

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-77-84>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Совместное использование частотно-временного разнесения и помехоустойчивого кодирования в системах радиосвязи с ППРЧ

А.А. Парамонов[@], Хоанг Ван Зунг

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: paramonov@mirea.ru

Резюме. В условиях постоянного совершенствования средств радиоразведки и постановки радиопомех и внедрения автоматизированных комплексов радиоэлектронного противодействия (РЭП) для повышения надежности, помехоустойчивости и помехозащищенности передачи информации широко используются системы радиосвязи (СРС) с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). При воздействии непреднамеренных и организованных преднамеренных помех помехоустойчивость системы радиосвязи с ППРЧ может быть значительно повышена путем комплексного использования частотно-временного разнесения и помехоустойчивого кодирования. В работе рассмотрен случай, когда система РЭП с ограниченной мощностью передатчика поражает помехой часть частотного диапазона СРС. При этом приемник должен обрабатывать смесь полезного сигнала, собственных шумов приемника и, с некоторой вероятностью, преднамеренной помехи, также считающейся шумовой. В статье проанализирована помехоустойчивость приема сигналов с ППРЧ в низкоскоростных системах радиосвязи при совместном применении частотно-временного разнесения информационных субсимволов и помехоустойчивых кодов в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех в части рабочей полосы СРС. Проведены расчеты зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при комплексном применении частотного разнесения информационных символов и помехоустойчивых кодов. Показано, что благодаря эффективному использованию частотно-энергетического ресурса радиолинии с учетом применения корректирующих кодов в условиях воздействия преднамеренных помех может быть обеспечена существенно более высокая помехоустойчивость СРС, чем в СРС без ППРЧ и без кодирования. Представленные зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха подтверждают, что достоверность передачи информации может быть существенно повышена за счет правильного сочетания расширения спектра сигнала, применения корректирующих кодов и разнесения информационных субсимволов по частоте с последующей их весовой обработкой.

Ключевые слова: помехоустойчивость системы радиосвязи, помеха в части полосы, отношение сигнал/помеха, вероятность битовой ошибки, псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), частотное разнесение, помехоустойчивые коды

• Поступила: 31.03.2021 • Доработана: 09.04.2021 • Принята к опубликованию: 12.04.2021

Для цитирования: Парамонов А.А., Хоанг Ван Зунг. Совместное использование частотно-временного разнесения и помехоустойчивого кодирования в системах радиосвязи с ППРЧ. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):77–84. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-77-84>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Joint use of frequency-time division and antinoise coding in radio communication systems with FHSS

Aleksei A. Paramonov[®], Hoang Van Zung

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: paramonov@mirea.ru

Abstract. In the context of continuous improvement of radio prospecting and active radio jamming technics along with introduction of automated active countermeasures systems (ACS), the frequency-hopping spread spectrum (FHSS) radio communication systems (RCS) are widely used in order to improve reliability and noise immunity of data transmission. The noise immunity of the RCS affected by unintentional or deliberate interference can be significantly perfected by the combined use of frequency-time division and antinoise coding. This paper explores the case when the interference created by an ACS system with a limited transmitter power covers a part of the RCS frequency range. The receiver gets input mix of the wanted signal, the receiver noise, and probably a deliberate interference also considered as a noise. The article analyzes the noise immunity of signals reception with FHSS in the low-speed radio systems with joint use of frequency-time division of information subsymbols and noise combating codes when the deliberate interference destructively impacts a part of the RCS working band. Dependence of the bit error probability on the signal-to-noise ratio is calculated for the joint use of frequency division of information subsymbols and noise combating codes. It is shown that due to effective use of the frequency-energy resource of a radio line, considering the use of correction codes, a quite high noise immunity of RCS under the influence of deliberate interference can be assured. The indicated dependences of the error probability on the signal-to-noise ratio confirm that the reliability of data transmission can be significantly increased by the proper combination of signal spectrum spreading, applying of correction codes, and frequency division of subsymbols followed by their weight processing.

