

УДК 004.052.2

DOI 10.17513/snt.40171

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ, ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОЙ СИСТЕМЫ OFDM, РЕАЛИЗОВАННОЙ В МОДУЛЯРНЫХ КОДАХ, И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕЕ РАЗРАБОТКЕ

Калмыков И.А., Чистоусов Н.К., Калмыкова Н.И., Духовный Д.В.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь,  
e-mail: kia762@yandex.ru

Цель исследования – разработать практические рекомендации по построению математической модели системы с частотным ортогональным мультиплексированием, реализованной в модулярных кодах, применение которой позволит повысить ее отказоустойчивость и помехозащищенность. Так как для повышения отказоустойчивости и помехозащищенности применяются избыточные модулярные коды, то в статье рассмотрены принципы их построения. Для достижения этой цели в статье описаны практические рекомендации для построения отказоустойчивой и помехозащищенной системы передачи. Используя эти рекомендации, была разработана математическая модель беспроводной системы передачи информации, способной корректировать ошибки, которые возникают как в процессе выполнения обработки сигналов, так и при передаче по каналу связи. Для коррекции ошибок был разработан алгоритм вычисления коэффициентов полиадической системы кодирования, применение которого позволяет одновременно выполнять процесс поиска ошибок и осуществлять преобразование из модулярного кода в позиционный код. В результате этого сокращаются временные затраты на обработку сигналов. Приведен пример реализации математической модели системы передачи на основе разработанных практических рекомендаций. Показаны примеры коррекции ошибок, возникающих как при вычислениях, так и при передаче из-за помех в канале связи.

**Ключевые слова:** системы OFDM, вейвлет-преобразования, практические рекомендации, модулярные коды классов вычетов, отказоустойчивость, помехоустойчивость, коррекция ошибок

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00036, <https://rscf.ru/project/23-21-00036/>.*

## MATHEMATICAL MODEL OF A FAULT-TOLERANT, INTERFERENCE-PROOF OFDM SYSTEM IMPLEMENTED IN MODULAR CODES AND PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR ITS DEVELOPMENT

Kalmykov I.A., Chistousov N.K., Kalmykova N.I., Dukhovnyy D.V.

North-Caucasian Federal University, Stavropol, e-mail: kia762@yandex.ru

The purpose of the study is to develop practical recommendations for the construction of a mathematical model of a system with frequency orthogonal multiplexing implemented in modular codes, the use of which will increase its fault tolerance and noise immunity. Since redundant modular codes are used to increase fault tolerance and noise immunity, the article discusses the principles of their construction. To achieve this goal, the article describes practical recommendations for building a fault-tolerant and noise-proof transmission system. Using these recommendations, a mathematical model of a wireless information transmission system has been developed that can correct errors that occur both during signal processing and during transmission over a communication channel. To correct errors, an algorithm has been developed for calculating the coefficients of a polyadic coding system, the use of which allows you to simultaneously perform the error search process and convert from modular code to positional code. As a result, the time spent on signal processing is reduced. An example of the implementation of a mathematical model of the transmission system based on the developed practical recommendations is given. Examples of error correction are shown, which occur both during calculations and during transmission due to interference in the communication channel.

**Keywords:** OFDM systems, wavelet transformations, practical recommendations, modular codes of residue classes, fault tolerance, noise immunity, error correction

*The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-21-00036, <https://rscf.ru/project/23-21-00036/>.*

### Введение

Базовой идеей технологии OFDM является параллельная передача данных на наборе частот, полученных с помощью быстрого преобразования (БПФ) [1]. Это позволяет обеспечить высокую скорость передачи информации. В результате такие

системы нашли применение в низкоорбитальном спутниковом интернете (НСИ). Так как НСИ базируется на спутниках и обмен данными осуществляется в сложной помеховой обстановке, то система с OFDM должна обладать свойствами отказоустойчивости и помехозащищенности. Одним

из вариантов решения этой проблемы выступают модулярные коды классов вычетов (МККВ). Введение МККВ в структуру систем с OFDM обеспечило увеличение скорости передачи данных за счет более быстрого выполнения цифровой обработки сигналов (ЦОС) с использованием дискретных вейвлет-преобразований (ДВП). Переход при выполнении ЦОС от БПФ к ДВП привел к созданию новых математических моделей систем OFDM, которые рассмотрены в работах [2, 3]. Но МККВ, благодаря своей структуре, способны корректировать ошибки, которые возникают как при вычислениях ДВП [4, 5], так и при передаче данных по каналу связи [6]. Однако эти возможности были рассмотрены отдельно друг от друга. **Цель исследования** – разработать практические рекомендации по построению математической модели системы с OFDM, реализованной в МККВ, применение кото-

рой позволит повысить ее отказоустойчивость и помехозащищенность.

