в приемнике РПР с Δ -слоем и, с другой, позволяют оценить выигрыш такого приемника относительно приемника Котельникова и определить целесообразность его применения.

Как видно, при отсутствии случайных помех приемник с Δ -слоем обеспечивает максимальный выигрыш. При увеличении уровня БГШ этот выигрыш снижается и становится практически незаметным при $\sigma \geq 0,3$.

Следует отметить, что наибольший практический интерес представляет область значений показателя $P^{\wedge}(\delta, \sigma^2, \Delta) \leq 0,02$, поскольку при больших значениях вероятности ошибки становится невыгодным повышать достоверность передачи информации на канальном и сетевом уровнях СПИ по сравнению с увеличением длительности сигнала и/или базы ПСС на физическом уровне. На графиках эта область представлена окрестностью точки

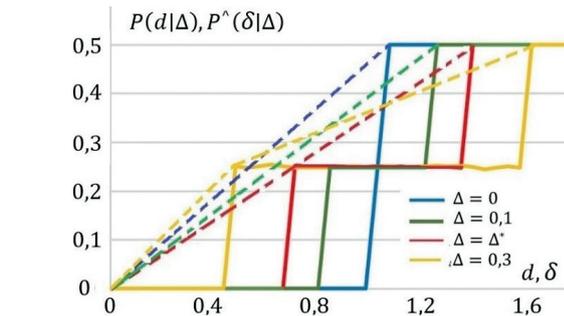


Рис. 2. Зависимость величин $P(d|\Delta), P^{\wedge}(\delta|\Delta)$ от значений d, δ текущей и средней мощности для различных при $\sigma = 0$

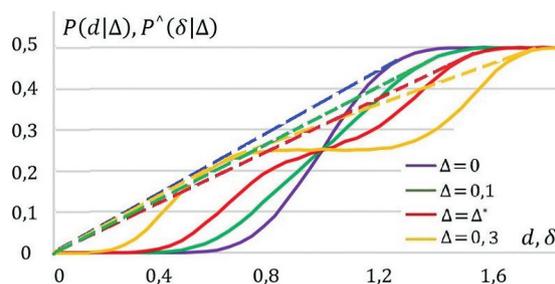


Рис. 3. Зависимость величин $P(d|\Delta), P^{\wedge}(\delta|\Delta)$ от значений d, δ текущей и средней мощности для различных при $\sigma = 0,1$

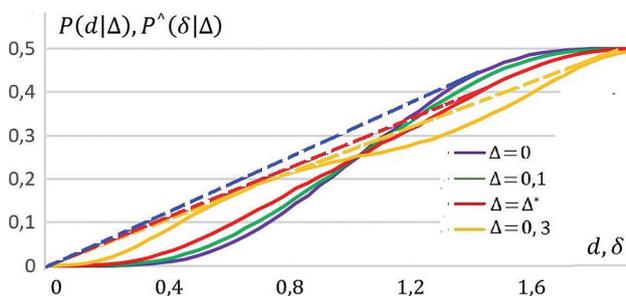


Рис. 4. Зависимость величин $P(d|\Delta), P^{\wedge}(\delta|\Delta)$ от значений d, δ текущей и средней мощности для различных при $\sigma = 0,2$

$\delta = 0$, поэтому наиболее важные результаты работы следует отнести к области $\delta \in [0, d_1)$.

Анализ представленных на рис. 2–4 зависимостей показывает, что несмотря на снижение выигрыша, обеспечиваемого приемником с Δ -слоем, он остается более эффективным по сравнению с приемником Котельникова. Более того, в рамках проведенных экспериментов оказалось, что с ростом уровня БГШ оптимальное значение параметра Δ^* возрастает. Этот результат свидетельствует о целесообразности теоретической проработки вопросов оптимизации параметра Δ приемника.

Заключение

Исследуемые вопросы подсказывают ряд направлений совершенствования способов повышения помехозащищенности системы связи к воздействию преднамеренных помех при наличии различных факторов: случайных помех с различными свойствами, нестационарной среды распространения сигналов, многолучевости, замираний, некогерентности приема, асинхронности и асинхронности композиции помехи с сигналом и другим.

В силу существенного расхождения верхних и нижних границ вероятности ошибки бита информации весьма актуальными являются обозначенные в [1, с. 58] проблемы повышения помехозащищенности СПИ передаваемых на канальном уровне информационных блоков. В таких АФПС (при условии их существования) вместо Δ -слоя в приемнике (демодуляторе, декодере) должно быть реализовано более сложное рандомизированное правило приема сообщений.

