

УДК 621.391

DOI: 10.53297/18293336-2026.1-99

МОДЕЛИ КАСКАДНЫХ КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

О.А. Гомцяц, Б.Ф. Бадалян, С.Г. Гомцяц, А.И. Погосян

Национальный политехнический университет Армении

В эпоху активного развития цифровых систем передачи данных (космической, спутниковой и мобильной) особую актуальность приобретает задача обеспечения надёжности передачи. Беспроводные каналы, используемые во всех этих системах, подвержены помехам различной природы, из-за чего принятые данные часто содержат ошибки. Вместе с тем во многих практических приложениях допускается лишь минимальная доля ошибок в обрабатываемых цифровых данных. Существенный вклад в преодоление этой проблемы вносит теория помехоустойчивого кодирования. В её рамках разработано множество кодов и методов их декодирования, которые отличаются по таким параметрам, как энергетический выигрыш, вносимая избыточность, сложность реализации и др.

Каскадные коды, впервые предложенные Форни в 1966 году, остаются одним из фундаментальных подходов в теории помехоустойчивого кодирования. За последние пятнадцать лет эта область претерпела значительные изменения, обусловленные развитием новых приложений: систем распределенного хранения данных, квантовых вычислений, стандартов беспроводной связи 5G и технологий Internet of Things. Каскадное кодирование представляет собой мощный метод построения длинных кодов с хорошими корректирующими свойствами путем последовательного применения двух или более простых кодов. Основная идея заключается в том, что внешний код кодирует исходные данные, а затем каждый символ кодового слова внешнего кода дополнительно кодируется внутренним кодом. Этот иерархический подход в некоторых конструкциях позволяет достичь производительности, близкой к теоретическому пределу Шеннона, при сохранении приемлемой вычислительной сложности.

В статье систематизированы основные методы кодирования в моделях каскадных конструкций, проанализированы современные алгоритмы декодирования и рассмотрены практические реализации каскадных кодов в различных областях. Особое внимание уделено сравнительному анализу каскадных кодов с другими семействами помехоустойчивых кодов, включая турбокоды, LDPC-коды, полярные коды и др.

Ключевые слова: каскадные коды, помехоустойчивое кодирование, LDPC, турбокоды, полярные коды, 5G.

Введение. В современных информационных технологиях одной из наиболее актуальных проблем является защита информации от искажений (ошибок, разрушений, повреждений). В кабельных и беспроводных линиях связи действуют преднамеренные и непреднамеренные помехи (воздействия) различной физической природы, которые искажают форму сигналов, что

приводит к неоднозначному распознаванию информации на приемной стороне. Для систем и устройств хранения информации (сообщений, данных), например, в случае магнитных и оптических носителей опасны разного рода механические (физические) воздействия, в частности, царапины на компакт-диске или другие дефекты, которые выводят из строя отдельные участки этих устройств. Все это привело к поиску и разработке специальных технологий для обнаружения и исправления ошибок (искажений).

Мощным инструментом коррекции этих ошибок являются помехоустойчивые коды, которые хорошо освещены в большом количестве публикаций [1-3]. Однако в последние годы разработаны еще более эффективные методы, системы, алгоритмы устранения ошибок, к которым можно отнести каскадные коды, комбинации различных кодов, турбокоды и такие кодовые конструкции, как пороговые декодеры, алгоритм декодирования Витерби, коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), коды Рида-Соломона, коды-произведения, а также разработки последних десятилетий: многопороговые декодеры (МПД), коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC), полярные коды и др.

Период 2010-2025 годов стал эпохой Ренессанса для каскадных кодов, обусловленного несколькими факторами. Во-первых, появление новых приложений, таких как облачные хранилища данных и квантовые вычисления, потребовало разработки специализированных схем кодирования. Во-вторых, существенный прогресс в вычислительных мощностях сделал практически реализуемыми сложные алгоритмы декодирования. В-третьих, стандартизация технологий 5G и принятие полярных кодов для управляющих каналов стимулировали новые исследования в области каскадирования с полярными кодами.

Основные способы формирования сложных кодовых конструкций.

Как уже отмечалось выше, эффективными способами борьбы с ошибками являются сложные кодовые схемы, включающие различные типы кодов и способы их соединений, которые рассмотрены ниже [4].

