

УДК 621.391.1

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67>

EDN: VZWUMY

Исследование адаптивных цифровых линий радиосвязи с обратной связью

Фам К. К. ✉, Глушанков Е. И., Ву Т. З.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Развитие эффективных систем цифровой радиосвязи предполагает разработку методов, обеспечивающих повышение их энергетической и спектральной эффективности. Один из подходов к решению этой задачи подразумевает оценку состояния канала связи и выбор оптимальных методов модуляции в цифровой системе передачи с обратной связью. **Целью** работы является исследование современных методов кодирования и модуляции в канале с обратной связью. Предлагаются способы применения этих методов в адаптивной системе с обратной связью для обеспечения оптимальных значений спектральной и энергетической эффективности. **Используемые методы:** сравнительный анализ различных подходов к построению адаптивной системы с обратной связью выполнен на основе моделирования в среде MATLAB с учетом воздействия различных типов шумов на процесс передачи данных в канале с обратной связью. **Новизна работы** заключается в комплексном исследовании и сравнительном анализе современных методов кодирования и многопозиционной модуляции в каналах с обратной связью, а также в разработке предложений по их применению в адаптивных системах. **В результате** исследования была разработана адаптивная система передачи данных с обратной связью, обеспечивающая более высокую скорость передачи данных по сравнению с системами без обратной связи при сохранении требований к надежности канала связи. **Практическая значимость:** предложенное решение рекомендуется к применению в случаях, когда требуется обеспечить высокую надежность передачи данных при одновременном сохранении высокой скорости. Это особенно актуально в условиях низкого качества принимаемого сигнала, обусловленного влиянием окружающей среды с высоким уровнем помех, например, при передаче через каналы с замираниями.

Ключевые слова: адаптивная система, канал с обратной связью, турбокод, каскадный код, низкоплотностный код, код Боуза – Чоудхури – Хоквингема, многопозиционная модуляция, райсовский канал, эффект Доплера, MATLAB

Актуальность

С развитием современных цифровых систем связи актуальными становятся вопросы повышения их энергетической и спектральной эффективности [1, 2]. Для этого можно использовать различные методы, одним из которых является применение адаптивной системы с обратной связью (ОС). В данной системе состояние канала связи оценивается на приемной стороне, причем эффективность его

Библиографическая ссылка на статью:

Фам К. К., Глушанков Е. И., Ву Т. З. Исследование адаптивных цифровых линий радиосвязи с обратной связью // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С. 52–67. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67. EDN: VZWUMY

Reference for citation:

Fam K. K., Glushankov E., Vu T. D. Research on Adaptive Digital Communication Lines with Decision Feedback. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 3. PP. 52–67 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67. EDN: VZWUMY

использования зависит от корректности полученной оценки, в частности, от выбора методов кодирования и модуляции [3, 4]. В подобной ситуации возникает проблема, связанная с выбором методов кодирования и модуляции, которые не только обеспечивали бы требуемую помехоустойчивость и скорость передачи данных, но и учитывали сложность реализации этих методов.

Для решения данной проблемы в работе исследуются характеристики некоторых современных методов кодирования, эффективность исправления ошибок которыми представлена в работах [5–12]. На основе полученных результатов предлагаются варианты применения этих методов в адаптивной системе с ОС.

Методы кодирования

В настоящем исследовании рассматривалась возможность применения широко используемых современных методов кодирования для оценки качества канала.

Турбокод (ТК) – метод кодирования, получивший широкое распространение в современных цифровых системах связи благодаря тому, что он является эффективным средством достижения желаемого компромисса между энергетической и спектральной эффективностью [13]. Рассмотрим схему кодера ТК на основе рекурсивного кодера систематического сверточного кода (РСК). Как показано на рисунке 1, исходные данные разделяются на блоки длиной $Lu(i)$, $i = (1, 2, \dots, L)$. Каждому такому блоку соответствует последовательность на выходе, длина которой приблизительно равна $3L$ при достаточно большом значении L . Это означает, что кодовая скорость составляет $R = 1/3$. Для ее увеличения до $R = 1/2$ можно применить метод перфорации. При этом для каждого информационного символа сохраняется один из двух формируемых избыточных символов. Перед выполнением декодирования в пропущенные биты вставляются нулевые значения.

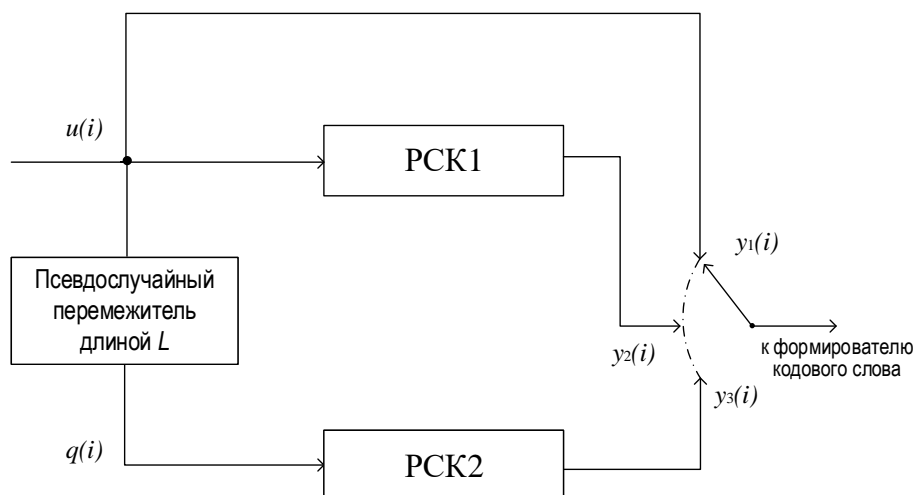


Рис. 1. Схема кодера ТК, состоящего из двух РСК

Для декодирования ТК, представленного на рисунке 1, может быть использована схема декодера, изображенная на рисунке 2 [14].

