

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ В СИСТЕМЕ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-4-10

Агеев Сергей Александрович,
ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
Россия, serg123_61@mail.ru

Гладких Анатолий Афанасьевич,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия, a_gladkikh@mail.ru

Брынза Александр Александрович,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия, abrynza73@gmail.com

Каретников Владимир Владимирович,
ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
Россия, karetnikovv@gumrf.ru

Савкин Александр Леонидович,
ФНПЦ АО "НПО "Марс", г. Ульяновск, Россия,
mars@mv.ru; savkin1957@inbox.ru

Manuscript received 02 February 2024;
Accepted 10 March 2024

Ключевые слова: морфологический синтез, перестановочное декодирование, эквивалентный код, производительная перестановка, непроизводительная перестановка, интервальный вектор, альтернативное решение

В статье выполнен морфологический анализ задач, которые решаются средствами помехоустойчивого кодирования в системах дистанционного управления роботизированными объектами. Приводятся и анализируются новые метод и алгоритмы защиты передаваемых данных от ошибок. Предложенные метод и алгоритмы разработаны на основе морфологического синтеза сведений, известных в данной предметной области, но комбинируемых по-иному для достижения технического решения, превосходящего по качеству известные аналоги. Например, применительно к известному методу перестановочного декодирования, связанного со способом мягкого декодирования, добавляется понятие когнитивной карты допустимых перестановок символов принятого приемником кодового вектора, что позволяет любые перестановки ограниченного множества символов вычислить априори и на их основе получить готовые решения по формированию параметров эквивалентного кода. Таким образом, сложные в арифметическом плане матричные преобразования, предписанные классическим методом получения эквивалентного кода, заменяются некоторым списком готовых решений. Это обеспечивает возможность в системах реаль-

ного времени использовать короткие двоичные избыточные коды. Показано, что для подобных кодов все перестановки делятся на два непересекающихся подмножества. Первая часть перестановок допускает получение эквивалентных кодов. Вторая часть перестановок приводит к вырожденным переставленным матрицам, которые не позволяют реализовать метод перестановочного декодирования. В работе обосновано, что обе части количественно примерно одинаковы для большинства двоичных кодов, что снижает эффективность использования метода перестановочного декодирования. Доказано, что любую перестановку в когнитивных картах можно представить, как логин в учетной записи. Но, в отличие от известных решений, каждый логин имеет добавление в формате альтернативных решений, позволяющее точно определить результирующую последовательность действий по преобразованию конкретной ситуации с неудачной перестановкой. Применение добавлений позволяет повысить продуктивность процедуры перестановочного декодирования за счет одной альтернативной перестановки с 50% до 90% при использовании одновременно двух дополнительных перестановок.

Информация об авторах:

Агеев Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Телекоммуникации и защита информации" ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Радиотехника, телекоммуникации и защита информации" Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Россия

Брынза Александр Александрович, аспирант кафедры "Радиотехника, телекоммуникации и защита информации" Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Каретников Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Судоходства на внутренних водных путях", первый проректор ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Савкин Александр Леонидович, кандидат военных наук, доцент, начальник службы обеспечения научно-технической деятельности ФНПЦ АО "НПО "Марс", г. Ульяновск, Россия

Для цитирования:

Агеев С.А., Гладких А.А., Брынза А.А., Каретников В.В., Савкин А.Л. Морфологический синтез в системе алгоритмов перестановочного декодирования с альтернативными решениями // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 4-10.

For citation:

Ageev S.A., Gladkikh A.A., Brynza A.A., Karetnikov V.V., Savkin A.L. (2024). Morphological Synthesis in the System of Permutation Decoding Algorithms with Alternative Solutions. T-Comm, vol. 18, no.3, pp. 4-10. (in Russian)

Введение

Интенсивное развитие систем управления транспортными средствами без прямого участия человека, применение беспилотных аппаратов (БА) в качестве целевого дистанционного зондирования заданного участка местности или акватории, развитие робототехники объективно потребовали технологического объединения элементов систем управления с системами телекоммуникации. При этом основным средством организации канала связи является система радиосвязи, которая с точки зрения помехоустойчивости в наименьшей степени защищена от влияний помех естественного или преднамеренного характера. Защитой от влияния помех в радиоканале является использование кодовых или алгоритмических методов обработки данных, которые в совокупности позволяют повысить параметр энергетического выигрыша кода (ЭВК), обеспечивающего требуемый уровень достоверности данных [1-5].

