

Publications, 2015, no. 3, vol. 10, pp. 6499–6507. Available at: <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv10n3.htm> (accessed: 21.08.2015).

28. Kamaev V. A., Finogeev A. G., Finogeev A. A., Shevchenko S. Knowledge Discovery in the SCADA Databases Used for the Municipal Power Supply System. *Knowledge-Based Software Engineering ; Springer International Publishing Switzerland – 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 Proceedings*, Volgograd, Russia, September 17–20, 2014, pp. 1–15.

29. Melinda Tóth, István Bozó Detecting and Visualising Process Relationships in Erlang. *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 29, pp. 1525–1534.

30. Niroshinie Fernando, Seng W. Loke, Wenny Rahayu Mobile cloud computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, January 2013, vol. 29, issue 1, pp. 84–106.

31. Samer Samarah A Data Predication Model for Integrating Wireless Sensor Networks and Cloud Computing. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 52, pp. 1141–1146.

32. Toshiba Asia Pacific Pte. Ltd. Toshiba Launches new storage system “Toshiba Total Storage Platform” to meet big data and cloud solutions November 12 2013. Available at: http://www.asia.toshiba.com/wp-content/uploads/2013/11/tapl_20131112.pdf (accessed: 10.08.2015).

33. Wei Liu, Takayuki Nishio, Ryoichi Shinkuma, Tatsuro Takahashi Adaptive resource discovery in mobile cloud computing. *Computer Communications*, September 1 2014, vol. 50, pp. 119–129.

УДК 621.391:519.72

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА САМООРТОГОНАЛЬНЫХ КОДОВ МЕТОДОМ ПОКООРДИНАТНОГО СПУСКА

Статья поступила в редакцию 14.07.2015, в окончательном варианте 28.08.2015

Шевляков Дмитрий Александрович, аспирант, Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: d.a.shevlyakov@gmail.com

В современных системах связи используют методы помехоустойчивого кодирования / декодирования для исправления возникающих при передаче ошибок. В статье приведено краткое описание одного из таких методов – многопорогового декодера (МПД). Рассмотрены вопросы, связанные с повышением эффективности работы МПД за счет использования многомерной оптимизации параметров рассматриваемого метода. Исходя из того, что оптимизацию необходимо проводить по нескольким группам параметров, был выбран метод покоординатного спуска. Его алгоритм применительно к рассматриваемым задачам детально описан в статье. Показано, что разработанный алгоритм позволяет произвести правильную настройку параметров и при этом для рассматриваемых классов задач сэкономить временные и вычислительные ресурсы на 15 десятичных порядков. Представлены результаты работы МПД с оптимизированными параметрами, которые позволяют сделать вывод о том, что область наилучшей его работы смещается на 0,6 дБ в сторону пропускной способности канала по сравнению с неоптимизированным вариантом. Таким образом, результаты, полученные с помощью данного алгоритма в канале с аддитивным белым гауссовским шумом, дают возможность настроить МПД (без его усложнения) на обеспечение наилучшего результата. Это позволяет рекомендовать МПД к использованию в современных системах связи с целью повышения ее качества и помехоустойчивости.

Ключевые слова: цифровая связь, системы передачи цифровой информации, помехоустойчивое кодирование, достоверность передачи данных, энергетический выигрыш кодирования, самоортогональные коды, многопороговые декодеры, компьютерное моделирование, методы многомерной оптимизации, метод покоординатного спуска

**DEVELOPMENT OF ALGORITHM OPTIMIZATION
PARAMETERS MULTITHRESHOLD DECODER
SELF-ORTHOGONAL CODES
THE COMPONENT WISE DESCENT METHOD**

Shevlyakov Dmitriy A., post-graduate student, Ryazan State Radio Engineering University,
59/1 Gagarin St., Ryazan, 390005, Russian Federation, e-mail: d.a.shevlyakov@gmail.com

In modern communication systems to correct any transmission errors using error-correcting coding methods/decoding. The article gives a brief description of one such method - multithreshold decoder (MTD). The problems associated with increasing the efficiency of the MPD through the use of multi-dimensional optimization of the parameters of the method. Based on the fact that optimization should be carried out by several groups of parameters was chosen method of coordinate descent. Its algorithm is applied to this problem is described in detail in the article. It is shown that the developed algorithm allows to make the correct settings and thus for this class of problems save time and computing resources by 15 decimal places. The results MTD work with optimized parameters that allow the conclusion that the best of his work area is shifted by 0.6 dB in the direction of the channel capacity compared to non-optimized for this. Thus, the results obtained by this algorithm in a channel with additive white Gaussian noise, let adjust MTD (without complication) to provide the best results. It is possible to recommend the MTD for use in modern communication systems in order to improve its quality and noise immunity.

Keywords: digital communication, digital transmission systems, error-correcting coding, reliability of data, energy coding gain, self-orthogonal codes, multithreshold decoders, computer simulation, method of coordinate descent.

