

## ВВЕДЕНИЕ В ТУРБО-КОДИРОВАНИЕ

## Введение

Задачей любой системы связи является передача информации от ее источника к приемнику. Перед разработчиком системы связи ставятся противоречивые требования. Разработчик должен стремиться к увеличению скорости передачи данных вплоть до максимально возможной, *минимизировать вероятность появления битовой ошибки*, минимизировать потребляемую мощность и ширину полосы пропускания. Естественно, нельзя удовлетворить всем эти требованиям.

Повышение скорости передачи, снижение потребляемой мощности, уменьшение ширины полосы пропускания приводят к повышению *вероятности появления битовой ошибки*. Теоретические пределы соотношения таких параметров, как скорость передачи, и вероятность появления битовой ошибки, были установлены Клодом Шенноном в 1948 г. В его работе было показано, что достижение предельно возможных характеристик при передаче данных по каналу с шумом возможно лишь при использовании кодирования информации, то есть применения помехоустойчивых кодов. Двоичная фазовая модуляция требует для достижения вероятности ошибок  $10^{-5}$  соотношения сигнал/шум в канале, равного 9,6 дБ. В работе Шеннона утверждается, что, используя кодирование, можно добиться любой заданной вероятности ошибок при соотношении сигнал/шум, равном -1,6 дБ, получая, тем самым, выигрыш в 11,2 дБ. Естественно, этот теоретически возможный результат применения схем кодирования дал импульс к развитию всевозможных помехоустойчивых кодов.

С момента создания в 1948 г. Клодом Шенноном основ передачи информации, представленной в цифровом виде, разработано огромное число помехоустойчивых кодов, и исследования в этом направлении продолжают и по сей день. Интерес исследователей вызван тем, что применение помехоустойчивых кодов позволяет значительно снизить стоимость систем связи. Так, уменьшение требуемого соотношения сигнал/шум на величину в 1 дБ в системах связи с космическими объектами позволяет снизить общую стоимость системы более чем на 1 миллион долларов. Более того, каждый выигранный децибел в системе связи, требующей низкого соотношения сигнал/шум, может коренным образом изменить и расширить ее область применения.

Схемы защиты от ошибок можно разделить на два типа – схемы с обнаружением ошибок и повторной передачей (ARQ, automatic repeat request), и схемы прямого исправления ошибок (FEC, forward error correction). Обе схемы основаны на введении в поток информации избыточности. При применении первого типа схем, в случае обнаружения ошибки производится запрос на повторную передачу испорченного блока информации. Детектирование наличия ошибок производится на основании относительно небольшого количества избыточной информации. При применении схем второго типа повторной передачи информации нет, а возможные ошибки пытаются устранить только за счет избыточности, введенной в поток информации. Естественно, схемы прямого исправления ошибок более популярны, так как не требуют дополнительного канала связи приемника с передатчиком. Существуют схемы помехоустойчивого кодирования, объединяющие ARQ и FEC. Такие схемы потенциально позволяют достичь безошибочной передачи данных, в то время как схемы FEC могут гарантировать лишь достижение некоторой статистической вероятности появления ошибки.

Существующие помехоустойчивые коды для схем FEC можно разделить на два класса – блочные и сверточные. Блочные коды – это коды, оперирующие над блоками данных. Примерами классических алгебраических блочных кодов являются коды Хэмминга, Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) и Рида-Соломона. Сверточные коды – коды, оперирующие над непрерывной последовательностью данных.

Поток данных в протоколах передачи информации, как правило, обладает некоторой структурой, поэтому для удобства сверточные коды принудительно

преобразуют для работы с блоками данных. При этом сверточные коды сохраняют гибкость в выборе как длины блока данных, так и степенью помехоустойчивости данных при заданной длине. Важной отличительной чертой сверточных кодов является простота использования схемы "мягких" решений. В схеме с "мягким" решением на декодер подаются не значения '1' и '0', то есть не окончательные решения приемного устройства о значении сигналов в канале, а некоторый диапазон значений, показывающий, насколько приемное устройство "уверено" в точности определения значения. Использование "мягких" решений позволяет повысить помехоустойчивость при низком отношении сигнал/шум в канале.

Турбо-коды по своей структуре представляют собой блочные коды, построенные каскадированием сверточных кодов. При этом турбо-коды сохраняют все преимущества сверточных кодов.