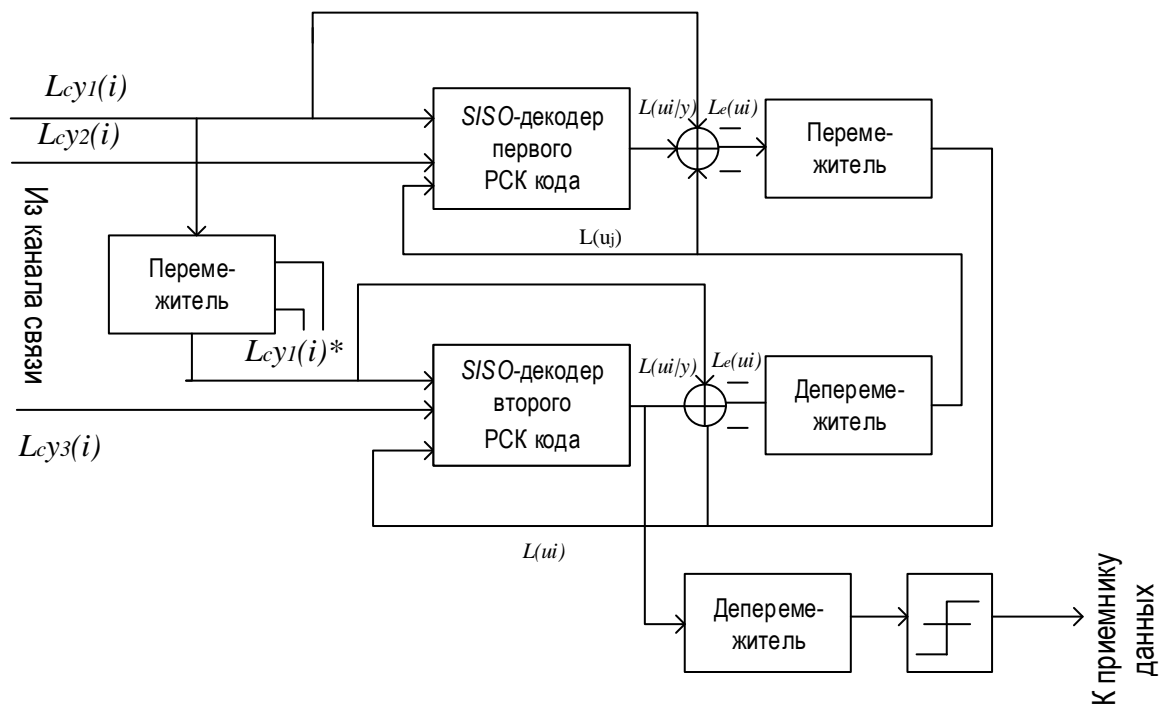


Рис. 2. Схема декодера ТК

Как показано на рисунке, на вход декодера каждого РСК поступают три типа данных: информационные биты, проверочные биты и информация об оценке апостериорных вероятностей (APP, аббр. от англ. A Posteriori Probability), получаемая от другого декодера. Поскольку значения APP являются мягкими решениями, декодеры такого типа также называют декодерами с мягким входом и мягким выходом (SISO, аббр. от англ. Soft Input Soft Output). Для представления мягких решений используется логарифм отношения правдоподобия (LLR, аббр. от англ. Log Likelihood Ratio), формулы которого для информационных символов $u(i)$ и вычисления значений апостериорных вероятностей представлены следующими выражениями:

$$L(u_i) = \ln \left[\frac{P(u_i=1)}{P(u_i=-1)} \right],$$

$$L_e(u_i) = L(u_i|y) - L_{cyk}(i) - L(u_i),$$

где $P(u(i) = m)$ – вероятность того, что $u(i) = m$, $m = \pm 1$; L_c определяет надежность канала (для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) $L_c = \frac{2}{\sigma^2}$; σ^2 – дисперсия шума).

Информационные символы представляют собой жесткое решение, полученное после выполнения определенного числа итераций, на каждой из которых вероятность ошибки уменьшается (обычно 10–20 итераций). Для декодирования ТК, представленного на рисунке 2, могут использоваться алгоритм максимума

апостериорной вероятности (MAP, *аббр. от англ.* Maximum a Posteriori) и алгоритм Витерби с мягким выходом (SOVA, *аббр. от англ.* Soft Output Viterbi Algorithm) [1, 14].

ТК на основе РСК с параметрами $v = 3$ нашел применение в системах мобильной радиосвязи, использующих стандарт множественного доступа с кодовым разделением (CDMA, *аббр. от англ.* Code Division Multiple Access) ($k = 1; n = 3$) и LTE ($k = 1; n = 2$) [15, 16].

Низкоплотностный код В данной работе представлен дополнительный метод кодирования, обладающий характеристиками, сопоставимыми с ТК, но отличающийся от него упрощенной процедурой и более высокой скоростью декодирования. Речь идет о коде с малой плотностью проверок на четность (LDPC, *аббр. от англ.* Low Density Parity Check Code), также называемом низкоплотностным [17]. LDPC-коды относятся к классу линейных блочных кодов, но в отличие от кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ) или Рида – Соломона (РС), характеризующихся строгим алгоритмом построения на основе заранее заданных полиномов, проектируются при помощи множества различных подходов. Кроме того, в LDPC-кодах порождающие матрицы имеют в строках и столбцах много меньшее количество единиц, чем нулей.

Эффективность и сложность кодирования и декодирования данного метода зависят от проверочной матрицы \mathbf{H} размером $M \times N$, которая задается для кода (она может быть представлена в виде двудольного графа Таннера, пример которого приведен на рисунке 3). Верхние узлы, обозначенные кружками, соответствуют символьным узлам (VN, *аббр. от англ.* Variable Nodes), а нижние узлы, обозначенные квадратами, – проверочным узлам (CN, *аббр. от англ.* Check Nodes). Наличие ребер между соответствующими символьными и проверочными узлами обозначает ненулевые позиции в матрице \mathbf{H} .

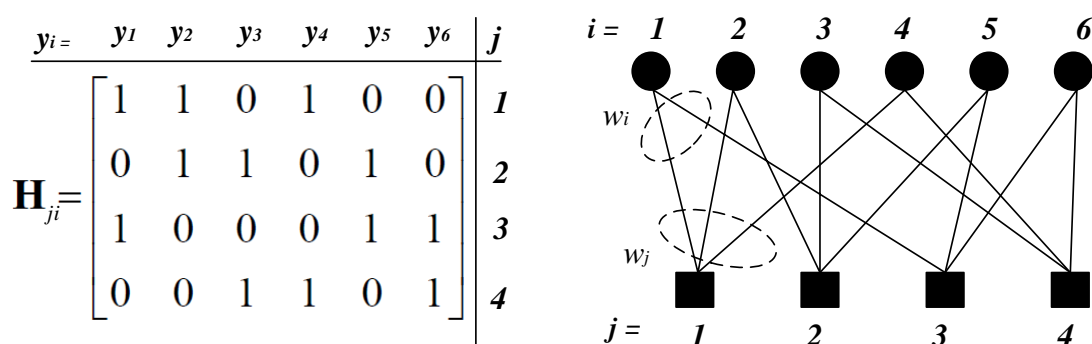


Рис. 3. Пример проверочной матрицы и связанного с ней графа Таннера

Более подробную информацию о методах построения оптимальных LDPC-кодов можно найти в работах [18, 19]. Для кода, определенного матрицей \mathbf{H} на рисунке 3, скорость кода определяется следующим выражением:

$$R = \frac{K}{N} = \frac{N-M}{N} = 1 - \frac{M}{N} = 1 - \frac{w_i}{w_j} = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3},$$

где w_i – количество единиц в каждом столбце матрицы \mathbf{H} ; w_j – количество единиц в каждой строке матрицы \mathbf{H} [1, 17].

Алгоритмы декодирования LDPC-кодов представляют собой итеративные процедуры, которые можно рассматривать как обмен информацией между символьными и проверочными узлами (q_{ij} и r_{ji}) графа Таннера до нахождения кодового слова или достижения определенного числа итераций. Основным является алгоритм распространения доверия (BP, *аббр. от англ.* Belief Propagation), который может быть представлен в «логарифмической» форме:

$$L(r_{ji}) = \ln \frac{r_{ji}(0)}{r_{ji}(1)} = 2 \tanh^{-1} \left\{ \prod_{i' \in V_{j \setminus i}} \tanh \left[\frac{1}{2} L(q_{i'j}) \right] \right\}, \text{ где } \tanh^{-1}(\alpha) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right),$$

$$L(q_{ij}) = \ln \frac{q_{ij}(0)}{q_{ij}(1)} = L_{\text{кан}}(y_i) + \sum_{j' \in C_{i \setminus j}} L(r_{j'i}), \text{ где } L_{\text{кан}}(y_i) = \ln \frac{p_i(0)}{p_i(1)},$$

$$y_i^{\text{дек}} = \begin{cases} 0, & L(\Lambda_i) > 0 \\ 1, & L(\Lambda_i) < 0 \end{cases}, \text{ где } L(\Lambda_i) = \ln \frac{\Lambda_i(0)}{\Lambda_i(1)} = L_{\text{кан}}(y_i) + \sum_{j' \in C_{i \setminus j}} L(r_{j'i}),$$

где $y_i^{\text{дек}}$ – решение по переданном символам y_i ; $C_{i \setminus j} = \{j' : h_{j'i} = 1\} \setminus \{j\}$ – подмножество индексов проверок, относящихся к символу с номером i в графе Таннера, за исключением проверки с номером j ; $V_{j \setminus i} = \{i' : h_{ji'} = 1\} \setminus \{i\}$ – множество индексов символов, участвующих в проверке с номером j в графе Таннера, за исключением символа с номером i .