Введение. В настоящее время для обмена информацией широко используются различные системы цифровой связи. В таких системах применяют как проводные, так и беспроводные каналы связи. В них передаваемая информация может искажаться под действием различного рода шумов [4]. Для исправления ошибок (искажений) в большинстве систем связи применяются методы помехоустойчивого кодирования, которые позволяют исправлять ошибки без необходимости повторной передачи искаженных данных [2]. При разработке таких методов наряду с хорошей корректирующей способностью требуется обеспечить невысокую сложность реализации методов. Это требование обусловлено тем, что скорости передачи данных постоянно растут [1]. Поэтому устройства, реализующие сложные методы коррекции ошибок, в ряде случаев уже не могут обеспечивать достаточную скорость обработки поступающей информации в реальном масштабе времени [7].

На сегодняшний день в теории кодирования известен ряд кодов и методов их декодирования, различающихся корректирующей способностью (энергетическим выигрышем кодирования), сложностью реализации и рядом других параметров [14–16]. Одним из лучших по соотношению эффективности и сложности реализации является многопороговый декодер (МПД) самоортогональных кодов (СОК) [5, 6]. Однако некоторые вопросы оптимизации параметров МПД под конкретные условия передачи / приема данных в литературе рассмотрены недостаточно полно. Поэтому целью данной статьи является устранение указанного недостатка.

Характеристика использования многопорогового декодера. В общем случае МПД может применяться для декодирования как блочных, так и сверточных СОК (алгоритм построения СОК описан в [8]). Кодер для СОК является простейшим устройством, состоящим только из регистров сдвига и сумматоров по модулю 2. Пример кодера для блочного кода показан на рисунке 1 [6].

Достаточно простым является и сам МПД, пример которого для такого же блочного кода представлен на рисунке 2 [6]. В его состав входят информационный, синдромный и разностный регистры; сумматоры по модулю 2; пороговые элементы (ПЭ), которые суммируют значения, поступающие на их входы, и сравнивают полученную сумму с порогом.

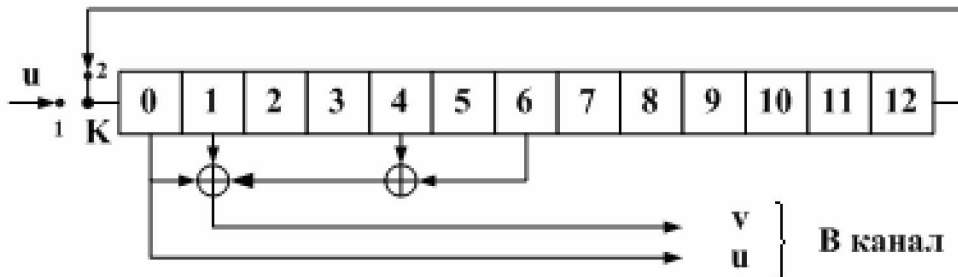


Рис. 1. Схема кодера блокового СОК

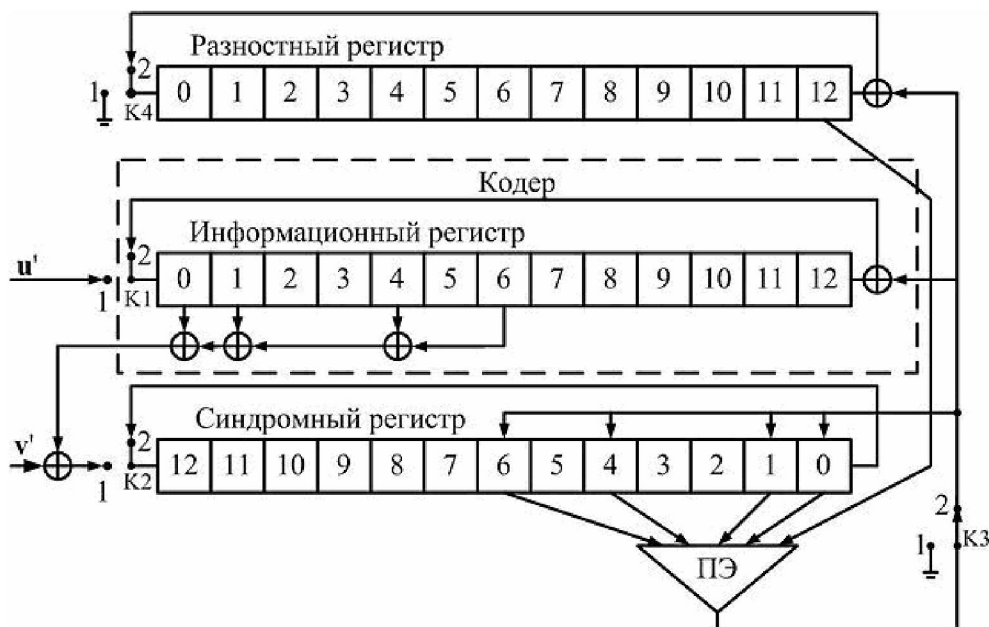


Рис. 2. Схема декодера МПД блокового кода с кодовой скоростью $R = 1/2$

Для эффективной работы как МПД, так и любого другого устройства кодирования / декодирования в конкретных условиях всегда необходимо производить первоначальную настройку кодека (кодера и декодера). Для правильной настройки необходимо выполнить процесс оптимизации большого количества (нескольких групп) параметров. В данном случае оптимальное решение найти аналитически проблематично и приходится использовать численные методы. При большом количестве возможных вариантов процесс оптимизации с помощью их полного перебора может занимать слишком долгое время. Поэтому необходимо разработать алгоритм оптимизации параметров МПД, позволяющий настроить кодек на достижение наилучшего результата в конкретных условиях – при допустимых объемах вычислительных и временных затрат. Исходя из того, что оптимизацию необходимо проводить по нескольким группам параметров, был выбран один из методов многомерной оптимизации – метод покоординатного спуска (метод Гаусса – Зейделя).

