

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ДВОИЧНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Δ -СЛОЯ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ГАУССОВСКОГО ШУМА И НЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Сазонов В. В.¹, Негурица А. О.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-39-47

Ключевые слова: оптимальная помеха, класс помех с ограниченной средней мощностью, база сигнала, отношение шум/сигнал, энергетический выигрыш, система передачи данных, рандомизированный алгоритм приема сигналов, приемник Котельникова.

Аннотация

Цель работы: оценить эффективность рандомизированного решающего правила с Δ -слоем неразличимости для помехоустойчивого приема двоичных псевдослучайных сигналов в канале с некогерентной преднамеренной помехой и гауссовским шумом.

Методы исследования: теоретико-игровой подход, аналитическое моделирование, методы оптимизации, геометрический и сравнительный анализ, статистическая обработка данных.

Результаты исследования: для сигналов с базой $p \leq 2$ при оптимальной толщине Δ^* -слоя неразличимости рандомизированного решающего правила приемника обеспечивается повышение гарантированной помехоустойчивости приема сигналов в классе помех, имеющих некогерентную составляющую с ограниченной средней мощностью и гауссовским шумом, по отношению к приемнику Котельникова. Применение в приемных моделах военных систем передачи данных рандомизированного решающего правила с Δ -слоем неразличимости повысит их помехоустойчивость.

Научная новизна: получены новые соотношения позволяющие оценить энергетический выигрыш до 1,38 дБ при использовании Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и не когерентности преднамеренной помехи.

Введение

Известно³, что одной из особенностей современных военных конфликтов является массированное применение систем вооружения; высокоточного, гиперзвукового оружия; беспилотных летательных и морских аппаратов; оружия, основанного на новых физических принципах, сопоставимого по эффективности с ядерным оружием; информационно-управляющих систем; управляемых роботизированных образцов вооружения и военной техники, а также, средств радиоэлектронной борьбы.

В условиях интенсивного применения средств радиоэлектронной борьбы критически важной задачей становится обеспечение устойчивости к воздействию помех собственных систем связи, навигации и управления. Опыт проведения специальной военной операции выявил ряд недостатков существующих средств связи, таких как их громоздкость,

заметность для противника, сложность развертывания и недостаточно высокая помехоустойчивость.

Проектирование новых поколений помехоустойчивых систем связи, способных эффективно функционировать в сложной радиоэлектронной обстановке, сталкивается с фундаментальной проблемой неполноты данных.

На этапе разработки, как правило, отсутствуют исчерпывающие сведения о конкретных условиях будущего применения (география, назначение системы, полный спектр возможных внешних воздействий).

Для решения задачи гарантированной оценки и обеспечения эффективности в условиях неизбежной неопределенности применяется методологический подход, при котором неизвестные или неконтролируемые факторы среды функционирования наделяются конфликтными (антагонистическими) свойствами [1].

¹ Сазонов Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент, докторант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vmktor-sazonov@yandex.ru

² Негурица Анастасия Олеговна, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: LadyN98@yandex.ru

³ Военная доктрина Российской Федерации (утв. Президентом РФ 25.12.2014 N Пр-2976)

Это означает моделирование активного, «интеллектуального» противника, который:

- способен вести радиоэлектронную разведку, то есть наблюдать, анализировать и идентифицировать параметры функционирующей системы [2];
- обладает возможностью оптимизировать воздействия, а именно целенаправленно подбирать и применять наиболее подавляющие из возможных вариантов помех, стремясь максимально нарушить работу системы [2];
- ограничен классом воздействий, выбор которого формируется совокупностью доступных противнику энергетических, технических, экономических и интеллектуальных ресурсов (например, мощностью передатчиков помех, их количеством, сложностью алгоритмов генерации помех, возможностями разведки) [3–6].

Принципиальная конфликтность условий эксплуатации – наличие активного противника, стремящегося к оптимизации своих подавляющих действий в рамках доступных ресурсов, кардинально меняет принципы постановки и решения задач синтеза элементов системы связи (системы передачи данных, тракта передачи данных выполняющих свой функционал в различных режимах распределения, обработки и преобразования данных) и управления их режимами работы.