Последовательное соединение кодов. Пусть имеются два линейных блоковых кода C_1 и C_2 . Тогда последовательное соединение этих двух кодов можно рассматривать, как поочередную передачу кодовых слов $c_1 \in C_1$ и $c_2 \in C_2$. Для случая m линейных блоковых кодов с параметрами (n_i, k_i, d_i) , $i = 1, 2, \dots, m$ такое чередование дает линейный код $LC(n, k, d)$ с параметрами

$$n = \sum_{i=1}^m n_i, \quad k = \sum_{i=1}^m k_i, \quad d = \min_{1 \leq i \leq m} \{d_i\}, \quad (1)$$

где k - число информационных символов; n - длина кода; d - кодовое расстояние.

Также отметим, что для случая всего одного и того же кода m -кратное последовательное соединение означает m -кратную повторную передачу кодовых слов.

Последовательное соединение кодов (time-sharing) иногда называют прямой суммой кодов [2] или каскадным соединением (concatenation) [5], однако последний термин будем использовать в несколько ином смысле, о чем будет сказано далее. Первый термин более детально пояснен ниже.

Прямая сумма кодов. Для двух линейных блочных кодов $LC_1(n_1, k_1, d_1), LC_2(n_2, k_2, d_2)$, имеющих одну и ту же длину, прямая сумма определяет следующий код $LC_\Sigma[n_1 + n_2, k_1 + k_2, d = \min\{2d_1, d_2\}]$ [2]. Если длины этих кодов различны, то можно добавить недостающее количество нулей к концу более короткого кода, причем суммой будет линейный код следующего вида:

$$LC_\Sigma[(2 \max\{n_1, n_2\}, k_1 + k_2, d = \min\{2d_1, d_2\})]. \quad (2)$$

Произведения кодов или итеративные коды. Как уже отмечалось выше, с целью снижения сложности кодирования-декодирования, а также эффективной коррекции ошибок были разработаны коды-произведения или итеративные коды.

Анализ литературы показал, что возможно несколько подходов к интерпретации таких кодов [4]. С одной стороны, очень простым способом является последовательное (повторное) кодирование. В этом случае выход первого кодера является входом для второго кодера и т.д., как это показано на рис.1. Несмотря на простоту, данный метод комбинирования кодов показывает очень хорошие результаты.

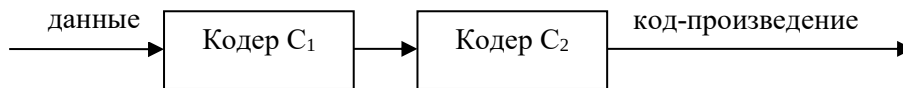


Рис. 1. Конструкция простейшего кода-произведения

Если $C_1(n_1, k_1, d_1)$ - внешний код, $C_2(n_2, k_2, d_2)$ - внутренний код, то их произведение дает итеративный код $C_\Pi(n_1 n_2, k_1 k_2, d_1 d_2)$ [4]. В кодере запись символов осуществляется по строкам, а в декодере считывание - по столбцам, что приводит к технике перемежения.

Каскадные коды. Модификацией итеративных кодов являются каскадные коды, предложенные Форни в работе [5]. Здесь рассмотрена уже ставшая классической двухступенчатая (двухкаскадная) схема кодирования-декодирования, как это показано на рис. 2.

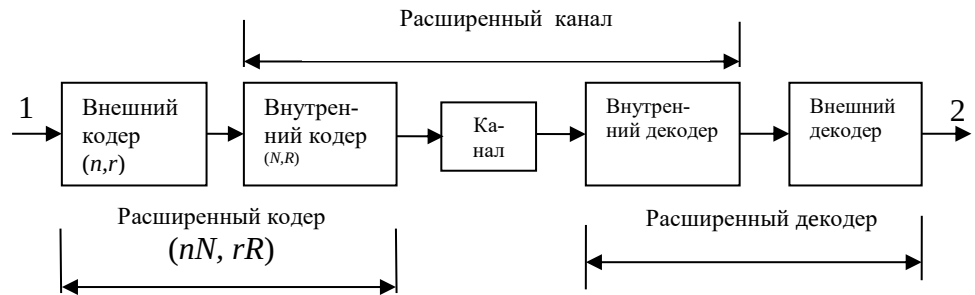


Рис. 2. Схема каскадного кодирования по Форни

На этой схеме введены следующие обозначения: 1 - источник сообщения; 2 - получатель сообщения; n - длина внешнего кода; N - длина внутреннего кода; nN - длина результирующего кода; r - скорость внешнего кодера; R - скорость внутреннего кодера; rR - скорость результирующего кода.

