

Исследование процессов когнитивной обработки данных в системах радиосвязи с перестановочным декодированием

Д.В. Мишин¹ , А.А. Гладких² , В.И. Кутузов² , А.Л.Х. Аттаби² 

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

² Ульяновский государственный технический университет
432027, Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32

Аннотация – Обоснование. Необходимость применения средств перестановочного декодирования в системах радиосвязи объясняется повышенными возможностями этого метода по исправлению ошибок. При этом сложные матричные вычисления в ходе поиска эквивалентных кодов по классической схеме перестановочного декодирования заменяются списком готовых решений. Эти решения вычисляются априори и заносятся в когнитивные карты процессора декодера, что делает метод удобным инструментом в процедуре обеспечения информационной надежности при управлении, например, беспилотными средствами по радиоканалам. По сути, матричные вычисления на борту заменяются поиском в списке когнитивных карт нужного решения, соответствующего в реальном времени текущей перестановке нумераторов надежных символов. Однако обработка данных в когнитивной карте декодера требует специального описания. **Цель.** Исследование способов идентификации перестановок нумераторов символов кодовых векторов для их эффективного преобразования в системе когнитивных карт перестановочного декодера. **Методы.** Раскрывается тонкая структура когнитивных карт производительных и непроизводительных перестановок нумераторов, которая позволяет на регулярной основе получить альтернативное решение для перехода в множество производительных перестановок при получении приемником непроизводительной перестановки, исключая тем самым использование метода проб и ошибок. **Результаты.** Повышается эффективность работы перестановочного декодера за счет реализации перестановок, попавших первоначально в множество решений, внесенных в когнитивную карту непроизводительных перестановок. **Заключение.** Предложено семейство микроконтроллеров для реализации принципа взаимодействия когнитивных карт с системой альтернативных решений.

Ключевые слова – перестановочное декодирование; эквивалентный код; производительная перестановка; непроизводительная перестановка; интервальный вектор.

Введение

Интенсивное продвижение в практику многих предметных областей беспилотных систем (БС) в широком смысле, систем с дистанционным управлением в навигации и геопривязки подвижных и неподвижных объектов потребовали повышения показателей к информационной надежности обрабатываемых в таких системах данных. С одной стороны, физическая основа и возможность оперативно организовать радиоканал в анализируемых системах не вызывает сомнений, с другой стороны, высокая вероятность проявления мешающих и деструктивных факторов в исследуемых каналах объективно носит беспрецедентный характер. Последнее обстоятельство привело к реализации множества известных технических решений, начиная от адаптивных систем радиосвязи, систем с расширением спектра и завершая системами с псевдослучайными перестройками рабочей частоты. Представленные технические решения не исключают использования средств помехоустойчи-

вого кодирования, но по своим массогабаритным показателям не всегда подходят к большому количеству БС. В этой связи возникла задача поиска технологических решений по защите данных от помех, приспособленных к относительно небольшим процессорам с малыми возможностями по реализации математических операций, например в матричной форме.

Одной из первых работ, связанных с процедурой обучения декодера избыточного кода по полученной случайным образом в результате сортировки принятых символов по убыванию градаций надежности их мягких решений и заменой процедуры решения системы линейных уравнений на тривиальный поиск необходимого решения по списку, была статья [1]. В последующем представленное техническое решение получило свое развитие в работах [2–7]. Следует отметить, что в указанных публикациях не рассматривается тонкая структура когнитивных карт (КК), не приводятся экспериментальные данные по выявлению

Таблица 1. Процентное соотношение производительных и непроизводительных перестановок по результатам статистических испытаний
Table 1. Percentage of productive and unproductive permutations according to the results of statistical tests

Хэмминга код (7, 4, 3)		Код БЧХ (15, 5, 7)		Код БЧХ (15, 7, 5)		Код Голея (23, 12, 7)		Код Голея – укороченный (18, 7, 7)	
ППН	НППН	ППН	НППН	ППН	НППН	ППН	НППН	ППН	НППН
80	20	62	38	51	49	52	48	52	48

Таблица 2. Объем выборки кодовых комбинаций для некоторых кодов
Table 2. Sample size of code combinations for some codes

Код	Объем перестановок	Общее количество ОКО	Объем выборки ОКО ППН	Машинное время составления КК
1	2	3	4	5
15,7,5	6435	3003	1512	150 с
15,5,7	3003	1001	616	70 с
23, 12, 7	1352078	705432	362880	900 с
18, 7, 7	31824	12376	6384	210 с

частоты возникновения производительных перестановок нумераторов (ППН) и непроизводительных перестановок нумераторов (НППН) для кодов с различной избыточностью. Более того, не рассматриваются возможности гибкого использования когнитивных карт в условиях их взаимоувязанности.

