

DOI: 10.17516/1999-494X-0441

УДК 621.396. 96

## Methods for Optimizing the Parameters of the Signal-Code Constructions and Their Processing Modes When Receiving in Channels with Pseudo-Random Resetting the Working Frequency and Cascade Coding

Andrey A. Pshenitsyn\* and Sergey B. Zhironkin  
*VKO Military Academy named after Marshal  
of the Soviet Union Georgiy Zhukov  
Tver, Russian Federation*

Received 17.09.2022, received in revised form 12.10.2022, accepted 16.11.2022

---

**Abstract.** The article presents a system of methods for optimizing the parameters of signal-code constructions with orthogonal signals and Reed-Solomon codes, as well as their processing modes when receiving with soft decoding under conditions of signal-noise environment uncertainty while simultaneously acting on a channel with pseudo-random restructuring of the working the frequency of two interference-barrage and concentrated in part of the frequency band. The optimization takes into account the boundary value and the worst value for the channel of the part of the band of pseudo-random tuning of the operating frequency, in which the concentrated interference acts.

**Keywords:** optimization methods, signal-code constructions, soft decoding, worst interference, limit value of interference frequency band, signal-interference environment, Kullback measure.

---

Citation: Pshenitsyn, A.A., Zhironkin, S. B. Methods for optimizing the parameters of the signal-code constructions and their processing modes when receiving in channels with pseudo-random resetting the working frequency and cascade coding. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(7), 861–873. DOI: 10.17516/1999-494X-0441

---

# Методы оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки при приеме в каналах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и каскадным кодированием

А. А. Пшеницын, С. Б. Жиронкин

*Военная академия воздушно-космической обороны  
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова  
Российская Федерация, Тверь*

**Аннотация.** В статье представлена система методов оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций с ортогональными сигналами и кодами Рида-Соломона, а также режимов их обработки при приеме с мягким декодированием в условиях неопределённости сигнально-помеховой обстановки при одновременном действии на канал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты двух помех – заградительной и сосредоточенной в части полосы частот. При оптимизации учитываются граничное и наихудшее для канала значения части полосы псевдослучайной перестройки рабочей частоты, в которой действует сосредоточенная помеха.

**Ключевые слова:** методы оптимизации, сигнально-кодовые конструкции, мягкое декодирование, наихудшая помеха, граничное значение полосы частот помехи, сигнально-помеховая обстановка, мера Кульбака.

Цитирование: Пшеницын А. А. Методы оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки при приеме в каналах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и каскадным кодированием / А. А. Пшеницын, С. Б. Жиронкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(7). С. 861–873. DOI: 10.17516/1999-494X-0441

## Введение

Во многих современных системах связи (СС) и обмена данными используются широкополосные ортогональные сигналы с прямым расширением спектра, каскадным кодированием и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). В связи с этим существует проблема оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций (СКК) и режимов их обработки при приеме на основе оценки помехоустойчивости. Оценка помехоустойчивости таких проектируемых систем посвящены работы [1–5] и ряд других.

В указанных работах в качестве основного способа декодирования внешнего кода в каскадной конструкции рассматривается жесткое декодирование, помехоустойчивость при действии наихудшей узкополосной помехи (сосредоточенной в части полосы ППРЧ) оценивается без учета граничного значения  $\rho_{гр}$  части полосы частот, накрытых узкополосной помехой и действия заградительной помехи во всей полосе. В некоторых работах, например [6], исследовано мягкое декодирование, но в предположении, что параметры сигнально-помеховой обстановки известны.

Цель работы – оптимизация параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки при приеме с мягким декодированием в каналах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, каскадным кодированием, неизвестных параметрах сигнально-помеховой обстановки и с учетом граничной полосы узкополосной помехи.

## Система методов оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки при приеме в каналах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и каскадным кодированием

Для достижения поставленной цели на основе обобщения [7–10] предложена система методов, в которых учитывается, что формирование СКК осуществляется на внешней ступени за счет не двоичного помехоустойчивого кода Рида-Соломона ( $n_2, k_2$ ), а на внутренней – ортогонального ( $n_1, k_1$ ).

Предполагается оптимальное декодирование внутреннего кода – «прием в целом» с помощью набора из  $2^{k_1}$  согласованных фильтров.

На каждом скачке частоты действует, независимо от других скачков, помеха в виде БГШ с неизвестной спектральной плотностью мощности.

