

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.Ф. Бабкин, В.В. Золотарёв

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная ул. 84/32
e-mail: zolotasd@yandex.ru
www.mtdbest.iki.rssi.ru*

Для обеспечения высокой достоверности передачи цифровых данных в системах ДЗЗ, увеличения скорости передачи и снижения излучаемой мощности радиопередатчика предложено применять последние достижения в области теории и техники помехоустойчивого кодирования. Рекомендуется использование обычных и каскадных методов кодирования на основе многопороговых алгоритмов для простого и эффективного декодирования в высокоскоростных каналах ДЗЗ. Описаны последние разработки аппаратных декодеров на ПЛИС и оценивается производительность программных версий таких декодеров.

Большой объём передаваемой информации при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) и быстро увеличивающиеся скорости передачи этой важнейшей информации для служб метеопрогнозирования и других наук о Земле предъявляет всё возрастающие требования к качеству передаваемой информации и её достоверности. Еще совсем недавно скорости передачи данных в системах ДЗЗ составляли десятки мегабитов в секунду при вероятности ошибки на бит $P_b(e) \sim 10^{-5}$. Современные системы ДЗЗ должны передавать данные со скоростями сотни мегабитов в секунду при вероятности ошибки менее $P_b(e) < 10^{-7}$, что в первую очередь связано со сложной последующей обработкой переданных на землю данных. Особенно важно обеспечить высокие уровни достоверности в тех случаях, когда перед передачей с орбиты информация в силу её огромного объёма существенно сжимается.

К наиболее эффективным методам обеспечения высокого уровня достоверности передачи дискретной информации в условиях высокого уровня шума канала относятся разнообразные и в настоящее время уже весьма мощные алгоритмы декодирования корректирующих кодов, например, [1,3,5,6,12]. За 50 лет своего интенсивного развития в технику связи были успешно внедрены пороговые декодеры, алгоритм Витерби (АВ), коды Рида-Соломона, каскадные схемы кодирования, а также разработки последнего времени: - алгоритмы для турбо кодов и многопороговые декодеры (МПД) [12]. Однако требования к алгоритмам исправления ошибок в каналах с шумами, в частности, спутниковых, непрерывно растут. При этом самая главная проблема: декодирование с эффективностью, близкой к оптимальной по энергетике, но при максимально простой реализации, - ещё до недавнего времени была весьма далека от своего успешного решения. Проблема особенно простой реализации становится фактически главной именно при передаче данных в ДЗЗ, поскольку высокие скорости передачи по каналу связи практически не позволяют выделять сколько-нибудь значительного времени как на кодирование информации помехоустойчивым кодом, так и на его декодирование.

Ниже рассмотрены новые подходы к решению весьма сложной по своей сути задачи помехоустойчивого кодирования, которые успешно развиваются в ИКИ РАН. Особое внимание мы уделим особенностям применения помехоустойчивого кодирования в задачах ДЗЗ. Эта проблема является хорошим тестом для проверки применимости технических решений, предлагаемых теорией кодирования, в реальных современных системах связи.

Главная проблема помехоустойчивого кодирования

Как известно, использование помехоустойчивого кодирования позволяет обеспечивать заданные достоверности передачи цифровых данных в спутниковых и других каналах связи при существенно более низком уровне сигнала по сравнению с вариантом передачи без кодирования [1-3, 10,11]. Реализация эффективных декодеров при кодировании в каналах с большим уровнем шума возможна, если выполняется условие $R < C$, т. е. когда кодовая скорость R меньше пропускной способности канала C . Кодовой скоростью $R = k/n < 1$ называется отношение числа информационных символов кода k к полному числу кодовых символов n , количество которых вследствие введения дополнительных избыточных символов всегда несколько превышает число исходных информационных символов k . Пропускная способность канала C определяется той моделью шума канала, в соответствии с которой передаваемые по этому каналу, например, двоичные символы, искажаются в процессе пересылки данных от передатчика к приёмнику сообщений.

Подчеркнём, что задача кодирования данных (при условии, что приёмник знает, как декодировать принятое закодированное сообщение) обычно является очень простой и не представляет никаких технологических трудностей.

