УДК 621.341

ТУРБОКОДЫ: ПРИНЦИПЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

TURBO CODES: PRINCIPLES, PERFORMANCE, AND APPLICATIONS IN MODERN COMMUNICATION SYSTEMS

Е. А. ЧИСТЯКОВ, Г. В. СУХОВЕРХОВ
РТУ МИРЭА, Москва, Россия
E. A. Chistyakov, G. V. Sukhoverkhov
RTU MIREA, Moscow, Russia

Аннотация. Рассматриваются турбокоды – революционный класс помехоустойчивых кодов, предложенный в 1993 г. и впервые позволивший на практике близко подойти к пределу Шеннона. Подробно излагаются принципы их построения, основанные на параллельном соединении рекурсивных систематических сверточных кодеров с перемежением, и ключевые алгоритмы итеративного декодирования (MAP, Log-MAP, Max-Log-MAP). Описывается механизм работы турбодекодера, включая вычисление прямых, обратных и переходных метрик, а также логарифмического отношения правдоподобий. Особое внимание уделено практическим аспектам применения турбокодов в современных системах связи, включая стандарты сотовой связи (3G/4G), и, что наиболее важно, в системах дальней космической связи (миссии *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Curiosity*), где их энергетическая эффективность имеет критическое значение. Проведено сравнение турбокодов с другими передовыми кодами (коды с малой плотностью проверок, полярные коды), выделены их сильные и слабые стороны. Отмечается, что несмотря на активное вытеснение турбокодов кодами с малой плотностью проверок, в новых стандартах и космических миссиях благодаря лучшей параллелизуемости и масштабируемости они сохраняют свою актуальность в энергоограниченных системах и устоявшихся проектах, оставаясь важным этапом в развитии теории помехоустойчивого кодирования.
Ключевые слова: турбокоды, итеративное декодирование, рекурсивные систематические сверточные коды, MAP-декодирование, метод максимума апостериорной вероятности.
Для цитирования: Чистяков Е. А., Суховерхов Г. В. Турбокоды: принципы, эффективность и применение в современных системах связи // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 210. № 1. С. 49–56.

Annotation. Turbo codes are considered – a revolutionary class of error-correcting codes proposed in 1993 that, for the first time in practice, enabled performance approaching the Shannon limit. The principles of their construction are presented in detail, based on the parallel concatenation of recursive systematic convolutional encoders with interleaving, along with the key iterative decoding algorithms (MAP, Log-MAP, Max-Log-MAP). The operating mechanism of the turbo decoder is described, including the computation of forward, backward, and branch metrics, as well as log-likelihood ratios. Particular attention is given to practical aspects of turbo code deployment in modern communication systems, including cellular communication standards (3G/4G) and, most importantly, deep-space communication systems (e.g., Mars Reconnaissance Orbiter and Curiosity missions), where their energy efficiency is of critical importance. A comparison with other advanced coding techniques (low-density parity-check codes and polar codes) is conducted, highlighting their respective strengths and weaknesses. It is noted that despite the on going replacement of turbo codes by LDPC codes in newer standards, their strong parallelization potential and scalability allow them to remain relevant in energy-constrained systems and legacy projects, representing an important milestone in the evolution of channel coding theory.
Key words: turbo codes, iterative decoding, recursive systematic convolutional codes, MAP decoding, maximum a posteriori probability method.
For citation: Chistyakov E. A., Sukhoverkhov G. V. Turbo Codes: Principles, Performance, and Applications in Modern Communication Systems // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2026. Vol. 210. № 1. Pp. 49–56.

1. Введение

Современные системы связи предъявляют высокие требования к надежности передачи информации, особенно в условиях ограниченных ресурсов, воздействия помех и больших расстояний. От наземных сотовых сетей до межпланетных коммуникаций – устойчивость к ошибкам является критически важным аспектом [1, 2, 3, 4]. Основу устойчивой передачи данных составляют помехоустойчивые (*error-correcting*) коды, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие в канале связи.

Одним из наиболее значимых достижений в этой области стало внедрение турбокодов (*Turbo Codes*) – класса итеративных помехоустойчивых кодов, близко подходящих к пределу Шеннона (*Shannon Limit*), то есть к теоретически возможной нижней границе отношения сигнал/шум (*signal-to-noise ratio* – SNR) для заданной скорости передачи. Эти коды были предложены в 1993 г. французскими учеными Клодом Бериу и Аленом Главье, став прорывом в цифровой обработке сигналов [1].