В работе [5] в качестве внешнего кода предлагается всегда использовать корректирующий код Рида-Соломона (РС), а в качестве внутреннего рассмотрены как сверточный помехоустойчивый код, так и код БЧХ.

Как видно из рис.2, кодовые слова на выходе предыдущего каскада используются как входные информационные символы для следующего каскада и т.д. Поскольку каждый кодер — это отдельное устройство, то в результате удастся упростить техническую реализацию каждого более короткого кода по сравнению с однокаскадным кодированием, конечно, при большой длине общего кода.

Отметим, что в случае многоступенчатой схемы кодирования скорость результирующего кода R равна произведению скоростей кодов r_i , используемых на разных n ступенях, т.е. $R = r_1 \cdot r_2 \cdots r_n$.

В современной интерпретации внешний кодер часто называется кодером источника, а внутренний - кодером канала.

Имеется огромное количество литературы, где рассмотрена данная схема в различных сочетаниях составляющих кодов [1,2,6,7]. Следующей модификацией этой схемы является включение перемежителя-деперемежителя между внутренним и внешним кодерами, как это показано на рис. 3. Перемежитель обеспечивает преобразование пачек цифровых ошибок в одиночные. Здесь, кроме того, показаны модуляция, канал связи и общая структура приемной части.

Одной из первых практических реализаций такой схемы является проект NASA по исследованию дальнего космоса и позднее рекомендованная CCSDS конструкция, показанная на рис. 3, называемая стандартной кодирующей системой [8].

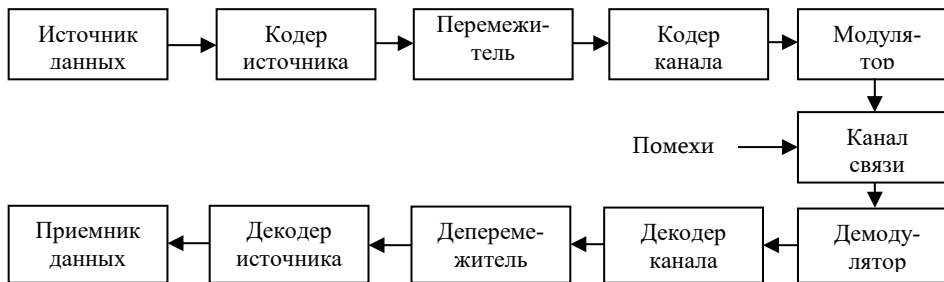


Рис. 3. Модификация классической каскадной конструкции

Основное назначение перемежителя – это разбиение пакетов ошибочных символов, которые могут появиться после внешнего кодера и в канале связи из-за помех. При этом обеспечиваются более благоприятные условия для работы внутреннего декода и значительно улучшается эффективность каскадной конструкции в целом.

Обобщенные каскадные коды. Эти коды впервые были предложены в [9] и являются обобщением классической каскадной схемы, рассмотренной выше. Здесь внешние и внутренние коды, в свою очередь, также состоят из нескольких уровней или подкодов, которые, несомненно, усложняют общую конструкцию, но зато улучшают ее характеристики. Примером одной из последних наиболее сложных конструкций может служить обобщенная каскадная система с вложенными кодами, представленная в [10]. Здесь рассмотрены каскадные коды, которые состоят из двух систем компонентов: системы внутренних кодов и системы внешних кодов, причем в первую систему входят два отдельных кода, а во вторую вложены два слоя по два подкода в каждом. Эта система предложена для MIMO (Multiple Input Multiple Output) - метода пространственного кодирования сигнала с целью увеличения полосы пропускания канала связи с применением нескольких антенных систем на передаче и приеме. Общая теория и характеристики обобщенных каскадных кодов подробно изложены в [9], где показано, что корректирующая способность такой обобщенной каскадной конструкции достаточно высока.

Турбокоды. Они являются дальнейшим развитием идей кодов-произведений и методов многократного декодирования, при котором на каждой новой итерации используются данные предыдущих итераций.

