

ОЦЕНКА СРЕДСТВ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЫИГРЫША КОДА

Гладких А.А.¹, Мишин Д.В.², Аттаби А.Л.Х.¹, Кутузов В.И.¹, Уласюк Т.Г.³

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, РФ

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

³Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, РФ

E-mail: a_gladkikh@mail.ru

В статье представлен результат численного эксперимента по оценке асимптотических показателей энергетического выигрыша избыточного кода в условиях изменения отношения сигнал/шум для различных методов обработки принятого кодового вектора приемником. Формулируется и доказывается теорема равноценности энергетического выигрыша кода в условиях виртуального запроса на повторение комбинаций избыточного кода, для которых оказалась неприемлемой единственная перестановка столбцов информационной части порождающей матрицы эквивалентного кода. Приводятся сравнительные оценки результатов декодирования кодовых векторов в системе перестановочного декодирования с системой, для которой применяется традиционное алгебраическое декодирование. Приводятся новые данные по структуре замен для ряда блоковых систематических кодов на предмет выявленных особенностей организации процедуры коррекции переставленной матрицы эквивалентного кода. На основе прямого перебора возможных перестановок и оценки свойства не вырожденности переставленных матриц даются рекомендации по организации алгоритма перестановочного декодирования для анализируемых кодовых конструкций.

Ключевые слова: перестановочный декодер, эквивалентный код, порождающая матрица эквивалентного кода, энергетический выигрыш кода и его равноценность

Введение

Развитие мобильных систем связи в первую очередь связывается с их совершенствованием в области достижения высоких скоростей обмена данными за счет расширения полосы пропускания каналов связи, а также обеспечения высокой надежности обработки данных за счет применения помехоустойчивого кодирования [1–5]. Такие системы получили наименование систем сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC, Ultra-Reliable Low-latency Communications) [5; 6].

Разработка коротких кодов и связанных с ними алгоритмов декодирования в последнее время вновь вызвала большой интерес в сфере телекоммуникаций. Это явление обусловлено строгими требованиями к новым технологиям URLLC, например, применительно к технологии 5G, которые предполагают использование высокопроизводительных кодов с короткой длиной блока для снижения задержки передачи и декодирования с низкой сложностью для достижения низкой задержки обработки [5].

Чтобы удовлетворить требования URLLC к задержке, рассматриваются мягкие методы декодирования избыточных (n, k, d) кодов как подходящий инструмент декодирования для коротких двоичных блоковых BCH кодов (Боуза – Чоудхури – Хоквингема, БЧХ-коды) [7]. Здесь тра-

диционно n – длина кодового вектора, k – число информационных разрядов, а d – метрика Хэмминга. Главным недостатком при этом является естественное уменьшение параметра d по мере уменьшения длины кодового вектора n .

Для достижения целей URLLC в работе [8] было предложено использовать метод перестановочного декодирования (ПД), который обеспечивает в системе мягкого декодирования наиболее полное использование введенной в код избыточности.

Метод достаточно подробно описан в работах [9–13]. При этом его преимущества для двоичных блоковых кодов заключаются не только в способности исправлять ошибки, кратность которых превосходит показатель метрики Хэмминга, а еще и в том, что все перестановки символов по их показателям мягких решений могут быть априори занесены в память процессора приемника. Это исключает применение алгебраических методов к матричным преобразованиям при вычислении эквивалентных кодов (ЭК) для сформированных приемником перестановок, но требует определенных вычислительных затрат для оперативного поиска комбинации нумераторов перестановки в памяти микроконтроллера.

С учетом требований URLLC метод поиска требуемых данных в массиве возможных перестановок символов кодовых векторов линейно-

го характера или бинарный метод оказываются малопродуктивными. Поэтому предлагается использовать адресный метод выявления требуемой перестановки, а по ней далее отыскивать в когнитивной карте декодера эталонную структуру порождающей матрицы, позволяющей в последующем выявить порождающую матрицу ЭК.

Известная статистика перестановок коротких избыточных кодов

В работах [13] показано, что для двоичных кодов переставленные матрицы, объединяющие нумераторы наиболее надежных символов, могут оказаться вырожденными, что не позволяет получить ЭК, представляющий собой нежелательный исход процедуры формирования перестановки. В противном случае, переставленная матрица имеет определитель не равный нулю и ЭК код в системе может быть получен. Статистические данные, собранные в ходе математического моделирования системы формирования подобных матриц, показали, что с ростом длины кодовых векторов количество полезных перестановок сокращается, а число отрицательных решений увеличивается. Так для группового кода (7,4,3) доля производительных перестановок нумераторов (ППН), позволяющих без дополнительных вычислительных затрат сформировать ЭК, составляет 80%, а доля непроизводительных перестановок нумераторов (НПН) – 20%. При этом подмножество полезных перестановок и подмножество непродуктивных перестановок не пересекаются и составляют полное множество всех возможных перестановок нумераторов символов.

