

Ответ редакции журнала
"Современные проблемы ДЗЗ из космоса"
от авторов статьи

«Обзор проблем полярных кодов с позиции технологий
Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования»

на комментарии:

**I. П.В. Трифонова и
II. С.В. Федоренко.**

I.

В обзоре по критериям, которые являются всегда важными при разработке алгоритмов декодирования, были рассмотрены результаты ряда авторов. Выбранными критериями являются: сложность алгоритмов, обеспечиваемая ими достоверность, а также помехоустойчивость, т.е. близость к пропускной способности канала.

В обзоре приходилось учитывать, что текущее состояние прикладной теории кодирования (ТК) не позволяет точно рассчитать сложность и достоверность каких-либо алгоритмов при большом уровне шума канала, что требует активного использования масштабного высокодостоверного моделирования. Авторы обзора не имеют информации о наличии таких качественных программных средств у активных в ТК научных групп в РФ.

Наконец, авторы обзора подчёркивают, что они являются тем коллективом специалистов, который для всех классических каналов, рассматриваемых в прикладной ТК, обеспечил сложность $N \sim n$, где n – длина используемых кодов, теоретически минимально возможную. Сложность относится к ключевым параметрам качества. И все характеристики наших алгоритмов уже 40 лет непрерывно проверяются в программных экспериментах, а сами программные средства научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) общедоступны на порталах нашей школы. Исключительно важно, что все соответствующие теоретические и прикладные результаты получены ещё в предыдущем тысячелетии. Специалисты обязаны их знать и учитывать в своей работе. Других методов декодирования с линейной сложностью и, что крайне важно, достигающих оптимальных, наиболее достоверных, решений при большом уровне шума, в настоящее время не существует. Напомним ещё раз, что эти сведения опубликованы и общедоступны в [6] (ссылка по списку литературы нашего Обзора).

Представленное выше введение к нашему ответу комментаторам обзора показывает сложность прикладных проблем ТК. Их важность была рассмотрена в самом обзоре.

Обратимся к комментарию П.В. Трифонова. Пункты указаны по его документу.

1.. Неприемлемое замечание. В своих работах диссертанты (да и просто авторы статей о новых алгоритмах) должны показать реальную сложность именно своих достижений и сравнить их с известными ранее декодерами. Этого не было сделано, как необходимо, с тем перечислением параметров моделирования и т.д., которые мы указывали в нашем обзоре.

Вынуждены добавить также, что мы уже неоднократно подчеркивали, что в исследованиях по ТК не следует ссылаться на результаты деятельности производственных корпораций, разрабатывающих системы связи и кодирования. Они живут по совершенно другим законам.

Далее, абсолютно правильно, что научный руководитель защищает работу своей аспирантки.

Но наше несогласие с предложенным изложением материала (Таб.3.2.), который мог бы стать полезным, состоит в том, что не ясно вообще, о чём идёт речь. Данные в соседних строках таблицы близки, но оставлены без содержательного текстового сопровождения. То, что указано, абсолютно непонятно. Где и за счёт чего улучшения, насколько они важны при столь малой разнице – неясно. И главное, какой компьютер, какова его скорость, реальная скорость декодирования кода.... ?

Мы помогаем всем нашим коллегам в этом технологическом вопросе. На наших сетевых порталах можно найти калибровочную программу для сопоставления и компенсации разницы в скоростях разных компьютеров, что очень облегчает задачу сравнения скоростей различных методов декодирования.

Таб.4.2 также «висит» сама по себе. Непонятны все прочие условия работы, скорость компьютера и собственно эффективность самого декодера.

Мы согласны, что на подготовку таблицы потребовались время и силы. Но и она ни о чём, а просто некая формальность. Да и сравнений с чем-то иным, чем собственные результаты, тоже нет. На отсутствие сравнений с другими методами указывалось и в официальных отзывах на диссертацию комментатора.

Последняя таб.4.3 столь же неполна собственными параметрами и какими-либо сравнениями. А заявление, что при снижении уровня шума всё улучшается, столь тривиально и просто очевидно, что совсем разочаровывает.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что обсуждаемые работы по полярным декодерам, как это бывает последнее время, излагают материал так, будто до них была пустыня. Этот подход исключает реальные сравнения и сильно обедняет результаты таких исследований.