Среди известных алгоритмов быстрого декодирования LDPC-кодов для каналов с непрерывным выходом наиболее известны алгоритм минимальных сумм («min-sum») и алгоритм равномерного наибольшего правдоподобия (UMP, *аббр. от англ.* Uniformly Most Powerful) [1, 20]. LDPC-код с длиной кодовых слов 32 400 и 64 800 битов при различных значениях скорости кодирования нашел применение в системе цифрового спутникового вещания DVB-S2 [21, 22].

Каскадный код. Методы кодирования, рассмотренные выше, хотя и способны обеспечить высокую энергетическую эффективность, требуют значительной сложности реализации и вычислительных затрат. В данной работе исследуется еще один метод кодирования, представляющий собой разновидность составного кода, формируемого последовательной схемой кодирования, а именно каскадный код. Поскольку данный метод кодирования сочетает в себе стандартные методы кодирования, требования к сложности кодирования и декодирования значительно снижаются. Каскадный код, в котором внешним является код РС, а внутренним – сверточный код (СК), часто используется в реальных системах связи (рисунок 4) [23].

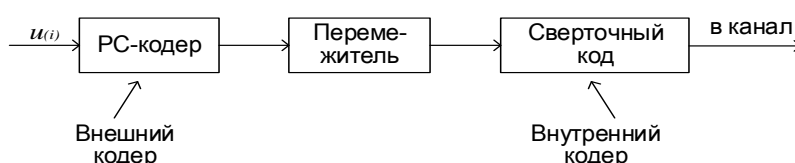


Рис. 4. Схема каскадного кодирования на основе кодов РС и СК

В качестве внешнего кода на практике обычно используется недвоичный код РС, поскольку данный метод эффективно противодействует пакетным ошибкам [24]. Для уменьшения избыточности кода РС после его кодирования используется перемежение, так как последующее деперемежение символов на входе декодера СК обеспечивает распределение пакетов ошибок между различными кодовыми словами. Декодирование такого каскадного кода может быть выполнено с использованием стандартных декодеров Витерби и РС [14, 25]. Каскадный код, построенный на основе кодов РС (255, 239) или (204, 188) (первый каскад – внешний код) в сочетании с СК со скоростью $R = 1/2$ (второй каскад – внутренний код), получил практическое применение в системах цифрового телевизионного вещания стандарта DVB (Digital Video Broadcasting) [26].

Адаптивная система с ОС

Один из подходов к обеспечению оптимальных значений спектральной и энергетической эффективности заключается в использовании адаптивной системы с ОС, в которой в зависимости от результатов контроля состояния канала связи осуществляется корректировка параметров или методов кодирования и модуляции с целью достижения требуемой эффективности канала связи [27]. В данной системе под задачами контроля состояния канала понимается использование коэффициента ошибок на приемной стороне в качестве критерия оценки состояния канала связи. Структура адаптивной системы с ОС представлена на рисунке 5, а алгоритм ее работы – на рисунке 6.

