

О РЕАЛЬНОСТЯХ ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЙ

(Ответ на замечания читателей)

В.В. Золотарёв

Как автор книги благодарю профессоров М.А. Быховского и В.П. Дворковича за внимание к моей новой монографии в их отзыве, напечатанном в предыдущем номере журнала Цифровая обработка сигналов (ЦОС). В их отзыве имеется ряд критических замечаний, на которые следует ответить.

Во-первых, введённое в книге сокращение «ОТ» воспроизведено везде в отзыве как Основная Теорема, тогда как это значит «Оптимизационная Теория». В книге, как и полагается, этот термин и его сокращение приведены вместе при их самом первом появлении на стр. 6. Эта ошибка оппонентов очень сильно меняет смысл многих выражений отзыва на книгу.

Во-вторых, необходимо отметить, что приведённые рецензентами многие цитаты из моей книги соответствуют оценкам очень большого числа других специалистов, которые они дают нашей Оптимизационной Теории (ОТ). Но тут есть и моя оценка ОТ как руководителя передовой научной школы мира по этой теме. С этим мнением вполне согласны все наши многочисленные рецензенты, сторонники, соавторы монографий, а также многие научные редакторы – члены-корреспонденты и академики РАН. Эти мнения уже вполне устоялись за последние 15..20 лет. Нас поддерживает и зарубежье. Ваш покорный слуга был недавно награждён Золотой медалью Евросоюза (ЕС) «За исключительные достижения», которой могут быть удостоены только учёные, имеющие действительно выдающиеся научные результаты. А после строгой экспертизы Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) в Женеве по рекомендации его Генерального секретаря издана наша монография по Оптимизационной теории кодирования (Zolotarev V.V., Zubarev Y.B., Ovechkin G.V. Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms, ITU, 2015).

В ответ на замечание про определение теории кодирования отвечаю, что, безусловно, теория кодирования не сводится только к задаче поиска глобального экстремума, решаемой при декодировании принятых сообщений. Она, конечно, гораздо шире (в том числе много шире определения, данного авторами отзыва). Но в монографии рассматриваются основные проблемы, с точки зрения нашей научной школы, теории помехоустойчивого кодирования: разработка декодеров, обеспечивающих близкое к оптимальному декодирование длинных помехоустойчивых кодов с наименьшей вычислительной сложностью, и построение кодов, наилучшим образом подходящих для этих декодеров. При этом используются предложенные автором монографии оптимизационные процедуры, которые позволяют получить впечатляющие результаты, недостижимые для других методов коррекции ошибок с сопоставимой вычислительной сложностью. Все это по мнению многих специалистов, действительно позволяет считать разработанную оптимизационную теорию «новой квантовой механикой» теории информации. При этом, отмечу, что термин «квантовые каналы», поставленный мне в вину в отзыве, в монографии совсем не используется. Скорее всего авторы отзыва так восприняли стандартные модели гауссовских каналов с квантованием выходного сигнала демодулятора на несколько уровней.

Далее отвечаю на пронумерованные замечания.

1. Монография посвящена разработке не систем связи, а методов кодирования/декодирования помехоустойчивых кодов. Поэтому в ней используются не предложенные уважаемыми рецензентами показатели эффективности систем связи, а те, которые традиционно используются при сравнении эффективности различных методов помехоустойчивого кодирования в типичных моделях каналов связи. По этой же причине в монографии нет сравнения с «рядом эффективных методов передачи и приема сообщений», перечисленных рецензентами. Это совсем не нужно. В то же время полученные в монографии характеристики сравниваются с характеристиками, обеспечиваемыми классическим декодером Витерби сверточных кодов, декодерами турбо и низкоплотностных кодов, которые считаются одними из наиболее перспективных для применения в высокоскоростных системах передачи данных, и характеристики декодеров некоторых других кодов.

2. Под «уровнем шума» в монографии понимается некоторая характеристика, влияющая на вероятность ошибки при передаче цифровых данных по каналу с шумом и зависящая от модели используемого канала. Так для двоичного симметричного канала это вероятность битовой ошибки, для q -ичного симметричного канала – вероятность символьной ошибки, для канала со стираниями – вероятность стирания, для гауссовского канала – отношение сигнал-шум на входе демодулятора. Использование единого термина «уровень шума» с нашей точки зрения позволяет несколько упростить изложение материала. Так же здесь отмечу, что конкретные отличия пропускной способности каналов и границ рабочих областей наших декодеров всегда указываются в тексте монографии на многих графиках для разных кодов и каналов.

3. В первой части п. 3 отзыва его авторы предлагают анализировать не конкретные коды, а ансамбли кодов, выявляя общие закономерности изменения их помехоустойчивости с изменением длины. Но дело в том, что проблемы декодирования – это всегда алгоритмические задачи создания только конкретных кодов. Нельзя сделать декодер для ансамбля кодов! При этом конкретный декодер можно применять в миллионах разных систем. Именно поэтому в наших работах внимание уделяется конкретным кодам с указанием характеристик их декодирования. При этом для оценки эффективности конкретного декодера для конкретного кода при большом уровне шума в

нашем случае необходимо использовать компьютерное моделирование, при малом же шуме эффективность кода и декодера всегда можно оценить аналитически с помощью представленных в монографии выражений.

