

А.А. КРЕЩУК, В.В. ЗЯБЛОВ, В.Г. ПОТАПОВ  
**СИГНАЛЬНО-КОДОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ В  
УСЛОВИЯХ МОЩНЫХ ПОЛОСОВЫХ ПОМЕХ**

---

*Крещук А.А., Зяблов В.В., Потاپов В.Г. Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех.*

**Аннотация.** Данная работа посвящена вопросам организации передачи в «плохих» каналах, в которых отношение сигнал/шум мало, и присутствует мешающий сигнал, с использованием частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот. В данной работе предложено два новых алгоритма демодуляции, существенно более устойчивый к наличию мощного мешающего сигнала. В результате компьютерного моделирования показано, что предложенный алгоритм демодуляции в условиях сильного мешающего сигнала имеет более высокую корректирующую способность, чем известные ранее.

**Ключевые слова:** ППРЧ, критерий согласия, критерий однородности, частотно-позиционное кодирование, борьба с помехами.

*Kreshchuk A.A., Zyblov V.V., Potapov V.G. Signal Code Constructions for Channels with Powerful Wideband Interference.*

**Abstract.** In this paper, we consider data transmission in “bad” channels with low snr and wideband interference. We propose a code construction based on frequency shift keying with fast frequency hopping. We also propose two new decoders that are more robust in regard to interference compared to the known OSN decoder. The computer simulation has shown that the proposed decoders have higher error correction efficiency than the previously known decoder.

**Keywords:** FFHFSK; Frequency-Shift Keying; Fast Frequency Hopping; Interference.

---

**1. Введение.** В настоящее время большинство работ по теории кодирования и коммуникациям предполагают использование канала с большим отношением сигнал/шум. Тем не менее задача передачи данных в частотно-селективных каналах с низким отношением сигнал/шум актуальна. Примером такого канала может служить канал передачи по линиям передачи электроэнергии [1]. В таком канале коэффициент передачи на некоторых диапазонах частот достигает -40 дБ.

Другим примером передачи в «плохом» канале является надежная передача в нелицензируемом диапазоне радиочастот на большие расстояния. На этих частотах могут передавать различные широкополосные излучатели, такие как точки доступа Wi-Fi. Уровень такого мешающего сигнала может превышать 30 дБ относительно полезного сигнала. Эволюция коэффициентов передачи канала может быть приближена моделью COST 207.

В данной работе предложена конструкция для некоторых таких каналов, основанная на частотно-позиционном кодировании с быстрой перестройкой частот. Для ее приема было предложено два новых алгоритма декодирования.

Многие результаты данной работы были ранее опубликованы в работе [2]. В работе [3] была рассмотрена возможность применения продолженного метода приема для систем множественного доступа. В работах [4] и [5] были исследованы каскадные конструкции с декодированием внутренних кодов по решетке, также использующие описанные в данной работе алгоритмы. В работе [6] была предложена аналогичная конструкция, поддерживающая одновременную работу 200 пользователей. Некоторые обобщения этих результатов представлены в работе [7].

Во втором разделе статьи описана используемая модель канала. Затем, в разделе 3 вводится система передачи данных. В разделе 4 приводятся некоторые существующие и два новых алгоритма демодуляции такого сигнала, в том числе новый статистический декодер, основанный на критерии Колмогорова-Смирнова, в подразделе 4.3и новый ранговый декодер в подразделе 4.2. Для оценки корректирующей способности предложенных декодеров проведено численное моделирование. Его результаты представлены в разделе 5.

