

УДК 621.391

DOI: 10.37468/2307-1400-2022-4-83-90

## ОБРАБОТКА ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ НЕИЗВЕСТНОЙ СТРУКТУРЫ

*Биккенин Рафаэль Рифгатович*<sup>1</sup>  
*Макаров Игорь Викторович*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военно-учебный научный центр Военно-морская академия, Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Показана роль и значение современных систем связи в обеспечении национальной безопасности Российской Федерации, в том числе в условиях проведения специальной военной операции по защите населения Донбасса. Названы основные требования, которым должна удовлетворять современная связь в повседневных условиях и при ведении боевых действий. Рассмотрено перспективное направление совершенствования систем связи военного назначения.

Предложена процедура некогерентного приема псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией, при воздействии помехи с неизвестной структурой. Найдена граница вероятности ошибки на основе неравенства Чернова, позволяющая оценить помехоустойчивость приема в условиях действия помех с неизвестной структурой.

Показано, что в сложной помеховой обстановке, когда помеха имеет энергетическое превосходство над сигналом, возможно обеспечить необходимую достоверность приема передаваемой полезной информации. Указана перспектива применения полученных результатов в теории и практике совершенствования систем передачи информации в силовых структурах.

**Ключевые слова:** сигнал с расширенным спектром, псевдослучайный сигнал, демодуляция, помеха с неизвестной структурой, граница вероятности ошибки.

## PROCESSING OF PSEUDORANDOM SIGNALS UNDER CONDITIONS OF INTERFERENCE OF UNKNOWN STRUCTURE

*Bikkenin Rafael R.*<sup>1</sup>  
*Makarov Igor V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Military training scientific center of Naval Academy, St. Petersburg, Russia

### ABSTRACT

The role and importance of modern communication systems in ensuring the national security of the Russian Federation, including in the conditions of a special military operation to protect the population of Donbass, is shown. The main requirements that modern communications must meet in everyday conditions and in the conduct of hostilities are named. The perspective direction of improvement of military communication systems is considered.

A procedure for incoherent reception of pseudorandom signals with differential phase shift keying, when exposed to interference with an unknown structure, is proposed. The error probability bound based on Chernov's inequality is found, which allows us to estimate the noise immunity of reception under conditions of interference with an unknown structure.

It is shown that in a complex interference situation, when the interference has an energy superiority over the signal, it is possible to ensure the necessary reliability of receiving the transmitted useful information. The prospect of applying the results obtained in the theory and practice of improving information transmission systems in power structures is indicated.

**Keywords:** the spread spectrum signal, pseudo-random signal, demodulation, interference with an unknown structure, error probability bound.

### Введение

События в современном мире продолжают развиваться по негативному сценарию, они переросли в системный кризис в разных сферах,

заявил Президент Владимир Путин на пленарном заседании XIX ежегодного форума Международного дискуссионного клуба «Валдай», который состоялся 27 октября 2022 г. Президент сказал

также о серьёзных, больших сдвигах, которые уже произошли и происходят в мире, о тех рисках, которые связаны с деградацией мировых институтов, с размыванием принципов коллективной безопасности [1].

Развал Советского Союза разрушил и равновесие геополитических сил. Запад почувствовал себя победителем и провозгласил однополярное мироустройство, в котором только его воля, его культура, его интересы имели право на существование. В сложившихся условиях, учитывая опыт окончания «Холодной войны», современное развитие России требует особого внимания к вопросам обеспечения национальной безопасности.

Систему национальной безопасности России образует функциональные элементы, взаимосвязь которых формируют единую системную целостность. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 года № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» основными силами обеспечения национальной безопасности являются Вооруженные Силы РФ, Федеральная служба войск национальной гвардии Российской Федерации (Росгвардия) и другие органы, в которых Федеральным законодательством предусмотрена военная и (или) правоохранительная служба, а также Федеральные органы государственной власти, принимающие участие в обеспечении национальной безопасности государства на основании законодательства РФ [2].

Положениями Указа № 400 от 2021 г. определено, что одним из средств обеспечения национальной безопасности страны являются технологии, а также технические, программные, лингвистические, правовые, организационные средства, включая телекоммуникационные каналы, используемые в системе обеспечения национальной безопасности для сбора, формирования, обработки, передачи или приема информации о состоянии национальной безопасности и мерах по ее укреплению [2].