Целью статьи является исследование способов идентификации перестановок нумераторов символов кодовых векторов для их эффективного преобразования в системе перестановочного декодирования.

1. Общая классификация перестановок и их статистические свойства

Считается, что принципы перестановочного декодирования (ПД) избыточных кодов известны из источников [7–9]. Учитывая специфику практического использования БС, для исследования были выбраны короткие избыточные коды (7, 4) – код Хэмминга; два кода БЧХ (15, 5) и (15, 7); совершенный код Голея (23, 12) и его укороченный аналог (18, 7). С использованием специально разработанной программы методом прямого перебора всех возможных перестановок нумераторов для указанных кодов были получены достаточно неожиданные данные по процентному соотношению ППН и НППН, которые приведены в таблице 1. Если для кода (7, 4) значение ППН существенно превосходит показатель НППН, что важно с практической точки зрения, то для других кодов это

соотношение становится практически равным. Принципиально это означает, что в половине случаев процедура ПД оказывается под угрозой срыва, что недопустимо. Предлагается оценить закономерности записей априорных вычислений для КК, позволяющих снизить объем данных, вносимых в память процессора с указанием пути рационального преобразования перестановок типа НППН, и таким образом сделать более совершенной работу декодера на борту БС.

В количественном отношении общее число перестановок оценивается выражением $N = C_n^k$.

Общее количество перестановок, требующих записи в КК декодера, приведено в таблице 2. В комбинаторике циклические сдвиги перестановок объединяются в орбиты. Во главе орбиты находится образующая комбинация орбиты (ОКО). Это означает, что объем памяти КК может быть уменьшен в n раз, но в таком случае, занося в память только значение ОКО, приходится вводить процедуру поиска в орбите требуемой записи [8–13]. Это означает, что простой поиск данных в некотором числовом массиве будет заменен вычислительным процессом, требующим определенных энергетических затрат. Более того, из-за замкнутости цикла перестановок, формируемых ОКО, в общей орбите переставленных по циклу комбинаций оказываются перестановки, формат которых может совпадать с форматом ОКО. Это становится ясным из анализа состава двух орбит, представленных на рис. 1.

Код БЧХ (15, 5, 7)				
4	6	7	9	13
5	7	8	10	14
6	8	9	11	15
1	7	9	10	12
2	8	10	11	13
3	9	11	12	14
4	10	12	13	15
1	5	11	13	14
2	6	12	14	15
1	3	7	13	15
1	2	4	8	14
2	3	5	9	15
1	3	4	6	10
2	4	5	7	11
3	5	6	8	12
Повтор цикла. det ≠ 0				

Код БЧХ (15, 5, 7)				
1	3	6	7	11
2	4	7	8	12
3	5	8	9	13
4	6	9	10	14
5	7	10	11	15
1	6	8	11	12
2	7	9	12	13
3	8	10	13	14
4	9	11	14	15
1	5	10	12	15
1	2	6	11	13
2	3	7	12	14
3	4	8	13	15
1	4	5	9	14
2	5	6	10	15
Повтор цикла. det = 0				

Рис. 1. Пример структуры орбит для двоичных кодов
 Fig. 1. Example of orbit structure for binary codes

В данной ситуации абстрактная алгебра указывает на так называемые тривиальные орбиты (ТО), одна из которых становится образующей комбинацией сборной орбиты (СО). Признаком любой ОКО является наличие единицы в левом разряде перестановки. Для кода БЧХ (15, 5, 7) на рис. 1 приведены образцы двух СО. Для одной такой орбиты определитель перестановки, не равный нулю, дает производительную перестановку в отношении ЭК, в другом случае такой код получен быть не может (определитель перестановки равен нулю). Сравнение СО показывает, что у них много общего, но из-за показателей определителей они должны быть занесены в разные КК: в карты производительных и непроизводительных перестановок соответственно. Целесообразно показатель ОКО для СО определять как наибольшую разницу между нумератором, стоящим на первой позиции (старший разряд в записи слева), и нумератором, стоящим на k позиции (младший разряд в записи справа). Для кода (15, 7), как следует из рисунка 1, это будут комбинации 1 3 4 6 10 и 1 3 6 7 11 соответственно. Перестановки, которые в таблицах выделены серым, являются ОКО ТО. В ходе исследования было выделено несколько свойств орбит перестановок.

Свойство 1. Потенциально каждая ТО может иметь минимум одну перестановку, максимум $(n - k)$ различных перестановок. В последнем случае при известной ОКО поиск требуемой перестановки во времени может затянуться, если такая перестановка находится в конце списка.

новки во времени может затянуться, если такая перестановка находится в конце списка.

