ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОДА И РЕЖИМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

А.М. Чуднов[1*], **Д.И. Кирик**[2], **Е.М. Ермакова**[1]

[1]Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: chudnow@yandex.ru

Информация о статье
УДК 621.391.1-503.5

Статья поступила в редакцию 08.10.2019

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация: *Изучаются принципы анализа и оптимизации параметров и режима использования помехоустойчивого кода в системе передачи информации с обратным каналом, функционирующей в условиях воздействия преднамеренных помех, структура которых может подбираться с позиции нарушения (ухудшения) работы системы. Разработана методика оптимизации параметров системы по критерию максимума гарантированной скорости передачи информации для классов помех с ограниченной средней мощностью. Дана оценка выигрыша, обеспечиваемого за счет применения предложенных методов оптимизации структуры канального блока и режима его декодирования.*

Ключевые слова: *система передачи информации, псевдослучайный сигнал, помехоустойчивый код, преднамеренная помеха, помехозащищенность системы.*

I. Введение

Актуальность и тематика работы. Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения надежного и безопасного функционирования систем передачи информации (СПИ) с обратным каналом, функционирующих в условиях воздействия преднамеренных помех. Защита от таких воздействий, структура которых может подбираться с позиций нарушения работы СПИ, должна быть предусмотрена уже на этапе их разработки.

Кроме того, проектирование СПИ из расчета на наихудший случай (наихудшую по структуре помеху в классе помех с ограниченной энергетикой) приобретает исключительную важность в системах и комплексах, в которых должен быть обеспечен обмен сообщениями с заданными гарантированными показателями своевременности и достоверности. При этом под гарантированными параметрами системы принято понимать параметры, которые могут быть обеспечены при воздействии наихудшей (оптимальной, преднамеренной) помехи из класса помех, определенного условием задачи.

Вопросам обеспечения гарантированных показателей СПИ, в частности, функционирующей в условиях преднамеренных помех, в научно-технической литературе (включая библиографические списки) уделяется значительное внимание в силу их актуальности [1–15]. На основе теоретических исследований разработаны, внедрены и широко используются в различных сферах линии связи с псевдослучайными сигналами [3–15]. В системах управления СПИ предусматриваются меры по функционированию в условиях дестабилизирующих воздействий. Вместе с тем задачи построения и исследования эффективности оптимальных алгоритмов функционирования СПИ на различных уровнях функциональной архитектуры изучены весьма в малой степени. В этом отношении к решенным вопросам в области передачи дискретных сообщений можно отнести лишь вопросы построения и анализа помехоустойчивости алгоритмов формирования и приема двоичных сигналов, являющихся ε-оптимальными с позиции обеспечения минимальной вероятности ошибочного приема бита информации в соответствующих классах помех. А именно, в [5–7] для класса помех с ограничениями на среднюю и пиковую мощность построены оптимальные приемники псевдослучайных сигналов, модулированных по фазе псевдослучайной {–1, 1}-последова-тельностью.

В [8–10] построены ε-оптимальные алгоритмы формирования и приема сигналов амплитудно-фазоманипулированных сигналов при ограничениях на энергию, а также на среднюю мощность помехи и установлена их асимптотическая оптимальность для сигналов с большой базой. Существенное расхождение оценок помехоустойчивости (около 6 дБ [10]) для систем с двоичными сигналами с полученной для общего случая верхней границей дает основание для поиска более эффективных алгоритмов передачи информации в условиях преднамеренных помех. При этом весьма важным представляется вопрос об эффективности использования обратного канала для передачи информации в условиях преднамеренных помех, который к настоящему времени является открытым.

Целью работы является получение оценок достижимой скорости передачи информации на канальном уровне системой с обратной связью при оптимизации параметров канального блока и режима декодирования кода. Рассматривается широко используемая модель СПИ с частичным исправлением ошибок и переспросом кодовых блоков с обнаруженными ошибками [12].

Концептуальное описание задачи и используемые термины. На концептуальном уровне задачу удобно описать на языке теории множеств следующим образом. Имеется класс $\mathcal{U}$ допустимых вариантов построения СПИ и класс $\mathcal{V}$ помех (вариантов постановки). Для каждой системы $U \in \mathcal{U}$ и заданных условий $V \in \mathcal{V}$ в соответствии с формализованной моделью мы определим показатель эффективности функционирования СПИ $q(U,V)$ как функцию $q: \mathcal{U} \times \mathcal{V} \to \mathbb{R}$. Тогда в классе условий $\mathcal{V}$ критерий оптимальности системы оценивается величиной:

$$Q(U) = \inf_{V \in \mathcal{V}} q(U,V)\,,$$

интерпретируемой как *гарантированно обеспечиваемая эффективность функционирования системы* U в классе условий $\mathcal{V}$.