**2. Модель канала.** В настоящее время существует множество различных моделей распространения сигнала, построенных для различных условий распространения. В общем виде такой канал можно записать в виде:

$$r(t) = \sum_{i=0}^{\tau} h(t,i)s(t-i) + \eta(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  — сигнал, переданный в момент времени  $t$ ,  $r(t)$  — сигнал, полученный в момент времени  $t$ ,  $h(t,i)$  — импульсный отклик канала в момент времени  $t$  и  $\eta(t)$  — белый гауссов шум. Большинство моделей канала можно представить в виде мультипликативного в частотной области канала с белым гауссовым шумом и некоторым законом эволюции. Таким образом, при использовании OFDM модуляции в квазистационарном канале, формулу (1) можно переписать в виде:

$$r_i = h_i s_i + \eta_i, \quad (2)$$

где  $r_i$  —  $i$ -й канал на выходе OFDM приемника,  $s_i$  —  $i$ -й канал на входе OFDM передатчика,  $h_i$  — коэффициенты передачи канала и  $\eta_i$  — белый гауссов шум. В дальнейшем мы будем рассматривать только частотное представление канала.

В данной работе использовался канал, описываемый в модели COST 207. Для различных условий передачи, таких как равнина, холмистая местность или городские условия, и различных скоростей дви-

жения приемника и передатчика построены модели, описывающие эволюцию коэффициентов  $h_t$  во времени.

**3. Сигнально-кодовая конструкция.** Для каналов с малым отношением сигнал/шум достаточно часто используется частотно-позиционное кодирование (англ. frequency shift keying). Пусть у приемника и передатчика есть диапазон частот, в котором выделено  $q$  несущих частот  $F_i$ ,  $i = \overline{1, q}$ . При передаче символа  $i$  в канал передается синусоидальный сигнал с частотой  $F_i$ . Выберем частоты  $F_i$  так, чтобы на интервале передачи одного символа все передаваемые сигналы были ортогональны. Тогда на передатчике и на приемнике мы сможем использовать OFDM модуляцию.

Для увеличения помехозащищенности нередко применяют быструю перестройку частот. При этом приёмнику и передатчику известны перестановки частот  $\pi_t(\vec{x})$ , где  $t$  — номер символа OFDM. Каждый OFDM символ передается несколько раз с разными перестановками частот. Перед демодуляцией сигнал подвергается обратной перестановке  $\pi_t^{-1}(\vec{x})$ . Таким образом, на вход демодулятору подается матрица размера  $q \times T$ , где  $q$  — порядок модуляции, а  $T$  — количество перестановок (прыжков по частотам) на один символ. Во всех описанных ниже алгоритмах элементами матрицы являются энергии отдельных сигналов, то есть абсолютные значения принятых комплексных символов.

В данной работе используется более сложная схема частотно-позиционного кодирования, когда каждый символ кодирует не одну частоту, а некоторую последовательность из  $n$  частот. Эти последовательности мы будем называть *трафаретом*. При этом для каждого OFDM символа используется одна частота из этой последовательности.

Для увеличения скорости передачи мы будем использовать несколько наборов из  $q$  частот. Разные наборы частот при этом будут использоваться для передачи разных информационных символов. Обозначим число таких наборов  $M$ .

Обозначим множество используемых трафаретов  $\mathcal{C}$ . Отдельные трафареты могут быть представлены как в виде последовательности частот  $\vec{c}^i = (c_1^i, \dots, c_T^i)$ , так и в матричной форме  $\mathbf{C}^i$ , где

$$\mathbf{C}_{ij}^a = \begin{cases} 1, & j = c_t^a \\ 0, & j \neq c_t^a \end{cases}.$$

Тогда процедура кодирования будет устроена следующим образом:

$$\vec{R}_{it} = R_{c_t^i t}.$$

Пусть заданы информационные символы  $i_1, \dots, i_M, i_j = \overline{1, |\mathcal{C}|}$ .  
 Запишем кодовое слово в таком виде:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} c_1^{i_1} \\ c_2^{i_2} \\ \vdots \\ c_M^{i_M} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}.$$

К каждому столбцу полученной матрицы применим отдельную перестановку частот  $\pi_t$ .