Свойство 2. Численным методом установлено, что в условиях, когда для ОКО СО определитель переставленной матрицы не равен нулю, то определи всех перестановок сборной орбиты также не равны нулю. В противном случае все определители сборной орбиты равны нулю.

Следствие: множество ППН и НПН не пересекаются. С практической точки зрения это означает, что для ускорения процедуры поиска окончательного решения – это решение может отыскиваться в КК ППН и КК НПН одновременно. Решение будет найдено только в одной карте.

Недостатком описанного подхода является проявление свойства 1. Для ускорения процесса поиска требуемого решения предлагается совершенно новая характеристика.

2. Понятие интервальных оценок в перестановках. Перестановки ППН

Рассмотрим последовательность нумераторов ОКО СО 1 3 4 6 10. Из рис. 1 (левая таблица) следует, что в ТО, к которой относится данная перестановка, для всех перестановок из состава этой орбиты будет одинаковый интервал между соседними нумераторами. Легко проверить, что для представленного примера это будет последовательность вида 2 1 2 4. Действительно, циклический сдвиг нумераторов по регистру сдвига не меняет расстояния между нумераторами.

Свойство 3. Интервальные оценки являются более информативными относительно свойств своей ТО, при этом оказываются на один байт меньше показателя перестановки.

Свойство 4. Если интервальная оценка не является орбитой ОКО СО, то другие $(k - 1)$ ОКО ТО в составе интервальной оценки имеют маркер, который указывает на шаги циклических изменений проверочной части порождающей матрицы в систематической форме. Образец проверочной матрицы хранится в специальной КК. Принцип преобразования представлен в таблице 3.

Заметно, что маркер отсутствует в левой колонке таблицы. Это является признаком ОКО СО. С практической точки зрения нет необходимости все матрицы держать в памяти когнитивной карты декодера. Матрицы с маркерами достаточно просто формируются за счет циклических сдвигов матрицы ОКО СО.

Таблица 3. Систематическое преобразование поверочной части порождающей матрицы ЭК в зависимости от содержания ОКО ТО с маркером 6
Table 3. Systematic transformation of the verification part of the generating matrix EC depending on the content of forming combination of a trivial orbit with marker 6

1 3 4 6 10	1 7 9 10 12	1 5 11 13 14	1 3 7 13 15	1 2 4 8 14
2 1 2 4	6 2 1 2	4 6 2 1	2 4 6 2	1 2 4 6
1010101101	1011101100	1111011010	1010011111	1011111000
0101111100	0110110101	1001011101	0111101101	1010011111
1101001111	1110001011	1010110110	1100101110	0111101101
1011110110	0111111010	0111110001	0101011011	1100101110
0110010111	1011010111	0100111111	1011111000	0101011011

Таблица 4. Структура разниц нумераторов ОКО частных орбит перестановки 1 4 6 8 9
Table 4. Structure of the differences between the numerators of the forming combination of private orbits of the permutation 1 4 6 8 9

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов
1 4 6 8 9	3 2 2 1
1 8 11 13 15	7 3 2 2
1 2 9 12 14	1 7 3 2
1 3 4 11 14	2 1 7 3
1 3 5 6 13	2 2 1 7

Свойство 5. Порождающие матрицы для ОКО ТО формируются на основе сведений о количестве ОКО, формируемых в рамках одной орбиты. Например, для ОКО СО будет сформировано всего пять ОКО. Следовательно, для ОКО ТО с показателем интервальных оценок 6 2 1 2 комбинации в исходной левой колонке должны быть сдвинуты по циклу на пять шагов. Поэтому комбинация 0110010111 преобразуется к виду 01100 10111, и для ОКО ТО с интервальными оценками 6 2 1 2 будет сформирован вектор 1011101100. Сказанное относится ко всем показателям ОКО.

Свойство 6. Внутри орбиты проверочные части порождающих матриц ЭК образуются каждый раз за счет перестановки правого столбца на позицию левого столбца формируемой новой матрицы новой перестановки.

Таким образом, матричные преобразования в системе ППН сводятся к циклическим преобразованиям некоторой исходной матрицы к требуемой матрице ЭК для конкретной перестановки.

3. Особенности обработки непроизводительных перестановок

Главной отличительной чертой НПН является вырожденность переставленных матриц нумераторов наиболее надежных символов принятых кодовых векторов. И если для кода Хэмминга (7, 4) число таких перестановок составляет всего 20 % от их общего числа, то для кодов (15, 5) и (15, 7) общее число непроизводительных перестановок возрастает до 50 %.

Это ставит под сомнение эффективность ПД по параметру ЭВК, поскольку процедура поиска результативной перестановки неоправданно затягивается по времени. Требуется оригинальное техническое решение для снижения уровня отрицательного эффекта в системе оптимальных по ЭВК кодов. В других отношениях поиск ОКО различного класса не отличается от алгоритмов выявления подобных орбит в системе производительных перестановок.