Задача синтеза системы состоит в максимизации этого показателя выбором (определением) допустимого варианта построения системы $U \in \mathcal{U}$, т. е. задача:

$$Q(U) = \inf_{V \in \mathcal{V}} q(U,V) \to \max_{U \in \mathcal{U}}\,. \tag{1}$$

Следует отметить, что задача (1) является составной частью теоретико-игровой задачи, представленной игрой $\mathcal{G} = \mathcal{G}(q, \mathcal{U}, \mathcal{V})$ [16, 17] с множествами $\mathcal{U}, \mathcal{V}$ стратегий игроков, отождествляющих СПИ и источника помехи, и функцией выигрыша первого игрока, т. е. СПИ $q(\cdot,\cdot)$. Пара $(U,V) \in \mathcal{U} \times \mathcal{V}$ называется ситуацией игры $\mathcal{G}$, искомая величина Q_- – нижним значением (нижней ценой) игры:

$$Q_- = \sup_{U \in \mathcal{U}} Q(U) = \sup_{U \in \mathcal{U}} \inf_{V \in \mathcal{V}} q(U,V).$$

Стратегия $U^0 = \mathrm{argmax}_{U\in\mathcal{U}}\, Q(U)$ (в нашем случае вариант построения системы), для которой достигается нижнее значение, т. е. $Q(U^0) = \max_{U\in\mathcal{U}} Q(U)$, называется *оптимальной гарантирующей стратегией*. Любая стратегия $U^\varepsilon \in \mathcal{U}$, для которой выполняется условие $Q(U^\varepsilon) \geq \max_{U\in\mathcal{U}} Q(U) - \varepsilon$, является *ε-оптимальной гарантирующей стратегией.* Соответствующие термины будем использовать применительно к СПИ.

Далее в работе в формализованном виде формулируется задача оптимизации параметров кода и режима обработки сигналов в СПИ с обратной связью, решение которой позволяет определить оптимальные параметры канального блока и режима декодирования помехоустойчивого кода, обеспечивающие максимально достижимую скорость передачи информации при воздействии наихудшей помехи с ограниченной мощностью на заданном временном интервале.

II. Модель СПИ и постановка задачи

Модель «система VS источник помехи» направляется на формализованное описание множеств $\mathcal{U}, \mathcal{V}$ допустимых вариантов построения системы и постановки помехи, соответствующих решаемой задаче. Рассматривается СПИ, представленная двоичными символами (битами), в которой осуществляются следующие преобразования.

1) Поступающие от источника информации символы (*пакеты данных*) разделяются на *информационные блоки*, содержащие по k символов, в которые добавляются $m = n - k$ *проверочных* символов. Сформированные таким образом *канальные блоки* имеют длину n и представляют собой *кодовые комбинации* (*слова*) избыточного (n,k,d)-кода [18], где n,k,d – соответственно длина кодового блока, число информационных элементов в блоке, минимальное расстояние кода.

2) Осуществляется псевдослучайное перемежение символов канальных блоков, сформированных на некотором временном интервале. С позиции решения теоретико-игровой задачи можно обосновать целесообразность межблочного перемежения символов на последовательности блоков такое, которое несущественно влияет на показатели задержки сообщений [17].

3) Сформированная последовательность символов передающей стороной СПИ выдается на физический уровень, осуществляющий передачу битов в виде псевдослучайных сигналов с базой b, которые после регистрации приемником физического уровня выдаются на канальный уровень системы.

Воздействующая на физический сигнал помеха может с некоторой вероятностью приводить к ошибочной регистрации символов в канале, причем вероятность выдачи ошибочного символа зависит от способа формирования, регистрации сигналов (решающего правила приемника), базы сигнала, а также мощности и структуры воздействующей помехи, задаваемыми соответственно величиной δ – отношение средней на временном интервале мощности помехи к мощности сигнала и функцией $F_v(z)$ распределения вероятностей отношения помеха/сигнал внутри этого интервала.

4) Поступающая из физического канала системы последовательность символов подвергается обратному перемежению, в результате которого восстанавливается исходный порядок следования символов, и подается в декодирующее устройство.

5) Декодер системы при наличии в принятом блоке не более установленного числа r ошибок исправляет эти ошибки и выдает восстановленную информационную последовательность символов на сетевой уровень СПИ. Если число ошибок превышает величину r, то с вероятностью, зависящей от корректирующей способности кода, эти ошибки обнаруживаются, и после переспроса соответствующие блоки повторяются. Блоки с необнаруженными ошибками выдаются получателю на сетевой уровень СПИ. При назначении режима декодирования принимается во внимание, что величина r не может быть выбрана более максимально возможной кратности $t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor$ исправляемых кодом ошибок.

В соответствии с выше рассмотренным формулируемая задача вида (1) направляется, с одной стороны, на нахождение параметров b, k, r, определяющих принцип построения и функционирования СПИ рассматриваемого уровня и обеспечивающих максимальное значение средней скорости передачи информации в системе и, с другой, на определение наихудшего вида (стратегии постановки) помехи, определяемого функцией $F_v(\cdot)$. Значения δ, n, а также показателей достоверности передачи информации и задействованного ресурса избыточности (вводятся ниже) полагаются заданными, поскольку решение данной задачи представляет интерес при различных значениях этих параметров. Ниже приводятся соотношения для участвующих в задаче параметров.

