

УДК 631.5; 004.031.4

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-133-140

И.А. Сорокин¹, ✉
П.Н. Романов¹,
Т.Е. Кондраненкова¹,
В.А. Ружьев²,
Н.А. Стенина³,
Н.Н. Пушкаренко⁴

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, Кемерово, Российская Федерация

⁴ Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Российская Федерация

✉ ivansorokin@bk.ru

Поступила в редакцию:
17.07.2022

Одобрена после рецензирования:
29.09.2022

Принята к публикации:
27.10.2022

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-133-140

Ivan A. Sorokin¹, ✉
Pavel N. Romanov¹,
Tatyana E. Kondranenkova¹,
Vyacheslav A. Ruzhev²,
Natalya A. Stenina³,
Nikolay N. Pushkarenko⁴

¹ Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russian Federation

² St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russian Federation

³ Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russian Federation

⁴ Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russian Federation

✉ ivansorokin@bk.ru

Received by the editorial office:
17.07.2022

Accepted in revised:
29.09.2022

Accepted for publication:
27.10.2022

Исследование алгоритмов перестановочного декодирования в системах управления БПЛА

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В данной работе представлена актуальная тема использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в агропромышленном комплексе (АПК) для получения оперативной достоверной информации о состоянии сельскохозяйственных угодий за весь период. В современных инфокоммуникационных технологиях и системах связи предъявляются высокие требования к достоверности передачи информации. В мобильных системах обмена данными используются композиции помехоустойчивых кодов в виде каскадных конструкций или турбокодов, и в целях повышения их эффективности необходимо наиболее полно использовать избыточность, введенную на каждой ступени обработки данных. Для решения подобной задачи целесообразно применить метод декодирования, основанный на упорядочивании индексов достоверности символов (ИДС) кодовой комбинации.

Методы. При определении систем кодирования-декодирования применялось прикладное программное обеспечение Mathcad. Проведенные математические исследования показали, что двоичные кодовые комбинации для достижения указанной границы могут быть декодированы не только на основе упорядоченной статистики, но и с использованием метода разбиения пространства разрешенных кодовых комбинаций на кластеры. На основе этого метода составлена блок-схема алгоритма имитационной модели работы декодера блокового кода на основе вычисления кластера.

Результаты. Применение предложенного способа мягкого декодирования систематических блоковых кодов позволяет сократить время обработки кодовых комбинаций в декодере за счет снижения размерности квадратной матрицы для определения свойства нелинейности строк переставленной порождающей матрицы после упорядочения столбцов исходной порождающей матрицы. Применение методов мягкого декодирования помехоустойчивых кодов позволяет снизить отношение сигнал/шум на 2 дБ по сравнению с методами жесткого декодирования при сохранении заданной достоверности передачи информации.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, декодирование, канал связи, мониторинг, обработка и передача данных, сельское хозяйство, сельскохозяйственные угодия

Для цитирования: Сорокин И.А., Романов П.Н., Кондраненкова Т.Е., Ружьев В.А., Стенина Н.А., Пушкаренко Н.Н. Исследование алгоритмов перестановочного декодирования в системах управления БПЛА. Аграрная наука. 2022; 364 (11): 133–140. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-133-140>

© Сорокин И.А., Романов П.Н., Кондраненкова Т.Е., Ружьев В.А., Стенина Н.А., Пушкаренко Н.Н.

Study of permutation decoding algorithms in UAV control systems

ABSTRACT

Relevance. This paper presents relevant topic of the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in the agro-industrial complex (AIC) to obtain timely reliable information about the state of agricultural land for the entire period. In modern infocommunication technologies and communication systems, high requirements are placed on the reliability of information transmission. In mobile data exchange systems, compositions of noise-resistant codes are used in the form of cascade designs or turbo codes, and in order to increase their efficiency, it is necessary to make the fullest use of the redundancy introduced at each stage of data processing. To solve such a problem, it is advisable to apply a decoding method based on the ordering of the character confidence indices (CCI) of the code combination.

Methods. When determining the encoding-decoding systems, the Mathcad application software was used. Mathematical studies have shown that binary block codes for reaching the specified boundary can be decoded not only on the basis of ordered statistics, but also using the method of dividing the space of allowed code combinations into clusters. Based on this method, a block diagram of the algorithm of the simulation model of the operation of the block code decoder based on cluster calculation is compiled.

Results. The application of the proposed method of soft decoding of systematic block codes reduces the processing time of code combinations in the decoder by reducing the dimension of the square matrix to determine the nonlinearity property of the rows of the rearranged generating matrix after ordering the columns of the original generating matrix.

Key words: UAV, decoding, communication channel, monitoring, data processing and transmission, agriculture, agricultural land

For citation: Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N. Study of permutation decoding algorithms in UAV control systems. Agrarian science. 2022; 364 (11): 133–140. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-133-140> (In Russian).

© Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N.

Введение / Introduction

Применение в современном сельском хозяйстве технологий и технически продвинутых устройств обусловлено высокими темпами роста потребительского спроса, а соответственно, необходимостью повышения объемов поставок для конкурентоспособности как на российском, так и на мировом рынке.

Высокие темпы технологического прогресса обязуют предприятия сельскохозяйственной отрасли использовать новшества для повышения качества выпускаемой продукции и уменьшения потерь, связанных с неблагоприятными природными явлениями. Наиболее ярко выражены являются потери в сельскохозяйственной отрасли, связанной с посевом зерновых культур. Как правило, большая доля гибели зерновых культур связана с недостаточной влажностью почвы, а также недостатком удобрений [1, 2].

Одним из инновационных методов определения состояния сельскохозяйственных культур является метод использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с инфракрасными датчиками и системами машинного зрения. Использование таких комплексов позволяет в автоматизированном режиме производить анализ почвы при помощи сегрегации инфракрасного излучения. Таким образом, описываемые системы могут выявлять наличие засушливых участков, а также участков с недостаточным озонированием почвы. В настоящее время на рынке существует множество типов и видов БПЛА: самолётного типа, вертолётного типа, беспилотные аэростаты, гибридные подклассы аппаратов [3].

Применение таких комплексов позволяет снизить убытки сельскохозяйственных предприятий до 19%, вследствие повышения всхожести посевов зерновых культур. Как правило, подобная практика в крупных предприятиях позволяет полностью окупить использование беспилотных летательных аппаратов и выйти на постоянную прибыль [4]. Кроме того, в итоге применение БПЛА влияет на увеличение количества и качества поставляемого продукта.

Широкое использование беспилотных летательных аппаратов, а также наземных роботов для сбора, обработки и передачи больших объемов данных предъявляет новые растущие требования к системе передачи данных: высокие скорости передачи данных, высокая динамическая траектория дронов, сильно развитая многолучевость и затухание при распространении сигнала. Научная значимость данной статьи заключается в установлении конкретных решений проблемы, разработке новых способов формирования, обработки, шифрования и дешифрования информации, направленных на повышение эффективности передачи информации при определенных условиях.

Для повышения уровня передачи информации беспилотными транспортными средствами предлагается использовать мягкие методы декодирования двусторонних избыточных кодов, а также спектрально-эффективных радиосигналов и пространственной структуры системы передачи информации [4].

В связи существенным развитием технологий, используемых в данной отрасли, БПЛА будут интенсивно внедряться во все сферы жизнедеятельности человека, в том числе и сельское хозяйство, значительно увеличивая производительность труда и снижая издержки производства.

Одним из приоритетных направлений исследований является наиболее полное использование пространственного ресурса, достигаемое путем применения

антенных систем, а также формирования, обработки, кодирования и декодирования информации с учетом помехоустойчивого кодирования.

Для повышения пропускной способности канала связи с беспилотным аппаратом предлагается использование мягких методов списочного декодирования недвоичных избыточных кодов, а также спектрально-эффективных радиосигналов, оптимизировать пространственную структуру системы передачи информации. На основе разработанных моделей распространения сигнала от беспилотного летательного аппарата и беспилотного наземного аппарата производится оптимизация числа и расположения приемных и передающих антенн. Согласование пространственных характеристик электромагнитного поля и пространственной структуры системы передачи информации, а также применение кластерного декодирования помехоустойчивых кодов позволяют приблизиться к потенциальному пределу пропускной способности. Для эффективного использования ресурса необходима полная информация о характеристиках канала передачи сигнала, что достигается разработкой и реализацией алгоритмов анализа характеристик распространения и тестированием канальной матрицы.

Достоинствами кластерного декодирования помехоустойчивых кодов являются возможность их компактного хранения, а также эффективная реализация процедур кодирования-декодирования на аппаратном уровне. Вместе с тем актуальной является задача уменьшения вероятности ошибок декодирования до величины 10^{-7} и менее. Поэтому разработка кодов, а также эффективных алгоритмов декодирования являются актуальными. Новизна научных исследований в области цифровой фильтрации определяется требованиями системы передачи информации от беспилотного аппарата и заключается в использовании концепции выработки оценок надежности символов недвоичных кодов по результатам обработки двоичной информации в непрерывном канале связи для эффективной реализации методов мягкого декодирования таких кодов, необходимых для управления движением беспилотного аппарата [5, 6, 7].

В современных инфокоммуникационных технологиях и системах связи предъявляются высокие требования к достоверности передачи информации. По этой причине в мобильных системах обмена данными используются композиции помехоустойчивых кодов в виде каскадных конструкций или турбокодов, и в целях повышения их эффективности необходимо наиболее полно использовать избыточность, введенную на каждой ступени обработки данных. Для решения подобной задачи целесообразно применить метод декодирования, основанный на упорядочивании индексов достоверности символов (ИДС) кодовой комбинации длины n по убыванию [8, 9, 10, 11, 12].