Для кода BCH (15,5,7) количество полезных перестановок уже оказывается на уровне 60%, а для кода (15,7,5) таких перестановок будет около 50%. Такое явление ставит под сомнение идею использования ПД для решения задач URLLC. В ряде работ [14–17] было предложено использовать две когнитивные карты: одну для хранения данных о ППН, а вторую для хранения данных о НПН. Но в отличие от известного метода псевдослучайной замены столбцов переставленной вырожденной матрицы размерности $k \times k$, предлагалось сопровождать перестановку НПН сведениями о нерациональных заменах нумераторов, которые однозначно не изменяют эффекта линейной зависимости [2; 18; 19].

Подобный подход позволяет избежать метода перебора в процедуре поиска линейно независимого столбца для устранения свойства вырожденности переставленной матрицы. Это положительно сказывается не только на вре-

менных показателях работы декодера в сторону их снижения. При этом повышается показатель ППН, например, для кода (15,5,7) он становится равным 90%. Подобную тенденцию в процентном соотношении показателей ППН и НПН повторяют коды Голя, но совершенно иная картина возникает при исследовании кодов с малой плотностью проверок на четность или хорошо известных кодовых конструкций с аббревиатурой LDPC.

Диаграмма процентного отношения ППН и НПН для LDPC кода (15,5,5) показана на рисунке 1.

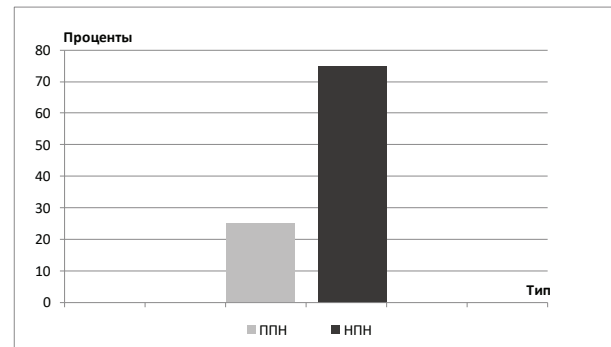


Рисунок 1. Диаграмма процентного отношения ППН и НПН для LDPC кода (10,5,5)

Основной причиной такого явления считается низкая плотность единичных элементов, характерная для кодов LDPC. Изучение тонкой структуры перестановок представленного кода показывает, что полное множество образующих комбинаций циклов для данного кода оказывается равно 207. Из них ППН составляет всего 51 комбинацию или 25%, а НПН – 156 комбинаций или 75%, при этом одноразовых замен потребуется 61, а двойных замен потребуется 95. В качестве высоковероятного предположения следует указать, что подобная картина с доминирующим превосходством НПН относительно ППН будет сохраняться для любого кода из разряда LDPC.

Оценим энергетический выигрыш кода (ЭВК) различных кодов в условиях, когда в системе ПД осуществляются все замены, если замены кратности более единицы запрашиваются для повторения данных или используют принцип каскадного кодирования для исправления указанных комбинаций кратности более единицы.

Принцип оценки эффективности системы связи по параметру энергетического выигрыша кода

В ходе аналитического моделирования системы связи с различными методами защиты информации от ошибок и использованием критерия ЭВК в работе использовались аналитические выраже-

ния, связанные с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), который порождает независимый поток битовых ошибок. При этом изменение дисперсии σ^2 осуществлялось в пределах от 1 до значения 0,01, что обеспечило практически непрерывное изменение отношения сигнал/шум (ОСШ):

$$h(\sigma^2) = 10 \log \frac{E_b}{2\sigma^2} \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где E_b – энергия сигнала на бит [1; 4].

Вероятность ошибки на бит оценивалась по формуле:

$$p_b(\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(x-\sqrt{E_b})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (2)$$

а вероятность ошибки на комбинацию оценивалась в соответствии с выражением:

$$P_{com}(\sigma^2) = \sum_{i=1}^n \frac{n!}{i! \times (n-i)!} p_b(\sigma^2)^i (1-p_b(\sigma^2))^{n-i}, \quad (3)$$

при этом значение переменной i в зависимости от метода декодирования изменялось [1; 2]. В случае алгебраического метода исправления ошибок переменной присваивалось значение $i = d_{\min}$, при использовании метода ПД $i = (n-k)$. В ряде иных случаев значение переменной оговаривается в тексте [1; 8; 9; 20].