Вероятность ошибочного приема символов p_e в физическом канале определяется выражением вида:

$$p_e = \varphi(\delta_v + \delta_\xi) = \varphi(\delta_\Sigma),$$

где δ_v, δ_ξ – отношение мощностей помеха/сигнал и шум/сигнал; $\delta_\Sigma = \delta_v + \delta_\xi$, $\varphi(\cdot)$ – функция, определяемая видом используемых сигналов и решающим правилом приемника. В приведенной записи величина δ_ξ полагается согласованной с зависимостью $\varphi(\cdot)$.

Так, например, для физического канала с когерентным приемом двоичных противоположных сигналов:

$$\varphi(\delta_\Sigma) = \mathcal{F}\left(\sqrt{\frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_v + \mathcal{P}_\xi/2}}\right) = \mathcal{F}\left(1/\sqrt{\delta_v + \mathcal{P}_\xi/2\mathcal{P}_u}\right), \quad (2)$$

где $\mathcal{F}(\cdot)$ – интеграл вероятностей Гаусса; $\mathcal{P}_u, \mathcal{P}_v. \mathcal{P}_\xi$ – мощность сигнала, помехи и шума, соответственно, следует положить $\delta_\xi = \mathcal{P}_\xi/2\mathcal{P}_u$.

Как отмечалось, стратегия помехи реализуется на физическом уровне и определяется функцией распределения вероятностей ее мощности $F_v(\delta_v)$, которая подбирается наихудшей для СПИ из множества:

$$\Omega(\delta) = \{F | M_F[z] = \delta\}.$$

С учетом этого рассматриваемая оптимизационная задача принимает вид:

$$Q(b,k,r) = Q(b,k,r|\delta,n,p_U) =$$
$$= \inf_{F_v \in \Omega(\delta)} q(b,k,r|F_v,n,p_U) \to \max_{b,\,k,\,r},$$

где $q(\cdot)$ – зависимость скорости передачи информации СПИ от записанных аргументов; p_U – вероятность ошибочного приема канального блока.

Несколько нарушая строгость записи соотношений, в выражениях $Q(b,k,r)$, $Q(b,k,r|\delta,n,p_U)$ для упрощения изложения будем исключать некоторые аргументы с обеспечением однозначного понимания этих выражений. Далее конкретизируем функцию $q(\cdot)$ и соответственно сформулируем решаемую задачу в замкнутом виде.

Для рассматриваемой системы относительная скорость передачи информации с постоянной мощностью помехи определяется соотношением:

$$q(b,k,r) = \frac{k}{br}(1 - p(n,r,\delta_\Sigma)) \quad (3)$$

где $p(n,r,\delta_\Sigma)$ – вероятность обнаружения декодером ошибки в канальном блоке, содержащем более r ошибок (такие блоки и только такие переспрашиваются и повторяются).

С учетом высоких требований к достоверности передачи информации в практических расчетах в формуле (3) вместо указанной величины, как правило, используется вероятность появления в канальном блоке более r ошибок, что приводит к незначительной погрешности (менее 0,0001 % в сторону занижения) рассчитанной величины $q(\cdot)$. Такую погрешность не будем принимать во внимание и в (3) величина $p(n,r,\delta_\Sigma)$ далее трактуется как вероятность искажения в принятом канальном блоке более r символов и полагается равной:

$$p(n,r,\delta_\Sigma) = \sum_{i=r+1}^{n} C_n^i p_e^i (1-p_e)^{n-i} =$$
$$= 1 - \sum_{i=0}^{r} C_n^i p_e^i (1-p_e)^{n-i}. \quad (4)$$

Тогда при воздействии на СПИ наихудшей в заданном классе помехи эффективность ее функционирования будет определяться величиной:

$$Q(b,k,r) = \inf_{F_v \in \Omega(\delta)} M_F[q(b,k,r)] =$$
$$= \frac{k}{br}\left(1 - \sup_{F_v \in \Omega(\delta)} M_F[p(n,r,\delta_\Sigma)]\right).$$

Таким образом, при известных параметрах системы распределение F_v наихудшей помехи определяется исходя из условия максимизации математического ожидания $M_F[p(n,r,\delta_\Sigma)]$, т. е. из решения задачи:

$$M_{F_v}[p(n,r,\delta_\Sigma)] \to \max_{F_v \in \Omega(\delta)}. \quad (5)$$

Если $P(n,r,\delta) = \sup_{F_v \in \Omega(\delta)} M_{F_v}[p(n,r,\delta_\Sigma)]$, то с учетом требований по достоверности передачи информации в СПИ и ограничений на параметры k, r кода с заданной длиной блока n рассматриваемая оптимизационная задача принимает следующий вид:

$$Q(b,k,r) = \frac{k}{bn}\big(1 - P(n,r,\delta)\big) \to \max_{b,r,k} \quad (6)$$

III. Методика и примеры решения задачи

Как видно, первым этапом решения сформулированной задачи (6) является решение ее подзадачи (5) и нахождение зависимости $P(n,r,\delta)$. Задача (5) относится к типу задач оптимизации распределений в пространствах с ограниченными моментами (задачи Чебышева – Маркова), решение которых может быть получено на основе теоремы Каратеодори о выпуклых оболочках с учетом теоремы Рисса о распределении масс [19]. В частности, для определенного выше пространства $\Omega(\delta)$ максимум функционала $M_{F_v}[p(n,r,\delta_\Sigma)]$ достигается на функции F_v, сосредотачивающей вероятностную меру не более, чем в двух точках δ_0, δ_1, для которых $(1-z)\delta_0 + z\,\delta_1 = \delta$.