Ключевое требование к проектируемым системам в такой парадигме смещается – они должны обладать устойчивостью не к отдельным, заранее известным типам помех, а ко всему спектру воздействия в заданном классе. Иными словами, система должна сохранять работоспособность даже в условиях, применения противником против нее оптимального (с его точки зрения, для достижения максимального подавляющего эффекта) воздействия из своего арсенала, ограниченного возможностями.

Исследования [1–11] в этой сфере направлены на решение задач анализа и оптимизации параметров и режимов обработки псевдослучайных сигналов в системах передачи данных. Основная сложность заключается в противодействии преднамеренным помехам, чья структура может быть специально подобранной противником для нанесения максимального ущерба алгоритмам работы системы передачи данных: ее срыва или деградации характеристик.

При заранее заданном алгоритме формирования равновероятных сигналов задача сводится к поиску оптимального рандомизированного алгоритма приема. Элементы рандомизации в алгоритме приема сигналов сводится к наличию Δ -слоя неразличимости – области сигнального пространства, где решение (± 1) принимается случайно. Для помехи, ограниченной средней мощностью, алгоритм приема сигналов с оптимизированным Δ^* -слоем эффективен при малой базе сигнала и гарантирует помехоустойчивость выше (от 0,41 до 1,38 дБ) приемника Котельникова [10, 11]. Общая постановка и пути решения проблемы передачи данных по каналам с неполно заданными характеристиками рассматривались в [10, 11]. Однако в [10, 11] вопросам помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов с использованием Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и некогерентности преднамеренных помех уделено мало внимания.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. На основе поставленной задачи анализа помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов с использованием Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и некогерентности преднамеренных помех, делаются выводы по применению полученных результатов.

Постановка задачи

Рассмотрим структурную схему односторонней системы передачи данных, функционирующую в условиях преднамеренных помех, (рис. 1, где $x(t)$ и $y(t)$ обозначены передаваемое источником и выдаваемое получателю сообщения, $s(t)$ и $u(t)$ – передаваемые, принимаемые данные; $v(t)$ – преднамеренная помеха; $g(t)$ – гауссовский шум).

Двоичные символы $x \in \{-1, 1\}$ источника данных представляются сигналами $s_1 \in S'(1)$, $s_x = xs_1$ которые передаются по каналу связи, подверженному воздействию аддитивной преднамеренной помехи $v \in S(\sqrt{\delta})$, где δ – отношение максимально допустимой энергии помехи к энергии сигнала и гауссовским шум $g(t)$.

Следует подчеркнуть, что алгоритм формирования сигналов и алгоритм их приема основаны на использовании заранее сформированной эталонной псевдослучайной последовательности $\gamma(t)$ с базой n и некогерентности (по причине практической нереализуемой

