

О научном инакомыслии:

«На первых порах новая теория провозглашается нелепой. Затем её принимают, но говорят, что она не представляет собой ничего особенного и ясна, как Божий день. Наконец, она признаётся настолько важной, что её бывшие противники начинают утверждать, будто сами открыли её.»

Уильям Джеймс, философ, США

«Старайся исполнить свой долг — и ты тотчас узнаешь, чего ты стоишь.»

Лев Николаевич Толстой

От автора

Выход в свет в 1963 году книги Дж. Л. Мессе «Пороговое декодирование» ознаменовал новый этап в развитии техники помехоустойчивого кодирования. Ясное описание очень простых методов со вполне удовлетворительными характеристиками определило в те годы их место в различных реальных системах связи.

Последующее появление в 1967 году алгоритма Витерби (AB) вывело технику кодирования на принципиально новый уровень качества связи благодаря возникшей возможности существенно более эффективного кодирования, поскольку предложенный алгоритм обеспечивал в гауссовском канале оптимальное декодирование кодов небольшой длины. Это стало причиной привлечения большого числа специалистов по теории и технике кодирования к проблеме повышения именно эффективности кодирования, поскольку в те годы всем казалось, что быстрый рост возможностей цифровых технологий позволит очень просто строить каскадные и другие всё более сложные схемы кодирования. В связи с этим обстоятельством проблема сохранения простоты реализации декодеров на длительное время осталась как бы в тени, хотя формально требование более простого декодирования никогда не снималось с повестки дня.

Тем не менее, исследования алгоритмов мажоритарного типа продолжались. В 2018 году исполнилось 40 лет со дня защиты первой кандидатской диссертации по новым итеративным алгоритмам декодирования мажоритарного типа [38]. А недавно отмечались 30 лет со дня защиты докторской диссертации по этой же тематике [36], которая недавно была уже гораздо более полно представлена в новых

книгах нашей научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования [4, 79, 90, 91, 94, 100]. Эффект от этих публикаций был достаточно сильным и положительным настолько, что это позволило издателю ряда книг по многопороговым алгоритмам декодирования (МПД) и справочника по кодированию недавно повторно выпустить в свет монографию по этой тематике [3], первое издание которой было напечатано ещё в 2006 году.

Отметим, что впервые в издательстве «Наука» результаты по многопороговым алгоритмам, включая Основную Теорему многопорогового декодирования (ОТМПД), были опубликованы ещё в 1981 году [2].

Таким образом, можно считать, что российские читатели всегда достаточно хорошо информированы о состоянии исследований по тематике эффективного декодирования на основе мажоритарных процедур, особенно простых в реализации по сравнению с другими методами. Результаты применения таких усовершенствованных алгоритмов, названных многопороговыми декодерами (МПД), оказываются к настоящему моменту уже практически совпадающими с оптимальными, т. е. мало отличающимися по выходной вероятности ошибки от характеристик переборных алгоритмов для этих же кодов даже вблизи пропускной способности канала. Это было показано участниками нашей научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) кодирования как теоретически, так и при обширном моделировании работы соответствующих процедур для специальных кодов, удовлетворяющих ряду весьма строгих, но абсолютно понятных требований, а также при создании аппаратуры кодирования на ПЛИС в ряде организаций.

Декодеры, построенные в соответствии с изложенными ниже принципами, уже успешно внедрены в многочисленных системах связи. Во всех случаях программной и аппаратной реализации предлагаемых далее методов многопорогового декодирования, пять поколений которой были созданы в НИИ Радио, ведущем институте Минсвязи, и в других организациях, были получены ожидаемые автором и разработчиками систем связи характеристики. Существенно, что уже в те далёкие годы они были иногда совершенно недоступны для всех других известных алгоритмов коррекции ошибок с разумной сложностью реализации.

Напомним те основные положения, которые фактически и позволили поднять эффективность исключительно простых алгоритмов порогового типа до уровня оптимальных переборных процедур. Они состоят всего из двух пунктов, обеспечивших решение принципиально новой для теории кодирования задачи повышения качества декодеров мажоритарного типа, реализующих процедуры поиска глобального

экстремума функционалов от очень большого числа переменных.