Переходя от перестановок к интервальным таблицам, можно заметить, что структура различий соседних значений нумераторов ничем не отличается от описанных выше применительно к множеству производительных перестановок и показана для одного из кодов в таблице 4. Это позволяет утверждать, что в реальном декодере в целях экономии времени анализа принятого кодового вектора целесообразно направлять данные одновременно и на вход карты ППН, и на вход карты НПН. Очевидным является свойство, которое указывает на отсутствие пересечений указанных множеств. Поэтому отклик должен быть либо на выходе карты ППН, либо на выходе карты НПН. Идентичность процедуры поиска для множества ППН и НПН указывает на целесообразность распараллеливания вычислительного процесса поиска альтернативного признака принадлежности перестановки к одному или другому множеству. В предыдущих работах эта процедура носила последовательный характер. На первом этапе оценивалась принадлежность принятой приемником перестановки к

Таблица 5. Структура нумераторов ОКО локальных орбит из состава НПН
 Table 5. Structure of forming combination numerators for local orbits from the unproductive permutations of numerators

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов	Запрещенные нумераторы
1 2 3 4 6	1 1 2 2	8 9 12
2 12 13 14 15	10 1 1 1	3 4 7
1 3 13 14 15	2 10 1 1	ВСЕ
1 2 4 14 15	1 2 10 1	6 7 10
1 2 3 5 15	1 1 2 10	7 8 11
1 2 3 4 9	1 1 1 5	6 8 12
1 8 9 10 11	7 1 1 1	4 13 15
1 6 13 14 15	5 7 1 1	3 5 9
1 2 7 14 15	1 5 7 1	4 6 10
1 2 3 8 15	1 1 5 7	ВСЕ
1 3 6 7 11	2 3 1 4	9 10
1 6 8 11 12	5 2 3 1	14 15
1 5 10 12 15	4 5 2 3	ВСЕ
1 2 6 11 13	1 4 5 2	4 5
1 4 5 9 14	3 1 4 5	7 8

числу произвольных, и при отрицательном исходе (следовательно, перестановка непроизводительная) оценивалась возможность коррекции такой перестановки за счет замены младшего разряда из группы информационных символов на старший разряд из группы нумераторов проверочных разрядов.

Описанный алгоритм удобен при использовании кода (7, 4), когда число производительных перестановок составляет 80 % от общего числа возможных перестановок. Для кодов БЧХ (15, 5) и (15, 7) эта пропорция изменяется в сторону увеличения числа непроизводительных перестановок и по этой причине становится невыгодной из-за соотношения ППН к НПН как 50 % к 50 %. При этом вероятность удачной замены символов остается относительно низкой, поскольку новая перестановка после замены символов может вновь оказаться из множества НПН.

По этой причине предлагается использовать более совершенный алгоритм когнитивного регулятора, когда в системе замены НПН появляются сведения о непродуктивных заменах. В этом случае таблица 3 преобразуется в таблицу 4.

Суть работы когнитивного регулятора в согласовании данных между когнитивными картами ППН и НПН заключается в более полном информационном обеспечении процедуры поиска ППН. Например, при использовании параллельной ра-

боты когнитивных карт регулятор обобщает результат такого поиска и принимает рациональное решение в процедуре поиска ЭК. Фрагмент не обработанной лексикографически карты НПН показан в таблице 5. Не упорядоченная карта в данном случае представлена для выявления групповых закономерностей свойств частных ОКО в системе ОКО СО. Это нерационально с практической точки зрения. Для организации процедуры рационального поиска данных в карте НПН глобальные и частные ОКО должны быть классифицированы лексикографически, что вытекает из семантических моделей традиционных поисковых систем.

Становятся ясны закономерности абстрактной алгебры применительно к множеству НПН, рассматриваемого совместно с закономерностями построения проверочной матрицы избыточного кода. При этом запрещенные нумераторы однозначно не являются продуктивными при попытке перевода перестановки из множества НПН в систему ППН.

Выявлены предпосылки к закономерности, при которой ни один из символов в составе проверочной матрицы не приводит к переводу перестановки, обозначенной термином **ВСЕ**, в систему ППН. Теоретического объяснения, обоснования этот факт на данном этапе исследований не нашел. Однозначно потребуются специальная програм-

Таблица 6. Параметры микропроцессоров, пригодных для формирования ПД
Table 6. Parameters of microprocessors suitable for generating permutation decoding