Турбокоды бывают и блочные, и сверточные; они строятся по параллельной и последовательной схемам [4]. В первых турбокодах были применены сверточные коды, включенные параллельно или последовательно через перемежитель П, как показано на рис. 4 [11].



Рис. 4. Развернутая параллельная схема турбокода

В этой схеме информационная последовательность подается на выход и параллельно на входы, в данном случае, двух кодеров, причем на один из них - через перемежитель. В общем случае количество кодеров может быть равным M . На выходах кодеров формируются корректирующие символы, которые далее после мультиплексирования совместно с информационными поступают на выход, образуя при этом одно сверточное кодовое слово.

На эффективность работы турбокодов, естественно, сильное влияние оказывают составляющие коды и перемежитель. Многочисленные исследования показали, что в этих турбокодах в качестве составляющих наиболее приемлемыми являются рекурсивные систематические сверточные коды (recursive systematic convolutional- RSC), позволяющие значительно уменьшить число кодовых слов низкого веса, определяющих эффективность турбокода [12]. Сформированный подобным образом турбокод известен под названием сверточного турбокода (Turbo Convolutional Code-TCC).

Другой немаловажной составляющей турбокода является перемежитель, который позволяет уменьшить корреляцию между соседними символами кодового слова, в результате чего вероятность ошибки на каждой итерации снижается.

Для декодирования турбокодов широкое применение получили такие алгоритмы декодирования, как MAP (Maximum A posteriori), Log-MAP, Max-Log-MAP SOVA (Soft Output Viterby Algorithm). Сложность декодирования турбокода оценивается по формуле

$$N_{\text{турбо}} = IN_{\text{сост}}M, \quad (3)$$

где I - количество итераций при декодировании; $N_{\text{сост}}$ - сложность практической реализации декодирования компонентных кодов; M - число компонентных кодов.

Турбокоды обладают довольно хорошими корректирующими способностями. Однако они не лишены и некоторых недостатков, к числу которых можно отнести эффект насыщения вероятности ошибки, заключающийся в уменьшении скорости убывания вероятности ошибки декодирования в области меньших шумов канала.

Эффект насыщения вероятности ошибки менее заметен в duo-binary турбокодах, где составляющие коды обрабатывают символы не по отдельности, а парами. Данные коды имеют очень хорошие характеристики при не-

больших длинах блока и высоких кодовых скоростях и рекомендованы к применению в стандартах DVB-S, IEEE 802.16.

Турбокоды и последовательные схемы кодирования доминируют среди кодовых конструкций, допускающих итеративное декодирование сверточных кодов. Однако, как уже отмечалось, существуют также и блочные турбокоды. Среди них выделим турбокоды-произведения или матричные (Turbo Product Code-TPC), которые строятся путем последовательного соединения двух или более блочных кодов [4]. Здесь в качестве составляющих кодов обычно используются либо одинаковые, либо разные короткие, легко декодируемые коды, например, коды с проверкой на четность, расширенные коды Хэмминга и некоторые другие.

TPC при невысокой сложности реализации позволяют получать близкую к предельной эффективность декодирования, что обеспечивает работу при низких отношениях сигнал/шум.

Низкоплотные коды. Среди разработок последних лет можно отметить так называемые коды с малой плотностью проверок на четность (Low-Density Parity Check - LDPC), в которых заново возродились идеи Р. Галлагера, предложенные еще в 1962 году, но не получившие вначале широкого распространения в связи с вычислительными проблемами [13]. Методы итеративного декодирования и современные вычислительные мощности привели к бурному развитию и применению этих кодов. Например, они используются в новом стандарте цифрового телевидения DVB-T2 в каскадной схеме совместно с кодами БЧХ.

LDPC-коды - это линейные блочные коды, которые представляются различным образом, в частности с помощью проверочной матрицы H , в которой содержатся преимущественно нули и относительно малое (<10) число единиц в строках и столбцах [12]. Поэтому число символов, содержащихся в проверочных уравнениях, уменьшается, что приводит к упрощению процесса декодирования.

LDPC-коды бывают регулярными и нерегулярными [4]. Проверочная матрица первых сильно разрежена и характеризуется одинаковым числом единиц и во всех столбцах и строках. В нерегулярных LDPC-кодах данное свойство не выполняется.

