

ПОЛЯРНОЕ КОДИРОВАНИЕ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И СИСТЕМАХ СВЯЗИ

КРУТОВ Александр Викторович

студент

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

г. Владивосток, Россия

Полярные коды представляют собой появляющийся класс кодов с исправлением ошибок, способных приблизиться к пропускной способности дискретного канала без памяти. Эта обзорная статья призвана проиллюстрировать принципы, методы генерации и декодирования. В отличие от традиционной стратегии кодирования с приближением пропускной способности, которая пытается сделать коды как можно более случайными, полярные коды следуют другой философии, также созданной Шенноном, создавая совместно типичный набор.

Ключевые слова: полярные коды, кодирование, турбокод, линейный код, криптография.

Принцип работы полярных кодов. Одним из самых больших сюрпризов в стандартизации 5G до сих пор было принятие polar codes в качестве официальной технологии кодирования каналов. Такие решения, конечно, сложны и часто связаны с политическими убеждениями не меньше, чем с техническими достоинствами. Несмотря на это, подвиг, достигнутый этой относительно зарождающейся технологией, замечателен. Еще совсем недавно было распространено мнение, что турбо-коды никогда не будут затмеваться. Итак, что же отличает полярные коды и как они работают?

Основы канального кодирования. Полярные коды – это технология канального кодирования, и вся технология канального кодирования работает в основном довольно схожим образом. Линии связи подвержены ошибкам из-за случайных помех, помех, нарушений работы устройств и т. д. это приводит к повреждению исходного потока данных на принимающем конце. Канальное кодирование в основном использует набор алгоритмических операций над исходным потоком данных на передатчике и другой набор операций над полученным потоком данных на приемнике для исправления этих ошибок. В терминологии канального кодирования совокупность этих операций на передатчике и приемнике соответственно обозначается как операции кодирования и декодирования. Фокус исследования канального кодирова-

ния может быть сформулирован довольно просто: разработать высокопроизводительные канальные коды, которые смягчают влияние ошибок в канале связи (битовая частота ошибок – это общий показатель производительности, используемый здесь). Однако реальная проблема здесь заключается в том, чтобы сделать это способом достаточно низкой сложности, который позволяет практически внедрить данную технологию в наши дни. Сложность кода определяет все, например, сколько энергии он потребляет, сколько памяти ему нужно, сколько вычислительной мощности он требует, и сколько задержки он несет, все это в конечном итоге определяет, хорош ли код для любого конкретного случая использования.

Методы кодирования каналов в широком смысле подразделяются на два класса: блочные коды и сверточные коды. Блочные коды работают на блоке данных / битах с фиксированным размером и применяют манипуляции к этому блоку на передатчике и приемнике. Коды Рида-Соломона, обычно используемые на жестких дисках компьютеров, являются одним из примеров такого типа кода. Сверточные коды, с другой стороны, работают с потоками данных с более произвольным числом данных/битов. Эти коды применяют метод скользящего окна, который обеспечивает существенное преимущество декодирования. Простые коды Витерби являются примером этого типа кода.

Как вы могли бы догадаться, на протяжении многих лет были проведены значительные продуктивные исследования в области объединения блочных и сверточных кодов, чтобы объединить преимущества обоих. Например, код RSV, который был наиболее эффективным кодом до turbo codes, был гибридом кода Рида-Соломона, который является блочным кодом, с Витерби сверточным кодом.

Принцип работы турбо кодов. Турбокодирование является примером методаconcatenированного кода. Прирост производительности по сравнению с другими такими кодами шокирующе огромен. Это был первый набор кодов, который приблизился к пределу пропускной способности Шеннона с относительно умеренным уровнем сложности. Турбо-коды объединяют два кодера сверточного типа, два последовательных декодера и перемежитель. Турбо-коды получают свое название от новой петли обратной связи, которую они используют, по крайней мере концептуально напоминает тот же механизм, с помощью которого работают турбированные выхлопные системы в автомобилях. Настоящая инновация в турбо-кодах заключается в независимости сложности декодирования от длины информационного блока, что позволяет снизить вероятность ошибки декодирования путём увеличения его длины. Предыдущие системы требовали жесткого знания о битах (например, 0 или 1), которые были получены. Однако для правильного декодирования турбокодов требуется только вероятностная мера каждого бита. Это в основном позволяет успешно передавать гораздо больше данных по каналам с турбокодированием.