	ATmega168P	ATmega328P	ATmega32u4	ATmega2560	Atmel SAM3X8E
ПЗУ (EEPROM)	0,5 Кб	1 Кб	1 Кб	4 Кб	16 Кб
ОЗУ (SRAM)	1 Кб	2 Кб	2,5 Кб	8 Кб	96 Кб
Память программ (FLASH)	16 Кб	32 Кб	32 Кб	256 Кб	512 Кб
Частота ЦП	16 МГц	16 МГц	16 МГц	16 МГц	84 МГц
Потребление на 1 МГц в режиме active	0,3 мА	0,3 мА	0,8 мА	3–4,68 мА	1 мА
Размеры	7 мм × 7 мм	7 мм × 7 мм или 34 мм × 7 мм	10 мм × 10 мм или 7 мм × 7 мм	14 мм × 14 мм или 7 мм × 7 мм	20 мм × 20 мм или 10 мм × 10 мм

ма, которая позволит убедиться в закономерности этого явления или, напротив, в определенной исключительности.

Предварительно установлено, что такая замена обеспечивает положительный результат только при использовании двухбитовой или трехбитовой рекомбинации между информационными и проверочными разрядами. Поэтому требуется дальнейшее изучение закономерностей интервальных зависимостей для оценки запрещенных нумераторов по шкале ОКО СО. Кроме того, заметно, что для отдельных замен запрещенными являются три нумератора, а в одном случае таких запретов два.

Анализ таблицы 4 показывает, что запрещенное число значений нумераторов для разных ОКО из состава НПН различно, но все они имеют термин ВСЕ. Этот факт в теории кодирования вскрыт впервые и пока не нашел своего теоретического объяснения. Заметно, что запрещенные замены в системе НПН носят в зависимости от ОКО системный характер, который может быть использован для организации вычислительного процесса в случае критических значений по объему памяти когнитивных карт.

Вскрытые в ходе исследования закономерности перестановок в системе ПД позволяют упростить известные подходы к декодированию данных. В новых условиях декодер после выделения k надежных символов вычисляет интервальную разницу и формирует ОКО, которое одновременно направляет на входы когнитивной карты ПНП и НПН. Поскольку множества реализаций этих карт не пересекаются, то ответ может быть получен только на выходе одной из указанных карт. Если отвечает карта ПНП, то выявляется соответствующая проверочная матрица с учетом циклических

сдвигов основной матрицы. В противном случае корректируется последний столбец перестановки в группе информационных разрядов с учетом запрещенных нумераторов. Процесс продолжается в соответствии с классическим алгоритмом выявления вектора ошибок в системе ПД.

4. Оценка реализации перестановочного декодера в системе беспилотных средств

Для реализации перестановочного декодера, использующего взаимозависимые когнитивные карты, возможно применение микропроцессоров семейства Atmel. В таблице 6 показаны наиболее значимые для реализации декодера характеристики.

Приведенные микропроцессоры обладают высокой энергоэффективностью, что позволяет использовать их от автономного источника питания. Так, при использовании аккумулятора емкостью 5000 мАч и микропроцессора ATmega328P в активном режиме на максимальной частоте (16 МГц) теоретически может проработать свыше 1000 часов. На практике же полная схема обвязки микропроцессора с минимально необходимым набором вспомогательных элементов при активном режиме составляет 30–100 мА. При таком потреблении указанного выше аккумулятора схема может работать непрерывно порядка 166 часов. На практике разряд батареи будет осуществляться несколько иначе, поскольку разряд происходит нелинейно, но порядок будет примерно таким. Следовательно, реализация декодера на микропроцессорах Atmel успешно может быть реализована для систем, работающих от автономных источников питания.