Для точного выявления особенностей вероятностных характеристик декодеров в работе принята концепция сравнения вероятностей ошибочных решений на бит. Поэтому по результатам работы декодера используется оценочное выражение вида:

$$P_{db} \approx \frac{P_{com}(\sigma^2)}{n}. \quad (4)$$

В этом случае сравнение выражений (2) и (4) считается корректным.

Для дальнейшего описания реализации процедуры ПД и оценки получаемого ЭВК необходимо сформулировать и доказать ряд теоретических положений.

Утверждение 1. Для получения полной информации о переданном дискретном сообщении необходимо достоверно принять все без исключения комбинации цифровой последовательности, например, входящие в пакет.

Принципиально подобная задача в сетевых структурах решается на канальном уровне. Для этого используются алгебраические или алгоритмические методы повышения достоверности [1–3].

Утверждение 2. При использовании метода ПД в случае возникновения НПН параметр ЭВК снижается на величину обратно пропорциональной процентной доли таких перестановок.

Действительно: пусть декодер в ходе обработки данных затрачивает энергию на передачу комбинации длин n бит равную nE_b . Пусть де-

кодер выявил перестановку вида НПН и пусть виртуально вместо коррекции переставленной матрицы приемник посылает запрос на повторение принятой ранее комбинации с неудачной перестановкой. Без учета затрат энергии на сигнал запроса о повторе данных к передатчику в указанных условиях система связи увеличивает энергетические затраты ровно в два раза.

Следовательно, в описанных условиях при передаче двух комбинаций половина из них при повторе данных потребовала 100% дополнительной энергии. При удачном приеме повторной комбинации требуемый уровень достоверности достигнут при обработке указанных двух комбинаций с затратами энергии на бит равной $E_b^{request} = 1/2 = 0,5$. Но одна комбинация в указанном corteже данных равна 50%, следовательно, переходя к процентным показателям НПН для конкретного кода логично указать, что относительный уровень энергии сигнала на бит составит $E_b = 1/1,5 \approx 0,67$.

Отсюда появляется возможность оценить энергетические потери при известных из статистических испытаний различных кодов по мощности множества комбинаций НПН. Если для кода (7,4,3) это множество составляет 20%, то в системе связи энергия на бит составит $E_{b(7,4,3)} = 1/1,2 \approx 0,83$.

В случае использования процедуры коррекции значений НПН энергетические затраты на бит системы связи составят $E_{b(7,4,3)} = 1$, которые будут обеспечиваться за счет внутренней работы декодера по коррекции перестановок НПН. На рисунке 2 представлены характеристики системы связи с помехоустойчивым кодированием при использовании двоичного кода (7,4,3) в условиях действия АБГШ. Характеристика с номером 1 представляет вероятность ошибки на бит без использования процедуры исправления ошибок, определяемой с использованием выражения (2). Нормативную прямую данная зависимость пересекает в точке с аргументом, равным 10,5 дБ.

Использование алгоритма с исправлением одной ошибки, характерного для данного кода, представляется на графике зависимостью с номером 2 и оценивается выражением (3), показывая изменение вероятности ошибки на комбинацию. Используя выражение (4) получаем характеристику 3 вероятности ошибки на бит в условиях исправления одной ошибки. В этом случае сравнение зависимостей 1 и 3 представляется корректным. Характеристика 3 пересекает нормативную прямую в точке с аргументом 8,0 дБ, что указывает на ЭВК кода, равный 2,5 дБ.

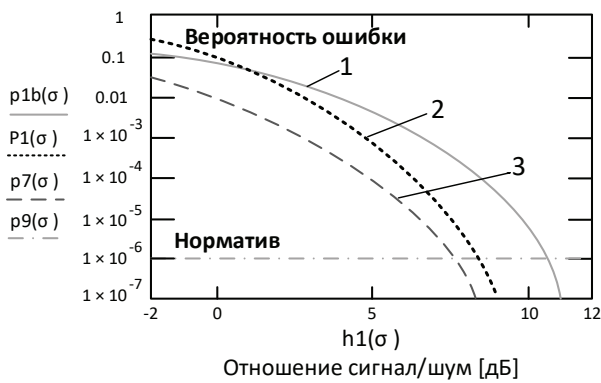


Рисунок 2. Оценка ЭВК кода (7,4,3) в условиях традиционного алгебраического декодирования

В случае применения в системе связи метода ПД параметр i в выражении (3) увеличивается, что однозначно повышает ЭВК, используемого в системе избыточного кода. Это происходит по причине перемещения символов с низкими показателями надежности в зону проверочных разрядов, что в конечном итоге обеспечивает при декодировании большее значение ЭВК.