Сложность LDPC-кодов имеет квадратичную зависимость от их длины, обусловленную специфической структурой проверочной матрицы. Поэтому аппаратная реализация LDPC-кодеров часто бывает очень сложной, причем для изменения, например, кодовой скорости и длины блока необходимо формировать новую проверочную матрицу H , что не всегда желательно. При этом сложность практической реализации LDPC-кодов, оцениваемая выражением $N_{LDPC} = 4 \cdot I \cdot S$ (I - количество итераций декодирования; S - средний вес столбцов проверочной матрицы), существенно ниже сложности турбокодов.

На рис.5 представлены результаты моделирования турбокода с кодовой скоростью $R=1/2$, конструктивной длиной составляющих рекурсивных си-

стематических сверточных кодов $K=4$, образующими полиномами составляющих кодеров $g_0=13$ и $g_1=15$ в восьмеричной системе счисления. Расчеты произведены нами в среде Simulink V.8.5 для алгоритма декодирования составляющих кодов Max-Log-MAP и 6-ю итерациями декодирования. С целью сравнения, на том же рисунке приведены характеристики каскадных схем для стандартов DVB-T и DVB-S2.

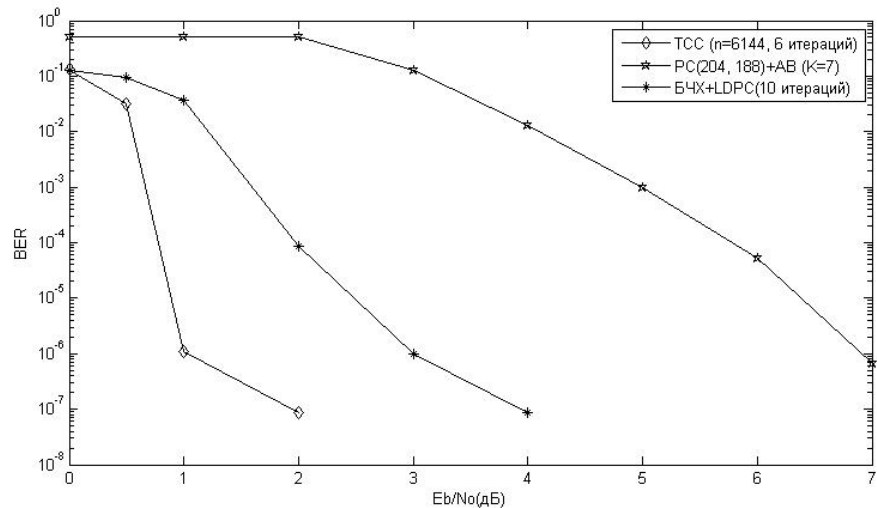


Рис. 5. Характеристики турбокодов и каскадных схем кодирования

Здесь РС+АВ – каскадный код Рида-Соломона + алгоритм Витерби.

Полярные коды и их каскадирование. Это современный метод коррекции ошибок при передаче данных. Полярные коды стали первыми кодами с явной конструкцией доказуемо достигающей пропускной способности канала. В 2016 году организация 3GPP приняла решение об использовании полярных кодов для управляющих каналов в стандарте 5G NR (New Radio), что значительно стимулировало исследования в этой области [14,15].

Реализация полярных кодов в стандарте 5G NR демонстрирует практическую значимость каскадных конструкций. Стандарт использует CRC-aided полярные коды с длинами блоков от 12 до 1088 бит для управляющей информации, достигая пороговое отношение сигнал/шум, близкое к теоретическому пределу.

Основная идея полярных кодов заключается в следующем. Для эффективной коррекции ошибок канал связи на первом шаге разбивается на два виртуальных подканала, которые формируются из передаваемых битов. При этом один подканал с помощью специальных преобразований битов становится почти идеальным без искажений с пропускной способностью, близкой к единице, и по нему передаются данные. Другой подканал заполняется так называемыми “замороженными” (frozen bits) битами, т.е. нулями для обеспечения декодирования на приемной стороне. На втором и дальнейших шагах

кодирования рекурсивно осуществляются такие же преобразования n раз, в результате чего на каждой рекурсии формируется кодовая последовательность длиной $N=2^n$. Эта процедура и называется поляризацией каналов. Таким образом, на каждом шаге каждый канал “расщепляется” на лучший и худший. После n шагов имеем N подканалов, которые поляризованы: они имеют ёмкость, близкую к 0 или к 1. Затем данные передаются только через хорошие каналы, и при $N \rightarrow \infty$ канал используется на 100% его теоретической мощности.