Алгоритм оптимизации. В основу метода Гаусса – Зейделя положены принципы более раннего метода поочередного изменения переменных [10]. Идея метода поочередного

изменения переменных заключается в следующем: выбирается исходная величина шага; из начальной точки многомерного пространства параметров делается шаг по первой переменной; вычисляется значение критериальной функции. Если оно «удачное» (значение критериальной функции улучшилось), то переходят к выполнению шага по следующей переменной. Если шаг по текущей переменной оказался «неудачным», то делается шаг по этой же переменной в противоположном направлении. Затем вне зависимости от удачности шага в «противоположном направлении» для текущей переменной следует переход к выполнению шага по следующей (очередной) переменной.

Эта процедура повторяется до тех пор, пока шаги по всем переменным будут «неудачными». То есть значение целевой функции не будет улучшено. В этом случае величина шага уменьшается, и следует повторение попыток «перемещений» по всем переменным (в той же последовательности) с уменьшенной величиной шага.

Поиск оптимума (наилучшего значения критериальной или целевой функции) продолжается до тех пор, пока абсолютное значение величины шага после очередного уменьшения не окажется меньше заданной величины.

Альтернативным подходом (алгоритмом) является поиск оптимума целевой (критериальной) функции за счет изменения значения текущей переменной. При этом значения остальных переменных остаются постоянными. После того, как этот оптимум достигнут, осуществляется поиск оптимума целевой функции по следующей переменной и т.д.

Поиск оптимума по направлению (одной переменной) можно производить любым известным методом одномерной оптимизации, в том числе и с изменением величины шага. Для этой цели был выбран метод поразрядного приближения. Таким образом, в методе Гаусса – Зейделя задача многомерной оптимизации сводится к многократному последовательному использованию метода одномерной оптимизации [10].

Сложности в использовании обоих указанных подходов могут быть связаны с тем, что потенциально возможно «схождение» вычислительного процесса не к глобальному экстремуму, а к одному из локальных. Поэтому в литературе рекомендуется применение рассмотренных методов с использованием нескольких вариантов «начальных точек», выбираемых случайным образом в области допустимых решений. Такое усложнение алгоритма увеличивает вероятность (хотя и не гарантирует) нахождения именно глобального экстремума. Вычислительные затраты при таком подходе многократно увеличиваются. Поэтому, если в результате специальных исследований (в том числе и вычислительных экспериментов) удастся обосновать единственность экстремума, то многократного повторения поиска экстремума из различных начальных точек можно избежать [3].

Для реализации алгоритма Гаусса – Зейделя был проведен анализ принципов работы МПД, подробно рассмотренных в [6]. На основании результатов такого анализа можно сделать вывод, что эффективность МПД (обеспечиваемая вероятность ошибки декодирования P_b) зависит от следующих параметров: применяемого кода (образующего полинома); числа итераций декодирования; значений пороговых и весовых коэффициентов на каждой из итераций; уровня шума в канале связи. Математически данную зависимость можно представить в виде:

$$P_b = F(\mathbf{t}, \mathbf{w}, p, SNR), \quad (1)$$

где $\mathbf{t}$ – вектор значений порогов; $\mathbf{w}$ – вектор значений весовых коэффициентов; p – образующий полином; SNR – отношение сигнал-шум; F – некоторая функция.

Значения параметров в (1) следует выбирать так, чтобы МПД был способен обеспечить декодирование близкое к оптимальному (переборные методы, имеющие экспоненциальную сложность в зависимости от длины кода и работающие по принципу максимального правдоподобия [11]). Поскольку большинство из параметров в (1) определяются требованиями (ограничениями) конкретной системы цифровой связи, то положим, что настройка декодера выполняется для заданных кода и канала. То есть параметры p и SNR известны (фиксированы).

Оценим число различных сочетаний параметров декодера. Опытным путем было установлено, что элементы векторов будут принимать по $n = 6$ разных значений. Например, диапазон изменения вектора t от «-1» до «4» с шагом 1, а вектора w – от «0» до «5» с тем же шагом. Соответственно число сочетаний различных значений параметров декодера примерно равно $n_t^I n_w^I$, где I – число итераций декодирования (оно обычно принимает значения от 5 до 10 в зависимости от уровня шума). Таким образом, общее число вариантов сочетаний значений параметров может составить до 36^{10} .

Следует отметить, что отличительной особенностью разработанного алгоритма является использование не только дискретных значений t и w , но и вещественных, которые поступают на вход МПД. В данном случае вещественными значениями являются оценки логарифмического отношения правдоподобия (LLR – log-likelihood ratio) для каждого из принятых битов, называемые также мягкими решениями демодулятора.

Поэтому при шаге изменения параметров равном 0,1 количество сочетаний возрастает до 2601^{10} . Приведенные числовые оценки показывают, что необходимо использовать алгоритмы минимизации функции ошибки декодирования, позволяющие существенно уменьшить число перебираемых вариантов.