Система методов представлена на рис. 1. Система позволяет на основе максимизации показателя  $\beta^{-1}$  помехоустойчивости (энергетической эффективности) осуществить выбор параметров СКК ( $P$ ) и режимов их обработки ( $A$ ), где  $\beta$  – минимально требуемое отношение энергии сигнала, приходящейся на один бит передаваемой информации, к спектральной плотности

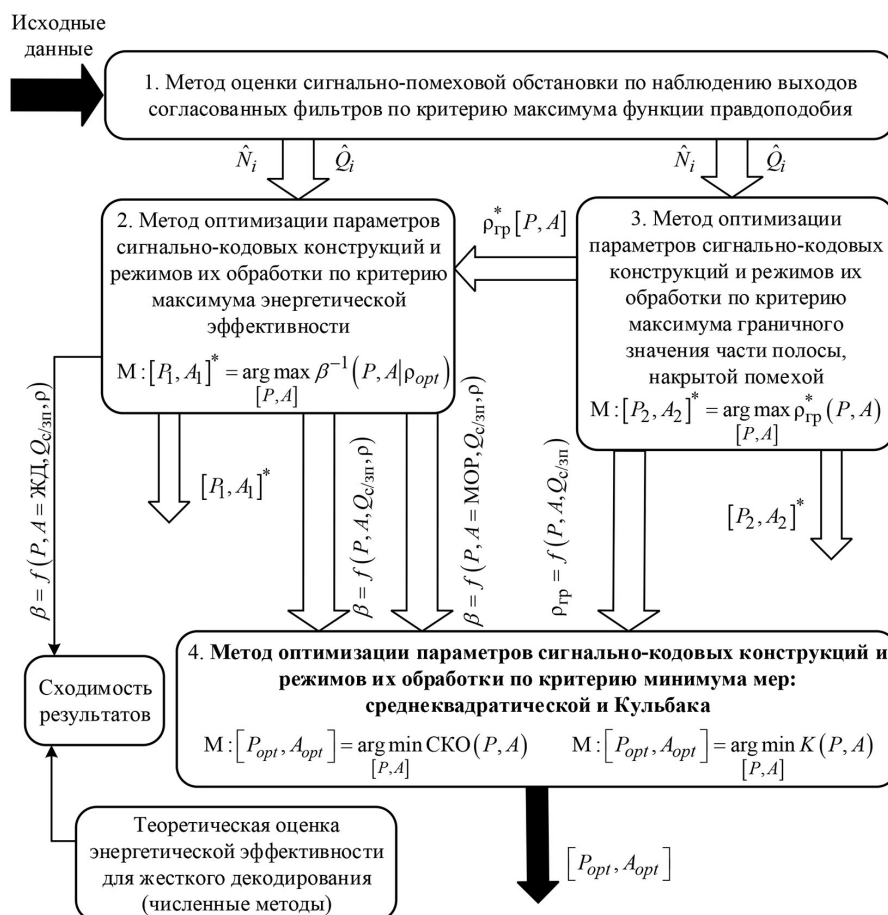


Рис. 1. Система методов

Fig. 1. System of methods

мощности помехи, при котором обеспечивается вероятность ошибки на бит (блок) не выше заданной. При этом учитывается не только использование когерентного или некогерентного канала СС, но и совокупность двух помех – заградительной (зп) и сосредоточенной (узкополосной – уп) в части полосы ППРЧ, определяемой параметром  $\rho = \Delta F_{\text{уп}}/\Delta F_{\text{ППРЧ}}$ . Для сосредоточенной (узкополосной) помехи использованы два параметра:  $\rho_{\text{гр}}$  и  $\rho_{\text{opt}}$  – характеризующий наихудшую помеху [11].

Первый метод оптимизации обеспечивает оценку сигнально-помеховой обстановки, в результате которой вычисляется оценка спектральной плотности мощности помехи ( $\hat{N}_i$ ), либо оценка отношения сигнал/помеха ( $\hat{Q}_i$ ) при приеме  $i$ -го сигнала (символа) внешнего кода.

Второй метод обеспечивает оптимизацию параметров сигнально-кодовой конструкции и режима ее обработки при мягком декодировании по критерию максимума помехоустойчивости, которая определяется при  $\rho_{\text{opt}}$  с учётом оценок параметров сигнально-помеховой обстановки.

Третий метод позволяет оптимизировать параметры сигнально-кодовой конструкции и режима ее обработки с учетом  $\rho_{\text{гр}}$ . Значения  $\rho_{\text{гр}}^*(P, A)$  при  $Q_{\text{с/уп}} = -20$  дБ передаются во второй метод для уточнения  $\beta(\rho)$ .