1. Мажоритарные алгоритмы могут быть чрезвычайно эффективными. Существуют весьма простые мажоритарные алгоритмы МПД итеративного типа, которые обладают свойством строгого приближения к оптимальному решению на всех итерациях декодирования до тех пор, пока продолжается процесс изменения декодером символов принятого сообщения. При таком подходе задача декодирования превращается в проблему поиска глобального экстремума функционала от большого числа переменных в дискретных пространствах, что тысячекратно раздвигает горизонты исследований, разработок и применения принципов оптимальной коррекции ошибок.

2. Эффект размножения ошибок (РО) при пороговом декодировании действительно очень сильно ограничивает возможности мажоритарных процедур декодирования. Но этот эффект вполне управляемый. Его правильная интерпретация помогает сформировать требования и критерии, по которым можно строить на основе оптимизационных процедур коды с очень малым уровнем размножения ошибок на выходе соответствующего им декодера, что и позволяет, в конечном счёте, чрезвычайно улучшить эффективность итеративных процедур мажоритарного типа.

Первое свойство оказывается, по существу, совершенно неожиданным. Но, действительно, после незначительной, но принципиальной модификации обычного порогового декодера, превращающей его в многопороговый (МПД), новый алгоритм на самом деле приобретает уникальное свойство стремления к оптимальному переборному решению, если выполнены весьма простые условия. В этом случае алгоритм при всех изменениях непрерывно измеряет расстояние между принятым вектором и текущим решением-гипотезой о переданном векторе. А это значит, что он на самом деле реализует процедуру поиска глобального экстремума (конкретно: минимума этого расстояния!) при действительно всего лишь линейной от длины кода, т. е. минимальной теоретически возможной сложности алгоритма. Представляется правдоподобным, что никакие другие известные в настоящее время методы коррекции ошибок не обладают подобными свойствами.

Новое понимание декодирования как поиска глобального экстремума подключает к теории кодирования совершенно грандиозное число теорий, методов и стилей, созданных различными теориями оптимизации для максимально быстрого поиска этого экстремума в предельно сложных условиях большого относительного уровня шума цифрового канала, но при использовании крайне простых мажоритарных алгоритмов.

А второе из приведенных выше утверждений заслуживает се-

рьёзного обоснования, что и сделано в одной из глав этой книги. Успешное решение этой сложной проблемы РО действительно позволило создавать коды, которые особенно эффективны при их применении именно в МПД. К этой проблеме не смог за 60 лет развития теории кодирования даже подступить ни один научный коллектив в мире. Но научная школа ОТ сформулировала проблему размножения ошибок, создала полную его теорию и действительно создала программные комплексы, которые теперь строят для любых кодовых скоростей простые мажоритарно декодируемые коды с минимальным уровнем подверженности РО. На этих кодах МПД алгоритмы достигают оптимальных решений даже в непосредственной близости от границы Шеннона и при минимальной возможной сложности. Именно создание полной теории РО позволило проявиться всем достоинствам МПД алгоритмов в полном блеске.

Вся теория РО для обширного множества классов кодов достаточно полно представлена и прокомментирована во всех предыдущих монографиях нашей школы [2–5, 90, 94]. Ознакомиться с нашей новой содержательной постановкой проблемы РО в этих книгах очень полезно. Здесь же в связи с ограниченным объёмом книги и большим числом новых теоретических и прикладных достижений ОТ этот материал существенно сокращён в объёме. Но и в нём представлены абсолютно все необходимые выводы и рекомендации по созданию кодов с малой подверженностью воздействиям РО. Это позволяет специалистам решать все вопросы построения требуемых кодов, в том числе разрабатывать программные средства для их поиска. Большую помощь в решении этой задачи, которая в принципе не могла возникнуть за пределами ОТ, могут оказать и наши сетевые порталы. По всем вопросам применения тех или иных программных систем, созданных школой ОТ, можно обращаться и к автору этой монографии.

Планируемое издание нового справочника по современным методам кодирования также будет способствовать решению этих вопросов.

