

УДК 621.396.4

ТУРБО-КОДЫ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПОВТОРАМИПрасолов В.А.¹, Токарев Д.А.²¹Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», Серпухов, РФ²Филиал военной академии РВСН имени Петра Великого, Серпухов, РФ

E-mail: pravit-1@iifmail.ru

Предложен подход к повышению вероятностно-временных характеристик информационного обмена в системах передачи данных, использующих для доведения информации комбинацию процедур повторной передачи данных и мажоритарного декодирования. В качестве схемы повышения достоверности используется турбо-код, проверочные символы которого распределяются по блокам, последовательно отправляемым получателю. Для реализации известных преимуществ многоитерационного алгоритма декодирования турбо-кодов предложено использование проверочных символов двух составляющих его сверточных кодов в каждом повторе, основанное на технике перфорации. В свою очередь, в первой посылке используются информационные символы систематического выхода турбо-кодера, что в отсутствие ошибок позволяет обеспечить прием информации без внесения временной задержки на работу декодера. Представленные результаты моделирования подтверждают эффективность рассматриваемого подхода, достигаемую исключительно усложнением схемы повышения достоверности при прочих равных условиях (энергии и полосе сигнала).

Ключевые слова: турбо-код, мажоритарная логика, оперативность, достоверность

Введение

Ряд систем передачи данных (СПД) [1], преимущественно военного назначения, для обеспечения гарантированного доведения информации до получателя осуществляют её многократное повторение. Накопленные повторы используются на приемной стороне при реализации алгоритма повышения достоверности информации, основанного на мажоритарной логике. Простота технического исполнения δ данного способа исправления ошибок позволяет обеспечить многообразие одновременно реализуемых сочетаний посимвольных мажоритарных проверок, общее число и типы которых определяются количеством накопленных повторов m . Очевидно, что поразрядное мажоритарное голосование по принципу большинства может осуществляться только при нечётном m , формируя проверку по правилу « $n = (m + 1)/2$ из m ». Кроме того, при получении каждого нового повтора, в том числе четного, возможно организовать типы проверок, доступные на нечетных повторах, предшествующих текущему.

Общее количество проверок по основаниям n на m -повторе определяется выражением

$$Q = \sum_{i=3}^m C_m^i, \quad (1)$$

где i – нечетные числа; C_m^i – число сочетаний из m по i . Другими словами, при приеме трех повторов производится одна проверка «2 из 3», четырех – три такие проверки (без учета уже выполненной), пяти – еще шесть и одна нового типа по правилу «3 из 5» и т.д.

Недостатком СПД с повторами и мажоритарной обработкой является отсутствие возможности коррекции ошибок до момента приема третьего повтора – первой проверки по правилу «2 из 3». Вероятность доведения $P_{\text{ДОВ}}$ сообщения длиной N на первом и втором повторах определяется только вероятностью ошибки в канале связи p_0

$$P_{\text{ДОВ}} = (1 - p_0)^N. \quad (2)$$

Вероятность же битовой ошибки после проведения мажоритарной проверки n/m , подставляемая на третьем и последующем повторах вместо p_0 в (2), определяется выражением:

$$p_b = \sum_{i=0}^{n-1} C_m^{m-i} p_0^{m-i} (1 - p_0)^i. \quad (3)$$

Постановка задачи

Рассмотрим возможность повышения помехоустойчивости и оперативности такой СПД методами помехоустойчивого кодирования

$\beta = f(m, \delta)$, оставив неизменной структуру сигнала s , длительность символа t_c и их количество N в каждом повторе, а также энергию E_b , затрачиваемую на передачу:

$$\beta(m, \delta) : \begin{cases} P_{\text{ДОВ}}(m) \rightarrow \max; \\ T_{\text{ДОВ}}(m) \rightarrow \min; \end{cases} \text{ при } \begin{cases} \Delta F = \text{const}; \\ E_b = \text{const}; \\ N = \text{const}; \\ t_c = \text{const}; \\ s = \text{const}. \end{cases} \quad (4)$$

