Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ

В.В. Золотарев, Р.Р. Назиров, А.В. Никифоров, И.В. Чулков

Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mails: zolotasd@yandex.ru, nazirov@iki.rssi.ru, nikiforov@iki.rssi.ru , chulkov@iki.rssi.ru

Рассмотрена задача обеспечения надежности передачи цифровой информации по каналам с помехами. Описаны преимущества многопорогового декодирования над другими помехоустойчивыми кодами. Описана новая высокоскоростная аппаратная реализация многопорогового декодера на ПЛИС Altera. Представлены результаты измерений реального энергетического выигрыша кодирования созданного устройства.

Ключевые слова: оптимальное декодирование, многопороговое декодирование, ДЗЗ, ПЛИС, высокоскоростная связь.

Кодирование в системах цифровой связи

Одной из важнейших задач при построении современных систем передачи информации является проблема повышения надежности, помехоустойчивости и скорости передаваемой информации. Кроме того, эти системы должны выполнять поставленные задачи в условиях действия различного вида помех [1-3]. Особенно высокими характеристики кодирования должны быть при создании систем ДЗЗ, где требуются максимально возможные уровни достоверности цифровых потоков и предельно высокие скорости их передачи.

Одним из решений данной задачи является использование помехоустойчивого кодирования в системах передачи информации. Целесообразность кодирования информации впервые была показана К. Шенноном, где было доказано, что если скорость создания сообщений источником не превосходит некоторой величины, называемой пропускной способностью канала, то при правильно выбранных методах кодирования и декодирования можно вести передачу по каналу с шумом со сколь угодно малой вероятностью ошибки. Основные задачи помехоустойчивого кодирования связаны с построением кодов с высокой корректирующей способностью и с разработкой высокоэффективных практически реализуемых алгоритмов их декодирования.

В настоящее время широко используются такие системы кодирования, как коды Рида-Соломона, Витерби, низкоплотностные, турбокоды и др. Однако, для реализации достаточно эффективных алгоритмов этих классов требуются значительные вычисленные затраты т. е. большое количество операций, что приводит к очень значительному увеличению времени кодирования и декодирования [1-3]. Высокая сложность устройств кодирования и декодирования в этих системах затрудняет этих алгоритмов для работы в реальном масштабе времени и существенно ограничивает скорость передачи информации. При небольшой вычислительной сложности эти алгоритмы обычно имеют довольно низкую помехоустойчивость.

Возможности многопорогового декодирования

Среди нескольких наиболее известных сейчас методов декодирования для большого уровня шума многопороговые декодеры (МПД) имеют ряд существенных преимуществ [3-5]:

– способность исправлять большое число ошибок за пределами гарантированной корректирующей способности;

– крайне незначительную сложность пороговых процедур декодирования;

– строго доказанное свойство разработанных МПД алгоритмов почти всегда достигать оптимальных решений даже при весьма высоких уровнях шума в канале связи;

– предельно малую сложность реализации МПД даже для очень длинных кодов, когда только и возможно достижение максимально допустимых значений эффективности кодирования.

Огромное преимущество МПД имеет перед всеми другими схемами декодирования по числу операций, достигающее 100 и более раз при программной их реализации [1, 2, 5], а также возможность их полного распараллеливания при аппаратной реализации [3, 4, 6, 7]. В результате производительность такого декодера ограничивается только скоростью движения данных по его регистрам сдвига, которые относятся к самым быстрым элементам схемотехники ПЛИС.

Экспериментальный МПД декодер

Одна из последних реализаций МПД была разработана в ИКИ РАН на ПЛИС Altera Stratix EP1S20 (рис. 1). Этот МПД является следующим этапом развития (с 1972 г.) этих декодеров сверточных кодов на базе МПД и может считаться представителем их шестого поколения.