Турбокоды нашли широкое применение как в наземных телекоммуникациях (например, в стандартах 3G/4G), так и в космической связи [3, 4], где условия крайне неблагоприятны: расстояния огромны, сигналы ослаблены, а задержки критичны [5]. Особое внимание заслуживают миссии по исследованию Марса, в которых надежность передачи научных данных имеет первостепенное значение. Именно в этих условиях турбокоды обеспечивают оптимальный баланс между сложностью декодирования и достижением высокой корректирующей способности.

Цель данной работы – рассмотреть принципы турбокодирования, алгоритмы декодирования, их теоретическую эффективность, а также особенности применения в современных системах связи, включая космические миссии.

2. Обзор классов помехоустойчивых кодов

Исторически развитие помехоустойчивых кодов шло от простых блочных схем к сложным графовым и итеративным структурам [1, 2, 6]. Наиболее распространенные классы кодов:

- Блочные коды (*Block Codes*) (рис. 1) – информация кодируется блоками фиксированной длины. Примеры: коды Хэмминга, Рида – Соломона. Эти коды эффективны при малых уровнях ошибок, но ограничены по корректирующей способности.
- Сверточные коды (*Convolutional Codes*) (рис. 2) – выход зависит не только от текущего входа, но и от предыдущих. Используются, например, в ранних спутниковых системах. Поддаются декодированию с помощью алгоритма Витерби (*Viterbi Algorithm*).
- Турбокоды (*Turbo Codes*) (рис. 3) – итеративные коды, сочетающие два или более кодера с использованием перемежения (*interleaving*) на их входе. Стали первым классом, приближающимся к пределу Шеннона [2, 7].
- Коды с малой плотностью проверок (*Low-Density Parity-Check* – LDPC) – графовые коды, предложенные еще в 1962 г. Р. Галлагером, но получившие популярность в 2000-х гг. благодаря улучшению вычислительных возможностей [6].
- Полярные коды (*Polar Codes*) предложены Э. Ариканом в 2008 г. и основаны на явлении поляризации каналов, позволяющем доказательно достигать пропускной способности симметричных каналов [8]. Это первые коды, которые доказанно достигают предела Шеннона при бесконечной длине блока и достаточно простом декодировании (*Successive Cancellation* – SC).

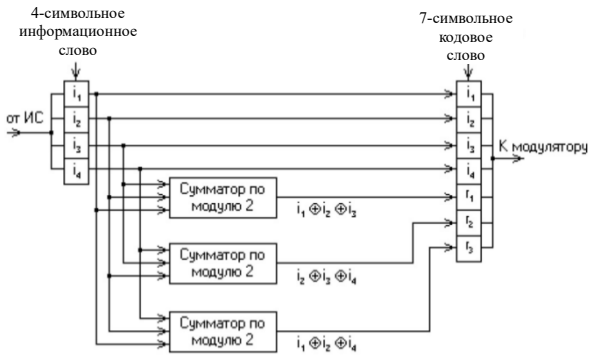

Рис. 1. Пример блочного кодера Хэмминга (7, 4)

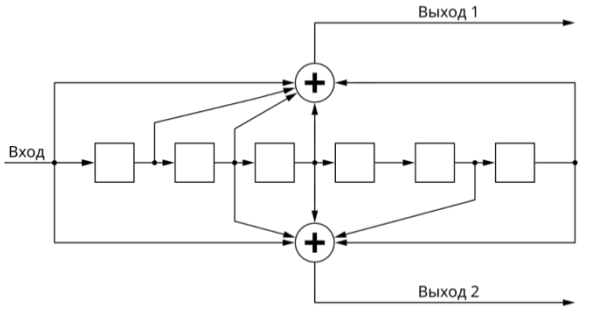

Рис. 2. Пример сверточного кодера

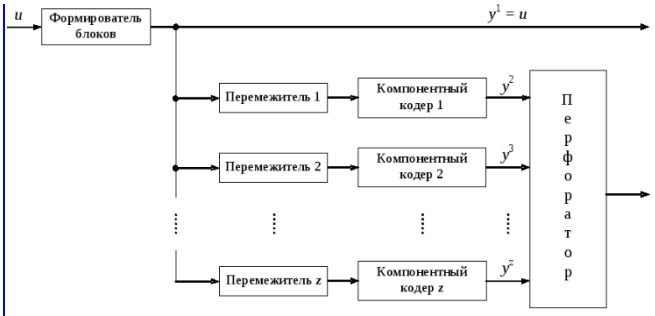

Рис. 3. Пример стандартной структуры турбокодера

3. Предел Шеннона

В 1948 г. Клод Шеннон сформулировал основополагающий принцип теории информации: существует предел (*Shannon Limit*), ниже которого надежная передача информации по шумному каналу невозможна.

