

23. Сосулин Ю.Г., Трусов В.Н., Черемушкин П.В. Обнаружение человека за стеной многоканальным радиолокатором. 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и её применение», 2007. Москва. Вып. IX-1, с. 205-207.

24. Гудзь А.Г., Сосулин Ю.Г. Радиолокационная система обнаружения и определения местоположения людей за преградой. В сборнике «Обеспечение качества на всех этапах жизненного цикла изделия». Под ред. Б.В. Бойцова и Ю.Ю. Комарова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008, с. 248-255.

## PROCESSING AND INTERPRETATION METHODS OF GROUND-PENETRATING RADAR DATA

<sup>1</sup>Linnikov O., <sup>1,2</sup>Sosulin Yu., <sup>1</sup>Trusov V., <sup>1</sup>Yufryakov B.

<sup>1</sup>Scientific and Technical Centre of System Modeling

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute

**Abstract.** In this report effective methods of processing and interpretation of ground-penetrating radar data are presented. These methods are realized in software of GPR «Defectoscope» which are intended for nondestructive inspection of building construction.

## НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЕКОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СПУТНИКОВЫХ КАНАЛОВ

Зубарев Ю.Б.<sup>1</sup>, Золотарёв В.В.<sup>2</sup>, Овечкин Г.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МНИТИ, <sup>2</sup>ИКИ РАН, <sup>3</sup>РГРТУ

Развитие систем спутниковой, космической и других видов связи определяется быстрым прогрессом в создании всё более эффективных методов декодирования двоичных кодов, позволяющих реализовать эффективное исправление возникающих при передаче ошибок, что и обеспечивает более полное использование ёмкости весьма дорогих каналов цифровой связи. В докладе рассмотрены основные известные методы декодирования турбо и низкоплотностных (LDPC) кодов для кодовой скорости  $R \sim 1/2$ , а также многопороговые декодеры (МПД) [1-3], алгоритмы, позволяющие реализовать быстродействующие декодеры этого типа при большой энергетической эффективности.

Как хорошо известно, получение больших уровней помехоустойчивости всегда связано с применением довольно длинных кодов. На рис. 1 представлены нижние оценки средней вероятности ошибки декодирования блоковых кодов в ДСК без памяти при  $R = 1/2$  и разных длинах  $n$  этих кодов [1]. Как видно из представленных кривых, для получения действительно небольших вероятностей ошибки декодирования следует выбирать весьма высокие значения  $n$ . В противном случае достижение хорошей достоверности передачи при вероятности ошибки в ДСК  $p_0 \lesssim 0.11$ , т.е. когда  $R \lesssim C$  в этом примере канала типа ДСК, окажется невозможным.

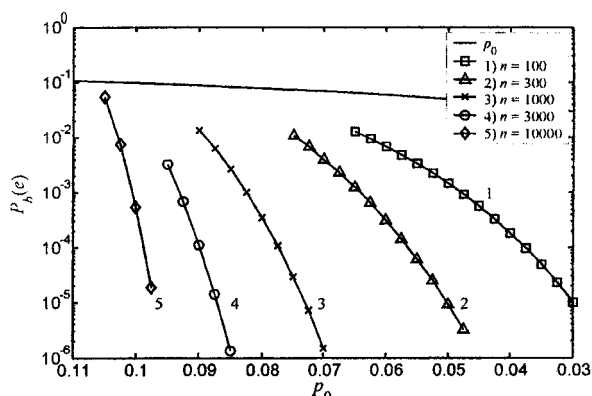


Рис. 1

Как следует из представленных графиков, даже при  $n \sim 10000$  битов вероятности ошибки канала  $p_0$ , при которых гипотетический наилучший переборный декодер мог бы обеспечить достаточно малые вероятности ошибки принятия решений относительно вида переданного блока, меньше, чем  $p_0 = 0.1$ . А это примерно ещё на 0.4 дБ меньше по уровню шума канала, чем разрешает граница  $R = C$ . Таким образом, даже представленные нижние оценки для вероятности ошибки декодера, полученные из известных границ сферической упаковки, показывают, что очень эффективные системы кодирования должны использовать и весьма длинные коды с  $n \sim 10^5 \div 10^7$ . Это обстоятельство дополнительно подчёркивает, что применяемые в технике связи ал-

горитмы коррекции ошибок должны быть максимально упрощены, поскольку только в этом случае окажется возможным действительно достаточно быстро и эффективно декодировать очень длинные коды.

При переходе к мягким модемам указанные нижние оценки характеристик декодирования и реальные возможности конкретных оптимальных методов декодирования улучшаются в области больших шумов канала примерно на 1.6 дБ.

Рассмотрим основные достигнутые за рубежом результаты, относящиеся к декодированию низкоплотных и турбо кодов.