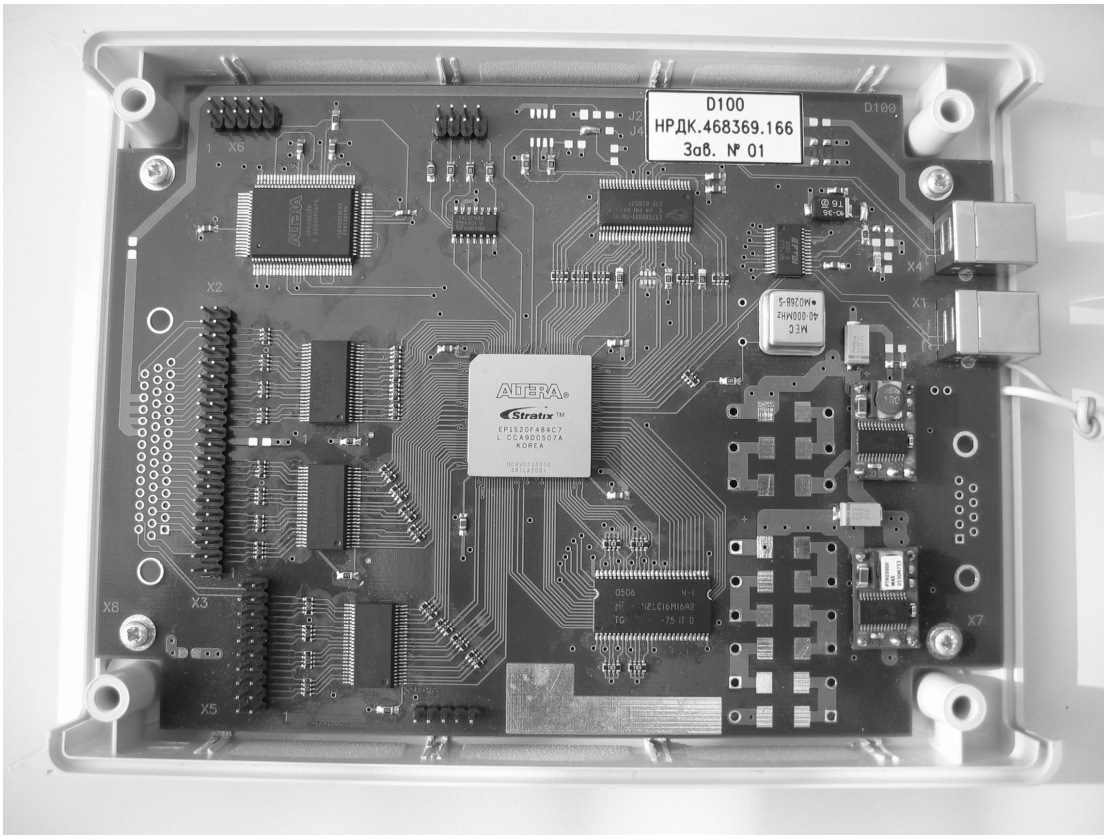

Рис. 1. МПД, разработанный в ИКИ РАН на ПЛИС Altera Stratix EP1S20

В данной ПЛИС реализован кодер, модуль генератор гауссовского шума и декодер, состоящий из 9-ти итераций коррекции ошибок (рис. 2). Разрядность шины данных 8 бит, частота следования данных 40 МГц (общая информационная скорость до 320 Мбит/сек). Длина каждой итерации декодера составляет 256 бит.

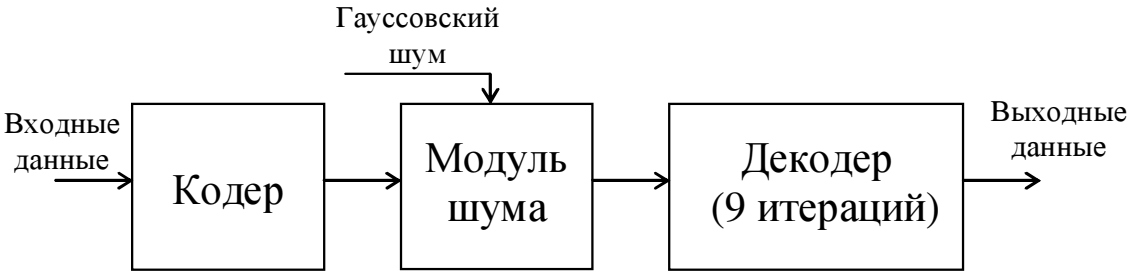

Рис. 2. Схема ПЛИС

В процессе разработки рассматриваемого МПД как составной части аппаратно-программного демонстрационного стенда был создан комплекс программных средств (рис. 3), 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.

