

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕЧАТИ»**

---

---

**ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА,  
УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ**

**Межвузовский  
сборник научных трудов**

**Выпуск 3**

Под общей редакцией  
д. т. н. Е. В. Никульчева

Москва  
2010

# МНОГОПороГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ<sup>1</sup>

Г. В. ОВЕЧКИН

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

**Введение.** В настоящее время для обмена информацией широко используются различные системы цифровой связи. Подобные системы используются для передачи данных как проводные, так и беспроводные каналы связи, в которых под действием различного рода помех передаваемая информация может исказиться. Это является недопустимым для многих приложений. Поэтому в любой системе передачи цифровых данных применяются средства помехоустойчивого кодирования, использование которых позволяет снизить долю необнаруженных ошибок до приемлемой. Подобные проблемы возникают и в системах хранения данных, в которых для повышения надежности долговременного хранения данных также используют помехоустойчивое кодирование.

**Характеристики методов коррекции ошибок.** На сегодняшний день в теории помехоустойчивого кодирования известно всего несколько методов коррекции ошибок в цифровых данных, обеспечивающих работу вблизи пропускной способности канала. Рассмотрим их эффективность при работе в канале с аддитивным белым гауссовским шумом, двоичной фазовой модуляцией при использовании кодов с кодовой скоростью  $1/2$  [1]. Отметим, что при таких параметрах канала и кодирования теоретически можно работать при отношении сигнал/шум, равным 0,2 дБ (кривая «С=1/2» на рис. 1).

Наиболее широкое практическое применение в реальных системах связи нашли сверточные коды, для декодирования которых часто используется оптимальный алгоритм Витерби (кривая «1) Витерби(K=7)» на рис. 1), и различные каскадные коды, например, каскадные коды, состоящие из кода Рида-Соломона и сверточного кода (кривая «2) РС(204,188,8)+АВ(K=7)» на рис. 1). Характеристики данных методов коррекции ошибок, как следует из представленных графиков, существенно хуже теоретически возможных. В последнее время зарубежными специалистами активно развиваются турбо [2] и низкоплотностные коды [3], эффективность которых очень высока. Например, методы декодирования турбо кодов, рекомендованных стандартом CDMA2000, обеспечивают характеристики, представленные кривой «3) ТСС

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №08-07-00078).

CDMA2000( $n=3600$ )). А с помощью низкоплотностных кодов длиной в миллион битов можно обеспечить сколь угодно малую вероятность ошибки декодирования при работе менее чем в 0,1 дБ от пропускной способности гауссовского канала (кривая «4» LDPC( $n=1000000$ )) на рис. 1). Эффективность декодеров низкоплотностных кодов меньшей длины, представлена на рисунке кривыми «5» 802.16e LDPC( $n=2304$ ) и «6» DVB-S2 LDPC( $n=64800$ )). К сожалению, все эти методы при работе в условиях большого шума все еще обладают весьма большой сложностью реализации, что затрудняет их практическое применение в высокоскоростных системах передачи и хранения данных.