Еще одной особенностью поставленной задачи является то, что целевая функция $F(t, w, p, SNR)$ не задана аналитически. Ее значение можно оценить только при помощи компьютерного моделирования, которое занимает достаточно много времени. Это дополнительно (и очень существенно!) усложняет процесс оптимизации. Поэтому в качестве метода минимизации целевой функции и был выбран метод покоординатного спуска, алгоритм которого будет детально описан далее.

Дополнительно отметим, что в результате анализа значений функции $F(t, w, p, SNR)$ для различного числа итераций декодирования было выявлено, что эта функция (типичный пример графика ее зависимости от весовых и пороговых коэффициентов показан на рисунке 3) в большинстве случаев имеет только одну точку минимума, т.е. глобальный экстремум. Это и позволяет использовать для его поиска метод Гаусса – Зейделя.

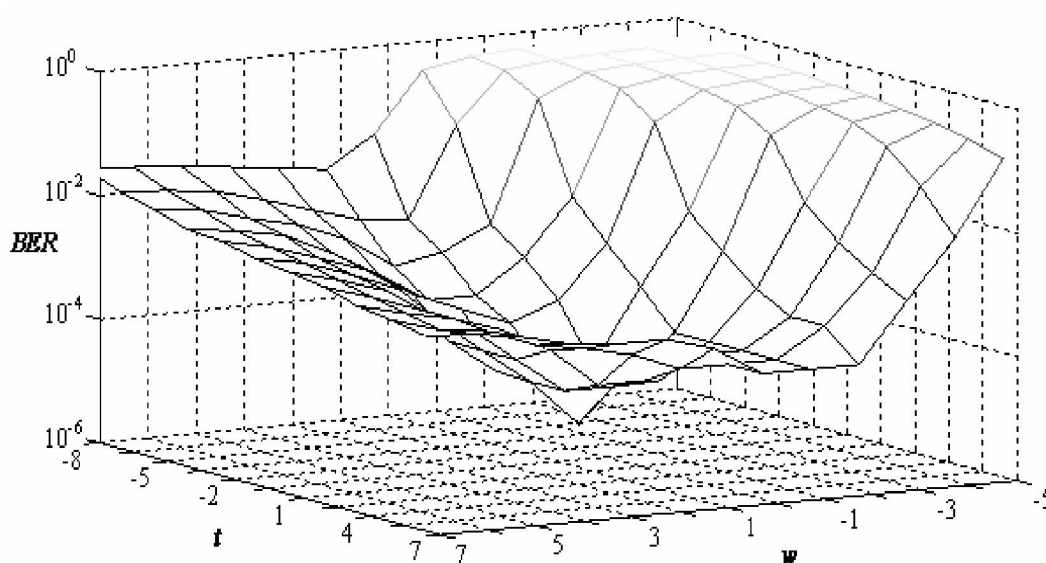


Рис.3. Типичный вид поверхности для функции вероятности ошибки декодирования (BER) от массивов пороговых (t) и весовых (w) коэффициентов

Разработанный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, показанной на рисунке 4.