Keywords: noise immunity of radio communication systems, partial-band interference, signal to interference ratio, bit error probability, frequency-hopping spread spectrum (FHSS), frequency diversity, noise combating code

• Submitted: 31.03.2021 • Revised: 09.04.2021 • Accepted: 12.04.2021

For citation: Paramonov A.A., Hoang Van Zung. Joint use of frequency-time division and antinoise coding in radio communication systems with FHSS. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):77–84 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-77-84>

Financial disclosure: Authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах радиосвязи (СРС) за счет использования режима передачи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) достигается высокая степень надежности и защищенности от организованных (преднамеренных) и непреднамеренных помех. Одним из эффективных видов организованных преднамеренных помех с точки зрения эффективности подавления СРС, а также сравнительно простой реализации в системах радиоэлектронного подавления является шумовая помеха в части полосы рабочих частот СРС. Спектральную

плотность мощности такой помехи можно представить в виде [1]

$$N_{\Pi} = \begin{cases} P_{\Pi} / (\rho \Delta F), & \text{в полосе } \rho \Delta F, \\ 0, & \text{в полосе } (1 - \rho) \Delta F, \end{cases} \quad (1)$$

где P_{Π} – мощность преднамеренной шумовой помехи; ρ – доля полосы, занимаемая помехой ($0 \leq \rho \leq 1$); ΔF – общая ширина полосы частот, занимаемой СРС.

Эффективным методом борьбы с данной помехой признано применение режима внутрисимвольной

ППРЧ, подробно описанного в [1–5]. В этом режиме производится разделение символа по длительности на независимые элементы (субсимволы), как показано на рис. 1, а затем каждый из этих субсимволов передается на своей частоте в соответствии с псевдослучайным законом, при этом $T_h = T_s/L$, где L – число субсимволов или число скачков рабочей частоты внутри одного символа.

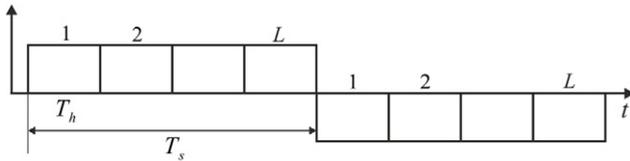


Рис. 1. Разбиение символа на субсимволы

В работах [1–5] показано, что за счет такого частотно-временного разнесения информационных символов при работе СРС в режиме ППРЧ может быть повышена помехоустойчивость передачи информации. Однако имеется принципиальная возможность дальнейшего повышения эффективности работы СРС в режиме ППРЧ в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех на линию радиосвязи, реализуемая при комплексном использовании частотно-временного разнесения информационных символов с оптимальным или близким к оптимальному алгоритму принятия решения и применении помехоустойчивых кодов.

Целью данной работы является оценка помехоустойчивости СРС в режиме ППРЧ при комплексном использовании частотно-временного разнесения и помехоустойчивого кодирования в условиях воздействия преднамеренной шумовой помехи в части полосы.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В рассматриваемых СРС используется режим внутрисимвольной ППРЧ с частотной телеграфией (ЧТ). В приемной части реализуется некогерентный алгоритм приема субсимволов с взвешиванием выходных выборок квадратичных детекторов и их

сложением. Структурная схема данной цифровой СРС с ППРЧ представлена на рис. 2.

Важным условием работы систем радиосвязи с ППРЧ является обеспечение синхронизации. Решению задач, связанных с обеспечением синхронизации в СРС с ППРЧ, посвящены работы [6–10], следовательно, в дальнейшем вопрос обеспечения синхронизации не рассматривается и принимается условие, что синхронизация идеально обеспечена.