Применение кодирования, помимо повышения сложности (параметр δ) алгоритмов формирования и обработки сигналов, неизбежно ведет и к увеличению общей временной задержки в СПД, определяемой выражением

$$t_3 = t_{\text{КОД}} + t_{\text{ОБР}} + t_{\text{ДЕКОД}}. \quad (5)$$

В исходной СПД с мажоритарными проверками кодирование не используется ($t_{\text{КОД}} = 0$), а задержка на первых двух повторах определяется только временем обработки принятых информационных символов $t_{\text{ОБР}}$. Это означает, что при хорошем качестве канала связи такая СПД может обеспечить максимально быстрое доведение информации потребителю.

Зададимся корректирующим кодом со скоростью $r = 1/m$. Необходимо распределить проверочные символы данного кода по m -посылкам таким образом, чтобы обеспечить возможность его декодирования в динамике приема каждого из m -повторов с учетом проверочных символов, принятых за $m - 1$ предыдущих. Тогда при отправке каждой новой посылки СПД будет наращивать мощность (корректирующую способность) кода, снижая скорость кодирования с $1/2$ до минимальной $1/m$. Каждая из посылок должна содержать N символов, а первая посылка должна обеспечивать возможность полного восстановления данных в отсутствие проверочных символов последующих.

Обеспечить такой алгоритм отправки проверочных символов проще всего использованием сверточного кодера (СК), число выходов которого равно числу повторов, заложенных в протокол информационного обмена СПД [2]. Сократить общую временную задержку в СПД с кодированием можно использованием систематических кодов, передавая/обрабатывая в первой посылке также только информационные символы. В свою очередь, при прочих равных условиях систематические сверточные коды уступают в дистанционных характеристиках несистематическим [3]. В

случае же несистематических СК восстановление информации после приема первой посылки можно осуществить делением проверочных символов на один из образующих полиномов, реализация которого потребует определенных временных затрат.

Турбо-кодирование с накоплением повторов

Развитие быстродействия средств вычислительной техники начинает позволять использовать наиболее мощные из известных кодов, прежде обоснованно считавшихся наилучшими только исходя из теоретических доказательств. Высокая эффективность данных кодов в большей степени достигается применением сложных алгоритмов их обработки и многоитерационного декодирования на приемной стороне.

На рис. 1 представлена структурная схема турбо-кода (ТК) стандарта CDMA2000 [4], задаваемого передаточной функцией:

$$G(D) = \begin{bmatrix} 1 & g_0(D) & g_1(D) \\ & d(D) & d(D) \end{bmatrix} \quad (6)$$

и полученного в результате конкатенации параллельных рекурсивных сверточных кодов с системой образующих полиномов:

$$\begin{cases} g_0(D) = 1 + D + D^3; \\ g_1(D) = 1 + D + D^2 + D^3; \\ d(D) = 1 + D^2 + D^3. \end{cases} \quad (7)$$

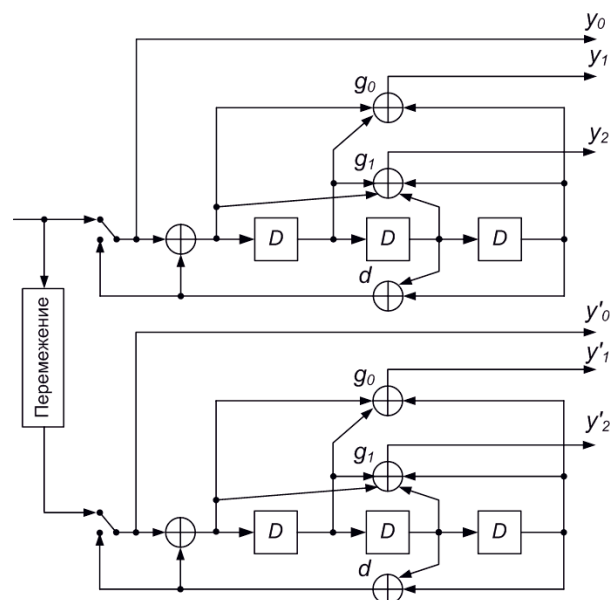


Рис. 1. Турбо-кодер стандарта CDMA2000 [5]