Будущие технологии полярного кодирования. Полярные коды до сих пор заменяли турбо-коды в каналах управления 5G eMBB (enhanced Mobile Broadband) и на физическом широкополосном канале. Хотя эти каналы обычно работают только на низких скоростях передачи данных, снижение сложности полярных кодов сделало их более привлекательным выбором, чем турбо-коды. В 5G еще предстоит решить две задачи: URLLC (сверхнадежная связь с низкой задержкой) и mMTC (массовая связь машинного типа). Эти варианты использования,

особенно URLLC, имеют сопоставимые требования к скорости передачи данных для каналов управления. Отличная способность полярных кодов исправлять ошибки, безусловно, делает их сильным соперником в этой гонке. Если смотреть в будущее, то для того чтобы полярные коды были увенчаны как универсальный метод кодирования, главная задача состоит в том, чтобы преодолеть барьер скорости передачи данных, сохраняя при этом производительность коррекции ошибок, а также преимущества низкой сложности. Каналы передачи данных обычно работают с гораздо более высокой скоростью передачи данных, чем каналы управления. Пиковая скорость передачи данных мобильной широкополосной связи 5G, как ожидается, составит около 20 Гбит / с. Ожидается, что системы Beyond-5G будут работать со скоростью передачи данных терабит/с. Сегодняшние самые передовые реализации polar code в настоящее время обеспечивают только около 5 Гбит / с. Однако существует прочная теоретическая основа, лежащая в основе полярных кодов, которая будет построена на них и не должна препятствовать их полному восхождению с течением времени.

Преимущества полярных кодов. Что касается реализации кодирования, кодер полярных кодов использует рекурсивную структуру со средней сложностью. Более того, учитывая длину кода, скорость кодирования полярных кодов может быть точно настроена путем добавления или удаления одного поляризованного канала. Поскольку турбокодер состоит из двух сверточных компонентных кодов, соответствующая сложность линейна по длине кода N . Наоборот, для нерегулярных кодов LDPC, основанных на случайной конструкции, сложность кодирования очень высока. К счастью, эта сложность может быть эффективно уменьшена на основе жадного процесса верхней триангуляции. На практике код LDPC часто дополнительно ограничивают, чтобы получить простое кодирование, такое как код квазициклического (QC) -LDPC. Таким образом, все три кода имеют эффективные структуры кодера, но полярные коды имеют лучшее свойство совместимости по скорости, чтобы почти непрерывно изменять скорость

кода. Что касается дизайна и конструкции кода, полярные коды могут быть построены различными методами. На практике алгоритм GA является предпочтительным выбором, поскольку он может обеспечить достаточно точную оценку эффективности ошибок с наименьшей сложностью. С другой стороны, для оптимизации турбокодов мы используем преобразование внешней информации (EXIT) в качестве полуаналитического инструмента для прогнозирования ошибок. Кроме того, в качестве основного строительного блока перемежитель в турбокодере должен быть оптимизирован на основе компьютерного поиска. Очевидно, что конструкция турбокодов сложнее, чем полярных кодов. Точно так же оптимизация кодов LDPC также занимает много времени. Переменная и распределение степени проверки могут быть оптимизированы только с помощью компьютерного поиска. И основным методом генерации матрицы контроля четности (или факторного графа) кода LDPC также является процесс автоматизированного конструирования, такой как алгоритм прогрессивного роста (PEG). Одним словом, построение полярных кодов является более простым и простым, чем другие коды.

Теоретически все три кода имеют одинаковую асимптотическую производительность, когда длина кода имеет тенденцию быть бесконечной. Доказано, что полярные коды, основанные на декодировании SC, достигают пропускной способности симметричного B-DMC, потому что конструкция кода соответствует совместному свойству AEP. Напротив, коды Turbo / LDPC, основанные на декодировании BCJR / BP, показывают тенденцию приближения к пропускной способности посредством компьютерного моделирования, а не теоретического доказательства. Таким образом, полярные коды имеют теоретическое преимущество перед двумя другими кодами.

Тем не менее, для конечной длины кода все три кода могут быть равномерно представлены с помощью связанного факторного графа и выполнять аналогичные алгоритмы передачи сообщений на графе. Для итеративного декодирования турбокодов каждый компонентный декодер выполняет алгоритм BCJR и обменивается внешней информацией через промежу-

точный / обратный перемежитель. Для кодов LDPC алгоритм BP работает на графе факторов, и между переменным и контрольными узлами передаются мягкие сообщения. После многих итераций оба декодера могут хорошо работать и приближаться к производительности ML-декодирования. Тем не менее, для полярных кодов производительность алгоритма BP ограничена короткими петлями графа коэффициентов и уступает таковым при ML-декодировании. Поэтому некоторые улучшения SC в дереве кодов являются лучшим выбором для полярных кодов, таких как SCL / SCS / CA-SCL / CA-SCS и так далее.

Все схемы кодирования имеют длину кода и скорость кода и передаются по двоичным входным каналам AWGN. Кроме того, 24 бита четности CRC прикреплены к каждому входному блоку кодеров. Для турбокодов две схемы кодирования соответственно называются стандартами WCDMA и LTE, и применяется алгоритм декодирования Log-MAP (декодирование BCJR в логарифмической области) с максимумом восемью итерациями. Аналогично, коды LDPC строятся в соответствии со стандартом WiMax, и используется стандартный алгоритм BP с максимумом 200 итераций.