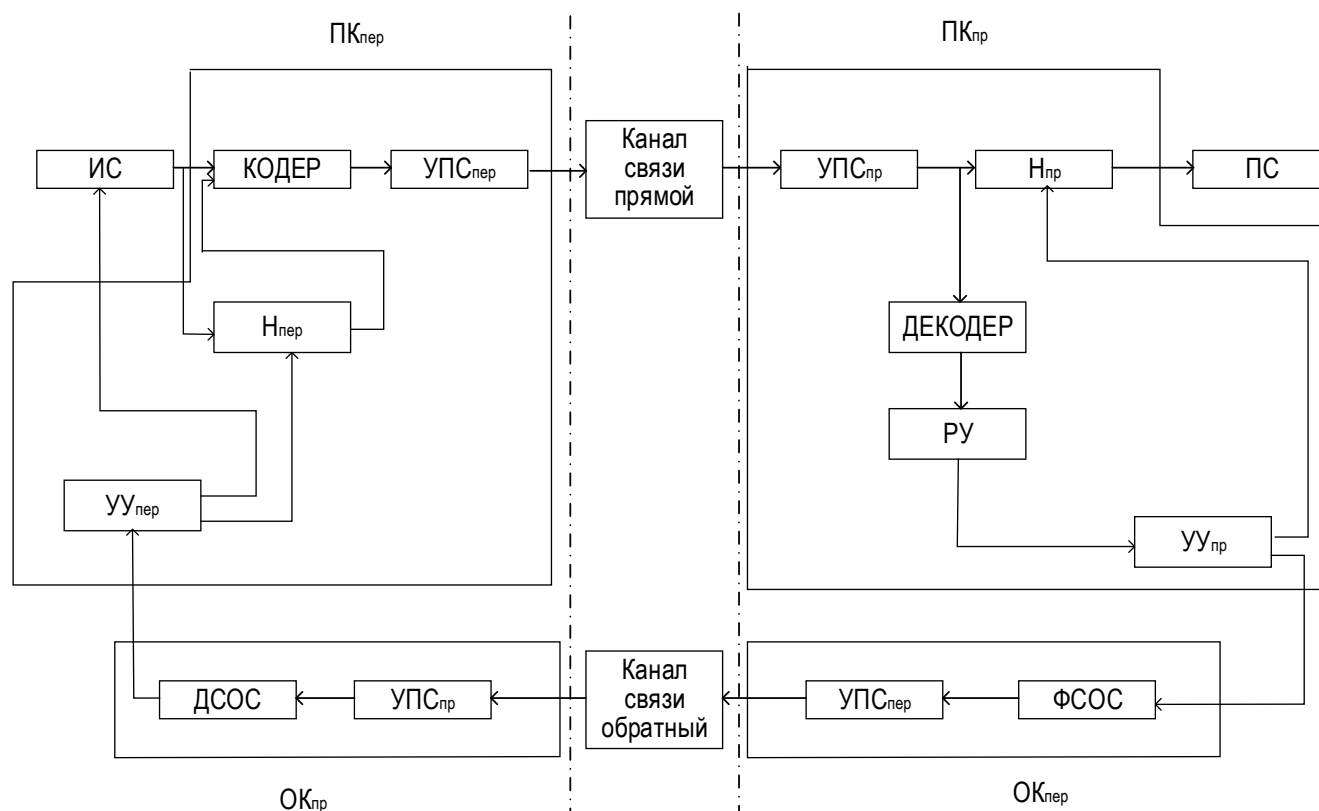


Рис. 5. Структура адаптивной системы с ОС

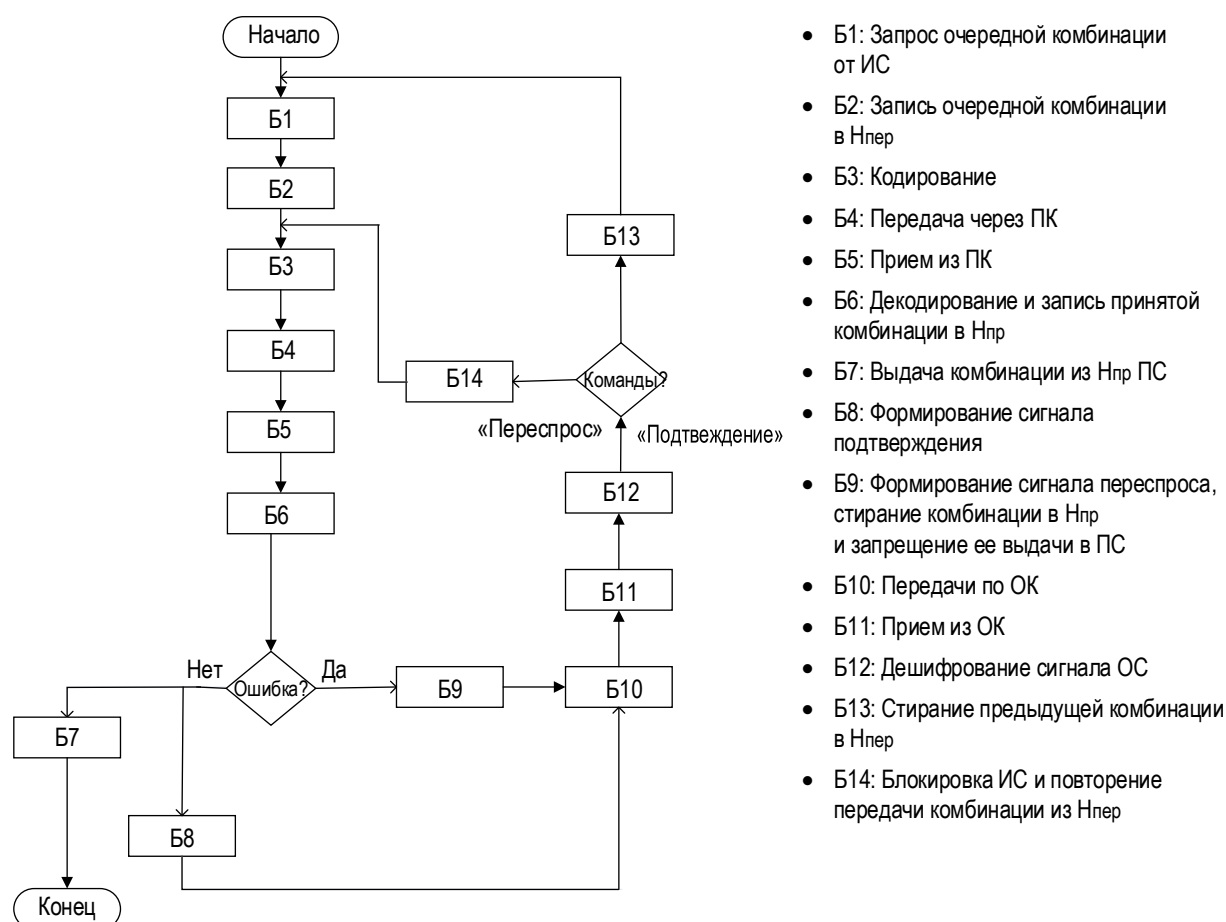


Рис. 6. Алгоритм работы адаптивной системы передачи данных с ОС

Принцип работы системы заключается в следующем. По команде управляющего устройства передатчика ($УУ_{пер}$) источник сообщения (ИС) отправляет сигнал готовности аппаратуры к передаче данных (Б1). В ответ на этот сигнал очередная комбинация сообщения заносится в накопитель передатчика ($Н_{пер}$, Б2) и кодер (Б3). $Н_{пер}$ предназначен для сохранения отправленной комбинации с возможностью ее повторной передачи. Далее последовательность после кодирования направляется в устройство преобразования сигнала передатчика ($УПС_{пер}$, Б4) и передается по прямому каналу связи. Комбинации, восстановленные после обратного преобразования в устройстве преобразования сигнала приемника ($УПС_{пр}$, Б5), одновременно поступают на декодирование и в накопитель приемника ($Н_{пр}$, Б6). На основании результатов декодирования решающее устройство (РУ) вычисляет вероятность битовой ошибки и сравнивает ее с допустимым значением, после чего результат сравнения передается в управляющее устройство приемника ($УУ_{пр}$). Если полученная вероятность оказывается ниже допустимого значения, $УУ_{пр}$ выдает команды в формирователь сигнала обратной связи (ФСОС), по которым формируется сигнал «Подтверждение», одновременно с этим отправляя команды $Н_{пр}$, чтобы информация из $Н_{пр}$ поступила к потребителю системы (ПС, Б8–Б7). После передачи через обратный канал сигнал «Подтверждение» распознается дешифратором сигнала обратной связи (ДСОС, Б10–Б12). При получении этого сигнала с помощью $УУ_{пер}$ от ИС запрашивается очередная комбинация, при этом информация в $Н_{пер}$ и $Н_{пр}$ стирается (Б13).

В противоположном случае, если полученная вероятность превышает допустимое значение, ФСОС генерирует сигнал «Переспрос» (Б9) и передает этот сигнал через обратный канал связи (Б10–Б12). При получении сигнала «Переспрос» УУ_{пер} выдает команды ИС, запрещающие передачу новой комбинации. При этом комбинация, хранящаяся в Н_{пер}, повторно передается в кодер и далее. Таким образом, комбинация в Н_{пер} будет повторяться до получения сигнала «Подтверждение». Обычно количество таких повторов ограничивается, если сигнал «Подтверждение» так и не получен, а комбинации из Н_{пер} передаются через прямой канал с изменением методов кодирования и декодирования. В случае, если ни одна комбинация методов кодирования и модуляции не обеспечивает допустимого значения вероятности ошибки, система будет использовать метод кодирования и модуляции, обеспечивающий наилучший результат [28].

Однако в данной системе необходимо учитывать, что обратный канал также подвержен ошибкам и неверно принятая передатчиком информация может существенно повлиять на выбор методов кодирования и модуляции. В отличие от информации, передаваемой через прямой канал, информация о состоянии канала, передаваемая через обратный канал, имеет значительно меньший объем и требует меньших скоростей передачи, следовательно, возможно применение методов кодирования с малыми скоростями, но имеющих большую корректирующую способность. Поэтому в обратном канале не требуется применение сложных методов кодирования и модуляции, что позволяет снизить вычислительную сложность при сохранении желаемой энергетической эффективности [29]. Как уже упоминалось, вычисление коэффициента вероятности битовой ошибки (BER, *аббр. от англ. Bit Error Rate*) представляет собой одну из ключевых задач при разработке адаптивных систем. Для его определения могут быть использованы как прямые методы (тестовые, применяемые в данной работе), так и косвенные подходы [28, 30, 31].

