

Научно-популярная статья из российского журнала "Знание - Сила" №7, 2019 г., расширенная не вошедшими в неё иллюстрациями.

Российский подарок Клоду Шеннону и всей теории кодирования

Цифровой информационный мир отметил очень «человеческий» юбилей: в 2018 году исполнилось 70 лет с момента выхода великой статьи «Математическая теория связи» выдающегося учёного нашего времени Клода Шеннона, от которой ведет отсчет главная отрасль теории информации — теория помехоустойчивого кодирования. Эта теория оказалась определяющей судьбы всего мирового цифрового сообщества — именно благодаря ей удастся поддерживать целостность, точность и «чистоту» цифровой информации, которую мы передаем и храним. Правда, поначалу математики отнеслись к данной теории весьма прохладно.

Огромное значение этой публикации Шеннона для техники связи, как мы теперь понимаем, состоит в том, что он ввёл понятие пропускной способности канала связи, зависящей от уровня вносимых им искажений сигнала, которая ограничивает возможность исправления ошибок в сообщениях, передаваемых, например, по космическим или спутниковым линиям, где особенно заметны шумы при пересылке цифровых потоков. Так вот, если доля ошибок в цифровой музыке, которую мы передали с Земли на Луну, будет достаточно мала, то с очень большой вероятностью все ошибки на приёмном конце могут быть исправлены. И ещё очень важно, что Шеннон указал, как в шумящем цифровом канале, создающем ошибки, нужно правильно формировать систему сигналов, а вовсе не повышать мощность передатчика, чем весьма озадачил инженеров своего времени, работавших тогда с аналоговыми сигналами. Однако сначала это была у него лишь теорема существования, которая не объясняла, как именно реализовать

технически указанную им возможность безошибочной передачи цифровой информации.

Но эти методы передачи и хранения данных быстро стали настолько важными, что буквально сотням тысяч исследователей в последующие годы пришлось решать проблемы создания конкретных простых алгоритмов декодирования – обнаружения и исправления ошибок в цифровых потоках, что стало абсолютно необходимым для обеспечения нужной сохранности и достоверности дискретных данных. Сначала они были малоэффективны или слишком сложны для реализации в реальной аппаратуре. Эта сложность N как число операций для декодеров обычно оценивается через длину кода n , используемого для передачи и последующей коррекции данных. Во многих случаях она пропорциональна $N \sim n^2$ или даже $N \sim n \cdot \log n$. Однако, поскольку эффективные коды должны быть очень длинными, даже такой уровень сложности N чрезмерен. Нужно создавать ещё более простые, но эффективные алгоритмы декодирования.

В России проблемы декодирования решают многие специалисты. А в Институте космических исследований (ИКИ РАН) и в Рязанском радиоуниверситете (РГРТУ) сформировали и совместно развивают принципиально новое и очень успешное направление создания особенно простых и эффективных декодеров, названных многопороговыми (МПД). Они работают непосредственно вблизи границы Шеннона, то есть около пропускной способности канала связи, что значительно увеличивает коэффициент полезного действия очень дорогих сетей цифровой связи для космоса, дистанционного зондирования Земли и любых других масштабных систем телекоммуникаций.

Особенность выполненных в ИКИ РАН и РГРТУ исследований, ставших новой Оптимизационной Теорией (ОТ) помехоустойчивого кодирования, состоит в том, что раньше при формировании наилучшего, самого вероятного решения декодера надо было перебирать всё экспоненциально растущее с длиной сообщения множество решений. Это