В качестве множества трафаретов предлагается выбирать слова хорошего линейного кода длины  $T$  над полем  $GF(q^k)$ . В данной работе в качестве такого кода выбран расширенный код Рида-Соломона  $(q + 1, 2, q)_q$ .

**4. Алгоритмы демодуляции.** Многие алгоритмы демодуляции являются развитием демодуляции по максимальной суммарной энергии. Его можно описать следующей формулой:

$$\text{demod}(R) = \max_{i=1, |\mathcal{C}|} \sum_{t=1}^T R_{c_t^i t},$$

где  $R$  — матрица принятого сигнала, первый индекс которой обозначает номер несущей частоты, а второй индекс обозначает номер OFDM символа. Можно представить, что демодулятор прикладывает к полученной матрице поочередно каждый трафарет и суммирует энергию, находящуюся в позициях этого трафарета.

Известно, что для гауссовского канала демодулятор по максимальной суммарной энергии является демодулятором по максимуму правдоподобия. К сожалению, в канале с замираниями его корректирующая способность становится хуже на несколько дБ. При наличии мощного мешающего сигнала его использование становится весьма нерациональным. В случае простого частотно-позиционного кодирования существует несколько модификаций данного алгоритма, позволяющих частично решить эти проблемы. Многие из них описаны в [8]. Ниже мы опишем одну из них. Для применения их к используемой в данной работе сигнально-кодовой конструкции необходимо вместо принятой матрицы  $R$  использовать матрицу  $\tilde{R}$ , определенную следующим образом:

$$\tilde{R}_{it} = R_{c_t^i t}.$$

**4.1 Декодер OSN.** Алгоритм работы декодера Order Statistics-Normalized Envelope Detection Based Diversity Combining [8] (OSN) можно схематично описать следующим образом:

1. Отсортируем каждую строку матрицы  $\tilde{R}$  по возрастанию энергии.
2. Отнормируем каждый столбец полученной матрицы, то есть разделим каждый элемент столбца на сумму всех элементов столбца.
3. Применим к полученной матрице демодуляцию по максимуму суммарной энергии.

Данный алгоритм неплохо работает для каналов с замираниями, но при наличии мощного мешающего сигнала он проигрывает предложенным алгоритмам.

**4.2 Ранговый критерий.** Для снижения вероятности ошибки при наличии мощного мешающего сигнала мы решили отказаться от использования самого значения энергии принятого сигнала, ограничившись лишь номером каждого символа в вариационном ряду, построенном по матрице  $R$ . Уход от использования значений энергии позволяет повысить устойчивость к мешающему сигналу.

Введем следующее обозначение:

$$Y_{it} = |\{(l,m): R_{it} > R_{lm}\}|.$$

Тогда решение, принимаемое ранговым декодером, можно записать как:

$$\max_{i=1,|\mathcal{C}|} \sum_{t=1}^T Y_{c_{it}}.$$

**4.3 Статистический демодулятор, основанный на критерии Колмогорова-Смирнова.** Пусть есть некоторый статистический критерий неоднородности выборок  $x$  и  $y$ , имеющий метрику  $K(x,y)$ , то есть чем больше  $K(x,y)$ , тем с большим уровнем допустимости можно сказать, что  $x$  и  $y$  имеют разное распределение вероятности.

Основная идея алгоритма демодуляции заключается в том, что демодулятор вычисляет  $K_i = K(\tilde{R}_i, R)$ , где  $\tilde{R}_i$  —  $i$ -ая строка матрицы  $\tilde{R}$ . Благодаря наличию псевдослучайных перестановок распределение шума и помех не может зависеть от выбора строки матрицы  $\tilde{R}$ , в то время как полезный сигнал полностью присутствует лишь в одной из ее строк. Таким образом, в правильной строке (для переданного траффарета) различие в распределениях будет максимальным. Поэтому выходом демодулятора является число  $\max_i K_i$ .