Связь (телекоммуникации) уже много десятилетий является одной из важнейших компонент

Вооруженных Сил. В период всех войн XX-го столетия и особенно во время Второй Мировой войны тот, кто мог обеспечить лучший информационный обмен между штабами, частями и подразделениями, получал огромное преимущество. Из средств массовой информации известно, что на фоне проходящей с 24 февраля 2022 г. Специальной военной операции участники и военные эксперты говорят об одной из проблем Российской Армии, а именно – о недостаточном ее оснащении средствами защищенной связи и отсутствии четкого и слаженного взаимодействия между различными подразделениями, участвующими в боевых действиях. Современные средства связи в армии есть, но их пока недостаточно и применяются они не всегда эффективно.

Связь, как известно, является основой управления Вооруженными Силами. Она должна быть всегда устойчивой, безопасной и своевременной. Не будет связи – не будет вовремя принятых решений, не будет выполненных приказов, не будут успешными боевые действия. Поэтому создание и широкомасштабное применение новых технических средств и систем связи, будет существенным образом способствовать решению стратегически важной для Вооруженных Сил РФ проблемы оснащения их новейшими информационно-коммуникационными системами на современном этапе развития.

В данной работе, направленной на совершенствование технических средств связи, рассмотрен один из вариантов решения проблемы обеспечения устойчивости связи – защиты каналов связи в процессе передачи информации. Предложена процедура обработки псевдослучайных сигналов при воздействии помех с неизвестной структурой и произведена оценка ее эффективности.

#### Методы исследования

В современных условиях в ряде систем связи (телекоммуникаций) находят применение сигналы с расширенным спектром (spread-spectrum, SS), называемые также шумоподобными или псевдослучайными [3-7]. В частности, в системах семейства стандартов IEEE 802.11

реализован метод расширения на основе «прямой последовательности» (direct sequencing, DS) при использовании кодов Баркера. В других системах телекоммуникаций применяют псевдослучайные последовательности (ПСП), формируемые с помощью M-последовательностей, кодов Гоулда и др.

Как известно, системы с расширенным спектром способны обеспечивать разделение сигналов по форме и структуре, что успешно реализуется в сотовой связи на основе стандартов CDMA (Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением), где допускается одновременное функционирование множества абонентов в общей полосе частот [4-7].

Кроме этого, системы с шумоподобными сигналами обладают повышенной скрытностью передачи и высокой помехоустойчивостью при воздействии сосредоточенных по спектру помех, когда их энергетика превышает сигнал.

В настоящей работе в развитие результатов [8] рассмотрена некогерентная обработка псевдослучайных сигналов, реализованных посредством фазовых методов модуляции, в частности относительной фазовой модуляции (ОФМ), в иностранной литературе, называемой дифференциальной фазовой модуляцией (differential phase shift keying) [4,5,7]. Предполагается, что помеха превосходит сигнал по мощности, но структура ее неизвестна. Для этого случая получена оценка вероятности ошибочного приема псевдослучайных сигналов с расширенным спектром.

#### Сигнал, помеха, процедура обработки

Предположим, что источник сообщений выдает двоичные символы

$$x \in \{0,1\}, \quad (P\{x_i = 0\} = P\{x_i = 1\} = 0,5), \quad i = 1, 2, \dots,$$

которые задаются на интервале  $t \in [0, T_0]$ . Далее эти символы с помощью псевдослучайной последовательности  $\gamma$  ( $\gamma_k \in \{0,1\}$ ,  $k = \overline{1, n}$  – элементы ПСП длительности  $T = T_0/n$ ) преобразуются в сигналы вида

$$S(t) = U_c \sum_{k=1}^n \pi_k(t) \text{rect}(t - (k-1)T) \cos(\omega t + \varphi_c), \quad (1)$$

где  $\text{rect}(t - (k-1)T)$  – единичный импульс длительности  $T = T_0/n$ , который определяет временной интервал каждого очередного элемента сложного псевдослучайного с относительной фазовой модуляцией (ПС-ОФМ) сигнала,

$$\pi_k(t) = \begin{cases} (-1)^{\varepsilon_k}, & t \in [(k-1)T, kT], \quad k = \overline{1, n}, \\ 0, & \text{при других } t, \end{cases}$$

$\varepsilon_k \in \{0,1\}$  – величина, связанная с  $k$ -м элементом ПСП по правилу перекодирования ОФМ  $\varepsilon_k = \varepsilon_{k-1} \oplus \gamma_{k1}$  (знак « $\oplus$ » означает сложение по модулю два);  $T_0$  – длительность ПС-ОФМ сигнала.

