

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

А.С. ВАБИЩЕВИЧ<sup>1</sup>, А.Д. ВАСЮТИЧ<sup>1,2</sup>, А.В. КУРИЛОВИЧ<sup>1</sup>, Ц. МА<sup>1</sup>, С.Х. ЖЭНЬ<sup>1</sup>,  
В.Ю. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,  
2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

**Аннотация.** В статье рассматриваются алгоритмы помехоустойчивого кодирования и декодирования. Описаны алгоритмы двухэтапного декодирования (HD2) и трехэтапного декодирования (HD3), алгоритм RCDS, а также алгоритм Repeat для кодов с повторением. Проведен сравнительный анализ корректирующей способности этих алгоритмов.

**Ключевые слова:** помехоустойчивое кодирование, двумерный код Хэмминга, корректирующая способность, блочные ошибки, адаптивное декодирование.

### Введение

При передаче данных по каналам связи неизбежно возникают ошибки, вызванные такими факторами, как шум, искажения и помехи. Для их минимизации применяется помехоустойчивое кодирование, которое позволяет обнаруживать и исправлять ошибки за счет добавления проверочной информации. Существует множество типов кодов, различающихся корректирующей способностью, скоростью и вычислительной сложностью, что определяет их эффективность в конкретных условиях эксплуатации [1, 2].

Одним из наиболее известных методов блочного помехоустойчивого кодирования являются коды Хэмминга, позволяющие исправлять одиночные ошибки в каждом блоке передаваемой последовательности. Классический код Хэмминга (7,4) позволяет исправлять одну ошибку на каждые четыре информационных бита, дополняя их тремя проверочными битами [3]. Для увеличения корректирующей способности разработаны двумерные коды Хэмминга, основанные на их одномерных аналогах, теоретически позволяющие исправить до четырех случайных ошибок в каждом блоке [4]. Однако существующие методы декодирования, такие как двухэтапный (HD2) и трехэтапный (HD3), не всегда обеспечивают максимальную исправляющую способность двумерного кода Хэмминга, что ограничивает их практическое применение [3–5].

В работе рассматриваются четыре алгоритма декодирования: двухэтапный (HD2), трехэтапный (HD3), адаптивный RCDS, а также алгоритм с повторением Repeat. В ходе исследования проведен анализ эффективности алгоритмов помехоустойчивого кодирования, произведена оценка их корректирующей способности при различных условиях передачи данных.

### Алгоритм двухэтапного декодирования HD2

Двухэтапное декодирование (2 stage Hamming Decoder, HD2) двумерного кода Хэмминга представляет собой последовательную обработку ошибок, разделенную на два этапа: анализ строк кодовой матрицы и анализ столбцов. Этот алгоритм основан на вычислении синдромов строк и столбцов, что позволяет локализовать ошибочные биты и выполнить их исправление.

На первом этапе декодирования вычисляются синдромы строк, которые используются для обнаружения позиций ошибочных символов внутри строк кодовой матрицы. Проверочная матрица Хэмминга помогает контролировать целостность данных, а синдромы позволяют выявить отклонения от корректного кодового слова. После анализа строк выполняется коррекция обнаруженных ошибок, в результате чего формируется промежуточная декодируемая матрица.

На втором этапе выполняются аналогичные операции для столбцов кодовой матрицы, что позволяет дополнительно выявить ошибки, нескорректированные на первом этапе. Таким образом, к концу обработки формируется окончательная матрица, содержащая исправленные данные [6].

Несмотря на эффективность двухэтапного алгоритма, его корректирующая способность ограничена и не позволяет исправлять все возможные комбинации ошибок, определенные конструктивным кодовым расстоянием двумерного кода Хэмминга. В частности, существуют варианты четырехкратных ошибок, которые данный алгоритм не может устранить, что снижает его адаптивность при высоком уровне помех. В связи с этим для повышения эффективности кодирования используются усовершенствованные алгоритмы, такие как трехэтапное декодирование (HD3), а также адаптивные алгоритмы, обеспечивающие повышенную исправляющую способность и минимизацию уровня блочных ошибок.

### **Алгоритм трехэтапного декодирования HD3**

Трехэтапное декодирование (3 stage Hamming Decoder, HD3) двумерного кода Хэмминга представляет собой расширение двухэтапного алгоритма, включающее дополнительный анализ кодовой матрицы на третьем этапе, что позволяет повысить корректирующую способность.