Если далее выбрать такую модель способа генерации шума канала, при котором вероятность ошибки приёма каждого двоичного символа равна p_0 , и эти искажения в каждом конкретном символе происходят независимо от успешности или ошибочности передачи других символов кода, то для такого двоичного симметричного канала (ДСК) пропускная способность C определяется простым соотношением $C=1-H(p_0)$. Например, для $p_0=0,11$ $C=0,5$, что и определяет возможности кодов с $R=1/2$: они могут работать только в каналах типа ДСК с $p_0<0,11$. Но если это условие выполняется, то возможна передача цифровых данных с последующим восстановлением истинного двоичного сообщения со сколь угодно большой достоверностью.

Однако сколь угодно высокая достоверность декодирования при передаче по каналу с шумом возможна только при очень большой длине используемых кодов. Именно это обстоятельство и приводит к основной проблеме теории помехоустойчивого кодирования, которая в одной из своих парадоксальных формулировок может быть представлена так: все коды хороши и могут обеспечить отличные результаты, однако их можно декодировать только переборными методами. В то же время простые алгоритмы для специально выбранных кодов, - малоэффективны, т. е. не обеспечивают малых вероятностей ошибок в той области шумов, где теория гарантирует обеспечение высокой достоверности.

Но даже при переборных методах декодирования кодов длины порядка $n=1000$, когда число рассматриваемых декодером вариантов решений $N=2^{500}$ многократно превышает число атомов во Вселенной, вероятность ошибки декодирования блока $P_b(e)\sim 10^{-5}$ возможна только при $p_0<0,08$. Это значит, что приближение к пропускной способности канала $C=1/2$, когда $p_0=0,11$, на самом деле возможно только при длинах кодов в десятки и сотни тысяч битов. Этим и определяется чрезвычайная сложность основной задачи помехоустойчивого кодирования – построения эффективных кодеков. Она может быть кратко сформулирована так: для работы в области таких шумов канала, когда $R\approx C$, что для рассматриваемого примера соответствует вероятности ошибки на символ лишь немного меньшей, чем $p_0=0,11$, необходимо создавать методы декодирования, гораздо более простые, чем переборные, которые, однако, лишь очень немного уступали бы по эффективности оптимальным методам.

Критерии эффективности кодирования

При проектировании систем связи наиболее удобно оценивать эффективность применения кодирования как величину снижения отношения битовой энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в канале связи E_b/N_0 в случае применения помехоустойчивого кодирования по сравнению со случаем, когда передача осуществляется без такого кодирования. Этот критерий называется энергетическим выигрышем кодирования (ЭВК). Фактически ЭВК соответствует эффекту увеличения мощности передатчика, пересчитанной на одинаковые скорости передачи информационных потоков. Величина ЭВК может составлять для очень эффективных кодов величин порядка $G=5 - 10$ дБ и более для вероятности требуемой вероятности ошибки декодера на бит $P_b(e)\sim 10^{-5}$. Очевидно, что при меньших необходимых вероятностях ошибки декодирования возможный уровень ЭВК будет больше, потому что система без кодирования должна работать при большей мощности передатчика, а система кодирования повышает достоверность своих решений только благодаря более эффективным вычислениям декодера. А поскольку рост требуемой достоверности передачи практически во всех системах неизбежен, как и увеличение её скорости, то становится очевидной важность повсеместного применения кодирования.

Напомним, что, например, известный алгоритм Витерби (АВ) для стандартного кода с $R=1/2$ и длиной стандартного кодирующего регистра $K=7$ позволяют достичь $G=5$ дБ. В начале 70-х годов прошлого века, когда были созданы первые аппаратные версии декодеров АВ, это было очень серьёзным достижением, что и определило успех его применения в последующие два десятилетия. С другой стороны, граница Шеннона для пропускной способности канала C показывает, что ЭВК для кодовой скорости $R\sim 1/2$ и $P_b(e)\sim 10^{-5}$ может быть более $G=9$ дБ. Значит, существуют гораздо более эффективные методы кодирования, чем использование этого конкретного кода длины 7 и декодирование по АВ.