Потенциальными возможностями по помехоустойчивости при заданных параметрах СКК и помеховой обстановки обладает алгоритм минимума обобщенного расстояния (МОР) [12]. В четвертом методе мерой Кульбака оценивается степень приближения зависимости  $\beta(\rho)$  исследуемых алгоритмов к характеристикам алгоритма МОР. Мера Кульбака позволяет учитывать не только широко используемую при оценке помехоустойчивости величину  $\beta^{-1}$  при  $\rho_{\text{opt}}$ , но и значение  $\rho_{\text{гр}}$ .

### 1. Метод оценки параметров сигнально-помеховой обстановки по наблюдению выходов согласованных фильтров при когерентном приеме

При оптимальном декодировании внутреннего кода – «приеме в целом» с помощью набора из  $M = 2^k$  согласованных фильтров – в качестве входной статистики (наблюдения) для оценки параметров сигнально-помеховой обстановки можно использовать выходы этих согласованных фильтров в виде корреляционных интегралов.

В зависимости от математического представления корреляционных интегралов, формируемых на выходах согласованных фильтров, метод позволяет формировать оценки либо спектральной плотности мощности помехи, либо отношения сигнал/помеха.

При представлении корреляционного интеграла для когерентного приема в виде

$$q_{im} = \int_{(i-1)T}^{iT} \xi(t) s_m(t) dt,$$

где  $q_{im}$  – корреляционные интегралы, сформированные на  $m$ -выходах согласованных фильтров,  $\xi(t)$  – смесь сигнала и уп/зп на входе демодулятора,  $s_m(t)$  – опорный (ожидаемый) сигнал,  $T$  – время приёма  $i$ -го сигнала.

Метод позволяет формировать оценку спектральной плотности мощности помехи. Оптимальная оценка спектральной плотности мощности помехи на интервале приёма  $i$ -го символа внешнего кода максимизирует функцию правдоподобия, которая представляется в виде

$$L(N_i) = p(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} | N_i) = \sum_{j_i=1}^M p(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} | N_i, j_i) P(j_i),$$

где  $N_i$  – спектральная плотность мощности помехи при приеме  $i$ -го сигнала,  $j_i$  – номер принимаемого сигнала (кодовой комбинации внутреннего кода), оцениваемый в процессе решения задачи различения  $M$  сигналов на интервале приёма  $i$ -го символа внешнего кода (формирования оценки  $\hat{j}_i$ ).

При больших отношениях сигнал/помеха, когда вероятность ошибки различения сигналов мала,  $L(N_i) \approx p(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} | N_i, \hat{j}_i)$ , где в соответствии с [10]

$$p(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} | N_i, \hat{j}_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_i E}} \exp\left(-\frac{(q_{i\hat{j}_i} - E)^2}{N_i E}\right) \prod_{m=1(m \neq \hat{j}_i)}^M \frac{1}{\sqrt{\pi N_i E}} \exp\left(-\frac{q_{im}^2}{N_i E}\right),$$

где  $E$  – энергия сигнала.

После максимизации этого выражения находится квазиоптимальная оценка плотности мощности помехи

$$\hat{N}_i = \frac{2\left(E - 2q_{i\hat{j}_i} + \frac{1}{E} \sum_{m=1}^M q_{im}^2\right)}{M}. \quad (1)$$

При представлении корреляционного интеграла в нормированном виде

$$q'_{im} = \frac{2}{N_i} q_{im}$$

формируется квазиоптимальная оценка отношения сигнал/помеха  $\hat{Q}_i = \frac{2E_i}{N_i}$ :

$$\hat{Q}_i = -\frac{M}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} + \sum_{m=1}^M q_{im}^2}. \quad (2)$$

При некогерентном приёме в каждом из  $M$  каналов реализуется квадратурная обработка и в качестве наблюдения рассматриваются

$$q_{im} = \sqrt{q_{imc}^2 + q_{ims}^2},$$

где  $q_{imc}$ ,  $q_{ims}$  – квадратурные представления корреляционных интегралов.

При таком наблюдении в соответствии с [9] приближённое (в предположении малой величины ошибки различения  $M$  сигналов) выражение для функции правдоподобия имеет вид

$$\begin{aligned} L(N_i) &\approx p(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} | N_i, \hat{j}_i) = \\ &= \frac{q_{i\hat{j}_i}}{N_i E / 2} \exp\left(-\frac{q_{i\hat{j}_i}^2 + E^2}{N_i E}\right) I_0\left(\frac{2q_{i\hat{j}_i}}{N_i}\right) \prod_{m=1(m \neq \hat{j}_i)}^M \frac{q_{im}}{N_i E / 2} \exp\left(-\frac{q_{im}^2}{N_i E}\right), \end{aligned}$$

где  $I_0(\cdot)$  – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента.

