

УДК 621.396.2

А.А. Соловьёв, Б.С. Каменецкий, А.А. Литвинов
Санкт-Петербург, Россия

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ М-ИЧНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ
СТОХАСТИЧЕСКИХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ И LDPC КОДА**

A.A. Soloviev, B.S. Kamenetskii, A.A. Litvinov
St.-Petersburg, Russia

**ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF JOINT USING OF M-ARY
ORTHOGONAL STOCHASTIC BROADBAND SIGNALS AND LDPC CODES**

Рассмотрен вопрос повышения помехоустойчивости систем передачи информации за счет совместного использования M -ичных ортогональных стохастических широкополосных сигналов и кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC кодов). Дано обоснование выбора сигналов и способа кодирования, приведен анализ помехоустойчивости, определено рациональное сочетание параметров кодирования и модуляции.

LDPC КОД. КВАЗИЦИКЛИЧЕСКИЙ КОД. M -ИЧНЫЕ МНОГОЧАСТОТНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ. АЛГОРИТМ РИЧАРДСОНА–УРБАНКА.

The article considers the question of increasing of noise-immunity of communication systems due to joint using of M -ary orthogonal stochastic broadband signals and low density parity check codes (LDPC codes). The substantiation of signal selection and method of coding is given, the analysis of noise-immunity is given and the efficient combination of coding and modulation parameters is defined.

LDPC CODE. QUASI CYCLIC CODE. M -ARY MULTIFREQUENCY BROADBAND SIGNALS. NOISE-IMMUNITY. RICHARDSON-URBANKE ALGORITHM.

Рассмотрим возможность совместного использования LDPC кодов и M -ичных ортогональных стохастических многочастотных параллельно-последовательных широкополосных сигналов (СМПШПС).

Такая комбинация, с одной стороны, позволит обеспечить высокую помехозащищенность системе, а с другой – благодаря применению СМПШПС, наделит систему такими свойствами, как устойчивость к многолучевому распространению, эффективность использования спектра и высокая структурная скрытность. Подробнее о сочетании кодирования и ШПС описано в работе [1].

Цель статьи – численно оценить выигрыш кодирования, достижимый при некогерентном приеме с LDPC кодированием, а также определить общую помехоустойчивость системы связи с СМПШПС и LDPC кодированием и влияние на нее объема ансамбля ортогональных сигналов M и числа итераций алгоритма декодирования r .

Для выполнения указанных задач в среде Simulink пакета программ Matlab реализована модель системы связи с СМПШПС и LDPC кодированием. Блок-схема модели представлена на рис. 1.