Ключевые достижения в области каскадирования полярных кодов включают:

- CRC-aided - каскадирование полярных кодов с CRC (Cyclic Redundancy Check) существенно улучшает производительность при конечных длинах блоков;
- PAC-коды (Polarization-Adjusted Convolutional codes) - применение сверточного предварительного кодирования перед полярным кодированием, предложенного в 2019 году;
- каскадирование с внешними кодами - использование полярных кодов в качестве внутренних кодов в комбинации с Reed-Solomon или BCH-кодами как внешними.

Алгоритмы декодирования полярных кодов изложены в [15].

Заключение. Несмотря на появление новых семейств кодов, таких как полярные коды, каскадные конструкции сохраняют свою релевантность благодаря гибкости, надежности и возможности адаптации к специфическим требованиям приложений. Фундаментальная идея каскадирования - построение мощных кодов из более простых компонентов - остается актуальной и продолжает генерировать новые исследовательские направления.

Литература

1. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / Пер. с англ.; Под ред. Р.Л. Добрушина и С.И. Самойленко. – М.: Мир, 1976.- 594 с.
2. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки / Пер. с англ.; Под ред. Л.А. Бассальго. - М.: Связь, 1979.- 744 с.
3. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Пер с англ.; Под ред. К.Ш. Зигангирова. – М.: Мир, 1986.- 576 с.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Пер. с англ. В.Б. Афанасьева.- М.: Техносфера, 2005.- 320 с.
5. Форми Д. Каскадные коды / Пер. с англ. В.В. Зяблова и О.В. Попова; Под ред. С.И. Самойленко.- М.: Мир, 1970.- 207 с.
6. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования / Пер. с англ.; Под ред. С.Д. Бермана. - М.: Мир, 1971.- 477 с.

7. **Кларк Дж. мл., Кейн Дж.** Кодирование с исправлением ошибок в цифровой связи / Пер. с англ.; Под. Ред. Б. С. Цыбакова - М.: Радио и связь, 1987.- 392 с.
8. Reed-Solomon Codes and Their Applications / **S. B. Wicker and V.K. Bhargava (2eds.)**. - N.Y.: IEEE Press, 1994.- 321 p.
9. **Блох Э.Л., Зяблов В.В.** Линейные каскадные коды.- М.: Наука, 1982.- 229 с.
10. **Крещук А.А., Зяблов В.В.** Обобщенная каскадная система с вложенными пространственно-временными кодами для систем ММО // Информационные процессы. - 2014.- Т.14, №2.- С. 160-177.
11. **Золотарев В.В., Овечкин Г.В.** Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / Под ред.чл.-кор. РАН Ю.Б.Зубарева.- М.: Горячая линия-Телеком, 2004.-126 с.
12. **Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.** Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь.- 2008.- №12.- С. 2-11.
13. **Галлагер Р.** Коды с малой плотностью проверок на четность // Теория кодирования.- М.: Мир, 1966.- С.139-165.
14. **Arikan E. and Markarian G.** Two-dimensional polar coding. // International Symposium on Communication Theory and Applications.- July 2009.- P.1-3.
15. **Arikan E.** Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. // IEEE Transactions on Information Theory.- 2009.- 55(7).-P. 3051-3073.

*Поступила в редакцию 10.04.2026.
Принята к опубликованию 27.05.2026.*

ԿԱՍԿԱԴԱՅԻՆ ԿՈՂԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼՆԵՐ

Հ.Ա. Գոմցյան, Բ.Ֆ. Բադալյան, Ա.Գ. Գոմցյան, Ա.Ի. Պողոսյան

Տվյալների հաղորդման թվային համակարգերի՝ տիեզերական, արբանյակային և շարժական, ակտիվ զարգացման ժամանակաշրջանում առանձնահատուկ արդիականություն է ձեռք բերում հաղորդման հուսալիության ապահովման խնդիրը: Այդպիսի համակարգերում օգտագործվող անլար կապուղիները ենթակա են զանազան բնույթի աղավաղումների ազդեցությանը, ինչի հետևանքով ընդունված տվյալները հաճախ պարունակում են սխալներ: Միաժամանակ, բազմաթիվ գործնական հավելվածներում ընդունելի է սխալների նվազագույն քանակություն մշակվող թվային տվյալներում: Նշված խնդրի լուծման գործում զգալի ներդրում ունի աղմկակայուն կոդավորման տեսությունը, որի շրջանակներում մշակվել են բազմաթիվ կոդեր և ապակոդավորման մեթոդներ՝ տարբերվող այնպիսի պարամետրերով, ինչպիսիք են էներգետիկ շահույթը, ներմուծվող հավելույթը, իրականացման բարդությունը և այլն:

Աղմկակայուն կոդավորման տեսության հիմնարար մոտեցումներից են Ֆորնիի կոդից 1966 թ. առաջին անգամ ներկայացված կասկադային կոդերը: Վերջին 15 տարիների ընթացքում այդ ոլորտը զգալի փոփոխությունների է ենթարկվել՝ պայմանավորված այնպիսի նոր հավելվածների զարգացմամբ, ինչպիսիք են տվյալների բաշխված պահպանման համակարգերը, քվանտային հաշվարկները, 5G անլար կապի

ստանդարտները և իրերի ինտերնետի տեխնոլոգիաները: Կասկադային կոդավորումը լավ շտկող հատկություններով երկար կոդերի կառուցման հզոր գործիք է՝ երկու և ավելի առավել պարզ կոդերի հաջորդական կիրառման ճանապարհով: Հիմնական գաղափարն այն է, որ արտաքին կոդը կոդավորում է ելակետային տվյալները, իսկ արտաքին կոդի կոդային խոսքի յուրաքանչյուր սիմվոլը լրացուցիչ կոդավորվում է ներքին կոդով: Այդ հիերարխիական մոտեցումը որոշակի կառուցվածքներում թույլ է տալիս հասնել Շեննոնի տեսական սահմանին մոտ արտադրողականության՝ ընդունելի հաշվողական բարդության պայմաններում:

Հոդվածում համակարգված են կասկադային կառուցվածքների մոդելներում կոդավորման հիմնական մեթոդները, վերլուծված են ապակոդավորման ժամանակակից ալգորիթմները, և դիտարկված են զանազան ոլորտներում կասկադային կոդերի գործնական իրականացումները: Հատուկ ուշադրություն է դարձված կասկադային կոդերի և աղմկակայուն կոդերի այլ ընտանիքների՝ ներառյալ տուրբոկոդերի, LDPC-կոդերի, բևեռային կոդերի համեմատական վերլուծությանը:

Առանցքային բառեր. կասկադային կոդեր, աղմկակայուն կոդավորում, LDPC, տուրբոկոդեր, բևեռային կոդեր, 5G:

MODELS OF CONCATENATE CODE STRUCTURES

H.A. Gomtsyan, B.F. Badalyan, S.G. Gomtsyan, A.I. Poghosyan

In the era of the active development of digital data transmission systems - space, satellite, and mobile - ensuring reliable transmission has become especially pressing. The wireless channels used in all of these systems are susceptible to various types of interference, which often results in errors in received data. However, in many practical applications, only a minimal error rate in the processed digital data is acceptable. The theory of error-correcting coding makes a significant contribution in overcoming this problem. Within this framework, numerous codes and decoding methods have been developed, differing in parameters such as energy gain, introduced redundancy, implementation complexity, and others.

Cascade codes, first proposed by Forni in 1966, remain one of the fundamental approaches in error-correcting coding theory. Over the past fifteen years, this field has undergone significant changes driven by the development of new applications: distributed data storage systems, quantum computing, 5G wireless standards, and the Internet of Things. Concatenated coding is a powerful method for constructing long codes with good error-correcting properties by sequentially applying two or more simpler codes. The basic idea is that an outer code encodes the original data, and then each code word symbol of the outer code is further encoded by an inner code. This hierarchical approach, in some designs, achieves performance close to the theoretical Shannon limit while maintaining acceptable computational complexity.

This article systematizes the main coding methods in concatenated design models, analyzes modern decoding algorithms, and discusses practical implementations of concatenated codes in various fields. Particular attention is paid to a comparative analysis of concatenated codes with other families of error-correcting codes, including turbo codes, LDPC codes, polar codes, and others.

Keywords: concatenated codes, error-correcting coding, LDPC, turbo codes, polar codes, 5G.