Представленное в данной книге ещё более системное, чем ранее, изложение методов и парадигм ОТ, а также новых результатов, полученных на их основе, позволяет, как надеется автор и члены его научной школы, составить общее глубокое понимание о состоянии исследований в сфере ОТ. Главным новым результатом ОТ, составляющим основу монографии, является давно уже ожидаемое достижение нашими МПД алгоритмами, ключевыми в теории ОТ, области в непосредственной близости от границы Шеннона для всех традиционных в теории кодирования цифровых каналов. Технологии достижения этого главного целевого для прикладной теории информации результата в книге описаны как целый ряд различных методов и под-

ходов, использующих в том числе и уникальные оптимизационные программные средства, которые действительно позволяют реально и просто, но очень аккуратно решать эту сложнейшую в идеологическом плане задачу на вполне приемлемом уровне технологической и алгоритмической сложности предлагаемых алгоритмов.

Подчеркнём, что преимущество ОТ перед другими алгоритмами определяется тем, что найдены простые и доступные всем методы исправления ошибок в кодах с мажоритарным декодированием при минимально возможной даже теоретически сложности, растущей с длиной кода всего лишь линейно. И при этом вероятности ошибки декодирования МПД алгоритмов оказываются практически такими же, как и у оптимальных переборных алгоритмов для этих же кодов, которые могут быть очень длинными. Кроме того, оба эти свойства для заданной кодовой скорости алгоритма МПД сохраняются даже в непосредственной близости относительного уровня шума канала к его пропускной способности. А поскольку корректирующие свойства хороших длинных кодов, которые строятся для МПД декодеров, растут с их длиной, то и оптимальное декодирование на базе методов ОТ характеризуется действительно достаточно малыми вероятностями ошибки, которые уже могут далее на много порядков уменьшаться разными простыми способами, например, каскадированием. Это означает, что инженеры связи получают мощные алгоритмы простой коррекции длинных кодов во всём диапазоне основных параметров систем кодирования для кодовой скорости, меньшей чем пропускная способность канала.

Необходимо лишь напомнить, что при обсуждении главных прикладных проблем теории кодирования редко упоминается о сложности самих вычислений, выполняемых при декодировании. Поэтому подчеркнём: именно в теории ОТ все алгоритмы работают только с небольшими целыми числами, что также очень сильно влияет на возможность простой реализации быстрых декодеров. Никакие другие достаточно эффективные алгоритмы за пределами ОТ не обладают этим свойством.

Если смотреть на результаты ОТ МПД чисто формально, то иногда возможно непонимание того, почему школа ОТ столь много внимания уделяет различным разработкам программного обеспечения (ПО). Объяснение этому может быть только одно, драматическое для ОТ и чрезвычайно трагическое для «прежней» теории кодирования. Главная прикладная цель теории кодирования — создание алгоритмов декодирования, наилучших по комплексному триединому критерию «помехоустойчивость — достоверность — сложность». И 60 лет бурных математических поисков «прежней» теории ясно показали, что

при большом уровне шума (!) ни один из параметров этого обобщённого критерия вообще ни для каких алгоритмов декодирования не может быть вычислен достаточно точно. Никогда! (Слабые и короткие коды с небольшой итоговой достоверностью тут не обсуждаются из-за их бесполезности). Но тогда это обстоятельство становится чётким доказательством того, что «та» теория потерпела полное фиаско, т. к., не зная точных значений этих важнейших параметров декодеров, обсуждать какие-либо другие свойства алгоритмов бессмысленно.

И, кстати, отметим, что характеристики алгоритмов ОТ по этому критерию нельзя вычислить тоже. Но школа ОТ осознала все эти фундаментальные свойства систем помехоустойчивого кодирования очень давно, в районе 1975 года. И начала сразу создавать множество разнообразных программных комплексов для проектирования, исследований параметров и настройки элементов декодеров для всех известных в теории каналов. Как нам кажется, за последние 50 лет к этой важнейшей масштабной и исключительно трудной и долгой работе пока не приступила ни одна научная группа в мире. А мы всё это создали и продолжаем разрабатывать ПО новейшего оптимизационного типа.