На первом этапе выполняется анализ синдромов строк (аналогично процессу при двухэтапном декодировании). Проверочная матрица Хэмминга используется для выявления ошибочных символов, после чего выполняется их корректировка, формируется промежуточная матрица. На втором этапе проводится аналогичный процесс для столбцов, что позволяет выявить и исправить ошибки, не устраненные на первом этапе. На третьем этапе осуществляется дополнительный анализ исправленных данных, который позволяет локализовать и устранить сложные случаи распределения ошибок. Этот этап играет ключевую роль в увеличении корректирующей способности алгоритма, позволяя исправить ошибки, не обработанные на предыдущих этапах [6].

Таким образом, трехэтапное декодирование является усовершенствованной версией HD2, обеспечивающей более высокую корректирующую способность, что приводит к снижению вероятности появления ошибок на выходе декодера, что делает его более эффективным в условиях высокой зашумленности канала.

### **Алгоритм декодирования RCDOS**

Алгоритм RCDOS представляет собой трехэтапное итеративное декодирование с жесткими правилами принятия решений, включающее операцию стирания ошибок и процедуру выбора оптимальной стратегии декодирования. Ключевое отличие данного алгоритма от других заключается в проведении дополнительного этапа анализа ошибок перед непосредственным декодированием.

В процессе работы алгоритм параллельно вычисляет синдромы строк и столбцов полученного кодового слова. Если в строке или столбце произошла ошибка, синдром данной строки или столбца не равен нулевому вектору, что позволяет идентифицировать ошибочные позиции. Ошибки фиксируются в регистрах строк и столбцов, где единичное значение указывает на наличие ошибки, а нулевое – на ее отсутствие. Сравнение общего количества ошибочных строк и столбцов позволяет определить стратегию декодирования, что называется процедурой принятия решения.

После этого выполняется трехэтапное декодирование, стратегия которого определяется распределением ошибок. Если количество ошибочных строк больше количества ошибочных столбцов, применяется строково-столбцово-строковое декодирование. Если количество ошибочных строк меньше, используется столбцово-строково-столбцовое декодирование. В

случае равенства количества ошибок в строках и столбцах выполняется операция стирания ошибок, затем выполняется строковое декодирование, в результате чего получается исправленный код.

На завершающем этапе ошибки стираются в тех позициях, где строковый и столбцовый регистры одновременно содержат единицы, после чего выполняется финальное строковое декодирование [6].

Результаты исследований показали, что алгоритм RCDOS обеспечивает более эффективное исправление ошибок по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодированием. Он позволяет устранить все ошибки, кратные половине минимального расстояния кода Хэмминга, а также значительное число ошибок, превышающих этот порог. Таким образом, алгоритм демонстрирует превосходство над известными алгоритмами, предлагая улучшенную корректирующую способность и адаптивную обработку ошибок, что делает его перспективным вариантом для применения в системах передачи данных.

### **Кодек помехоустойчивого кодирования Repeat**

Реализован помехоустойчивый кодек, основанный на многократном повторении исходной информации с ее последующим восстановлением с использованием статистического анализа частоты символов. Вместо традиционной кодовой матрицы применяется строка длиной 16 бит, которая не подвергается классическому кодированию Хэмминга, а повторяется трижды, формируя расширенную последовательность длиной 48 бит. Такой подход повышает устойчивость данных к ошибкам, поскольку вероятность корректного восстановления информации увеличивается за счет анализа повторов.

На этапе декодирования выполняется идентификация наиболее часто встречающегося битового значения среди трех повторов для каждой позиции исходной строки. Полученная после передачи 48-битная последовательность анализируется таким образом, что для каждого бита определяется доминирующее значение среди трех имеющихся вариантов, позволяя скорректировать возможные искажения данных.

### **Сравнение и анализ**

В ходе исследования проведена оценка эффективности четырех алгоритмов декодирования, включая двухэтапное декодирование (HD2), трехэтапное декодирование (HD3), алгоритм RCDOS, а также алгоритм Repeat. Анализ проводился в условиях бинарного симметричного канала с контролируемыми параметрами, моделирующими вероятность появления ошибок. Для каждого алгоритма определены значения вероятности блочных ошибок PBE(HD2), PBE(HD3), PBE(RCDOS), PBE(Repeat), что позволяет оценить их способность к исправлению и минимизации искажений данных.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности блочных ошибок на выходе декодера в условиях бинарного симметричного канала. График демонстрирует, что лучшие результаты по снижению вероятности блочных ошибок показывает алгоритм RCDOS, за ним следует трехэтапное декодирование (HD3), далее двухэтапное декодирование (HD2), а предложенный алгоритм Repeat демонстрирует наибольший уровень ошибок среди всех декодеров.