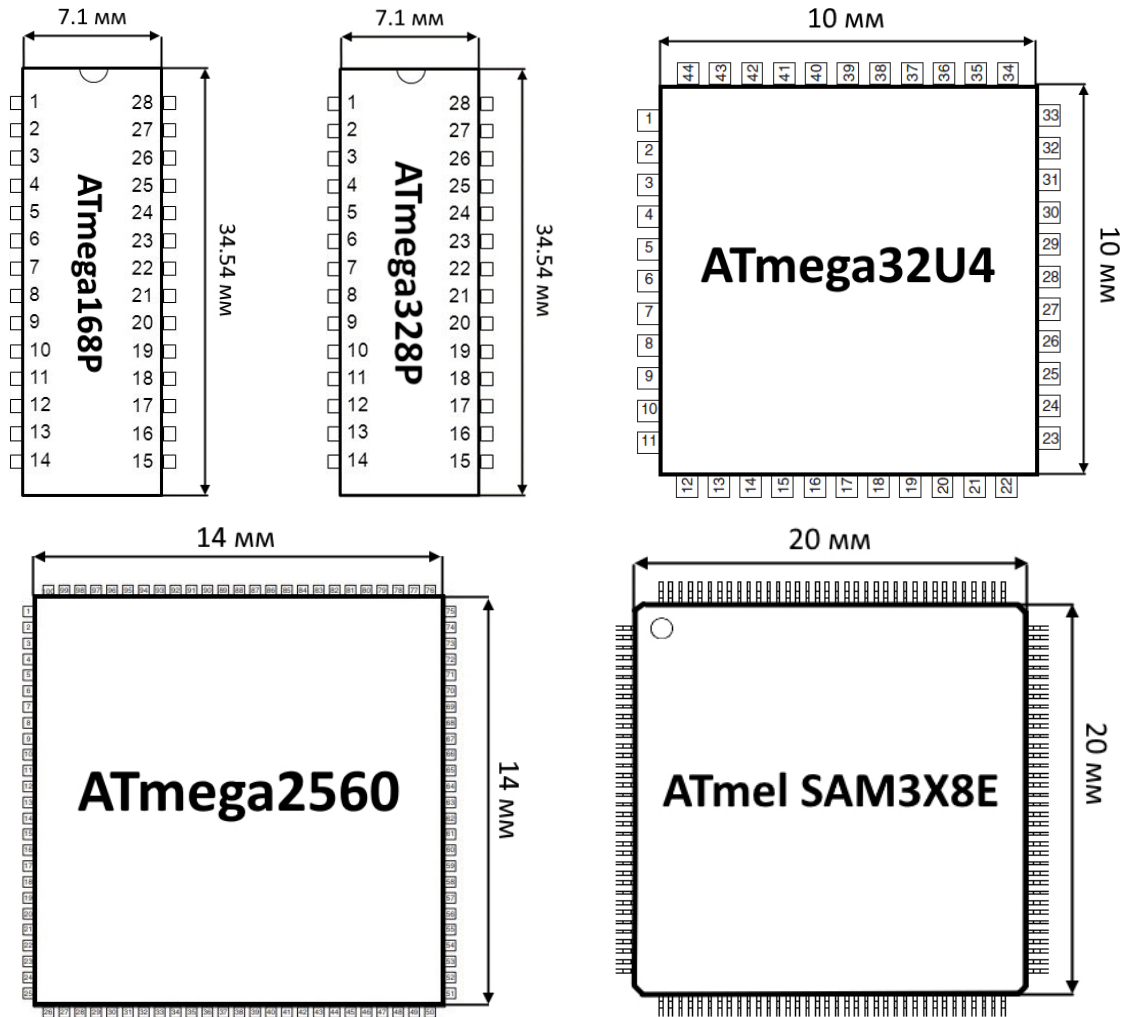


Рис. 2. Геометрические размеры процессоров для реализации декодера
Fig. 2. Geometric dimensions of processors for decoder implementation

Как следует из рис. 2, размеры микропроцессоров не превышают 20 мм × 20 мм, что делает возможным их размещение практически на любой платформе.

Очевидно, что производительности энергоэффективных микропроцессоров, приведенных выше, недостаточно для вычисления необходимых матриц при реализации декодера БЧХ (15, 5) с достаточной скоростью для поддержания приемлемой скорости канала связи. В рамках данной работы вместо сложных матричных вычислений предлагается использовать список готовых решений – когнитивную карту процессора декодера. Минимальный объем памяти для хранения когнитивных карт может быть рассчитан достаточно просто. Например, объем когнитивной карты для кода БЧХ (15, 5) составляет около 28–30 Кб. Эти данные в процессе выполнения программы не изменяются, а потому могут быть размещены в памяти программы (FLASH) микропроцессора.

Однако кроме данных когнитивной карты необходимо учитывать дополнительные ресурсы памяти для основного алгоритма исполняемого кода (работа с массивами, алгебраические операции, чтение и запись данных). Также следует учитывать, что декодер прежде всего является частью приемника, а следовательно, программный код реализации декодера должен работать в одном рабочем цикле с программной реализацией протокола связи. Таким образом, минимально необходимая память микроконтроллера должна превышать объем когнитивной карты минимум в 2 раза (<60 Кб). Из приведенных в таблице 5 микропроцессоров таким объемом программной памяти обладают ATmega2560 и Atmel SAM3X8E.

Заключение

С точки зрения абстрактной алгебры в работе показаны ранее неизвестные свойства циклических перестановок замкнутого множества на-

туральных чисел, состоящего из n элементов, в котором при выделении произвольных $k < n$ элементов однозначно образуются k независимых орбит, начинающихся на наименьшее из выбранных n элементов.

Синтез указанного свойства с закономерностями построения групповых двоичных систематических кодов показывает, что при формировании орбит все множество возможных перестановок нумераторов кодовых векторов разбивается на два непересекающихся множества. Каждое из этих множеств в отдельности отражает свойство вырожденности (или напротив) порождающих пере-

ставленных матриц, что означает невозможность (или возможность) формирования ЭК.