Для получения наилучшего результата ЭВК предлагается использовать расширенное пространство поиска приемлемого технического решения, получившего название морфологического метода, включающего в себя последовательное использование морфологического анализа (МА) и морфологического синтеза (МС) [6-8]. Например, использование мягких решений по асимптотическим оценкам обеспечивает повышение ЭВК до 3 дБ [1, 2]. Дополнительный выигрыш теоретически можно получить за счет использования метода перестановочного декодирования (ПД) групповых избыточных кодов. В этом случае на основе мягких решений за счет ранжирования нумераторов символов в принятом кодовом векторе и переноса (перестановки) наиболее надежных символов на место информационных разрядов, и соответствующего преобразование порождающей матрицы основного кода G в матрицу эквивалентного кода (ЭК) $G_{ЭК}$ получить вектор такого кода [2, 5, 9]. Приемник после формирования вектора ЭК сравнивает его с переставленным вектором основного кода и по разнице символов определяется вектор ошибок, действовавший в канале связи в ходе приема комбинации основного кода.

Метод МС подсказывает, что крайне невыгодно тратить ресурс микропроцессора приемника на вычисление матрицы $G_{ЭК}$ практически для каждой принятой комбинации в классическом варианте, а вместе с этим определять обратную матрицу для ее переставленного аналога и по биекции принятого и переставленного вектора кодовой комбинации формировать матрицу перестановок. Наиболее важным моментом в описанной цепочке событий является вычисление для каждой переставленной матрицы ее определителя, поскольку для такой вырожденной матрицы найти обратную матрицу не представляется возможным. Но, как было показано выше, при реализации ПД все перестановки и их свойства могут быть определены заранее. Это означает, что для перестановок, у которых переставленная матрица $G_{пер}$ является невырожденной целесообразно для нее обратную матрицу $G_{пер}^{-1}$ оценить априори и занести это значение в когнитивную карту (КК) декодера. При этом такая карта получает название – КК производительных перестановок нумераторов (ППН) символов кодового вектора, поскольку такие перестановки в общем случае позволяют получить ЭК. В противном случае, КК получает наименование непроизводительных перестановок

нумераторов (НПН). По понятным причинам множества ППН и НПН не пересекаются и поэтому разрешение той или иной перестановки может производиться одновременно в двух КК. В результате поиска безальтернативно откликается только одна КК из двух.

Метод МС требует изучение тонкой структуры названной пары КК, которая может способствовать повышению эффективности системы ПД и правильной формулировке цели работы. Целью работы является исследование способов идентификации перестановок нумераторов символов кодовых векторов двоичных групповых кодов в ходе их преобразований в системе перестановочного декодирования.

Классификация перестановок и их статистические свойства

Принципы ПД систематических групповых кодов известны из источников [9-13]. Учитывая специфику практического использования БА для исследования были выбраны короткие избыточные коды (7, 4) – код Хэмминга; два кода Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) (15, 5) и (15, 7); совершенный код Голея (23, 12) и его укороченный аналог (19, 8). 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 НПН практически для всех кодов, которые приведены в таблице 1. Если для кода (7, 4) значение ППН существенно превосходит показатель НПН, что важно с практической точки зрения, то для других кодов это соотношение становится неудовлетворительным. Принципиально это означает, что в половине случаев процедура ПД оказывается не выполнима для достаточно эффективных алгебраически декодируемых кодов и обозначенный в работе [9] порог по исправлению $(n - k)$ ошибок оказывается якобы недостижимым.

