

Ответы на ваши новые вопросы №№ 12 - 17

12. Можно ли ожидать дальнейшего увеличения преимуществ МПД по сравнению с турбо и другими кодами? Будут ли созданы программные версии МПД алгоритмов с числом операций декодирования на бит в 1000 раз меньшим, чем для других кодов?

Сейчас эффективные при большом уровне шума программные турбо декодеры обычно требуют менее 10'000 операций на бит. Если допустить, что будет создан МПД со сложностью, которая окажется в 1000 раз меньшей, чем у турбо кодов, то получим, что от МПД требуется выполнять менее 10 операций на бит. Некоторые турбо декодеры требуют намного меньшего числа операций, чем 10^4 . Таким образом, МПД выполнял бы в этом случае вообще всего несколько операций. Ясно, что это нереально.

А вот если сопоставлять возможности МПД и турбо кодов в области таких шумов, где МПД всё ещё успешно работают, а турбо декодеры имеют уже не столь хорошие характеристики энергетической эффективности, то возможно, что при некоторых параметрах кодирования каскадные версии МПД действительно дадут относительно других методов значительное преимущество по производительности. Варианты каскадных версий программных МПД подобного типа созданы и в настоящее время широко исследуются.

Однако и 100-кратное преимущество МПД по числу операций перед прочими алгоритмами и так чрезвычайно велико. Оно уже никогда не сможет быть заметно уменьшено.

Вполне реализуемое преимущество порядка 1000 раз по производительности для аппаратных версий МПД декодеров было рассмотрено при ответе на предыдущий вопрос.

13. Чем всё же принципиально отличается МПД от обычного порогового декодера Месси?

Только тем, что решения всех пороговых элементов в МПД запоминаются в новом разностном регистре памяти декодера и используются затем при формировании решений на следующих итерациях коррекции ошибок. Этого достаточно, чтобы строго доказать

совершенно уникальное свойство стремления решений МПД к решению оптимального (переборного!) декодера (ОД). Ни один другой алгоритм коррекции ошибок не обладает таким чрезвычайно полезным свойством, которое становится особенно важным в итеративных схемах декодирования, к которым и относится МПД. Более того, сложность МПД – линейная от длины кода n , причём, с очень небольшим коэффициентом пропорциональности при n .

Поскольку это очень важно, напомним, что стремлением к решению оптимального декодера (ОД) мы называем свойство МПД, согласно которому при всех изменениях декодируемых символов (может быть, и не двоичных) расстояние текущего решения МПД от принятого сообщения строго уменьшается. Более того, достигнув решения ОД, МПД не уходит из него. Это ещё одно очень полезное свойство МПД можно называть устойчивостью решений МПД относительно решений ОД.

Нелишне также ещё раз отметить, что **в МПД должны применяться только специальные коды с очень низким уровнем размножения ошибок (РО).** Этот эффект был всесторонне теоретически рассмотрен в ряде публикаций по МПД. Некоторые из них представлены и на нашем веб-сайте, посвящённом многопороговому алгоритму: www.mtdbest.iki.rssi.ru.

14. Можно ли создать МПД для не двоичных каналов?

Вся полная теория МПД алгоритмов для не двоичных кодов и каналов была написана и опубликована более 20 лет назад. Были построены оценки характеристик и найдены соответствующие коды, позволяющие достичь высокой эффективности декодирования. Разумеется, было проведено и всестороннее моделирование работы алгоритма в каналах с большим уровнем шума. Не двоичные МПД (далее – QМПД) столь же легки в реализации, как и обычные двоичные многопороговые декодеры.

Оценки результатов моделирования **QМПД** свидетельствуют, что эти декодеры также очень просты алгоритмически и **имеют характеристики, которые существенно лучше, чем у кодов Рида-Соломона (РС).**

Это не удивительно, так как решения QМПД также строго стремятся к решению не двоичного оптимального (разумеется, переборного!) декодера (ОД), а используемые в QМПД коды, в

отличие от кодов РС, могут быть достаточно большой длины, что ещё более увеличивает эффективность нашего многопорогового алгоритма и одновременно сильно упрощает его.