Показана возможность быстрой коррекции вырожденных матриц за счет заранее вычисленных альтернативных решений в перестановках. За счет свойства непересекающихся множеств орбит показана возможность распараллеливания процесса идентификации конкретной перестановки относительно принадлежности тому или другому множеству. Процесс поиска решения для двух множеств может решаться одновременно.

Предложено семейство микроконтроллеров для реализации принципов ПД с системой альтернативных решений.

Список литературы

1. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52–56.
2. Гладких А.А., Овинников А.А., Тамразян Г.М. Математическая модель когнитивного перестановочного декодера // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 1. С. 14–19.
3. 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. URL: <http://sersec.org/journals/index.php/IJCA/article/view/5087>
4. Чилихин Н.Ю., Карпухина Е.К., Горюнов А.О. Разработка и интеграция адаптивного SCL декодера в аппаратную платформу FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19, № 3. С. 357–365. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2021.19.3.13>
5. Питерсон У., Уэлден Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.
6. Мишин Д.В., Тяжев А.И. Описание цифровых систем различными схемами построения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.60-66>
7. Morelos-Zaragoza R. The Art of Error Correcting Coding. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 320 p.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
9. Гладких А.А., Наместников С.М., Пчелин Н.А. Эффективное перестановочное декодирование двоичных блоковых избыточных кодов // Автоматизация процессов управления. 2017. № 1 (47). С. 67–74.
10. Свойства циклических структур в системе перестановочного декодирования избыточных кодов / Н.Ю. Бабанов [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2020. № 2 (60). С. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.35752/1991-2927-2020-2-60-101-108>
11. Оценка эффективности защиты данных от ошибок на базе байесовского вывода в системе итеративных преобразований / А.А. Гладких [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2022. № 4 (70). С. 120–130. DOI: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2022_4_70_120
12. 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: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2022_3_69_27
13. Оценка статистических характеристик перестановочного декодера методом его программной реализации / А.Л.Х. Аттаби [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91–98. DOI: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2023_2_72_91

Информация об авторах

Мишин Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: проблемы передачи дискретных сообщений по многолучевым каналам со сложной помеховой обстановкой, вопросы анализа и синтеза эффективных алгоритмов цифровой обработки сигналов, теория кодирования.

E-mail: d.mishin@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2572-5254>

SPIN-код (eLibrary): 6134-1535

AuthorID (eLibrary): 228334

ResearcherID (WoS): AAQ-9371-2021

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники, телекоммуникаций и защиты информации Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Россия.

Область научных интересов: теория кодирования, вопросы анализа и синтеза эффективных алгоритмов цифровой обработки сигналов.

E-mail: a_gladkikh@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0466-9102>

SPIN-code (eLibrary): 8777-8766
AuthorID (eLibrary): 574659
ResearcherID (WoS): AAI-6402-2021

Кутузов Владислав Игоревич, инженер по кибербезопасности ООО «АйТиИ Экспо Интернешнл», аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и защиты информации Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Россия.

Область научных интересов: теория кодирования.
E-mail: kutuzovvladislav@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9925-5889>
SPIN-code (eLibrary): 6554-5574
AuthorID (eLibrary): 1163712

Аттаби Акил Латиф Худайр, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и защиты информации Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Россия.

Область научных интересов: теория кодирования.
E-mail: aqeel.attaby@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0836-9254>
ResearcherID (WoS): M-2526-2017

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2024, vol. 27, no. 1, pp. 103–112

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.1.103-112
UDC 621.391
Original Research

Received 22 November 2023
Accepted 25 December 2023
Published 29 March 2024

Research of cognitive data processing in radio communication systems with permutation decoding

Dmitry V. Mishin¹ , Anatoly A. Gladkikh² ,
Vladislav I. Kutuzov² , Aqeel Latif Khudair Attaby² 

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia
² Ulyanovsk State Technical University
32, Severny Venets Street,
Ulyanovsk, 432027, Russia

Abstract – Background. The need to use permutation decoding tools in radio communication systems is explained by the increased error correction capabilities of this method. In this case, complex matrix calculations during the search for equivalent codes according to the classical scheme of permutation decoding are replaced by a list of ready-made solutions. These solutions are calculated a priori and entered into the cognitive cards of the decoder processor, which makes the method a convenient tool in the procedure for ensuring information reliability when controlling, for example, unmanned vehicles via radio channels. In fact, matrix calculations on board are replaced by searching the list of cognitive maps for the right solution corresponding in real time to the current permutation of reliable character numerators. However, data processing in the decoder's cognitive map requires a special description. **Aim.** The study of methods for identifying permutations of character numerators of code vectors in order to effectively transform them in a system of cognitive maps of a permutation decoder. **Methods.** The paper reveals the subtle structure of cognitive maps of productive and unproductive permutations of numerators, which allows on a regular basis to obtain an alternative solution for switching to a set of productive permutations when the receiver receives an unproductive permutation, thereby excluding the use of trial and error. **Results.** The efficiency of the permutation decoder increases due to the implementation of permutations that were originally included in a set of solutions introduced into the cognitive map of unproductive permutations. **Conclusion.** A family of microcontrollers is proposed to implement the principle of interaction of cognitive maps with a system of alternative solutions.