Информационная последовательность длиной D , поступающая от источника информации

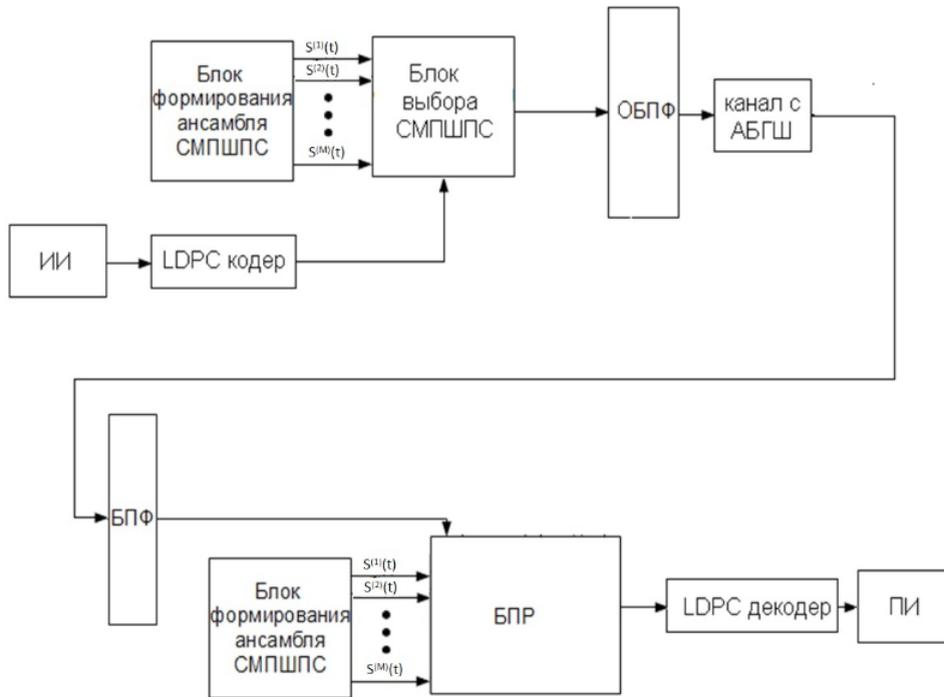


Рис. 1. Модель формирования и приема многочастотных M -ичных сигналов с кодированием и декодированием

(ИИ), кодируется в LDPC кодере, формируя кодовый вектор длиной $N=D/R$, где R – скорость кода. Структура кода полностью определяется его порождающей матрицей и будет описана ниже.

Используемая модуляция основана на передаче широкополосных сигналов с CDMA на n поднесущих, расстояние между которыми выбирается равным

$$\Delta f = 1/t_n, \quad (1)$$

где t_n – длительность субэлемента сигнала.

В блоке выбора СМПШПС на основе $d = \log_2 M$ кодовых бит осуществляется выбор одной из M ортогональных последовательностей, хранящихся в блоке формирования ансамбля СМПШПС. Выбранная последовательность одновременно передается на n поднесущих для формирования которых используется n -точечное ОБПФ, что аналогично способу создания ортогональных поднесущих, используемому в модуляции OFDM. Элементы последовательности принимают значения 1 и -1 . Таким образом, после преобразования сигнала из частотной области во временную, осуществляемого в блоке ОБПФ, каждая поднесущая модулируется выбранной последовательностью по закону ФМ-2.

В результате сигнал с номером c ($c = \overline{1, M}$) на

выходе передатчика (выходе блока ОБПФ) имеет вид:

$$S^{(c)}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L A_i \gamma_j^{(c)} g[t - (j-1)t_n] \cos(\omega_i t + \varphi_i),$$

где i – номер поднесущей ШПС ($i = \overline{1, n}$); A_i – амплитуда составляющей сигнала на i -й поднесущей; $\gamma_j^{(c)}$ – j -й субэлемент c -й модулирующей последовательности, состоящей из L субэлементов; ω_i – частота i -й поднесущей; φ_i – фаза i -й поднесущей; $g[t - (j-1)t_n]$ – срезающая функция:

$$g[t - (j-1)t_n] = \begin{cases} 1 & \text{при } (j-1)t_n \leq t \leq jt_n, \\ 0 & \text{при других } t \end{cases},$$

причем $t \in ((k-1)T, kT)$, где $T = Lt_n$ – длительность элемента сигнала, k – номер субэлемента сигнала.

На приеме поднесущие сигнала разделяются в блоке БПФ. В блоке принятия решения (БПР) после вычисления корреляции между принятым сигналом и ансамблем используемых СМПШПС определяется номер принятого сигнала, после чего информация декодируется и поступает к получателю информации (ПИ). В модель была заложена возможность изменения параметров используемых СМПШПС: числа сигналов в ансамбле M , числа субэлементов в сигнале L , числа поднесущих n .

полосе сигнала. Шум формируется с помощью блока AWGN среды Matlab, в котором задается имитируемая величина $P_c/P_{ш}$. Перенос сигнала в область высоких частот не осуществляется.

Исходя из требований к точности получения результатов, общее количество переданных символов (размер выборки) при проведении машинного эксперимента определяется следующим образом [4]:

$$N \geq \frac{P_{\text{ош}}^* (1 - P_{\text{ош}}^*) \left[\Phi^{-1} \left(\frac{Q}{2} \right) \right]^2}{\varepsilon_0^2},$$

где $\Phi^{-1}()$ – обратная функция Лапласа; $\varepsilon_0^2 = |P_{\text{ош}} - P_{\text{ош}}^*|$, $P_{\text{ош}}$ – истинное значение вероятности ошибки, $P_{\text{ош}}^*$ – измеренная вероятность ошибки; Q – вероятность того, что $P_{\text{ош}}$ и $P_{\text{ош}}^*$ различаются не более чем на ε_0 . Установлено, что при проведении эксперимента приемлемую оценку $P_{\text{ош}}$ дают следующие требования к точности результатов [4]: $\varepsilon_0 = 0,25P_{\text{ош}}$, $Q = 0,9$. Исходя из заданных требований, достаточный размер выборки составляет $N \geq 43,36 \left(\frac{1}{P_{\text{ош}}} - 1 \right)$.