Значительно улучшают возможности кодирования каскадные методы [8], которые обычно более эффективны, чем исходные алгоритмы. Но они также ещё весьма далеки от потенциальных теоретических пределов.

Экономическая ценность применения кодирования

Зарубежные специалисты оценивали каждый дополнительный 1 дБ ЭВК, полученный на основе помехоустойчивого кодирования, в миллионы долларов более 20 лет назад [2]. Сейчас экономическая

ценность всё более высоких уровней ЭВК и роста достоверности передаваемых данных многократно возросла, поскольку при этом можно значительно уменьшать размеры очень дорогих антенн или повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи или снижать необходимую мощность передатчика, а также улучшать другие очень существенные параметры систем связи. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всём мире уделяется огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

В системах без кодирования обычно невозможно обеспечить использование потенциальной ёмкости каналов более, чем на несколько процентов. Поэтому с экономической точки зрения затраты на создание таких систем связи оказываются в десятки раз большими, чем в правильно спроектированных системах с применением помехоустойчивого кодирования и теми же параметрами ёмкости каналов связи.

Из приведённого сопоставления следует, что любые коммерческие и многие другие системы цифровой связи, использующие каналы с дефицитными энергетическими и частотными ресурсами, никогда не выдержат конкурентной борьбы с правильно построенными современными системами связи, использующими эффективные методы помехоустойчивого кодирования.

Многие другие вопросы, связанные с решением проблем создания систем помехоустойчивого кодирования, рассмотрены на сайте ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru в разделе "Ваши вопросы о кодировании" и на его научно-образовательной странице.

Сложность реализации МПД

Главным достоинством реализованных в ИКИ аппаратно на ПЛИС и в программном виде всесторонне испытанных алгоритмов МПД, предлагаемых для систем ДЗЗ, является очень низкая сложность декодирования [12]. Это важнейшее прикладное направление развивается у нас в стране более 30 лет и успешно конкурирует с зарубежными подходами к этой проблеме. По некоторым параметрам кодов ИКИ сейчас опережает западные разработки на 5 - 7 лет.

При оценке затрат МПД на декодирование одного бита данных формально определяемая сложность как число операций у МПД примерно на 2 порядка (!!!) меньше, чем у турбо подобных кодов с сопоставимой энергетической эффективностью [6,12].

Разработанные к настоящему моменту аппаратные версии МПД на ПЛИС обеспечивают весьма высокие уровни ЭВК и скорости обработки до 480 Мбит/с. Таким образом, системы связи для ДЗЗ уже сейчас на 5-7 лет вперёд обеспечены самой передовой технологией повышения достоверности передачи цифровых потоков.

Особенности применения кодирования в системах ДЗЗ

Основные особенности применения тех или иных методов помехоустойчивого кодирования в системах ДЗЗ состоят в том, что на летательный аппарат (ЛА) помещается чрезвычайно простая часть системы кодирования - кодер. Он всегда представляет собой весьма небольшой блок памяти или несколько относительно коротких регистров сдвига.

Наиболее сложная часть системы кодирования - декодер - находится на приёмной стороне системы связи. Это позволяет считать, что технические и технологические ограничения, которым должен удовлетворять такой декодер, находящийся обычно на Земле, оказываются достаточно мягкими и не идут ни в какое сравнение с теми ограничениями, которые имеют место на ЛА.

Основным требованием, которое следует учитывать при реализации ДЗЗ, является небольшой размер кодера на ЛА, что позволяет обеспечить минимизацию возможных искажений цифровых данных, находящихся в кодере и предназначенных для последующей передачи на Землю.

Пример тех пунктов Технического задания (ТЗ) на системы кодирования, которые желательно детально обсуждать при её создании, приведен на сайте ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru.

Выводы

Появление хорошо зарекомендовавших себя многопороговых алгоритмов декодирования с очень простой реализацией, обеспечивающих почти оптимальные характеристики декодирования, создаёт принципиально новые возможности для реализации систем обмена данными в разнообразных проектах в аэрокосмической области.

В случае реализации высокоскоростных систем ДЗЗ алгоритмы типа МПД имеют столь большие преимущества перед всеми остальными методами коррекции ошибок, что у него нет вообще никаких конкурентов по стоимости и эффективности на скоростях выше 50 Мбит/с.