И что это даёт? Наши программные модели практически мгновенно дают ответ о значении всех параметров триединого критерия. Это открывает пути для многократного увеличения возможностей теории, которая, со своей стороны, помогает указать пути развития систем оптимизационного ПО, а программные средства, с другой стороны, обеспечивают ускорение проверки достижений теории и ориентируют теорию в выборе её новых целей. Как мы понимаем, нигде в мире никаких подобных исследовательских технологий пока нет ни у одной научной группы, имеющей отношение к прикладным вопросам теории кодирования.

И если в этот момент обратить внимание на то, что все три параметра триединого критерия у МПД декодеров уже давно имеют ещё и теоретически наилучшие возможные значения, то получаем, что ОТ действительно достигла полного решения проблема Шеннона и создала абсолютно лучшие по этому критерию алгоритмы. Отсюда уже понятно, что в этом случае нет никаких причин считать, что в обозримом будущем появятся методы, которые будут значительно лучше того, что предлагает связистам и теоретикам ОТ. Это верно просто потому, что существенно улучшить характеристики алгоритмов ОТ невозможно, т. к. МПД декодеры имеют даже теоретически наилучшие значения параметров этого комплексного критерия. А создавать реальные новые алгоритмы без хорошего ПО никто не смог до нас, и никто не сможет этого делать и после нас. Причину этого мы уже назвали: никакие параметры эффективных декодеров вычис-

лить, настроить и улучшить без хорошего ПО в принципе нельзя. Так что конкурентов у нас нет. И мы очень сожалеем о том, что нам просто не с кем обсуждать дальнейшее развитие прикладной теории кодирования.

Вот и всё, что касается лидерства ОТ и ценности хорошего оптимизационного ПО, тесно взаимодействующего с оригинальной тонкой теорией.

Все несомненно важные вопросы детального количественного сопоставления возможностей и свойств алгоритмов ОТ и других методов можно найти в наших новых обзорах по прикладным вопросам теории кодирования (посмотрите для этого также Приложение 3), в основных журналах по системам связи, в наших докладах на конференциях и на портале www.mtdbest.ru. Часть таких обзоров можно найти по ссылке [73] и далее по всем последующим пунктам в конце этой монографии.

Таким образом, алгоритмы ОТ характеризуются тем, что они по триединому жёсткому критерию «помехоустойчивость — достоверность — сложность» являются единственной группой кодов, которые в полной степени обладают и одновременно, и по отдельности всеми наилучшими возможными свойствами, указанными в этом критерии. А именно это и является основной целью создания алгоритмов декодирования для работы вблизи границы Шеннона.

Мы надеемся, что на многие естественные вопросы по проблеме сложности, эффективности и технологичности кодирования и многопорогового декодирования, а также по методам работы с новыми версиями АВ, которые продолжают тоже интенсивно развиваться и патентоваться школой ОТ, читатели этой книги получат достаточно содержательные ответы. В случае заинтересованности они, несомненно, смогут сами продолжить весьма перспективные для всех систем связи исследования МПД процедур, а также АВ, включая их блокковые версии, которые уже нашли свое место в целом ряде проектов.

Как будет показано далее, при создании новых алгоритмов и соответствующих им кодов основной задачей исследователей становится максимально аккуратное и оптимизированное по очень многим критериям одновременное проектирование декодера и применяемого в нём кода. Иначе говоря, простота реализации МПД достигается за счёт более сложных и тщательно организованных этапов проектирования кода и конкретных алгоритмов его декодирования по уже готовым технологиям. В этом случае проблема сложности реализации алгоритма целенаправленно трансформируется таким образом, чтобы технологические задачи построения более эффективного декодера решались именно за счёт тех компонентов сложности, увеличение которых

наиболее доступно или даже полезно.

Например, в абсолютном большинстве случаев минимизации вычислительных затрат МПД объём его операций декодирования при хорошей эффективности оказывается на 2–3 десятичных порядка меньшим, чем для других алгоритмов именно за счёт значительного объёма памяти декодера, использующего весьма длинные коды. Понятно, что это иногда совершенно необходимо в высокоскоростных системах связи при большом уровне шума. Подчеркнём ещё раз то, что и вблизи пропускной способности канала алгоритмы МПД сохраняют реальную умеренную сложность, вполне доступную современным технологиям, тогда как прочие методы почти всегда оказываются в этой области параметров вообще неработоспособными.