Заметим, что неудовлетворительная ситуация в целом с проблемой простого и эффективного декодирования в технике кодирования становится уже совершенно нетерпимой при рассмотрении проблемы декодирования недвоичных кодов. Эта неожиданная мысль станет для вас более понятной, если отметить, что, например, в недвоичном канале с основанием $q=256$ сложность полномасштабного алгоритма Витерби (АВ) будет иметь порядок q^{K-1} , где K - длина образующей кода. А это значит, что даже при $K=3$ и весьма слабой эффективности АВ для столь короткого кода и недвоичного канала его сложность на много порядков превышает сложность N стандартного двоичного декодера Витерби с $K=7$, для которого $N \sim 3 \cdot 2^{K-1}$. **Но отсюда следует, что в q -ичном канале работоспособного алгоритма типа Витерби фактически вообще не существует.** Возможными для реализации в недвоичном канале оказываются только **два декодера: для кодов Рида-Соломона и МПД.** Но МПД намного проще, чем алгоритмы коррекции ошибок для кодов РС, и одновременно с этим МПД намного эффективнее, потому что коды РС имеют строго ограниченную длину, а коды для МПД могут быть сколь угодно длинными и сложность МПД от их длины совершенно не зависит. Более того, при выборе длинного кода QМПД оказывается даже немного попроще.

Копии новых статей о QМПД также представлены на нашем сайте: www.mtdbest.iki.rssi.ru.

15. Как спроектировать МПД и выбрать коды для него?

Создание МПД - сложный процесс, который состоит в анализе и реализации всех пунктов ТЗ, которое рассмотрено в вопросе № 3 (в первой группе ответов на вопросы читателей). Мы доработали это ТЗ по результатам его обсуждения у нас на сайте и с заказчиками. Его последняя модификация представлена на новой образовательной страничке нашего сайта. Для того чтобы правильно оценить и учесть в проекте все возможности кодов и алгоритма МПД, можно воспользоваться характеристиками этого метода, приведёнными в нашем **справочнике по кодированию**: **"Помехоустойчивое**

кодирование. Методы и алгоритмы", который уже вышел в свет в издательстве «Горячая линия - Телеком» в Москве в 2004 г.

Все данные об издательстве (сайт www.techbook.ru), где вы можете купить справочник, и о возможности приобретения справочника в других местах также можно найти на нашем сайте: www.mtdbest.iki.rssi.ru . Разумеется, вы можете купить этот справочник в Интернете или в книжных магазинах Москвы, Санкт-Петербурга и других городов. Можно также узнать о текущем наличии книги в Интернет-магазинах России на сайте www.findbook.ru и даже просто в поисковой системе www.yandex.ru , набрав в рамке поиска два первых слова его названия и сделав отметку для поиска на Маркете.

Для того, чтобы облегчить вам несомненно очень трудную работу по выбору метода декодирования мы также предлагаем вам наш **«Имитатор цифрового канала»** с самым широким набором наилучших известных в настоящее время в мире алгоритмов декодирования. В этом смысле наш имитатор, реализованный, например, на высокоскоростном ноутбуке, не имеет даже приблизительных аналогов среди любых других систем моделирования алгоритмов декодирования. **«Имитатор» – уникальнейший прибор и испытательный стенд для декодеров разных типов.** Число методов декодирования, характеристики которых вы можете посмотреть и оценить на нём, непрерывно увеличивается и уже сейчас его применение позволит вам следить за состоянием мирового уровня алгоритмов коррекции ошибок, а также прогнозировать его развитие на много лет вперёд.

Детальное описание «Имитатора» представлено на нашем сайте www.mtdbest.iki.rssi.ru в разделе новостей. В ближайшее время мы будем **бесплатно распространять демоверсию Имитатора**, содержащую все основные возможности его полномасштабного варианта. Эта демоверсия Имитатора будет размещена и на нашем сайте. Мы предложим также программно-аппаратный комплекс для проверки МПД алгоритмов, разработанных на ПЛИС и других аппаратных средствах.

Продолжим основную тему.