После максимизации этого выражения оценка спектральной плотности мощности на интервале приёма  $i$ -го символа внешнего кода представляется в виде

$$\hat{N}_i = \frac{2 \left( E - 2q_{\hat{ij}} + \frac{1}{E} \sum_{m=1}^M q_{im}^2 \right)}{2M-1}. \quad (3)$$

Аналогично получается квазиоптимальная оценка отношения сигнал/помеха

$$\hat{Q}_i = -M + \sqrt{M^2 + \sum_{m=1}^M q_{im}^2}. \quad (4)$$

Полученные оценки (1, 3), а при известной энергии сигнала (2, 4) позволяют вычислить апостериорную вероятность  $p_{psi}$  решения демодулятора  $\hat{a}_j$ , используя для расчета [13]: для когерентного приёма

$$p_{psi}(\hat{a}_j) = \frac{\exp \left[ \frac{2}{N_j} q_{jm} \right]}{\sum_{m=0}^{M-1} \exp \left[ \frac{2}{N_i} q_{im} \right]},$$

для некогерентного

$$p_{psi}(\hat{a}_j) = \frac{I_0 \left( \sqrt{\left( \frac{2}{\hat{N}_i} q_{jc} \right)^2 + \left( \frac{2}{\hat{N}_i} q_{js} \right)^2} \right)}{\sum_{m=1}^M I_0 \left( \sqrt{\left( \frac{2}{\hat{N}_i} q_{imc} \right)^2 + \left( \frac{2}{\hat{N}_i} q_{ims} \right)^2} \right)}.$$

Полученные таким образом значения  $p_{psi}$  используются в дальнейшем для мягкого декодирования блока СКК.

## 2. Метод оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки по критерию максимума энергетической эффективности

Структура метода оптимизации параметров СКК и режимов их обработки при когерентном или некогерентном приеме представлена на рис. 2.

Содержание метода состоит в следующем.

1. На первом этапе производится предварительная установка и последующий перебор параметров  $(n_1, k_1)$  и  $(n_2, k_2)$  СКК, исходя из требований к передаваемым сообщениям (их длины и возможности объединения или разбиения на блоки), избыточности, задержек на обработку, требований к помехоустойчивости и т.д.

2. Исходя из установленных параметров СКК обработка предусматривает как «мягкие» алгоритмы приема-декодирования, работа которых невозможна без оценки сигнально-помеховой

обстановки (рис. 3), так и «жесткий» алгоритм декодирования, когда исправляется  $t = \frac{n_1 - k_1}{2}$  ошибок, не требующий знания  $p_{ps}$  для принятых символов.

3. Перечень исходных данных для моделирования включает:

- отношение сигнал/заградительная помеха –  $Q_{с/зп}$ ,



Рис. 2. Структура метода оптимизации параметров сигнально-кодовой конструкции и режима ее обработки при когерентном или некогерентном приеме

Fig. 2. The structure of the method for optimizing the parameters of the signal-code constructions and the mode of its processing with coherent or incoherent takes

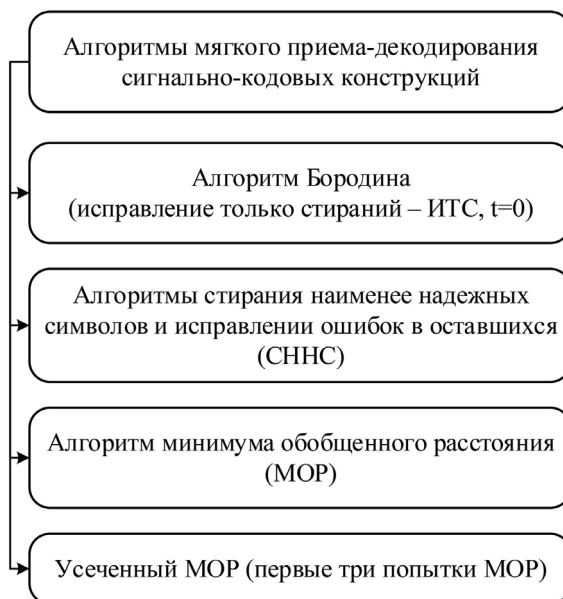


Рис. 3. Алгоритмы мягкого приема-декодирования сигнально-кодowych конструкций

Fig. 3. Soft reception-decoding algorithms for the signal-code constructions

- заданную вероятность ошибки в одном бите (блоке) –  $P_{e(\text{бит})}$ ,
- количество циклов испытаний для набора статистики –  $n$ ,
- значение части полосы СС, накрытой узкополосной помехой –  $\rho$ ,
- диапазон и шаг изменения отношения сигнал/узкополосная помеха –  $Q_{c/\text{шп}}$  для моделирования.