Вместе с этим, обращение к методам МА показывает, что взятые из сетевых технологий способы сопровождения списочных записей альтернативными решениями, позволяющих, например, изменить маршрутизацию или иные важные параметры трафика, могут играть положительную роль и в системе ПД. Предлагается оценить закономерности записей априорных вычислений для КК, позволяющих снизить объем данных, вносимых в память процессора БА с указанием на основе МС пути рационального преобразования перестановок типа НПН к перестановкам ППН, и таким образом сделать более совершенной работу декодера на борту БА.

Таблица 1

Процентное соотношений ППН и НПН по результатам статистических испытаний

| 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) | |
|------------------------|----|--------------------|----|--------------------|----|-----------------------|----|------------------------------------|----|
| ПП | НП | ПП | НП | ПП | НП | ПП | НП | ПП | НП |
| Н | Н | Н | Н | Н | Н | Н | Н | Н | Н |
| 80 | 20 | 62 | 38 | 51 | 49 | 52 | 48 | 52 | 48 |

Общее количество перестановок, требующих записи в КК декодера приведено в таблице 2.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

В комбинаторике циклические сдвиги перестановок в регистре могут описываться единственной комбинацией, которая получила название образующей комбинации орбиты (ОКО) [14]. С технической точки зрения это означает, что объем памяти КК может быть уменьшен в n раз, поскольку в список заносятся не все комбинации орбиты, а только значения ОКО [12].

Необходимым и достаточным условием получения любой комбинации орбиты является запись нумераторов ОКО в лексикографическом формате. Тогда однозначным признаком ОКО будет нумератор равный единице в левом старшем разряде.

В таком случае процедура поиска конкретной комбинации нумераторов из состава орбиты заменяется некоторым вычислительным процессом ее формирования из ОКО. Это означает, что простой поиск данных в некотором числовом массиве будет заменен вычислительным процессом, требующем определенных энергетических затрат [15, 16]. Более того, из-за замкнутости цикла перестановок, формируемых ОКО, в общей орбите переставленных по циклу комбинаций оказываются перестановки, признак которых может совпадать с форматом ОКО. Это становится ясным из анализа состава двух орбит, представленных на рисунке 1. В данной ситуации абстрактная алгебра указывает на так называемые тривиальные орбиты (ТО). Их число всегда равно значению k . Одна из этих ТО становится образующей комбинацией сборной орбиты (СО).

Таблица 2

Объем выборки ОКО для ППН некоторых кодов

| Двоичный код | Объем перестановок | Общее количество ОКО | Объем выборки ОКО ППН | Машинное время составления КК |
|--------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 7, 4, 3 | 5040 | 20 | 16 | 30 с |
| 15, 5, 7 | $\approx 1.3 \cdot 10^{11}$ | 1001 | 616 | 70 с |
| 15, 7, 5 | $\approx 1.3 \cdot 10^{11}$ | 3003 | 1512 | 150 с |
| 23, 12, 7 | 23! | 705432 | 362880 | 900 с |
| 19, 8, 7 | 19! | 12376 | 6384 | 210 с |

| Код БЧХ (15, 5, 7) | Число циклов |
|-----------------------------------|--------------|
| 4 6 7 9 13 | |
| 5 7 8 10 14 | |
| 6 8 9 11 15 | |
| 1 7 9 10 12 TO2 | 3 |
| 2 8 10 11 13 | |
| 3 9 11 12 14 | |
| 4 10 12 13 15 | |
| 1 5 11 13 14 TO3 | 1 |
| 2 6 12 14 15 | |
| 1 3 7 13 15 TO4 | 0 |
| 1 2 4 8 14 TO5 | 0 |
| 2 3 5 9 15 | |
| 1 3 4 6 10 TO1 CO | 5 |
| 2 4 5 7 11 | |
| 3 5 6 8 12 | |
| Повтор цикла. $det \neq 0$ ППН | |