хорошо делали оптимальные декодеры (ОД), такие, как алгоритм Витерби (АВ), но только для коротких кодов. А вот при новом подходе к созданию декодеров число просматриваемых вариантов решений о сообщении пропорционально просто его длине, то есть сложность декодирования оказывается линейной: $N \sim n$. Этот минимум, допускаемый теорией, фактически и был достигнут в разработках научной школы Оптимизационной Теории (ОТ). При этом практически всегда многопороговые декодеры (МПД), созданные нашими учёными, находят как раз то лучшее решение, которое раньше обеспечивал только алгоритм Витерби (АВ). Это и стало основным результатом российской школы ОТ, создавшей простые методы коррекции ошибок в принятых сообщениях на основе алгоритмов МПД. Фактически все крайне оригинальные и просто неожиданные методы Оптимизационной Теории, которые научная школа этого направления называет новой «квантовой механикой» в теории информации, основаны именно на свойствах алгоритмов МПД начинать свою коррекцию ошибок с некоторого подходящего состояния декодера, то есть со стартового решения о принятом сообщении, а затем последовательно искать всё более правдо-подобные решения МПД, которые и хранятся по одному в декодере до тех пор, пока не будет найдено ещё лучшее промежуточное решение о принятом сообщении. Так можно найти и оптимальное решение, наиболее близкое к принятому сообщению, для чего раньше надо было использовать полный перебор допустимых сообщений.

Очень наглядный мультфильм, показывающий работу такого совершенно неожиданного алгоритма, представлен на ресурсах www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru, с главной страницы которых «О методе», например, с сайта www.mtdbest.ru, можно скачать [описание](#) работы с [демонстрационной программой](#), которая после краткого ознакомления с инструкцией-описанием легко запускается на любом компьютере с Windows. На его экране вы получите картинку работы уникального простейшего МПД блокового двоичного кода, представленную на рис. 1. Он так назван потому,

что контролируемые символы кода в среднем информационном регистре много раз проходят через простейший решающий пороговый элемент, которые последовательно строго улучшают принятое сообщение, непрерывно снижая долю оставшихся двоичных ошибок в помеченных красным цветом квадратах. Мультфильм показывает быструю сходимость решений декодера к результату оптимального декодера (ОД) за несколько итераций при весьма большом уровне шума для кода длины $n=2000$ битов. В фильме в строке «Current distance» на дисплее справа непрерывно показываются независимые измерения расстояний решений МПД декодера до принятого сообщения, которые в процессе работы алгоритма, согласно основам нашей Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования, всегда только строго уменьшаются. МПД-декодер в мультфильме, как можно увидеть, достигает решения оптимального декодера (ОД), в нашем случае безошибочного, при весьма большом уровне шума. Именно так успешно и абсолютно понятно работают все наши методы.