И снова напомним, что ближайшие окрестности границы Шеннона могут быть достигнуты только в случае применения и эффективного декодирования очень длинных кодов.

Внимательный читатель, конечно, отметит, что многие свойства и возможности представленного в книге алгоритма МПД и других методов, относящихся к теории ОТ, как и в ранее изданных монографиях, многократно рассматриваются и комментируются в различных разделах книги с разных позиций. Автор признаёт, что это действительно так. И в данной монографии (как и в предыдущих) это тоже сделано с единственной целью наиболее полного, всестороннего и в то же время максимально понятного доказательства или объяснения не очень обычных свойств и возможностей многопороговых декодеров, различных модификаций алгоритма Витерби (AB), Основной Теоремы многопорогового декодирования (ОТМПД) и многих новых парадигм ОТ. Такой способ изложения материала диктуется тем, что, хотя все ключевые результаты получены очень простыми методами, многие из них всё же не использовались ранее в публикациях по теории кодирования и являются для этой отрасли науки совершенно новыми. Это требует очень аккуратного и постепенного предъявления во многих случаях не совсем простых и иногда даже неожиданных результатов, свойств и характеристик наших алгоритмов. Разнообразные комментарии и формы изложения материала, как нам представляется, облегчают читателю задачу понимания представленных в книге результатов, для усвоения которых иногда всё-таки требуются немалые усилия и время.

Определённую, как мы думаем, немалую поддержку таким усилиям читателей окажут информационно-справочные и научно-методические материалы наших крупнейших в мире двуязычных сетевых порталов по теории кодирования, МПД алгоритмам и ОТ: www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru. Первый из них достаточ-

но часто обновляется. Теперь на них не только размещены многие демо-программы по наиболее известным в мире алгоритмам коррекции ошибок, но и наши новые программные платформы. Читатели могут переписать на свои компьютеры эти удобные программные средства исследования МПД или АВ, а затем сразу же начать исследовательскую работу по мажоритарным алгоритмам, свёрточным АВ и по блоковым модификациям АВ (БАВ), меняя в случае необходимости и сами коды, изучая характеристики алгоритмов декодирования в весьма широких пределах, вполне соответствующих всем традициям полноценной научной работы. Достоинства такого подхода к предварительным исследованиям по ОТ уже смогли подтвердить и наши зарубежные коллеги, которые высоко оценили новые возможности, предоставляемые нашими программными платформами для более близкого знакомства с ОТ и её парадигмами, алгоритмами и технологиями. Подчеркнём снова, что использование таких программных платформ позволяет существенно расширить область параметров, которыми теперь можно управлять в экспериментах по декодированию, в том числе и самими кодами, которые стало возможным менять по желанию экспериментатора.

Опыт издания нашего справочника по кодированию [1] показывает, что он также весьма полезен многим студентам, аспирантам и специалистам. Автор надеется, что следующее издание существенно обновлённого справочника при всех текущих трудностях всё же скоро будет реализовано.

Очень способствует, как оказалось, правильному восприятию основ ОТ небольшой цветной буклет-комикс [90] ведущих авторов нашей научной школы об ОТ. Он подготовлен с использованием эмоциональных компонент восприятия весьма неожиданной (хотя и очень простой!) для всех теории. Такой подход, как и просмотр стартового мультфильма (см. далее), очень помогает дальнейшему процессу более глубокого изучения ОТ.