При этом функция

$$P(n,r,\delta) = \max_{F_v \in \Omega(\delta)} M_{F_v}[p(n,r,\delta_\Sigma)] =$$
$$= \max_{z \in [0,1]}[(1-z)\,p(n,r,\delta_0+\delta_\xi) +$$
$$+ z\,p(n,r,\delta_1+\delta_\xi) \quad (7)$$

представляет собой выпуклую вверх оболочку функции $p(n,r,\delta_\Sigma)$ по аргументу δ, точки δ_0, δ_1 соответствуют значениям мгновенной мощности, с которыми оптимальная помеха должна действовать на символы в физическом канале, а оптимальная величина z^* определяет вероятности $Pr\{\delta_v = \delta_1\} = z^*$, $Pr\{\delta_v = \delta_0\} = 1 - z^*$ действия помехи с этими значениями мощности.

Для примера на рисунке 1 приведены графики, иллюстрирующие принцип построения выпуклых вверх оболочек $\varphi_\delta^-(\delta)$, $p_\delta^-(n,r,\delta)$ зависимостей $p_e = \varphi(\delta_v)$ (рисунок 1а) и $p(n,r,\delta_v)$ (рисунок 1б), где принято $\delta_\xi = 0$.

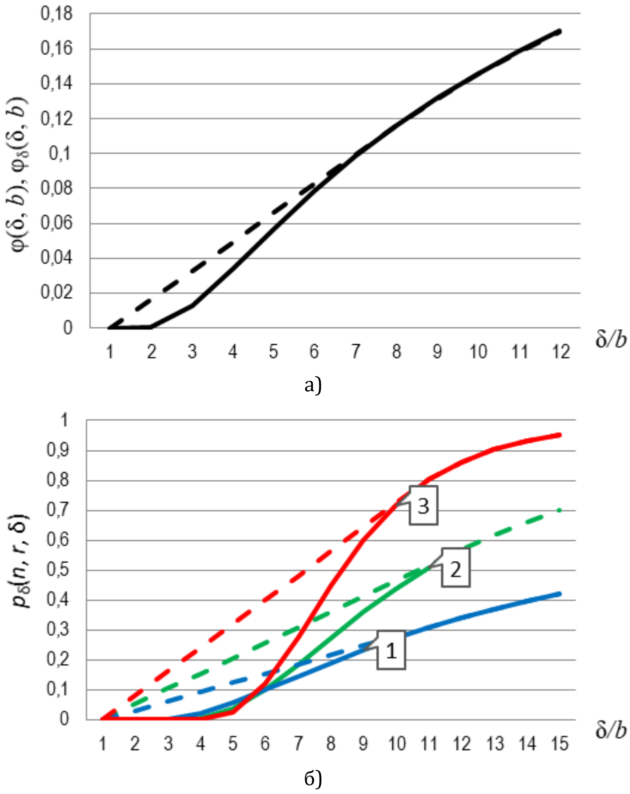

Рис. 1. Графики, иллюстрирующие принцип построения выпуклых оболочек функций

Функция (см. рисунок 1а) определена в [9, 10] как минимальная вероятность ошибочного приема двоичного символа при наихудшей помехе с ограниченной средней мощностью:

$$p_{e\delta}^-(\delta) = \varphi_\delta^-(\delta,b) = \begin{cases} c_b\delta/b, & \delta/b \le \gamma_b, \\ \varphi(\delta/\mathrm{b}), & \delta/b > \gamma_b, \end{cases} \quad (8)$$

где: $\varphi_\delta^-(\cdot)$ – выпуклая вверх по аргументу δ оболочка функции $\varphi(\cdot)$, c_b, γ_b – параметры, зависящие от базы сигнала.

Установлено также, что при $b \to \infty$ имеет место сходимость $c_b \to c_\infty \approx 0{,}166$, $\gamma_b \to \gamma_\infty \approx 0{,}706$ и:

$$\varphi_\delta^-(\delta,b) \to \mathcal{F}_\delta^-\left(\sqrt{\mathrm{b}/\delta}\right) = \begin{cases} c_\infty\,\delta/b, & \delta/b \le \gamma_\infty, \\ \mathcal{F}\left(\sqrt{b/\delta}\right), & \delta/b \ge \gamma_\infty, \end{cases} \quad (9)$$

на основании которой при $n \ge 10$ в практических расчетах для вероятностей ошибки в условиях наихудшей помехи с ограниченной средней мощностью при $p_{e\delta}^- < 0{,}1$ можно использовать линейную зависимость $p_{e\delta}^- \approx 0{,}166\,\delta/b$.

Аналогичным образом строятся и интерпретируются выпуклые оболочки $p_\delta^-(n,r,\delta)$ (пунктирные линии) функций $p(n,r,\delta)$, приведенные на рисунке 1б, определяющие зависимости вероятности переспроса канального блока при оптимизированной помехе. Графики зависимости вероятности переспроса от δ/b при стационарной помехе представлены сплошными линиями, а при оптимизированной помехе – пунктирными; при этом зависимостям для СПИ с параметрами n, r, равными 7.3, 23.3, 63.7, соответствуют кривые 1, 2 и 3.