На практике постановщик помех поражает не все частоты, используемые в режиме ППРЧ, а только их часть, поэтому на приемной стороне одни субсимволы могут быть сильно поражены помехой, а другие – незначительно. Отметим сходство режима внутрисимвольной ППРЧ с разнесенным приемом, когда отношения сигнал/шум в разных ветвях разнесения оказываются разными. Это сходство позволяет воспользоваться теорией разнесенного приема при выборе способов принятия решения о символе по совокупности принятых субсимволов.

Один из возможных способов комбинирования субсимволов – мажоритарное сложение (принятие решения по большинству решений о переданных субсимволах, принадлежащих одному символу). Методика оценочного расчета вероятности ошибки приема символа для этого случая приведена в [5]. При разделении символа на L субсимволов, т.е. при L -кратном разнесении по частоте и при воздействии преднамеренной шумовой помехи в части полосы вероятность ошибки приема символа, определяемая на основе мажоритарной логики вынесения решения, определяется выражением

$$\begin{cases} P_b = \sum_{k=L-\lfloor L/2 \rfloor}^L C_L^k p_{si}^k (1-p_{si})^{L-k}, & \text{для нечетных } L, \\ P_b = \sum_{k=L/2+1}^L C_L^k p_{si}^k (1-p_{si})^{L-k} + \\ + \frac{1}{2} C_{L/2}^L p_{si}^{L/2} (1-p_{si})^{L/2}, & \text{для четных } L, \end{cases} \quad (2)$$

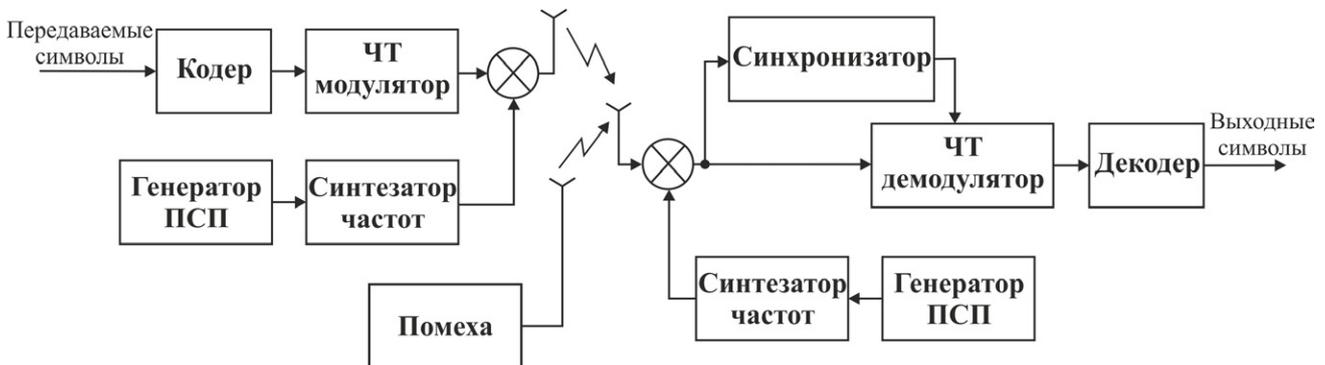


Рис. 2. Структурная схема канала связи для цифровой системы связи с ППРЧ (ПСП – псевдослучайная последовательность)

$$P_{si} = \rho \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{1}{L} \frac{E_b}{2(N_0 + P_n T_h / \rho \Delta F)} \right] + (1 - \rho) \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{1}{L} \frac{E_b}{2N_0} \right],$$

где N_0 – спектральная плотность мощности собственных шумов приемника.

Лучших результатов при приеме сигналов в режиме внутрисимвольной ППРЧ можно ожидать при надлежащем взвешивании и сложении принятых субсимволов. Согласно [1, 11] эффективным методом взвешивания выборок каждого субсимвола перед их сложением является адаптивное взвешивание выходной выборки квадратичного детектора в каждом канале некогерентного приема. Именно такой вид весовой обработки субсимволов совместно с помехоустойчивым кодированием рассмотрен в последнем разделе статьи.