Этот предел выражается через емкость канала (*Channel Capacity*) [9]:

$$C = B\log_2(1 + \mathrm{SNR}),$$

где C – пропускная способность; B – ширина полосы; SNR – отношение сигнал/шум.

Для бинарного симметричного канала с шумом (например, *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) – аддитивный белый гауссов шум) предел Шеннона определяет минимально возможное отношение энергии на бит к спектральной плотности шума E_b/N_0, при котором возможна надежная передача данных с заданной скоростью. Этот предел составляет примерно 0,19 дБ для $R = 1/2$.

4. Турбокоды: принципы и типы

Классическая архитектура турбокодов основана на параллельной комбинации двух или более рекурсивных систематических сверточных кодеров (*Recursive Systematic Convolutional* – RSC), к входным

данным которых применяется перемежение (*interleaving*) – перестановка битов входной последовательности с целью декоррелировать ошибки [1, 7, 10]. Эта схема позволяет создать итеровативную структуру декодирования, в которой два декодера последовательно обмениваются апостериорными вероятностями, уточняя оценку переданной информации. Важно отметить, первоначальные данные и оценка переданной информации являются мягким решением (то есть значения теоретически могут находиться в пределах $-\infty < x < \infty$, где x – любое действительное число, но на практике значения ограничены параметрами входного тракта и свойствами системы и редко превышают по модулю одноразрядные целые значения, что будет более подробно рассмотрено в пункте 5.3), которое используется как априорная вероятность внутри каждого отдельного RSC-декодера.

Основные разновидности турбокодов:

1. Параллельные турбокоды (*Parallel Concatenated Convolutional Codes* – PCCC) – наиболее распространенный тип, реализованный в 3G и стандартах CCSDS для космоса.

2. Серийные турбокоды (*Serial Concatenated Convolutional Codes* – SCCC) – отличаются последовательным применением кодеров и позволяют достичь лучшей устойчивости на больших кодовых расстояниях.

3. Блочные турбокоды (*Block Turbo Codes* – BTC) – применяются вместо сверточных кодеров блочные (например, Рида – Соломона), используются в некоторых оптических системах.

4. Гибридные турбокоды – совмещают структуру турбокодов с LDPC или полярными кодами, используются в новых протоколах (например, в системах 6G или глубокого космоса).

5. Алгоритмы декодирования турбокодов.

Основой высокой эффективности турбокодов является итеративное декодирование – процедура, при которой декодеры обмениваются вероятностной информацией о переданных битах, постепенно уточняя решения [2, 7, 11]. Такой подход позволил впервые приблизиться к теоретическому пределу надежной передачи информации.

5. Декодирование турбокодов

5.1. Декодер MAP. Декодирование турбокодов базируется на алгоритме MAP (*Maximum A Posteriori Probability*) и его упрощенных версиях: Log-MAP и Max-Log-MAP, которые обеспечивают баланс между точностью и вычислительной сложностью [7, 10, 11] (рис. 4).

Рис. 4. Схема работы турбодекодера

Базовый алгоритм – MAP, или алгоритм максимального апостериорного правдоподобия. Он вычисляет для каждого переданного бита вероятность его значения с учетом всех доступных наблюдений. Это обеспечивает наилучшее декодирование в смысле минимизации вероятности битовой ошибки.

Алгоритм MAP работает следующим образом:

1. Задается априорное распределение для параметров $P(\theta)$. Оно отражает предварительные знания или убеждения относительно параметров до учета наблюдаемых данных.

2. Используется функция правдоподобия, которая показывает вероятность наблюдать данные y при заданных параметрах θ:

$$L(\theta|y) = P(y|\theta).$$

3. Вычисляется апостериорное распределение на основе теоремы Байеса:

$$P(\theta|y) = \frac{P(y|\theta)P(\theta)}{P(y)}.$$

4. MAP-оценка параметра находится путем максимизации апостериорного распределения (отметим, что максимизация не означает просто нахождения максимального значения, а применение комплекса действия для того, чтобы приблизить значение к его теоретическому максимуму):

$$\hat{\theta}_{\text{MAP}} = \arg\left\{\max_{\theta} P(\theta|y)\right\}.$$

Однако MAP-алгоритм требует больших вычислительных затрат. Для снижения сложности применяются логарифмические версии.