Считаем, что на входе устройства обработки (демодулятора) действует помеха, о которой отсутствует полная информация: неизвестна ее структура и плотность распределения  $\omega(\xi)$ . Но при этом предполагаем, что имеется априорная информация о ее энергетических параметрах.

Будем полагать, что такая помеха с неизвестным распределением выбирается в классе распределений с ограниченной дисперсией [10]:

$$D = \left\{ \omega(\xi) : \int_{-\infty}^{\infty} \xi^2 \omega(\xi) d\xi = \sigma^2(\xi) \leq \sigma^2 \right\}, \quad (2)$$

так как любое излучение сигнала на выходе радиопередатчика в реальных условиях имеет ограничение по мощности.

Для названного класса распределений выполнены условия симметрии плотности распределения  $\omega(\xi) = \omega(-\xi)$  и нормировки  $\int_{-\infty}^{\infty} \omega(\xi) d\xi = 1$  и, кроме того, плотность распределения имеет только положительные значения  $\omega(\xi) \geq 0$ .

Кроме того полагаем, что

$$\alpha^2 + \hat{\alpha}^2 = \int_{(k-1)T}^{kT} \alpha^2(t) dt + \int_{(k-1)T}^{kT} \hat{\alpha}^2(t) dt \leq E_{\text{п}} \leq 1,$$

где  $\alpha$  и  $\hat{\alpha}$  – случайные величины с неизвестным распределением, являющиеся помехой;  $E_{\text{п}}$  – максимально возможная величина энергии помехи на длительности элемента сложного псевдослучайного сигнала.

Процедуру обработки ПС-ОФМ сигнала представим выражением, являющимся модификацией

взаимокорреляционного некогерентного демодулятора с учетом элементов свертки сигнала

$$\text{sign } \lambda = \text{sign} \left[ \sum_{k=1}^n (-1)^{Y_k} (X_k X_{k-1} + Y_k Y_{k-1}) \right], \quad (3)$$

где  $\text{sign } \lambda$  означает определение знака выходной статистики  $\lambda$ , при этом, если  $\lambda > 0$ , регистрируется информационный символ  $x_i = 1, i = 1, 2, \dots$ ;

$$X_{k-1} = \int_{(k-1)T}^{kT} Z(t) \cos \omega t dt, \quad X_{k-1} = \int_{kT}^{(k+1)T} Z(t) \cos \omega t dt,$$

$$Y_{k-1} = \int_{(k-1)T}^{kT} Z(t) \sin \omega t dt, \quad Y_{k-1} = \int_{kT}^{(k+1)T} Z(t) \sin \omega t dt,$$

$Z(t)$  – аддитивная смесь сигнала и помехи на  $(k-1)$ -ми  $k$ -м интервалах.

Оценка вероятности ошибки подробнее рассмотрим выражение (3) с учетом (1) и условий, наложенных на помеху. После подстановки квадратурные компоненты принимают вид

$$X_k = (-1)^{E_k} \sqrt{q} \cos \varphi_{\bar{n}} + \alpha,$$

$$Y_k = (-1)^{E_k} \sqrt{q} \sin \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha},$$

$$X_{k-\bar{n}} = (-1)^{E_{k-1}} \sqrt{q} \cos \varphi_{\bar{n}} + \alpha,$$

$$Y_{k-\bar{n}} = (-1)^{E_{k-1}} \sqrt{q} \sin \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha},$$

где  $q$  – отношение мощностей сигнала и помехи.

Произведя подстановку этих компонентов в (3), получим

$$\lambda = \sum_{k=1}^n (-1)^{Y_k} \left[ (-1)^{E_k} \sqrt{q} \cos \varphi_{\bar{n}} + \alpha \right] \left[ (-1)^{E_{k-1}} \sqrt{q} \cos \varphi_{\bar{n}} + \alpha \right] +$$

$$+ \left[ (-1)^{E_k} \sqrt{q} \sin \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha} \right] \left[ (-1)^{E_{k-1}} \sqrt{q} \sin \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha} \right] = qn + \sum_{k=1}^n Z_k,$$