Из принципа построения выпуклых оболочек и строения зависимости $p(n, r, \delta_\Sigma)$ видно, что функция $P(n, r, \delta)$ линейна в области типовых исходных данных, что существенно упрощает общую оптимизационную задачу (6). Кроме того, можно установить, что для нахождения точек δ_1, δ_0 сосредоточения вероятностной меры $F_v(\delta_v)$ и зависимости $P(n, r, \delta)$ в целом вместо исходной функции $\varphi(\delta, b)$ может быть использована ее выпуклая оболочка $\varphi_{\delta}^{-}(\delta, b)$.

На следующих этапах решения задачи (6) должны быть определены оптимальные соотношения показателей достоверности передачи информации и скорости передачи информации в системе. При оценке показателей достоверности будем учитывать следующие моменты:

– необходимость приведения показателей к одинаковой длине информационного блока в передаваемой последовательности;

– зависимость показателя достоверности от параметров n, k, d кода и показателя r, определяющего режим декодирования;

– зависимость показателя достоверности от среднего числа повторений канальных блоков.

Поскольку требования по достоверности к СПИ на канальном уровне определяются исходя из обеспечения процесса передачи пакетов данных, постольку соответствующий показатель может быть пересчитан к вероятности ошибочной передачи в системе бита сообщения. Другими словами, система U, в которой информационный блок длины k символов передается с вероятностью ошибки $p_e(k)$, оценивается показателем p_U, для которого $p_e(k) = 1 - (1 - p_U)^k \approx kp_U$, т. е. вероятностью:

$$p_U = 1 - \left(1 - p_e(k)\right)^{\frac{1}{k}} \approx \frac{p_e(k)}{k}. \qquad (10)$$

Второй из отмеченных моментов может быть учтен на основе либо подбора конкретных параметров кодов и анализа их способности по исправлению и обнаружению ошибок, либо использования зависимостей, характеризующих достижимые свойства кодов. При этом в любом случае обеспечивается выполнение условий:

1) $r \le t$ (условие допустимости режима декодирования);

2) $n - k \ge \log(\sum_{i=0}^{t} C_n^i)$ (граница Хемминга – необходимое условие существования (n, k, d)-кода).

В предположении равенства вероятностей всех конфигураций ошибок веса более t справедлива оценка вероятности необнаружения кодом ошибки на основе соотношения:

$$P_e(n, k, r) \approx \frac{2^k - 1}{\frac{2^n}{S_n(r)} - 1}, \qquad (11)$$

где $S_n(r) = \sum_{i=0}^{r} C_n^i$.

Следует заметить, что данное выражение дает оценку соответствующей вероятности, пригодную для использования в прикладных задачах, точность которой повышается с увеличением значений n, m, r, δ_ξ. При $r = 0$ данная оценка совпадает с полученным в [12] выражением для вероятности необнаруженной ошибки при кодировании с использованием специального преобразования канальных блоков на передаче и приеме, а при $r = t$ для совершенных кодов ($S_n(r) = S_n(t) = \sum_{i=0}^{r} C_n^i = 2^m$) вырождается в очевидное тривиальное соотношение $P_e(n, k, r) = 1$.

В целом для СПИ с учетом повторений блоков вероятность ошибки в выдаваемом на сетевой уровень информационном блоке составит:

$$P_U(n, k, r) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - P_e(n, k, r)\right)^i P_S(i),$$

где $P_S(i) = \Pr\{S = i\}$ – вероятность того, что число S циклов передачи канального блока равно i. В условиях задачи имеем $P_S(i) = P^{i-1}(n, r, \delta)(1 - P(n, r, \delta))$, поэтому:

$$P_U(n, k, r) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - P_e(n, k, r)\right)^i P_S(i) = \frac{P_e(n, k, r)}{1 - \left(1 - P_e(n, k, r)\right) P(n, r, \delta)}. \qquad (12)$$

Значения представленных соотношениями (10–12) показателей достоверности усредняются по функции распределения вероятностей F_δ.

Формулы (4, 5, 7–12) позволяют вычислять все участвующие в задаче (6) величины и таким образом определяют методику ее решения. Алгоритм оптимизации параметров b, k, t, d в общих чертах можно представить следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Задание исходных данных: n, δ и допустимой вероятности ошибки на бит p_U^*.

Шаг 2. Организация циклов оптимизации b, k.

Шаг 2.1. Вычисление p_e, t.

Шаг 2.2. Организация цикла оптимизации $r \in [0, t]$.

Шаг 2.2.1. Вычисление $P_e(n, k, r), P(n, r, \delta), p_U$.

Шаг 2.2.2. Проверка условия $p_U \le p_U^*$; если не выполнено, то конец цикла r.

Шаг 2.2.3. Вычисление показателя $Q(b, k, r)$.

Шаг 2.2.4. Вычисление максимума для $Q_0(b, k, r) = \max Q(b, k, r)$ и соответствующих значений b_0, k_0, r_0.

Шаг 2.3. Конец цикла r.