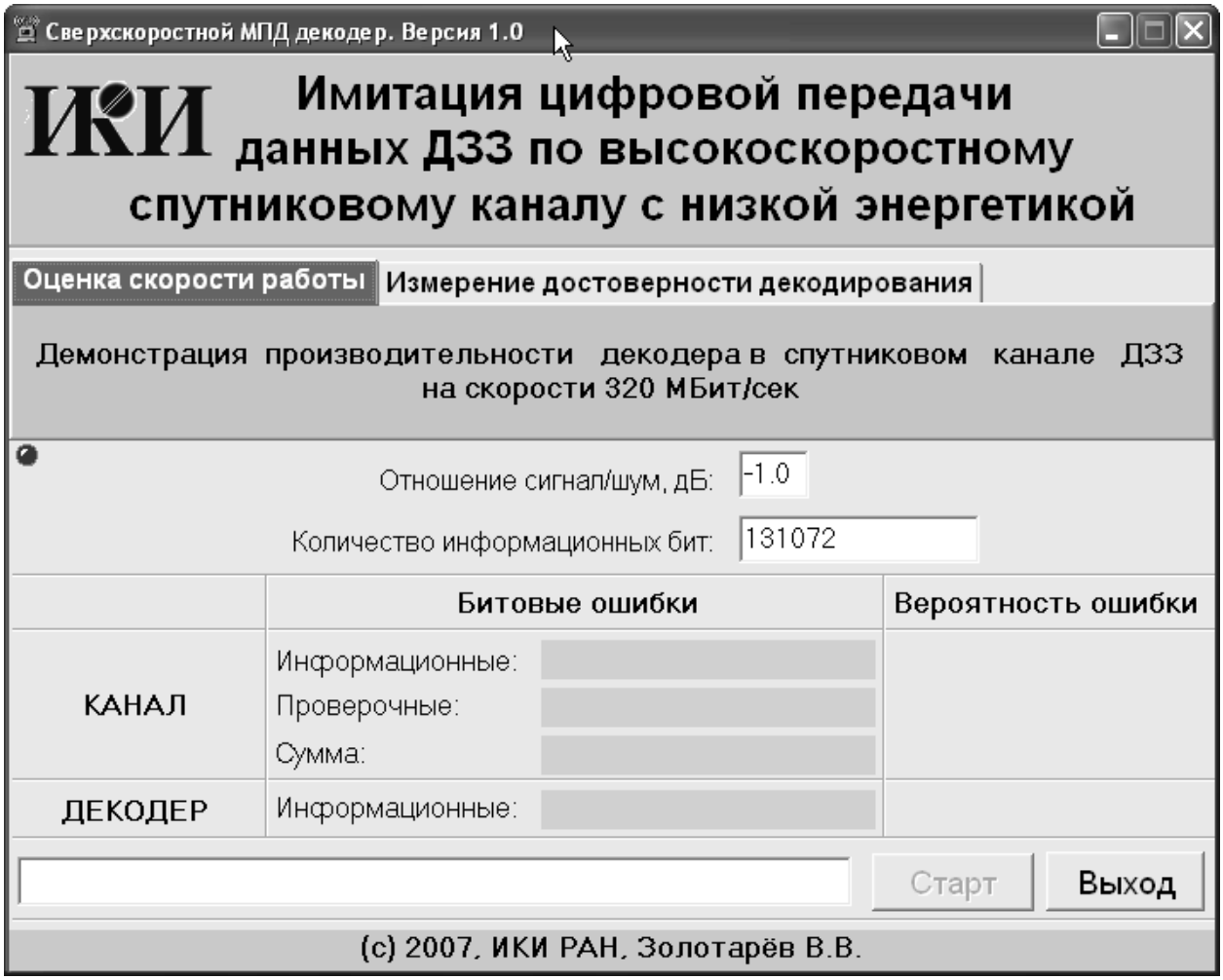

Рис. 3. Интерфейс программного комплекса МПД

При первом режиме работы программы демонстрируется скорость работы декодера. В кодер поступает информация, сгенерированная внутри ПЛИС, а на вход имитатора гауссовского шума подаются данные, находящиеся во внутренней памяти ПЛИС, которой достаточно для передачи 128 Кбит данных через декодер. При передаче большего количества данных шум из внутренней памяти повторяется. В этом режиме работы данные в кодере и декодере передаются на максимальной скорости (8-битовый поток с частотой 40 МГц), так как вся информация генерируется непосредственно в ПЛИС.

Для запуска программы нужно задать отношение сигнал/шум, а также количество передаваемых бит данных и нажать кнопку «Старт». Через декодер данные пройдут с максимальной скоростью, и программа покажет количество битовых ошибок на входе и выходе декодера, а также вероятность того, что декодер не исправит ошибку при данном соотношении сигнал/шум. В данном режиме работы показывается максимальная производительность работы декодера 640 Мбит/с в канале.