Распределив символы с пяти выходов кодера (выход y' не используется) по $m = 5$ посылкам и последовательно отправив их в очередности $y_0, y_1, y_2, y'_1, y'_2$, можно, в случае неуспешного приема информационных символов с систематического выхода y'_0 , обеспечить исправление ошибок уже при втором приеме, декодируя рекурсивный СК со скоростью $1/2$, образуемый полиномами g_0 и d .

Большей эффективности можно добиться, если при приеме второй посылки обеспечить работу алгоритма декодирования не сверточного, а турбо-кода, заключающегося в многоитерационной передаче мягких решений с выхода одного составного сверточного декодера на вход другого. Для этого в составе второй и последующих посылок необходимо присутствие проверочных символов минимум с одного из двух выходов каждого из составляющих СК турбо-кода. В заданных ограничениях (4) данное требование может быть выполнено по аналогии с известной в теории кодирования процедурой перфорации, за тем исключением, что выколотые символы не удаляются, а будут передаваться в каждом новом повторе. Для осуществления работы декодера позиции отсутствующих символов до момента их поступления в новом повторе могут быть отмечены приемной стороной как стирания.

Таблица 1. Шаблоны выкалывания ТК

Выход кодера	Скорость кода				
	1	1/2	1/3	1/4	1/5
y_0	11	11	11	11	11
y_1	00	10	11	11	11
y_2	00	00	00	10	11
y'_1	00	01	11	11	11
y'_2	00	00	00	01	11

Порядок передачи символов выкалывания, основанный на правилах перфорации турбо-кода, приведен в виде шаблонов (см. таблицы 1-2), действие которых распространяется на каждые 10 бит кодовой последовательности, соответствующей двум тактам работы турбо-кодера (по пять бит за такт). Символ «1» в шаблоне означает передачу бита в повторе, «0» – выкалывание.

Таблица 2. Порядок передачи символов ТК

Выход кодера	Номер повтора				
	1	2	3	4	5
y_0	11	00	00	00	00
y_1	00	10	01	00	00
y_2	00	00	00	10	01
y'_1	00	01	10	00	00
y'_2	00	00	00	01	10

Результаты моделирования

На рис 2 представлена сравнительная оценка достижимых вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доведения сигналами восьмипозиционной PSK 1880 бит информации, дополненных 32 битами CRC, девятью повторами с мажоритированием и пятью повторами с турбо-кодированием, считая постоянным отношение «сигнал/шум» E_b/N_0 в ходе передачи всех посылок.

Выводы

Таким образом, единственным обстоятельством для применения в СПД с повторами мажоритарных проверок является простота их тех-