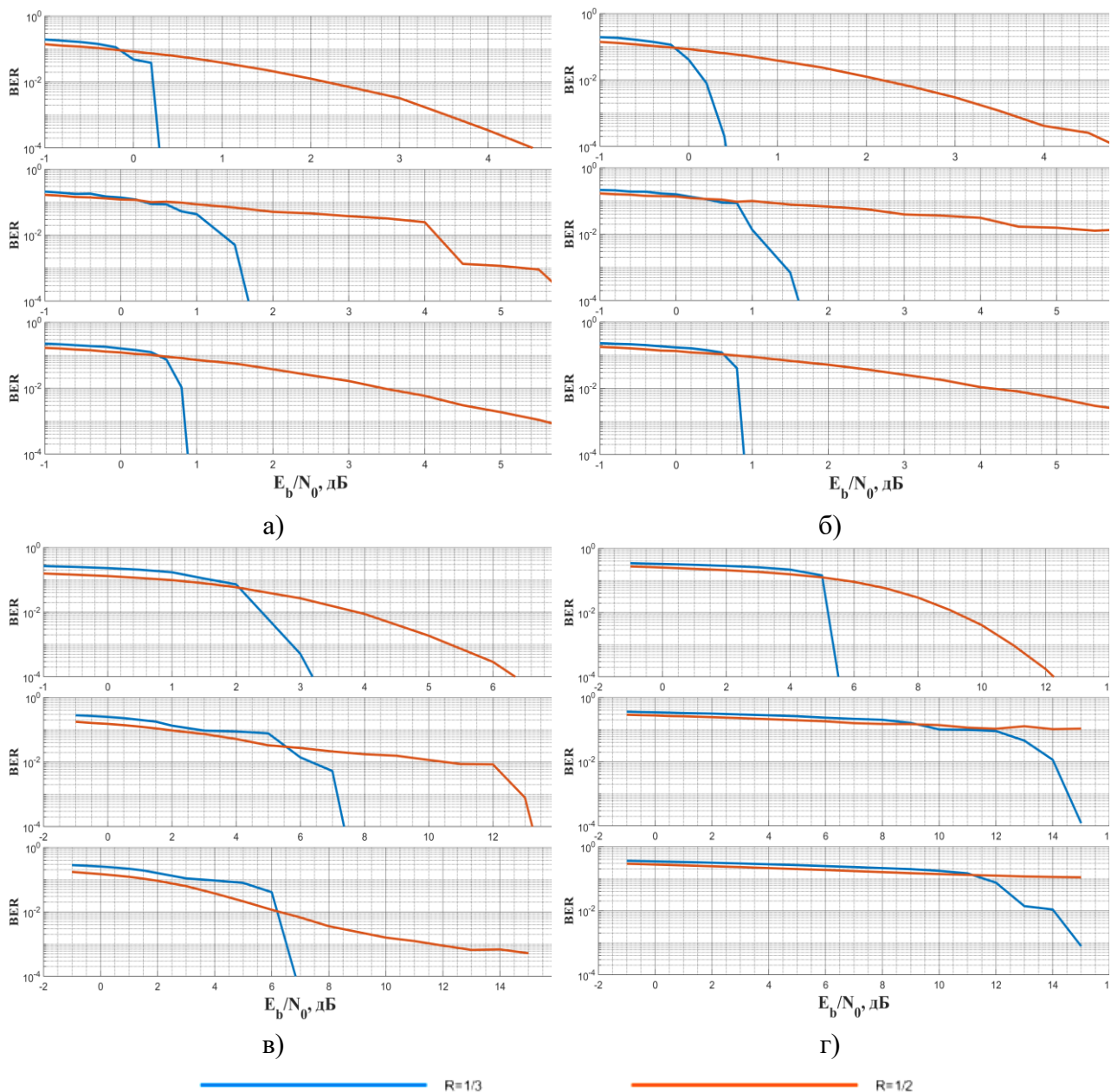
Результаты моделирования

Рассматривается случай передачи информации через прямой и обратный каналы в условиях АБГШ и замираний (райсовский канал, РК). При этом предполагается, что в РК принятый сигнал состоит из основного сигнала и отраженных сигналов со временем задержки от 10^{-6} до 10^{-9} с, а отношение мощности прямого сигнала к мощности многолучевого сигнала составляет 10.

Для повышения точности моделирования данные передаются многократно с заданным количеством итераций (в данном исследовании используется 10 итераций). Затем рассчитывается средняя вероятность ошибки для всех итераций, и определяется окончательное значение вероятности ошибки. На рисунках 7–9 представлены результаты анализа характеристик методов кодирования (таблица 1) при их сочетании с ФМ (фазовой модуляцией) и КАМ (квадратурной амплитудной модуляцией). Первый график демонстрирует передачу сигнала через канал с АБГШ, в то время как второй и третий графики отражают передачу сигнала через РК с частотой Доплера, равной 0 и 100 Гц соответственно.

Таблица 1 – Параметры помехоустойчивого кодирования

Типы кодов	Параметры кодов
ТК	$L = 65536; \nu = 3; R = \left\{\frac{1}{3}; \frac{1}{2}\right\}$
LDPC-код	$L = 64800; R = \left\{\frac{1}{2}; \frac{3}{4}; \frac{5}{6}; \frac{9}{10}\right\}$
Каскадный код	PC (255; 239) и PC (204; 188) + СК $\left(\nu = 3; R = \frac{1}{2}\right)$