Во втором режиме работы измеряется эффективность декодирования в зависимости от уровня шума канала. Здесь также задается отношение сигнал/шум и количество передаваемых бит, но в этом случае информация на вход кодера и данные имитатора гауссовского шума поступают из компьютера. В этом режиме имеется возможность проверить работу декодера на большом количестве данных при постоянно изменяющемся уровне шума в канале. Ниже приведены характеристики данного декодера, состоящего из 9 и 40 итераций (рис. 4).

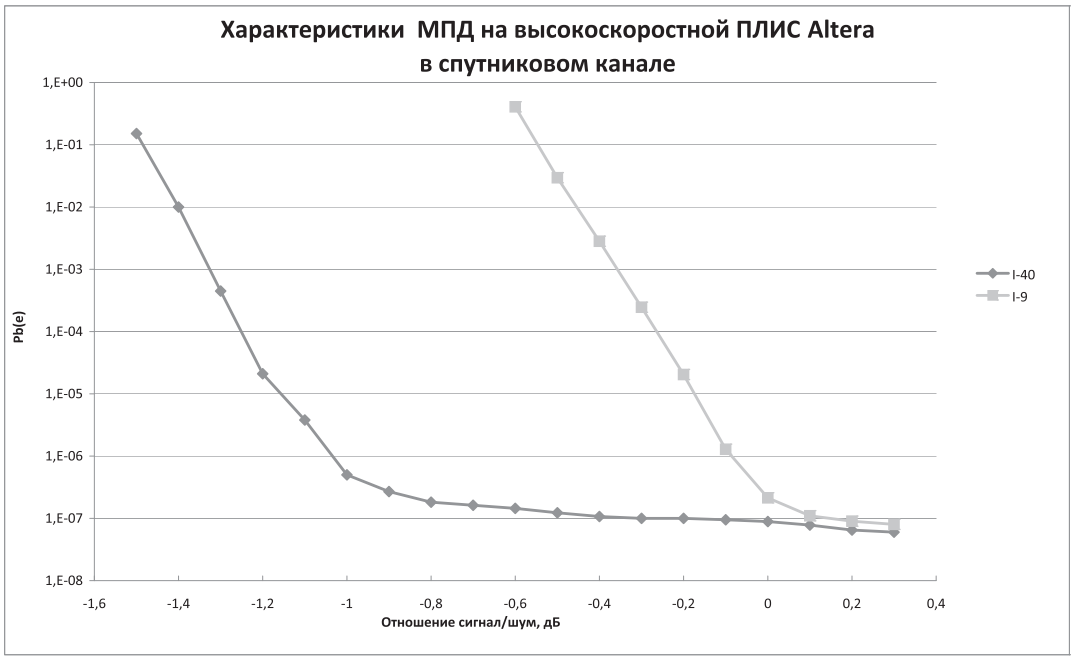

Рис. 4. Характеристики МПД на высокоскоростной ПЛИС Altera в спутниковом канале

Данный проект показал, что можно получить хорошие энергетические характерис-тики кодирования при высоком уровне шума на информационной скорости до 320 Мбит/с при очень малой аппаратной сложности, что чрезвычайно ценно для систем ДЗЗ.

Высокоскоростной МПД декодер

В конце 2008 г. в ИКИ РАН был создан и успешно испытан декодер, работающий на информационной скорости более 1 Гбит/с. Этого удалось достичь за счет использования конвейера при реализации процедур вычислений на пороговом элементе декодера. В этом случае

скорость работы декодера ограничена только достижимой быстротой прохождения данных по сдвиговым регистрам ПЛИС. При реализации этой сверхвысокоскоростной версии МПД декодера удалось максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы очень недорогой ПЛИС. Энергетическая эффективность и общие размеры наземной части комплекса (декодера) в общем случае определяются выбором конкретных типов ПЛИС приёмной части системы кодирования.

В таблице 1 представлены ПЛИС фирмы Altera, необходимые для реализации декодера с требуемым энергетическим выигрышем.

Таблица 1.

