

88. КОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В 5G

Мелеховец Д. М., Хорольский Н. В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Русина Н. В. – ст. преп. каф. ЭИ

В работе исследуется роль теории кодирования в развитии стандарта связи пятого поколения (5G). Рассматриваются ключевые типы кодов: низкоплотностные коды с проверкой на чётность (LDPC) и полярные коды, принятые в 5G New Radio (NR). Анализируются их преимущества перед турбо-кодами 4G, включая эффективность декодирования, адаптацию к различным сценариям передачи и минимизацию задержек. Приведены примеры применения кодов в каналах данных и управления, а также их влияние на обеспечение требований 5G: высокой скорости, надёжности и масштабируемости.

Современные системы связи, такие как 5G, предъявляют требования к пропускной способности, задержкам (менее 1 мс) и плотности подключений (до 1 млн устройств на км²). Теория кодирования, обеспечивающая коррекцию ошибок и оптимизацию передачи данных, стала основой для реализации этих задач [3]. В 5G произошёл переход от турбо-кодов (4G) к LDPC и полярным кодам, что позволило улучшить производительность и адаптивность. Цель научной работы: исследовать эволюции кодирования в 5G, его теоретические основы и практические применения.

Коды исправления ошибок делятся на два класса [3]:

1) Блочные коды (например, LDPC): данные разбиваются на блоки, к которым добавляется избыточность.

2) Свёрточные коды: избыточность вводится через линейные комбинации битов.

Параметры эффективности кодов:

1. Пропускная способность (близость к пределу Шеннона).

2. Сложность кодирования/декодирования.

3. Задержки и энергопотребление.

Коды, используемые в 5G:

1) Низкоплотностные коды (LDPC). Они представляют собой разреженную матрицу проверки на чётность, что делает декодирование более простым [4]. Эти коды применяются в 5G в виде каналов данных (eMBB – Enhanced Mobile Broadband). Преимущества: высокая параллелизация декодирования (алгоритм Belief Propagation) [4], эффективность для больших блоков данных (до 10 Гбит/с) [2], низкая вероятность ошибки (BLER < 10⁻⁵) [4].

2) Полярные коды. Поляризация каналов – часть каналов становится идеальной, часть – зашумлённой [1]. Эти коды применяются в 5G в виде каналов управления (URLLC – Ultra-Reliable Low-Latency Communications, mMTC – Massive Machine-Type Communications) [2]. Преимущества: достижение предела Шеннона для двоичных симметричных каналов [1], гибкость для коротких пакетов (актуально для IoT) [2], алгоритмы декодирования (SC, SCL) с балансом сложности и точности [1].

Практическими аспектами реализации в 5G NR являются:

1. LDPC для данных пользователя (длины блоков: 256-8448 бит) [2].

LDPC (Low-Density Parity-check) — это линейные коды с малой плотностью проверок на чётность, обеспечивающие высокую эффективность декодирования и близкую к пропускной способности канала производительность. В 5G NR LDPC-коды используются для кодирования пользовательских данных в канале передачи данных (например, PDSCH, PUSCH). Они заменили турбо-коды, применявшиеся в 4G LTE, благодаря лучшей масштабируемости для больших блоков данных (до 8448 бит), низкой задержке декодирования (важно для URLLC — Ultra-Reliable Low-Latency Communications), энергоэффективности при аппаратной реализации [5].

2. Полярные коды для широкополосных каналов (PBCH) и DCI [2].

Полярные коды — это класс линейных блочных кодов, теоретически достигающих пропускной способности канала при больших длинах блоков. Они основаны на явлении "поляризации" битов канала. PBCH (Physical Broadcast Channel) используются для передачи системной информации

базовой станции. DCI (Downlink Control Information) применяются для кодирования управляющих сообщений. Главными преимуществами полярных кодов является то, что они оптимальны для малых длин блоков (например, DCI обычно имеет длину 20–200 бит) и имеют низкую сложность декодирования (алгоритм Successive Cancellation)[6].

3. Адаптивное кодирование: перестройка параметров к условиям канала (например, CQI – Channel Quality Indicator) [4].

Адаптивное кодирование и модуляция (AMC — Adaptive Modulation and Coding) позволяет динамически изменять параметры передачи на основе:

- CQI (Channel Quality Indicator): Показатель качества канала, который UE (пользовательское устройство) отправляет базовой станции.

- Других метрик: SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), уровень ошибок (BLER).

Настраиваемыми параметрами является скорость кодирования (Code Rate) и схема модуляции (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM).

При высоком CQI (хорошее качество канала) используется 256-QAM и высокая скорость кодирования для увеличения пропускной способности. При низком CQI — QPSK и низкая скорость для повышения надёжности [7].

Рассмотрим проблемы и перспективы кодов в 5G.

Проблемы:

1. Декодирование полярных кодов для длинных блоков (рост сложности) [1].
2. Совместимость с Massive MIMO и миллиметровыми волнами [4].

Перспективы:

1. Коды для квантовой связи (LDPC в квантовых повторителях) [4].
2. ИИ-оптимизированные алгоритмы декодирования [3].

Таким образом, переход на LDPC и полярные коды в 5G стал революционным шагом, позволившим достичь целевых показателей скорости, задержек и надёжности [1, 2, 4]. Теория кодирования продолжает развиваться, открывая возможности для 6G, квантовых коммуникаций и энергосетей IoT.

Список использованных источников:

1. Arikan, E. (2009). Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes. **IEEE Transactions on Information Theory**.
2. 3GPP TS 38.212. NR; Multiplexing and channel coding.
3. Richardson, T. (2008). *Modern Coding Theory*. Cambridge University Press.
4. Samsung. (2019). LDPC Codes for 5G New Radio. *Whitepaper*.
5. 3GPP TS 38.212 (Specification for 5G NR channel coding), исследования компании Qualcomm и Ericsson по LDPC в 5G.
6. Работы Эрдала Арыкана (создателя полярных кодов), стандарт 3GPP TS 38.212.
7. Исследования 3GPP TR 38.814 (Study on NR), материалы IEEE по адаптивным алгоритмам в 5G.