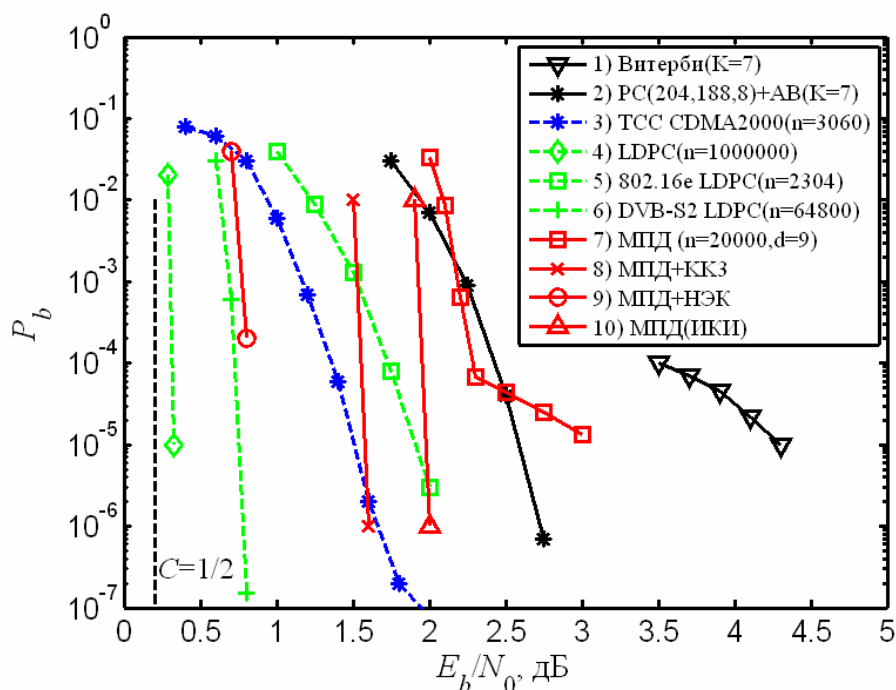


Рис. 1. Эффективность методов коррекции ошибок в канале с АБГШ и ФМ2

Интересным направлением в области разработки алгоритмов коррекции ошибок является многопороговое декодирование (МПД), развиваемое российскими специалистами [4-7]. Для данных декодеров показано, что они позволяют почти оптимально декодировать даже очень длинные коды с линейной от длины кода сложностью исполнения, демонстрируя при этом достаточно хорошие корректирующие способности, пример которых для кода длиной 20000 битов, кодовым расстоянием  $d=9$  и кодовой скорости  $R=1/2$  представлен на рис. 1 кривой «7» МПД ( $n=20000, d=9$ )). При этом МПД выполняют только простейшие операции сложения и сравнения целых чисел, что делает их очень привлекательными для применения в существующих и вновь создаваемых высокоскоростных цифровых системах передачи данных.

**Многопороговые декодеры самоортогональных кодов.** Более подробно опишем основные принципы работы МПД, который используется для

декодирования блочных или сверточных самоортогональных кодов (СОК). Кодер для подобных кодов является простейшим устройством, состоящим только из регистров сдвига и сумматоров по модулю 2. Пример кодера для сверточного СОК с кодовой скоростью  $R=1/2$  показан на рис. 2. Достаточно простым является и сам МПД, пример схемы реализации которого для такого же сверточного кода показан на рис. 3.

Несмотря на достаточно хорошую корректирующую способность, обеспечиваемую исходным МПД алгоритмом, разработчики постоянно ищут способы возможного повышения его эффективности.

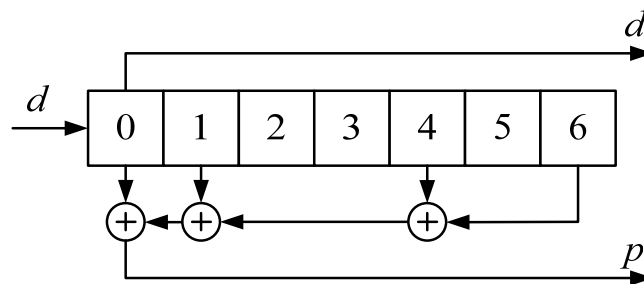


Рис. 2. Схема кодера сверточного СОК

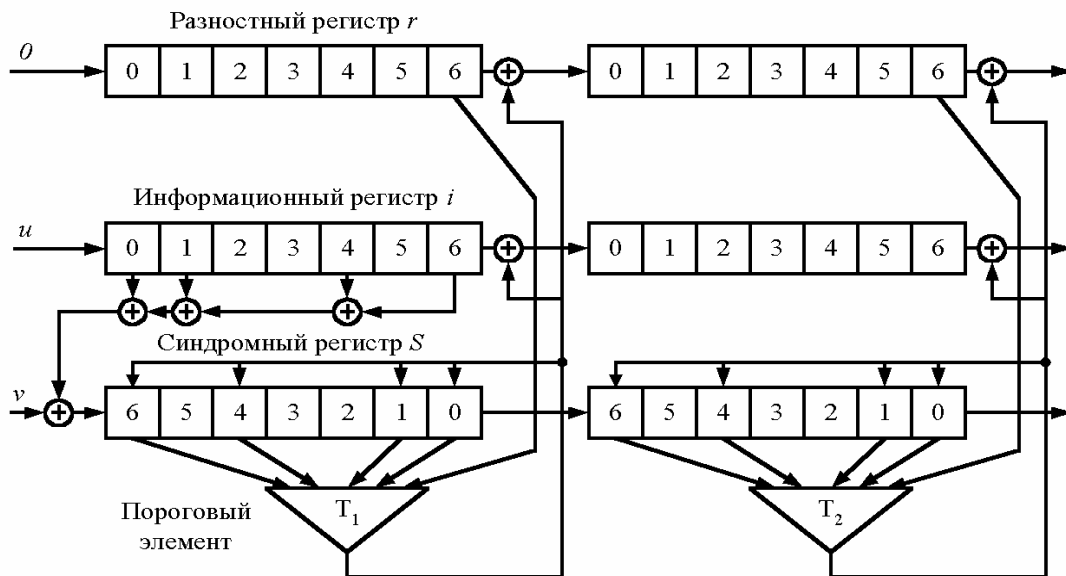


Рис. 3. Схема декодера МПД сверточного кода с двумя итерациями

Одним из способов приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала является выбор кодов, в наименьшей степени подверженный размножению ошибок декодирования [4]. Данное свойство проявляется в том, что после того, как декодер при работе совершает ошибку, вероятность ошибки в следующих символах существенно возрастает. Следовательно, нужно выбирать коды, для которых увеличение вероятности второй ошибки декодирования очень мало. В работах [4, 8] предложены подходы,

позволяющие оценить подверженность кода размножению ошибок и построить коды с минимальным размножением ошибок. Авторами показано, что только за счет выбора кода и оптимизации его структуры без усложнения схемы декодирования можно получить дополнительный энергетический выигрыш порядка 1..1,5 дБ.