Материал и методы исследования / Materials and method

При определении систем кодирования-декодирования применялось прикладное программное обеспечение Mathcad (зарубежная программа для компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования).

Упорядоченная последовательность ИДС имеет вид:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (1)$$

$$|y_1| \geq |y_2| \geq \dots \geq |y_n| \quad (2)$$

Реализация этой процедуры приводит к подстановке λ_1 такой, что

$$y = \lambda_1(r), \quad (3)$$

где $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ — принятая последовательность символов.

В ходе сортировки ИДС, отвечающих λ_1 , создается перестановочная матрица R_{λ_1} . Следующий шаг декодирования состоит в перестановке столбцов порождающей матрицы в систематической форме в порядке, соответствующем последовательности Y :

$$G = (I_{k \times k} : H_{(n-k) \times k}^T), \quad (4)$$

где k — число информационных разрядов кода.

Выполняя $G \times R_{\lambda_1}$, получим:

$$G' = \lambda_1[G(Y)] = (g'_1 g'_2 \dots g'_n), \quad (5)$$

где g'_i — i -й столбец матрицы G' .

Естественно, образованная таким образом матрица G' на данном шаге алгоритма не является систематической.

Продолжение алгоритма состоит в построении наиболее надежного базиса возможного эквивалентного кода. Начиная с первого столбца матрицы G' , находятся первые k линейно независимых столбцов, которым в соответствии с Y соответствуют наибольшие ИДС. Остальные $(n - k)$ столбцов тоже упорядочиваются в порядке убывания их надежности, приводя к отображению λ_2 такому, что:

$$G'' = \lambda_2[G'] = \lambda_2[\lambda_1[G(Y)]]. \quad (6)$$

Применяя отображение λ_2 к последовательности Y , декодер получает новую переупорядоченную последовательность Z , где:

$$Z = \lambda_2(Y) = (z_1, z_2, \dots, z_k, z_{k+1}, \dots, z_n). \quad (7)$$

В этой последовательности:

$$|z_1| \geq |z_2| \geq \dots \geq |z_k| \geq |z_{k+1}| \geq \dots \geq |z_n|. \quad (8)$$

Для проверки линейной независимости строк в матрице G' декодер выделяет первые k столбцов и, формируя квадратную матрицу $A_{k \times k}$, вычисляет ее детерминант. При $\det(S_{k \times k}) \neq 0$ открывается возможность образования из матрицы G'' путем линейных преобразований ее строк и столбцов новой матрицы эквивалентного кода $G''_{\text{сист}}$ в систематической форме. Следует учитывать, что при $\det(A_{k \times k}) = 0$ в матрице $A_{k \times k}$ наблюдается свойство линейной зависимости строк, что не позволяет сразу получить $G''_{\text{сист}}$. В случае линейной зависимости строк декодер переходит к итеративной процедуре преобразования $A_{k \times k}$ за счет смены мест столбцов с номерами k и $k + 1$ в G' . При отрицательном исходе первого шага итерации осуществляется смена мест столбцов с номерами $k + 1$ и $k + 2$ (второй шаг итерации). Выполнение последующих шагов итераций считается нецелесообразным, поскольку на позициях с номерами $k + 3$ и более с высокой вероятностью могут оказаться ошибочно принятые символы. В этом случае комбинация отмечается как

стирание для последующего восстановления на уровне внешних декодеров. Последнее обстоятельство не актуально для максимально декодируемых кодов, так как для них всегда выполняется первое условие $\det(A_{k \times k}) \neq 0$. Именно к такому классу кодов относятся коды Риды — Соломона (РС).

Получив удовлетворительный результат по вычислению $\det(A_{k \times k})$, декодер должен выполнить регулярную процедуру по вычислению матрицы $G''_{\text{сист}}$. Известно, что произведение матрицы $A_{k \times k} = A$ на ее обратное отображение $A \times A^{-1} = E$ обеспечивает получение единичной матрицы. Исходя из этого, декодер выполняет регулярную процедуру вычисления такой матрицы и определяет обратную матрицу A^{-1} , которая точно указывает на порядок преобразования строк матрицы G'' для получения новой порождающей матрицы в систематической форме $G''_{\text{сист}}$.

Описанная процедура легко программируется для процессора приемника, однако следует учитывать, что объем вычислений экспоненциально увеличивается с ростом k . Для повышения скорости работы процессора приемника (сокращения объема вычислений) предлагается использовать принцип перехода от основного (n, k, d) кода к некоторому укороченному коду.