• Log-MAP – выполняет декодирование в логарифмическом домене, упрощая вычисления с экспонентами и произведениями. Для вычисления суммы экспонент применяется следующая операция:

$$\log(e^a + e^b) = \max(a, b) + \log(1+e^{-|a-b|}).$$

• Max-Log-MAP – еще более упрощенная версия, приближенно заменяющая логарифмическую сумму максимумом:

$$\log(e^a + e^b) \approx \max(a, b).$$

Прямой обратный проход (Forward-Backward Recursion). Когда мы принимаем последовательность символов $y = (y_1, y_2, \ldots, y_N)$, нам нужно найти вероятность того, что в момент времени k был передан определенный бит u_k. Эта вероятность должна учитывать всю информацию:

- то, что было получено до момента k;
- и то, что будет получено после момента k.

Таким образом, приходим к тому, что MAP-декодирование основывается на трех типах метрик:

1. Прямая метрика (α-метрика): смысл в накоплении всей информации о том, как система могла прийти в текущее состояние из начального:

$$\alpha_k(s) = \sum_{s'} \alpha_{k-1}(s')\gamma_k(s', s),$$

где $\alpha_k(s)$ – вероятность находиться в состоянии s в момент времени k, учитывая все предыдущие наблюдения $y_1, y_2, \ldots, y_k$.

Таким образом, прямой проход отвечает за историю (прошлое) системы.

2. Обратная метрика (β-метрика): смысл в том, чтобы учесть информацию о том, какие сигналы будут приходить в будущем:

$$\beta_k(s) = \sum_{s'} \beta_{k-1}(s')\gamma_{k+1}(s', s),$$

где $\beta_k(s)$ – вероятность того, что система перейдет в конечное состояние, начиная с момента k, учитывая все будущие наблюдения $y_{k+1}, y_{k+2}, \ldots, y_N$.

Таким образом, обратный проход отвечает за предсказание (будущее) системы.

3. Переходная метрика (γ-метрика): описывает вероятность перехода кодера из состояния s' в состояние s в момент времени k, если на вход подан бит u_k, а на выходе наблюдается символ y_k:

$$\gamma_k(s', s) = P(y_k|u_k, s', s)\, P(u_k),$$

где $P(u_k)$ – априорная вероятность информационного бита (например, при первичном приеме последовательности, когда декодер только начал свою работу и если нет других данных о вероятностях биты принимаются равновероятными: $P(u_k = 0) = P(u_k = 1) = 0{,}5$), а $P(y_k|u_k, s', s)$ – вероятность того, что канал выдаст наблюдение y_k, если переход действительно произошел.

Таким образом, если α отвечает за историю, а β за будущее, то γ – это локальное звено, связывающее прошлое, настоящее и будущее.

Без γ-метрики α и β существовали бы сами по себе и не имели бы связи с реальными переходами и наблюдениями.

5.2. Вычисление апостериорного отношения правдоподобия. После нахождения всех метрик вычисляется логарифмическое отношение апостериорных вероятностей (*Log-Likelihood Ratio* – LLR) для каждого переданного бита u_k [2, 7, 10, 11]:

$$L(u_k) = \log \frac{P(u_k = 1|y)}{P(u_k = 0|y)}.$$

Это выражение можно разложить через α-, β- и γ-метрики:

$$L(u_k) = \log \frac{\sum_{(s',s):u_k=1} \alpha_{k-1}(s')\gamma_k(s', s)\beta_k(s)}{\sum_{(s',s):u_k=0} \alpha_{k-1}(s')\gamma_k(s', s)\beta_k(s)}.$$

Таким образом, α-, β- и γ-метрики позволяют эффективно реализовать прямой и обратный проходы и вычислить апостериорные вероятности даже при низком SNR, что делает MAP и его приближения (Log-MAP, Max-Log-MAP) ключевыми алгоритмами в турбодекодировании.

5.3. Теоретический диапазон входных данных. На вход турбодекодера подаются мягкие решения (*soft decisions*), чаще всего в виде LLR, описание которого есть выше в пункте 5.2, за исключением того, что обычно для передачи турбокодов используется BPSK (*Binary Phase Shift Keying* – двухфазная манипуляция или двоичная фазовая манипуляция с диапазоном значений от –1 до 1), поэтому передаваемый 0 во всех формулах заменяется на –1. Таким образом, LLR можно записать как:

$$L(u_k) = \log \frac{P(u_k = 1|y)}{P(u_k = -1|y)}.$$

Так как $P(u_k = \pm 1|y)$ могут быть сколь угодно малыми, то формально:

$$L(u_k) \in (-\infty, +\infty).$$

То есть в теории диапазон бесконечный.