В качестве критерия однородности мы предлагаем использовать критерий Колмогорова-Смирнова. В терминах эмпирических функций

распределения критерий Колмогорова-Смирнова представлен следующей метрикой:

$$K(R,i) = \max_x |F_i(x) - F(x)|, \quad (3)$$

где  $F_i(x)$  — эмпирическая функция распределения  $i$ -й строки матрицы  $\tilde{R}$ , а  $F(x)$  — эмпирическая функция распределения всей матрицы  $R$ .

Такая формулировка критерия Колмогорова-Смирнова удобна для понимания, но для непосредственного вычисления удобнее переписать этот критерий в терминах рангов. Для этого введем матрицу  $\tilde{Y}$ ,  $i$ -я строка которой содержит элементы  $Y_{c_{it}}$ , упорядоченные по возрастанию.

Так как функции  $F_i(x)$  и  $F(x)$  являются ступенчатыми, достаточно проверить значение метрики (3) в точках  $R_{it}$ . По определению,  $Y_{it} = F(R_{it}) \cdot T \cdot q$ . Максимум  $K(R,i)$  достигается только в точках  $R_{it} - 0$  и  $R_{it} + 0$ . Таким образом, перепишем выражение (3) в виде:

$$K(R_i, R) = \max_t \max(qt - \tilde{Y}_{it}, (\tilde{Y}_{it} - 1) - q(t - 1)). \quad (4)$$

**5. Результаты моделирования.** Для оценки вероятности ошибки в среде MATLAB™ была написана программа, позволяющая проводить моделирование для выбранной модели канала, алгоритма демодуляции и типа помехи. Было предложено две сигнально-кодовые конструкции: помехозащищенная и более простая. Параметры более простой сигнально-кодовой конструкции:

- Порядок модуляции  $q$  равен 256.
- Использовался только один набор частот,  $M = 1$ .
- Количество скачков на один символ  $T$  равно 10.
- Трафареты были заданы как  $c_i = i$ ,  $i = \overline{1, q}$  и  $t = \overline{1, T}$ .
- Длина преобразования Фурье составляет 2048.
- Мешающий сигнал имеет мощность, на 30 дБ превышающую мощность полезного сигнала, и имеет ширину полосы в 25% полосы передача.

Параметры более помехозащищенной сигнально-кодовой конструкции:

- Порядок модуляции  $q$  равен 8.
- Использовалось  $M = 22$  наборов частот.
- Количество скачков на один символ  $T$  равно 45.
- Трафареты были построены на пятикратном повторении кода  $[9, 2, 8]_8$ , то есть  $[45, 2, 40]_8$  коде.
- Длина преобразования Фурье составляет 2048.

- Мешающий сигнал имеет мощность, на 20 или 30 дБ превышающую мощность полезного сигнала, и имеет ширину полосы либо в четверть, либо в половину ширины полосы приемника.

Рассмотрим сначала более помехозащищенную конструкцию. На рисунке 1 представлены результаты моделирования предложенной конструкции при использовании разных алгоритмов приема. Декодер по критерию Колмогорова-Смирнова (далее декодер КС), описанный в разделе 4.3, обозначен в легенде «К.-С.». Ранговый декодер, описанный в разделе 4.2, обозначен «Ранг», а декодер OSN, описанный в разделе 4.1, — «OSN». Канал соответствует 12-лучевой модели для холмистой местности при относительной скорости движения передатчика 120 км/ч. Мощность мешающего сигнала превышает мощность полезного сигнала в 1000 раз (на 30 дБ). При этом мешающий сигнал занимает четверть полосы передачи.