Оценить эффективность такого преобразования можно, исходя из следующих соображений. Современные процессоры тратят на операцию сложения до 2 нс, а на операцию умножения — до 180 нс. С некоторой долей условности можно утверждать, что на операцию умножения операндов в двоичном поле процессор будет затрачивать около 2 нс. Таким образом, на вычисление определителя матрицы $S_{2 \times 2}$ потребуется порядка 6 нс. Исходя из этих условий, в табл. 1 представлены данные оценки временных затрат при вычислении определителей матриц других размерностей.

Из табл. 1 следует, что незначительное увеличение размерности квадратной матрицы приводит к существенному увеличению времени вычисления определителя. По полученным из табл. 1 данным построим график зависимости времени вычисления определителя матрицы $k \times k$ от ее размерности (рис. 1).

При переходе к такому коду необходимо выполнить коррекцию принятого вектора $V_{\text{пр}}$ путем сложения его с результатом произведения комбинации f символов, определяющих процедуру укорочения, на первые f строк матрицы G . Матрица G известна приемнику, следовательно, надежность приема символов f не должна вызывать сомнений. Защиту таких символов представляется возможным осуществить, используя дополнительные средства, например проверку на четность.

В результате выполнения алгоритма декодеру становятся известными принятый вектор $V_{\text{пр}}$ с ошибками и упорядоченными по убыванию ИДС, матрица перестановки R_{λ_1} и результат ее умножения на вектор $V_{\text{пр}}$: $V'_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \times R_{\lambda_1}$, преобразованная в соответствии с Y порождающая матрица $G''_{\text{сист}}$ и новый вектор $V''_{\text{пр}}$ как результат умножения информационных разрядов с наиболее надежными ИДС из $V'_{\text{пр}}$ на $G''_{\text{сист}}$. Очевидно, что

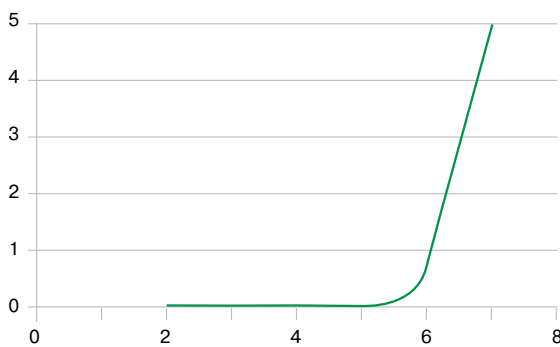
Таблица 1. Ориентировочные временные затраты для расчета определителей матриц для повышения скорости работы процессора декодера

Table 1. Estimated time costs for calculating matrix determinants to increase the speed of the decoder processor

Размерность матрицы $k \times k$ и ориентировочное время вычисления определителя					
2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
$6 \cdot 10^{-9}$ с	$4,6 \cdot 10^{-8}$ с	$2,2 \cdot 10^{-7}$ с	$1,2 \cdot 10^{-6}$ с	$7 \cdot 10^{-6}$ с	$4,9 \cdot 10^{-5}$ с

Рис. 1. Ориентировочные временные затраты для расчета определителей матриц

Fig. 1. Estimated time spent for calculating matrix determinants



вычитание вектора $V''_{пр}$ из вектора $V'_{пр}$ определяет вектор ошибок V'_{er} . Этот вектор необходимо умножить на $R_{n,1}^T$, чтобы получить истинный вектор ошибок V_{er} , действовавший в канале связи в ходе передачи информации. Сложение этого вектора с вектором $V_{пр}$ обеспечивает восстановление той кодовой комбинации, которая была передана передатчиком. В лучшем случае подобный алгоритм способен обеспечить исправление $(n - k)$ стираний, что для большинства используемых на практике двоичных кодов превосходит метрику Хэмминга.

Асимптотической оценкой энергетического выигрыша от применения блокового двоичного кода может служить выражение:

$$D_{km} = \delta \times 10 \lg(k(1 - R + 1/n)) \text{ дБ}, \quad (9)$$

где δ — поправочный коэффициент; R — характеристика кода, определяющая долю вводимой в код избыточности, при этом $R = k/n$ [13].

Условие $\delta = 0$ справедливо не для всех кодов. Известно, что не двоичные коды достигают значения D_{km} , что нельзя сказать о двоичных кодах, которые в большинстве своем не являются максимально декодируемыми кодами [13].

Принимая для двоичных кодов коэффициент $\delta \approx 0,7$, можно определить максимальные возможности применяемого в системе кода, а значения δ напрямую зависят от весовой структуры кода. Действительно, условие $\det(A_{k \times k}) = 0$ выполняется в том случае, если в любой строке матрицы $A_{k \times k}$ после перестановки столбцов образуется строка, содержащая все нули. Подобное случается для 20–25% возможных подстановок. Временные задержки при реализации указанной процедуры могут быть скомпенсированы повышением рабочей частоты процессора.