Практическое ограничение диапазона. В реальных системах связи мы никогда не имеем бесконечно больших или малых вероятностей, потому что сигнал всегда имеет конечный SNR (отношение сигнал/шум), а также вычислительная техника работает с ограниченной разрядностью.

Поэтому LLR-значения нормируются и квантируются в конечный диапазон.

Например, в аппаратных турбодекодерах часто используют фиксированную арифметику, где LLR представляются целыми числами с ограниченной

разрядностью, для экономии ресурсов это может быть 6 – 8 бит, иногда достаточно даже 4 бит (от –8 до +7) и при этом производительность системы почти не ухудшается.

Столь малого диапазона хватает, потому что при очень большом по модулю LLR (например, $|L(u_k)| > 10$) апостериорная вероятность становится практически 0 или 1:

$$L = +10 \Rightarrow P\left(u_k = 1 \middle| y\right) \approx 0{,}99995,$$
$$P\left(u_k = 0 \middle| y\right) \approx 0{,}00005.$$

То есть «более уверенные» значения ничего не меняют – они все равно будут интерпретированы как «почти точно 0» или «почти точно 1», поэтому практический диапазон LLR ограничивают малыми числами, и все, что больше порога, срезается (*clipping*).

Так же если используется 1 бит для квантования (например, {−1,+1}), то это уже не мягкое решение, а по сути жесткое решение и весь смысл кодирования теряется, поэтому в аппаратных турбодекодерах обычно применяют хотя бы 4 – 6 бит, что позволяет сохранить «степень уверенности» приемника.

5.4. Итеративная структура. Два RSC-декодера в турбокодовой схеме обмениваются логарифмическими отношениями апостериорных вероятностей (*Log-Likelihood Ratios* – LLR). Перемежитель и деперемежитель обеспечивают независимость ошибок между декодерами (рис. 5).

Декодирование завершается при достижении максимального числа итераций или при удовлетворении условия сходимости (например, отсутствия изменений в оценке последовательности или достижения определенного предела значения оценок).

6. Турбокоды и приближение к пределу Шеннона

Турбокоды стали первым классом кодов, демонстрирующим практическое приближение к пределу Шеннона. Уже при умеренных длинах (около 1000 бит) они достигают уровня ошибок менее 10^{-5} при SNR, отличающемся от теоретического предела менее чем на 1 дБ [1, 2, 5, 7]. Это стало возможным благодаря итеративному декодированию, использованию априорной информации и структуре, обеспечивающей большое кодовое расстояние.

Особенно важно это для систем с жесткими энергетическими ограничениями, как в глубокой космической связи, где минимизация E_b/N_0 имеет решающее значение.

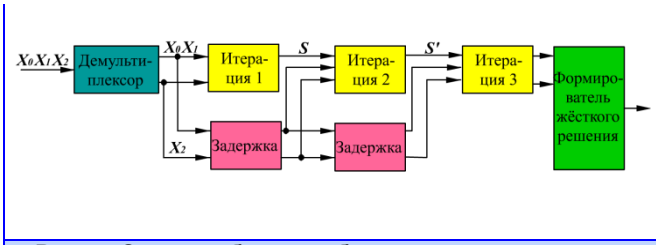

Рис. 5. Схема работы турбодекодера с примером на три итерации

7. Применение турбокодов в современных системах связи

Турбокодирование стало поворотным моментом в эволюции систем передачи данных, особенно в условиях, когда традиционные корректирующие коды не позволяли достичь приемлемого уровня надежности. Благодаря своей близости к пределу Шеннона, турбокоды находят широкое применение как в наземных, так и в космических системах связи [3, 4, 5].

Наземные системы связи. В современных коммерческих и военных телекоммуникациях турбокоды применяются как основа канального кодирования для высоконагруженных и чувствительных к ошибкам каналов. Примеры включают:

- 3G и 4G (UMTS, LTE): в стандарте 3GPP турбокоды используются для защиты управляющей информации и некоторых видов пользовательского трафика. Их гибкость и высокая корректирующая способность позволяют динамически адаптировать параметры кодирования к текущим условиям радиоканала.
- WiMAX (IEEE 802.16): использует турбокодирование для передачи данных в условиях городской многолучевой среды.
- Военные радиосистемы: многие системы с защищенным каналом связи, особенно в тактических сетях, применяют турбокоды для обеспечения надежности в условиях интенсивных помех и преднамеренных воздействий.

