

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта монография увидела свет в год сорокалетия издания на русском языке перевода удивительной по своей глубине и одновременно по ясности изложения книги Дж. Месси «Пороговое декодирование», издательство «Мир», 1966 г. Полагая это совпадение важным и обязывающим, автор умножил усилия при подготовке к публикации совокупности своих исследований по дальнейшему развитию методов исключительно простого мажоритарного декодирования линейных кодов и в связи с этим надеется, что, по меньшей мере, некоторые из тех методов многопорогового декодирования, которые были представлены в данной книге, окажутся действительно полезными для связистов нового века.

Перечислим кратко те принципиальные новые результаты, которые выводят МПД методы на ведущие позиции в мировом конкурсе алгоритмов коррекции ошибок для каналов с большим уровнем шума.

Во-первых, книга про МПД представляет собой уникальное издание, в котором постоянно указывается на единство блоковых и свёрточных кодов. В мировой практике исследования проблем кодирования до сих пор ещё не преодолено противопоставление этих классов кодов, тогда как МПД даже своими базовыми свойствами подчёркивают их взаимосвязь, особенно на прикладном уровне.

Далее, это, несомненно, доказательство ключевых свойств МПД алгоритмов, согласно которым изменения декодируемых символов всегда приводят к строго более правдоподобным новым промежуточным решениям декодера. Никаких аналогов таких важнейших свойств для других алгоритмов коррекции ошибок до сих пор нет.

Найдены классы кодов, которые почти не подвержены эффекту размножения ошибок, т.е. группирования ошибок на выходе декодера порогового типа. Все ранее применявшиеся подходы к изучению эффекта размножения ошибок не смогли дать ничего конструктивного для идеи повторной и, тем более, многократной коррекции ошибок.

Подчеркнём, что свойство сходимости решений МПД к оптимальному и результаты принципиально нового анализа эффекта размножения ошибок обеспечили одновременно с двух направлений (со стороны алгоритма и со стороны кодов) такие условия декодирования, при которых МПД декодер на самом деле во многих случаях при весьма высоких уровнях шума достигает решения оптимального декодера. В то же время, хотя достижение оптимальных решений обычно требует переборных методов, сложность алгоритма МПД растёт с длиной кода всего лишь линейно.

Тем не менее, МПД не относится к оптимальным методам и, после описания решения двух сложнейших проблем – выбора простых хороших алгоритмов и наиболее подходящих для него кодов – большая часть книги фактически посвящена методам повышения эффективности работы МПД при возможно более высоком уровне шума. При этом все предлагаемые для этого методы улучшения алгоритмов типа МПД всегда строго отбираются по критериям минимальной сложности как при оценке их с точки зрения числа операций, так и при расчётах быстродействия аппаратной реализации.

Для различных кодов, использованных в МПД, и большинства вариантов декодирования на основе этого метода приведены полезные оценки эффективности. В случае необходимости в дополнительных оценках эффективности кодов и алгоритма МПД можно обратиться к нашему справочнику по кодам, на специализированный научно-методический двуязычный веб-сайт ИКИ РАН по методам кодирования [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru) или от моделировать ту схему, которая вызывает вопросы, на компьютере.

Более того, на указанном веб-сайте можно найти детальные развёрнутые ответы на вопросы, которые часто задают читатели, желающие улучшить своё понимание проблематики помехоустойчивого кодирования.

Оценки сложности программной реализации показывают преимущество МПД перед другими методами примерно на 2 десятичных порядка по числу операций на бит

при сопоставимой эффективности. Это редчайший случай в истории развития методов цифровой обработки. Им надо правильно распорядиться. В канале с довольно большим уровнем шума при моделировании работы МПД на обычных ПЭВМ скорость его работы близка к 1 Мбит/с на каждые 1 ГГц тактовой частоты процессора, что действительно на порядки превышает производительность программных версий других алгоритмов при той же энергетической эффективности.

В настоящее время построены коды и созданы конкретные программные МПД процессоры, принятые к стандартизации для цифровых каналов специальной телевизионной системы. Трудно припомнить другие подобные решения при отечественных разработках цифровой техники связи. На специализированных микропроцессорах скорость декодирования МПД можно значительно повысить. Поэтому маловероятно, что какие-то другие достаточно эффективные методы могут быть упрощены в такой же степени.