Асимптотическое оценивание системы избыточного кодирования показывает, что максимум D_{km} при фиксированном n достигается при значениях R , близких к 0,5, и по мере отклонения R от этой нормы выигрыш D_{km} незначительно убывает. В любом случае с увеличением n энергетический выигрыш от применения алгоритма декодирования увеличивается, превосходя те значения этого параметра, которые возможны при мягком декодировании. Асимптотическая оценка метода указывает на возможность получения энергетического выигрыша до 2 дБ относительно мягких способов декодирования избыточных кодов.

Проведенные исследования показали, что двоичные блоковые коды для достижения указанной границы могут быть декодированы не только на основе упорядочен-

ной статистики, но и с использованием метода разбиения пространства разрешенных кодовых комбинаций на кластеры (лексикографический подход к составлению списка) [13].

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На основе этого метода составлена блок-схема алгоритма имитационной модели работы декодера блокового кода на основе вычисления кластера.

Символы принятой кодовой комбинации V систематического (n, k) -кода по основному алгоритму упорядочиваются по убыванию их градаций надежности и на основании выполненных перестановок формируется вектор V' , который совместно с вектором V образует двудольный граф для формирования матрицы перестановок R , умножение на которую порождающей матрицы кода G приводит к получению новой матрицы G' , первые k столбцов которой проверяются на предмет линейной независимости и в случае положительного исхода этой проверки матрица G' приводится к систематической форме G'_s , при этом первые k наиболее надежных элементов вектора V' путем умножения на G'_s образуют вектор эквивалентного кода $V_{эkv}$, который при поэлементном сложении по модулю 2 с вектором V' формирует переставленный вектор ошибок E' и после умножения вектора E' на R^T формируется вектор ошибок E , действовавший в канале связи на вектор V , при этом в случае отрицательного результата проверки линейной независимости строк матрицы G' осуществляется замена k -го столбца этой матрицы на $(k - 1)$ -й столбец и в случае необходимости на последующие столбцы до выполнения условия линейной независимости k первых столбцов матрицы G' ; при выполнении этого условия адекватно меняются местами элементы в V' и столбцы R , отличающиеся тем, что для всех разрешенных кодовых комбинаций (n, k) -кода по их f старшим разрядам определяют номер кластера, при этом значение f выбирают в пределах $1 < f \leq \lfloor k/2 \rfloor$ и при формировании кодового вектора на передаче младший разряд комбинации (правый) выкалывается и заменяется на бит проверки четности f разрядов кластера, а приемник, приняв вектор V по градациям надежности и биту четности, оценивает правильность приема номера кластера и в случае положительного решения переходит к обработке $(n - f, k - f)$ -кода по основному алгоритму, предварительно сформировав корректирующий вектор $W_{ук}$ путем умножения разрядов номера кластера на первые f строк порождающей матрицы G кода и последующего временного удаления из него разрядов кластера, после чего вектор $W_{ук}$ вычитается из вектора V , при этом разряды кластера вектора V также не учитываются, младшему разряду вновь образованного вектора $V_{ук}$ присваивается наиболее низкая оценка градации надежности, после чего декодер работает по основному алгоритму, формируя вектор ошибок E , который поразрядно складывается с векторами $W_{ук}$, $V_{ук}$, формируя переданный вектор V за счет возвращения на свои места старших разрядов номера кластера, при этом если проверка на четность номера кластера не выполняется, декодер подвергает инверсии наиболее ненадежный бит из числа участвующих в проверке.

Используем данный метод на примере двоичного кода БЧХ $(15, 7, 5)$ с порождающим полиномом $g(x) = 721_8$. Под номер кластера выделим первые три информационных разряда, $f = 3$. Порождающая матрица G в систематической форме имеет вид:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Пусть на выходе кодера образовался вектор вида:

$$V_{\text{код}} = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0.$$

Передатчик заменяет младший (правый) бит комбинации на бит проверки четности для старших трех разрядов, определяющих номер кластера. Следовательно, в канал связи будет передан вектор:

$$V_{\text{пер}} = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1.$$

Приемник принимает вектор, устанавливая по какому-либо известному принципу градацию надежности для каждого символа. Пусть соответствие символов и градаций надежности символов (далее — оценки) имеет вид

$$V = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1$$

Оценки 6 2 7 7 1 1 1 7 7 7 7 5 5 7, следовательно, вектор ошибок представлен последовательностью

$$e = 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0.$$

Приняв вектор с ошибками, декодер на первом шаге декодирования проверяет номер кластера на четность. В примере проверка на четность дает отрицательный результат, поэтому декодер инвертирует второй разряд в номере кластера, так как он имеет худшую оценку надежности. Вектор, используемый для последующего анализа, принимает вид