4. Процедура статистического имитационного моделирования, основанная на разработанной в [7–10] модели, позволяет получить зависимость минимально требуемого отношения энергии сигнала, приходящегося на один бит передаваемой информации к спектральной плотности мощности узкополосной помехи

$$\left( \frac{E_b}{N_{\text{шп}}} \right)_{\text{дБ}}^{P_{e(\text{бит})}}, \text{ при котором обеспечивается вероятность}$$

ошибки на бит(блок) не выше заданной от части полосы частот, накрытой узкополосной помехой  $\rho$ . Моделирование выполняется для одного значения  $\rho$  и заданных: алгоритме приема-декодирования, когерентном или некогерентном приеме, оценке сигнально-помеховой обстановки. После этого строится график  $\beta = f(P, A, Q_{c/\text{шп}}, \rho)$ . Обратные связи позволяют осуществить моделирование для всех возможных вариантов  $[P', A']$ . Результаты моделирования для жесткого декодирования и значения

$$\left( \frac{E_b}{N_{\text{шп}}} \right)_{\text{дБ}}^{P_{e(\text{бит})}}, \text{ полученные численными методами, показывают}$$

высокую степень сходимости ( $\leq 5\%$ ).

Например, на рис. 4 приведены результаты моделирования когерентного приема-декодирования СКК (РС(31,13) и ортогонального (32,5)) для некоторых алгоритмов при  $Q_{c/\text{шп}} = 15$  дБ, известной спектральной плотности мощности помехи в части полосы  $\rho$  с шагом 0,1 и вероятности ошибки на блок  $\leq 10^{-2}$ .

5. На основе полученных в результате моделирования зависимостей  $\beta = f(P, A, Q_{c/\text{шп}}, \rho)$ , используя значения  $\beta(\rho_{\text{opt}})$ , строятся графики зависимости энергетической эффективности при наихудшей помехе от параметров СКК, режима обработки, сигнально-помеховой обстановки. После этого осуществляется выбор оптимальных  $[P_1, A_1]^*$  по критерию максимума помехоустойчивости.

На рис. 5 для РС(31,  $k$ ) и ортогонального (32,5) приведены графики, позволяющие определить оптимальные параметры СКК при наихудшей помехе и  $Q_{c/\text{шп}}=15, 10, 5$  дБ для алгоритма МОР и когерентного приема.

Для оптимизации параметров СКК и режимов обработки необходимо построить семейство графиков всех сочетаний  $[P]$  и  $[A]$ . После чего произвести оптимизацию.

### 3. Метод оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки по критерию максимума граничного значения части полосы, накрытой помехой

Известно, что для СС с ППРЧ и помехоустойчивым кодированием существует значение  $\rho_{\text{гр}}$  части полосы, накрытой помехой, характеризующееся тем, что при  $\rho \leq \rho_{\text{гр}}$  независимо от мощности помехи обеспечивается заданная достоверность передачи информации [14].



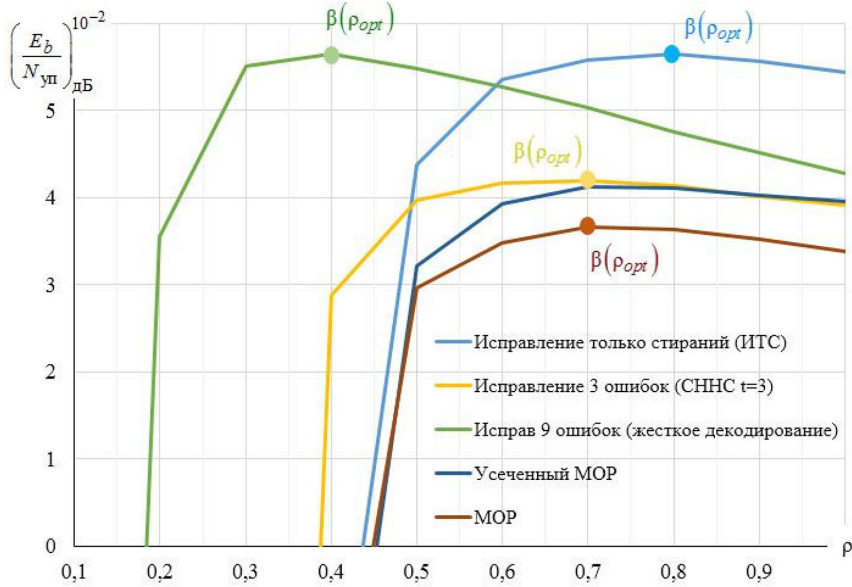


Рис. 4. Энергетическая эффективность СКК при  $Q_s/b_n=15$  дБ и различных режимах обработки  
 Fig. 4. SCC energy efficiency at  $Q_s/b_n=15$  dB and various processing modes