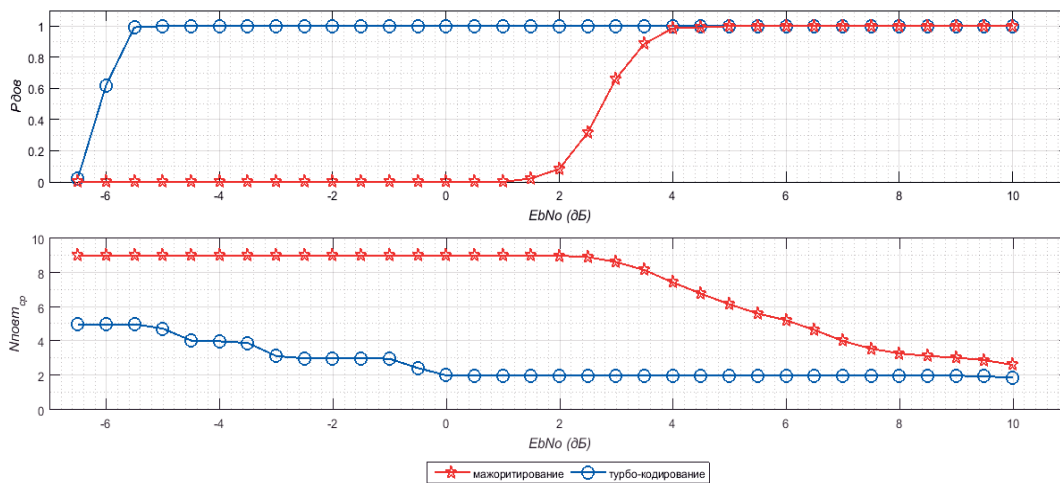


Рис. 2. Оценка ВВХ доведения информации повторами

нического исполнения δ . При прочих равных условиях (энергия, длительность и полоса сигнала) использование более сложного в аппаратной реализации турбо-кодирования позволяет получить значительный выигрыш одновременно по вероятности и времени доведения сообщений:

– на интервале значений $-5 \text{ дБ} < E_b/N_0 < 2 \text{ дБ}$ применение предложенного способа передачи проверочных символов турбо-кода позволяет обеспечить абсолютную (равную 100%) вероятность доведения, достичь которую использованием мажоритарной логики путем организации множества из 247 проверок невозможно;

– при равенстве мощностей сигнала и шума ($E_b/N_0 = 0 \text{ дБ}$), а также при дальнейшем улучшении качества канала можно обеспечить гарантированное ($P_{\text{дов}} = 1$) доведение информации турбо-кодированием уже за два повтора, исправляющая же способность мажоритарного декодирования начинает проявляться при $E_b/N_0 > 2 \text{ дБ}$, обеспечивая $P_{\text{дов}} = 1$ лишь при $E_b/N_0 > 4 \text{ дБ}$ за семь повторов (57 проверок).

Литература

1. Ванюшин В.М., Вилков С.В., Деркач А.М., Цимбал В.А. Методика нахождения характеристик процесса доведения сообщения в радиосети без обратной связи с повторениями и их мажоритарной обработкой // Инфокоммуникационные технологии. Т.9, № 1 2011. – С. 33-39.

Прасолов Виктор Анатольевич, начальник Управления автоматизированных систем управления и связи Института инженерной физики (Серпухов, Московская обл.). Тел. (8-496) 735-31-93. E-mail: prasvit-1@iifmail.ru.

Токарев Дмитрий Александрович, соискатель Кафедры АСУ филиала Военной академии РВСН им. Петра Великого. Тел. (8-496) 735-31-93

AUTOMATIC REPEAT REQUEST WITH TURBO-CODES

Prasolov V.A.,¹ Tokarev D.A.²

¹*Interregional public organization «Institute of Engineering Physics», Serpukhov, Russian Federation*

²*Branch of the Military Academy of the strategic missile forces, Serpukhov, Russian Federation*

E-mail: prasvit-1@iifmail.ru

The article presents a modification of Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) technique where user data are encoded with turbo-code and decoded with majority decoding algorithm. A sender encodes the data using Code Division Multiple Access 2000 standard punctured turbo-code. Encoded bits are then spread between subsequently transmitted blocks. Additional information (redundancy) added by the code is used by a receiver to recover the original data. First transmission includes only the user data symbols obtained from systematic output of a turbo-coder. In the absence of channel errors, that data is received without an additional delay. If errors are detected, a request for retransmission of a block is sent and the sender inserts parity bits of punctured turbo-code. Simulation results confirm the efficiency of the proposed method, which is achieved by using more complex coding and without increasing of signal energy or bandwidth.)