$$V = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1.$$

Номер восстановленного кластера имеет значение 4_{10} . Декодер переходит на укороченный код (1, 2, 4, 5), порождающая матрица которого имеет вид:

$$G_{\text{ук}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Далее формируется корректирующий вектор W путем умножения номера кластера на первые три строки порождающей матрицы G . Тогда

$$W = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0$$

и после исключения из него разрядов кластера, вектор имеет вид

$$W_{\text{ук}} = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0.$$

Складывая по модулю 2 с соответствующими разрядами принятого вектора V и $W_{\text{ук}}$, получаем вектор укороченного кода $V_{\text{ук}}$:

$$V = 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1$$

$$W_{\text{ук}} = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0$$

$$V_{\text{ук}} = 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1$$

$$\text{Оценки } 7 \ 1 \ 1 \ 1 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 5 \ 5 \ 0.$$

Младшему разряду этого вектора искусственно присваивается наиболее низкий индекс достоверности символа (в нашем случае 0, показан курсивом). После чего выполняется основной алгоритм декодера, представленный ниже в табл. 2.

В этом алгоритме переходы от элементов строки «Порядковой нумерации» к элементам строки «Новая нумерация символов» представляются двудольным графом, на основании которого по общеизвестным правилам формируется матрица перестановок R размерности $(n-f) \times (n-f)$.

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Путем умножения матрицы R на матрицу $G_{\text{ук}}$ получают результат предварительного преобразования, который необходимо оценить с точки зрения сохранения свойства нелинейности строк новой матрицы G' .

$$G' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Для этого из G' выделяются первые $k-f=\lambda$ столбцов с образованием матрицы $A_{\lambda \times \lambda}$, для которой проверяют условие $\det(A_{\lambda \times \lambda}) \neq 0$, и выполняется действие по вычислению обратной матрицы $A_{\lambda \times \lambda}^{-1} = E_{\lambda \times \lambda} / A_{\lambda \times \lambda}$, структура которой точно указывает на порядок комбинирования строк матрицы G' для получения в систематической форме порождающей матрицы G'_s . Например, для G' имеем

$$A_{\lambda \times \lambda}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Если условие $\det(A_{\lambda \times \lambda}) \neq 0$ не выполняется, то 4-й столбец матрицы G' меняется местами с 5-м столбцом.

Таблица 2. Алгоритм перехода к новой нумерации символа кода декодера

Table 2. Algorithm for switching to a new numbering of the decoder code symbol

Порядковая нумерация	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вектор укороченного кода $V_{\text{ук}}$	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Оценки	7	1	1	1	7	7	7	7	7	5	5	0
Новая нумерация символов	1	5	6	7	8	9	10	11	2	3	4	12
Значения переставленных символов $V_{\text{пром}}$	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1

Если и в этих условиях детерминант оказывается равным нулю, то 4-й столбец матрицы G' меняется местами с 6-м столбцом. После вычисления $A_{\lambda \times \lambda}^{-1}$, вычисляется порождающая матрица эквивалентного кода в систематической форме.

$$G'_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Вектор 0111, выделенный в табл. 2, умножается на новую порождающую матрицу и в результате образует вектор:

$$V_{\text{экр}} = 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Вектор $V_{\text{экр}}$ поразрядно сравнивается со значениями вектора $V_{\text{пром}}$.

Выполнив операцию $e_{\text{услв}} \times R^T = e$, декодер получает вектор ошибок, действовавшего в канале связи при передаче кодового вектора. Для получения истинного вектора укороченного кода необходимо сложить по модулю 2 три вектора: вектор ошибок e , корректирующий вектор $W_{\text{ук}}$ и вектор укороченного кода $V_{\text{ук}}$.

К результату сложения справа необходимо добавить три старших разряда, отвечающих за номер кластера.

Полученный результат свидетельствует о результативности алгоритма. Применение предложенного способа мягкого декодирования систематических блочных кодов позволяет сократить время обработки кодовых комбинаций в декодере за счет снижения размерности квадратной матрицы для определения свойства нелинейности строк переставленной порождающей матрицы после упорядочения столбцов исходной порождающей матрицы.

Применение методов мягкого декодирования помехоустойчивых кодов позволяет снизить отношение сигнал/шум приблизительно на 2 дБ по сравнению с методами жесткого декодирования при сохранении заданной достоверности передачи информации.

Для повышения вероятностных характеристик системы необходимо в перспективе применять мягкие декодеры как кода РС, так и сверточного кода. При этом сложность декодера будет повышена незначительно.

Разбиение пространства кодовых комбинаций на подмножества (кластеры) позволяет организовать защитные зоны кодовых комбинаций не в виде сфер, а в виде прямоугольных параллелепипедов. Отход от метрики Хэмминга и вычисление позиции кодовой комбинации в декартовой системе координат позволяет правильно определить положение вектора на плоскости кластера при условии, что старшие разряды координат оказались принятыми верно.