Шаг 3. Конец циклов b, k.

Шаг 4. Вывод результатов.

В соответствии с описанной методикой проведены расчеты оптимальных параметров b, k, r СПИ с длинами кодовых блоков $n = 7, 15, 31, 63, 127$ для различных значений δ и p_U^*, которые свидетельствуют о возможности использования методики для оптимизации параметров и режима обработки сигналов в соответствующих условиях функционирования системы.

По результатам анализа решений и расчетов в частных случаях можно сделать следующие выводы.

Во-первых, оптимизированная импульсная помеха выигрывает у стационарной по эффекту воздействия на СПИ 2–4 дБ. На рисунке 2 кривые 2 и 3 соответствуют зависимостям скорости передачи информации СПИ $Q_0(n,\delta)$ для наихудшей помехи, использующей код с $n = 127$ и $n = 31$ при $\delta_\xi = 0$, и кривая 1 $Q_1(n,\delta)$ – для стационарной помехи, использующей код с $n = 127$, расхождение которых свидетельствует об указанной величине выигрыша. Следует отметить, что этот выигрыш составляет меньшую величину, чем при воздействии на СПИ без обратной связи.

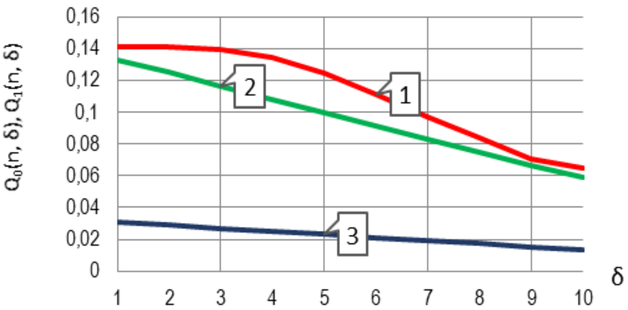

Рис. 2. Зависимость скорости передачи информации от δ

Во-вторых, из графиков видно, что оптимальная помеха реализует выпуклую оболочку зависимости $Q_1(n,\delta)$ по аргументу δ.

В-третьих, в рассмотренных случаях для СПИ с кодированием и обратной связью вероятность активного состояния $P_0 = Pr\{\delta_v = \delta_{v1}\}$ находилась в пределах $0{,}5 \leq P_0 \leq 0{,}75$. Приблизительно такую же скважность реализует оптимизированная помеха с ограниченной средней мощностью, воздействующей на физический канал для доведения в нем вероятности ошибки бита до $p_e = 0{,}05$.

В-четвертых, из п. 1 следует, что при проектировании СПИ, состоящей из нескольких линий связи, необходимо учитывать возможность поочередного их подавления в импульсном режиме и рассчитывать помехоустойчивость при ограничении на среднюю мощность помехи.

В-пятых, увеличение длины кодового блока позволяет повысить гарантированную скорость передачи информации. Из графиков $Q_0(n,\delta)$ для $n = 31$ (кривая 3) и $n = 127$ (кривая 2) на рисунке 2 видно, что при $n = 127$ СПИ выигрывает по скорости передачи у СПИ с $n = 31$ около 3,0 … 4,0 дБ.

В-шестых, оптимальное значение базы сигнала приблизительно равно $b \approx (2{,}5 \dots 3{,}5)\delta$. Этим подтверждается правильность используемого на практике подхода к обоснованию требований к базе сигнала, при которой в физическом канале за счет избыточности сигнала обеспечивается вероятность ошибочного приема бита $p_v = 10^{-3} \dots 10^{-2}$, а дальнейшее повышение достоверности осуществляется на канальном уровне.

В-седьмых, с ростом требований по достоверности оптимальное значение базы сигнала возрастает, а оптимальное значение кратности исправляемых ошибок уменьшается. Это объясняется более высокой корректирующей способностью избыточных кодов в режиме обнаружения ошибок с переспросом блоков с ошибками по сравнению с режимом исправления ошибок. На рисунке 3 для примера представлены соответствующие зависимости от требований к вероятности ошибки информационного символа $10^{-24} \leq p_U \leq 10^{-8}$, где параметры r_0, b_0 изменяются в пределах:

$$5 \leq r \leq 16, \quad 4 \leq b \leq 8.$$

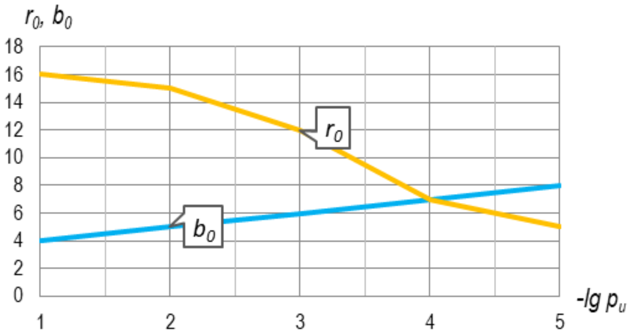

Рис. 3. Зависимость оптимальных значений базы сигнала b_0 и кратности исправляемых кодом ошибок r_0 от максимально допустимой вероятности ошибки в системе p_U

IV. Заключение

Разработанная методика позволяет определять оптимальные параметры кода и режима обработки сигналов в СПИ по критерию максимума гарантированной скорости передачи информации в классе помех с ограниченной мощностью. Анализ полученных оценок, а также их сравнение с результатами [5–10] свидетельствует об эффективности применения в системе избыточных кодов с правильно подобранными параметрами и режимами их использования.