Турбо коды были введены в рассмотрение французским исследователем Claude Berrou в 1993 г., и сразу же привлекли к себе пристальное внимание специалистов в области помехоустойчивого кодирования информации во всем мире. Причина этому - уникальная способность турбо кодов обеспечивать характеристики помехоустойчивости передачи информации по каналам с шумами близкие к теоретически достижимым значениям при умеренной сложности оборудования для кодирования и декодирования. Уже в первой работе по турбо кодам была продемонстрирована возможность получения значения средней вероятности ошибки на бит  $10^{-5}$  для бинарной фазовой модуляции в канале с аддитивным белым гауссовским шумом при отношении сигнал/шум на бит всего 0.7 дБ, что лишь на 0.5 дБ больше теоретического предела для бинарных *антиподальных* сигналов. Дальнейшие работы показали, что возможно создание турбо-кодов, обеспечивающих вероятность ошибки  $10^{-5}$  при отношении сигнал/шум на 0.03 дБ больше теоретического предела.

До открытия схемы турбо-кодирования не существовало методов, позволяющих приблизиться к пределу Шеннона. На практике использовались схемы, позволяющие получать заданное значение вероятности ошибки при отношении сигнал/шум равном 3-4 дБ. Единственным классом помехоустойчивых кодов, обещавших достижение предела Шеннона, были коды с низкой плотностью проверок на четность, открытые Галлагером в 1963г. Однако в силу сложности построения хороших кодов и их декодирования они не были популярны. С открытием турбо-кодов, взор исследователей обратился и к кодам Галагера.

Наиболее заметным достижением в теории помехоустойчивого кодирования на данный момент, безусловно, является изобретение турбо-кодов. Схема помехоустойчивого кодирования, получившая название турбо-код, была изобретена в 1993 г. Результаты, достигаемые при ее применении, оказались настолько впечатляющими, что уже к 2000 году эта схема кодирования была внесена в стандарты новых систем связи. Эти стандарты включают: стандарт, используемый NASA для связи с космическими объектами, стандарт наземного цифрового широковещательного телевидения DVB-T (digital video broadcasting, terrestrial), а также стандарты сотовой связи третьего поколения – UMTS и cdma2000.

За прошедшее с момента открытия турбо-кодов десятилетие появилось множество работ, посвященных этой тематике. Основное внимание исследователей было направлено на свойства самих турбо-кодов. Были созданы несколько гипотез, объясняющих эффективность турбо-кодов, исследовалось влияние параметров кодеров на эффективность кодирования. Так, исследовались различные типы и параметры компонентных кодеров, влияние устройств чередования различной конструкции.

Исследования свойств турбо-кодов как схемы помехоустойчивого кодирования важны, прежде всего, для разработчиков новых стандартов для систем связи. Именно перед ними встает вопрос выбора оптимальных для системы связи параметров турбо-кода.

После принятия решений о параметрах схемы помехоустойчивого кодирования, перед разработчиками аппаратуры встает вопрос построения эффективных декодеров.

В отличие от большинства других помехоустойчивых кодов, применяемых в схемах FEC, для турбо-кодов существует несколько алгоритмов декодирования. Эти алгоритмы имеют различное качество декодирования, обеспечивая, тем самым, различную вероятность ошибок в декодированных данных. Естественно, алгоритмы обладают различными требованиями к ресурсам, которые необходимы при их реализации в декодерах. Причем требования к ресурсам в немалой степени зависят от способа организации вычислений в самом алгоритме. Перед разработчиком аппаратуры системы связи, включающей в свой состав подсистему помехоустойчивого кодирования на базе турбо-кода, неминуемо встает вопрос выбора как типа алгоритма декодирования, так и его параметров.

Несмотря на растущую популярность, и достаточно давний срок появления, нет свободно доступных систем моделирования турбо-кодов с открытым исходным текстом. Естественно, существуют открытые модели, реализующие некоторые из алгоритмов. Ситуация осложняется тем, что существуют различные математические описания алгоритмов. Кроме того, все доступные существующие модели используют арифметику с плавающей точкой. Арифметика с плавающей точкой, безусловно, позволяет выполнить алгоритм с достаточно точностью. Однако при реализации декодеров на основе DSP, заказных интегральных схем или в базе FPGA встает проблема перевода алгоритмов декодирования с применением представления чисел с фиксированной точкой. Декодеры для различных турбо-кодов уже реализованы как в виде готовых микросхем, так и в виде IP cores для различных базисов. Естественно предположить, что производители данных продуктов имеют системы моделирования турбо-декодеров, оперирующих с числами с фиксированной точкой, но данные системы остаются закрытыми, по вполне понятным причинам.