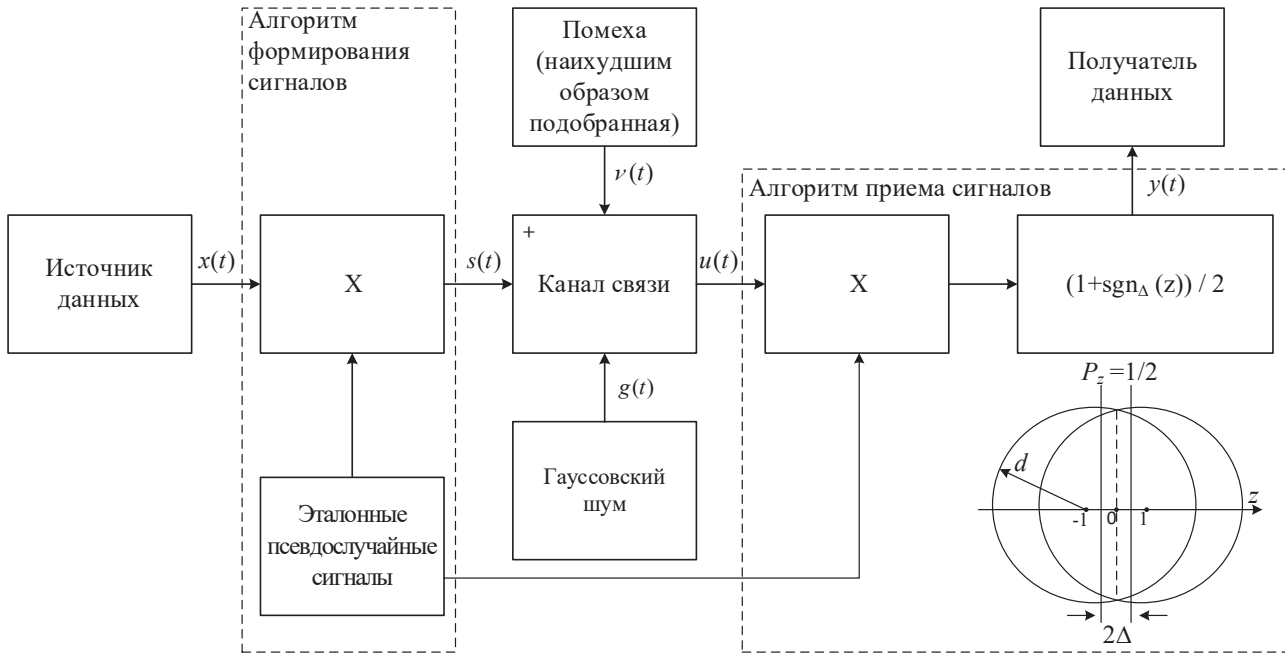


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия элементов в системе передачи данных с источником оптимальных помех и гауссовским шумом

помехи, складываемой с сигналом в точке приема с заданной разностью фаз несущих колебаний) обработки преднамеренной помехи $v(t)$ учитываемой коэффициентом α . При этом приемник использует рандомизированное решающее правило с Δ -слоем неразличимости:

$$P_{\Delta}(u, s) = \frac{1}{2}(1 + \text{sgn}_{\Delta}(z)), \quad (1)$$

$$\text{где } \text{sgn}_{\Delta}(z) = \begin{cases} -1, & \text{if } z \leq -\Delta, \\ 0, & \text{if } -\Delta < z < \Delta, \\ 1, & \text{if } z \geq \Delta. \end{cases}$$

На приемной стороне различение передаваемых символов осуществляется по принятому из канала сигналу $u = \gamma \cdot s_x + \alpha \cdot v + g$ и известному в точке приема эталонно-псевдослучайной последовательности в соответствии с рандомизированным решающим правилом $d: R^n \times S'(1) \rightarrow \{-1, 1\}$, которое формирует решение о переданном символе $y = d(u, s_1)$ и выдает его получателю с учетом Δ -слоя неразличимости. При $\Delta = 0$ алгоритм приема совпадает с приемником Котельникова.

Известно [10, 11], что с позиции воздействия на систему передачи данных стратегия источника оптимальных помех определяется лишь функцией F_D , распределяющей между сигналами имеющуюся среднюю мощность.

Поэтому зависимость максимальной вероятности ошибки на бит в классе помех с ограниченной средней мощностью, определяется усреднением величины $P[D, n, \Delta]$ по наихудшему допустимому распределению F_D :

$$P^-(\delta, n, \Delta) = \sup_{F_D} P[D, n, \Delta]. \quad (2)$$

Как следствие из всего вышеизложенного для показателя $P^-(\delta, n, \Delta)$ можно сформулировать оптимизационную задачу [1]:

$$P^-(\delta, n, \Delta) \rightarrow \min_{\Delta}, \quad (3)$$

решение которой определяет оптимальное значение Δ^* -слоя неразличимости

$$F_D = \arg \max_{F_D} P[D, n, \Delta],$$

оптимальную стратегию постановки некогерентной помехи, а также минимально достижимое значение вероятности ошибки приема данных, гарантированно рассматриваемой системой передачи данных $P^-[D, n, \Delta^*]$.