На рисунке 3 представлена сравнительная характеристика кода (7,4,3) в условиях алгебраического декодирования данных и в условиях ПД, когда значение равно $E_{b(7,4,3)} = 1$. Характеристики 1 и 2 имеют одинаковое значение с аналогичными кривыми, представленными на рисунке 1, характеристика 4 представляет изменение вероятности ошибки на бит в условиях применения ПД.

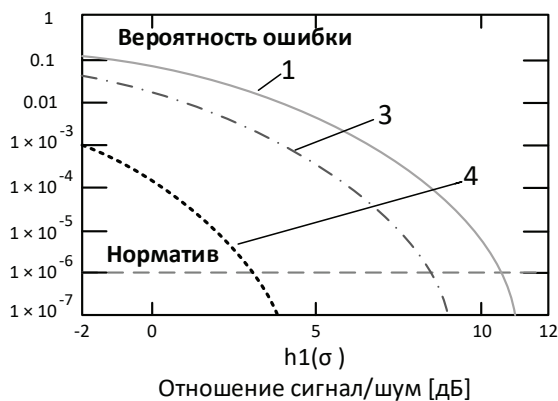


Рисунок 3. Оценка ЭВК кода (7,4,3) в условиях алгебраического декодирования и ПД

Аргумент функции 4 при пересечении с нормативной прямой составляет 3,0 дБ, что обеспечивает асимптотическое значение ЭВК на уровне 7,5 дБ.

Вызывает интерес явление, которое возникает при обработке данных в системе ПД при гипотетическом повторе 20% данных и снижении при этом равнозначного значения параметра E_b до 0,83. На рисунке 4 представлены две характеристики 5 и 6.

Зависимость 5 представляет вероятность ошибки на бит, когда $E_b = 0,83$. Зависимость 6 определялась в условиях, когда $E_b = 1$. Трассировка данных в точках пересечения характеристик с нормативной прямой показывает, что проигрыш функции 5 относительно кривой 6 составляет около 0,9 дБ. Исследования показали, что выявленное процентное превосходство подмножеств НПН над подмножествами ППН для кодов ВСН не приводит к существенному проигрышу по параметру ЭВК. Но в любом случае отказ от коррекции перестановок НПН ухудшает показатель выигрыша кода примерно до 1 дБ. В этом случае сохраняется целесообразность коррекции перестановок из подмножества НПН для таких кодов.

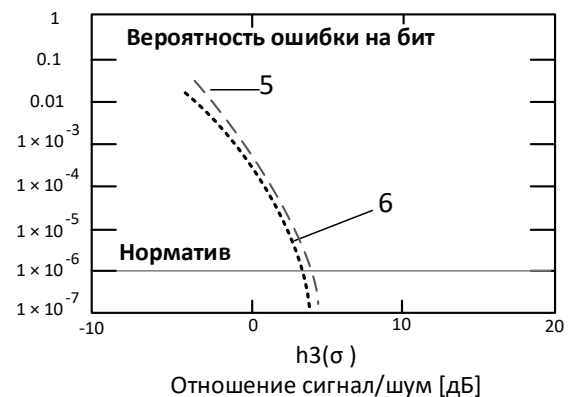


Рисунок 4. Оценка проигрыша ЭВК при уменьшении значения E_b

На рисунке 5 показано поведение характеристик кода LDPC (15,5,5). При этом с учетом количества НПН значение энергии сигнала на бит принималось равным $E_b = 0,63$.