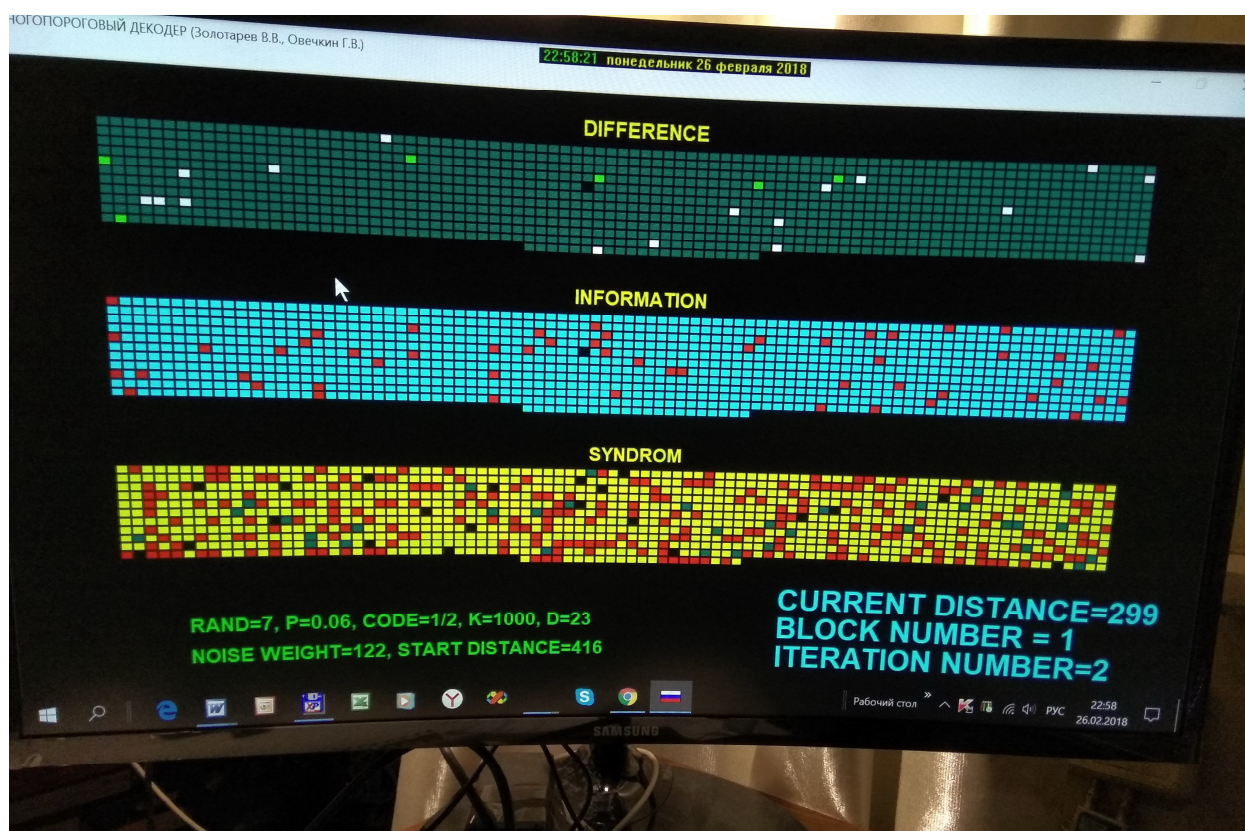


Рис. 1.

В 1970-х годах это стало величайшей революцией в теории кодирования. Никаким другим методам достоверность экстремально простых МПД алгоритмов недоступна. Причина этого в том, что часть совершённой цифровой научно-технической революции — теория размножения ошибок (РО), которая позволила найти для МПД совершенно новые особые ранее неизвестные коды, обеспечившие наилучшую достоверность, если применяется именно этот алгоритм. К сожалению, наши методы, несмотря на большое число публикаций и монографии на английском языке, всё ещё мало известны за рубежом. Между тем, наша школа Оптимизационной Теории (ОТ) — абсолютный лидер в этой отрасли теории информации.

Все созданные в ИКИ РАН и РГРТУ декодеры непрерывно улучшаются. Первые авторские свидетельства на них были получены ещё в 1972 году. А общее число патентов на алгоритмы, создаваемые научной школой Оптимизационной Теории в течение примерно 50 лет, уже приближается к сорока, и у нас готовятся новые заявки на методы декодирования.

Более того, у нас запатентована ещё и особая блоковая версия самого знаменитого метода коррекции ошибок прошлого века - алгоритма Витерби для свёрточных кодов. Такой блоковый алгоритм Витерби (БАВ) для одного из стандартов NASA оказался у нас в ~16 тысяч раз проще аналогичного алгоритма, представленного теоретиками другой школы кодирования.

Оптимизационная Теория превратила всю прикладную теорию кодирования, охраняющую целостность информационных ресурсов нашей цифровой цивилизации, в типичную наукоёмкую технологию проектирования систем цифровой связи с активнейшим использованием хорошо известных математических процедур поиска глобального экстремума функционалов на всех этапах проектирования систем кодирования. Таким образом, классическая алгебраическая теория — молодость теории кодирования — уже полностью передала пальму первенства новой "квантовой механике" теории информации, нашей Оптимизационной Теории,

которая стала частью общих теорий оптимизации для поиска глобального экстремума функционалов. Во всех основных классических каналах, рассматриваемых в теории кодирования МПД, алгоритмы не имеют никаких конкурентов по достоверности при высоком уровне шума среди методов с сопоставимой сложностью.