2.. Крайне неудачное замечание комментатора. Ссылка доктора наук на пользу мобильных телефонов удивительна по наивности. Мы уже выше написали, что корпорации живут по иным законам, чем наука. А больше ничего из достижений комментатора тут нет.

3. Комментатор прав: очень многое можно. Но насколько переход к целочисленным переменным снижает результат – этого он нигде не пишет. По тексту у него не удалось найти упоминаний ни целочисленных переменных, ни вещественных. Да, написано аккуратно, у него больше опыт. Он умеет обходить сложные места темы. А у аспирантки во многих местах фигурируют именно вещественные числа. И что надо делать на самом деле при создании декодеров в этом плане – неясно. Какая часть работ комментатора связана с вещественными числами – тайна. Отрицать их использование невозможно. Так что налицо способность обходить трудности замалчиванием. Но это совершенно не научный метод. Такой стиль работы, кстати, и стал причиной заката методов прочих лет: турбо и других алгоритмов. То же происходит сейчас и с полярными кодами.

4.. Странное замечание. Да. И мы, как сотни других специалистов пишем, что полярные коды слабы, из-за чего рассматривают только их короткие варианты! У нас нет противоречия с комментатором по этому пункту. А для коротких кодов у нас в обзоре есть 2 рисунка, 1 и 2, где блочные алгоритмы Витерби (БВ) и многопроговые декодеры (МПД) успешно декодируют именно короткие коды с наилучшими возможными по достоверности результатами и указанием сложности через скорости декодирования. Это ключевой момент обзора. И комментатор просто сам заставил нас обратить на это внимание. Оба эти запатентованных нами метода сходятся к наилучшему оптимальному результату и для коротких кодов даже без специальной дополнительной настройки. Кроме того, они выполняют только простейшие операции с небольшими целыми числами, что крайне важно для реальных быстрых систем. И мы везде указали условия моделирования. Всегда готовы помочь коллегам, которые готовы пойти ещё дальше нас. А абсолютно все «картинки» без указания всего списка параметров моделирования и/или расчёта (даже это в анализировавшихся работах непросто понять!) в работе комментатора не объясняют ничего.

5.. По данному пункту мы принимаем замечание комментатора. Мы, как всегда в подобных ситуациях, поняли термин «уровни квантования» из работы «Трифонов, 2018» (ссылка [26] Обзора) как обычный, относящийся к квантованию выходного сигнала демодулятора. Возможно, что комментатору следовало бы его как-то доопределить более точно или назвать совершенно иначе.

6.. В статье Tal, Vardy, 2015, на которую указывает комментатор, написано «Unfortunately, even under maximum-likelihood decoding, the performance of polar codes falls short in comparison to LDPC and turbo codes of comparable length.», т.е. никакого противоречия с данными, представленными в обзоре, нет. Конечно, в статье далее предлагаются некоторые улучшения, но они связаны с применением списочного декодирования и, самое главное, добавлением к полярным кодам CRC, т.е. фактически авторы неявно переходят к каскадной кодовой конструкции, естественно обладающей совершенно новыми свойствами по сравнению с исходными полярными кодами. А это только усложняет понимание и без этого очень непростых результатов.

7.. Важный пункт. Мы настаиваем, что сложность $(n \cdot \ln n)$ неоправданно велика. Наши алгоритмы МПД сходятся к оптимальному решению с линейной сложностью: $N \sim n$. Это известно 40 лет. Перечислены выше слабости полярных кодов (малая длина и проч.) слишком значительны. От этого нельзя уйти. А таб. 4.1 опять бесполезна для сравнения с какими-либо прочими методами. Ничего неясно по существу. И, кроме того, тут присутствует списочное декодирование, которое сильно разрушает традиционные понятия о корректирующей способности. Мы детально объясняли это в самом обзоре. Списки используются из-за крайней слабости самих полярных кодов.