Рис. 7. Характеристики ТК и модуляция:
а) ФМ2; б) ФМ4; в) КАМ16; г) КАМ256

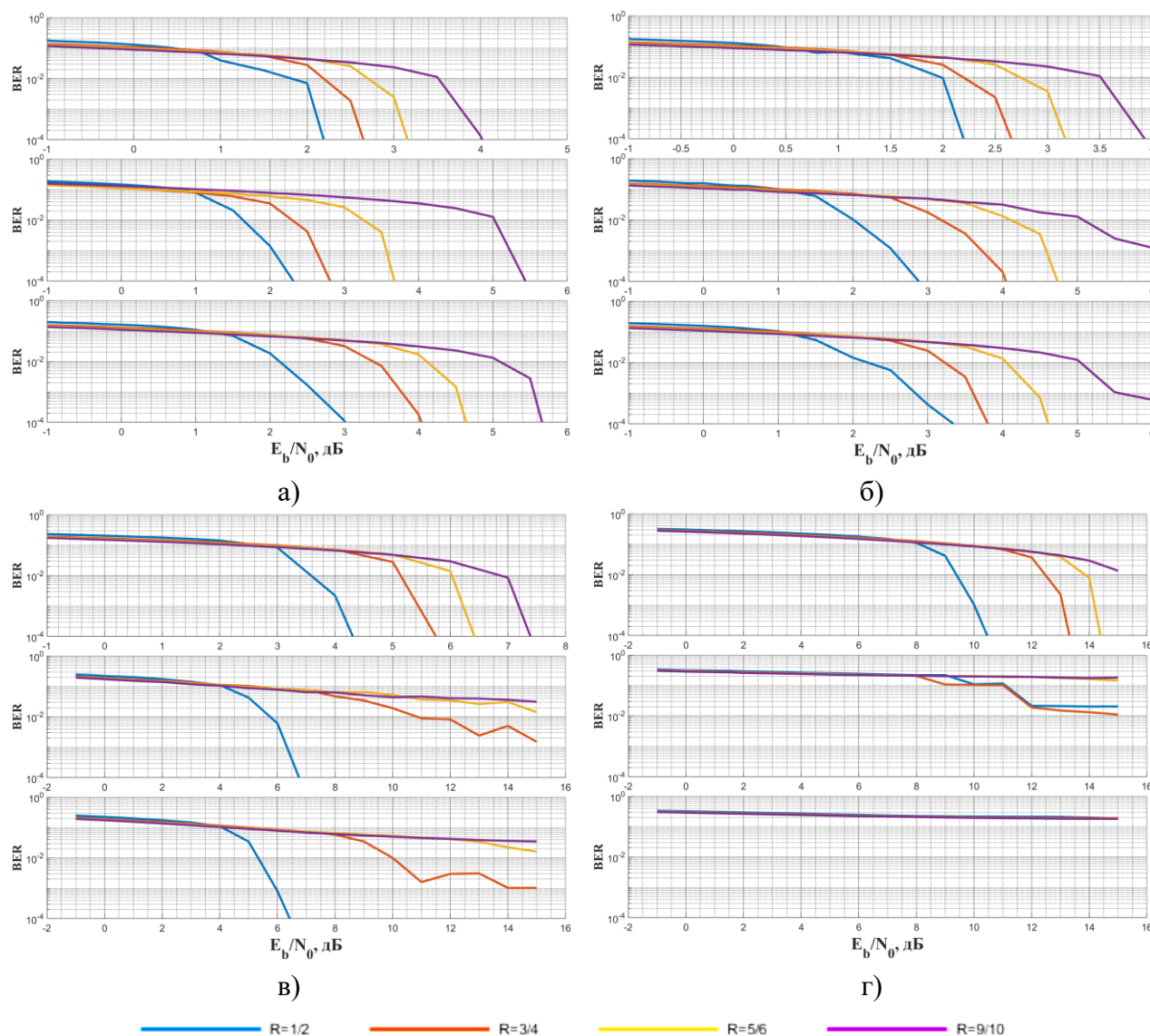


Рис. 8. Характеристики LDPC-кода и модуляции:
а) ФМ2; б) ФМ4; в) КАМ16; г) КАМ256

Из приведенных рисунков можно сделать следующие выводы.

Во-первых, эффективность исправления ошибок ТК со скоростью $R = 1/3$ значительно превосходит эффективность при $R = 1/2$, что особенно очевидно проявляется в РК.

Во-вторых, в случае если канал передачи обладает высоким качеством (высоким отношением сигнал/шум (ОСШ) и слабым затуханием), использование LDPC-кодов оказывается более эффективным по сравнению с ТК, поскольку они обеспечивают более высокую скорость передачи данных. Однако в противоположной ситуации (при низком ОСШ и сильном затухании) применение ТК демонстрирует большую эффективность, особенно при скорости кодирования $R = 1/3$.

В-третьих, с каскадным кодом, хотя он и обеспечивает меньшую эффективность исправления ошибок по сравнению с ТК и LDPC-кодами, сложность процессов кодирования и декодирования оказывается ниже. По этой причине

при использовании методов модуляции низкого порядка данный метод кодирования может применяться для уменьшения общей сложности системы.

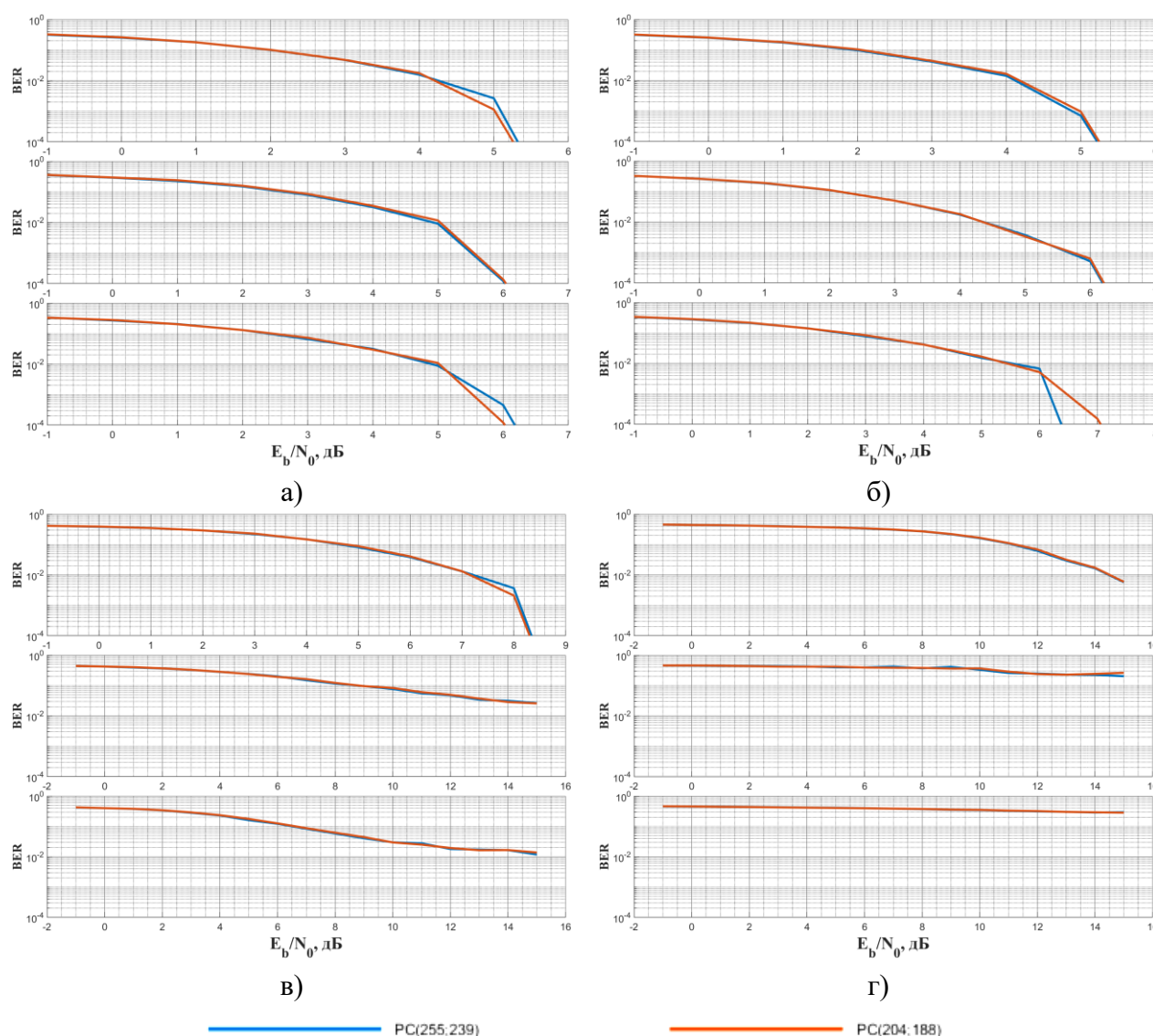


Рис. 9. Характеристики каскадного кода и модуляция:
а) ФМ2; б) ФМ4; в) КАМ16; г) КАМ256

В-четвертых, воздействие РК на качество принимаемого сигнала является весьма значительным для методов модуляции высокого порядка.

На основе полученных результатов была разработана адаптивная система с ОС, структура и принцип работы которой описаны выше. Для оценки качества состояния канала связи допустимое значение вероятности ошибки принимается в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-6} . Результаты анализа изменений методов кодирования и модуляции данной системы при передаче сигнала через каналы с АБГШ (голубой цвет), РК с частотой Доплера, равной нулю (зеленый цвет) и 100 (красный цвет), в прямом и обратном каналах передачи представлены соответственно на рисунках 10 и 11. Для каждого диапазона значений отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума (E_b/N_0 , аббр. от англ. Energy per Bit to

Noise Power Spectral Density Ratio) примененные методы кодирования и модуляции представлены в соответствующих блоках.