Эти применения подтверждают универсальность турбокодов и их способность обеспечивать высокое качество связи при ограниченных ресурсах.

Турбокоды в космической связи. В космических каналах передача данных сопровождается экстремально низким уровнем сигнала и высокой задержкой. Энергетическая эффективность становится критически важной [3, 4, 5]. В этих условиях турбокоды показали выдающиеся результаты.

- Спутниковая связь (например, спутники *Earth Observation* и GNSS): турбокоды применяются в каналах нисходящей и восходящей линии для защиты телеметрических и командных данных.
- Глубокая космическая связь: в рекомендациях CCSDS (*Consultative Committee for Space Data*

Systems), турбокоды стандартизованы для передачи научной информации с межпланетных миссий [3, 4, 5]. Например:

- Миссия *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO): использует турбокоды для передачи данных на Землю с высокой скоростью при минимальном уровне энергии.
- Миссия *Mars Science Laboratory* (*Curiosity*): данные научных приборов проходят через каскад турбокодирования и модуляции перед отправкой на Землю.

• Модули и ретрансляторы орбитальных аппаратов (например, MAVEN, *ExoMars*): применяют турбокоды совместно с модуляцией BPSK или QPSK и адаптивной системой управления мощностью.

Использование турбокодов позволяет: передавать данные даже при SNR < 0 дБ, эффективно использовать ограниченную полосу частот, повышать отказоустойчивость к искажениям космического канала (доплеровский сдвиг, фединги (*fading*, замирания), солнечные бури).

8. Сравнение с другими современными кодами

Хотя турбокоды достигли выдающихся результатов, они не являются единственными передовыми кодами, используемыми в современных системах связи. Сравнение с другими типами кодов позволяет оценить области, где турбокоды оптимальны и где уступают другим решениям [6].

LDPC-коды с малой плотностью проверок на четность. LDPC-коды стали прямыми конкурентами турбокодов благодаря следующим преимуществам:

1. Высокая параллелизация декодирования, позволяющая реализовывать их в высокоскоростных аппаратных системах.
2. Более низкая вероятность ошибки при низкой BER.
3. Широкое применение в 5G, Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), спутниковых системах (DVB-S2/S2X).

В космической связи LDPC уже заменяют турбокоды в новых версиях стандарта CCSDS [6], особенно при больших объемах данных (например, передача видео и спектральных карт).

Полярные коды (*Polar Codes*). Полярные коды являются первым классом кодов, доказавшим достижимость предела Шеннона для симметричных каналов. Их особенности:

1. Применяются в 5G NR (*New Radio*), особенно для управления ресурсами в соответствии со спецификацией физического уровня 5G NR [6, 12].
2. Имеют малую сложность при короткой длине кодов.
3. Хорошо подходят для низкой задержки и малых пакетов данных.

Тем не менее, полярные коды менее эффективны при больших кодовых длинах и не вытеснили турбокоды из систем, требующих высокой надежности при длинных сообщениях.

Сравнительный анализ. Турбокоды, LDPC и полярные коды обладают своими преимуществами и ограничениями, и выбор конкретного метода кодирования зависит от условий передачи и требований к системе.

Турбокоды исторически показали себя как один из первых классов кодов, приближающихся к пределу Шеннона. Они особенно эффективны при использовании длинных кодовых слов, где вероятность ошибки снижается до очень малых значений. Однако при коротких блоках их эффективность заметно падает, и в таких условиях они демонстрируют лишь средний уровень по сравнению с другими современными схемами. Несмотря на это, турбокоды до сих пор применяются в космической связи, где высокая помехоустойчивость при длинных пакетах данных остается ключевым требованием.

LDPC-коды отличаются высокой гибкостью и возможностью эффективной параллельной реализации декодера, что делает их привлекательными для современных систем связи. При длинных кодовых словах они обеспечивают очень высокую эффективность, сопоставимую и зачастую превосходящую турбокоды. На коротких блоках они сохраняют хорошие характеристики, хотя в этих условиях могут уступать полярным кодам. Сегодня LDPC являются основным выбором в стандартах пятого и шестого поколений (5G/6G) для каналов передачи больших объемов данных.