Результаты аппаратной реализации МПД на основе ПЛИС Xilinx и Altera демонстрируют возможность достижения абсолютной степени распараллеливания вычислений. В этом случае архитектуру БИС можно выстроить таким образом, что декодер как бы не тратит на операции с данными синдромного регистра вообще никакого времени. Прямо в момент завершения цикла сдвига данных по регистрам декодера решения о величине ошибки в декодируемых символах уже всегда сформированы. Значит, эти регистры в декодере МПД могут сдвигать данные со скоростью, максимальной для выбранной технологии. А это скорости порядка сотен мегабитов в секунду на регистр. Разумеется, при этом число одновременно и параллельно работающих регистров в декодере может достигать нескольких десятков. Поэтому производительность МПД алгоритма может определяться только максимально возможной скоростью одновременного сдвига данных во всех таких регистрах памяти, из которых почти полностью и состоит этот декодер. Иначе говоря, стороннему наблюдателю представляется, будто декодер просто в большинстве случаев «угадывает» правильные решения, которые он мгновенно и подставляет в проходящие информационные потоки,двигающиеся по схемным регистрам с максимально возможной скоростью. Эта возможность уже успешно реализована на стандартных ПЛИС за счёт создания соответствующей адаптивной схемы порогового элемента и подбором необходимых разностных соотношений в порождающих полиномах используемого кода. Такое двухэтапное распараллеливание операций МПД и обеспечивает его сверхбыструю работу. Столь идеальное упрощение МПД в аппаратном виде довольно трудно реализовать для других алгоритмов, что позволяет считать МПД абсолютным лидером среди других методов и по производительности аппаратного декодера. Таким образом, преимущество аппаратных МПД перед другими алгоритмами по скорости на 2–3 десятичных порядка также может считаться уже вполне достигнутым.

Подчеркнём, что МПД просто декодируют очень длинные коды, для которых только и возможна эффективная реализация коррекции ошибок при больших шумах канала. МПД могут использовать многие типы блоковых и свёрточных кодов, из которых наиболее выделяются самоортогональные с особенно простой реализацией их декодирования.

Для недвоичных каналов более 20 лет назад предложены также очень простые для реализации без операций умножения и деления в недвоичных полях коды и их МПД декодеры. Их характеристики при близких по уровню шума условиях работы на 2, 3 и более порядков лучше по вероятности ошибки, чем у любых декодеров кодов Рида-Соломона. Это, как и в двоичных кодах, связано с тем, что МПД успешно, очень просто и почти оптимально декодирует весьма длинные коды, такие, которые в принципе невозможно построить в классе кодов РС. Заметим, что среди недвоичных кодов очень трудно создать и эффективный алгоритм Витерби. Так что недвоичный МПД является прекрасным примером совершенно уникального и чрезвычайно эффективного декодера, с

которым не может даже близко сравниться никакой известный двоичный код и декодер другого класса, которых, если исходить из реальности, фактически и нет. А поскольку сейчас известно огромное число различных вариантов применения кодов РС (и больше практически никаких других нет!), то это и означает, что потребность в двоичных кодах чрезвычайно велика, а возможности ограничены именно кодами РС. Например, двоичный МПД обеспечит простейшими методами повышение достоверности хранящихся на CD-ROM или переданных цифровых данных на много десятичных порядков. Эти декодеры формируют принципиально новые уровни качества и целостности цифровых символьных потоков данных, которые недостижимы для декодеров РС. Причём, что крайне важно, двоичные МПД тоже очень просты, как и его бинарные аналоги.

МПД можно применять и для одновременного с помехоустойчивым кодированием сжатия цифровых данных, в частности, со статистикой бернуллиевского источника. Очень важно, что для некоторых типов источников сжатие реализуется на уровне, очень близком к теоретически предельно возможному. И, что очень существенно, такие МПД не боятся даже высокой плотности ошибок в принятых упакованных потоках. Они и в этом случае восстанавливают данные с требуемым высоким качеством, совершенно не обнаруживая никаких признаков «хрупкости» сжатой информации, когда искажения в переданных данных приводят к большим пакетам ошибок в восстановленной распакованной информации.

В каналах со стираниями МПД работают почти при пропускной способности такого канала, на много порядков снижая долю стёртых символов по сравнению с их исходной плотностью во входном цифровом потоке. Это, видимо, тоже практически недостижимо для других методов. Причём, восстанавливающий стёртые данные МПД при этом оказывается даже ещё проще, чем декодер для каналов типа ДСК, хотя сложность базового МПД и так очень незначительна.

Уникальны и каскадные схемы для МПД. При каскадировании с кодами контроля по чётности иногда можно обойтись всего одной – двумя дополнительными операциями декодера на бит, сохраняя при этом все достоинства каскадных схем по эффективности. Это совершенно несопоставимо со сложностью декодирования каскадных схем с кодами РС, которые, тем не менее, иногда очень сильно уступают простейшим схемам с МПД и ККЧ.