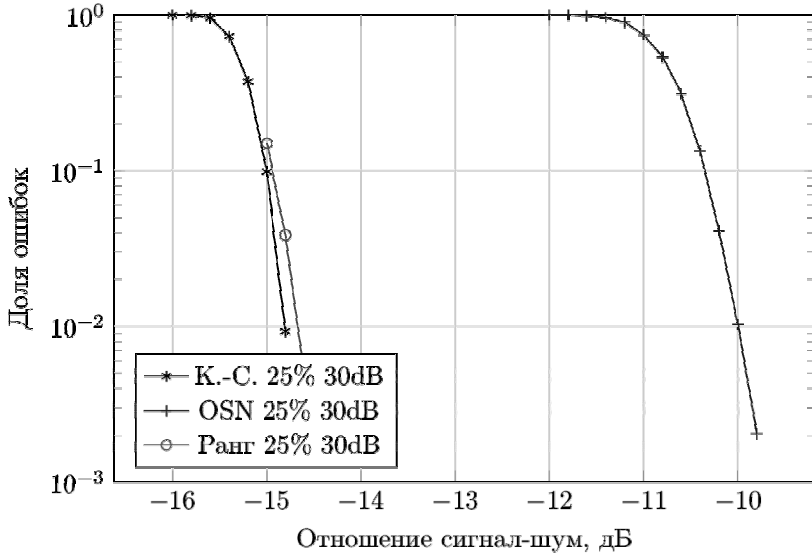


Рис. 1. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

Из рисунка видно, что декодер по критерию Колмогорова-Смирнова и ранговый декодер имеют близкую корректирующую способность и выигрывают около 5 дБ по сравнению с известным OSN декодером.

На рисунке 2 мощность мешающего сигнала была уменьшена до 20 дБ. При этом рабочий диапазон для декодера КС изменился очень слабо, а для остальных декодеров он заметно увеличился. В данных условиях наибольшей корректирующей способностью обладает ранговый декодер.

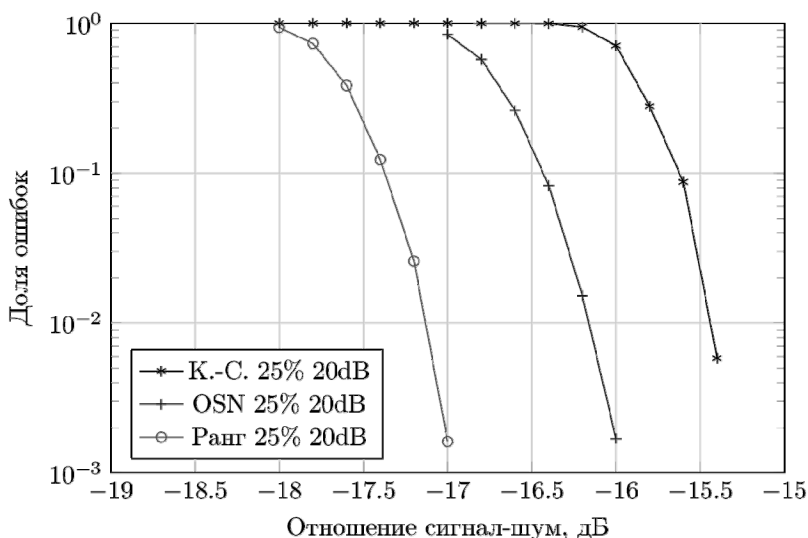


Рис. 2. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 20 дБ относительно полезного сигнала

На рисунке 3 представлены результаты моделирования для мешающего сигнала в половину полосы полезного сигнала, имеющего мощность в 1000 раз превышающего мощность полезного сигнала. К сожалению, добиться устойчивой работы рангового декодера в этих условиях не удалось. При этом декодер КС выигрывает у декодера OSN 5 дБ. По сравнению со случаем, когда помеха занимает четверть полосы, изображенный на рисунке 1 рабочий диапазон отношений сигнал/шум уменьшился на 5 дБ.