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. Том 61. Вып.1, с. 41–59.
2. 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.
3. Nguyen B. V., Nguyen M. T., Jung H., Kim K. Designing Anti-Jamming Receivers for NRDCSK Systems Utilizing ICA, WPD, and VMD Methods // IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs. 2018. V. 66. № 9. P. 1522–1526. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2891254>.
4. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Commun. Lett. 2023. V. 27. № 2. P. 457–461. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3224381>.
5. 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. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-79-86>.
6. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the Decisive Rule for a Receiver with Binary Signal Indistinguishability Δ -Layer in a Jamming Channel // Probl. Inf. Transm. 2025. V. 61. № 1. P. 41–55. DOI: 10.1134/S0032946025010041.
7. Чуднов, А. М. Комментарии к статье Н. Н. Плотникова, А. В. Войнова и А. Н. Путилина «Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолинии тропосферной связи» / А. М. Чуднов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2024. – № 11-12(197-198). – С. 20–30. – DOI 10.53816/23061456_2024_11-12_20.
8. Feng Z., Ren G., Chen J., Chen C., Yang X., Luo Y., Xu K. An Anti-Jamming Hierarchical Optimization Approach in Relay Communication System via Stackelberg Game // Appl.Sci. 2019. V. 9. № 16. P. 3348 (14 pp.). <https://doi.org/10.3390/app9163348>.
9. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб.: ВАС, 2021.

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF USING Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY OF BINARY SIGNALS RECEIVED UNDER CONDITIONS OF RANDOM AND DELIBERATE INTERFERENCES

*Neguritsa A. O.*⁵

Keywords: *signal generation and reception algorithm, pseudorandom signal, randomized reception rule, guaranteed error probability.*

⁵ Anastasia O. Neguritsa, adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: LadyN98@yandex.ru

Abstract

The aim of the work is to study the effectiveness of the application of the decision rule of the receiver with the Δ -layer of indistinguishability of binary signals under the influence of accidental and deliberate interference on the communication channel, to refine the assessment of the gain provided by the use of the Δ -layer, taking into account the additive effect of Gaussian noise on the transmitted signal, the presence of which in the channel reduces the value of this gain.

Results: analytical expressions were obtained for the probability of erroneous reception of the FM signal when using a receiver with a Δ -layer, which for the given power ratios: signal-interference-noise were calculated by conducting a computational experiment, the results of which presented graphs of the dependence of the probability of error of the message bit on the power of deliberate interference with the worst (optimal) distribution at different levels of Gaussian noise.

It has been established that with an increase in the noise level, the gain of the receiver with the Δ -layer decreases, in the channel with an average noise power (in the signal frequency band) the effect is practically non-existent $\sigma^2 > 0,1$.

Scientific novelty: the article defines the conditions for the effective use of the decision rule for receiving FM signals with a Δ -layer of indistinguishability under the influence of both intentional and accidental interference.

References

1. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimizacija oblasti nerazlichimosti priemnikom dvoichnyh signalov, peredavaemyh po kanalu s prednamerenoj pomehoj // Problemy peredachi informacii. 2025. Tom 61. Vyp.1, s. 41–59.
2. Chudnov A. M., Sapunova L. P., Bikbulatov V. R. Model' kanala peredachi dannyh s obratnoj svjaz'ju v uslovijah vozdeystvija prednamerennyh pomeh s ogranichennoj srednej moshhnost'ju // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. 2025. Vyp. 2. S. 243–249.
3. Nguyen B. V., Nguyen M. T., Jung H., Kim K. Designing Anti-Jamming Receivers for NRDCSK Systems Utilizing ICA, WPD, and VMD Methods // IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs. 2018. V. 66. № 9. P. 1522–1526. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2891254>.
4. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Commun. Lett. 2023. V. 27. № 2. P. 457–461. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3224381>.
5. Chudnov A. M., Kirik D. I., Ermakova E. M. Optimizacija parametrov koda i rezhima obrabotki signalov v uslovijah prednamerennyh pomeh // Trudy uchebnyh zavedenij svjazi. 2019. T. 5. № 4. S. 79–86. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-79-86>.
6. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the Decisive Rule for a Receiver with Binary Signal Indistinguishability Δ -Layer in a Jamming Channel // Probl. Inf.Transm. 2025. V. 61. № 1. P. 41–55. DOI: 10.1134/S0032946025010041.
7. Chudnov, A. M. Kommentarii k stat'e N. N. Plotnikova, A. V. Vojnova i A. N. Putilina «Vybor algoritma adaptacii po rabochej chastote v odnopolosnoj radiolinii troposfernoj svjazi» / A. M. Chudnov // Voprosy oboronnoj tehniki. Serija 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu. – 2024. – № 11-12(197-198). – S. 20–30. – DOI 10.53816/23061456_2024_11-12_20.
8. Feng Z., Ren G., Chen J., Chen C., Yang X., Luo Y., Xu K. An Anti-Jamming Hierarchical Optimization Approach in Relay Communication System via Stackelberg Game // Appl.Sci. 2019. V. 9. № 16. P. 3348 (14 pp.). <https://doi.org/10.3390/app9163348>.
9. Chudnov A. M. Matematicheskie osnovy modelirovanija, analiza i sinteza sistem. SPb.: VAS, 2021.