Турбо коды нашли применение в стандарте широковещательного видео первого поколения DVB-S [4]. В данном стандарте описаны так называемые duo-binary турбо коды, работающие сразу с парами битов. Характеристики декодера duo-binary турбо кода с кодовой скоростью 1/2 и длиной блока 848 и 3008 битов в канале с AWGN и BPSK представлены на рис. 2 кривыми «DVB-S turbo (n=848) MLM» и «DVB-S turbo (n=3008) MLM» [5]. При декодировании выполнялось 8 итераций, на которых для декодирования составляющих кодов использовался max-log-MAP алгоритм. Из графиков видно, что данные коды способны работать на расстоянии примерно в 2.4 дБ и 1.6 дБ от пропускной способности канала при  $P_b=10^{-6}$ . Для данных турбо кодов существуют аппаратно реализованные кодеки, например, кодек компании iCODING, поддерживающий длины блока до 256 байт и способный работать со скоростью до 45 Мбит/с при реализации на ASIC и до 15 Мбит/с при реализации на FPGA Virtex™-II [6].

На рис. 2 кривой «LDPC (n=10000000) SP» показаны характеристики очень длинного LDPC кода длиной  $10^7$  битов [7]. При декодировании выполнялось до 2000 итераций sum-product алгоритма декодирования. Отметим, что данный код способен работать всего в 0.04 дБ от пропускной способности канала при  $P_b=10^{-6}$ , хотя, конечно, его реализация будет слишком сложна для практического применения.

Характеристики рекомендуемых в стандарте для широковещательного видео второго поколения DVB-S2 [8] LDPC кодов длиной 16200 и 64800 битов при кодовой скорости 1/2 представлены на рис. 2 кривыми «DVB-S2 LDPC(n=16200) SP» и «DVB-S2 LDPC(n=64800) SP» [5]. При декодировании выполнялось до 50 итераций sum-product алгоритма декодирования. Видно, что такие коды работают примерно в 0.7 и 0.9 дБ от пропускной способности канала при  $P_b=10^{-6}$ . Характеристики декодера LDPC кода длиной n=16200 при использовании более простого min-sum алгоритма декодирования показаны кривой «DVB-S2 LDPC(n=16200) MS». Такой декодер показывает сопоставимую с турбо кодами эффективность при несколько меньшей сложности исполнения. Для LDPC кодов стандарта DVB-S2 существуют аппаратно реализованные кодеки, например ASIC кодек компании АНА, способный работать со скоростью до 155 Мбит/с [9].

При использовании многопорогового декодирования (МПД) [1-3] возможно получение энергетического выигрыша кодирования, сопоставимого с результатами, достигаемыми на основе других методов, при вычислительных затратах в МПД, которые в ряде случаев оказываются на 2 порядка меньшими по числу операций, чем у других алгоритмов. Это позволяет создавать быстрые декодеры класса МПД, которые на обычных ПК осуществляют декодирование на скоростях 5÷15 Мбит/с при большом уровне шума в канале.

Реализация МПД на серийных ПЛИС Xilinx и Altera позволила достичь информационных скоростей передачи при большом уровне шума более 1 Гб/с [3]. Это стало возможным после модификации этого алгоритма, в результате которой его производительность стала определяться только максимальными скоростями продвижения данных по регистрам сдвига, реализованных в ПЛИС. Тем самым были сняты практические все ограничения на скорость декодирования в любой аппаратуре помехоустойчивого кодирования, в том числе и для систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для других методов достижение подобных результатов является весьма трудной задачей.