На приемной стороне после переноса всех субсимволов на общую промежуточную частоту сигнал демодулируется с последующим детектированием и стробированием в конце каждого субсимвола. Сигналы, соответствующие одному символу, взвешиваются и суммируются для формирования величин статистик принятия решения. Представленные ниже результаты получены при условии, что весовой множитель w_i выбирается обратно пропорциональным сумме мощностей сигнала и помехи P_Σ . При трехкратном разнесении средняя вероятность ошибки приема определяется выражением

$$P_e(L=3) = (1-\rho)^3 \frac{1}{8} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{E_b}{N_0} \right) \times \left\{ 4 + \frac{3}{4} \frac{E_b}{N_0} + \frac{1}{32} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^2 \right\} + \rho(1-\rho)^2 \frac{3}{8} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{E_b/3}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{2E_b/3}{N_0} \right) \right] \times \left\{ 4 + \frac{1}{4} \left(\frac{E_b}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{2E_b}{N_0} \right) + \frac{1}{32} \left(\frac{E_b/3}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{2E_b/3}{N_0} \right)^2 \right\} + \rho^2(1-\rho) \frac{3}{8} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2E_b/3}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{E_b/3}{N_0} \right) \right] \times \left\{ 4 + \frac{1}{4} \left(\frac{2E_b}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{E_b}{N_0} \right) \right\} \quad (3)$$

$$+ \frac{1}{32} \left(\frac{2E_b/3}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{E_b/3}{N_0} \right)^2 \left\{ + \rho^3 \frac{1}{8} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{E_b}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} \right) \times \left\{ 4 + \frac{3}{4} \frac{E_b}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} + \frac{1}{32} \left(\frac{E_b}{N_0 + P_n T_h / \rho 2M} \right)^2 \right\} \right\},$$

где M – количество частот; E_b – энергия символа (бита).

Помимо разнесения символа по частоте в режиме ППРЧ, имеет смысл применение помехоустойчивых кодов [12–14] для борьбы с организованными помехами. Их применение позволяет ожидать снижения эффективности постановки помехи.

Вероятность битовой ошибки при приеме цифровых сигналов является важным показателем, по которому ведут сравнение систем связи, использующих различные коды. В [13–15] приведены подробные выводы выражений для вероятности ошибки декодирования с жестким решением. При этом максимальное число исправляемых ошибок определяется соотношением

$$t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor,$$

где d – минимальное кодовое расстояние, равное наименьшему значению расстояния Хэмминга; $[x]$ обозначает целую часть числа x .

В блоковых кодах $[n, k]$ число информационных бит составляет k , а длина кода – n . Для двоичных систем передачи информации вероятность битовой ошибки равна вероятности ошибки принятия символа. Предполагается, что ошибки принятия символа статистически независимы, тогда вероятность битовой ошибки при декодировании жестких решений можно найти по формуле [15]:

$$P_e \approx \frac{d}{n} \sum_{i=t+1}^d \binom{n}{i} P_b^i (1-P_b)^{n-i} + \frac{1}{n} \sum_{i=d+1}^n i \binom{n}{i} P_b^i (1-P_b)^{n-i}, \quad (4)$$

где P_b – вероятность ошибки приема канального символа, которая с учетом того, что энергия канального символа $E_c = (k/n)E_b = R_c E_b$ определяется выражениями (2) и (3).

ДИСКРЕТНОЕ СЛОЖЕНИЕ СУБСИМВОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЛОКОВЫХ КОДОВ

На рис. 3–4 в логарифмическом масштабе приведены зависимости средней вероятности ошибки на бит P_e от отношения сигнал/помеха в режиме ППРЧ при совместном использовании принципа разнесения символа и помехоустойчивого кодирования.