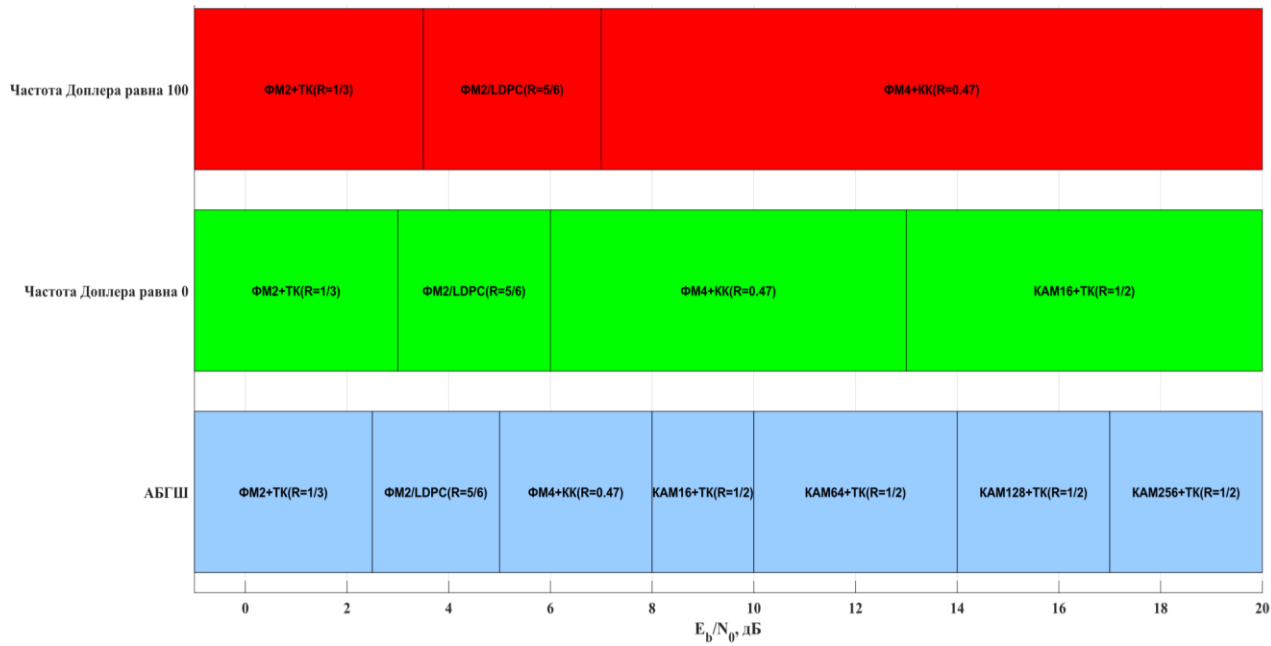


Рис. 10. Методы кодирования и модуляции, использованные в прямом канале

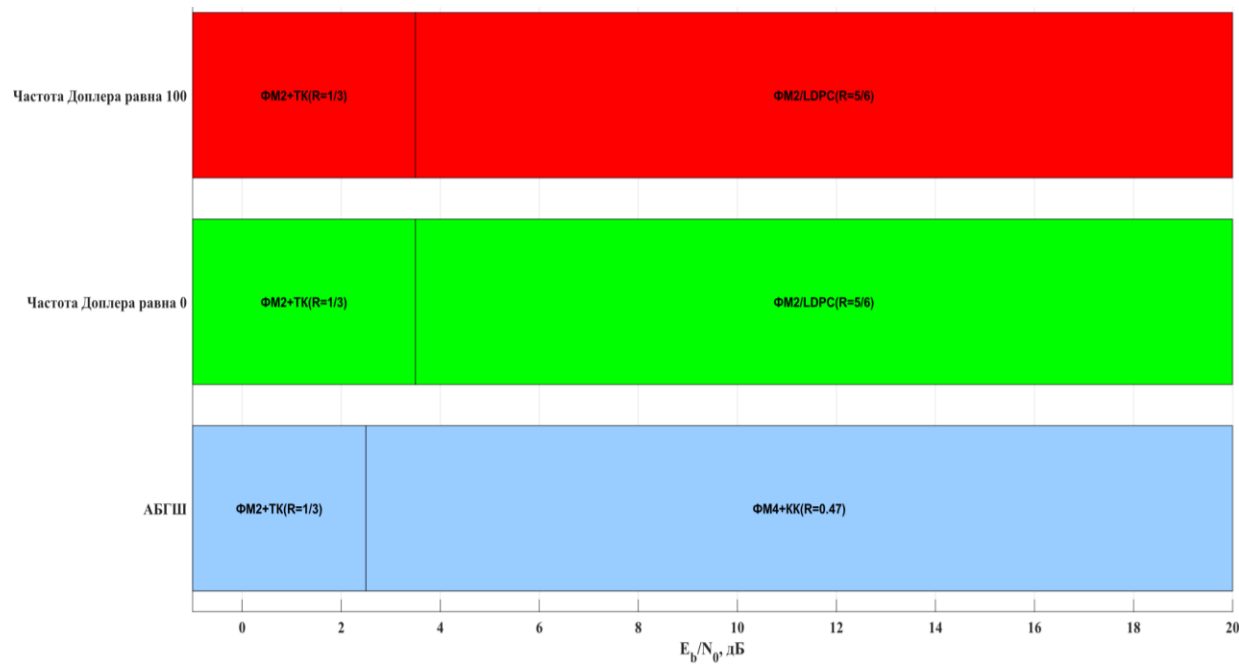


Рис. 11. Методы кодирования и модуляции, использованные в обратном канале

Заключение

В данной работе проведена оценка и сравнение эффективности современных методов кодирования с точки зрения способности исправления ошибок, скорости кодирования и сложности реализации. Эти оценки и сравнения были вы-

полнены в условиях воздействия различных помех, что позволило продемонстрировать влияние различных типов помех на процесс передачи данных. Применение рассмотренных методов кодирования в адаптивной системе с ОС также продемонстрировало эффективное управление передачей данных.

В дальнейшем планируется развитие представленного решения в направлении применения методов противодействия замираниям (например, метода разнесенного приема), что позволит снизить требования к исправлению ошибок. В таком случае можно будет использовать более простые методы кодирования, что приведет к уменьшению сложности системы.