Недостатки полярных кодов. Конечно, у полярных кодов есть несколько недостатков. Напомним, что для выбора канала полярных кодов надежность канала должна рассчитываться в соответствии с конкретным типом канала или состоянием канала. Следовательно, построение кода зависит от канала, хотя структура кодера является универсальной. Например, учитывая канал AWGN с двоичным входом, каналы, выбранные для переноса информационных битов, должны быть оптимизированы по точкам в заданном диапазоне SNR для достижения оптимальной производительности при каждом SNR. Но это не серьезная проблема на практике. Поскольку характеристики ошибок полярных кодов не чувствительны при незначительном изменении набора информационных каналов, мы можем оптимизировать выбор канала при фиксированном SNR. Таким образом, набор каналов является единообразным в широком диапазоне SNR, но при этом производительность может быть немного снижена.

Поскольку SC и его алгоритмы улучшения выполняются в порядке поэтапного декодирования в кодовом дереве, эти декодеры по существу обладают последовательной архитектурой. Из-за этого структурного ограничения дизайн декодера с высокой пропускной способностью стал проблемой на данный момент, что является основным недостатком полярных кодов на практике.

В этой статье рассматриваются основные концепции полярного кодирования, которые включают поляризацию канала, схему кодирования, методы построения и различные алгоритмы декодирования, такие как ML, BP, SC и улучшенные версии SC. Теория кодирования и методология проектирования полярных кодов были в значительной степени установлены, в то время как полярные коды при декодировании с помощью CRC могут значительно превзойти коды Turbo / LDPC. Хотя остаются некоторые открытые вопросы, считается, что полярное кодирование будет конкурентоспособным решением канального кодирования в будущих системах связи.

Заключение. У кодирования сетей 5G по принципу Polar code есть ряд преимуществ. В-первых, технология минимум в 3 раза повышает

частотный спектр высокоскоростной сети по сравнению с используемыми сегодня стандартами RAN. Во-вторых, полярные коды интересны операторам с точки зрения экономического эффекта. Решение способно проводить декодирование линейной сложности, что позволяет сократить до минимума стоимость внедрения запуска сетей 5G в будущем.

Интерес разработчиков к субквадратичному кодированию объясняется также тем, что его характеристики способны приблизить скорость передачи данных к предельным значениям, т. е. к пределу Шэннона. Также при декодировании при помощи простого поляризованного канала с последовательным подавлением помех она обеспечивает результат, аналогичный тому, что достигается при декодировании по методу максимального правдоподобия, но сложность применения полярных кодов существенно меньше.

Учитывая выше сказанное, можно заключить, что технология Polar code имеет весомые конкурентные преимущества по сравнению с другими вариантами кодирования канала 5G, что значительно ускоряет процесс стандартизации и развертывания сетей для коммерческой эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арикан Э. Поляризация каналов: метод построения кодов, обеспечивающих пропускную способность, для симметричных каналов без памяти с двоичным входом // IEEE Trans. Информация. Теория. – том. 55, 7 июля 2009 г. – С. 3051-73.
2. Арикан Э. Систематическое полярное кодирование // IEEE Commun. Lett. – Vol. 15, 8 августа 2011 г. – С. 860-62.
3. Мори Р., Танака Т. Представление полярных кодов при построении с использованием эволюции плотности // IEEE Commun. Lett. – Vol. 13, 7 июля 2009 г. – С. 519-21.
4. Нуу К., Чен К. Декодирование с помощью CRC полярных кодов // IEEE Commun. Lett., Vol. 16, 10 октября 2012 г. – С. 1668-71.
5. Ричардсон Т., Урбанке Р. Современная теория кодирования, издательство Кембриджского университета, 2008.
6. Таль И., Варди А. Как построить полярные коды // IEEE Trans. Информация. Теория. – том. 59, 10 октября 2013 г. – С. 6562-82.
7. Таль И., Варди А. Список декодирования полярных кодов // IEEE Int'l. Symp. Информация. Теория (ISIT), 2011. – С. 1-5.
8. Трифонов П. Эффективное проектирование и декодирование полярных кодов // IEEE Trans. Commun. – Vol. 60, 11 ноября 2012 г. – С. 3221-27.
9. Чен К., Нуу К., Лин Дж. Улучшенное последовательное декодирование полярных кодов // IEEE Trans. Comm. – Vol. 61, 8 августа 2013 г. – С. 3100-07.
10. Язди А.А., Кишишанг Ф.Р. Упрощенный последовательный декодер отмены для полярных кодов // IEEE Commun. Lett. – Vol. 15, 12 декабря 2011 г. – С. 1378-80.

POLAR CODING IN INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES AND COMMUNICATIONS SYSTEMS

KRUTOV Alexander Viktorovich

student

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Polar codes are an emerging class of error correction codes capable of approaching the capacity of a discrete memoryless channel. This overview article aims to illustrate the principles, methods of generation and decoding. Unlike the traditional approach-throughput coding strategy, which tries to make the codes as random as possible, polar codes follow a different philosophy, also created by Shannon, by co-creating a typical set.

Key words: polar codes, coding, turbo code, linear code, cryptography.