| Код БЧХ (15, 5, 7) | | | | | | Число циклов |
|--------------------------------|----|--|--|--|--|--------------|
| 1 3 6 7 11 TO1 | CO | | | | | 4 |
| 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 TO2 | | | | | | 3 |
| 2 7 9 12 13 | | | | | | |
| 3 8 10 13 14 | | | | | | |
| 4 9 11 14 15 | | | | | | |
| 1 5 10 12 15 TO3 | | | | | | 0 |
| 1 2 6 11 13 TO4 | | | | | | 0 |
| 2 3 7 12 14 | | | | | | |
| 3 4 8 13 15 | | | | | | |
| 1 4 5 9 14 TO5 | | | | | | 1 |
| 2 5 6 10 15 | | | | | | |
| Повтор цикла. $det = 0$ НПН | | | | | | |

Рис. 1. Пример структуры СО для двоичного кода БЧХ

Для кода БЧХ (15, 5, 7) на рисунке 1 приведены образцы двух СО. Для одной такой орбиты определитель перестановки не равный нулю приводит к ППН 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 матриц $G_{пер}$ они должны быть занесены в разные КК: соответственно в КК ППН и НПН. Показатель ОКО из числа ТО для СО оценивается по наименьшей разнице между нумератором, стоящим в левом разряде (для любой ОКО равен единице) и нумератором, стоящим на k позиции (младший разряд в записи справа). Для кода (15, 5, 7), как следует из рисунка 1, это будет комбинация 1 3 4 6 10 для орбиты ППН и комбинация 1 3 6 7 11 для орбиты НПН. Как правило, такая орбита порождает наибольшее число циклических сдвигов. В последующем число циклов играет важную роль в системе вычисления производных матриц из единственного эталонного образца матрицы $G_{пер}$ для системы перестановок ППН. Этот процесс достаточно ясно описан в работах [17, 18].

Главная задача данной работы заключается в развитии нового направления в ПД – это разрешение неопределенности в ходе обработки данных из КК НПН [19, 20]. Для оценки возможных решений в ходе имитационного моделирования процедуры ПД был выбран код БЧХ (15, 5, 7). На рисунке 2 представлена сравнительная диаграмма двух кодов в условиях игнорирования возможных альтернативных решений для множества НПН. Ожидается, что производительность процедуры ПД в указанных условиях для кода БЧХ будет крайне недостаточной.

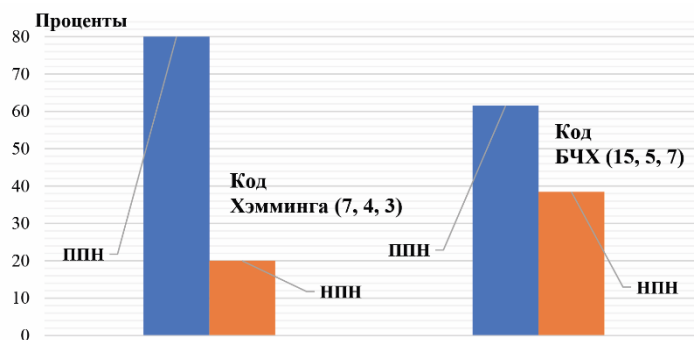


Рис. 2. Сравнительные характеристики кодов по параметрам ППН и НПН

Из таблицы 1 следует, что другие коды, кроме указанных на рисунке 2, будут иметь еще худшее соотношение между показателями ППН и НПН.

Понятие интервальных оценок в перестановках. Перестановки ППН

Рассмотрим последовательность нумераторов ОКО СО 1 3 4 6 10. Из рисунка 1 (только левая таблица) следует, что ТО1, 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 расстояние между нумераторами.

Свойство 1. Интервальные оценки являются более информативными относительно свойств своей ТО, при этом оказываются на полбайта меньше показателя перестановки, что важно для объема памяти КК.

Свойство 2. 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.