В качестве последнего замечания автор считает необходимым подчеркнуть, что все исходные предпосылки исследования, теоретические результаты, вытекающие из них практические следствия и выводы по-прежнему чрезвычайно просты. Они связаны только с самыми базовыми общепринятыми понятиями теории вероятностей, теории и прикладной тематики помехоустойчивого кодирования и не требуют знаний специальных разделов других сложных дисциплин. Именно эта возможность взглянуть на потенциальные возможности кодов и мажоритарных процедур, исходя только из самых простейших теоретических соображений и здравого смысла, создаёт условия для очень быстрого обучения студентов и специалистов новым возможностям

техники кодирования на основе МПД алгоритмов, простых методов достижения оптимальных решений на основе реализации поиска глобального экстремума, а также с использованием возможностей блоковых модификаций АВ. При этом остаётся крайне важным и полезным, что и МПД декодеры на базе мажоритарных процедур, и все модификации АВ уже много десятилетий хорошо известны научным работникам и инженерам, что хорошо помогает пониманию всех особенностей и тонкостей достижений ОТ — нашей «квантовой механики» теории информации.

Отметим также, что достаточно быстро просмотреть эту книгу, чтобы выразить сильное удивление от того, что в ней весьма немного формул. Но все необходимые выражения, позволяющие оценивать параметры всех кодов, декодеров и каналов, рассматриваемых в прикладной теории кодирования, в ней есть. Это обстоятельство особенно выразительно подчёркивает краткость, совершенство и информационную наполненность монографии, которую наша научная школа рекомендует читать вдумчиво и постепенно. Как отмечали некоторые специалисты при чтении рукописи монографии, глубокая философская сущность ОТ, которая уже очень давно вернула содержательную прикладную теорию кодирования на правильный путь (чего, может быть, не смогли увидеть за много прошедших десятилетий некоторые научные сотрудники, которые пишут статьи «про коды»!), заслуживает действительно очень аккуратного изучения и столь же глубокого понимания.

Так что теория кодирования — вовсе не математическая задача! Никаких главных характеристик систем кодирования при большом относительном уровне шума нельзя вычислить, причём, видимо, никогда! Та уже ушедшая теория не смогла смириться с этим. Она в реальности давно и полностью покинула огромное плодотворное поле этой отрасли науки. Судя по всему, эта прикладная и одновременно, конечно, истинно фундаментальная проблема полностью и надолго перешла в сферу интересов и достижений ОТ, т. к. успешно и полностью ею решена на базе теорий поиска экстремума функционалов, тесно взаимодействующих с интеллектуальным инновационным программным обеспечением (ПО). А поскольку ОТ создала алгоритмы со всеми самыми наилучшими возможными параметрами декодирования по триединому критерию и действительно решила проблему Шеннона, то совершенно естественно, что возвращение в реальную прикладную теорию кодирования на абсолютно новом уровне простейших мажоритарных схем и известнейшего алгоритма Витерби с его различными модификациями — это факт. Мы уверены, что эта ситуация закрепилась в теории информации на весьма долгий срок!

Автор считает своим приятнейшим долгом поблагодарить всех членов нашей научной школы, многолетняя активная работа которых создала возможность написания этой книги, моего особо надёжного и всё понимающего коллегу — заведующего кафедрой РГРТУ, д.т.н., проф. Г.В. Овечкина, и воистину огромное количество наших помощников, энтузиастов и просто высокопрофессиональных специалистов, которые в течение многих лет участвовали в проведении исследований и применении полученных результатов в конкретных системах и проектах.

Большую поддержку работам по МПД и ОТ оказывали факультет ФРТК МФТИ, Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, ОНИТ РАН, НИИ «КВАНТ», НИИ Радио, Воронежский НИИ связи, ЛЭИС им. М.А. Бонч-Бруевича, ИКИ РАН и Рязанский ГРТУ.

Значительную финансовую поддержку неоднократно оказывал нашим исследованиям Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ). При его участии наша школа смогла также издать целый ряд своих монографии и справочник по кодированию.

Наверное, пятидесятилетние исследования МПД не могли бы быть представлены в своём нынешнем виде, если бы не поддержка академиков АН СССР А.И. Берга и В.А. Котельникова, академиков РАН В.К. Левина, Н.А. Кузнецова и Л.М. Зелёного, члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева, профессоров Э.М. Габидулина, С.И. Самойленко, Ю.Г. Дадаева, В.И. Коржика, А.Н. Пылькина, В.В. Витязева, докторов технических наук С.В. Аверина и Р.Р. Назирова, которые высоко оценили представленные материалы исследований или участвовали в работах по исследованиям наших алгоритмов и очень способствовали их признанию научно-технической общественностью.