Зависимости представлены для случая передачи без разнесения и кодирования, для случая трехкратного разнесения символа по частоте, а также для случая совместного использования трехкратного разнесения по частоте и простых блоковых кодов – кода Хэмминга (7, 4) и Голея (23, 12). Кривые получены для сигналов ЧТ в режиме ППРЧ и при отношении сигнал/шум приемника, равном 15 дБ, и доле поражаемых помехой частот ($\rho = 0.1, 0.2$).

Из рисунков видно, что применение режима внутрисимвольной ППРЧ на основе мажоритарного правила с использованием простых блоковых кодов с декодированием жестких решений позволяет на порядки снизить вероятность битовой ошибки при небольших отношениях сигнал/преднамеренная помеха, соответствующих по физическому смыслу мощной помехе по отношению к полезному сигналу. Увеличение избыточности или применение более мощных кодов с более высокой корректирующей способностью позволяет значительно повысить помехоустойчивость передачи информации.

ВЕСОВАЯ ОБРАБОТКА СУБСИМВОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЛОКОВЫХ КОДОВ

Весовая обработка субсимволов заключается в адаптивном взвешивании выборки сигналов на выходах квадратичных детекторов перед их сложением [1]. Зависимости вероятности битовой ошибки для этого

случая от отношения сигнал/помеха для сигналов ЧТ в режиме ППРЧ при воздействии шумовой помехи в части полосы с различными долями поражаемых частот ($\rho = 0.1, 0.2$) и отношением сигнал/шум приемника 15 дБ представлены на рис. 5–6.

Кривые, показанные черной линией, относятся к случаю применения режима ППРЧ без разнесения символов ($L = 1$) и без применения помехоустойчивого кодирования; красной линией – при трехкратном разнесении символа; синей – при трехкратном разнесении символа с использованием кода Хэмминга (7, 4); зеленой – при трехкратном разнесении символа с использованием кода Голея (23, 12).

Анализ полученных кривых позволяет отметить, что при комплексном использовании частотного разнесения и помехоустойчивого кодирования значительно снижается вероятность битовой ошибки при приеме сигналов в режиме ППРЧ с ЧТ в области небольших значений отношения сигнал/помеха. При небольших значениях отношения сигнал/помеха, соответствующих по физическому смыслу мощной преднамеренной помехе, совместное использование разнесения символа по частоте и простых блоковых кодов позволило снизить вероятность битовой ошибки на два и более порядков. При этом полученный выигрыш в отношении сигнал/помеха за счет использования разнесения символа по частоте и кодирования при заданной вероятности битовой ошибки 10^{-5} составляет более 5 дБ для случая трехкратного разнесения и использования кода Хэмминга (7, 4) с долей поражаемых частот $\rho = 0.1$ и более 3 дБ при $\rho = 0.2$. Применение более мощных кодов с более высокой корректирующей способностью позволяет значительно повысить помехоустойчивость передачи информации, например, использование кода

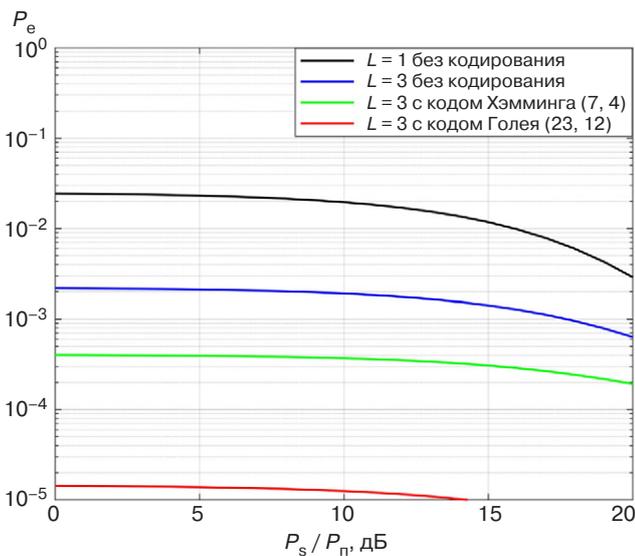


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки на бит P_e от отношения сигнал/помеха при использовании частотного разнесения и блоковых кодов ($\rho = 0.1$)