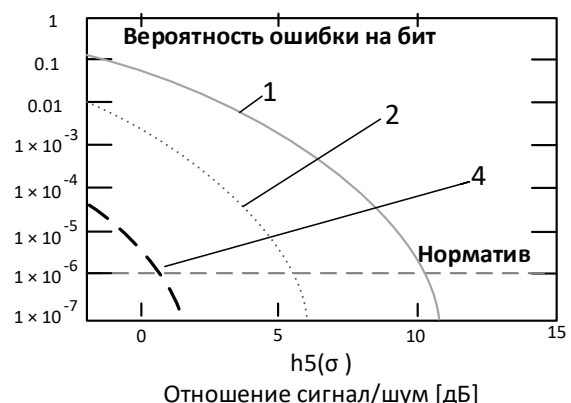


Рисунок 5. Асимптотическая оценка ЭВК кода LDPC в условиях алгебраического декодирования (зависимость – 2) и с использованием ПД (зависимость 3)

На рисунке 5 кривая 1 соответствует вероятности ошибки в АБГШ. Зависимость 2 представляет процедуру алгебраического декодирования

с исправлением ошибок в метрике Хэмминга, а зависимость 3 соответствует системе ПД с исправлением ошибок, кратных числу проверочных разрядов. Следует отметить, что корректировка переставленной матрицы кода LDPC требует, в основном, двойных подстановок, что однозначно увеличивает объем памяти когнитивной карты НПП и одновременно повышает сложность реализации декодера. Можно показать, что плотность единичных элементов в порождающей матрице кода LDPC (15,5,5) к общему числу элементов составляет значение 0,33, кода BCH (15,7,5) – 0,35, а для кода BCH (15,5,7) это значение будет равно 0,49.

Специфические особенности перестановок

Изучение тонкой структуры ППП и НПП для различных кодов выявило ряд их особенностей, которые потребовали внести изменения в основной алгоритм ПД. Экспериментально было установлено, что в условиях, когда значение n оказывалось кратным значению k , то в условиях равных значений интервалов между нумераторами невозможно указать однозначно структуру порождающей матрицы эквивалентного кода. На рисунке 6 показаны примеры периодических перестановок для двух кодов, причем для кода BCH определитель переставленной матрицы не равен нулю, а для кода LDPC определитель такой матрицы равен нулю.

Код BCH (15, 5, 7)				
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15

Код LDPC (15, 5, 5)				
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15
1	4	7	10	13
2	5	8	11	14
3	6	9	12	15

Рисунок 6. Примеры периодических перестановок

Утверждение 3. Если значения основного избыточного кода n и k возможно представить кратным отношением, равным натуральному числу N , то невырожденная переставленная матрица требует коррекции хотя бы одного столбца.

Действительно, в работе [20] установлено, что в алгоритме декодирования важно выполнить три

шага: во-первых, по принятой приемником перестановке выявить ее состав, относящийся к образующей комбинации цикла (ОКЦ); во-вторых, оценить расстояние принятой перестановки от ОКЦ в цикле до принятой перестановки; в-третьих, трансформировать порождающую матрицу, связанную в когнитивной карте с ОКЦ.

Правило трансформации гласит: если движение в цикле осуществляется в пределах одной орбиты, в порождающей матрице ОКЦ переставляются столбцы справа налево, а при переходе в другую локальную орбиту переставляются строки исходной порождающей матрицы. Следовательно, в периодически повторяющемся цикле нет возможности определить ОКЦ, а значит нет возможности выполнить необходимый отсчет расстояния. Подобная перестановка не может быть интерпретирована правильно. Поэтому производство одной подстановки нарушает цикличность данных, а ОКЦ однозначно определяется структурой порождающей матрицы эквивалентного кода.

Следствие: комбинация нумераторов с периодическим следованием межинтервальных оценок, равных N , должна размещаться в когнитивной карте НПП.

Принципиально нет необходимости ради единственной перестановки размещать в декодере специальную когнитивную карту, но поскольку подобная перестановка требует коррекции только одиночной подстановкой, то целесообразность включения указанной комбинации в когнитивную карту НПП очевидна.

В системах ПД для ускорения процедуры сортировки мягких решений символов рекомендуется формировать их в целочисленном формате. Для этого в работах [8; 10] предлагается использовать линейную функцию вида:

$$\lambda(Z_i) = \left\lfloor \frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{E_b}} \times Z_i \right\rfloor, \quad (5)$$

где $\lambda(Z_i)$ – целочисленное мягкое решение сигнала (ЦМРС) его текущего значения Z_i . В выражении (5) параметр $\lambda_{\max}$ обычно принимают равным семи [1; 8]. Тогда потребуется всего три бита для нумерации 8 значений ЦМРС от 0 до 7. Для выявления частоты формирования названных ЦМРС в канале с АБГШ была разработана имитационная модель подобного канала связи. Результаты испытаний модели и объем выборки приведены на рисунках 7 и 8.