### Материалы и методы исследования

#### 1. Принципы построения избыточных модулярных кодов классов вычетов

В МККВ кодовая комбинация представляет собой кортеж из  $n$  остатков  $Y_i = Y \bmod p_i$  целого числа  $Y$ , где  $n$  – количество информационных оснований  $p_i, i = 1, 2, \dots, n$  [7–9]

$$Y = (Y_1, \dots, Y_n). \quad (1)$$

Основания – это взаимно простые числа  $p_1, \dots, p_n$ , которые задают рабочий диапазон

$$P_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (2)$$

Известно, что МККВ относятся к арифметическим кодам, для которых справедливо

$$Y * X = \left( |Y_1 * X_1|_{p_1}^+, |Y_2 * X_2|_{p_2}^+, \dots, |Y_{n-1} * X_{n-1}|_{p_{n-1}}^+, |Y_n * X_n|_{p_n}^+ \right), \quad (3)$$

где  $*$  – модульные операции (сложение, вычитание, умножение);  $X = X \bmod p_i; i = 1, 2, \dots, n$ .

Пусть для коррекции ошибок в МККВ будет введено дополнительно  $r$  контрольных оснований. В результате произойдет увеличение диапазона МККВ до полного диапазона

$$P_{n+r} = \prod_{i=1}^{n+r} p_i = P_n \prod_{i=n+1}^{n+r} p_i = P_n \tilde{P}_r. \quad (4)$$

В этом случае МККВ сможет корректировать ошибки кратностью  $r/2$ . Комбинация МККВ будет отнесена к разрешенной, если выполнится условие

$$Y = (Y_1, \dots, Y_n, Y_{n+1}, \dots, Y_{n+r}) < P_n. \quad (5)$$

#### 2. Практические рекомендации для построения отказоустойчивой и помехозащищенной системы с OFDM

В помехоустойчивых системах OFDM поток информации сначала кодируется с помощью избыточного кода. После этого поток информационных и контрольных разрядов подвергается преобразованиям, определяемым технологией OFDM. Этот подход будет использован и в разработанных практических рекомендациях, которые содержат этапы:

1. Выбор ДВП для реализации ЦОС, применяемой в системе с OFDM.

2. Выбор разрядности входных данных  $M$  для системы с OFDM. На основе этого определяются информационные основания

$p_1, \dots, p_n$  помехоустойчивого кода, для которых рабочий диапазон разрешенных комбинаций (2) удовлетворяет условию

$$2^M < P_n. \quad (6)$$

3. Определяется кратность ошибок  $\gamma$ , возникающих при воздействии помех. Затем выбираются проверочные основания, число которых равно  $r = 2\gamma$ .

4. Выбор алгоритма, реализующего кодпреобразование из позиционной системы счисления (ПСС) в МККВ, который используется в помехоустойчивом кодере.

5. Выбор оснований  $m_1, m_2, \dots, m_k$ , которые участвуют в вычислении ДВП. При этом они должны удовлетворять условиям для рабочего диапазона  $M_k = \prod_{j=1}^k m_j$

$$M_k > 2^{2M+Q}, \quad (7)$$

где  $Q$  – количество операций сложения при вычислении одного отсчета ДВП.

6. Выбор алгоритма вычисления контрольных остатков для избыточного МККВ, способного исправлять однократные ошибки вычислений, вызванные сбоем/отказом устройства ЦОС. Данный алгоритм должен обладать минимальными временными затратами на реализацию данной процедуры, выполняемой на передающей стороне.

7. Выбор алгоритма обнаружения и исправления ошибок, возникающих в процессе выполнения ЦОС, с минимальными временными затратами.

8. Выбор алгоритма, реализующего кодпреобразование МККВ – ПСС и обладающего минимальными временными затратами на реализацию данной процедуры.

9. Выбор алгоритма исправления пачек ошибок, вызвавших помехи. При этом выбранный алгоритм должен обеспечить коррекцию комбинации за минимальное время.

### 3. Применение практических рекомендаций при построении математической модели отказоустойчивой и помехозащищенной системы с OFDM

Используя практические рекомендации, выполним разработку математической мо-

дели отказоустойчивой и помехозащищенной системы OFDM. Она включает в себя:

1 этап. Последовательность  $X(j)$ , где  $j = 1, 2, \dots$ , длиной  $M$  бит подается на вход блока, выполняющего перевод ПСС-МККВ. Вычисленные остатки  $\{X_1(j), \dots, X_{n+r}(j)\}$  последовательно подаются на вход мультиплексора (MUX), который преобразует их в параллельный набор остатков  $\{Y_c(1), \dots, Y_c(N)\}$ , где  $c = 1, \dots, k$ ,  $N$  – количество отсчетов ДВП.

2. Вычисление контрольных остатков для коррекции ошибок, возникающих при выполнении ОДВП Хаара в МККВ. На основе анализа был выбран алгоритм из работы [6]

$$Y_{k+f}(u) = m_{k+f} - \left( K_{k+f} \right)^{-1} \sum_{c=1}^k Y_c(u) \left| K_c \right|_{m_{c+f}}^+ + \ddot{r}_{Y(u)} \Big|_{m_{c+f}}^+ . \quad (8)$$

где  $\ddot{r}_{Y(u)}$  – ранг числа  $Y(u)$  при использовании оснований  $m_1, \dots, m_k$ ;  $f = 1, 2$ .