Свойство 3. 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 ТО2 с показателем интервальных оценок 6 2 1 2 комбинации в исходной матрице должны быть сдвинуты по циклу на пять шагов. Тогда последовательность нижней строки 0110010111 преобразуется и для ТО2 с интервальными оценками 6 2 1 2 будет сформирован вектор 1011101100, который по вертикальному циклу передвигается на верхнюю строку матрицы. Сказанное относится ко всем последующим показателям ТО.

Свойство 4. Внутри отдельной орбиты ТО проверочные части порождающих матриц ЭК образуются каждый раз за счет перестановки правого столбца на позицию левого столбца формируемой новой матрицы новой перестановки.

Преобразования проверочной части матрицы $G_{пер}$ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Систематические преобразования проверочной части порождающей матрицы ЭК в зависимости от содержания ОКО ТО с маркером 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 |
| Эталон | Сдвиг эталона на 5 циклов вправо | Сдвиг колонки 6212 на 3 цикла вправо | Сдвиг колонки 4621 на 1 цикл вправо | Нет сдвига |

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 эталонной матрицы СО.

Таким образом, матричные преобразования в системе ППН сводятся к циклическим преобразованиям некоторой исходной матрицы в требуемой матрицы ЭК для конкретной перестановки без выполнения арифметических операций в матричном пространстве.

Особенности обработки НПП

Главной отличительной чертой НПП является вырожденность переставленных матриц нумераторов наиболее надежных символов, принятых приемником кодовых векторов.

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 НПП. Очевидным является свойство, которое указывает на отсутствие пересечений указанных множеств. Поэтому отклик должен быть либо на выходе карты ППН, либо на выходе карты НПП. Идентичность процедуры поиска для множества ППН и НПП 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 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.

Таблица 4

Структура разниц нумераторов ОКО частных орбит перестановки 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 |

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 НПП, как 50% к 50%. При этом вероятность удачной замены символов остается относительно низкой, поскольку новая перестановка после заметны символов может вновь оказаться из множества НПП.

По этой причине предлагается использовать более совершенный алгоритм когнитивного регулятора, когда в системе замены НПП 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 НПП заключается в более полном информационном обеспечении процедуры поиска ППН. Например, при использовании

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

параллельной работы когнитивных карт регулятор обобщает результат такого поиска и принимает рациональное решение в процедуре поиска ЭК. Фрагмент одной записи карты НПП представлен в таблице 5.

Для организации процедуры рационального поиска данных в карте НПП глобальные и частные ОКО должны быть классифицированы лексикографически, что вытекает из семантических моделей традиционных поисковых систем.

Таблица 5

Структура нумераторов ОКО из состава НПП (фрагмент)

| Комбинация ОКО | Разница соседних интервалов | Запрещенные нумераторы |
|----------------|-----------------------------|------------------------|
| 1 2 3 4 6 | 1 1 2 2 | 8 9 12 |
| 1 11 12 13 14 | 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 |

Становятся ясны закономерности абстрактной алгебры применительно к множеству НПП, рассматриваемого совместно за закономерностями построения проверочной матрицы избыточного кода. При этом запрещенные нумераторы однозначно не являются продуктивными при попытке перевода перестановки из множества НПП в систему ППП. Исследование полной таблицы 5 показало, что запрещенное число значений нумераторов для разных ОКО из состава НПП может быть различным, но все без исключения перестановки имеют индекс **ВСЕ**. Этот факт в теории кодирования вскрыт впервые. Он нашел свое теоретическое объяснение, заключающееся в проявлении линейной зависимости строк матрицы $G_{пер}$.

Выявлены предпосылки к закономерности, при которой ни один из символов из состава проверочной матрицы не приводит перевод перестановки, обозначенной термином **ВСЕ** в систему ППП. Предварительно установлено, что такая замена обеспечивает положительный результат только при использовании двух или трех перестановок между информационными и проверочными разрядами, как показано на рисунке 3.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \xrightarrow[|A|=0]{\rightarrow A'} A' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow |A'| = 1$$

Рис. 3. Пример замены двух столбцов в матрице A с индексом **ВСЕ**

На рисунке 3 представлена ситуация, при которой приемник принял последовательность символов и по результатам их ранжирования была получена последовательность, состоящая из двух кортежей [1 2 4 6 15] [3 5 7 8 9 10 11 12 13 14].