Решение поставленной задачи

Для решения поставленной задачи был модифицирован [10, 11] и реализован вычислительный эксперимент, посредством добавления в модель влияние воздействия некогерентной составляющей (α) и аддитивной составляющей гауссовского шума ($g(t)$).

Параметры моделирования:

- 10^5 независимых испытаний;
- диапазон варьирования отношения помеха/сигнал для фазоманипулированных сигналов ($n=1$) $\delta \in [0, 2]$ с шагом 0,04, для амплитудно-фазоманипулированных ($n=2$) $\delta \in [0, 4]$ с шагом 0,08;
- критические значения Δ -слоя для $n=1$: $\Delta\{0; 0,1716; 0,3\}$, $n=2$: $\Delta\{0; 0,2584; 0,5\}$.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи (отсутствие гауссовского шума, когерентность помехи ($\alpha = 1$)) показаны в таблице 1, 2 и рисунке 2а.

Из таблиц 1, 2 и рисунка 2а видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1,38 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,41 дБ, что соответствует ранее полученным результатам [10].

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи и наличия гауссовского шума (при когерентности помехи ($\alpha = 1$)) показаны в таблице 3, 4 и рисунке 2б.

Из таблиц 3, 4 и рисунка 2б видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,17 дБ.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи, и наличия некогерентности в её фазовой составляющей ($\alpha = 0,9$), и отсутствии гауссовского шума показаны в таблице 5, 6 и рисунке 2в. Из таблиц 5, 6 и рисунка 2в видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1,3 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,32 дБ. Однако, при незначительном увеличении коэффициента некогерентности (уменьшение коэффициента α) выигрыш значительно уменьшается.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи и наличия некогерентности в её фазовой составляющей ($\alpha = 0,9$), а так же наличие гауссовского шума показаны в таблице 7, 8 и рисунке 2г. Из таблиц 7, 8 и рисунка 2г видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 0,7 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,22 дБ. Однако, при незначительном увеличении коэффициента некогерентности (уменьшение коэффициента α) и увеличение гауссовского шума выигрыш резко уменьшается.

Обобщенный анализ вычислительного эксперимента удобно представить в виде таблицы 9.

Таблица 1.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях оптимальных помех

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0	0,251	0,5	0,499	0,499	0,5	0,5
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0	0	0,251	0,25	0,252	0,5	0,5	0,499	0,5
$\Delta = 0,3$	0	0	0	0,248	0,249	0,249	0,253	0,249	0,25	0,498	0,499

Таблица 2.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях оптимальных помех

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0	0,132	0,209	0,253	0,277	0,296	0,312	0,321	0,333
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,094	0,131	0,166	0,24	0,269	0,292	0,308	0,319	0,333
$\Delta = 0,5$	0	0,105	0,155	0,177	0,185	0,194	0,237	0,278	0,299	0,311	0,323

Таблица 3.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0,007	0,072	0,248	0,416	0,485	0,498	0,499	0,499
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,006	0,074	0,188	0,249	0,304	0,383	0,453	0,491	0,496
$\Delta = 0,5$	0	0,002	0,064	0,193	0,243	0,249	0,257	0,281	0,342	0,414	0,47

Таблица 4.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0,014	0,121	0,204	0,25	0,276	0,298	0,309	0,322	0,329
$\Delta^* = 0,2584$	0	0,008	0,09	0,13	0,177	0,231	0,267	0,291	0,304	0,321	0,331
$\Delta = 0,5$	0	0,098	0,155	0,173	0,187	0,201	0,236	0,27	0,295	0,313	0,324

Таблица 5.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0	0	0	0,499	0,499	0,5	0,499
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0	0	0	0,252	0,249	0,248	0,251	0,499	0,499
$\Delta = 0,3$	0	0	0	0	0,251	0,251	0,251	0,249	0,249	0,248	0,249