Разумеется, наши исследования все эти годы участвуют и в мировом конкурсе алгоритмов декодирования, разнообразие которых непрерывно увеличивается, к сожалению, часто вообще без какого-либо улучшения эффективности или снижения сложности реализации. Многие наши обзоры по алгоритмам декодирования можно найти на сайтах www.mtdbest.ru, www.mtdbest.iki.rssi.ru и в ведущих журналах России по системам цифровой связи.

Общие причины, безусловно, огромного преимущества методов Оптимизационной Теории, как мы полагаем, — минимальная их сложность N , уже давно просто пропорциональная длине кода: $N \sim n$, высокая однородность структуры и крайняя простота алгоритмов, доказанное предельно возможное аппаратное быстроедействие, а также практически всегда получаемые наиболее правдоподобные, то есть оптимальные решения, для поиска которых раньше требовалось выполнять процедуры, например, алгоритма Витерби, сложность которых растёт как экспонента от n .

Очень существенно и то, что все алгоритмы, созданные в рамках ОТ, работают в арифметиках с фиксированной запятой, т.е. оперируют только небольшими целыми числами. А фактически все прочие известные алгоритмы проводят вычисления с действительными числами. Это создаёт дополнительные большие преимущества декодерам, разработанным в ОТ, причём как для аппаратной, так и для программной реализации.

Но решающую роль в первенстве технологий Оптимизационной Теории играет активное синергетическое взаимодействие оригинальной теории и полномасштабного тонкого программного моделирования алгоритмов МПД, чем пока не может похвастать ни одна научная школа по

кодированию у нас и, судя по текущим результатам, за рубежом. А у нас такой стиль работы внедрён в среду сторонников Оптимизационной Теории примерно с 1975 года. Жаль, что лозунг «Программирование - вторая грамотность» уже очень давно не воспринимается как актуальный, в том числе и среди научных работников.

На рис. 2 показан чип созданного в ИКИ РАН макета МПД декодера на ПЛИС ALTERA на скорость декодирования более 1 Гбит/с. Для любых других конкурирующих алгоритмов это абсолютно недостижимо. Но и программные макеты МПД на обычных ПК среднего уровня даже при большом уровне шума моделируемых каналов связи демонстрируют скорости работы порядка $5\div 30$ Мбит/с. Это в десятки и в сотни раз превышает быстродействие методов потенциальных конкурентов и позволяет во многих случаях даже для быстрых каналов не проектировать новых микросхем, а использовать простые программные алгоритмы коррекции ошибок на базе ОТ и МПД.

Многопороговый декодер (МПД) для спутниковых и космических каналов
Он повышает кпд их использования в 3 - 10 раз, в том числе для ДЗЗ.

МАКЕТ на информационную скорость ~1,08 Гбит/с

The multithreshold decoder (MTD) for satellite and Space channels, raises efficiency of their usage in 3-10 times, including **channels up to 1Gb/s**



MTD for the Space, quick channels and flash memory

Рис. 2

Решенные нами важнейшие проблемы обеспечения высокой достоверности «цифры» рассмотрены в нашей новой монографии «Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума» 2019 года под научной редакцией академика Н.А. Кузнецова. Это подарок от нас юбилею статьи Шеннона. На сайтах www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru можно найти и наши другие книги, в том числе изданную Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) англоязычную коллективную монографию под редакцией академика В.К. Левина.

Работы по Оптимизационной Теории и патенты по МПД получили премию Правительства РФ по науке и технике, Золотую медаль Евросоюза (ЕС) «За исключительные достижения» за выдающиеся научные достижения и Золотую медаль Международного салона изобретений «Архимед».