На самостоятельное освоение технологии проектирования МПД декодеров необходимо затратить определённое время. **Для этого нужно также иметь три программных комплекса:** 1) для выбора кодов, 2)

моделирования МПД, а также 3) для оптимизации его параметров. Эти программные комплексы постоянно развиваются авторами.

 Для того, чтобы ваши работы по созданию программной или аппаратной версии МПД алгоритма были максимально успешными и учитывали последние достижения в области его исследований и проектирования, **обращайтесь также непосредственно к его разработчикам.**

16. Если в рассматриваемом у нас проекте для относительно низкоскоростных каналов не требуется большая скорость декодирования, то следует ли и в этом случае реализовать именно метод МПД? Может быть, следует применять другие алгоритмы?

Ваш конкретный вопрос непосредственно связан с философией прикладных исследований в теории кодирования.

Появление турбо кодов в 1993 году стало революцией в кодировании по двум причинам.

Во-первых, это определялось тем, что прогресс в технике кодирования после появления каскадной схемы, составленной из алгоритма Витерби (АВ) и кодов Рида-Соломона (РС) в 80-е годы почти остановился. И – надолго!

(Разумеется, авторы **нашего сайта** www.mtdbest.iki.rssi.ru и алгоритма МПД сожалеют, что западным специалистам практически неизвестны многочисленные статьи про алгоритмы МПД и книга "Вычислительные сети" издательства «Наука», Москва, 1981г., в которой изложены теоретические основы этого метода. Эти работы демонстрировали непрерывный прогресс в исследованиях по тематике многопороговых алгоритмов и в 80-е годы.)

Во-вторых, прямо в первой публикации по турбо кодам её авторы впервые озвучили в качестве принципиально новой цели прикладных исследований как раз главную проблему теории кодирования: простое декодирование вблизи пропускной способности канала. Более того, прямо в первой статье авторов турбо кодов была продемонстрирована и почти реальная возможность достижения этой цели.

Два указанных выше обстоятельства и стали причиной лавинообразного роста объёма публикаций по турбо кодам и многим подобным им кодовым конструкциям и алгоритмам. Это была новая эра в исследованиях по кодам. Конечно, потом был проведён более глубокий анализ этой совершенно новой ситуации в теории кодирования и в смежных прикладных проблемах. Выяснилось, что на

самом деле в кодировании ещё огромное количество нерешённых технологических задач и в турбо декодировании, как в известном телесериале, «всё ещё только начинается». До окончательного решения - действительно простого и эффективного декодера, - как и показало «десятилетие турбо кодов», было ещё очень далеко.

Но вот прошло 10 лет развития турбо кодов. Можно ли делать какие-нибудь обобщения? Да, частично уже можно. Рассмотрим их.

Изначально работа турбо декодера около пропускной способности канала требовала по порядку величины до 10'000 операций на бит. И тогда, и сейчас это было очень много, особенно для высокоскоростных каналов. Потом многие тысячи исследователей сумели значительно упростить и турбо декодеры, и очень многие другие алгоритмы, начало бурному развитию которых дали именно турбо коды. Однако в большинстве случаев вместе с упрощением алгоритмов характеристики их эффективности также немного ухудшились.

Казалось бы, нужно было воспользоваться тем, что турбо коды поставили перед исследователями новые вполне реалистические цели и решать уже достаточно конкретную задачу работы почти при пропускной способности канала другими методами. Но этих-то других методов в руках исследователей и не оказалось.

Разумеется, взрыв интереса к кодированию оживил многие более ранние идеи в этой области. К ним можно отнести, в частности, низкоплотностные коды и некоторые другие интересные кодовые конструкции. Все они были связаны с различными достаточно полезными подходами, которые, однако, по правильности выбора своих метрических оценок так и не смогли даже приблизиться к алгоритму МПД. Именно это и приводило к неоправданно высокой сложности их реализации. Так что о том, чтобы достичь уровня МПД по критериям сложности декодирования, речи не было совсем!