Полученные результаты расчетов могут использоваться как нижние границы гарантированной скорости передачи информации с заданной достоверностью системы с обратной связью, которые более чем на 10 дБ улучшают соответствующие границы [9, 10] для однонаправленных систем.

Также необходимо отметить, что приведенная методика оптимизации направлена на построение алгоритмов функционирования СПИ на канальном уровне в нерандомизированном варианте, что не приводит к равновесной ситуации игры $\mathcal{G}(q,U,V)$ и, соответственно, в рамках рассматриваемой задачи не может привести к построению оптимального алгоритма передачи/приема сообщений СПИ. В связи с этим, актуальным представляется исследование вопросов рандомизации алгоритма работы СПИ и его оптимизации в обобщенной, подобным образом, постановке задачи.

Список используемых источников

1. Добрушин Р.Л. Оптимальная передача информации по каналу с неизвестными параметрами // Радиотехника и электроника. 1959. Т. 4. № 12. С. 1951–1956.
2. Cahn C. Performance of Digital Matched Filter Correlator with Unknown Interference // IEEE Transactions on Communication Technology. 1971. Vol. 19. Iss. 6. PP. 1163–1172. DOI:10.1109/TCOM.1971.1090760
3. Kullstam P. A. Spread Spectrum Performance Analysis in Arbitrary Interference // IEEE Transactions on Communications. 1977. Vol. 25. Iss. 8. PP. 848–853. DOI:10.1109/TCOM.1977.1093906
4. Bashar T., Wu D. Y.-W. A Complete characterization of minimax and maximin encode-decoder policies for communication channels with incomplete statistical description // IEEE Transactions on Information Theory. 1985. Vol. 31. Iss. 4. PP. 482–489. DOI:10.1109/TIT.1985.1057076
5. Жодзишский Ю.И. Максимальная гарантированная помехоустойчивость приема сигналов при ограничении средней мощности мешающих воздействий // Радиотехника. 1986. № 10. С. 56–57.
6. Жодзишский М.И. Применение теории игр к синтезу оптимальной системы посимвольной передачи информации // Радиотехника. 1982. № 11. С. 77–81.
7. Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Жодзишский Ю.И. Гарантированная помехоустойчивость приема сигналов // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 2. С. 316–321.
8. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех. Л: ВАС, 1986. 84 с.
9. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1986. Том 22. № 4. С. 49–54.
10. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1991. Том 27. № 3. С. 57–65.
11. Чуднов А.М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиолиний в условиях случайных и преднамеренных помех // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 4.
12. Коржик В.И., Осмоловский С.А., Финк Л.М. Универсальное стохастическое кодирование в системах с решающей обратной связью // Проблемы передачи информации. 1974. Том 10. № 4. С. 25–29.
13. Feng Z., Ren G., Chen J., Chen C., Yang X., Luo Y., et al. An Anti-Jamming Hierarchical Optimization Approach in Relay Communication System via Stackelberg Game // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 16. DOI:10.3390/app9163348
14. Yue G., Wang X. Anti-jamming coding techniques with application to cognitive radio // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009. Vol. 8. № 12. PP. 5996–6007. DOI:10.1109/TWC.2009.12.081627
15. Yue G., Wang X., Madihian M. Design of Anti-Jamming Coding for Cognitive Radio // Proceedings of Global Telecommuictions Conference (GLOBECOM, Washington, USA, 26–30 November 2007). Piscataway, NJ: IEEE, 2007. PP. 4190–4194. DOI:10.1109/GLOCOM.2007.797
16. Воробьев Н.Н. Основы теории игр. Бескоалиционные игры. М.: Наука, 1984. 496 с.
17. Han Z., Niyato D., Saad W., Başar T., Hjørungnes T. Game Theory in Wireless and Communication Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 554 p.
18. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир. 1976. 593 с.
19. Крейн М.Г., Нудельман А.А. Проблема моментов Маркова и экстремальные задачи. М.: Наука, 1973. 563 с.

* * *

OPTIMIZATION OF CODE PARAMETERS AND SIGNAL PROCESSING MODE UNDER INTENTIONAL INTERFERENCE

A. Chudnov[1], D. Kirik[2], E. Ermakova[1]

[1]Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation
[2]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
The article was received 8th October 2019

For citation: Chudnov A., Kirik D., Ermakova E. Optimization of Code Parameters and Signal Processing Mode under Intentional Interference. 2019;5(4):79–86. (in Russ.) Available from: https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-79-86

Abstract: *In this article we study the analysis and optimization principles of parameters and the mode of use the error-correcting code in the information transmission system with a reverse channel, which functions under the influence of intentional interference, its structure can be selected from the position of violation (deterioration) of the system operating. We see the developed methodology for optimizing system parameters according to the criterion of the maximum guaranteed information transfer rate for interference classes with limited average power. An assessment of the efficiency gain provided by applying the proposed optimizing methods of the channel block structure and its decoding mode is made.*

Keywords: *information transmission system, pseudo-random signal, error-correcting code, intentional interference, noise immunity of the system.*

References

1. Dobrushin R.L. Optimalnaia peredacha informatsii po kanalu s neizvestnymi parametrami [Optimal Transmission of Information over a Channel with Unknown Parameters]. *Radiotekhnika i elektronika*. 1959;4(12):1951–1956. (in Russ.)