Наши, видимо, крупнейшие в мире двуязычные сетевые порталы по теории и прикладным вопросам помехоустойчивого кодирования, содержащие более 600 блоков данных, просматривают ежегодно свыше 100 тысяч специалистов из более 90 стран мира. Расположенные на первом из них различные программные платформы позволяют посетителям наших порталов переписывать их к себе и далее по простым инструкциям сразу же переходить к полноценным исследованиям по тематике Оптимизационной теории и МПД, варьируя десятки параметров различных кодовых систем. На рис. 3 представлены данные о посещаемости наших порталов, с которых читатели ежегодно переписывают до 20 Гбайтов справочной, учебной и научно-методической информации. Таким образом, и международное научно-техническое сообщество активно использует методы Оптимизационной Теории в своей текущей работе. За рубежом начались защиты диссертаций по ОТ и алгоритмам МПД, а наша школа уже получает и зарубежные патенты по своей тематике.

Наши порталы по ОТ и МПД

www.mtdbest.ru

www.mtdbest.iki.rssi.ru

**2016 год - более 105 тыс. читателей
наших порталах из 94 стран мира**

**За
на**

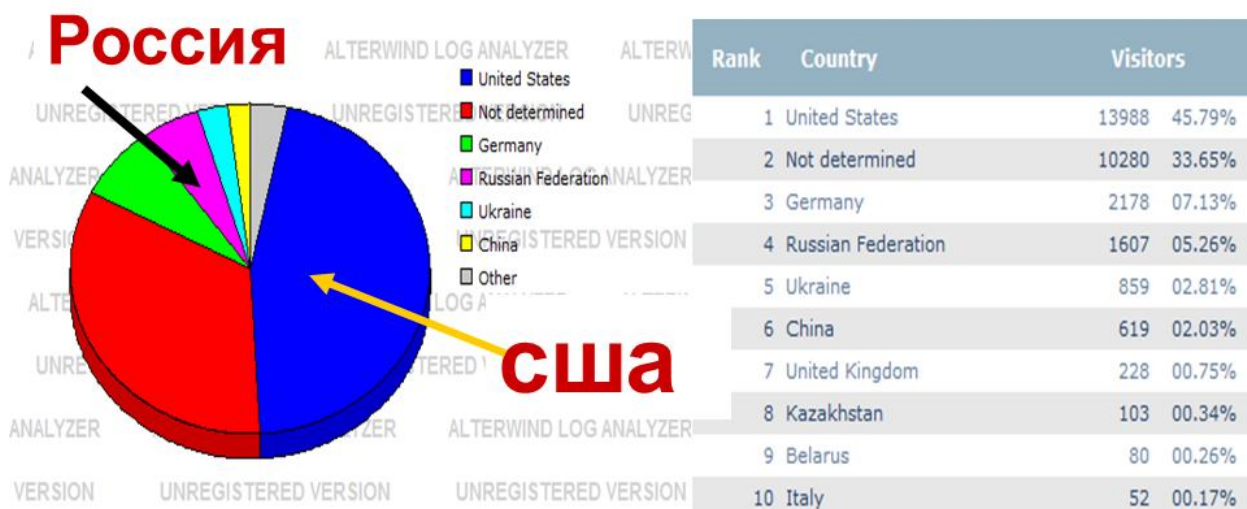


Рис. 3

Исключительное совершенство нашей ОТ особо подчёркивается так же тем обстоятельством, что она чрезвычайно компактна во всех представленных в ней прикладных аспектах. Правильное распределение функциональной нагрузки между аналитическими результатами и определяемыми средствами программного обеспечения (ПО) свойствами алгоритмов, не выражаемых аналитически, позволяет ставить цели по характеристикам проектируемых алгоритмов и искать необходимые технические решения при минимальных оценочных исследованиях, но при широком быстром и разнообразном программном экспериментировании. Образно говоря, компактность ОТ можно оценить как "уменьшенную на два-три порядка" по размеру классическую теорию. А поскольку ОТ очень естественно рассматривает все свои алгоритмы через уменьшение расстояния до принятого из канала вектора, что в большинстве случаев есть просто уменьшение веса синдрома при небольшом изменении информационной

части сообщения, то и обучение студентов или специалистов основам технологий ОТ оказывается очень простым и понятным.