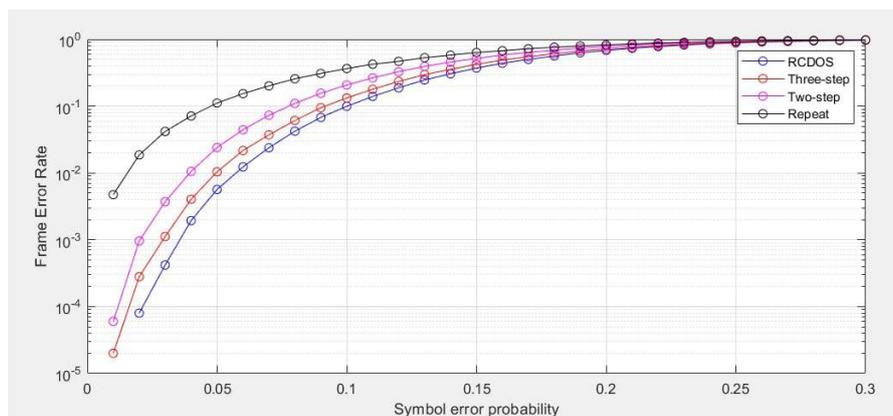


Рис. 1. Вероятность блочных ошибок в зависимости от алгоритма декодирования

Таким образом, результаты исследования показали, что алгоритм RCDOS является наиболее эффективным среди представленных алгоритмов декодирования.

### Заключение

Результаты показали, что алгоритм RCDOS обладает наименьшей вероятностью блочных ошибок, значительно превосходя остальные алгоритмы. Алгоритм HD3 демонстрирует высокую корректирующую способность, уступая только RCDOS. Алгоритм HD2 показывает стабильное исправление ошибок, но с более высокой вероятностью блочных потерь.

Алгоритм Repeat для декодирования помехоустойчивых кодов с повторением, несмотря на простоту, продемонстрировал ограниченную корректирующую способность, уступая всем рассмотренным алгоритмам. Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность алгоритма адаптивного декодирования RCDOS.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF NOISE-RESISTANT DECODING ALGORITHMS

A.S. VABISHCHEVICH, A.D. VASIUTICH, A.V. KURILOVICH, J. MA, X.H. REN,  
V.Yu. TSVIATKOU

**Abstract.** The article discusses noise-resistant encoding and decoding algorithms. The algorithms of two-stage decoding (HD2) and three-stage decoding (HD3), the RCDOS algorithm, as well as the Repeat algorithm for codes with repetition are described. A comparative analysis of the corrective ability of these algorithms has been carried out.

*Keywords:* noise-resistant coding, two-dimensional Hamming code, correction ability, block errors, adaptive decoding.

### Список литературы

1. Mercier, H. A survey of error-correcting codes for channels with symbol synchronization errors / H. Mercier, V. K. Bhargava, V. Tarokh // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2010. – № 1 (12). – P. 87–96.
2. Jeong, S. Iterative Channel Detection With LDPC Product Code for Bit-Patterned Media Recording / S. Jeong, J. Lee // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2017. – № 11 (53). – P. 1–4.
3. Hamming, R. W. Error detecting and error correcting codes / R. W. Hamming // *Bell System Technical Journal*. – 1950. – № 2 (29). – P. 147–160.
4. Elias, P. Error-free coding / P. Elias // *IEEE Trans Inf Theory*. – 1954. – № 4 (4). – P. 29–37.
5. Chiaraluce, F. Extended Hamming product codes analytical performance evaluation for low error rate applications / F. Chiaraluce, R. Garello // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2004. – № 6 (3). – P. 2353–2361.
6. Ren, X. A New Hard-decision Iterative Decoding Method for Hamming Product Codes / X. Ren, J. Ma, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Kanapelka // *Engineering Letters*. – 2022. – Vol. 30, № 3.