2. Cahn C. Performance of Digital Matched Filter Correlator with Unknown Interference. *IEEE Transactions on Communication Technology*. 1971;19(6):1163–1172. Available from: https://doi.org/10.1109/TCOM.1971.1090760

3. Kullstam P. A. Spread Spectrum Performance Analysis in Arbitrary Interference. *IEEE Transactions on Communications*. 1977;25(8):848–853. Available from: https://doi.org/10.1109/TCOM.1977.1093906

4. Bashar T., Wu D. Y.-W. A Complete characterization of minimax and maximin encode-decoder policies for communication channels with incomplete statistical description. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1985;31(4):482–489. Available from: https://doi.org/10.1109/TIT.1985.1057076

5. Zhodzishsky Y.I. Maksimalnaia garantirovannaia pomekhoustoichivost priema signalov pri ogranichenii srednei moshchnosti meshaiushchikh vozdeistvii [Maximum Guaranteed Noise Immunity of Signal Reception while Limiting the Average Power of Interfering Influences]. *Radiotekhnika*. 1986;10:56–57. (in Russ.)

6. Zhodzishsky M.I. Primenenie teorii igr k sintezu optimalnoi sistemy posimvolnoi peredachi informatsii [Application of Game Theory to the Synthesis of an Optimal System of Symbolic Information Transfer]. *Radiotekhnika*. 1982;11:77–81. (in Russ.)

7. Weitzel V.A., Zhodzishsky M.I., Zhodzishsky Y.I. Garantirovannaia pomekhoustoichivost priema signalov [Guaranteed Noise Immunity of Signal Reception]. *Radiotekhnika i elektronika*. 1987;32(2):316–321. (in Russ.)

8. Chudnov A.M. *Pomekhoustoichivost linii i setei sviazi v usloviiakh optimizirovannykh pomekh* [Interference Immunity of Communication Lines and Networks under Optimized Interference Conditions]. Leningrad: Telecommunications Military Academy Publ.; 1986. 84 p. (in Russ.)

9. Chudnov A.M. O minimaksnykh algoritmakh formirovaniia i priema signalov [On Minimax Algorithms for Generating and Receiving Signals]. *Problems of Information Transmission*. 1986;22(4):49–54. (in Russ.)

10. Chudnov A.M. Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniia i priema signalov [Game-Theoretic Problems of Synthesis of Signal Generation and Reception Algorithms]. *Problems of Information Transmission*. 1991;27(3):57–65. (in Russ.)

11. Chudnov A.M. Ob adaptivnykh algoritmakh psevdosluchainogo perekliucheniia rabochikh chastot radiolinii v usloviiakh sluchainykh i prednamerennykh pomekh [On Adaptive Algorithms for Pseudo-Random Switching of the Operating Frequencies of Radio Lines under Conditions of Random and Deliberate Interference]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2015(4). (in Russ.)

12. Korzhik V.I., Osmolovsky S.A., Fink L.M. Universalnoe stokhasticheskoe kodirovanie v sistemakh s reshaiushchei obratnoi sviaziu [Universal Stochastic Coding in Systems with Crucial Feedback]. *Problems of Information Transmission* 1974;10(4):25–29. (in Russ.)

13. Feng Z., Ren G., Chen J., Chen C., Yang X., Luo Y., et al. An Anti-Jamming Hierarchical Optimization Approach in Relay Communication System via Stackelberg Game. *Applied Sciences.* 2019;9(16). Available from: https://doi.org/10.3390/app9163348

14. Yue G., Wang X. Anti-jamming coding techniques with application to cognitive radio. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2009;8(12):5996–6007. Available from: https://doi.org/10.1109/TWC.2009.12.081627

15. Yue G., Wang X., Madihian M. Design of Anti-Jamming Coding for Cognitive Radio. *Proceedings of Global Telecommuictions Conference, GLOBECOM, 26–30 November 2007, Washington, USA)*. Piscataway, NJ: IEEE; 2007. p.4190–4194. Available from: https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2007.797

16. Vorobev N.N. *Osnovy teorii igr. Beskoalitsionnye igry* [The basics of game theory. Non-cooperative games]. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 496 p. (in Russ.)

17. Han Z., Niyato D., Saad W., Başar T., Hjørungnes T. *Game Theory in Wireless and Communication Networks*. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. 554 p.

18. Peterson W., Weldon E. *Kody ispravliaiushchie oshibki* [Codes for correcting errors]. Moscow: Mir Publ.; 1976. 593 p. (in Russ.)

19. Crane M.G., Nudelman A.A. *Problema momentov Markova i ekstremalnye zadachi* [The Problem of Markov Moments and Extremal Problems]. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 563 p. (in Russ.)