где  $Z_k = \sqrt{q} (\alpha \cos \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha} \sin \varphi_{\bar{n}}) (a_k + b_k) + a_k b_k (\alpha^2 + \hat{\alpha}^2)$ ,

$$a_k = (-1)^{E_k}, \quad b_k = (-1)^{E_{k-1}},$$

$$Z_k = \begin{cases} 2\sqrt{q} (\alpha \cos \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha} \sin \varphi_{\bar{n}}) + \alpha^2 + \hat{\alpha}^2, & a_k = b_k = 1, \\ -2\sqrt{q} (\alpha \cos \varphi_{\bar{n}} + \hat{\alpha} \sin \varphi_{\bar{n}}) + \alpha^2 + \hat{\alpha}^2, & a_k = b_k = -1, \\ -(\alpha^2 + \hat{\alpha}^2), & a_k \neq b_k = 1, \\ -(\alpha^2 + \hat{\alpha}^2), & a_k \neq b_k = -1. \end{cases}$$

Вероятность ошибки при передаче символа «0»

$$P_{\text{ош}} = P\{\lambda < 0\} = P\left\{ \sum_{k=1}^n Z_k < -qn \right\} = \int_{-qn}^{\infty} \omega(z) dz.$$

Однако в рассматриваемом случае нахождение точного выражения для вероятности ошибочного приема является сложной задачей, поскольку плотность распределения  $\omega(z)$  величины  $Z = \sum_{k=1}^n Z_k$  может быть неизвестна. Поэтому имеет смысл найти верхнюю граничную оценки вероятности

ошибки. Для этого удобно воспользоваться неравенством Чернова [11, 12], которое в данном случае имеет вид:

$$P_{\text{ош}} = P\left\{ \sum_{k=1}^n Z_k < -qn \right\} < \left( M\{e^{t(Z+qn)}\} \right)^n, \quad (4)$$

где  $t < 0$  – параметр, по которому проводится оптимизация выражения (4), при этом  $t$  является решением уравнения

$$M\{ze^{tz}\} / M\{e^{tz}\} = -q.$$

Воспользуемся известным математическим выражением

$$A \sin(\varphi_c + \theta) = \alpha \cos \varphi_c + \hat{\alpha} \sin \varphi_c,$$

где  $A = \sqrt{\alpha^2 + \hat{\alpha}^2}$ ,  $tg \theta = \alpha / \hat{\alpha}$ .

Тогда после подстановки значений  $z$  с учетом ограниченности энергии помехи имеем

$$P_{\text{ош}} \leq \left[ \frac{1}{4} e^{t(2\sqrt{q}A \sin(\varphi_c + \theta) + q + 1)} + \frac{1}{4} e^{t(-2\sqrt{q}A \sin(\varphi_c + \theta) + q + 1)} + \frac{1}{2} e^{t(q-1)} \right]^n. \quad (5)$$

Для нахождения окончательного выражения для оценки вероятности ошибки произведем усреднение (5) по значениям фаз сигнала и помехи. При этом удобно применить метод моментных пространств [11, 12]. В его основе лежит теорема, которая позволяет в отдельных случаях упростить сложные аналитические преобразования путем использования наглядных геометрических представлений.

Теорема [13]. Пусть  $z$  – случайная величина с функцией распределения вероятностей  $G_z(z)$  определена на конечном интервале  $I = [a, b]$ , где также заданы две непрерывные функции  $k_1(z)$  и  $k_2(z)$ . Тогда обобщенным моментом случайной величины  $z$ , который индуцирован функцией  $k_1(z)$ , называется значение

$$m_i = M\{k_i(z)\} = \int_a^b k_i(z) dG_z(z), \quad i = 1, 2.$$

В этом случае моментным пространством  $M$  в двумерном пространстве Евклида  $R_2$  будет называться замкнутое, ограниченное и выпуклое множество векторов

$$M = \left\{ m = (m_1, m_2) \in R_2 \mid m_i = \int_a^b k_i(z) dG_z(z), \quad i = 1, 2 \right\}.$$

Пусть  $L$  – кривая  $r = (r_1, r_2)$  в пространстве  $R_2$ , задаваемая в виде  $r_1 = k_1(z)$ ,  $z \in L$ , а  $C$  – выпуклая оболочка кривой  $L$ . В таком случае эта оболочка совпадает с моментным пространством  $L = M$ .

Известно [12], что множество  $M$  в пространстве Евклида  $R_2$  принято называть выпуклым, если для величин  $a \in M$  и  $b \in M$  следует, что  $\rho^a + (1-\rho)b$ , где  $0 < \rho < 1$ . Оболочка  $C$  также называется выпуклой, так как содержит в себе кривую  $L$  и включается во все другие выпуклые области пространства  $R_2$ , Содержащие  $L$ .