* * *

Для получения наглядного представления об эффективности работы МПД читателям предлагается небольшой демонстрационный мультфильм-программа, предназначенный для работы на IBM PC-совместимом компьютере под управлением ОС Windows, в котором проиллюстрированы важнейшие особенности процедур декодирования многопорогового типа при исправлении ошибок в условиях большого уровня шума двоичного симметричного канала. По опыту издания ряда предыдущих книг по тематике МПД и ОТ именно такая небольшая предварительная подготовка психологического плана с помощью предлагаемой демо-программы создаст необходимые эмоциональные и гносеологические предпосылки для плодотворной последующей работы с этой книгой над нашими новыми алгоритмами.

Предлагаемый цветной мультфильм с детальной инструкцией пользователя показывает главную особенность работы МПД алгоритма для относительно длинного кода с малым уровнем размножения ошибок: строгое уменьшение расстояний последовательности его решений до принятого вектора при каждой коррекции контролируемых символов, т. е. иллюстрирует справедливость нашей ОТПД — Основной Теоремы многопорогового декодирования, исходного ключевого пункта всей Оптимизационной Теории.

Инструкцию по работе с демонстрационной программой и сам мультфильм можно переписать со специализированного двуязычного портала ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru на странице описания методов МПД или с аналогичного портала РГРТУ — www.mtdbest.ru. При копировании этих файлов с портала РГРТУ сначала надо переписать и прочесть описание¹ работы с демонстрационной программой², которая затем очень просто запускается.

Там же можно найти наши многочисленные обзоры по прикладным вопросам теории кодирования, самую разнообразную дополнительную оперативную информацию по МПД алгоритмам, учебно-методические материалы, большое количество статей, книг и презентаций по ОТ, её парадигмам и технологиям, а также по алгоритму Витерби и его новым модификациям, дивергентному декодированию и другим вопросам. Там же находятся файлы программных платформ для различных типов декодеров, работающих в соответствующих им каналах. Эти платформы сразу позволяют непосредственное их использование для начала исследований по тематике ОТ.

Краткий обзор ситуации в теории кодирования есть также в Приложении 3 этой монографии.

Целый ряд рисунков в книге является слайдами из нескольких презентаций и других публикаций.

Данная монография очень скоро будет размещена на одном из сайтов нашей научной школы ОТ, возможно, на www.mtdbest.ru или даже на каком-то ещё одном нашем новом портале. Следите за новостями!

Целый ряд проблем, относящихся к общим постановкам задач кодирования и конкретным возможностям МПД алгоритмов, также рассмотрены на наших порталах в разделах ответов на вопросы, которые позволяют более точно и образно оценивать возможности систем кодирования на основе алгоритмов МПД и АВ.

Там же представлена переписка с редакциями научных журналов,

¹https://mtdbest.ru/articles/demoop_apr4.pdf

²<https://mtdbest.ru/program/mtddemo.zip>

что тоже помогает понять условия развития исследований в сфере ОТ.

Значительную поддержку в изучении методов декодирования на основе МПД алгоритмов нашим читателям могут оказать также три очень полезные лабораторные работы, которые можно переписать с образовательных страничек («Обучение») наших сетевых ресурсов, указанных выше (файл **labrus.zip**³), распаковать их и предложить радиотехническим кафедрам ВУЗов для студентов и системы профессиональной переподготовки специалистов в области телекоммуникаций.

Дополнительные сведения по многопороговым декодерам и другим полезным методам коррекции ошибок можно найти в нашем справочнике [1] и в монографиях [2–5, 94], а также в изданиях для широкого круга студентов, аспирантов и специалистов по системам связи [79, 90, 91]. Самые новые публикации можно найти по ссылке [73] и на последующих позициях ссылок на литературу в конце этой монографии.

Ваше мнение о книге и предложения по её улучшению направляйте по адресу: Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, в.н.с. отдела 71, В.В.Золотарёву, а также на электронную почту автора **zolotasd@yandex.ru**.

Автор В.В. Золотарёв

12.10.2020 г.

³<http://www.mtdbest.iki.rssi.ru/labrus.zip>