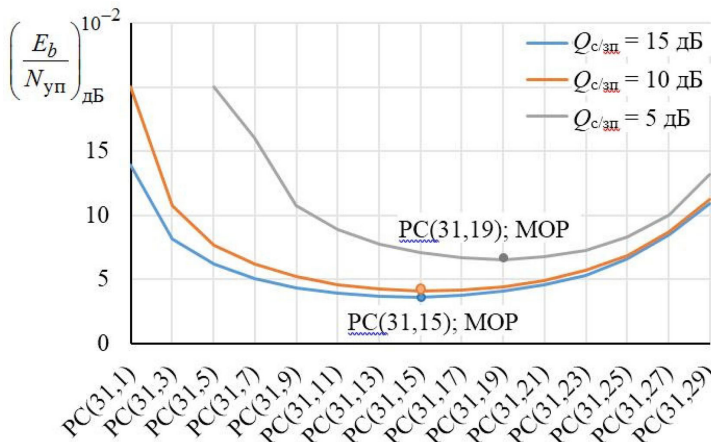


Рис. 5. Энергетическая эффективность СКК  $\beta(\rho_{opt})$  при  $Q_{с/зп}=15, 10, 5$  дБ для РС(31,  $k$ )  
 Fig. 5. Energy efficiency of SCC  $\beta(\rho_{opt})$  at  $Q_{s/bn}=15, 10, 5$  dB for RS(31,  $k$ )

Метод обеспечивает оптимизацию параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки по критерию максимума граничного значения части полосы, накрытой помехой при заданных условиях.

Метод основан на модели когерентного и некогерентного каналов СС и различных режимах обработки. Особенность заключается в том, что задается значение  $\left(\frac{E_b}{N_{уп}}\right)_{дБ}^{10^{-2}} = -20$  дБ

и находится  $\rho_{гр}^*$ . Описание метода приведено в [8].

На рис. 6 приведены результаты моделирования всех алгоритмов когерентного приема-декодирования при  $Q_{c/zn} = 5$  дБ, известной  $N_t$ , множества СКК на основе кода РС(31,  $k$ ) и ортогонального (32,5).

Анализ полученных графиков показывает, что наибольшим значением  $\rho_{ГР}^*$  обладают алгоритмы приема-декодирования: МОР, усеченный МОР, при этом максимальное значение  $\rho_{ГР}^* \approx 0,3$ . Кроме этого, метод позволяет оценить влияние отношения сигнал/заградительная помеха на величину  $\rho_{ГР}^*$ . На рис. 7 приведены результаты моделирования для СКК на основе

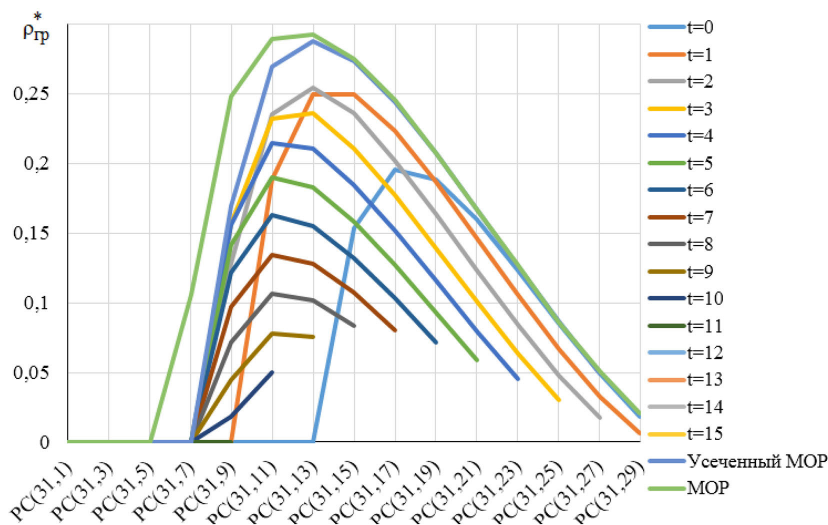


Рис. 6. Зависимость  $\rho_{ГР}^*$  от параметров сигнално-кодовых конструкций и режимов их обработки при отношении сигнал/заградительная помеха  $Q_{c/zn} = 5$  дБ