Таким образом, турбо декодеры дали громадное ускорение работам по кодированию. Они указали достойные цели и доказали реальность их достижения. Но чисто «силовой» метод решения проблемы декодирования в турбо идеологии при весьма большом удельном числе операций на бит не решил и в принципе не мог решить проблемы сложности турбо декодирования, хотя рост производительности элементной базы микроэлектроники был за это десятилетие весьма значительным. Одной из причин этой неудачи является то, что скорости передачи данных в этот период тоже росли очень высокими темпами. Поэтому несомненно, что и дальше ситуация с проблемностью всеобщего применения турбо кодов не изменится сколько-нибудь радикально. Турбо – это слишком сложно. У них нет серьёзных перспектив. И это, видимо, надолго, если не навсегда.

На фоне этого совершенно неизбежного кризиса турбо тематики **перспективы для алгоритмов МПД смотрятся совсем иначе.**

При близких возможностях по эффективности декодирования производительность МПД, как показано в ответах на предыдущие вопросы, на несколько порядков выше, чем у турбо декодеров. Подчеркнём, что речь идет о разнице не в процентах или даже не о преимуществе по быстродействию в несколько раз. **Мы говорим о преимуществе МПД по скорости декодирования, числу операций, составляющем именно несколько десятичных порядков.**

Кстати, программа для МПД занимает всего одну страничку текста, например, на языке С++.

Если скорость передачи в канале не превышает $1 \div 3$ Мбит/с, то и аппаратные реализации МПД совершенно необязательны. Более того, граница предпочтительности микропроцессорных программных версий декодеров по сравнению с аппаратными будет всё время сдвигаться в сторону более высоких скоростей обработки. А очень большой запас программного МПД по производительности в этом случае может обеспечить для проектируемой коммуникационной сети дополнительные возможности по надёжности, синхронизации, достоверности и дальности связи, а также по допустимому уровню шума. **Это и есть ответ на ваш вопрос «что и когда делать». Всегда только самое лучшее!**

А в тех случаях, когда рассматривается проблема кодирования для высокоскоростных каналов, в пользу МПД говорит реальная возможность создания аппаратных декодеров и такого класса, которые будут при некоторых параметрах кодовых систем быстрее прочих примерно на 3 порядка! Причины этого преимущества МПД мы тоже уже рассмотрели ранее. Такова реальность.

* * * * *

Поэтому заданный выше вопрос о применении той или иной системы кодирования должен всегда решаться однозначно: для любых систем связи следует использовать только самые эффективные на текущий момент методы кодирования с минимальной вычислительной нагрузкой при декодировании.

Причина этого, повторим, проста: после первой системы кодирования вам нужно будет делать другую, потом третью и т. д. . Если ваша вторая система кодирования была не из лучших по критерию «сложность-эффективность», то, когда вы начнёте проектировать третью систему с предельно возможными характеристиками, вам совершенно не пригодится опыт второй разработки. Ведь он был для совершенно другого метода с весьма посредственными возможностями. И, значит, ваши трудности реализации третьей системы будут из-за этого неоправданно большими по сравнению со случаем, если бы вы делали и

во втором проекте самую лучшую из известных вам систем помехоустойчивого кодирования.

Кстати, вы можете присылать нам свои варианты проектов систем помехоустойчивого кодирования. При этом учёт тех пунктов ТЗ, которое мы в качестве примера предлагали рассматривать, желателен, но полное формальное следование ему совсем необязательно. Если это для вас нужно, мы можем проанализировать такую заявку и подготовить конструктивный комментарий такого проекта

17. Если в нашем конкретном проекте необходимо реализовать систему кодирования с малой задержкой принятия решения, то какой может быть процедура выбора правильного метода декодирования?

Ваш вопрос ещё более обобщает ту формулировку проблемы выбора декодера, которую мы анализировали в предыдущем ответе на вопросы. Фактически поставленная в вашем вопросе проблема расширяется до следующей: насколько известные алгоритмы гибки по отношению к различным критическим параметрам декодирования? Иначе говоря, если в одном случае наиболее важна большая производительность, т. е. число операций декодирования, в другом – только небольшой дополнительное расширение полосы частот, а в третьем – малая задержка принятия решения декодером, то как надо выбирать методы при этой самой общей постановке проблемы выбора и реализации системы коррекции ошибок?

Начнём с того, что количество реально эффективных и одновременно реализуемых методов очень невелико. Это турбо коды, АВ и каскадные схемы с АВ, а также некоторые виды низкоплотностных и близких к ним кодов и, наконец, МПД и каскадные схемы на его основе.