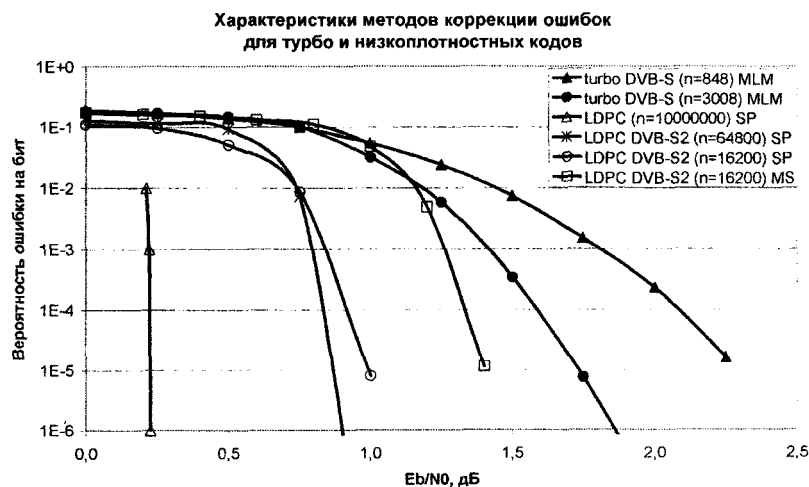
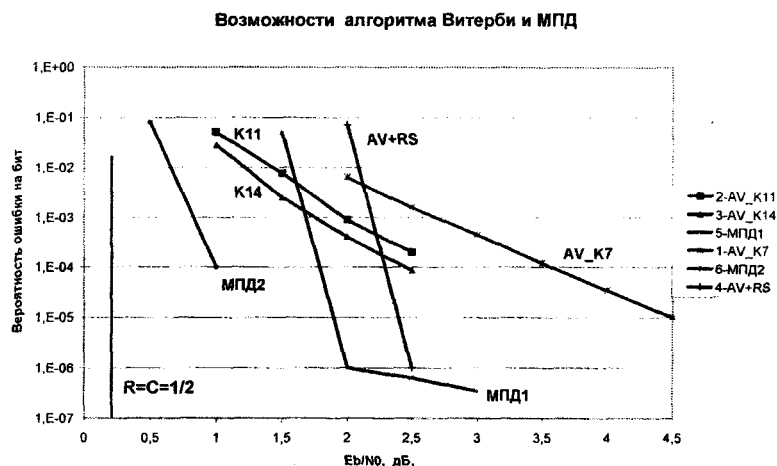


Рис.2.



Вместе с тем полезно заметить, что быстрое увеличение производительности всех узлов микроэлектроники позволяет реализовать на новом уровне эффективности и уже классические схемы, например, алгоритм Витерби (АВ) для более длинных кодов. На рис.3 представлены характеристики АВ для  $K=7$  (стандартный код), 11 и 14, а также каскадной схемы АВ+РС ( $K=7$ , код Рида-Соломона длины 256 с кодовой скоростью  $R=7/8$ ). Как следует из представленных данных, весьма простыми методами на базе более длинных кодов можно улучшить энергетические характеристики АВ примерно на 1 дБ, в том числе и для каскадной схемы. Код Рида-Соломона в этой схеме можно заменить более длинными недвоичными кодами и применить для них QМПД [10,11]. Дополнительный прирост ЭВК при переходе к QМПД будет в этом случае несколько менее 1 дБ.

Характеристики многопороговых алгоритмов представлены первой кривой МПД1 декодера на скорость 1 Гб/с, который планируется применить для марсианского проекта. Вторая кривая МПД2 соответствует оценке характеристик декодирования длинного кода для новой системы ДЗЗ. В настоящее время завершаются работы по созданию для этого кода высокоскоростного декодера и по его включению в эффективную каскадную схему.

Таким образом, алгоритмы МПД могут успешно применяться в любых высокоскоростных каналах, где они простейшими способами обеспечивают высокие энергетические характеристики кодирования.

Дополнительная информация об МПД разных классов – на специализированном тематическом двуязычном веб-сайте ИКИ РАН [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).

С этого же ресурса можно переписать демопрограммы рассмотренных выше алгоритмов декодирования и ряда других методов исправления ошибок в каналах с большим уровнем шума. Программы сопровождаются инструкциями по их использованию и позволяют рассматривать возможности многих методов декодирования при разных параметрах кодов и каналов.

Исследования велись при финансовой поддержке РФФИ по гранту №08-07-00078.

#### Литература

1. Золотарёв В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. –Под редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б.Зубарева. «Москва, Радио и связь», «Горячая линия - Телеком», 2006, 270 с.
2. V.V.Zolotarev, S.V.Averin, I.V.Chulkov. Optimum Decoding Characteristics Achievement on the Basis of Multithreshold Algorithms. — 9-th ISCTA'07, July, UK, Ambleside, 2007.
3. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. "Горячая линия - Телеком", Москва, 2004, 124 с.
4. European Telecommunications Standards Institute. Digital video broadcasting (DVB); interaction channel for satellite distribution systems. ETSI EN 301 790 V1.2.2, (12-2000) 2000.
5. Valenti M.C., Cheng S., Iyer Seshadri R. Digital video broadcasting // Chapter 12 of Turbo Code Applications: A Journey from a Paper to Realization, Springer, 2005.
6. Product Brief. S2002. DVB-RCS Compliant Turbo Encoder/Decoder. 2001.
7. On the Design of Low-Density Parity-Check Codes within 0.0045 dB of the Shannon Limit // IEEE Comm. Letters. 2001. vol. 5, no. 2, pp. 58-60.
8. European Telecommunications Standards Institute. Digital video broadcasting (DVB) second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications. DRAFT EN 302 307 (v. 1.1.2 06.2006).
9. Product Brief. ANA4702. DVB-S2 Compliant LDPC/BCH Forward Error Correction (FEC) Decoder Core. 2006.

10. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых декодеров. - «Цифровая обработка сигналов», М., 2008, № 1, с.2 -11.

11. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В. Каскадные схемы декодирования для баз данных на основе МПД. - В сб.: «10 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её приложения- DSPA-08», Пленарный доклад, М., 2008.

## NEW DECODING ALGORITHMS FOR HIGH-SPEED SATELLITE CHANNELS

Zubarev Yu.<sup>1</sup>, Zolotarev V.<sup>2</sup>, Ovechkin G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MNITI, <sup>2</sup>SRI RAS, <sup>3</sup>RGRTU

Development of systems satellite, space and other kinds of communication is defined by a rapid progress in creation of more and more effective methods of decoding of the binary codes, allowing to realize effective correction of errors arising by transfer, as provides fuller use of capacity of rather expensive channels of digital communication. In the report the basic known methods of decoding of a turbo and LDPC codes for code rate  $R \sim 1/2$ , and also multi-threshold decoders (MTD) [1-3] are considered, the algorithms, allowing to realize high-speed decoders of this type at the big power efficiency. Apparently, for really small of decoding error probabilities it is necessary to choose rather high code length  $n$ .

Very effective coding systems must use and rather long codes with  $n \sim 10^5 \div 10^7$ . This circumstance in addition underlines, that communications applied in the technician algorithms of errors correction should be as much as possible simplified, as only in this case it will appear possible really quickly enough and effectively to decode very long codes.

Turbo codes have found application in the standard of digital video broadcasting of first generation DVB-S [4]. In the given standard the codes working at once with pair of bits are described so-called duo-binary turbo code. Decoder characteristics duo-binary turbo code with code rate  $1/2$  and code length of 848 and 3008 bits over the channel with AWGN and BPSK are presented on fig. 2 by curves «DVB-S turbo ( $n=848$ ) MLM» and «DVB-S turbo ( $n=3008$ ) MLM» [5]. At decoding 8 iterations on which for decoding of constituent codes it was used max-log-MAP algorithm were carried out. It is clear, that the given codes it is capable to work at the distance approximately in 2.4 dB and 1.6 dB from of the channel capacity at  $P_b=10^{-6}$ . For the DVB-S turbo codes exist it is hardware the realized codecs, for example, the company iCODING codec, supporting code lengths up to 256 bytes and capable to work with a speed to 45 Mbit/s at ASIC implementation and to 15 Mbit/s with at FPGA Virtex<sup>TM</sup>-II implementation [3].

On fig. 2 curve «LDPC ( $n=10000000$ ) SP» is shown performance for very long LDPC code with code length of  $10^7$  bits [7]. At decoding about 2000 iterations sum-product algorithm of decoding were carried out. We will notice, that the given code is capable to work all at 0.04 dB from the channel capacity at  $P_b=10^{-6}$  though, of course, its realization will be too complex for practical application.

Characteristics recommended in the next generation standard for digital video broadcasting DVB-S2 [6] LDPC codes with code length of 16200 and 64800 bits and code rate  $1/2$  are presented on fig. 2 by curves «DVB-S2 LDPC ( $n=16200$ ) SP» and «DVB-S2 LDPC ( $n=64800$ ) SP» [5]. For DVB-S2 LDPC codes exist it is hardware the realized codecs, for example AHA 4702 codec [9], capable to work with a speed 155 Mbit/s.

Multithreshold decoding [1-3] allows to create fast decoders of class MTD which on usual personal computers carry out decoding on speeds 5-15 Mbit/s at the high noise level in the channel. Realization MTD at Xilinx and Altera [3] has allowed to reach information transmission speeds at the high noise level more than 1 Gbit/s for systems of remote sounding of the Earth (RES). For other methods achievement of similar results is rather difficult problem.

Characteristics of multithreshold algorithms are presented by first curve «МПД1» of the decoder with the speed 1 Gbit/s which was planned to apply to the Space project. Second curve «МПД2» corresponds to an estimation of long code decoding characteristics for new system RES. Works on creation the high-speed decoder for this code are almost ended.

The additional information about different classes of MTD is presented at specialized thematic bilingual web-site SRI RAS [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).

## ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ИНОВАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ «МУЛЬТИКОР» ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Солохина Т.В.

ГУП НПЦ «Электронные вычислительно-информационные системы» (ГУП НПЦ «ЭЛВИС»)  
а/я 19, Зеленоград, г. Москва, Россия 124460, Т. +7-495-913-3188. tanya@elnet.msk.ru. <http://multicore.ru>

1. Потребительские свойства современных систем ЦОС в самых различных областях применений во многом определяются элементной базой, на основе которой эти системы создаются. Кроме того, необходимость постоянного обновления систем ЦОС на рынке предьявляет требование и к обновлению элементной базы.