В первой последовательности оказались наиболее надежные символы. Во второй последовательности в левой ее часть будут менее надежные символы, но с высокой вероятностью принятые правило по результатам фиксации жестких решений. В правой части второй последовательности окажутся символы с низкими значениями мягких решений, которые с высокой вероятностью будут ошибочными. В подобной ситуации для замены двух столбцов в матрице A целесообразно выбрать столбцы из второго кортежа с номерами 3 и 5.

Это приводит к образованию матрицы A' , которая обеспечивает получение ЭК.

На рисунке 4 показаны изменения в диаграмме при однократных перестановка столбцов.

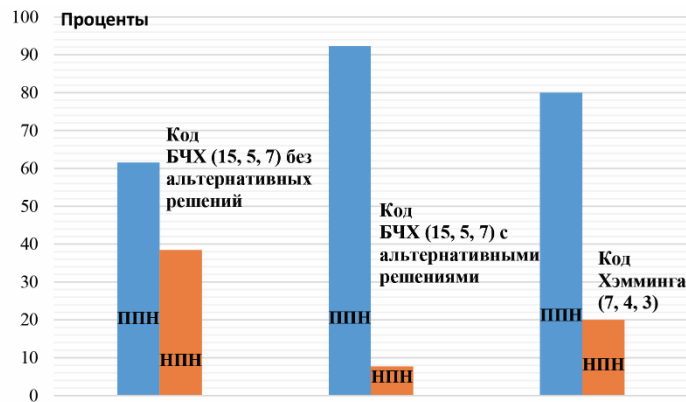


Рис. 4. Сравнительная характеристики кодов по параметрам ППП и НПП при использовании одинарных альтернативных решений

Вскрытые в ходе исследования закономерности перестановок в системе ПД позволяет 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 ППП и НПП. Поскольку множества реализаций этих карт не пересекаются, то ответ может быть получен только на выходе одной из указанных карт. Если отвечает карта ППП, 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.

Заключение

С точки зрения абстрактной алгебры в работе показаны ранее неизвестные свойства циклических перестановок замкнутого множества натуральных 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 переставленных 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.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Morelos-Zaragoza R. The Art of noise-tolerant coding. Methods, algorithms, and applications. 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. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с.
6. Zwicky F. Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach. New York: McMillan, 1969.
7. Акимов С.В. Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб., 2004. № 171. С. 165-173.
8. Акимов С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области / <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2> / 04.12.2023.
9. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52-56.
10. Gladkikh A. A., Ganin D. V., Pchelin N. A., Shakhtanov S. V., Ocherpovsky A. V. Coding Methods and Permutation Decoding in the Systems for Network Processing of Data // International Journal of Control and Automation Vol. 13, No.1, (2020), pp. 93-110.
11. Давыдов И.Ю., Козлов Д.А., Шахтанов С.В., Шубаева М.Ю. Перестановочное декодирование в системе комбинаций кодовых

конструкций при оценке биометрических данных // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 85-92.

12. Ганин Д.В., Дамдам М.А.Я., Савкин А.Л. Перестановочное декодирование в маломощных беспроводных сенсорных сетях // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (68). С. 54-61. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_68_54.

13. Новоселов А.В., Шахтанов С.В., Аль-Месри А.С.А., Толикina М.Ю. Оценка критериев эффективности защиты данных от ошибок на базе перестановочного декодирования // Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 27-34. doi:10.35752/1991-2927_2022_3_69_27.

14. Фрид Э. Элементарное введение в абстрактную алгебру. Пер. с венгер. Ю.А. Данилова. М.: Мир, 1979, 260 с.