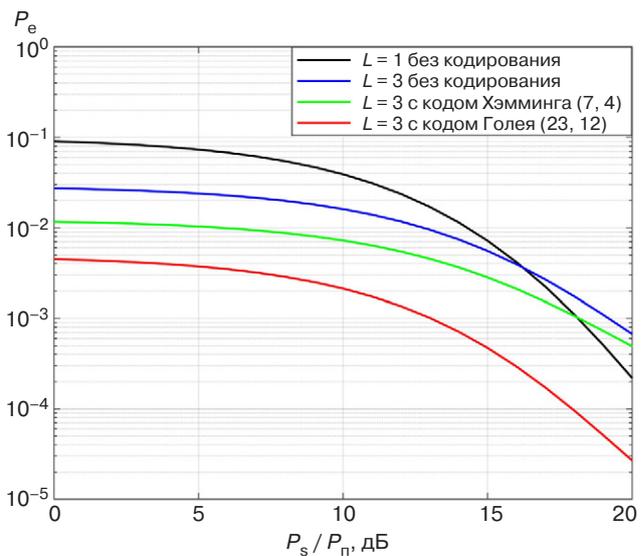


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки на бит P_e от отношения сигнал/помеха при использовании частотного разнесения и блоковых кодов ($\rho = 0.2$)

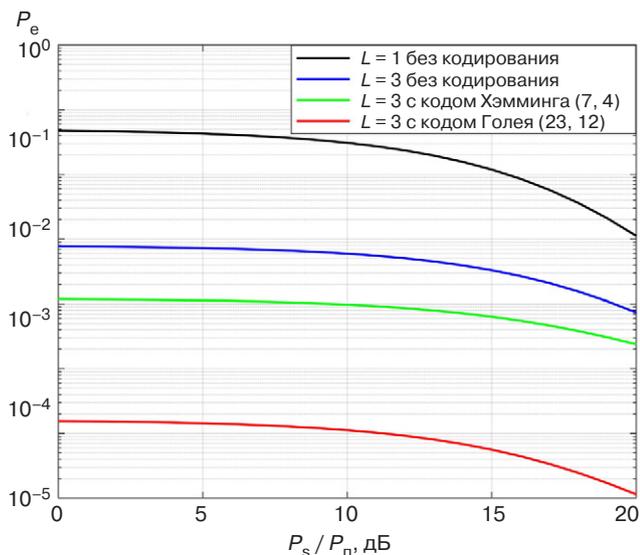


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки на бит P_e от отношения сигнал/помеха при использовании частотного разнесения с весовой обработкой и блочных кодов ($\rho = 0.1$)

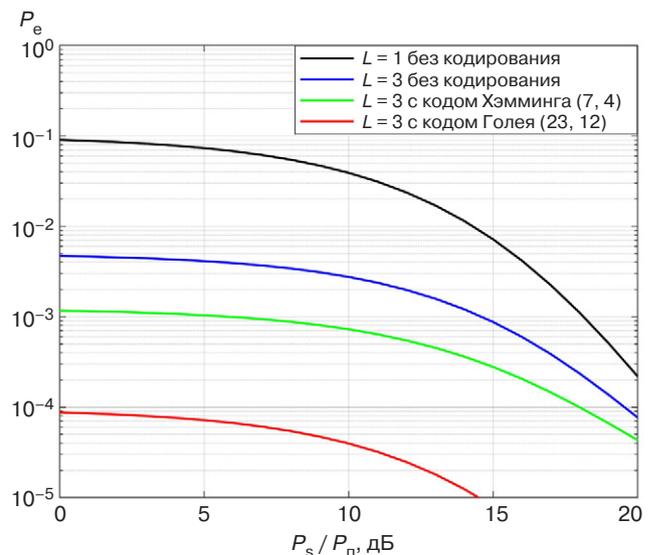


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки на бит P_e от отношения сигнал/помеха при использовании частотного разнесения с весовой обработкой и блочных кодов ($\rho = 0.2$)

Голя (23, 12) при трехкратном разнесении символа в режиме ППРЧ позволило получить энергетический выигрыш 13 дБ с заданной $P_e = 10^{-5}$ и $\rho = 0.2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы.