Следующее направление работ связано с разработкой каскадных схем кодирования, составляющей частью которых является МПД. При этом каскадирование следует осуществлять только с очень простыми кодами для того, чтобы общая сложность схемы сильно не увеличилась. Поэтому в основное внимание уделено каскадированию МПД с кодами контроля четности, кодами Хэмминга и короткими самоортогональными кодами [9]. Применение подобных схем, как показали аналитические расчеты и результаты компьютерного моделирования, позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала на 1..2 дБ и уменьшить вероятность ошибки декодирования на 2..5 порядков без существенного усложнения схемы декодирования. Для примера на рис. 1 кривой «8) МПД+ККЗ» показаны характеристики одной из каскадных схем, построенной из МПД и достаточно простого самоортогонального кода. Данная схема позволяет обеспечить эффективность, сопоставимую с эффективностью лучших методов коррекции ошибок. При этом сложность этой каскадной схемы остается очень небольшой. В результате такой каскадный МПД легко реализовать, как и обычный МПД декодер, для скоростей порядка 500 Мбит/с и даже выше.

Дополнительное улучшение эффективности методов коррекции ошибок возможно при согласованном использовании систем кодирования и модуляции. Возможности одного из таких МПД декодеров представлены на рис. 1 кривой «9) МПД+НЭК». Данный график иллюстрирует очень высокую энергетическую эффективность алгоритма на расстоянии всего лишь порядка 0,6 дБ от пропускной способности гауссовского канала связи. Абсолютное большинство других алгоритмов коррекции ошибок оказываются в области столь больших шумов чрезвычайно сложными. При этом характеристики МПД оказываются сопоставимыми и даже лучшими характеристик декодеров многих известных турбо и LDPC кодов.

**Аппаратная реализация МПД.** Большое внимание уделяется и аппаратной реализации МПД на современной элементной базе. Одна из последних реализаций МПД была разработана в ИКИ РАН на ПЛИС Altera Stratix EP1S20 (рис. 4) [10]. Этот МПД является очередным этапом развития декодеров сверточных кодов на базе МПД и может считаться представителем их шестого поколения.

В данной ПЛИС реализован кодер, модуль генератора гауссовского шума и декодер, состоящий из 9-ти итераций коррекции ошибок (рис. 5). Раз-

рядность шины данных составляет 8 бит, частота следования данных 40 МГц (общая информационная скорость до 320 Мбит/сек).