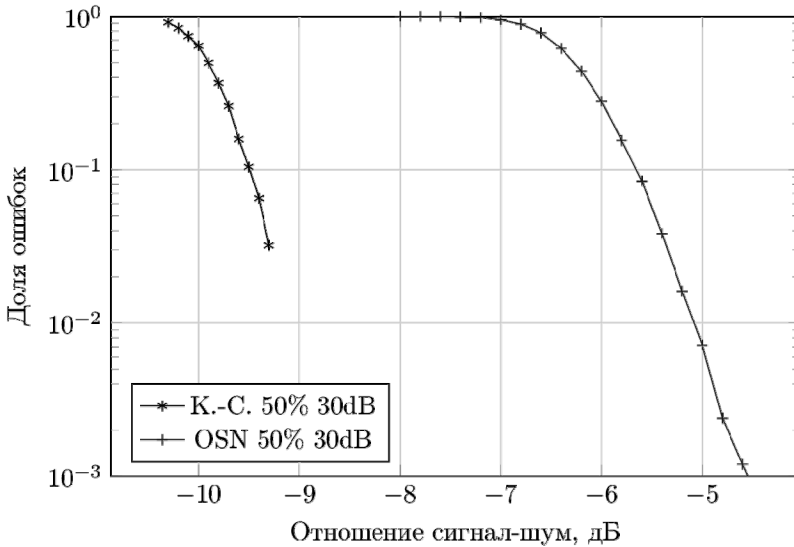


Рис.3. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

Для более простой сигнально-кодовой конструкции результаты моделирования выглядят по-другому. На рисунке 4 редставлены результаты сравнения корректирующей способности для канала с мощным мешающим сигналом, занимающим четверть полосы передачи. Работа рангового декодера для этого случая не исследовалась. Кривая, соответствующая вероятности неправильного приема демодулятором по сумме энергий, описанном в начале раздела 4, практически не отклоняется от уровня 0.5, а значит, передача данных с этим декодером весьма нерациональна. Как видно из рисунка, в этих условиях выигрыш при использовании статистического демодулятора вместо известного декодера OSN превосходит 10 дБ.

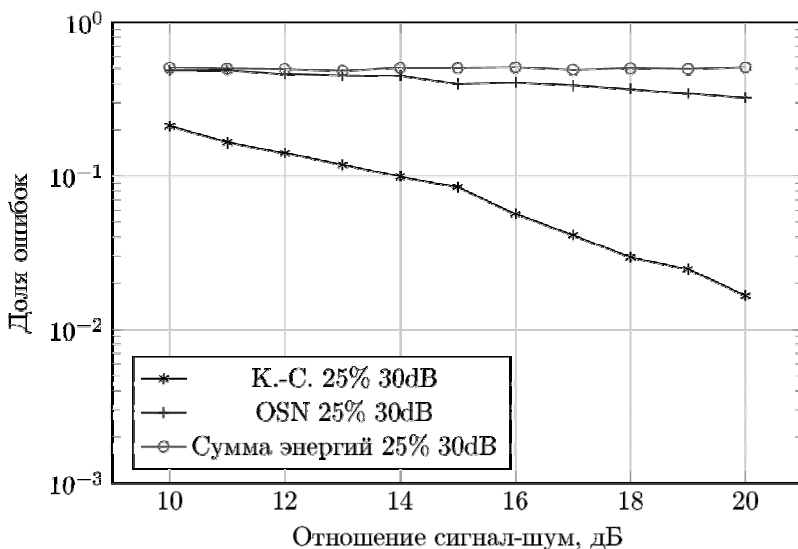


Рис. 4. Корректирующая способность представленной высокоскоростной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

**6. Заключение.** Задача построения системы передачи данных для «плохих» каналов актуальна. Одной из сигнально-кодовых конструкций, используемых для ее решения, является частотно-позиционное кодирование с быстрой перестройкой частот. Существующие алгоритмы демодуляции плохо работают при наличии мощного мешающего сигнала. В работе предложена сигнально-кодовая конструкция, основанная на частотно-позиционном кодировании, имеющая скорость около 1,5 бит на OFDM символ. Данная конструкция позволяет организовывать передачу данных в каналах с мощными широкополосными помехами и высоким уровнем шума, в том числе при отношении сигнал-помеха -30 дБ и отношении сигнал/шум -9 дБ.