Далее, практически всегда можно сделать так, чтобы на втором этапе декодирования каскадного кода с МПД скорость кода  $R_1$  этого второго этапа коррекции ошибок фактически совпадала со скоростью  $R_0$  всего каскадного кода в целом. Обычно декодер второй очереди в последовательной каскадной схеме работает при скорости  $R_1 \approx 0,8 \div 0,95$ , т.е. он изначально гораздо менее эффективен, чем код с кодовой скоростью полного каскадного кода  $R_0$ . В значительной степени именно поэтому МПД для каскадных кодов особенно эффективны, оставаясь при этом почти столь же простыми, как и обычные базовые МПД алгоритмы.

Особенно удобны и эффективны МПД для параллельных кодов, которые, возможно, появились гораздо раньше вообще всех других достаточно эффективных параллельных методов кодирования. Хорошо работает МПД также и с различными сложными многопозиционными системами сигналов, которые значительно сжимают спектр передаваемого сигнала относительно традиционной двоичной системы ФМ2.

Полезные результаты получены для МПД при использовании кодов с неравной защитой битов, с неравномерной энергетикой каналов, в случае применения МПД для кодов с выделенными ветвями. Это позволяет утверждать, что МПД декодеры легко адаптируются к различным условиям их применения в системах связи.

Заметим, что при отсутствии мягкого модема, при наличии которого только и возможно применение большинства других эффективных алгоритмов, МПД в этом случае

очень существенно упростится, а некоторое снижение его характеристик по энергетике будет очень умеренным.

Важнейший шаг проектирования МПД – оптимизация многих сотен его параметров. Это – хороший пример правильного использования мощной современной компьютерной техники и тех же методов адаптации и оптимизации, которые реализует собственно МПД, в проектировании самих этих крайне полезных алгоритмов. При этом достигается дополнительное повышение результирующей достоверности декодирования благодаря очень существенному улучшению характеристик МПД, иногда на 1–2 порядка, без какого-либо увеличения числа операций в конечном варианте применения такого декодера после выполнения оптимизации. Никакие другие методы коррекции ошибок не имеют такого действительно мощного дополнительного средства повышения эффективности без какого-либо увеличения его итоговой сложности.

Вообще вся идеология МПД базируется именно на идеях оптимизации функционалов от очень большого числа переменных на всех трёх этапах проектирования и собственно контроля работы алгоритма. Сначала при выборе кодов для МПД происходит поиск по целому ряду критериев таких кодов, которые в минимальной степени подвержены эффекту размножения ошибок. Затем при выборе общих критериев и параметров декодирования оптимизируются путём выбора необходимых значений веса проверок, пороги решений мажоритарных элементов и отдельные разностные параметры кодов в выбранных декодерах. Третьим шагом оптимизационного проектирования является контроль работы МПД, который и реализует алгоритм, минимизирующий расстояние решения МПД до принятого из канала сообщения. Именно совокупность указанных мощных оптимизационных процедур на всех трёх главных этапах проектирования и контроля характеристик МПД обеспечивает высокие результирующие параметры эффективности алгоритма.

Очень широки возможности МПД по согласованному взаимному обмену между значениями его параметров: памяти, задержки решения, числа операций, производительности, размеров кода, избыточности, уровня шума канала и энергетического выигрыша. Всегда можно выбрать такие параметры декодера, что по любому практически непротиворечивому техническому заданию на его разработку можно реализовать и создать требуемое устройство класса МПД. Например, для достижения максимальной скорости можно реализовать высокопроизводительный свёрточный МПД за счёт увеличения памяти декодера и задержки решения. При необходимости снижения задержки решения следует применять блочные коды, что уменьшает производительность декодера, а при выборе небольшой скорости передачи можно успешно нагрузить декодер более мощным алгоритмом коррекции с более сложным типом порогового элемента, который позволит работать при большем уровне шума и т.д.

И, наконец, подчеркнём, что все эти совершенно принципиальные практические результаты являются следствием серьёзных теоретических исследований, развития в течение многих десятилетий очень мощных инструментальных стендов и программного обеспечения для разработки, испытаний и контроля работы МПД на различных ПЛИС, а также создания имитаторов цифровых каналов и макетов новых алгоритмов декодирования.

В связи с описанной выше технологией проектирования МПД декодеров есть ещё один важнейший аспект тематики многопорогового декодирования. Дело в том, что вместе

с 35-летними исследованиями по тематике МПД все эти годы создавались программно-аппаратные средства, которые меняли свои базовые машины, цели и ориентиры, быстро преобразались в соответствии со стремительным развитием цифровой техники. В настоящее время специально созданное системное программное обеспечение для исследований, оптимизации и проектирования МПД составляет эффективные пакеты прикладных программ, которые продолжают интенсивно развиваться.