Полярные коды теоретически способны достигать предела Шеннона при бесконечной длине кодовых слов. На практике же их сильная сторона проявляется именно при коротких и средних блоках, где они зачастую превосходят LDPC и турбокоды по эффективности. По этой причине в стандартах 5G и будущих 6G полярные коды применяются для кодирования управляющей информации, где требуется высокая надежность при относительно малых размерах сообщений. Их перспективность в области космической связи также активно исследуется, хотя пока они не получили такого же широкого практического распространения, как турбокоды или LDPC.

Таким образом, турбокоды остаются актуальными и эффективными для энергетически ограниченных систем, особенно в глубокой космической связи, тогда как LDPC и полярные коды находят применение в новых коммерческих стандартах и системах с высокой пропускной способностью.

9. Эволюция и замещение турбокодов: тренды и перспективы

Несмотря на выдающиеся характеристики турбокодов, последние десятилетия ознаменовались активной интеграцией новых классов кодов, в первую очередь LDPC и полярных, особенно в системах с высокой скоростью передачи и параллельной обработкой.

Причины замены турбокодов. Выше было описано много фактов, давайте структурируем их для более четкого понимания:

1. Аппаратная реализация: LDPC-коды позволяют лучше распараллеливать декодирование, тогда как турбодекодеры требуют последовательной итеративной обработки (особенно при использовании алгоритма декодирования по методу максимума апостериорной вероятности *(Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv* – BCJR).

2. Масштабируемость: при увеличении пропускной способности системы LDPC показывают меньшие задержки.

3. Поддержка новыми стандартами: международные рекомендации (например, CCSDS 131.0-B-3) включают LDPC-коды в качестве основного механизма для новых миссий в глубоком космосе.

Конкретные примеры замещения.

• DVB-S2X (*Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation Extension*) полностью отказался от турбокодов в пользу LDPC для видео и передачи телеметрии.

• Новые миссии НАСА и Европейского космического агентства с участием ретрансляторов (например, *Lagrange*, JUICE, *Artemis*) используют LDPC-коды с длинами вплоть до 65536 бит.

• Модернизация DSN (*Deep Space Network*) также базируется на LDPC-кодах с переменной избыточностью и гибкой модуляцией.

Перспективы. Тем не менее, турбокоды продолжают оставаться актуальными в миссиях с ограниченным энергопитанием, низкой скоростью передачи и высокой помехоустойчивостью [6]. Они по-прежнему являются предпочтительным выбором в устоявшихся системах, таких как орбитальные модули *Mars Odyssey* и MAVEN, где замена аппаратуры может быть экономически и технологически неоправданной. Кроме того, турбокоды служат важной базой для научных исследований, направленных на разработку гибридных схем кодирования, таких как *Turbo*-LDPC и *Turbo-Polar*. Таким образом, вместо полного отказа от турбокодов наблюдается постепенный переход к более адаптивным и аппаратно эффективным кодам, при котором турбокоды сохраняются в критичных или уже эксплуатируемых миссиях.

10. Заключение

Турбокодирование сыграло ключевую роль в развитии систем связи, впервые приблизив корректирующие коды к теоретическому пределу Шеннона. Благодаря высокой эффективности и возможности адаптации, турбокоды стали основой надежной передачи данных в сложных каналах – от мобильной связи 3G/4G до глубококосмических миссий на Марс и дальше.

В современных реалиях турбокоды уступают место LDPC и полярным кодам в новых стандартах и миссиях, однако продолжают использоваться в системах с ограниченными ресурсами, где стабильность, проверенность и энергоэффективность играют первостепенную роль.

Анализ текущих и будущих систем связи показывает, что турбокоды остаются актуальны, особенно в космической связи, где каждый бит информации может быть критически важен для успеха миссии.

Список источников

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [Электронный ресурс]. 1993. DOI : 10.1109/ICC.1993.397441 (дата обращения: 10.02.2026).
2. The Turbo Principle: From theory to practice [Электронный ресурс] / P. H. Siegel [и др.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2001. Vol. 19. № 5. Pp. 793–799. DOI : 10.1109/JSAC.2001.924863 (дата обращения: 10.02.2026).
3. CCSDS. TM Synchronization and Channel Coding. CCSDS 131.0-B-3. Recommended Standard [Электронный ресурс]. 2017. 98 p. URL : https://public.ccsds.org/Pubs/131x0b3s.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
4. Deep Space Network: Telemetry Services [Электронный ресурс] / NASA/JPL. 2022. URL : https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/208/208B.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
5. Turbo Codes for Deep-Space Communications [Электронный ресурс] / D. Divsalar [и др.]. URL : https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950015118/downloads/19950015118.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
6. Rice M. A History of Channel Coding in Aeronautical Mobile and Deep-Space Telemetry [Электронный ресурс] // Entropy. 2024. Vol. 26. № 8. Pp. 694. DOI : 10.3390/e26080694 (дата обращения: 10.02.2026).
7. Benedetto S., Montorsi G. Unveiling Turbo Codes: Some results on parallel concatenated coding schemes [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Information Theory. 1996. Vol. 42. № 2. Pp. 409–428. DOI : 10.1109/18.485713 (дата обращения: 10.02.2026).

8. Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Information Theory. 2009. Vol. 55. № 7. Pp. 3051–3073. DOI : 10.1109/TIT.2009.2021379.
9. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication [Электронный ресурс] // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. Pp. 379–423; 623–656. DOI : 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
10. Ryan W. E. A Turbo Code Tutorial [Электронный ресурс]. 2000. 9 p. URL : https://b.goeswhere.com/turbo2ca.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
11. Regalia P. A. Iterative Decoding of Concatenated Codes: A Tutorial [Электронный ресурс]. 2005. № 967375. 13 p. URL : https://asp-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/ASP.2005.762 (дата обращения: 10.02.2026).
12. 3GPP. Multiplexing and Channel Coding (Release 15). TS 36.212 [Электронный ресурс]. URL : https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.212/ (дата обращения: 10.02.2026).

References

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [Electronic resource]. 1993. DOI : 10.1109/ICC.1993.397441 (date of access: 10.02.2026).
2. The Turbo Principle: From Theory to Practice [Electronic resource] / P. H. Siegel [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2001. Vol. 19 (5). Pp. 793–799. DOI : 10.1109/JSAC.2001.924863 (date of access: 10.02.2026).
3. CCSDS. TM Synchronization and Channel Coding. CCSDS 131.0-B-3, Recommended Standard [Electronic resource]. 2017. 98 p. URL : https://public.ccsds.org/Pubs/131x0b3s.pdf (date of access: 10.02.2026).
4. Deep Space Network: Telemetry Services [Electronic resource] / NASA JPL. 2022. URL : https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/208/208B.pdf (date of access: 10.02.2026).
5. Turbo Codes for Deep-Space Communications [Electronic resource] / D. Divsalar [et al.]. URL : https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950015118/downloads/19950015118.pdf (date of access: 10.02.2026).
6. Rice M. A History of Channel Coding in Aeronautical Mobile and Deep-Space Telemetry [Electronic resource] // Entropy (Basel). 2024. Vol. 26 (8). Pp. 694. DOI : 10.3390/e26080694 (date of access: 10.02.2026).
7. Benedetto S., Montorsi G. Unveiling Turbo Codes: Some Results on Parallel Concatenated Coding Schemes [Electronic resource] // IEEE Transactions on Information Theory. 1996. Vol. 42 (2). Pp. 409–428. DOI : 10.1109/18.485713 (date of access: 10.02.2026).
8. Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels [Electronic resource] // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 55 (7). Pp. 3051–3073. DOI : 10.1109/TIT.2009.2021379 (date of access: 10.02.2026).
9. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication [Electronic resource] // Bell System Technical Journal. Vol. 27. Pp. 379–423, 623–656. DOI : 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x (date of access: 10.02.2026).
10. Ryan W. E. A Turbo Code Tutorial [Electronic resource]. 2000. 9 p. URL : https://b.goeswhere.com/turbo2ca.pdf (date of access я: 10.02.2026).
11. Regalia P. A. Iterative Decoding of Concatenated Codes: A Tutorial [Electronic resource] // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2005. Article ID 967375. 13 p. URL : https://asp-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/ASP.2005.762 (date of access: 10.02.2026).
12. 3GPP. Multiplexing and Channel Coding (Release 15). TS 36.212 [Electronic resource]. URL : https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.212/ (date of access: 10.02.2026).

Поступила в редакцию 12.09.2025
The article was submitted 12.09.2025

Информация об авторах

Егор Алексеевич Чистяков *– старший преподаватель кафедры РЭСК ИРИ, e-mail: chistyakov@mirea.ru;*
Глеб Владимирович Суховерхов *– лаборант кафедры РЭСК ИРИ, e-mail: suhoverhov@mirea.ru.*

Information about the authors

Egor Alekseevich Chistyakov *– Senior Lecturer at the RASC Department of the IRI, e-mail: chistyakov@mirea.ru;*
Gleb Vladimirovich Sukhoverkhov *– Laboratory Assistant at the RASC Department of the IRI, e-mail: suhoverhov@mirea.ru.*