Рис.4.5 производит ещё худшее впечатление. Если кто-то принял кодовый блок с 1000 информационных символов, то как его вообще можно где-то использовать, если в качестве решения декодера «числятся» ~500 его вариантов? Такой подход неприемлем, а для быстрых линий связи и просто невозможно. Это – вынужденный неудачный маневр для кажущегося уменьшения вероятности ошибки результата декодирования. А причина его – малая эффективность самих полярных кодов.

Наконец, рис.4.7б также относится к списочным алгоритмам и не требует наших повторных аналогичных оценок. Однако мы согласны, что тут некоторые варианты декодирования имеют высокую производительность, но при малом уровне шума, на что снова можно указать как на несущественный обычный момент. Все алгоритмы, а не только для полярных кодов, при малой плотности ошибок канала ускоряются в десятки и сотни раз. Да, возможно, что именно некоторые алгоритмы, представленные на этом рисунке, можно было бы доработать до удовлетворительного уровня, но предъявленные конкретные результаты не впечатляют, учитывая списочное декодирование и другие уже рассмотренные обстоятельства.

8. Ссылка на умных студентов тут неуместна. Свои важные результаты соискатели сами должны предъявлять в удобном виде оппонентам и всем читателям.

9. Для краткости отметим, что и тут лучшие результаты показал опять именно алгоритм Витерби (AB), открытый уже более 50 лет назад и никак к нашей научной группе даже не относящийся. Он, как известно, является оптимальным по вероятности ошибки декодирования. Для этих условий моделирования его нельзя превзойти на базе полярных кодов даже и сейчас, через 50 лет.

10.. Здесь снова неизбежные у полярных кодов списочные методы, которые совершенно не относятся к традиционной классической постановке задачи декодирования.

11.. Мы согласны, что в одной из ссылок указаны результаты моделирования. Но это опять не результаты комментатора, на трудности интерпретации которых указывалось и в официальных отзывах на его диссертацию, которая указана в ссылке [26] нашего Обзора. Так что наше отношение к ней – вовсе не проявление только наших капризов.

12.. В этом пункте указаны декодеры со списками до 500, некоторые при очень высокой сложности и при длине информационной части всего лишь $k \sim 1024$, что, конечно, очень сильно изменяет постановку задачи (при значительном росте допустимой сложности алгоритмов) и не позволяет провести корректное сравнение. Диссертант не обеспечил хоть как-то понятное сравнение методов. Можно было бы привлечь опять AB или другие методы. Сопоставление только своих методов абсолютно не показательно. Нельзя излагать свои результаты так, как будто до этого никаких работ по кодам вообще не было.

13. Непонятное рискованное утверждение. Комментатор считает, что его аспирантка не занималась аппаратной реализацией. Пусть. Это не существенно для нашего Обзора.

Но заявить, что именно это обстоятельство – основание считать, что в тех кодах не требуются вычисления с действительными числами, - такой пассаж смотрится крайне странно. Особенно, если вспомнить, что в той диссертации на степень к.т.н. соискательница многократно (и весьма правильно!) обсуждает в разных местах сложность циклов различных процедур декодирования именно с *вещественными* числами. А из-за использования таких странных и нелогичных, если не сказать большего, «технологий» дискуссии от комментатора мы вынуждены напомнить, что (цитата по тексту этой к.т.н. диссертации): «.....сложность декодирования расширенных кодов Рида-Соломона можно оценить как $O(Ln^3 \log n)$ операций над вещественными числами....., а при увеличении длины кода n требуемый размер списка L растет экспоненциально».

И в связи с такой очень вольной трактовкой комментатором своих результатов и диссертации своей аспирантки, авторы обзора вынуждены снова напомнить, что для недвоичных кодов к которым относятся и коды

Рида-Соломона (РС) ещё более 35 лет назад были предложены линейные по сложности от длины кодов (т. е. с $N \sim n$) алгоритмы декодирования, которые для весьма большого уровня шума достигают оптимальных, наилучших по вероятности ошибки решений (ссылка [3] нашего Обзора). Но более того, эти методы помещены ещё 15 лет назад в весьма популярный и вообще единственный в РФ справочник по кодированию под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева, который выпустила опять же наша школа Оптимизационной Теории (ссылка [6] нашего Обзора). Иначе говоря, предложенный с задержкой на многие десятилетия «новый» алгоритм для кодов РС, например, при вполне реальной длине кода $n \sim 255$ будет в $\sim n^2 \cdot \log_2(n) \sim 500'000$ раз сложнее крайне простого метода из справочника, даже если не учитывать замечание диссертантки про ещё и экспоненциальный рост параметра L .