Одним из факторов, влияющих на работу кодека, является число итераций r в алгоритме де-

кодирования. Зависимость помехоустойчивости системы связи от числа итераций в алгоритме декодирования для используемого LDPC кода показана на рис. 3.

Из графиков следует, что увеличение числа итераций выше 10 нецелесообразно.

Сравнение результатов моделирования передачи СМППС без кодирования с теоретической зависимостью (вероятностью ошибки на бит для некогерентного детектирования M -ичных ортогональных сигналов, взятой из работы [5]) показало их достаточно точное совпадение (графики, показанные на рис. 3 жирными линиями), что свидетельствует об адекватности созданной модели.

Более детальные результаты моделирования для случая $r = 10$ представлены в таблице. Полученные значения вероятности ошибки на бит $P_{\text{ош}_5}$ при передаче информации в разработанной модели указаны в первой строке, а соответствующие им соотношения энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности шума E_b/N_o – во второй строке. В третьей строке указан энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) G , показывающий снижение энергии, необходимой для передачи одного бита данных, по сравнению со случаем, когда кодирования нет. Величина ЭВК рассчитывается по формуле

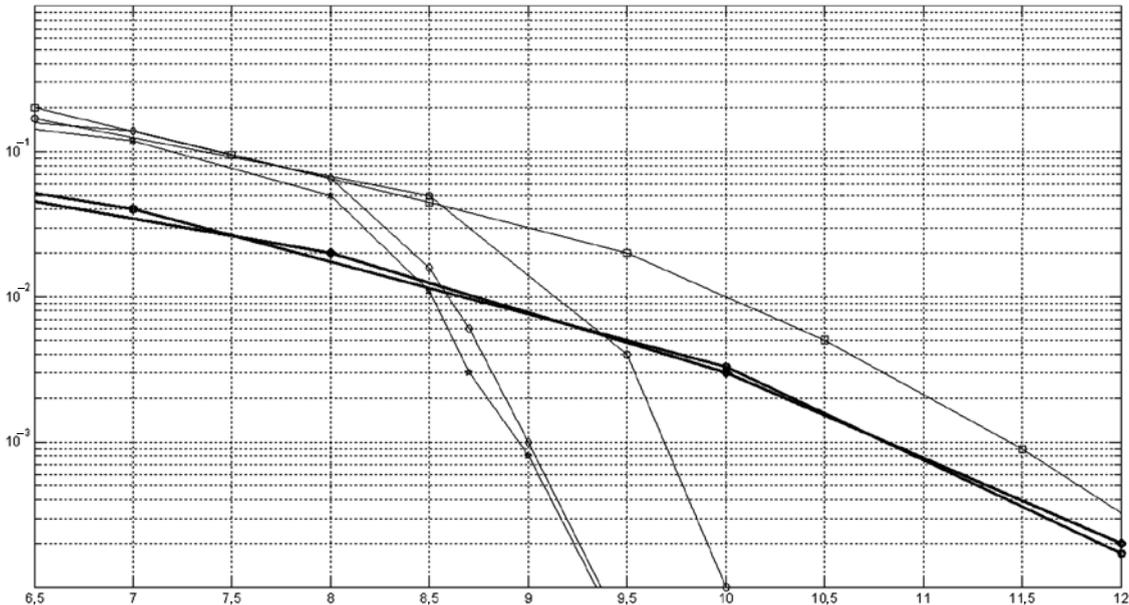


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки на бит от соотношения сигнал/шум ($P_{\text{ош}} = f(E_b/N_o)$) при передаче СМППС ($n = 4; M = 2; L = 8$) с LDPC кодированием, при разном числе итераций в алгоритме декодирования и без кодирования
 (—□—) итерация; (—◇—) 5 итераций; (—△—) 10 итераций; (—★—) 100 итераций;
 (—●—) без кодирования; (—●—) теория