Fig. 6. Dependence  $\rho_{ГР}^*$  from the parameters of the signal-code constructions and processing modes at the ratio signal/barrage at  $Q_{s/bn} = 5$  dB

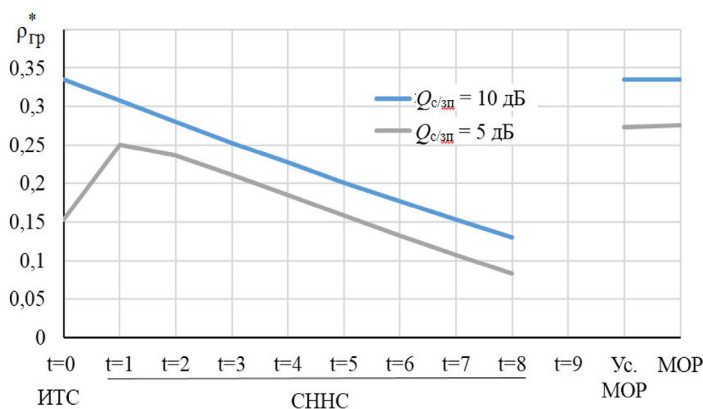


Рис. 7. Зависимость  $\rho_{ГР}^*$  от отношения сигнал/заградительная помеха и режимов обработки при фиксированных параметрах сигнално-кодовой конструкции

Fig. 7. Dependence  $\rho_{ГР}^*$  from the ratio signal/barrage and various processing modes with fixed the parameters of the signal-code constructions

РС(31,15) при когерентном приеме, известной  $N_i$  и различных отношениях сигнал/заградительная помеха.

Таким образом, данный метод обеспечивает не только оптимизацию параметров СКК и режимов их обработки в заданных условиях по критерию максимума  $\rho_{гр}^*$ , но и учитывает влияние отношения сигнал/заградительная помеха на  $\rho_{гр}^*$ .

#### 4. Метод оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки по критерию минимума мер: среднеквадратической и Кульбака

Простое сравнение полученных значений  $\rho_{гр}^*$  не учитывает значения энергетической эффективности при других  $\rho$ , для оптимизации параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки с учётом  $\rho_{гр}^*$  и других значений  $\rho$  в [8] предложены показатели помехоустойчивости: среднеквадратическая мера

$$СКО(\beta, \beta_{пот}) = \sqrt{\sum_k [\beta(\rho_k) - \beta_{пот}(\rho_k)]^2},$$

и мера Кульбака [15], имеющая с учётом того, что  $\beta$  измеряется в децибелах, следующий вид

$$K(\beta, \beta_{пот}) = 0,1 \sum_k 10^{0,1\beta(\rho_k)} [\beta(\rho_k) - \beta_{пот}(\rho_k)],$$

где  $\beta_{пот}(\rho_k)$  – потенциальная помехоустойчивость, полученная при обработке алгоритмом МОР при тех же условиях, что и  $\beta(\rho_k)$ .

Мера Кульбака в отличие от среднеквадратической меры подчёркивает значимость «хвостов» распределения, придаёт им большую значимость, что важно для учёта различий характеристик помехоустойчивости в области  $\rho_{гр}^*$ .

#### Заключение

Таким образом, применение разработанной системы методов обеспечивает оптимизацию параметров сигнально-кодовых конструкций и режимов их обработки различными алгоритмами мягкого декодирования в каналах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) при действии двух помех: заградительной и сосредоточенной в части полосы ППРЧ, неизвестной сигнально-помеховой обстановке, учёте наихудшего и граничного значений части полосы частот ППРЧ, накрытой сосредоточенной помехой.

#### Список литературы / References

- [1] Тузов Г.И. *Помехозащищённость радиосистем со сложными сигналами, под ред. Г.И. Тузова*. М: Радио и связь, 1985 [Tuzov G. I. *Interference immunity of radio systems with complex signals, ed. G. I. Tuzov*, Moskva, Radio i svyaz, 1985 (in Rus.)]
- [2] Варакин Л.Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М.: Радио и связь, 1985, 384 [Varakin L. E. *Communication systems with noise-type signals*. Moscow, Radio i svyaz, 1985, 384 (in Rus.)]
- [3] Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. *Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последователь-*

ностью, под ред. В. И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиософт, 2011. 550 [Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Shestopalov V. I. *Noise immunity of radio communication systems with spectrum modulation by pseudo-random sequence*, ed. V. I. Borisov. ed. 2nd, revised. and additional. Moscow, Radiosoft, 2011. 550 (in Rus.)]