При постоянно наблюдаемом росте требований к достоверности передачи цифровых данных можно считать, что МПД может уже сейчас обеспечивать ЭВК порядка 7 - 9 дБ и более в высокоскоростных каналах связи систем ДЗЗ, что близко к величине выигрыша $M=5 - 8$ раз. В ближайшем будущем, можно довести эту величину до значений $M=10 - 15$ по значению возможного роста скорости передачи данных или снижению мощности передатчика по сравнению с отсутствием кодирования для достоверности передачи, соответствующей вероятности ошибки на бит $P_b(e) \sim 10^{-7} - 10^{-9}$.

Применение МПД декодеров особенно важно для очень популярных сейчас малых аппаратов и принципиально меняет облик систем этого класса, позволяя повысить качество, объём и достоверность принимаемой информации.

К этому можно добавить, что современные всё более мощные методы предварительной обработки исходной информации непосредственно на передающей стороне позволяют без заметных потерь сжимать некоторые типы данные в $K=1,5-3$ раза. После ограниченных дополнительных исследований, видимо, некоторые виды передаваемой первичной информации можно будет сжимать до 4 - 6 раз. Но это означает, что уже в настоящее время совместное применение тех мощных методов кодирования источника данных и канала, какими обладает сейчас теория информации, может обеспечить высококачественную передачу ценных научных данных на скоростях, в $M=10-20$ раз превышающих те уровни, которые достижимы без использования современных эффективных методов обработки информации.

Дополнительная целевая проработка ряда аспектов кодирования источника и канала может позволить уже в самом ближайшем будущем довести коэффициент ускорения скорости передачи или снижения мощности передатчика до величин порядка $M \sim 30-80$ при одновременном значительном росте на 2 - 4 десятичных порядка уровня достоверности передаваемых цифровых данных.

Достижение этих целей не потребует выделения больших ресурсов и значительных затрат. Основные теоретические и экспериментальные результаты и необходимые для этого технологии, позволяющие добиться таких, конечно, очень высоких характеристик уже разработаны. Для некоторых систем они могут быть ускоренно доработаны и затем реализованы в соответствии с потребностями развития современных систем ДЗЗ и других высокоскоростных систем связи с высоким уровнем достоверности передачи данных по спутниковым и другим каналам связи

Литература

1. *Золотарев В.В.* Использование помехоустойчивого кодирования в технике связи. - Электросвязь, 1990, №7, с.7-10.
2. *Берлекэмп Э.Р.* Техника кодирования с исправлением ошибок. - ТИИЭР, 1980, Т. 68, №5, с. 24-58.
3. *Кларк Дж., Кейн Дж.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. - М., Радио и связь, 1987, 382 с.
4. *Золотарев В.В.* Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов. - В кн.: 4-я Международная Конференция "Спутниковая связь - ICSC-2000", 2000, Т.2, М., МЦНТИ, с. 20-25.
5. *Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарев В.В., Третьякова Е.И.* Вычислительные сети. - М., Наука, 1981, 280 с.
6. *Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.* Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи. - Электросвязь, №9, 2003, с.34-37.
7. *Мессис Дж.* Пороговое декодирование: Пер. с англ. /Под ред. Ю.Л. Сагаловича. - М., Мир, 1966, 186 с.
8. *Форни Д.* Каскадные коды. - М.: Мир, 1970, 216 с.
9. *Золотарёв В.В.* Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов. - В кн.: 4-я Международная Конференция "Спутниковая связь - ICSC-2000", Т.2, 2000, М.: МЦНТИ, с. 20-25.
10. *Золотарёв В.В.* Характеристики каскадирования многопороговых декодеров для спутниковых каналов связи. - 5-я международная конференция "Цифровая обработка сигнала и её применение", М., 2003, с. 353-356.
11. *Zolotarev V.V.* The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels. - In Proc.: 7-th International Symposium on Communication Theory and applications, held on 13-18 July 2003, St. Martin's College, Ambleside, UK, pp.18-22.
12. *В.В.Золотарёв, Г.В.Овечкин.* Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник.- Москва, Горячая линия - Телеком, 2004, 126 с.