## Турбо-кодер

Турбо-коды были открыты в 1993 году Берроу, Главье и Цитимаджимой (Berrou, Glavieux, Thitimajshima). В своей работе они сообщали о получении впечатляющих результатов для кода с большой длиной кадра. В следующей работе они постарались объяснить и формализовать полученные им результаты. В описываемой ими схеме достигалась вероятность появления ошибок  $10^{-5}$ , являющейся промышленным стандартом за рубежом, при степени кодирования  $1/2$  и модуляции BPSK в канале с белым аддитивным гауссовым шумом с отношением  $E_b/N_0$ , равным 0,7 дБ.

Классический вариант построения кодера приведен на рис. 1, он представляет собой параллельное соединение двух рекурсивных систематических сверточных кодеров (Recursive Systematic Convolutional Codes — RSC).

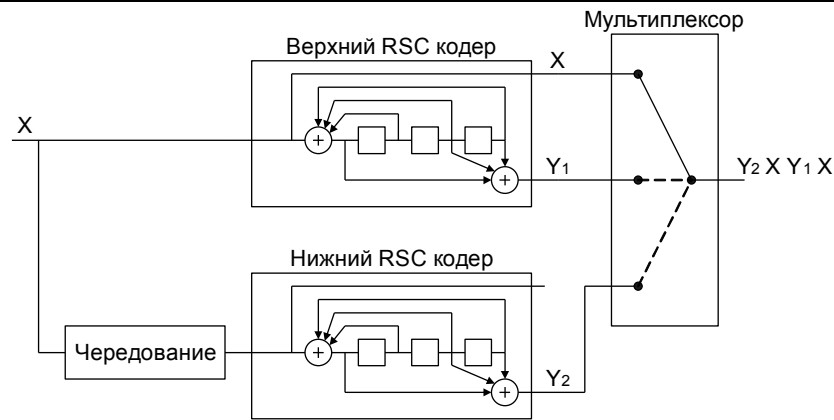


Рис.1. Классический турбо-кодер

Оба RSC кодера работают со скоростью равной  $1/2$ . Это означает, что на информационный бит на входе RSC кодер откликается двумя битами на выходе. Значение бита на систематическом выходе верхнего RSC кодера совпадает со значением входного бита, а на втором выходе формируется проверочный бит. На вход второго RSC кодера с выхода чередователя поступает бит, номер которого  $j$  зависит от номера  $i$  на входе чередователя по определенному закону. У нижнего RSC кодера систематический выход не используется, а на втором выходе формируется второй проверочный бит.

С выхода всего турбо-кодера на модулятор сначала поступает бит с систематического выхода верхнего кодера, а затем два проверочных бита: сначала с верхнего RSC кодера, затем – с нижнего. В результате степень кодирования  $r$  всего турбо-кодера в целом оказывается равной  $1/3$ . Можно сформировать и так называемый перфорированный, или выколотый (punctured) код, в котором биты с проверочных выходов RSC кодеров мультиплексируются, в результате чего сопровождение информационного бита чередуется от бита к биту проверочным битом либо с верхнего, либо с нижнего RSC кодера. При этом несколько снижается корректирующая способность кода, однако кодовая скорость  $r$  возрастает до  $1/2$ . В любом случае благодаря использованию систематических сверточных кодеров в кодовом блоке можно явно выделить систематическую и проверочные части. Более того, можно считать, что в канал связи передаются два кодовых блока: первый кодовый блок, состоящий из информационной части и проверочной части верхнего RSC кодера, и второй кодовый блок, состоящий из перемешанной информационной части и проверочной части нижнего RSC кодера. Ясно, что передавать перемешанную систематическую часть второго кодового блока в канал связи нет смысла, поскольку для ее восстановления в декодере можно использовать операцию обратную операции чередования информационной части кодового блока.

Схема каскадного кодирования впервые была предложена еще в 1966 году Форни, в его работе "Concatenated codes", как метод получения высокоэффективного кода посредством комбинации двух или более компонентных кодов, иногда называемых составными. В результате, такие коды могут корректировать ошибки в значительно более длинных кодах и имеют структуру, которая позволяет относительно легко осуществить декодирование средней сложности. Последовательные каскадные коды часто используются в системах ограниченной мощности, таких как космические зонды. Самая распространенная из этих схем содержит внешний код Рида-Соломона, который следует за сверточным кодом. Подобная схема применяется, например, в стандарте ISDB-T - Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting, наземные цифровые широкоэмитательные системы с интеграцией служб, рис.2. Турбо-код можно считать обновлением структуры каскадного кодирования с итеративным алгоритмом декодирования связанной кодовой последовательности.