Keywords – permutation decoding; equivalent code; performance permutation; non-performance permutation; interval vector.

✉ a_gladkikh@mail.ru (Anatoly A. Gladkikh)

 © Dmitry V. Mishin et al., 2024

References

1. A. A. Gladkikh, "Permutation decoding as a tool for increasing the energy efficiency of data exchange systems," *Elektrosvyaz*, no. 8, pp. 52–56, 2017. (In Russ.)
2. A. A. Gladkikh, A. A. Ovinnikov, and G. M. Tamrazyan, "Mathematical model of a cognitive permutation decoder," *Tsifrovaya obrabotka signalov*, no. 1, pp. 14–19, 2019. (In Russ.)

3. A. A. Gladkikh et al., "Coding methods and permutation decoding in the systems for network processing of data," *International Journal of Control and Automation*, vol. 13, no. 1, pp. 93–110, 2020, url: <http://serc.org/journals/index.php/IJCA/article/view/5087>.
4. N. Yu. Chilikhin, E. K. Karpukhina, and A. O. Goryunov, "Development and integration of an adaptive SCL decoder into the Xilinx Artix-7 XC7A100T FPGA hardware platform," *Infokommunikacionnye tehnologii*, vol. 19, no. 3, pp. 357–365, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/ikt.2021.19.3.13>. (In Russ.)
5. U. Piterson and E. Uelden, *Error Correcting Codes*. Moscow: Mir, 1976. (In Russ.)
6. D. V. Mishin and A. I. Tyazhev, "Description of digital systems by various construction schemes," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 60–66, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.60-66>. (In Russ.)
7. R. Morelos-Zaragoza, *The Art of Error Correcting Coding*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
8. B. Silyar, *Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application*. Moscow: Vil'yams, 2003. (In Russ.)
9. A. A. Gladkikh, S. M. Namestnikov, and N. A. Pchelin, "Efficient permutation decoding of binary block redundancy codes," *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, no. 1 (47), pp. 67–74, 2017. (In Russ.)
10. N. Yu. Babanov et al., "Properties of cyclic structures in a system of permutational decoding of redundant codes," *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, no. 2 (60), pp. 82–89, 2020, doi: <https://doi.org/10.35752/1991-2927-2020-2-60-101-108>. (In Russ.)
11. A. A. Gladkikh et al., "Evaluation of the effectiveness of data protection from errors based on Bayesian inference in a system of iterative transformations," *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, no. 4 (70), pp. 120–130, 2022, doi: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2022_4_70_120. (In Russ.)
12. A. V. Novoselov et al., "Evaluation of criteria for the effectiveness of data protection from errors based on permutation decoding," *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, no. 3 (69), pp. 27–34, 2022, doi: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2022_3_69_27. (In Russ.)
13. A. L. Kh. Attabi et al., "Estimation of statistical characteristics of a permutation decoder using its software implementation method," *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, no. 2 (72), pp. 91–98, 2023, doi: https://doi.org/10.35752/1991-2927_2023_2_72_91. (In Russ.)

Information about the Authors

Dmitry V. Mishin, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radio Engineering Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: problems of transmitting discrete messages over multipath channels with complex interference conditions, issues of analysis and synthesis of effective algorithms for digital signal processing, coding theory.

E-mail: d.mishin@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2572-5254>

SPIN-код (eLibrary): 6134-1535

AuthorID (eLibrary): 228334

ResearcherID (WoS): AAQ-9371-2021

Anatoly A. Gladkikh, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Research interests: coding theory, issues of analysis and synthesis of effective algorithms for digital signal processing.

E-mail: a_gladkikh@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0466-9102>

SPIN-code (eLibrary): 8777-8766

AuthorID (eLibrary): 574659

ResearcherID (WoS): AAI-6402-2021

Vladislav I. Kutuzov, engineer at ITE Expo International LLC, postgraduate student of the Department of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Research interests: coding theory, wireless sensor networks, IoT.

E-mail: kutuzovvladislav@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9925-5889>

SPIN-code (eLibrary): 6554-5574

AuthorID (eLibrary): 1163712

Aqeel Latif Khudair Attaby, postgraduate student of the Department of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Research interests: coding theory.

E-mail: aqeel.attaby@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0836-9254>

ResearcherID (WoS): M-2526-2017