В работе также предложено два алгоритма приема: декодер КС и ранговый декодер. Первый более устойчив к присутствию в канале очень мощных широкополосных помех, в то время как последний имеет более широкий рабочий диапазон отношений сигнал/шум для более слабых или более узкополосных помех. Компьютерное моделирование также показало, что в каналах с широкополосной помехой декодер КС выигрывает 5 дБ у известного декодера OSN. В указанных условиях демодулятор по сумме энергий дает вероятность ошибки близкую к 0,5. Таким образом, мы можем рекомендовать предложенные алгорит-

мы демодуляции к использованию. Выбор конкретного алгоритма из предложенных зависит от конкретных условий применения.

Благодаря использованию предложенных в работе методов декодирования, в работе [6] удалось построить похожую сигнально-кодую конструкцию для систем множественного доступа, где в одной полосе частот работают несколько сотен пользователей.

## Литература

1. Langfeld P. OFDM für die schnelle Powerline Communication // Mensch & Buch: Berlin. 2002.
2. Крещук А.А., Потанов В.Г. Некоторые статистические демодуляторы для частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот // Автоматика и телемеханика. 2013. Вып. 74. №. 10. С. 1688–1695.
3. Kreshchuk A., Potapov V. New coded modulation for the frequency hopping OFDMA system // Proceedings of 13<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2012. pp. 209–212.
4. Osipov D. Order statistics-based decoder with reliability information in a multiple access system under interference // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2014. pp. 283–288.
5. Osipov D. Inner Convolutional Codes and Ordered Statistics Decoding in a Multiple Access System Enabling Wireless Coexistence // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Workshop on Multiple Access Communications. 2013. pp 33–38.
6. Фролов А.А., Зяблов В.В. Метод кодирования для Q-частотного гауссовского канала с S пользователями // Информационные Процессы. 2014. Вып. 14. №. 2. С. 151–159.
7. Frolov A., Zyablov V. A new coding method for a multiple-access system with a large number of active users // In Proc. IEEE Information Theory Workshop. 2015. pp 1–5.
8. Ahmed S., Yang L.L., Hanzo L. Diversity Combining for Fast Frequency Hopping Multiple Access Systems Subjected to Nakagami-m Fading // Proceedings of 6<sup>th</sup> IEE International Conference on 3G and Beyond. 2005. pp. 235–239.

## References

1. Langfeld P. OFDM für die schnelle Powerline Communication. Mensch & Buch: Berlin. 2002.
2. Kreshchuk A.A., Potapov V.G. [Statistical demodulators for frequency shift keying with fast frequency hopping]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2013. vol. 74. no. 10. pp. 1688–1695. (In Russ).
3. Kreshchuk A., Potapov V. New coded modulation for the frequency hopping OFDMA system. Proceedings of 13<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2012. pp. 209–212.
4. Osipov D. Order statistics-based decoder with reliability information in a multiple access system under interference. Proceedings of 14<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2014. pp. 283–288.
5. Osipov D. Inner Convolutional Codes and Ordered Statistics Decoding in a Multiple Access System Enabling Wireless Coexistence. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Workshop on Multiple Access Communications. 2013. pp 33–38.
6. Frolov A., Zyablov V. [A coding technique for Q-frequency S-user gaussian channel]. *Informacionnye Processy – Information Processes*. 2014. vol. 14. no. 12. pp. 151–159. (In Russ.).

7. Frolov A., Zyblov V. A new coding method for a multiple-access system with a large number of active users. In Proc. IEEE Information Theory Workshop. 2015. pp 1–5.
8. Ahmed S., Yang L.L., Hanzo L. Diversity Combining for Fast Frequency Hopping Multiple Access Systems Subjected to Nakagami-m Fading. Proceedings of 6<sup>th</sup> IEE International Conference on 3G and Beyond. 2005. pp. 235–239.