Так вот маленькая задержка, о которой вы спрашиваете, требуется в низкоскоростных каналах, когда даже несколько лишних миллисекунд принятия решения являются критическими для всего проекта в целом. Если задержка очень мала, то сначала её следует сопоставить (снова!) с границами сферической упаковки и посмотреть, чтобы эти характеристики были хотя бы теоретически возможны.

Первое впечатление при этом состоит в том, что эта ситуация всегда соответствует необходимости применения АВ. Однако следует абсолютно всегда помнить, что АВ – переборный алгоритм. Как известно, в 70-х годах прошлого века разработчики очень быстро

сумели достичь такого уровня, что стандартом для систем связи стал АВ с длиной образующей $K=7$. Через 30 лет существования АВ при чрезвычайно быстром прогрессе элементной базы авторам только недавно пришлось проконсультировать работы по созданию АВ для кода с $K=11$. Причём, как известно, (см. публикации авторов и на нашем веб-сайте: www.mtdbest.iki.rssi.ru) характеристики АВ с $K=11$ не намного лучше, чем при $K=7$. А вот усложнение АВ при этом - весьма немалое. Причина снова та же - экспоненциальный рост его сложности! Так что быстрого прогресса в кодировании от применения АВ ожидать не стоит.

Но хорошо известно, что при задержке всего немного большей, чем при использовании АВ, МПД может обеспечить характеристики эффективности, которым соответствуют только лучшие коды с $K=15$. А поскольку АВ с разумной производительностью для $K=15$ пока создать вообще нельзя, то получается, что МПД перехватывает у АВ инициативу и при малых задержках решения. Правда, при этом увеличивается число необходимых итераций декодирования. Но при постановке задачи в данном вопросе производительность не является критическим параметром. Да и каждая итерация в МПД требует всего нескольких весьма простых операций с небольшими целыми числами.

А вот турбо коды относятся к каскадным схемам с обычно большой задержкой. И для них почти нет маневра в выборе и обмена одних параметров на другие при серьёзных ограничениях на задержку. Это и позволяет снова утверждать, что МПД и при малых задержках практически не имеет конкурентов. У него в этом случае есть даже дополнительное преимущество. Поскольку при малых задержках производительность не является самым главным требованием, то всегда проще перейти к микропрограммной реализации этого декодера и использовать несколько более сложную логику принятия решений в МПД алгоритме. Это требует очень малого числа дополнительных операций. Но характеристики МПД, достаточно высокие изначально, при этом дополнительно улучшаются.

Примеры приведённых выше рассуждений о взаимообмене параметров требуют итогового обобщения. Это можно сделать таким образом. Для МПД между задержкой принятия решений L , используемым объёмом памяти M , длиной кода n и производительностью N действуют очень широкие обменные соотношения параметров внутри самого метода. Перечисленные выше параметры при рассмотрении различных вариантов реализации МПД могут варьироваться в разных сочетаниях более чем десятикратно. Никаких других методов декодирования со столь же широкими допустимыми обменными соотношениями главных критериев эффективности и сложности в настоящий момент неизвестно.

Возможность столь широкой вариации указанных выше параметров, а также ряда других, которые можно найти в нашем примерном ТЗ на разработку кодов (см. ответ на вопрос №3 и новую образовательную страничку нашего веб-сайта с уточнённой версией примерного ТЗ), дополнительно выделяет МПД из общего ряда методов декодирования. Это и позволяет создавать на его основе уникальные специальные схемы коррекции ошибок, которые, оставаясь в классе процедур МПД, дополнительно улучшают его и без того очень высокие характеристики.

+++++

Выводы. Никакие другие методы декодирования не обеспечивают возможности столь же легкого манипулирования практически всеми параметрами алгоритмов, как это допустимо в случае МПД. Это позволяет многопороговым декодерам выигрывать практически все реальные конкурсы на объективно организованных чемпионатах алгоритмов по совокупности параметров эффективности, сложности и быстродействия.

У вас есть новые вопросы?

Мы постараемся ответить на них очень быстро.