В интересах эффективного использования частотно-энергетического ресурса для систем радиосвязи целесообразно применение режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Эффективным видом организованных преднамеренных помех для такой системы радиосвязи, а также с точки зрения рационального использования мощности преднамеренной помехи, является шумовая помеха

в части полосы частот (сосредоточенная по спектру помеха). Для борьбы с такой помехой целесообразно применять режим внутрисимвольной ППРЧ. Кроме того, для значительного повышения помехоустойчивости приема сигналов в присутствии преднамеренной помехи в части полосы предлагается совместное использование принципа частотно-временного разнесения информационных символов и помехоустойчивых кодов. При этом целесообразно использовать алгоритм взвешивания и сложения разнесенных сигналов при некогерентном детектировании с последующим декодированием.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Шестопапов В.И. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты*. М.: Радио и связь; 2000. 384 с. ISBN 5-256-01392-0
2. Miller L.E., Lee J.S., Kadrichu A.P. Probability of error analyses of a BFSK frequency-hopping system with diversity under partial-band jamming interference. Part III: Performance of a square – law self-normalizing soft decision receivers. *IEEE Transactions on Communications*. 1986;34(7):669–675. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1986.1096609>
3. Парамонов А.А., Хоанг Ван З. Прием сигналов относительной фазовой телеграфии с весовой обработкой субсимволов в системах передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.2>

REFERENCES

1. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty* (Noise immunity of radio communication systems with spreading of spectrum signals by the method of pseudo-random tuning of the operating frequency). Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 384 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01392-0
2. Miller L.E., Lee J.S., Kadrichu A.P. Probability of error analyses of a BFSK frequency-hopping system with diversity under partial-band jamming interference. Part III: Performance of a square – law self-normalizing soft decision receivers. *IEEE Transactions on Communications*. 1986;34(7):669–675. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1986.1096609>