На рисунке 7 показаны результаты испытания модели в условиях, кода ОСШ принималось равным 0 дБ, а на рисунке 8 это отношение принима-

лось равным 10 дБ. При этом длина комбинации принималась равной 15 битам. Из графиков видно, что в указанных случаях при передаче цифровых данных формируется достаточное количество надежных ЦРМС.

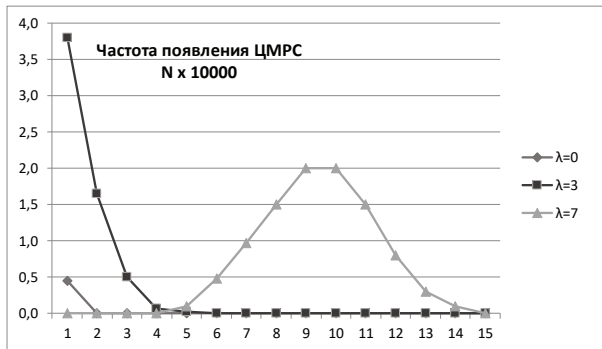


Рисунок 7. Результаты испытаний модели при ОСШ, равном 0 дБ

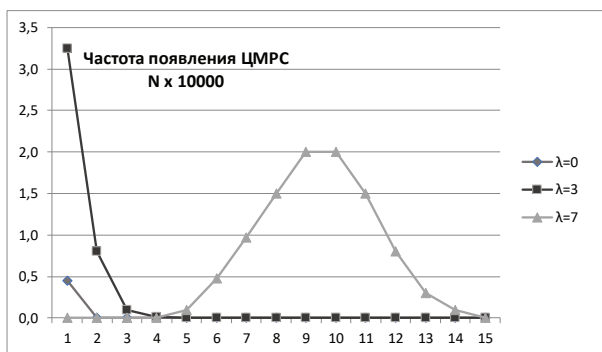


Рисунок 8. Результаты испытаний модели при ОСШ, равном 10 дБ

Заключение

Показано, что низкая плотность единичных элементов в порождающей матрице кодов LDPC контрпродуктивна для их использования в системах ПД. Во многом в ходе обработки данных для таких кодов приемнику придется выполнять двойные коррекции переставленных вырожденных матриц, что повышает сложность реализации декодера. При этом потенциальные возможности этих кодов остаются высокими.

В системах сенсорных сетей в ходе обработки данных, поступающих от датчиков, в системах управления беспилотными средствами, мобильными робототехническими устройствами метод ПД обеспечивает максимально возможный выигрыш ЭВК, что делает его актуальным для защиты цифровых данных от влияния мешающих факторов в этой предметной области.

В качестве перспективы исследований следует указать оценку возможностей метода в системе LoRa (Long Range).

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2007. 1104 с.
2. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / пер. с англ. В.Б. Афанасьева. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
3. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.
4. Аджемов А.С., Санников В.Г. Общая теория связи: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 624 с.
5. Efficient decoders for short block length codes in 6G URLLC / С. Yue [et al.] // IEEE Communications Magazine. 2023. Vol. 61, no. 4. P. 84–90. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200275
6. Probability-based ordered-statistics decoding for short block codes / С. Yue [et al.] // IEEE Communications Letters. 2021. Vol. 25, no. 6. P. 1791–1795. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3058978
7. Segmentation-discarding ordered-statistic decoding for linear block codes / С. Yue [et al.] // 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa, USA, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014173
8. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52–56.
9. Coding methods and permutation decoding in the systems for network processing of data / A.A. Gladkikh [et al.] // International Journal of Control and Automation. 2020. Vol. 13, no.1. P. 93–110.
10. Ганин Д.В., Дамдам М.А.Я., Савкин А.Л. Перестановочное декодирование в маломощных беспроводных сенсорных сетях // Автоматизация процессов управления. 2022. № 2 (68). С. 37–44. DOI: 10.35752/1991-2927-2022-2-68-37-44
11. Оценка критериев эффективности защиты данных от ошибок на базе перестановочного декодирования / А.В. Новоселов [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 27–34. DOI: 10.35752/1991-2927_2022_3_69_27
12. Саид Б.А.С., Пчелин Н.А. Модификация способа оценивания мягких решений символов и его верификация // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (67). С. 60–67. DOI: 10.35752/1991-2927-2022-1-67-60-67
13. Оценка статистических характеристик пере-