Зависимость вероятности ошибки на бит от соотношения энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности (СПМ) шума и выигрыш кодирования для системы на основе СМПШПС с LDPC кодированием

Вероятность ошибки $P_{\text{ошб}}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Отношение сигнал/шум E_b/N_0 , дБ	8,6	9	9,4	9,7	10
Выигрыш кодирования G , дБ	0,1	1,8	2,9	3,8	4

$G = (E_b/N_0)_{\text{нк}} - (E_b/N_0)_{\text{к}}$, где $(E_b/N_0)_{\text{нк}}$ и $(E_b/N_0)_{\text{к}}$ – значения отношения энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности (СПМ) шума при заданной величине вероятности ошибки для передачи информации без кодирования и с кодированием соответственно. Значение E_b/N_0 в свою очередь, может быть получено из следующего уравнения:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} B \frac{1}{R \cdot \log_2 M}, \quad (2)$$

где B – база сигнала; M – число сигналов в ансамбле; R – скорость кода.

Таким образом, ЭВК учитывает снижение требуемого отношения сигнал/шум за счет исправления ошибок в декодере и дополнительные затраты энергии сигнала на передачу кодовых символов с учетом избыточности кода.

СМПШПС имели следующие параметры: че-

тыре поднесущих ($n = 4$), два сигнала в ансамбле ($M = 2$), восемь субэлементов ($L = 8$). Использовался некогерентный прием, 10 итераций в алгоритме декодирования ($r = 10$).

Еще одним объектом исследования стала зависимость помехоустойчивости приема от объема ансамбля M (см. уравнение (2)). На рис. 4 показаны зависимости значения средней вероятности ошибки от отношения E_b/N_0 для ансамблей сигнала разного объема: $M = 2; 4; 8; 16; 64$. Скорость кода 1/2.

Как видно из графика, увеличение объема ансамбля сигналов приводит к повышению помехоустойчивости исследуемой системы. Так, для ансамбля из 64 сигналов ($M = 64$) энергетический выигрыш над случаем с $M = 2$ составил порядка 4,5 дБ при $P_{\text{ошб}} = 10^{-5}$.