Таким образом, исследования МПД базируются на идеологии современного помехоустойчивого кодирования, а также мощном, динамически развивающемся программном обеспечении, аппаратных средствах, которые обладают десятками свойств и возможностей, даже и не обсуждавшихся в этой книге. Это и создаёт условия для успешного продолжения исследований и разработок, и определяет трудности приобретения необходимого объёма знаний и опыта для специалистов, которые не работали ранее по тематике МПД. Однако если они готовы к сотрудничеству, то при взаимодействии с разработчиками МПД алгоритмов всегда быстро выходят на тот уровень, с которого начинается действительно серьёзная исследовательская работа по этой проблематике. Только непрерывное и интенсивное развитие всей инструментальной базы исследований и программного обеспечения для дальнейшей разработки этого метода, а также всесторонняя глубокая подготовка специалистов по исследованиям и разработкам алгоритмов МПД, которая осуществляется по многим направлениям, позволяют продолжать успешные исследования по тематике многопорогового декодирования.

### **Рекомендации для дальнейших исследований**

Исходя из уровня достигнутых возможностей алгоритмов МПД попробуем сформулировать те задачи, которые следует решать, чтобы развитие тематики МПД продолжалось максимально быстрыми темпами.

1. Поскольку рабочая область МПД в настоящее время выше границы Шеннона по энергетике примерно на 1 дБ, то должен быть продолжен и расширен поиск условий для работы МПД непосредственно вблизи пропускной способности канала.

2. Если рекордная производительности МПД не нужна, то полезно немного усложнить работу порогового элемента в МПД, что позволит сократить число итераций, уменьшить задержку принятия решений МПД и обеспечить работу МПД при большем уровне шума. Надо найти оптимальную по сложности функцию, намного более эффективную, чем обычный пороговый элемент.

3. Развивать каскадные методы кодирования, которые могут помочь МПД работать почти при пропускной способности канала без увеличения сложности декодирования. Нужно иметь в виду, что схемы с высокоскоростными внешними кодами, скорее всего, бесперспективны.

4. Проработать каскадные недвоичные коды, предварительно повысив эффективность обычного недвоичного МПД ещё на несколько порядков, хотя уже и сейчас его преимущество перед декодерами кодов РС более чем значительно. При этом полезно рассмотреть самые различные схемы, в том числе и с параллельными кодами.

5. Проанализировать и создать новые системы с мощными МПД и многопозиционными системами сигналов.

6. Продолжить разработки систем одновременного кодирования канала и различных видов источника. Это крайне важно для телеметрии.

7. Продолжить поиск и анализ эффективных методов кодирования блоковых кодов, поскольку при этом пока не наилучшим образом используется вычислительные возможности МПД.

8. Продолжить развитие тематики неравномерной энергетике. Это быстрый и успешный рост ЭВК с минимальными затратами.

9. Создать эффективные декодеры для каналов с неравной защитой символов. Некоторые задачи тут довольно простые, но требуется тонкая оптимизация кодов.

10. Под все перечисленные задачи необходимо непрерывно создавать новые коды, которые только и могут помочь в дальнейшем развитии методов МПД.

11. Создать микропроцессорные МПД с большой энергетической эффективностью на лучших в настоящее время микропроцессорах.

12. Предпринять специальные усилия по дальнейшему снижению объёма вычислений в МПД при большом уровне шума. Это облегчит достижение высокоэффективной работы МПД алгоритмов при предельных отношениях сигнал/шум.

\* \* \* \* \*

Приглашаем также специалистов, студентов и аспирантов просмотреть специализированный веб-сайт ИКИ РАН [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru). Он регулярно обновляется. Там можно найти задачи, которые могут быть решены и стать основой для создания новых типов МПД.

На веб-сайте регулярно помещаются новые статьи, демонстрационные материалы и презентации последних результатов по МПД. Там же можно найти ответы на последние вопросы по кодированию и объявления о новых предстоящих или уже состоявшихся событиях в сфере разработок МПД алгоритмов.

Часть не рассмотренных в данной книге вопросов проанализирована в нашем справочнике по кодированию «Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы», Москва, издательство «Горячая линия – Телеком», 2004 г. Интернет-магазины, в которых можно её купить, легко найти через поисковую систему [www.findbook.ru](http://www.findbook.ru) или приобрести её непосредственно через издательство [www.techbook.ru](http://www.techbook.ru), тел.: (495)737-39-27.