**Крещук Алексей Андреевич** — к-т техн. наук, младший научный сотрудник сектора № 3.2 прикладных проблем теории кодирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: теория помехоустойчивого кодирования. Число научных публикаций — 20. krsch@iitp.ru; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: (495)6995096.

**Kreshchuk Alexey Andreevich** — Ph.D., junior researcher of sector №3.2 - applied coding theory, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 20. krsch@iitp.ru; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: (495)6995096.

**Зяблов Виктор Васильевич** — д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией №3 информационных технологий передачи, анализа и защиты информации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование и защита информации. Число научных публикаций — 300. zyblov@iitp.ru; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: +7(495)6506214.

**Zyablov Victor Vasil'evich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of laboratory #3 - transmission, protection and analysis of information, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 300. zyblov@iitp.ru; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: +7(495)6506214.

**Потапов Владимир Георгиевич** — к-т техн. наук, заведующий сектором 3.2 прикладных проблем теории кодирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование и защита информации. Число научных публикаций — 30. potapov@iitp.ru, <http://iitp.ru/ru/users/326.htm>; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: +7(495)6995096.

**Potapov Vladimir Georgievich** — Ph.D., head of the sector 3.2 - applied coding theory, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 30. potapov@iitp.ru, <http://iitp.ru/ru/users/326.htm>; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: +7(495)6995096.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00150).

**Acknowledgements.** This research is supported by Russian Science Foundation (project №14-50-00150).

## РЕФЕРАТ

### *Крещук А.А., Зяблов В.В., Потанов В.Г.* **Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех.**

Данная работа посвящена вопросам организации передачи в «плохих» каналах, в которых отношение сигнал/шум мало, и присутствует мешающий сигнал, с использованием частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот. Стандартный алгоритм приема по максимальной сумме мощностей в таких условиях не работает.

В работе предложена сигнально-кодовая конструкция, основанная на частотно-позиционном кодировании, имеющая скорость около 1.5 бит на OFDM символ. Данная конструкция позволяет организовывать передачу данных в каналах с мощными широкополосными помехами и высоким уровнем шума, в том числе при отношении сигнал-помеха -30 дБ и отношении сигнал/шум -9 дБ.

В работе также предложено два алгоритма приема: декодер КС и ранговый декодер. Первый более устойчив к присутствию в канале очень мощных широкополосных помех, в то время как последний имеет более широкий рабочий диапазон отношений сигнал/шум для более слабых или более узкополосных помех. Компьютерное моделирование также показало, что в каналах с широкополосной помехой декодер КС выигрывает 5 дБ у известного декодера OSN. В указанных условиях демодулятор по сумме энергий дает вероятность ошибки близкую к 0,5. Таким образом, мы можем рекомендовать предложенные алгоритмы демодуляции к использованию. Выбор конкретного алгоритма из предложенных зависит от конкретных условий применения.

## SUMMARY

### *Kreshchuk A.A., Zyablov V.V., Potapov V.G.* **Signal Code Constructions for Channels with Powerful Wideband Interference.**

In this paper, we consider data transmission in “bad” channels with low snr and wideband interference. We propose a code construction based on frequency shift keying with fast frequency hopping having the rate of 1.5 bit per OFDM symbol. This code construction allows transmitting data in channels with strong wideband interference and high noise levels, including with SIR equal to -30 dB and SNR equal to -9 dB. We also propose two new decoders that are more robust in regard to interference compared with the known OSN decoder. The first one, based on the Kolmogorov-Smirnov criterion, is more robust in case of very strong interference, while the second decoder has a wider working range for weaker interference and interference with narrower band.

The computer simulation has shown that the proposed decoders have higher error correction efficiency than the previously known decoder. Thus, they can be recommended for use in real systems.