Теорема [13] позволяет относительно легко определять границы для момента  $m_2 = M\{k_2(z)\}$ , непосредственное вычисление которого связано с преодолением значительных сложностей. Для этого достаточно просто должен определяться другой момент  $m_1 = M\{k_1(z)\}$ . В качестве функций, для которых нетрудно вычислить  $m_1 = M\{k_1(z)\}$  могут быть выбраны  $|z|$ ,  $z^m$ ,  $m = 2, 3, \dots$ ,  $\exp(rz)$  и некоторые другие. Имея информацию о конкретных значениях функции  $k_1(z)$  несложно построить выпуклую оболочку на интервале  $I = [a, b]$ . Затем можно определить верхнюю и нижнюю границы  $M\{k_2(z)\}$  как точку пересечения оболочки некоторой вертикальной прямой, проходящей через известное значение  $m_1$ .

Пусть  $z = 2\sqrt{q} \cos(\varphi_c + \theta)$  и рассмотрим моменты  $M\{k_1(z)\} = M\{z\}$ ,  $M\{k_2(z)\} = M\{e^z\}$ . Построим выпуклую оболочку, которая в соответствии с приведенной выше теоремой совпадает с моментным пространством.

Из рис. 1 видно, нижняя граница выпуклой оболочки совпадает с моментом  $M\{k_2(z)\}$ , а верхняя граница – прямая линия, проходящая через две известные точки и которую можно задать следующим выражением:

$$\frac{M\{k_1(z)\} + 2\sqrt{q}}{4\sqrt{q}} = \frac{M\{k_2(z)\} - \exp(-2\sqrt{q})}{\exp(2\sqrt{q}) - \exp(-2\sqrt{q})}. \quad (6)$$

В (6)  $M\{k_1(z)\} = M\{2\sqrt{q} \cos(\varphi_c + \theta)\} = 0$ , поскольку фаза  $(\varphi_c + \theta) = 0$  является равномерно распределенной на интервале  $[0, 2\pi]$ . Следовательно верхняя граница момента  $M\{k_2(z)\} = M\{\exp[2\sqrt{q} \cos(\varphi_c + \theta)]\}$  найдется как решение уравнения (6) для точки пересечения прямой линии с осью координат (рис. 1).

Таким образом, получим

$$M\{k_2(z)\} \leq \frac{\exp(4\sqrt{q}) + 1}{2\exp(2\sqrt{q})}. \quad (7)$$

Дальнейшее упрощение (7) возможно при двух условиях. Во-первых, если  $\sqrt{q} < 0$  и  $\exp(4\sqrt{q}) < 1$ , получим  $M\{k_2(z)\} \leq \exp(-2\sqrt{q})$ , во-вторых – при  $\sqrt{q} > 0$  величина  $\exp(4\sqrt{q}) > 1$ , тогда  $M\{k_2(z)\} \leq 2\sqrt{q}$ . Ясно, что для нахождения верхней оценки следует иметь в виду второе условие.

Наконец, окончательно получим верхнюю граничную оценку для вероятности ошибки

$$P_{\text{ош}} \leq \left[ \frac{1}{4} e^{t(\sqrt{q}+1)} + \frac{1}{4} e^{-t(\sqrt{q}-1)} + \frac{1}{2} e^{t(q-1)} \right]^n. \quad (8)$$