- становочного декодера методом его про-грамм-ной реализации / А.Л.Х. Аттаби [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91–98. DOI:10.35752/1991-2927_2023_2_72_91
14. Структура и взаимосвязь когнитивных показателей в системе перестановочного декодирования / А.А. Ничунаев [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2023. № 4 (74). С. 126–133. DOI: 10.35752/1991-2927_2023_4_74_126
15. Перестановочное декодирование с системой адаптированных альтернативных решений / А.А. Гладких [и др.] // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 4. С. 73–78.
16. Исследование процессов когнитивной обработки данных в системах радиосвязи с перестановочным декодированием / Д.В. Мишин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2024. Т. 27, № 1. С. 103–112. DOI: 10.18469/1810-3189.2024.27.1.103-112
17. Алгоритмы взаимодействия когнитивных карт в процедуре перестановочного декодирования двоичных кодов / А.А. Гладких [и др.] // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 1. С. 71–76.
18. Брынза А.А. Априорное формирование когнитивных карт непроизводительных решений в системе перестановочного декодирования // Автоматизация процессов управления. 2024. Т. 78, № 4. С. 18–23. DOI: 10.35752/1991-2927_2024_4_78_18
19. Математическое моделирование защищенных многоточечных сеансов видеоконференцсвязи многоуровневыми графами / А.А. Гладких [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 1 (85). С. 31–43. DOI: 10.18469/ikt.2024.22.1.04
20. Ничунаев А.А. Особенности согласования систем управления и измерения с системами мобильной связи пятого поколения // Автоматизация процессов управления. 2024. Т. 77, № 3. С. 28–34. DOI: 10.35752/1991-2927_2024_3_77_28
- Дата поступления 17.01.2025
Дата принятия 18.02.2025

Гладких Анатолий Афанасьевич, д.т.н., профессор кафедры радиотехники, телекоммуникаций и защиты информации (РТ и ЗИ) Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск ул. Северный Венец, 32. Тел. +7 909 357-78-37. E-mail: a_gladkikh@mail.ru

Мишин Дмитрий Викторович, д.т.н., профессор кафедры радиоэлектронные системы (РЭС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 960 816-24-46. E-mail: d.mishin@psuti.ru

Аттаби Акил Латиф Худайр, аспирант кафедры РТ и ЗИ УлГТУ. 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск ул. Северный Венец, 32. Тел. +7 929 797-62-82. E-mail: aqeel.attaby@gmail.com

Кутузов Владислав Игоревич, аспирант кафедры РТ и ЗИ УлГТУ. 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. Тел. +7 917 601-62-82. E-mail: kutuzovvladislav@mail.ru

Уласюк Татьяна Георгиевна, старший преподаватель кафедры обеспечения авиационной безопасности (ОАБ) Ульяновского института гражданской авиации (УИ ГА). 432001, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8. Тел. +7 917 610-55-43. E-mail: tgu-7@yandex.ru

UDC 621.391

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.1.05

EVALUATION OF PERMUTATION DECODING TOOLS ACCORDING TO THE CRITERION OF THE CODE ENERGY GAIN

Gladkikh A.A.¹, Mishin D.V.², Attabi A.L.X.¹, Kutuzov V.I.¹, Ulasyuk T.G.³

¹*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation*

²*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

³*Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russian Federation*

E-mail: a_gladkikh@mail.ru

The article presents the result of a numerical experiment held in order to evaluate the asymptotic parameters of the energy gain of a redundant code under conditions of a change in the signal-to-noise ratio for various methods of processing the received code vector by the receiver. The theorem of equivalence of the energy gain of the code is formulated and proved in the conditions of a virtual request for repetition of combinations of redundant code, for which a single permutation of the columns of the information part of the equivalent code generating matrix proved unacceptable. Comparative estimates of the results of decoding code vectors in a permutation decoding system with a system for which traditional algebraic decoding is used are provided. New data on the structure of substitutions for a number of block systematic codes are presented for the revealed features of the organization of the procedure for correcting the rearranged matrix of the equivalent code. Based on a direct enumeration of possible permutations and an assessment of the non-degeneracy property of rearranged matrices, recommendations on the organization of a permutation decoding algorithm for the analyzed code structures are given.