4. Парамонов А.А., Хоанг Ван З. Помехоустойчивость передачи цифровой информации в системе радиосвязи сигналами ДОФТ с ППРЧ при воздействии шумовой помехи в части полосы. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.8>
5. Хоанг Ван З., Парамонов А.А. Эффективное использование частотно-энергетического ресурса в системах передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при низкой скорости передачи. В сб.: «Системы компьютерной математики и их приложения»: мат. XX международной научной конф. Смоленск: Изд-во СмолГУ; 2019. Вып. 2. Ч. 1. С. 84–89.
6. Журавлев В.И. *Поиск и синхронизация в широкополосных системах*. М.: Радио и связь; 1986. 240 с.
7. Каплин Е.А., Клионский М.Б., Либединский Е.В., Яковлев А.В. Устройство синхронизации в системе радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты: Патент на изобретение RU 2510933. Дата публикации: 10.04.2014.
8. Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е. Алгоритмы временной и частотной синхронизации сигналов с ППРЧ. Ч. 1. Вхождение в синхронизм. *Теория и техника радиосвязи*. 2017;2:23–32.
9. Cornwall M.K., Haas H.P. Frequency hopping spread spectrum system with high sensitivity tracking and synchronization for frequency unstable signals: US Patent 6934316B2. Publ. 23.08.2005.
10. Vandewiele B.J.L., Roovers R.L.J. Fast synchronization for frequency hopping systems: Patent WO2007036847. Publ. 05.04.2007.
11. Проакис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X
12. Парамонов А.А., Хоанг Ван З. Эффективность применения помехоустойчивого кодирования в системах передачи цифровой информации с широкополосными сигналами. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.20>
13. Кларк Дж., мл., Кейл Дж. *Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи*: пер. с англ. М.: Радио и связь; 1987. 388 с.
14. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. *Теория кодов, исправляющих ошибки*: пер. с англ. М.: Связь; 1979. 744 с.
15. Torrieri D.J. The information-bit error rate for block codes. *IEEE Transactions on Communications*. 1984;32(4):474–476. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1984.1096082>
3. Paramonov A.A., Hoang Van Zung. Reception of differential binary phase shift keying signals with weight processing of sub-symbols in information transmission systems with frequency hopping spread spectrum. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2020;10 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.2>
4. Paramonov A.A., Hoang Van Z. Noise immunity of digital information transmission in a radio communication system by DQPSK signals with frequency hopping spread spectrum in the partial-band jamming noise. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2021;2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.8>
5. Hoang Van Z., Paramonov A.A. The efficient use of frequency-energy resource in information transmission systems with a frequency hopping spread spectrum at low rate of transmission. In: *XX mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Sistemy komp'yuternoi matematiki i ikh prilozheniya"* (Proc. of the XX International Scientific Conference "Systems of computer mathematics and their applications"). Smolensk: SmolGU; 2019. V. 20. Part 1, p. 84–89. (in Russ.).
6. Zhuravlev V.I. *Poisk i sinkhronizatsiya v shirokopolosnykh sistemakh (Search and synchronization in broadband systems)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1986. 240 p. (in Russ.).
7. Kaplin E.A., Klionskii M.B., Libedinskii E.V., Yakovlev A.V. Device for synchronization in radio communication system with programmed operational frequency tuning: RU Pat. 2510933. Publ. 10.04.2014. (in Russ.).
8. Charkin D.Yu., Alekhin S.Yu., Grigor'ev E.V., Limarev A.E., Prokhorov V.E. Algorithms of time and frequency synchronization of FH signals. Part 1. Synchronism initialization. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Theory and Technology*. 2017;2:23–32 (in Russ.).
9. Cornwall M.K., Haas H.P. Frequency hopping spread spectrum system with high sensitivity tracking and synchronization for frequency unstable signals: US Patent 6934316B2. Publ. 23.08.2005.
10. Vandewiele B.J.L., Roovers R.L.J. Fast synchronization for frequency hopping systems: Patent WO2007036847. Publ. 05.04.2007.
11. Proakis J.G. *Tsifrovaya svyaz' (Digital Communications)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01434-X
12. Paramonov A.A., Hoang Van Zung. Efficiency of application of error-correcting coding in digital information transmission systems with wideband signals. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2020;12 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.20>
13. Clark J.C. Jr., Cain J.B. *Error-correcting coding for digital communications*. New York and London: Plenum Press; 1981. 422 p.
[Clark J.C. ml., Cain J.B. *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoi svyazi (Error Correction Coding in Digital Communication Systems)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1987. 388 p. (in Russ.).]

14. McWilliams F.J., Sloane N.J.A. *The theory of error-correcting codes*. Amsterdam etc.; 1977. 762 p.
[McWilliams F.J., Sloane N.J.A. *Teoriya kodov, ispravlyayushchikh oshibki (Theory of error-correcting codes)*. Moscow: Svyaz'; 1979. 744 p. (in Russ.).]
15. Torrieri D.J. The information-bit error rate for block codes. *IEEE Transactions on Communications*. 1984;32(4):474–476. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1984.1096082>

Об авторах

Парамонов Алексей Анатольевич, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: paramonov@mirea.ru.

Хоанг Ван Зунг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tuandung@mail.ru.

About the authors

Aleksei A. Paramonov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: paramonov@mirea.ru.

Hoang Van Zung, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tuandung@mail.ru.