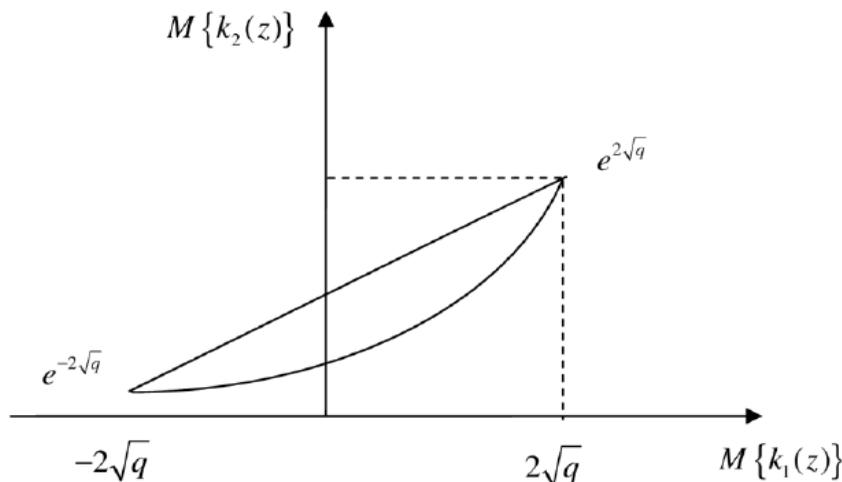


Рисунок 1 – Выпуклая оболочка

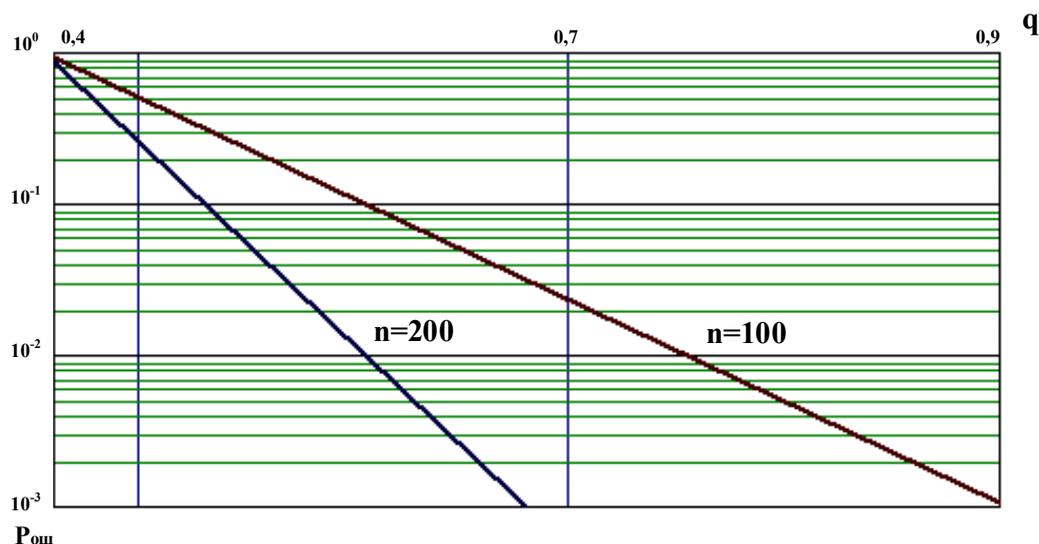


Рисунок 2 – Верхняя граница (неравенство Чернова) вероятности ошибочного приема псевдослучайных сигналов

Ценность выражения (8) заключается в его математической строгости в условиях недостаточности априорных сведений о законах распределения помехи и ее структуре. При выполнении вычислений необходимо проведение оптимизации по параметру  $t$ .

#### Обсуждение результатов

Результаты численных расчетов помехоустойчивости (неравенство Чернова) псевдослучайных сигналов по найденному выражению (8) на основе программного продукта Mathcad 15 с учетом оптимизации по параметру  $t$  в виде графических зависимостей  $P_{ош}$  от величины отношения сигнал/помеха представлены на рис. 2.

Следовательно, путем выбора базы сложных псевдослучайных сигналов, с учетом реальных пределов величин отношения сигнал/помеха, меньших единицы, при помехах, превосходящих сигналы по мощности, можно обеспечить необходимую достоверность доставки сообщений получателю. При этом действительная вероятность ошибки при обработке названных сигналов не превысит значений, вытекающих из статистического неравенства Чернова. Это неравенство математически строго определяет верхнюю граничную оценку помехоустойчивости псевдослучайных сигналов, обрабатываемых при действии организованных помех с ограниченным энергетическим ресурсом, но с неизвестной абоненту

системы передачи сообщений структурой. В этом заключается его ценность для теории и практики систем передачи цифровой информации, создаваемых в интересах силовых ведомств, обеспечивающих национальную безопасность Российской Федерации.

При практической реализации задач проектирования систем передачи и обработки информации для силовых структур можно руководствоваться полученной в работе граничной оценкой. В этом случае создаваемые системы, с использованием псевдослучайных сигналов будут способны обеспечивать скрытность передачи информации и ее реальную помехоустойчивость, не хуже заданных в технических требованиях заказчика к поставляемому изделию.