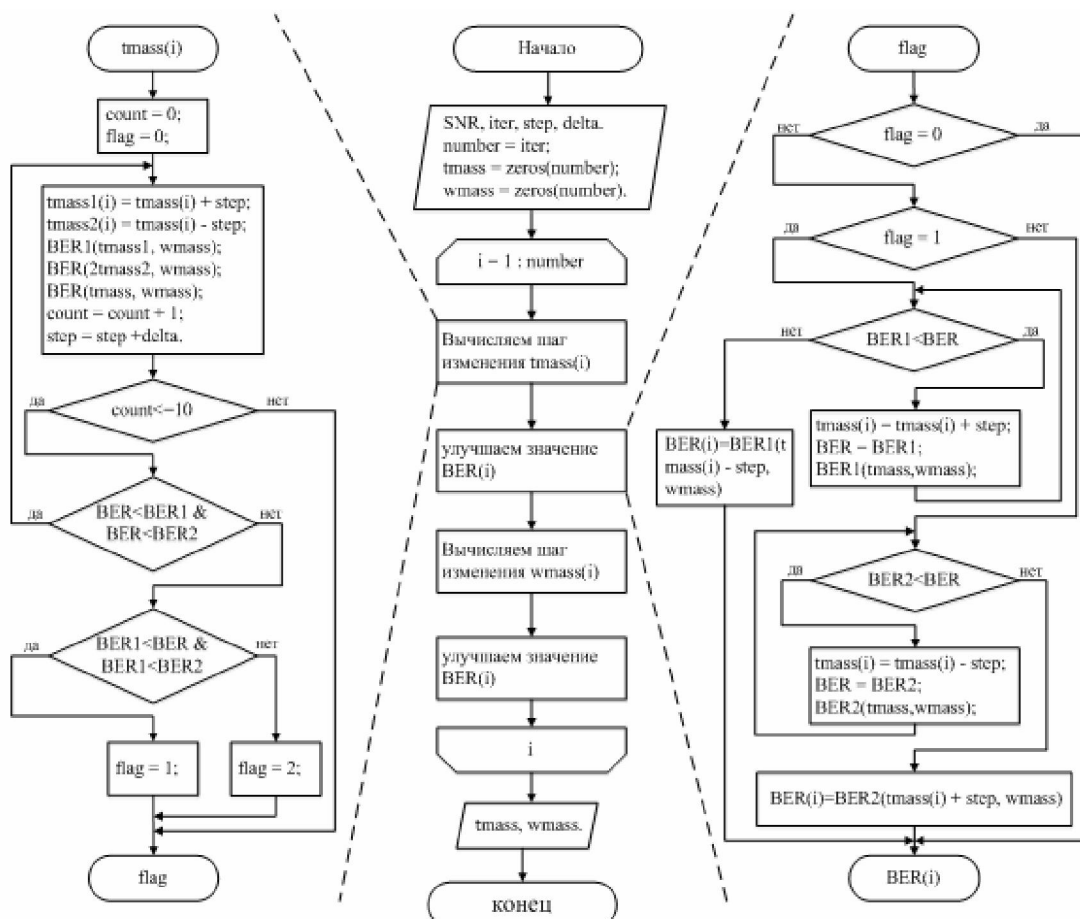


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации параметров МПД

На рисунке 4 пунктирами выделены группы повторяющихся операций, соответствующие детализации блоков на основной ветке алгоритма. Входными параметрами данного алгоритма являются следующие: отношение сигнал / шум (SNR), для которого будет проводиться оптимизация; количество итераций декодирования ($iter$), которое равно также общему числу элементов в каждой группе оптимизируемых параметров. Следует отметить, что разработанный алгоритм в качестве необязательных параметров поддерживает установку шага изменения оптимизируемого значения ($step$) и дискретности изменения шага ($delta$). По умолчанию эти аргументы равны 0.2 и 0.1, соответственно. Выходными величинами алгоритма являются массивы пороговых ($tmass$) и весовых ($wmass$) коэффициентов.

Далее в формализованном виде мы опишем основные шаги, используемые при минимизации функции декодирования F в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.

Шаг 1. Задаем произвольно выбранные массивы изменяемых параметров $t = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ и $w = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$, где n – число итераций и $n \in N, t \in N, w \in N$, а также полином $\langle p \rangle$ и отношение сигнал / шум SNR . Кроме того, на начальных итерациях следует немного завышать порог. Для того, чтобы декодер делал меньше собственных ошибок, которые вынуждены исправлять последующие итерации декодирования.

Шаг 2. Оптимизация по итерациям.

Выбираем нулевое приближение $w = w_0$ и количество итераций декодирования $i = 1$. Тогда функция будет зависеть только от одной переменной t . Обозначим ее через $f_i(t) = F(t, w_0)$. Используя метод поразрядного приближения, найдем минимум функции $f_i(t)$ и обозначим его через t_1 . Таким образом, был сделан шаг из точки (t_0, w_0) в точку (t_1, w_0) , по направлению параллельному оси t . При этом предполагается, что значение целевой функции уменьшилось. Затем аналогичным образом из новой точки осуществляем спуск по направлению, параллельному оси w . Иными словами рассматривается функция $f_2(t) = F(t_1, w)$, для которой мы будем искать минимум. Значение переменной, которое обеспечивает этот минимум, обозначим через w_1 . Таким образом, второй шаг алгоритма (по переменной w) приведет в точку (t_1, w_1) .

Далее будем повторять циклы, выбирая последующие параметры и увеличивая количество итераций декодирования $i = 2, 3, 4 \dots n$ до тех пор, пока не достигнем локального минимума целевой функции.

Шаг 3. Оптимизация в целом.

После получения решения на предыдущем шаге его можно улучшить: изменяя также значения весов и порогов для каждой из итераций декодирования, но контролируя вероятность ошибки декодирования на выходе не после каждой, а после последней итерации. Данный процесс можно повторять многократно до тех пор, пока решение декодера не прекратит улучшаться.

Результаты вычислительных экспериментов по оптимизации параметров МПД. В рамках данной работы было проведено исследование эффективности вычислительного алгоритма оптимизации в условиях использования цифровой системы передачи данных, структурная схема которой приведена на рисунке 5.