Эти общие рассуждения проявляются при сравнении публикаций по ОТ и по другим алгоритмам так, что очень часто прочие методы описываются и оцениваются с использованием $30 \div 100$ формул и при этом обращаются ещё к ссылкам на $3 \div 15$ иных публикаций, что по известным жёстким законам статистики не позволяет глубоко доверять таким оценкам. В то же время для алгоритмов ОТ при очень ограниченных размерах необходимых расчетных данных обычно предъявляются достаточно детальные сведения об экспериментальных результатах, подтверждающих основные предварительные оценки. Более того, в случае, если какой-то иной алгоритм не проверялся экспериментально, что, к сожалению, оказывается типичным итогом подобных публикаций, то уже без каких-либо исключений характеристики МПД декодеров или других алгоритмов класса ОТ всегда оказываются по вероятностям ошибки и простоте реализации многократно более выигрышными. Нелишне отметить также, что для очень многих кодовых кластеров (типичных множеств параметров кодов, декодеров и каналов) до сих пор достоверно известны по строгим критериям достоверность-помехоустойчивость-сложность (!) только характеристики алгоритмов ОТ.

Многие наши коллеги согласны с нами в том, что значение Оптимизационной Теории и МПД методов сейчас намного выше роли новых идей квантовой механики, которая усилиями большого числа великих физиков была создана сто лет назад. Правда, в первые годы XX века физика была не самой актуальной наукой для человечества. Однако ее новые постулаты получили высокую оценку международного научного сообщества, а основоположники квантовой механики заслуженно стали Нобелевскими лауреатами.

Наша Оптимизационная Теория создана как раз в момент быстрого начала формирования цифрового информационного сообщества, когда

обеспечение высокой достоверности цифровых данных относится к наиболее актуальным проблемам науки и техники, которые к тому же оказались и очень сложными для текущего уровня теории информации. Наука в этой очень трудной для изучения отрасли знания пошла по тупиковому пути. Именно эти обстоятельства и определяют действительно исключительно выдающуюся роль нашей очень своевременной фундаментальной и весьма технологичной теории, а также всех её прикладных достижений.

Совокупность достигнутых нами результатов в прикладной Оптимизационной теории, представленных в книге «Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума» и в других наших монографиях, позволяет поздравить науку России с полным решением в 2018-м, юбилейном году важнейшей проблемы всего цифрового мира планеты Земля — успешным созданием технологий исключительно простого обеспечения высокой достоверности цифровой информации, в том числе и в системах с большим уровнем шума, вплоть до самых ближайших окрестностей абсолютно упругой и поэтому никогда не достижимой (как и скорость света для материальных тел!) границы Шеннона для всех классических цифровых каналов информации.

Так что многие специалисты будут очень удивлены, когда узнают, что классическая теория кодирования успешно завершена. Вместо трудных и необозримых проблем этой теории теперь надо просто освоить уже значительное множество технологий проектирования, отладки и настройки алгоритмов МПД и других близких к ним методик. Но именно это всегда и происходит при успешном завершении действительно важных наукоёмких проектов.

Как написал об успешных результатах изучения и решения научной школой ОТ проблемы Шеннона академик Н.А. Кузнецов, «отрадно найти её решение в этом юбилейном году в монографии российского учёного». Мы глубоко признательны Николаю Александровичу за его высокую оценку

проделанной нами работы в области современной Оптимизационной теории
помехоустойчивого кодирования и её наиболее важных прикладных проблем.

По поручению сторонников
научной школы Оптимизационной Теории

Валерий Золотарёв

P.S.

Вы можете переписать на свой компьютер нашу юбилейную
монографию в специальном переработанном виде на английском языке. Она
называется "Coding Theory as a Simple Optimal Decoding near Shannon's
Bound".

Она свободно доступна по ссылке:

https://mtdbest.ru/articles/mtd_book_2019.pdf .

Успехов вам!