Имеет смысл сравнить полученные результаты с теоретическими характеристиками не-

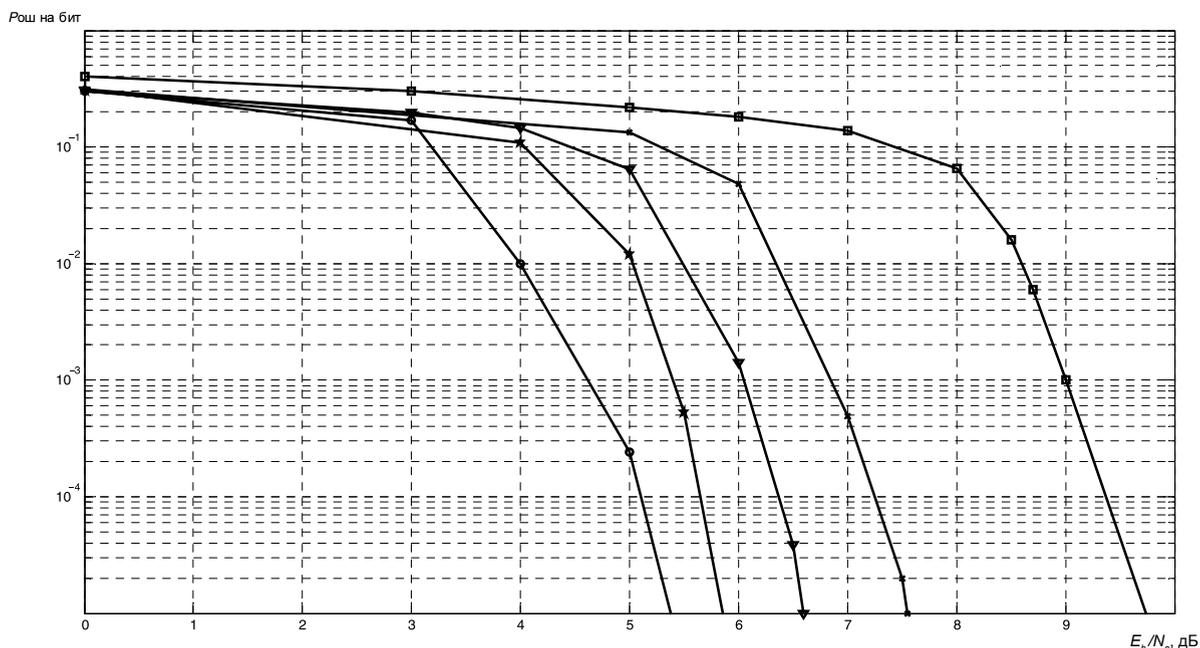


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки на бит от соотношения энергии сигнала на бит к СПМ шума ($P_{\text{ошб}} = f(E_b/N_0)$) при передаче СМПШПС с LDPC кодированием при разном объеме ансамбля СМПШПС (\square) $M = 2, L = 64, n = 4$; (\triangle) $M = 4, L = 64, n = 4$; (\blacktriangleright) $M = 8, L = 64, n = 4$; (\star) $M = 16, L = 64, n = 4$; (\bullet) $M = 64, L = 64, n = 4$

когерентного приема ортогональных сигналов без кодирования [5]. Так, без кодирования, для $P_{\text{ошб}} = 10^{-5}$ величины E_b/N_0 составляют 13,4 дБ; 10,7 дБ; 9,3 дБ; 8,1 дБ и 6,8 дБ для $M = 2; 4; 8; 16; 64$ соответственно. Таким образом, ЭВК $G = 3,6$ дБ при $M = 2$; $G = 3,15$ дБ при $M = 4$; $G = 2,7$ дБ при $M = 8$; $G = 2,25$ дБ при $M = 16$ и $G = 1,4$ дБ при $M = 64$.

Энергетический выигрыш при некогерентном приеме СМППС ($n = 4$; $M = 2$; $L = 8$) на фоне АБГШ при использовании квазициклического LDPC кода (648, 324) составляет 4 дБ при $P_{\text{ошб}} = 10^{-6}$.

Моделирование показало, что при практиче-

ском применении LDPC кода (648, 324) целесообразно использовать $r = 10$ итераций в алгоритме декодирования.

Увеличение объема ансамбля ортогональных стохастических широкополосных сигналов приводит к существенному увеличению помехоустойчивости радиосистемы, поэтому целесообразно использовать СМППС с большим объемом ансамбля ($M = 32,64$). Следует учесть, что выигрыш кодирования с ростом M уменьшается, что ограничивает возможность дальнейшего увеличения объема ансамбля. В будущем имеет смысл изучить возможность использования СМППС с небинарными LDPC кодами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Варакин, Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л.Е. Варакин. –М.: Радио и связь, 1985. –384 с.
2. **Richardson, T.J.** Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes [Text] / T.J. Richardson, R.L. Urbanke // IEEE Transactions on information theory. –2001, Febr. –Vol. 47. –№ 2. –P. 638–656.
3. **Gallager, R.G.** Low Density Parity Check Codes

[Text] / R.G. Gallager. –Cambridge: M.I.T. Press, 1963. –90 p.

4. **Чесноков, М.Н.** Микропроцессорные помехоустойчивые устройства приема цифровых сигналов [Текст] / М.Н. Чесноков. –СПб.: ВАС, 1994. –172 с.

5. **Прокис, Д.** Цифровая связь [Текст] / Д. Прокис; Пер. с англ.; Под ред. Д.Д. Кловского. –М.: Радио и связь, 2000. –800 с.

REFERENCES

1. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami. –Moscow: Radio i svyaz', 1985. –384 s. (rus)
2. Richardson T.J., Urbanke R.L. Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes / IEEE Transactions on information theory. –Febr. 2001. –Vol. 47. –№ 2. –P. 638–656.
3. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes.

–Cambridge: M.I.T. Press, 1963. –P. 90.

4. Chesnokov M.N. Mikroprotsessornye pomexoustoichivye ustroistva priema tsifrovyykh signalov. –St. Petersburg: VAS, 1994. – 172 s. (rus)

5. Prokis D. Tsifrovaia svyaz'; Per. s angl.; Pod red. D.D. Klovskogo. – Moscow: Radio i svyaz', 2000. –800 s. (rus)