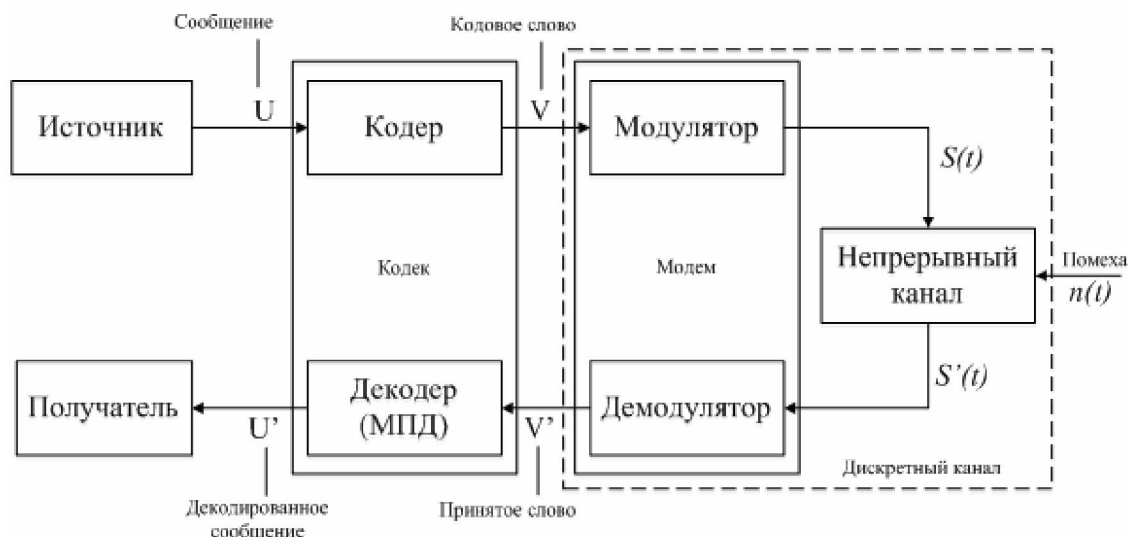


Рис. 5. Структурная схема процесса цифровой передачи данных

Моделирование проводилось с помощью пакета прикладных программ MATLAB (с использованием встроенного языка программирования MATLAB и стандартных библиотек) на ЭВМ с процессором Core i7 -4702MQ. В качестве исходных данных были выбраны отношение сигнал шум $SNR = 3$ дБ; диапазоны изменения массивов пороговых ($t = 1 \dots 4$) и весовых ($w = 0 \dots 4$) коэффициентов при 8-ми итерациях декодирования. Как уже было сказано

ранее, данный алгоритм и исследуемый декодер (МПД) поддерживают возможности использования вещественных чисел (LLR). Поэтому при выбранном шаге ($step = 0.2$) общее количество полученных значений (BER_i) путем полного последовательного перебора равно $i = 8^{21} (26 \times 21)^8$. Если учесть, что время, требуемое на получение одного значения, составляло около тридцати секунд, то общее время для всего вычислительного эксперимента без использования предлагаемого алгоритма заняло бы 2^{15} дней ($8^{21} \times 0,5 / 1440$). По результатам работы программы моделирования были получены оптимизированные массивы параметров МПД при общем количестве значений $i = 1540$. Таким образом, среднее время выполнения и количество вычислительных операций снизилось примерно на 15 десятичных порядков.

Теперь для наглядности приведем результаты работы МПД с оптимизированными и неоптимизированными параметрами в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

На рисунке 6 представлены графики зависимости отношения сигнал / шум E_b / N_0 от вероятности ошибки декодирования P_b при использовании квадратурной фазовой модуляции (QPSK) для МПД кода с кодовой скоростью $R = 4 / 8$ (по аналогии с рисунком 2, но в четыре раза большем количестве регистров при одинаковой общей кодовой скорости $R = 0,5$) и минимальным кодовым расстоянием $d = 13$ [6]. На этом рисунке кривой 1 представлены характеристики для МПД с параметрами, подобранными вручную (с учетом рекомендаций шага 1); кривой 2 – характеристики, полученные после оптимизации параметров МПД отдельно для каждой из итераций (шаг 2); кривой 3 – характеристики для МПД с параметрами после оптимизации в целом (шаг 3). Отметим, что оптимизация по итерациям (шаги 1 и 2) дает в дополнительный выигрыш при вероятности битовой ошибки $P_b = 10^{-4}$ около 0,5 дБ. А оптимизация в целом (шаги 1, 2 и 3) позволяет получить выигрыш еще порядка 0,1 дБ. Этот выигрыш означает, что при меньшем отношении сигнал / шум кодек обеспечивает одинаковую вероятность исправления. Подчеркнем, что этот выигрыш получается не за счет усложнения алгоритма (декодер остается таким же простым), а только за счет лучшего выбора параметров декодера на этапе его первоначальной настройки.

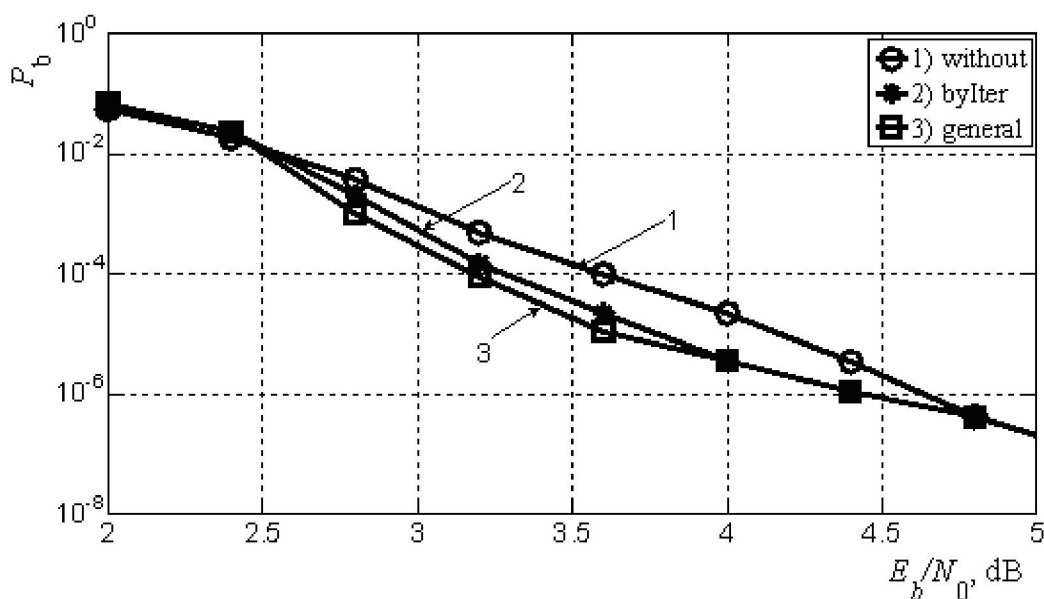


Рис. 6. Результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности МПД в канале с аддитивным белым гауссовским шумом

Выводы.