Keywords: *permutation decoder, equivalent code, generating matrix of the equivalent code, energy gain of the code and its equivalence*

Gladkikh Anatoly Afanasyevich, Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; Professor of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 909 357-78-37. E-mail: a_gladkikh@mail.ru

Mishin Dmitry Viktorovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radioelectronic Systems Department; Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 960 816-24-46. E-mail: d.mishin@psuti.ru

Attabi Akil Latif Khudair, Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; PhD Student of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security Department. Tel. +7 929 797-62-82. E-mail: aqeel.attaby@gmail.com

Kutuzov Vladislav Igorevich, Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; PhD Student of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security Department. Tel. +7 917 601-62-82. E-mail: kutuzovvladislav@mail.ru

Ulasyuk Tatiana Georgievna, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, 8/8, Mozhaisky Street, Ulyanovsk, 432001, Russian Federation; Senior Teacher of Aviation Security Department. Tel. +7 917 610-55-43. E-mail: tgu-7@yandex.ru

References

1. Sklyar B. *Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Applications*. Moscow: Williams, 2007, 1104 p. (In Russ.)
2. Morelos-Saragosa R. *The Art of Noise-Tolerant Coding. Methods, Algorithms, and Applications*. Transl. from English by V.B. Afanasiev. Moscow: Technosphere, 2005, 320 p. (In Russ.)
3. Peterson W., Ueldon E. *Error-Correcting Codes*. Moscow: «Mir», 1976, 594 p. (In Russ.)
4. Adzhemov A.S., Sannikov V.G. *General Theory of Communication: Textbook for University*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2018, 624 p. (In Russ.)
5. Yue C. et al. Efficient decoders for short block length codes in 6G URLLC. *IEEE Communications Magazine*, 2023, vol. 61, no. 4, pp. 84–90. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200275
6. Yue C. et al. Probability-based ordered-statistics decoding for short block codes. *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 1791–1795. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3058978
7. Yue C. et al. Segmentation discarding ordered-statistic decoding for linear block codes. *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Waikoloa, USA, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014173
8. Gladkikh A.A. Permutation decoding as a tool to improve the energy efficiency of data exchange systems. *Elektrosvyaz*, 2017, no. 8, pp. 52–56. (In Russ.)

9. Gladkikh A.A. et al. Coding methods and permutation decoding in the systems for network processing of data. *International Journal of Control and Automation*, 2020, vol. 13, no.1, pp. 93–110.
10. Ganin D.V., Damdam M.A.Y., Savkin A.L. Permutation decoding in low-power wireless sensor networks. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2022, no. 2 (68), pp. 37–44. DOI: 10.35752/1991-2927-2022-2-68-37-44 (In Russ.)
11. Novoselov A.V. et al. Evaluation of criteria for the effectiveness of data protection against errors based on permutation decoding. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2022, no. 3 (69), pp. 27–34. DOI: 10.35752/1991-2927_2022_3_69_27 (In Russ.)
12. Said B.A.S., Pchelin N.A. Modification of the method of evaluating soft solutions of symbols and its verification. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2022, no. 1 (67), pp. 60–67. DOI: 10.35752/1991-2927-2022-1-67-60-67 (In Russ.)
13. Attabi A.L.Kh. et al. Evaluation of statistical characteristics of a permutation decoder by its software implementation statistical. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2023, no. 2 (72), pp. 91–98. DOI: 10.35752/1991-2927_2023_2_72_91 (In Russ.)
14. Nichunaev A.A. et al. Structure and relationship of cognitive indicators in the system of permutational decoding. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2023, no. 4 (74), pp. 126–133. DOI: 10.35752/1991-2927_2023_4_74_126 (In Russ.)
15. Gladkikh A.A. et al. Permutation decoding with a system of adapted alternative solutions. *Cifrovaya obrabotka signalov*, 2023, no. 4, pp. 73–78. (In Russ.)
16. Mishin D.V. et al. Research of cognitive data processing in radio communication systems with permutation decoding. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 103–112. DOI: 10.18469/1810-3189.2024.27.1.103-112 (In Russ.)
17. Gladkikh A.A. et al. Permutation decoding with a system of adapted alternative solutions. *Cifrovaya obrabotka signalov*, 2024, no. 1, pp. 71–76. (In Russ.)
18. Brynza A.A. A priori formation of a cognitive map of unproductive decisions in the permutative decoding system. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2024, no. 4 (78), pp. 18–23. DOI: 10.35752/1991-2927_2024_4_78_18 (In Russ.)
19. Gladkikh A.A. et al. Mathematical modeling of secure multipoint video conference sessions using multilayer graphs. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2024, vol. 22, no. 1 (85), pp. 31–43. DOI: 10.18469/ikt.2024.22.1.04 (In Russ.)
20. Nichunaev A.A. Features of coordinating the control and measurement systems with the 5G mobile communication systems. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2024, no. 3 (77), pp. 28–34. DOI: 10.35752/1991-2927_2024_3_77_28 (In Russ.)

Received 17.01.2025

Accepted 18.02.2025