15. 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.

16. Дамдам М.А.Я. Метод снижения сложности декодирования не двоичных избыточных кодов DSPA // 22 Международная конференция. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2020. С. 237-242.

17. Бабанов Н.Ю., Шахтанов С.В. Циклические свойства орбит перестановок когнитивной карты перестановочного декодера систем реального времени // Проектирование и технология электронных средств. 2020. №4(62). С.85-92.

18. Аттаби А.Л.Х., Брынза А.А., Ганин Д.В., Ничунаев А.А., Новоселов А.В. Оценка статистических характеристик перестановочного декодера методом его программной реализации // Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91-98. doi:10.35752/1991-2927_2023_2_72_91.

19. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. 2-е изд. Стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 284 с.

20. Аль-Месри А.С.А., Пчелин Н.А., Дамдам М.А.Я., Брынза А.А. Парадигма нейросетевого декодирования не двоичных избыточных кодов // Автоматизация процессов управления. 2021. № 1 (63). С. 74-81. doi:10.35752/1991-2927-2021-1-63-74.

MORPHOLOGICAL SYNTHESIS IN THE SYSTEM OF PERMUTATION DECODING ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE SOLUTIONS

Sergey A. Ageev, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia, serg123_61@mail.ru

Anatoly A. Gladkikh, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia, a_gladkikh@mail.ru

Alexander A. Brynza, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia, abrynza73@gmail.com

Vladimir V. Karetnikov, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia, karetnikovvv@gumrf.ru

Alexander L. Savkin, FPPC JSC RPA "MARS", Ulyanovsk, Russia, mars@mv.ru; savkin1957@inbox.ru

Abstract

The paper performs a morphological analysis of the problems that are solved by means of noise-resistant coding in systems of remote control of robotic objects. A new method and algorithms for error protection of transmitted data are presented and analyzed. The proposed method and algorithms are developed on the basis of morphological synthesis of information known in this subject area, but combined in a different way to achieve a technical solution superior in quality to known analogs. For example, concerning to the known method of permutation decoding, connected with the method of soft decoding, the concept of a cognitive map of admissible permutations of symbols of the code vector accepted by the receiver is added, that allows to calculate any permutations of the limited set of symbols a priori and on their basis to receive ready decisions on formation of parameters of the equivalent code. Thus, arithmetically complex matrix transformations prescribed by the classical method of obtaining the equivalent code are replaced by some list of ready solutions. This provides the possibility to use short binary redundant codes in real-time systems. It is shown that for such codes all permutations are divided into two non-overlapping subsets. The first part of permutations allows to obtain equivalent codes. The second part of permutations leads to degenerate permuted matrices which do not allow to realize the method of permutation decoding. In the work it is proved that both parts are quantitatively approximately identical for the majority of binary codes that reduces efficiency of use of the method of permutation decoding. It is proved that any permutation in cognitive maps can be represented as a login in an account. But, unlike the known solutions, each login has an addendum in the format of alternative solutions, allowing to define precisely the productive sequence of actions on transformation of a concrete situation with unsuccessful permutation. Application of additions allows to increase productivity of procedure of permutation decoding at the expense of one alternative permutation from 50% up to 90% at use simultaneously two additional permutations.

Keywords: morphological synthesis, permutation decoding, equivalent code, productive permutation, unproductive permutation, interval vector, alternative solution.