1. Разработан и обоснован алгоритм оптимизации параметров многопорогового декодера СОК.
2. Показано, что данный алгоритм, позволяет найти параметры МПД, обеспечивающие эффективное декодирование применяемого в нем кода при большем уровне шума в канале по сравнению неоптимизированным вариантом.
3. Опытным путем за счет оптимальной настройки параметров декодера без его усложнения получено снижение временных (вычислительных) затрат на процесс оптимизации / моделирования на 15 десятичных порядков по сравнению с полным перебором всех параметров.
4. Полученные результаты оценки эффективности МПД с оптимизированными параметрами в канале с АБГШ (рис. 6) показывают, что при вероятности ошибочного приема $P_b = 10^{-5}$ область наилучшей его работы смещается на 0,6 дБ в сторону пропускной способности канала.
5. Таким образом, результаты, полученные с помощью данного алгоритма, позволяют настроить МПД на обеспечение наилучшего результата без его технологического усложнения.
6. На основе проведенного исследования, а также результатов, полученных в других публикациях по МПД [2, 5, 6, 8, 9, 13] можно говорить о целесообразности его использования в современных системах передачи цифровой информации для повышения качества связи (улучшения помехоустойчивости).

Список литературы

1. Азизов Р. Ф. Помехоустойчивость радиотехнических устройств охраны при использовании когерентного и некогерентного методов обнаружения / Р. Ф. Азизов, Д. А. Аминев, С. У. Увайсов, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1. – С. 101–107.
2. Белицкий А. М. Повышение достоверности приема-передачи команд управления с использованием многопороговых декодеров самоортогональных кодов / А. М. Белицкий, Г. В. Овечкин, Д. А. Шевляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: www.science-education.ru/113-11555 (дата обращения 13.06.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Брумштейн Ю. М. Одно- и многомерные временные ряды: анализ возможных методов оптимизации отсчетов и оценки характеристик / Ю. М. Брумштейн, М. В. Иванова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1. – С. 101–107.
4. Воловач В. И. Помехоустойчивость радиотехнических устройств охраны при использовании когерентного и некогерентного методов обнаружения / В. И. Воловач // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 1. – С. 13–20.
5. Золотарёв В. В. Современные методы повышения достоверности передачи данных в системах ДЗЗ / В. В. Золотарёв, Г. В. Овечкин, Д. А. Шевляков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы XII Всероссийской открытой конференции. – Москва, 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Золотарёв В. В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования / В. В. Золотарёв. – 2-е изд. – Москва : «Горячая линия – Телеком», 2014. – 266 с.
7. Леммле Д. В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многлучевых каналах / Д. В. Леммле // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 2. – С. 207–216.
8. Овечкин Г. В. Алгоритм построения самоортогональных кодов для многопороговых декодеров / Г. В. Овечкин, П. В. Овечкин, Н. Н. Гринченко, В. К. Столчнев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 9, ч. 2. – С. 179–188.
9. Овечкин Г. В. Эффективность многопороговых методов коррекции ошибок в каналах связи с замираниями / Г. В. Овечкин, Д. А. Шевляков // Успехи современной радиоэлектроники: Радиотехника. – 2014 – № 6. – С. 37–43.
10. Рейзлин В. И. Численные методы оптимизации : учебное пособие / В. И. Рейзлин. – Томск : Томский политехнический университет, 2011. – 105 с.

11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Москва : Вильямс, 2004. – 1104 с.
12. Шевляков Д. А. Алгоритм оптимизации параметров многопорогового декодера / Д. А. Шевляков // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : тезисы докладов XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань : Рязанский государственный радиоактивный университет, 2014. – С. 115–121.
13. Шевляков Д. А. Современные методы коррекции ошибок для цифровых систем передачи данных / Д. А. Шевляков // Молодёжь, образование, наука : материалы VIII Российской ежегодной научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа : Восточная экономико-юридическая гуманитарная академия, 2013. – С. 154–158.
14. Arikan E. Systematic polar coding / E. Arikan // IEEE Communications Letters. – August 2011. – Vol. 15, no. 8. – P. 860–862.
15. Cushon K. High-Throughput Energy-Efficient LDPC Decoders Using Differential Binary Message Passing / K. Cushon, S. Hemati, C. Leroux, S. Mannor, W. J. Gross // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2014. – Vol. 62, no. 3. – P. 619–631.
16. Ould-Cheikh-Mouhamedou Y. A simple and efficient method for lowering the error floors of turbo codes that use structured interleavers / Y. Ould-Cheikh-Mouhamedou // IEEE Communications Letters. – 2012. – Vol. 16, no. 3. – P. 392–395.