2. MIL-STD-188-141C, Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems, 25.07.2011.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. – 1104с.
4. 3GPP2 C.S0002-C, Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, 28.05.2002.
5. Yang S. C.3G CDMA2000 wireless system engineering (British library Cataloguing in Publication Data). London, Artech house, INC., 2004. – 270 p.
6. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing. Pearson Prentice Hall, 2007. – 1084 p.
7. Berrou C. Codes and turbo codes. Springer Science & Business Media, 2011. – 400 p.
8. Branka Vucetic, Jinhong Yuan. Turbo Codes: Principles and Applications. Kluwer Academic Publishers, 2000. – 312 p.
9. Rajeshree Raut, Kishore Kulat. Error Control Coding for Performance Improvement. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 180 p.
10. Parvathy Sherin. Performance Enhancement of MC-CDMA System Using Turbo Block Codes. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 76 p.

Получено 17.04.2017

Keywords: turbo-code, majority logic, efficiency, reliability

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.3.07

Prasolov Victor Anatoljevich, Interregional public organization «Institute of Engineering Physics», Bolshoy Udarny la, Moscow reg., Serpukhov, 142210, Russian Federation; the Head of Department of Automated Control Systems and Communication, PhD in Technical Science. Tel.: +74967353193. E-mail: pravvit-1@iifmail.ru.

Tokarev Dmitriy Alexandrovich, Branch of the Military Academy of the strategic missile forces; Brigadnaya st., 17, Moscow reg., Serpukhov, 142210, Russian Federation; PhD student of the Department of Automated Control Systems. Tel.: +74967353193.

References

1. Vanushin V.M., Vilkov S.V., Derkach A.M., Tsymbal V.A. Metodika nahojdenia harakteristik processa dovedenia soobshenia v radioseti bez obratnoi svyazi s povtoreniami i ih majoritarnoi obrabotkoi [Methods of finding the characteristics of the delivery process of messages in radio network without feedback with repeating and their majority processing]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2011, vol. 9 no. 1, pp. 33-39.
2. MIL-STD-188-141C. Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems. 25.07.2011.
3. Sklar B. *Digital Communications. Fundamentals and Applications. Second Edition*. PrenticeHall PTR, New Jersey, 2001. 1079 p. (Russ ed. Sklar, B. Tsyfrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenit. Moscow, Vilams Publ., 2003. 1104 p.).
4. 3GPP2 C.S0002-C, «Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems», 28.05.2002.
5. Yang S.C. *3G CDMA2000 wireless system engineering*. London, Artech house, INC., 2004. 270 p.
6. Proakis J.G., Manolakis D.G. *Digital Signal Processing*. Pearson Prentice Hall, 2007. 1084 p.
7. Berrou C. *Codes and turbo codes*. Springer Science & Business Media, 2011. 400 p.
8. Branka Vucetic, Jinhong Yuan. *Turbo Codes: Principles and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 312 p.
9. Rajeshree Raut, Kishore Kulat. *Error Control Coding for Performance Improvement*. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 180 p.
10. Parvathy Sherin. *Performance Enhancement of MC-CDMA System Using Turbo Block Codes*. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 76 p.

Received 17.04.2017

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 612.172

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ ЭКГ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Пермяков С.А., Кузнецов А.А., Сушкова Л.Т., Чепенко В.В.

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, РФ

E-mail: sapermakov@bk.ru

В работе представлен статистический подход к исследованию амплитудно-фазового сопряжения электрокардиограмм. Проведено сравнение гистограмм параметров стандартного отклонения и информационной энтропии. Предложена и описана модель параметрического сопряжения электрокардиографических данных на основе инфокоммуникационных связей и энтропийного подхода к анализу дискретных данных. По данным групповых регистраций электрокардиограмм условно-здоровых молодых людей предложена информационная модель амплитудно-фазового сопряжения. Показано, что введенный параметр угла инфокоммуникационной связи и информационная модель сопряжения имеют особую чувствительность к донологическим состояниям. По результатам анализа созданных параметрических диаграмм сопряжения представлена качественная и количественная классификация режимов амплитудно-фазового сопряжения электрокардиографических данных.

Ключевые слова: ритм сердца, сопряжение, инфокоммуникационная связь, функциональное состояние