14. Также странное и, видимо, непроконтролированное комментатором замечание. Авторы обзора указали детальные скоростные характеристики своего МПД метода для блочного варианта. А комментатор зачем-то снова сослался не на свои результаты (Почему? Их совсем нет?), а на чужую статью, где для полярных кодов, как он пишет, указывается скорость программной реализации более 200 Мб/с. Но больше не сообщил об этом вообще ничего.

Да. Это впечатляет! Но мы проверили несколькими способами простую пересылку больших массивов данных между двумя массивами и выполнение простейших логических операций на нашем компьютере и получили возможное число операций декодера где-то в пределах всего лишь $5 \div 40$ операций на декодированный бит. Ресурса для работы хоть какого-то реального декодера просто нет! Такой же результат получился у нас и на двух других компьютерах с тактовой частотой ~ 3 ГГц. Так что названные комментатором «красивые» скорости программного декодера выше 200 Мб/с для реального (какого же всё-таки?) декодера - крайне неудачный финал его документа. Была ли тут его ошибка или здесь просто «выиграла» неконтролируемая фантазия – это уже не наш вопрос.

Ну, и как финальное замечание укажем, что не следовало демонстрировать абсолютно излишние эмоции в конце каждого пункта комментариев, даже если критические статьи в настоящее время весьма редки.

Заканчивая ответ на комментарий Трифонова, авторы обзора вынуждены подтвердить своё негативное отношение к тематике полярных кодов. Мы согласны, что комментатор сейчас является одним из наиболее известных специалистов по полярным кодам. Но недостатки и серьёзные проблемы этого направления слишком многочисленны. И корректного сравнения полярных алгоритмов с другими методами специалисты по таким алгоритмам не делают. Все их игры идут «внутри» этой темы, что и показывает её глубокую внутреннюю проблемность.

А все указанные нами многочисленные преимущества алгоритмов ОТ действительно очень значимы, технологичны и теперь уже позволяют решать многие проблемы повышения достоверности и быстродействия, которые ранее были вообще неразрешимы. Комментатор представил противоречивые данные по своим методам, а трудные моменты, которые всегда абсолютно естественно возникают в сложных исследованиях, предпочёл вообще утаить (сложность, скорости, достоверность, представление чисел и т.д.). В очень неявном виде комментатором использовались и методы каскадирования. А они отвлекают и приводят к неправильной оценке результатов, относящихся к самим полярным кодам, как и при переключении внимания на списочные варианты. Но это совершенно неправильный подход. Да это и не получилось совершенно.

Тем не менее, нам кажется, что комментатор имеет очень неплохую команду программистов, которая пока не нашла своей яркой научной темы. Школа ОТ готова поделиться своими технологиями и предлагает начать совместные перспективные разработки по одному из многих направлений нашей деятельности. Это ускорит выход прикладной теории кодирования из длительного глубокого кризиса.

II.

В ответ на претензии С.В. Федоренко авторы обзора считают полезным сообщить следующее.

Повторно просмотрев результаты исследований этого специалиста, мы можем отметить следующие обстоятельства.

1.. Книга имеет некорректное название. В ней нет новых алгоритмов декодирования, которые имели бы меньшую сложность, чем другие известные до её издания методы. Утверждения о «генетической связи» и многие прочие совершенно второстепенные детали его публикации не могут ничего изменить.

2. Многочисленные примеры коррекции ошибок в коротких кодах, возможно, полезны как учебный материал, но не как ценный результат докторской диссертации.

3. Автор комментария выполнил, безусловно, большой объём работы в монографии. Но возьмём, например, результаты по снижению асимптотической сложности декодирования до ~ 5 раз в экспоненте сложности по сравнению с полным перебором. Это приводит даже для не очень длинных кодов к такой «уменьшенной» сложности, которая больше, чем число атомов во Вселенной. Ясно, что это весьма запоздалые

«достижения». Они не полезны ни для теории, ни для обучения студентов, как это указано, тем не менее, в аннотации к его монографии. И уже 35 лет известны эффективные коды с линейной от длины кода сложностью и оптимальным декодированием (ссылки [3,4] Обзора и сотни других наших работ). Все они разработаны научной школой ОТ.