[4] Чуднов А. М., Кирик Д. И., Ермакова Е. М. Оптимизация параметров кода и режима обработки сигналов в условиях преднамеренных помех. *Труды учебных заведений связи*. 2019. 5(4). 79–86 [Chudnov A. M., Kirik D. I., Ermakova E. M. Optimization of code parameters and signal processing mode under intentional interference. *Font Paragraph Styles Proceeedings of education institutions of communication*. 2019. 5(4). 79–86 (in Rus.)]

[5] Близняк А. А., Жиронкин С. Б., Макарычев А. В. Энергетический подход к оценке помехоустойчивости канала передачи данных с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях одновременного действия двух помех. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2018, 12, 13–18 [Bliznyuk A. A., Zhironkin S. B., Makarychev A. V. Power approach to an assessment of a noise stability of a data link with pseudo-casual reorganization of working frequency in the conditions of simultaneous action of two hindrances. *Achievements of Modern Radioelectronik*, 2018, 12, 13–18 (in Rus.)]

[6] Портной С. Л., Жиронкин С. Б. Декодирование блочных кодов в системах передачи информации с псевдослучайным переключением частот. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, 1989, 32, 8. [Portnoy S. L., Zhironkin S. B. Decoding of block codes in information transmission systems wish pseudo-random frequency switching. *Izvestiya vuzov. Radio electronics*, 1989, 32, 8 (in Rus.)]

[7] Бердышев В. П., Близняк А. А., Жиронкин С. Б., Пшеницын А. А. Помехоустойчивость канала передачи данных с ППРЧ при мягком декодировании с использованием оценок спектральной плотности мощности помехи. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2020, 13(7), 343–354 [Berdyshev V. P., Bliznyuk A. A., Zhironkin S. B., Pshenitsin A. A. Noise immunity of a data transmission channel with frequency hopping during soft decoding using estimates of the spectral density of the interference power. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2020, 13(7), 343–354 (in Rus.)]

[8] Жиронкин С. Б., Пшеницын А. А., Близняк А. А. Оптимизация параметров каскадного кода по критерию максимума граничного значения полосы частот помехи и выбор алгоритма декодирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2021, 14(7), 820–829 [Zhironkin S. B., Pshenitsin A. A., Bliznyuk A. A. Optimization of the cascade code parameters by the criterion of the boundary value of the interference band and the selection of the decoding algorithm. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2021, 14(7), 820–829 (in Rus.)]

[9] Пшеницын А. А., Жиронкин С. Б., Макарычев А. В., Близняк А. А., Пархоменко П. М. Прием ортогональных сигналов с оценкой отношения сигнал/шум. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019, 12(73), 148–155. [Pshenitsin A. A., Zhironkin S. B., Makarychev A. V., Bliznyuk A. A., Parkhomenko P. M. Reception of orthogonal signals with signal-to-noise radio estimation. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2019, 12, 148–155]

[10] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Пшеницын А. А., Лютиков И. В. Оценка параметров смеси сигнала с шумом по наблюдению выходов многоканального устройства различения ор-

тогональных сигналов при когерентном приеме. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2020, 13(3), 361–369 [Zhironkin S. B., Bliznyuk A. A., Pshenitsin A. A., Lytikov I. V. Estimation of parameters of signal mixture with noise based on monitoring outputs of the multichannel device of orthogonal signals distinction at coherent reception. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2020, 13(3), 361–369 (in Rus.)]

[11] Чуднов А. М. Помехозащищённость системы передачи информации с псевдослучайным переключением частот в условиях наихудших помех. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 1984, 9, 3–8 [Chudnov A. M. Interference immunity of the information transmission system with pseudo-random frequency switching in the conditions of the worst interference. *Proceedings of universities. Radio electronics*, 1984, 9, 3–8 (in Rus.)]

[12] Форни Д. *Каскадные коды: пер. с англ. под ред. С. И. Самойленко*. М.: Мир, 1970. [Forni D. *Concatenated codes: per. from English, ed. S. I. Samoilenko*. Moscow, Mir, 1970 (in Rus.)]

[13] Тихонов В. И. *Оптимальный прием сигналов*. М.: Радио и связь, 1983, 320. [Tikhonov V. I., *Optimum reception of signals*. Moscow, Radio i svyaz. 1983, 320 (in Rus.)]

[14] Pursley M. B., Stark W. E. Antijam capability of frequency-hop spread-spectrum with Reed-Solomon coding, *IEEE Military Communications Conference*. 1983. 7–11

[15] Тихонов В. И., Харисов В. Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. М.: Радио и связь, 2004, 608 [Tikhonov V. I., Hurisov V. N., *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moscow, Radio i svyaz. 2004, 608 (in Rus.)]