ПЛИС Altera	**Используемая память, Кбит**	**Энергетический выигрыш**
Stratix EP1S20	489	8,2 дБ
Stratix EP1S80	2’119	8,7 дБ
Stratix2 EP2S180	4’074	9,1 дБ

Общие характеристики МПД алгоритмов

Применение МПД в спутниковых и прочих дорогих каналах позволяет реализовать произвольно высокие скорости обработки и существенно, **до нескольких раз (!)** повысить к.п.д. их использования. Крайне простое устройство МПД по сравнению с прочими сопоставимыми с ним по эффективности методами делает их много более предпочтительными в быстрых широкополосных каналах при аппаратной реализации. В более медленных каналах связи даже программные реализации МПД очень эффективны и требуют написания лишь нескольких десятков команд программного кода для порогового элемента. При этом скорости декодирования при большом шуме могут достигать десятков Мбит/с на обычных ПК. Простые методы согласования кода и сигналов ещё более повышают возможности МПД и делают их реализацию особенно простой. Совершенно незначительная разница в эффективности МПД по сравнению с некоторыми особенно сложными декодерами других типов, как показывает динамика улучшения характеристик МПД в последние годы, будет преодолена, видимо, в самое ближайшее время.

МПД декодеры относятся к чисто отечественному направлению развития теории и техники кодирования. Они опережают аналогичные зарубежные наработки на 5 - 7 лет. Методы МПД защищены патентами и лицензиями. Работы по этой тематике получили Премию Правительства РФ по науке и технике.

Новые сферы применения МПД алгоритмов

Кроме естественных областей применения простых высокоэффективных методов кодирования в сетях связи следует отметить хорошие возможности их использования МПД для кодирования информации на дисках и других носителях больших объёмов информации, в сверхбольших базах аудио- и видео- данных с намного более высоким уровнем достоверности, чем это было доступно до недавнего времени, а также при обновлении, восстановлении, переносе и использовании хранимых там данных. При этом легко обеспечить оперативный постоянный контроль над качеством хранимой информации, а также своевременную корректировку и перенос данных вследствие старения и возникающих дефектов носителя. Все виды динамического контроля уровня достоверности, управления памятью и её резервированием самым очевидным образом реализуются на основе того, что МПД алгоритмы непрерывно проводят различные простые, но очень информативные и удобные мажоритарные оценки надёжности записанных данных. Этим и определяются все дополнительные преимущества многопороговых алгоритмов в их приложениях по обеспечению принципиально нового, на много десятичных порядков более

высокого уровня целостности и достоверности хранения информации в сверхбольших массивах данных практически любой структуры.

Новые типы МПД алгоритмов получили название символьных [2, 5, 7], поскольку они работают с использованием естественного для вычислительной техники байтовой структуры данных. Такой подход создал условия для применения в этих МПД столь длинных кодов, что при традиционном их декодировании другими методами реальные скорости коррекции были бы примерно до **миллиарда (!)** раз более низкими, чем в случае МПД алгоритмов. Это позволяет считать разработку символьных кодов и их декодеров открытием в теории и технике кодирования и рекомендовать их широкое применение, в том числе и для высокодостоверного хранения данных ДЗЗ [5, 7].

Выводы

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.

Большое число демонстрационных программ для различных типов МПД декодеров и конкурирующих с ними методов представлены на ресурсе [7].

Исследования и разработки МПД алгоритмов велись при финансовой поддержке РФФИ по гранту №08-07-00078.

Литература

1. *Золотарев В.В.* Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. 207 с.

2. *Золотарев В.В., Овечкин Г.В.* Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник. “Горячая линия – Телеком”, Москва, 2004. 128 с.

3. *Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.* Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь, 2008. №12. С. 58-61.

4. *Золотарев В.В., Назиров Р.Р., Чулков И.В.* Оптимальное декодирование в цифровых спутниковых каналах при дистанционном зондировании Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. I. С. 229-235.

5. *Золотарев В.В., Назиров Р.Р.* Сверхнадёжное исправление ошибок на основе МПД алгоритмов для баз данных систем ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. I. С.267-272.

6. *Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В.* Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов, 2008. №1. С. 2-11.

7. Веб-сайт ИКИ РАН по современным методам помехоустойчивого кодирования - ***www*.mtdbest.iki.rssi.ru**

New possibilities of multithreshold decoding for high-reliable data transmission in ERS systems

V.V. Zolotarev, R.R. Nazirov, A.V. Nikiforov, I.V. Chulkov

Space Research Institute of RAS
E-mails: zolotasd@yandex.ru, nazirov@iki.rssi.ru, nikiforov@iki.rssi.ru , chulkov@iki.rssi.ru

Reliability of transferring binary digital streams in Gaussian channels with a large noise level is considered. Advantages of multithreshold decoding over other noiseproof codes are described. New high-speed hardware realizations of the multithreshold decoder on FPGA Altera is described. Measuring results of a real power efficiency of coding for the created device are presented.

Keywords*:* optimum decoding, multithreshold decoding, ERS, FPGA, high-speed communication.