Литература

1. Варгаузин В. А., Цикин И. А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352с. EDN: SDSMUX
2. Быховский М. А. Гиперфазовая модуляция оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018. 310 с.
3. Лукьянчик Я. И., Левенец А. В., Чье Е. У. Модель системы передачи данных с обратной связью и адаптивным выбором кодирования по состоянию канала связи // Информационные технологии XXI века. 2015. С. 506–513. EDN: UDRXTH
4. Кульбида В. А. Способы помехоустойчивого кодирования и декодирования для построения систем связи с адаптацией этих способов к состоянию канала // Техника радиосвязи. 2006. №. 11. С. 40–51. EDN: LTWRRX
5. Сидоркина Ю. А., Шахтарин Б. И., Балахонов К. А. Анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 6 (99). С. 108–116. EDN: TAVMVV
6. Зайцев Г. В., Лутков А. Н. Анализ эффективности турбодекодирования кодов произведения при различных вариантах обмена информацией между итерациями // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 3–8. EDN: WGCGXP
7. Небаев И. А. Анализ эффективности турбокодов в системах обработки и передачи данных: автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб.: СПбГУТ, 2013. 16 с.
8. Ghauri S. A., Ul Haq M. E., Iqbal M., Ur Rehman J. Performance Analysis of LDPC Codes on Different Channels // Proceedings of Eighth International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies (10–12 September 2014, Oxford, UK). 2014. P. 235–240. DOI: 10.1109/NGMAST.2014.34
9. Астахов Н. В., Башкиров А. В., Костюков А. С., Хорошайлова М. В., Чирков О. Н. Верификация LDPC-кодов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 74–77. EDN: XWKVNF
10. Dinesh Kumar D., Shantha Selvakumari R. Performance Analysis of Min-Sum Based LDPC Decoder Architecture for 5G New Radio Standards // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62. Part 7. P. 4965–4972. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.693. EDN: KPHEJN

11. Healy C. T., Anas A. R., Tsimenidis C. C. LDPC-Coded Modulation Performance Analysis and System Design // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 212166–212176. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3038082
12. Mergu K. Performance Analysis of Reed–Solomon Codes Concatenated with Convolutional Codes over AWGN Channel // APTIKOM Journal on Computer Science and Information Technologies. 2016. Vol. 1. Iss. 1. PP. 27–32. DOI: 10.11591/APTIKOM.J.CSIT.100
13. Архипкин А. Турбокоды – мощные алгоритмы для современных систем связи // Беспроводные технологии. 2006. № 1 (2). С. 63–64. EDN: MTGAAR
14. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник / под. ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М., 2004. 126 с. EDN: TPMDGJ
15. Kim J. Y, Poor H. V. Turbo-Coded Optical Direct-Detection CDMA System with PPM Modulation // Journal of Lightwave Technology. 2001. Vol. 19. Iss. 3. P. 312–323.
16. Mosleh M. F., Abid M. F. Evaluation of Rate Matching of Turbo Code for 3GPP LTE System // Optical and Wireless Technologies: Proceedings of OWT 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE). Vol. 472. Singapore: Springer, 2018. P. 401–410.
17. Голиков А. М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2016. 516 с. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/6138> (дата обращения 11.09.2004)
18. Кудряшов Б. Д. Основы теории кодирования: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 400 с.
19. Ковалев С. И., Винарь П. О. Методы построения оптимальных LDPC-кодов с большим минимальным обхватом // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сборник докладов Третьей Международной научной конференции (14–22 апреля 2022 г., Санкт-Петербург). СПб.: СПбГУАП, 2022. С. 202–205. DOI: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-202. EDN: APTEZP
20. Овчинников А. А., Фоминых А. А. Декодирование низкоплотностных кодов стандарта 5G с использованием статистических свойств источника // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сборник статей XXIII международной научной конференции (01–05 июня 2020 г., Санкт-Петербург). Ч. 1. СПб., 2020. С. 301–307. EDN: QBUQFL
21. Коротков Л. Н., Башкиров А. В., Свиридова И. В. Использование LDPC-кодов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6–3. С. 41–44. EDN: RXKQOT
22. Gomes M., Falcão G., Silva V., Falcão M., Faia P. HDL Library of Processing Units for Generic and DVB-S2 LDPC Decoding // Proceedings of the International Conference on Security and Cryptography. 2006. Vol. 1. PP. 17–24.
23. Майстренко В. А., Седунов Д. П. Сравнительный анализ декодирования каскадных укороченных кодов Рида–Соломона в адаптивных системах обмена данными с обычным декодированием // Техника радиосвязи. 2019. №. 3. С. 60–68. DOI: 10.33286/2075-8693-2019-42-60-68. EDN: NBBTGM

24. Самойлов А. Г., Сидоренко А. А. Применение каскадных помехоустойчивых кодов для повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 3. С. 18–22. EDN: TPXAWP

25. Aitsab O., Pyndiah R. Performance of Concatenated Reed–Solomon/Convolutional Codes with Iterative Decoding // Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 97, 03–08 November 1997, Phoenix, USA). 1997. PP. 934–938. DOI: 10.1109/GLOCOM.1997.638463

26. Kratochvíl T. Simulation and Application of DVB Channel Coding on Multimedia DSP Development Board // Proceedings of the 13th European Signal Processing Conference (04–08 September 2005, Antalya, Turkey). 2005. PP. 1–4.

27. Корчинский В. В., Большаков С. И. Оценка эффективности применения обратной связи в системе передачи данных // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 6. № 9 (60). С. 40–44. EDN: QBGNIF

28. Шувалов В. П., Захарченко Н. В., Шварцман В. О., Свет С. Д., Скворцов Г. И. и др. Передача дискретных сообщений: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1990. 464 с.

29. Томашевич В. С. Исследование характеристик обратного канала в беспроводных сетях связи // Проблемы информатики. 2009. № S1. С. 4–9. EDN: NBRZJJ

30. Куприянова О. В., Левенец А. В., Чье Е. У. Оценка состояния канала связи по статистике декодирования помехоустойчивых кодов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2015. №. 3 (38). С. 110–120. EDN: UMKWHN

31. Кочетова И. В., Левенец А. В. Имитационное моделирование системы передачи данных с адаптивным выбором помехоустойчивого кода по оценке состояния канала связи // Информатика и системы управления. 2020. № 4 (66). С. 17–24. DOI: 10.22250/isu.2020.66.17-24. EDN: KWWHIV

**Статья поступила 29 октября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 02 декабря 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.**

Информация об авторах

Фам Конг Куен – аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fam.kk@sut.ru.

Глушанков Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glushankov.ei@sut.ru

Ву Тхе Зуэт – аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: vutheduyet99@gmail.com

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67>
EDN: VZWUMY

Research on Adaptive Digital Communication Lines with Decision Feedback

K. K. Fam ✉, E. Glushankov, T. D. Vu

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem Statement. The advancement of efficient digital radio communication systems necessitates the development of methods that enhance both their energy and spectral efficiency. One approach to addressing this challenge involves assessing the state of the communication channel and selecting optimal modulation schemes within a digital transmission system equipped with feedback. **The aim of this study** is to investigate modern coding and modulation techniques applicable to feedback channels. The paper proposes methods for integrating these techniques into an adaptive feedback system in order to achieve optimal spectral and energy efficiency. **Methods.** A comparative analysis of various design approaches for adaptive feedback systems was conducted through simulation in the MATLAB environment. The simulations accounted for the influence of different types of noise on the data transmission process within feedback channels. **Scientific Novelty.** The novelty of this work lies in its comprehensive investigation and comparative analysis of contemporary coding methods and multi-level modulation techniques. Furthermore, the study presents recommendations for their effective application in adaptive communication systems. **Results.** As a result of this research, an adaptive data transmission system with feedback was developed. This system achieves higher data transmission rates compared to non-feedback systems, while still meeting the reliability requirements of the communication channel. **Practical Significance.** The proposed solution is recommended for scenarios that demand high data transmission reliability alongside high throughput. This is particularly relevant under conditions of poor signal quality, which may arise due to significant environmental interference such as in fading channels.

Key words: adaptive system, feedback channel, turbo code, cascade code, low-density parity-check code, Bose–Chaudhuri–Hocquenghem code, multi-position modulation, Rician channel, Doppler effect, MATLAB

Information about Authors

Fam Kong Kuen – Postgraduate at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: fam.kk@sut.ru.

Glushankov Evgeny – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: glushankov.ei@sut.ru

Vu The Duyet – Postgraduate at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: vutheduyet99@gmail.com