Мы снова напоминаем, что алгоритмы для всех классических каналов, рассматриваемых в ТК, с линейной сложностью и оптимальным по вероятности ошибки результатом известны с 1981 года и помещены в 2004 году в единственный изданный в РФ справочник по кодированию, подготовленный научной школой ОТ под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева (ссылка [6] в конце нашего Обзора). Конкретные алгоритмы, описываемые вторым недовольным комментатором гораздо слабее методов ОТ и по сложности, и достоверности. Они появились в 70-х годах того века, ~60 лет назад и, как признаёт комментатор, не были им улучшены, а только получили особую новую интерпретацию.

Так что все перечисленные кары на авторов Обзора от второго комментатора приходится отвергнуть просто из-за того, что очень мягко сформулированное в обзоре наше мнение и добавленные в этом ответе особенности его работы достаточно объективны. Мы и здесь согласны с тем, что можно только сожалеть о недостаточном количестве критических обзоров по нашей тематике. Увеличение объективных аналитических работ об уровне исследований в прикладной теории кодирования было бы исключительно полезно.

Авторы обзора долго колебались, но решили указать на ещё один момент текущей немного странной дискуссии. Оба комментатора не привели в своих основных трудах в списках литературы и в собственных обзорах ни одной из ~500 статей или обзоров нашей научной школы ОТ, ни одной из восьми монографий, написанных сторонниками школы ОТ под научной редакцией или с прямым участием академиков и членов-корреспондентов РАН. У комментаторов не указан даже наш единственный в РФ справочник по кодированию, который вполне точно описывал ситуацию в прикладных вопросах ТК в стране и в мире (ссылка [6] в конце нашего Обзора).

Полезно напомнить и о том, что наши сетевые порталы читает весь мир, а число их посетителей близко к 100'000 в год.

Таким образом, крайне недостаточная информированность докторов наук, решивших комментировать наши обзоры о реальных успехах прикладной ТК, конечно, не пошла им на пользу.

Вряд ли их сильно порадует и то, что у нас уже накопилось некоторое количество других отрицательных мнений о нашей уникальной и очень успешной работе в ТК, написанных, в том числе, и специалистами с немалым числом высоких званий и наград. Комментаторы нашего обзора здесь далеко не первые. Но у нас ещё больше положительных отзывов о наших важнейших результатах, которые реально развивают прикладную теорию кодирования. Все отзывы, включая и негативные, можно прочесть на наших порталах, например, в разделах «Наши книги». Там же приведены и наши детальные ответы на всегда – увы! - крайне непрофессиональную и всегда очень эмоциональную критику важнейших результатов нашей научной школы. Столь же полезны и документы на страницах «Дискуссии» наших порталов. Все они могут быть весьма ценными для тех специалистов, которые не имеют возможности достаточно внимательно следить за развитием нашей реальной прикладной науки и пока не научились выделять перспективные направления работ в той или иной отрасли знаний.

Разумеется, авторы обзора хорошо понимают сложность тематики ТК и готовы к сотрудничеству со всеми коллективами, занятыми исследованиями в области цифровых технологий. Научная школа ОТ вполне может также взаимодействовать и с обоими комментаторами нашего обзора, конечно, имеющими весьма немалый исследовательский опыт в этой интереснейшей сфере науки. Возможно, что они пока не нашли, как нам кажется, перспективных для себя направлений работы в современной принципиально обновленной теории кодирования, основанной на оптимизационных алгоритмах с линейной от длины кодов сложностью и наилучшими оптимальными решениями. У нашей Оптимизационной Теории обширное поле для плодотворной работы в цифровом мире.

Мы, со своей стороны, готовы сотрудничать со всеми активными специалистами, занятыми в сфере цифровых технологий.

По поручению авторского коллектива «Обзора....»

Авторы:

Н.А. Кузнецов,

В.В. Золотарёв,

Г.В. Овечкин.