Таблица 6.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0,157	0,212	0,245	0,268	0,285	0,3	0,313
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,063	0,114	0,137	0,174	0,231	0,261	0,281	0,298	0,309
$\Delta = 0,5$	0	0,079	0,143	0,166	0,178	0,187	0,192	0,212	0,259	0,282	0,278

Таблица 7.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0,001	0,013	0,077	0,222	0,371	0,461	0,488	0,5
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0,001	0,024	0,103	0,191	0,242	0,284	0,343	0,409	0,462
$\Delta = 0,3$	0	0	0,024	0,123	0,211	0,245	0,248	0,252	0,265	0,293	0,347

Таблица 8.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0,002	0,05	0,147	0,208	0,243	0,268	0,286	0,3	0,312
$\Delta^* = 0,2584$	0	0,002	0,057	0,111	0,142	0,181	0,226	0,257	0,281	0,296	0,308
$\Delta = 0,5$	0	0,071	0,142	0,166	0,178	0,187	0,189	0,221	0,252	0,279	0,297

Таблица 9.

Обобщенный анализ вычислительного эксперимента

Параметр	$n = 1$				$n = 2$			
	а)	б)	в)	г)	а)	б)	в)	г)
Оптимальный Δ^*	0,1716				0,2584			
Выигрыш (дБ)	1,38	1	1,3	0,7	0,41	0,17	0,32	0,22
Уменьшение $P^*(\%)$	28	22	26	7	8	4	7	5