References

1. B. Sklyar, "Digital communication. Theoretical foundations and practical applications," Moscow: Williams. 2003. 1104 p.
2. R. Morelos-Zaragoza, "The Art of noise-tolerant coding. Methods, algorithms, and applications," Moscow: Technosphere. 2005. 320 p.
3. W. Peterson, E. Weldon, "Error-correcting codes," Moscow: Mir, 1976. 594 p.
4. A.S., Adjemov, V.G. Sannikov, "General theory of communication," Textbook for universities. Moscow: Hot Line – Telecom, 2018. 624 p.
5. V.A. Vargauzin, I.A. Tsikin, "Methods of increasing the energy and spectral efficiency of digital radio communication," SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 352 p.
6. F. Zwicky, "Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach," New York: McMillan, 1969.
7. S.V. Akimov, "Four-level integrative model for automation of the structure-parametric synthesis," *Proceedings of educational institutions of communication*. SPbGUT. 2004. No. 171, pp. 165-173.
8. S.V. Akimov, "Introduction to morphological methods of research and modeling of subject area knowledge," <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2 / 04.12.2023>.
9. A.A. Gladkikh, "Permutation decoding as a tool for increasing the energy efficiency of data exchange systems," *Elektrosvyaz*. 2017. No. 8, pp. 52-56.
10. A.A. Gladkikh, D.V. Ganin, N.A. Pchelin, S.V. Shakhtanov, A.V. Ochepovsky, "Coding Methods and Permutation Decoding in the Systems for Network Processing of Data," *International Journal of Control and Automation*. Vol. 13. No. 1, 2020, pp. 93-110.
11. I.Yu. Davydov, D.A. Kozlov, S.V. Shakhtanov, M.Yu. Shibaeva, "Permutation decoding in the system of combinations of code constructions in the evaluation of biometric data," *Automation of control processes*. 2019. No. 2 (56), pp. 85-92.
12. D.V. Ganin, M.A.Y. Damdam, A.L. Savkin, "Permutation decoding in low-power wireless sensor networks," *Automation of control processes*. 2022. No. 1 (68), pp. 54-61. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_68_54.
13. A.V. Novoselov, S.V. Shakhtanov, A.S.A. Al-Mesri, M.Y. Tolikina, "Estimation of the criteria of the data protection efficiency from errors on the basis of the permutation decoding," *Automation of control processes*. 2022. No. 3 (69), pp. 27-34. doi:10.35752/1991-2927_2022_3_69_27.
14. E. Fried, "Elementary introduction to abstract algebra," Moscow: Mir, 1979. 260 p.
15. B.A.S. Said, N.A. Pchelin, "Modification of the method of soft symbol solutions estimation and its verification," *Automation of control processes*. 2022. No. 1 (67), pp. 60-67. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_67_60.
16. M.A.Y. Damdam, "A method to reduce the decoding complexity of non-binary redundant DSPA codes," *22nd International Conference. Ser. "Digital signal processing and its application"*. Moscow. 2020, pp. 237-242.
17. N.Yu. Babanov, S.V. Shakhtanov, "Cyclic properties of the permutation orbits of the cognitive map of the permutation decoder of the real-time systems," *Designing and technology of electronic means*. 2020. No.4(62), pp. 85-92.
18. A.L.H. Attabi, A.A. Brynza, D.V. Ganin, A.A. Nichunaev, A.V. Novoselov, "Estimation of statistical characteristics of the permutation decoder by the method of its program realization," *Automation of control processes*. 2023. No. 2 (72), pp. 91-98. doi:10.35752/1991-2927_2023_2_72_91.
19. V.V. Borisov, V.V. Kruglov, A.S. Fedulov, "Fuzzy models and networks," 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 2017. 284 p.
20. A.S.A. Al-Mesri, N.A. Pchelin, M.A.Y. Damdam, A.A. Brynza, "Paradigm of neural network decoding of non-binary redundant codes," *Automation of control processes*. 2021. No. 1 (63), pp. 74-81. doi:10.35752/1991-2927_2021_1_63_74.

Information about authors:

Sergey A. Ageev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Telecommunications and Information Protection", Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

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

Alexander A. Brynza, postgraduate student of the Department of "Radio Engineering, Telecommunications and Information Protection" Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Vladimir V. Karetnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Inland Waterways Navigation Department, First Vice-Rector, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Alexander L. Savkin, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Head of the Service of Scientific and Technical Activity Support of FPPC JSC RPA "MARS", Ulyanovsk, Russia