#### Список литературы

1. Заседание Международного дискуссионного клуба «Валдай» 27 октября 2022 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/statements/66975> (дата обращения 26.10.2022).
2. Указ Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 года № 400 «О Стратегии национальной безопасности в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046> (дата обращения 26.10.2022).

3. Диксон Р. К. Широкополосные системы. – М.: Связь, 1979. – 304 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
5. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
6. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
7. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
8. Биккенин Р.Р., Андрюков А.А. Подавление ответных (ретранслированных) помех при обработке псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляции // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 27–32.
9. Биккенин Р.Р., Андрюков А.А. Адаптивный демодулятор псевдослучайных сигналов для беспилотного летательного аппарата, эффективный в условиях помех, похожих на сигнал // Информация и Космос. – 2018. – № 1. – С. 20–24.
10. Цыпкин Я.В. Основы информационной теории оценивания. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
11. Возенкрафт Дж. Джекобс Н. Теоретические основы техники связи. – М.: Мир, 1969. – 640 с.
12. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
13. Kung Yao. Quadnatic – Exponential Moment Error Bounds for Digital Communications Systems // Journal of the Frankline Institute. – 1980. Vol. 310. – № 6. – P. 365–371.
14. Meeting of the Valdai International Discussion Club, October 27, 2022 [Electronic resource]. – <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/statements/66975> (date of access 26.10.2022 ).
15. Decree of the President of the Russian Federation of July 2, 2021 No. 400 “On the National Security Strategy in the Russian Federation” [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046> (date of access 26.10.2022).
16. Dikson R.K. Wideband systems M.: Svyaz', 1979. – 304 p.
17. Sklyar B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2003. – 1104 p.
18. Prokis Dzh. Digital communications. – M.: Radio i svyaz', 2000. – 800 p.
19. Ipatov V.P. Broadband systems and code division of signals. Principles and Applications. – M.: Tekhnosfera, 2007. – 488 p.
20. Goldsmit A. Wireless communications. – M.: Tekhnosfera, 2011. – 904 p.
21. Bikkenin R.R., Andryukov A.A. Suppression of response (retransmitted) interference in the processing of pseudo-random signals with relative phase modulation // Information and Space. – 2016. – № 2. – pp. 27–32.
22. Bikkenin R.R., Andryukov A.A. Adaptive pseudo-random signal demodulator for unmanned aerial vehicle, effective in signal-like interference conditions // Information and Space. – 2018. – No. 1. – pp. 20–24.
23. Cyppkin YA.V. Fundamentals of Information Theory of Evaluation. – M.: Nauka, 1984. – 320 p.
24. Wozencraft J. Jacobs N. Theoretical foundations of communication technology. – M.: Mir, 1969. – 640 p.
25. Korzhik V.I., Fink L.M., Shchelkunov K.N. Calculation of noise immunity of discrete message transmission systems: a handbook. – M.: Radio i svyaz', 1981. – 232 p.
26. Kung Yao. Quadnatic – Exponential Moment Error Bounds for Digital Communications Systems // Journal of the Frankline Institute. – 1980. Vol. 310. – No. 6. – pp. 365–371.

#### References

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2022 г.  
Принята к публикации 26 декабря 2022 г.

**Ссылка для цитирования:** Биккенин Р.Р., Макаров И.В. Обработка псевдослучайных сигналов в условиях помех неизвестной структуры // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 4(40). С. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-4-83-90>

**For citation:** Bikkenin R.R., Makarov I.V. Processing of pseudorandom signals under conditions of interference of unknown structure // National security and strategic planning. 2022. № 4(40). pp. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-4-83-90>

#### **Сведения об авторах:**

**БИККЕНИН РАФАЭЛЬ РИФГАТОВИЧ** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ телекоммуникаций, Военный институт дополнительного профессионального образования, Военно-учебный научный центр Военно-морская академия, г. Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: rafbikkenin@mail.ru

**МАКАРОВ ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры боевого применения средств связи, Военный институт дополнительного профессионального образования, Военно-учебный научный центр Военно-морская академия, г. Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vas7559@yandex.ru

#### **Information about authors:**

**BIKKENIN RAFAEL R.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical Foundations of Telecommunications, Military Institute of Additional Professional Education, Military Educational Research Center Naval Academy, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia  
e-mail: rafbikkenin@mail.ru

**MAKAROV IGOR V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Combat Use of Communications, Military Institute of Additional Professional Education, Military Educational Research Center Naval Academy, St. Petersburg, Russia  
e-mail: vas7559@yandex.ru