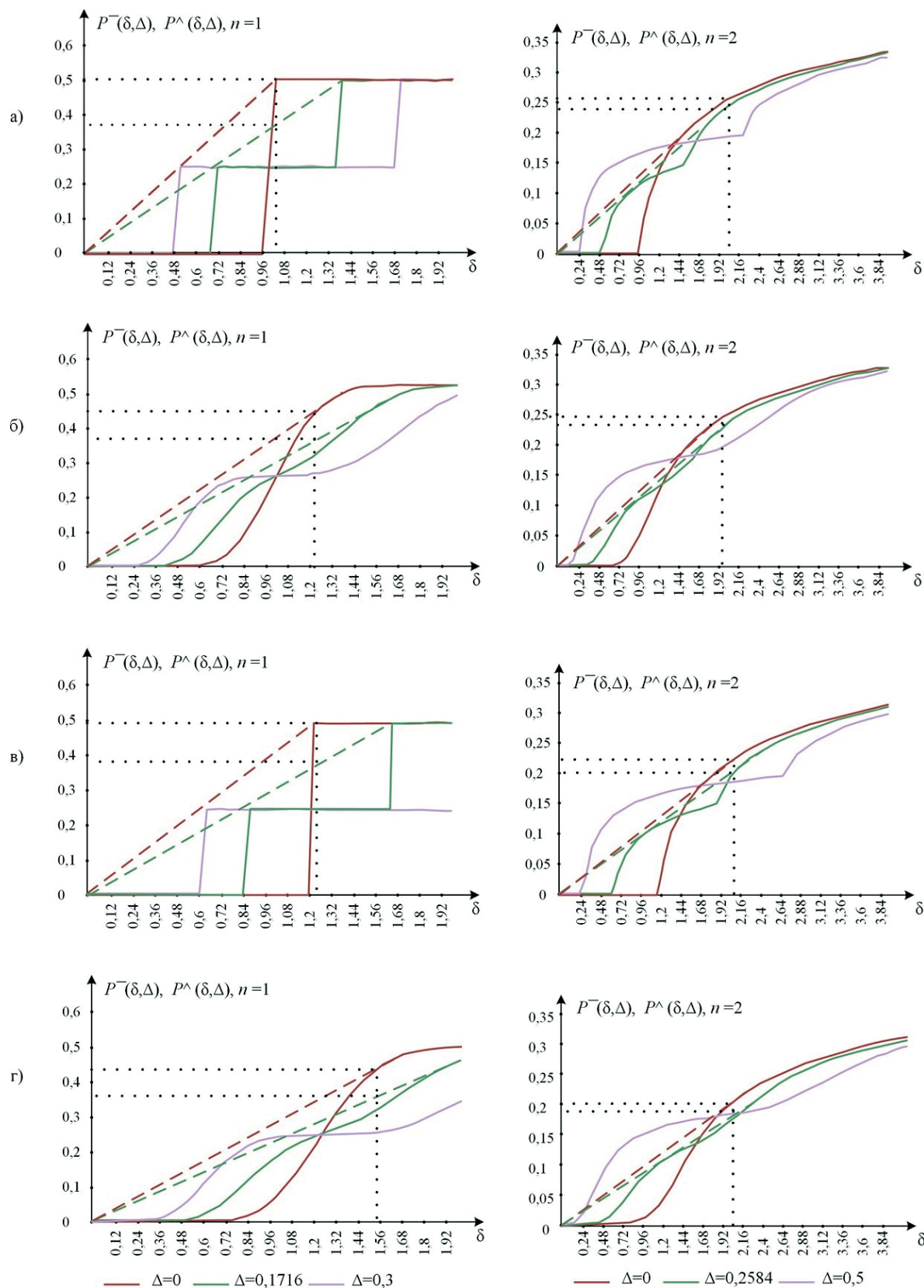


Рис. 2. Графики зависимостей $P^-(\delta, \Delta)$ и их выпуклых оболочек $P^+(\delta, \Delta)$

а: в условиях преднамеренных помех; б: в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума;

в: в условиях некогерентности преднамеренных помех;

г: в условиях некогерентности преднамеренных помех и гауссовского шума.

Заключение

Полученные результаты анализа (табл. 9) позволили оценить эффективность применения Δ -слоя неразличимости для повышения помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов в условиях некогерентности преднамеренных помех и гауссовского шума. При этом, следует отметить, что наличие некогерентной составляющей в пред-

намеренной помехе приводит к снижению выигрыша (при $n = 1$ с 28 % до 7 %, а при $n = 2$ с 8 % до 5 %) использования в алгоритме приема Δ^* -слоя неразличимости.

Данные результаты показывают возможность получения выигрыша в помехоустойчивости к преднамеренным помехам при проектировании новых поколений систем связи, способных эффективно функционировать в сложной радиоэлектронной обстановке.

Литература

1. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем / А.М. Чуднов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Буденного Министерства обороны Российской Федерации, 2021. – 193 с.
2. Чуднов А. М., Положинцев Б. И., Кичко Я. В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 12. – С. 33-47. – DOI 10.18127/j00338486-202212-03.
3. Chudnov A. M., Kichko Ya. V., Sapunova L. P. Optimization of the guaranteed rate of information transmission by pseudo-random signals with a randomized base under conditions of deliberate interference // Radio engineering and electronics. – 2023. – V. 68. № 3. – P. 263–270. DOI: 10.31857/S0033849423030051
4. Чуднов А. М., Кичко Я. В., Сапунова Л. П. Оптимизация гарантированной скорости передачи информации псевдослучайными сигналами с рандомизированной базой в условиях преднамеренных помех // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 3. С. 263–270.
5. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend FDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 457–461. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3224381.
6. Чуднов А. М. Комментарии к статье Н. Н. Плотникова, А. В. Войнова и А. Н. Путилина «Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолнии тропосферной связи» // 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.
7. Одоевский С. М., Султанов Р. С., Ключников В. О. Оценка помехоустойчивости беспроводных линий связи с адаптивной модуляцией в условиях оптимизированных помех // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5 томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 238-247.
8. 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 Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 243–252. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-243-244.
9. 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. – P. 41–55. – DOI: 10.1134/S0032946025010041.
10. 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. – DOI: 10.31857/S0555292325010048.

ANALYSIS OF THE NOISE IMMUNITY OF BINARY PSEUDORANDOM SIGNAL RECEPTION USING A Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY UNDER GAUSSIAN NOISE AND INCOHERENT INTENTIONAL INTERFERENCE

Sazonov V. V.⁴, Neguritsa A. O.⁵

Keywords: optimal interference, class of interferences with constrained average power, processing gain, signal-to-noise ratio (SNR), energy gain, data transmission system, randomized signal reception algorithm, Kotelnikov's receiver.