Рис.2. Подсистема кодирования стандарта ISDB-T.

Опубликованные Берроу и Главье результаты вызвали целую волну исследований, направленных на изучение предложенного ими метода помехоустойчивого кодирования. Так, было предложено использовать в качестве компонентных кодов не сверточные, а блочные коды, вплоть до кодов Хэмминга. Кроме того, схема турбо-кодирования была обобщена на более чем два компонентных кода (рис.3).

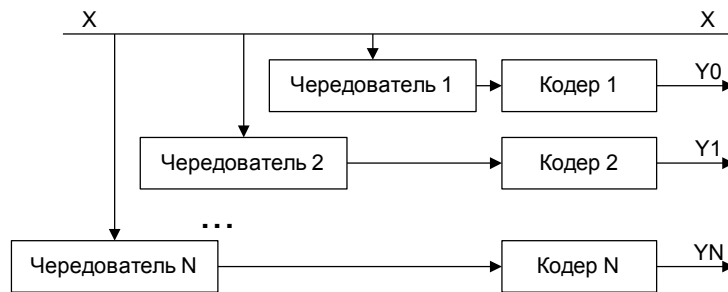


Рис.3. Структурная схема параллельного турбо-кодера

Было предложено использовать последовательное соединение кодов (рис.4). В отличие от схем, предложенных Форни, последовательно объединенные кодеры разделяются устройствами чередования. В соответствии с принципом организации, эти схемы кодирования принято называть кодами с последовательным или параллельным каскадированием.

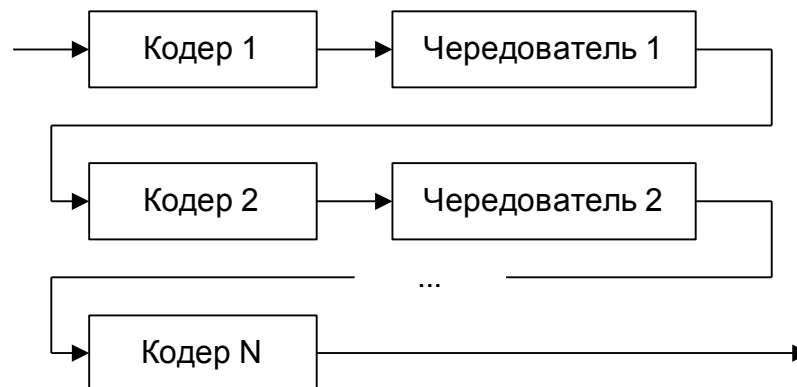


Рис.4. Структурная схема последовательного турбо-кодера

Исследования, проведенные зарубежными исследователями, показали, что схемы с компонентными кодами, отличными от сверточных, и с большим числом компонентных кодов, обладают определенными преимуществами перед классической схемой турбо кода. Однако, классическая схема остается наиболее выгодной в системах с низким отношением сигнал/шум, и более проста для практической реализации.

В противоположность классическим алгебраическим блочным кодам, турбо-коды следует отнести к случайным кодам. В этом смысле турбо-коды следуют рассмотренному ранее принципу Шеннона. В то же время длина блока турбо-коды реально может достигать чрезвычайно большой величины, поскольку она не влияет на вычислительную сложность алгоритма декодирования. При декодировании турбо-кодов, как и сверточных кодов, не возникает трудностей использования "мягких" решений.

Идеи создания подобных кодов и их декодирования восходят к работам Галлагера о так называемых кодах с малой проверкой на четность почти 40-летней давности. Тем не менее, этот факт никак не умаляет заслуг авторов создания турбо-коды, поскольку помимо возрождения самой идеи, они предложили оригинальную схему случайного кодирования, в которой для формирования проверочных символов используются сверточные кодеры, а для декодирования — очень эффективный итеративный алгоритм с "мягкими" решениями. Более того, после открытия турбо-коды турбоподобными кодами стали называть целую группу кодов, в частности, как более ранние коды Галлагера, так и гиперкоды (Turbo-Codes), о которых широко было заявлено в 1998 г. Все эти коды объединяет возможность применения итеративного алгоритма декодирования с "мягкими" решениями.