References

1. Azizov R. F., Aminev D. A., Uvaysov S. U., Yurkov N. K. Pomekhoustoychivost radio-tekhnicheskikh ustroystv okhrany pri ispolzovanii kogerentnogo i nekogerentnogo metodov obnaruzheniya [The error-corrective of radio devices when using coherent and incoherent detection methods]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 1, pp. 101–107.
2. Belitskiy A. M., Ovechkin G. V., Shevlyakov D. A. Povyshenie dostovernosti priema-peredachi komand upravleniya s ispolzovaniem mnogoporogovykh dekoderov samoortogonalnykh kodov [Increasing the reliability of reception and transmission of control commands using a self-orthogonal codes multithreshold decoders]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2013, no. 6. Available at: www.science-education.ru/113-11555 (accessed: 13.06.2015).
3. Brumshteyn Yu. M., Ivanova M. V. Odn- i mnogomernye vremennye ryady: analiz vozmozhnykh metodov optimizatsii otschetov i otsenki kharakteristik [Single- and multi-dimensional time series: an analysis of possible methods of optimization and performance evaluation samples]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 1, pp. 101–107.
4. Volovach V. I. Pomekhoustoychivost radiotekhnicheskikh ustroystv okhrany pri ispolzovanii kogerentnogo i nekogerentnogo metodov obnaruzheniya [Immunity protection of wireless devices using coherent and incoherent detection methods]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, no. 1, pp. 13–20.
5. Zolotarev V. V., Ovechkin G. V., Shevlyakov D. A. Sovremennye metody povysheniya dostovernosti peredachi dannykh v sistemakh DZZ [Modern methods of increasing the reliability of data transmission systems remote sensing]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa : materialy XII Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. Proceedings of the XII All-Russian Public Meeting], Moscow, 2014. 1 electron. Wholesale. disk (CD-ROM).
6. Zolotarev V. V. *Teoriya i algoritmy mnogoporogovogo dekodirovaniya* [Theory and algorithms multithreshold decoding], 2nd ed. Moscow, «Goryachaya liniya – Telekom» Publ., 2014. 266 p.
7. Lemmle D. V. Kharakteristiki peredachi signalov OFDM v mnogoluchevykh kanalakh [The transmission characteristics of an OFDM signal in multipath channels]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 2, pp. 207–216.
8. Ovechkin G. V., Ovechkin P. V., Grinchenko N. N., Stolchnev V. K. Algoritmy postroeniya samoortogonalnykh kodov dlya mnogoporogovykh dekoderov [Algorithm for construction of self-orthogonal codes for multithreshold decoders]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskaya nauka* [News of the Tula State University. Technics science], 2013, issue 9, part 2, pp. 179–188.
9. Ovechkin G. V., Shevlyakov D. A. Effektivnost mnogoporogovykh metodov korrektsii oshibok v kanalakh svyazi s zamiraniyami [Efficiency multithreshold methods of error correction in communication channels with fading]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki: Radiotekhnika* [Achievements of Modern Radioelectronics: Radiotechnics], 2014, no. 6, pp. 37–43.

10. Reyklin V. I. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods], Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2011. 105 p.
11. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical bases and practical application], Moscow, Williams Publ., 2004. 1104 p.
12. Shevlyakov D. A. Algoritmy optimizatsii parametrov mnogoporogovogo dekodera [The optimization algorithm parameters multithreshold decoder]. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh i v obrazovanii : tezisy dokladov XIX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [New Information Technologies in Research and in Education. Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists], Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University Publ. House, 2014. pp. 115–121.
13. Shevlyakov D. A. Sovremennyye metody korrektsii oshibok dlya tsifrovyykh sistem peredachi dannykh [Modern methods of error correction for digital data transmission systems]. *Molodezh, obrazovanie, nauka : materialy VIII Rossiyskoy ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth, Education and Science. Proceedings of the VIII Annual Russian Scientific and Practical Conference of Undergraduates, Graduate Students and Young Scientists], Ufa, East Economics and Law Academy of Humanities Publ. House, 2013, pp. 154–158.
14. Arikan E. Systematic polar coding. *IEEE Communications Letters*, August 2011, vol. 15, no. 8, pp. 860–862.
15. Cushon K., Hemati S., Leroux C., Mannon S., Gross W. J. Energy-Efficient LDPC Decoders Using Differential Binary Message Passing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, vol. 62, no. 3, pp. 619–631.
16. Ould-Cheikh-Mouhamedou Y. A simple and efficient method for lowering the error floors of turbo codes that use structured interleavers. *IEEE Communications Letters*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 392–395.

УДК 004.891

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ КЛАССИФИКАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ¹

Статья поступила в редакцию 04.07.2015, в окончательном варианте 10.09.2015.

Курочкин Александр Геннадиевич, коммерческий директор, ООО «НПЦ “Иннотех”», 305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, e-mail: ak.kursk@gmail.com

Жилин Валерий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И. И. Иванова, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. К. Маркса, 70, e-mail: shatolg@mail.ru

Суржикова Светлана Евгеньевна, аспирант, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, e-mail: moi_lanchik@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, e-mail: SFilist@gmail.com

Для мониторинга функционального состояния органов и систем человека предложено использовать анализ вольтамперных характеристик в биоактивных точках (БАТ) с последующим построением многоагентных классификаторов. С целью получения вектора информативных признаков,

¹ Исследования выполнены при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы». Проект «Разработка математического и программного обеспечения автоматизированных диагностических комплексов для анализа и классификации изображений мазков периферической крови в процессе лекарственного воздействия».