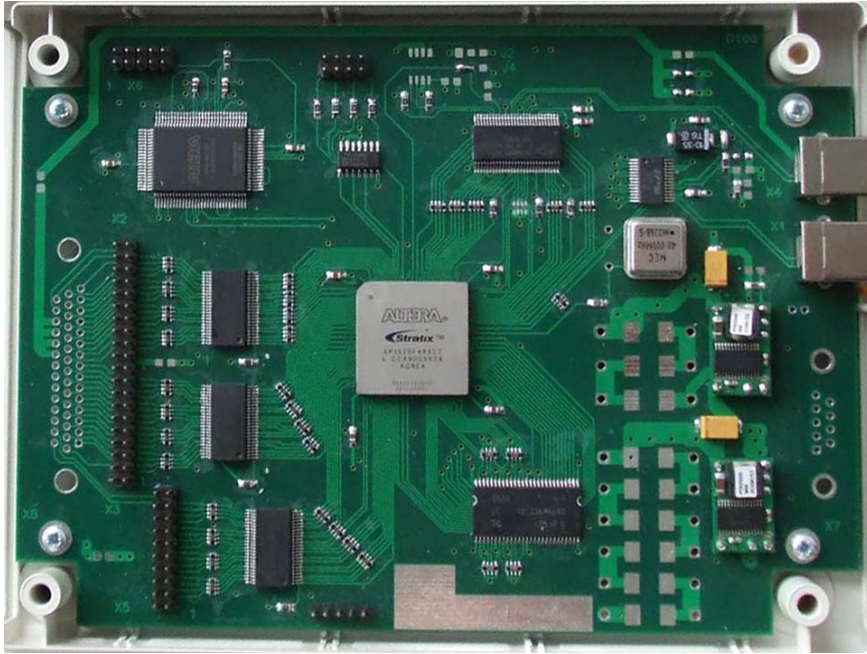


Рис. 4. МПД, разработанный в ИКИ РАН на ПЛИС Altera Stratix EP1S20

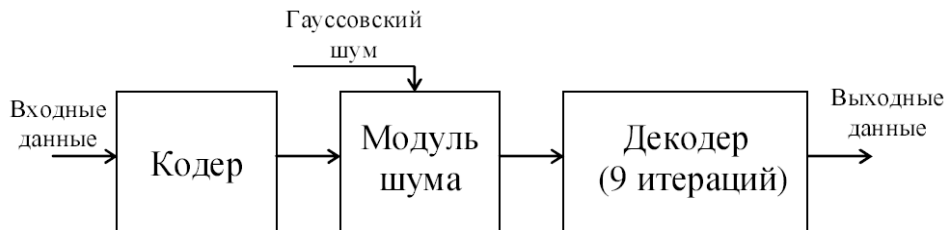


Рис. 5. Схема ПЛИС

В процессе разработки рассматриваемого МПД как составной части аппаратно-программного демонстрационно-измерительного стенда был создан комплекс программных средств, который обеспечивал генерацию информационного потока, генерацию шума с настраиваемыми параметрами, имитацию аппаратной версии декодера, оценку скорости работы прибора (демонстрация производительности декодера в спутниковом канале ДЗЗ на скорости 320 Мбит/сек), измерение достоверности декодирования в зависимости от уровня шума канала.

Данный проект показал, что можно получить хорошие энергетические характеристики кодирования при высоком уровне шума на информационной скорости до 320 Мбит/с при очень малой аппаратной сложности, что чрезвычайно ценно, например, для систем дистанционного зондирования земли.

В 2009 г. в ИКИ РАН завершились испытания декодера, работающего на информационной скорости более 1 Гбит/с. Такой скорости удалось дос-

тичь за счет использования конвейера при реализации процедур вычислений на пороговом элементе декодера и максимально эффективного использования вычислительных ресурсов ПЛИС. Энергетическая эффективность и общие размеры наземной части комплекса (декодера) в общем случае определяются выбором конкретных типов ПЛИС приёмной части системы кодирования. Пример характеристик, обеспечиваемых данной ПЛИС, представлен на рис. 1 кривой «10) МПД (ИКИ)».

**Заключение.** Таким образом, принципиально новый уровень помехоустойчивости и скорости обработки данных, достигаемый с помощью алгоритмов МПД разных типов позволяет решать задачи обеспечения высокой надежности передачи и хранения данных без какой-либо дополнительной доработки этих алгоритмов или всего лишь при незначительной их адаптации к возможным дополнительным требованиям, возникающим в крупномасштабных цифровых системах. Их использование одинаково просто и эффективно как при аппаратной, так и при программной реализации.

Дополнительную информацию о МПД можно получить на специализированном веб-сайте [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).

#### Библиографический список

1. *Зубарев Ю.Б.* Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых декодеров / Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин // *Электросвязь*, 2008. — № 12. — С. 2–11.
2. *Berrou C.* Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // *Proc. of ICC'93*. — Geneva, Switzerland, 1993. — P. 1064-1070.
3. *MacKay D.J.C.* Near Shannon limit performance of low density parity check codes / D.J.C. MacKay, R.M. Neal // *IEEE Electronics Letters*, Aug. 1996. — V. 32. — N. 18. — P. 1645–1646.
4. *Золотарёв В.В.* Теория и алгоритмы многопорогового декодирования / В.В. Золотарёв. — М.: Радио и связь; Горячая линия–Телеком, 2006. — 232 с.
5. *Золотарёв В.В.* Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин. — М.: Горячая линия–Телеком, 2004. — 124 с.
6. *Зубарев Ю.Б.* Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов / Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин // *Цифровая обработка сигналов*, 2008. — №1. — С. 2–11.
7. Веб-сайт ИКИ РАН ([www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru)).
8. *Овечкин Г.В.* Оптимизация структуры не двоичных самоортогональных кодов для схем параллельного кодирования / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин // *Труды НИИР*, 2009. — № 2. — С. 34–38.
9. *Золотарёв В.В.* Использование многопорогового декодера в каскадных схемах / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин // *Вестник РГРТА*, 2003. — Вып. 11. — С. 112–115.
10. *Золотарёв В.В.* Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ / В.В. Золотарёв, Р.Р. Назиров, А.В. Никифоров, И.В. Чулков // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: сб. науч. статей.* — М.: ООО «Азбука-2000», 2009. — Вып. 6. — Т. I. — С. 167–173.