Главная задача декодера заключается в правильном определении номера кластера. Для восстановления старших разрядов кластеров и координат целесообразно использовать принципы декодирования с итеративным распространением доверия (декодирования по наилучшим показателям) и метод выкалывания симво-

Таблица 3. Расчет условного вектора ошибок, действовавший в канале связи

Table 3. Calculation of the conditional error vector acting in the communication channel

Комбинация эквивалентного кода $V_{\text{экр}}$	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
Значения переставленных символов $V_{\text{пром}}$	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
Условный вектор ошибок $e_{\text{услв}}$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Таблица 4. Расчет вектора, принятого из канала связи, без учета номера кластера

Table 4. Calculation of the vector received from the communication channel, without taking into account the cluster number

Комбинация укороченного кода $V_{\text{ук}}$	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Корректирующий вектор $W_{\text{ук}}$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
Вектор ошибок e	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
Результат сложения	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Таблица 5. Восстановление номера кластера кодовых комбинаций в декодере

Table 5. Restoration of the cluster number of code combinations in the decoder

Комбинация укороченного кода $V_{\text{ук}}$	Позиции разрядов кластера		0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Комбинация с номером кластера	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Вектор, принятый из канала связи	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0

лов, полученных в ходе стандартной процедуры кодирования, и замены их на проверочные символы.

Выводы / Conclusion

1. Условия функционирования системы связи с применением параметрической адаптации по коду РС определяют выбор метода декодирования этого кода по принципу упорядоченной статистики.

2. Подобная схема декодирования исключает методы переключений в регистрах сдвига, что существенно упрощает процедуру управления работой процессора приемника и программирования соответствующих программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

3. В декодер необходимо ввести регистр хранения оценок, необходимый для формирования перестановочной матрицы. Учитывая наличие всего двух оценок, процедура сортировки такого массива не вызывает трудностей.

4. Применение режима адаптации не потребует существенного изменения сложившейся структуры заголовка кадра. Необходимо предусмотреть всего один дополнительный байт.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хайрулина Т. П. Влияние различных уровней влажности почвы на активность ферментов в листьях и семенах сои. В сборнике: *Адаптивные технологии в растениеводстве Амурской области*. Благовещенск, 2014; 16-21.
2. Абдуллаев А.А., Джумаев Б.Б., Эргашев А., Сабоиев И.А., Каримов Х.Х. Влияние засухи на фотосинтетические параметры флаговых листьев различных сортов пшеницы. *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук*. 2010; (4). 46-53.
3. Зубарев, Ю., Фомин, Д., Чашчин, А., Заболотнова, М. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*, 2019; (2), 47-51. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>
4. Сорокин И.А., Обухов А.Д., Романов П.Н., Шibaева М.Ю. Применение метода перестановочного декодирования в системе управления беспилотных летательных аппаратов малого класса (дроны, мультикоптеры). *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2019; (2) 186-195.
5. Sorokin I.A., Kondrankenkova T.Y., Chesnokov A.D., Shibaeva M.Y., Ochepovsky A.V. The use of coding-decoding systems on unmanned aircraft with the sensor networks operation. *International Journal of Control and Automation*. 2020; Vol. 13. (1). P. 82-92.
6. Золотарев, В. В., Овечкин Г. В., чл.-кор. РАН Зубарева Ю. Б. ред. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. М.: Горячая линия-Телеком, 2004: 126. .
7. Гладких А. А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными *Электросвязь*. 2017; (8). 52-56.
8. Гладких, А. А., Давыдов И. Ю. Способ мягкого декодирования линейных кодов. В книге: *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Материалы 22-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара*. 2019; 127-129. .
9. Блох, Э. Л., Попов О.В., Турин В.Я. Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации М.: Связь, 1971: 312
10. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УлГТУ, 2010; 253
11. Злотник, Б. М. Помехоустойчивые коды в системах связи Статистическая теория связи. М.: Радио и связь, Вып. 31, 1989: 232.
12. Зяблов, В. В., Цветков М. А. Метод обнаружения ошибочного декодирования с использованием списков. *Информационные процессы*. 2004; Т. 4. (2). 188-201.
13. Дамдам, М.А.Я. Метод снижения сложности декодирования не двоичных избыточных кодов. *DSPA2020: докл. 22-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение»*. 25-27 марта 2020; 200-205.