Abstract

The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of a randomized decision rule with a Δ -layer of indistinguishability for the noise-resistant reception of binary pseudorandom signals in a channel with incoherent intentional interference and Gaussian noise.

Research method: game-theoretic approach, analytical modeling, optimization methods, geometric and comparative analysis, statistical data processing.

Results of the study: for signals with a processing gain of $n \leq 2$, the use of a randomized decision rule with an optimally selected Δ^* -layer of indistinguishability ensures an increase in the guaranteed noise immunity of signal reception within the class of interferences that include an incoherent component with limited average power and gaussian noise, in comparison to the Kotelnikov's receiver. The application of a randomized decision rule with a Δ -indistinguishability layer in receiver modems of military data transmission systems will increase their noise immunity.

Scientific novelty: new analytical expressions have been derived, allowing the evaluation of an energy gain of up to 1.38 dB through the use of a Δ -layer of indistinguishability in the presence of Gaussian noise and incoherent intentional interference.

References

1. Chudnov A. M. Matematicheskie osnovy modelirovaniya, analiza i sinteza sistem / A. M. Chudnov. – Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Voennaya akademiya svyazi imeni marshala Sovetskogo Sojuz S. M. Budennogo Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii, 2021. – 193 s.
2. Chudnov A. M., Polozhincev B.I., Kichko Ja.V. Analiz pomehozashchishchennosti obmena dannymi gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh optimizirovannykh pomekh // Radiotekhnika. – 2022. – T. 86, № 12. – S. 33–47. – DOI 10.18127/j00338486-202212-03.
3. Chudnov A. M., Kichko Ya. V., Sapunova L. P. Optimization of the guaranteed rate of information transmission by pseudo-random signals with a randomized base under conditions of deliberate interference // Radio engineering and electronics. – 2023. – V. 68. № 3. – P. 263–270. DOI: 10.31857/S0033849423030051.
4. Chudnov A. M., Kichko Ja. V., Sapunova L. P. Optimizatsiya garantirovannoy skorosti peredachi informatsii psevdosluchajnymi signalami s randomizirovannoy bazoy v usloviyakh prednamerennykh pomekh // Radiotekhnika i jelektronika. 2023. T. 68. №3. S. 263–270.
5. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend FDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 457–461. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3224381.
6. Chudnov A. M. Kommentarii k stat'e N. N. Plotnikova, A. V. Vojnova i A. N. Putilina «Vybor algoritma adaptatsii po rabochej chastote v odnopolosnoj radiolinii troposfernoj svyazi» // Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. – 2024. – № 11-12(197-198). – S. 20–30. – DOI: 10.53816/23061456_2024_11-12_20.

⁴ Viktor V. Sazonov, Ph.D. (in Tech.), Associate Professor, Doctoral Student of the Military Academy of Communications, Saint Petersburg, Russia. E-mail: vmktor-sazonov@yandex.ru

⁵ Anastasia O. Neguritsa, Adjunct officer of the Military Academy of Communications, Saint Petersburg, Russia. E-mail: LadyN98@yandex.ru

7. Odoevskij S. M., Sultanov R. S., Kljuchnikov V. O. Ocenka pomehoustojchivosti besprovodnyh linij svjazi s adaptivnoj moduljaciej v uslovijah optimizirovannyh pomeh // Radiolokacija, navigacija, svjaz': Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. V 5 tomah, Voronezh, 16–18 aprelja 2024 goda. – Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2024. – S. 238–247.
8. 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 Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2025. – № 2. – S. 243–252. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-243-244.
9. 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. – P. 41–55. – DOI 10.1134/S0032946025010041.
10. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimizacija oblasti nerazlichimosti priemnikom dvoichnyh signalov, peredavaemyh po kanalu s prednamerЕННОj pomehoj // Problemy peredachi informacii. – 2025. – T. 61, № 1. – S. 47–59. – DOI: 10.31857/S0555292325010048.