4. Утверждение, приведенное в монографии, про то, что рассматриваемые в ней коды позволяют исправлять более, чем $d/2$ ошибок, несмотря на замечание рецензентов, является верным. Это известно уже более 50 лет со времени выхода в свет книги Дж. Мессис «Пороговое декодирование». Причем этот факт, подробно обсуждаемый в разделе 2.1 монографии, является отправным моментом всей обсуждаемой оптимизационной теории кодирования. Дополнительно отмечу, что и многие другие помехоустойчивые коды (турбо, низкоплотностные и даже некоторые алгебраические, такие как коды Рида-Соломона) позволяют исправлять больше ошибок, чем гарантируется минимальным кодовым расстоянием. Безусловно, сделать они это могут не всегда и обязательно существуют конфигурации из более, чем $d/2$ ошибок, которые приведут к ошибке декодирования. Но такие конфигурации встречаются гораздо реже исправляемых конфигураций ошибок.

5. Поскольку при большом уровне шума (малом отношении сигнал-шум на выходе демодулятора) на эффективность декодера влияние оказывает не столько минимальное кодовое расстояние, сколько спектр кода и многие другие параметры кодера и декодера, пропадает необходимость сравнения построенных нами кодов с другими с помощью предложенных рецензентами границ. Хотя граница Хэмминга (т.е. сферическая упаковка) обсуждается в монографии в разделе 1.6.

6. Утверждение рецензентов, что «характеристики рассмотренных кодов наверняка уступают характеристикам кодов с максимально достижимым расстоянием (МДР)» выглядит весьма странно и бездоказательно. При этом, для символьных кодов в разделе 3.5.3 достаточно подробно на примере характеристик конкретных кодов показано, что коды Рида-Соломона, относящиеся к МДР-кодам, существенно уступают предлагаемым в монографии символьным кодам при одинаковом размере символа. Безусловно, в монографии отмечено, что это оказалось возможным в том числе за счет того, что наши коды длиннее кодов Рида-Соломона. Но более длинных кодов Рида-Соломона при таком же размере символа, к сожалению, нет и ничего с этим поделать нельзя. Даже использование всевозможных вариантов организации каскадирования на базе кодов Рида-Соломона не позволяет получить лучшие, чем в монографии результаты. Кроме того, сложность алгебраического декодера кода Рида-Соломона пропорциональна квадрату длины кода, в то время как сложность нашего декодера всего лишь линейная. Хотя, справедливости ради, можно отметить, что для своей длины коды Рида-Соломона действительно обеспечивают очень хорошие характеристики.

Что касается замечания про нашу недооценку фундаментальных результатов, полученными многими отечественными и зарубежными специалистами, то ее нет. Наша школа с величайшим почтением изучает и использует труды многих учёных: К. Шеннона, Дж. Мессис, А. Витерби, Д. Форни, Дж. Кларка, Дж.П. Робинсона, Д. Салливена, В.М. Готлиба, Э.М. Габидулина, А.Л. Ларина и многих других уважаемых специалистов. И это не запоздалые теперь уже реверансы в адрес моих коллег из-за обвинений рецензентов. Ссылки на разные работы в области теории кодирования сделаны мной в книге на страницах: 21, 24, 96, 155..159 и далее, не считая общего списка литературы из 72-х позиций, где есть не только моя фамилия. Но в процитированных рецензентами со стр. 197 недостатках алгебраической теории ошибок нет. Действительно, все перечисленные проблемы ею не решены, и именно они ещё много десятилетий назад стали причиной её заката во всех прикладных аспектах.

Таким образом, в комментариях рецензентов не выявлено ни одной даже мелкой неточности автора в изложении важнейшей для цифровой связи новой Оптимизационной Теории. Наша научная школа, действительно, решила на высоком научном и технологическом уровнях проблему простого высокостойкого декодирования вблизи пропускной способности канала, поставленную 70 лет назад К. Шенноном.

В заключении я выражаю редакции журнала свою признательность за терпеливое ожидание моего ответа на критику рецензентов и за резервирование для этого тех ограниченных ресурсов журнала, которые, конечно, в другой ситуации можно было бы выделить для других статей. Поэтому более точный и детальный ответ на замечания оппонентов, восстанавливающий научную репутацию монографии, её автора и уважаемого журнала по современным цифровым технологиям, представлен на портале нашей научной школы по адресу <http://www.mtdbest.ru/books.html>, где уже есть материалы и про нашу новую книгу, в частности, рецензия, опубликованная в журнале «Электросвязь». Рассмотренный здесь мной текст оппонентов тоже там представлен. Там же мы поместим мнения о нашей монографии других наших читателей.

д.т.н., профессор В.В. Золотарёв

– автор монографии «Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума (Оптимизационная Теория помехоустойчивого кодирования – новая «квантовая механика» теории информации)». М., Горячая линия – Телеком, 2018, 221 с.;

– Лауреат премии Правительства РФ по науке и технике и Золотой медали Евросоюза (ЕС) «За исключительные достижения».

*zolotasd@yandex.ru , www.mtdbest.iki.rssi.ru , www.mtdbest.ru
моб.: 8-916-518-86-28*