ОБ АВТОРАХ:

Иван Александрович Сорокин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 а., ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижегородская область, 606340, Российская Федерация E-mail: ivansorokin@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-0977-3563>

Павел Николаевич Романов, старший преподаватель кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 а., ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижегородская область, 606340, Российская Федерация E-mail: pavel.romanov011@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7656-8706>

Татьяна Евгеньевна Кондраненкова, старший преподаватель кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 а., ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижегородская область, 606340, Российская Федерация E-mail: tat2192@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3901-3389>

REFERENCES

1. Khairulina T. P. Influence of different levels of soil moisture on the activity of enzymes in soybean leaves and seeds. In the collection: *adaptive technologies in crop production in the Amur region*. Blagoveshchensk, 2014; 16-21. (In Russian)
2. Abdullaev A.A., Dzumaev B.B., Ergashev A., Saboiev I.A., Karimov Kh.Kh. Effect of drought on photosynthetic parameters of flag leaves of different wheat varieties. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Biological and Medical Sciences*. 2010; (4). 46-53. (In Russian)
3. Zubarev, Yu., Fomin, D., Chashchin, A., Zabolotnova, M. The use of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, 2019; (2), 47-51. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>(In Russian)
4. Sorokin I.A., Obukhov A.D., Romanov P.N., Shibaeva M.Yu. Application of the permutation decoding method in the control system of small unmanned aerial vehicles (drones, multicopters) / *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019; (2) 186-195. (In Russian)
5. Sorokin I.A., Kondrankenkova T.Y., Chesnokov A.D., Shibaeva M.Y., Ochepovsky A.V. The use of coding-decoding systems on unmanned aircraft with the sensor networks operation *International Journal of Control and Automation*. 2020; Vol. 13. (1). P. 82-92.
6. Zolotarev V. V., Ovechkin G. V., Corresponding Member. RAS Zubareva Yu. B. ed. *Noise-correcting coding. Methods and algorithms*. Directory. M.: Hotline-Telecom, 2004: 126 (In Russian)]
7. Gladkikh A. A. Permutation decoding as a tool for improving the energy efficiency of data exchange systems. *Telecommunication*. 2017; (8). 52-56. (In Russian)
8. Gladkikh, A. A., Davydov, I. Yu., Method for soft decoding of linear codes in the book: *Actual problems of physical and functional electronics. Materials of the 22nd All-Russian Youth Scientific School-Seminar*. 2019; 127-129. (In Russian)
9. Bloch, E. L., Popov O. V., Turin V. Ya. Error Source Models in Digital Information Transmission Channels M.: Svyaz, 1971: 312 (In Russian)
10. Gladkikh A.A. Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in an erasing communication channel *Ulyanovsk: UIGTU*, 2010; 253 (In Russian)
11. Zlotnik, B. M. Noise-immune codes in communication systems *Statistical Theory of Communication*. M.: Radio and communication, Vol. 31, 1989: 232. (In Russian)
12. Zyablov, V. V., Tsvetkov, M. A Method for detecting erroneous decoding using lists. *Information processes*. 2004; T. 4. (2). 188-201. (In Russian)
13. Damdam, M.A.Ya. Method of reducing the complexity of decoding non-binary redundant codes *DSPA2020: dokl. 22nd International Conference "Digital signal processing and its application"*. March 25-27, 2020; 200-205. (In Russian)

ABOUT THE AUTHORS:

Ivan Aleksandrovich Sorokin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, 22 a., st. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation E-mail: ivansorokin@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-0977-3563>

Pavel Nikolaevich Romanov, Senior Lecturer, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, 22 a., st. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation E-mail: pavel.romanov011@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7656-8706>

Tatiana Evgenievna Kondranenkova, Senior Lecturer, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, 22 a., st. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation E-mail: tat2192@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3901-3389>

ОБ АВТОРАХ:

Вячеслав Анатольевич Ружьев, кандидат технических наук, доцент, декан Инженерно-технологического факультета, заведующий кафедрой «Технические системы в агробизнесе» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», 2, Петербургское шоссе, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, 196601, Российская Федерация
E-mail: ruzhev_va@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3011-639X>

Наталья Александровна Стенина, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, ФГБОУ ВО «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия», 5, ул. Марковцева, г. Кемерово, 650056, Российская Федерация
E-mail: stnat33@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5087-5732>

Николай Николаевич Пушкаренко, кандидат технических наук, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и комплексов, Чувашский государственный аграрный университет, 29, ул. К. Маркса, г. Чебоксары, 428003, Российская Федерация
E-mail: stl_mstu@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS:

Vyacheslav Anatolievich Ruzhev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Head of the Department "Technical Systems in Agribusiness" federal state budgetary educational institution higher education "St. Petersburg State Agrarian University", 2, Petersburg highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation
E-mail: ruzhev_va@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3011-639X>

Natalya Alexandrovna Stenina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering, Kuzbass State Agricultural Academy, 5, st. Markovtseva, Kemerovo, 650056, Russian Federation
E-mail: stnat33@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5087-5732>

Nikolai Nikolaevich Pushkarenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, Chuvash State Agrarian University, 29, st. K. Marx, Cheboksary, 428003, Russian Federation
E-mail: stl_mstu@mail.ru