3 этап. Вычисление обратного ДВП (ОДВП) Хаара в МККВ. Для этого набор остатков  $\{Y_c(1), \dots, Y_c(N)\}$  делится на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты  $\{a_u\}$  и  $\{d_u\}$ . При этом коэффициенты НЧ  $\{\hat{h}_0, \hat{h}_1\}$  и ВЧ  $\{\hat{g}_0, \hat{g}_1\}$  фильтров Хаара, используя  $R = 2^Z$  – коэффициент масштабирования, где  $Z = 1, 2, \dots$ , представляются

$$\hat{h}_0 = \hat{g}_0 = \hat{g}_1 = \left\lfloor R/\sqrt{2} \right\rfloor \bmod P_k, \quad \hat{h}_1 = \left( P_k - \left\lfloor R/\sqrt{2} \right\rfloor \right) \bmod P_k \quad (9)$$

Тогда ОДВП Хаара в МККВ при  $u = 1, \dots, N$  и  $c = 1, \dots, k$  реализуется согласно

$$|y(u)|_{m_c}^+ = \left| Y_c(u) \hat{h}_1 \right|_{m_c}^+ + \left| Y(u+1) \hat{h}_0 \right|_{m_c}^+, \quad |y(u+1)|_{m_c}^+ = \left| Y_c(u) \hat{g}_1 \right|_{m_c}^+ + \left| Y_c(u+1) \hat{g}_0 \right|_{m_c}^+ \quad (10)$$

### 4. Преобразование МККВ-ПСС через полиадическую систему кодирования (ПСК)

$$A_c(u) = \left| \sum_{v=1}^{k+2} y_v(u) \beta_{vc} + \gamma_v^c \right|_{m_c}^+, \quad (11)$$

где  $\beta_{vc}$  –  $c$ -й коэффициент  $v$ -го ортогонального базиса, представленного в ПСК;  $\gamma_v^c$  – количество превышения модуля  $m_v$ ;  $v = 1, \dots, k$ ;  $c = 1, \dots, k$ .

Для поиска однократной ошибки в МККВ вычисляются два старших коэффициента ПСК [4]. Если  $A_{k+1}(u) = 0, A_{k+2}(u) = 0$ , то в процессе вычислений ОДВП сбоя или отказа не было, и ошибка отсутствует. Тогда полученный результат переводится в ПСС на основе

$$y(u) = A_1(u) + A_2(u)m_1 + A_2(u)m_1m_2 + \dots + A_k(u) \prod_{c=1}^{k-1} m_c . \quad (12)$$

Если  $A_{k+1}(u) \neq 0, A_{k+2}(u) \neq 0$ , то ошибка присутствует и ее необходимо корректировать

$$y(u) = y^*(u) + \bar{e} = \left[ A_1^*(u), \dots, A_k^*(u) \right] + \left[ e_1, \dots, e_k \right] = \left[ A_1(u), \dots, A_k(u) \right]. \quad (13)$$

где  $y^*(u)$  – искаженная комбинация МККВ;  $\bar{e} = \left[ e_1, \dots, e_n \right]$  – вектор ошибки.

После исправленная комбинация переводится в позиционный код. Затем выполняется преобразование параллельных  $N$  потоков в последовательный с помощью мультиплексора  $\{y(1), y(2), \dots, y(N)\} \rightarrow y$ . Для получения аналогового сигнала из потока  $y$ , который будет передан в канал связи, используется ЦАП. Для выполнения обратного преобразования на при-

емной стороне в систему OFDM встроен АЦП. Полученный с его помощью кортеж отсчетов  $\{y(1), y(2), \dots, y(N)\}$  передается на входы устройства ПСС-МККВ. В результате на выходе преобразователя появляются  $y(1) = (y_1(1), \dots, y_k(1)), \dots, y(N) = (y_1(N), \dots, y_k(N))$ . Данные кодовые комбинации МККВ поступают на вычислительное устройство, выполняющее ДВП Хаара, а также на вход блока, вычисляющий контрольные остатки  $y_{k+1}(u), y_{k+2}(u)$  согласно (10). Результатом таких вычислений являются коэффициенты  $\{a_u\}$  и  $\{d_u\}$ . Хаара, которые представлены в МККВ. Это кодовые комбинации  $\{Y_c(1), \dots, Y_c(N)\}$ , где  $c = 1, \dots, k$ , которые подаются на вход преобразователя МККВ – ПСК – ПСС. Данный преобразователь осуществляет вычисление коэффициентов ПСК согласно (11), а затем поиск и коррекцию ошибок, возникших из-за сбоев и отказов при вычислениях ДВП в МККВ согласно (13). Откорректированный параллельный набор  $\{Y_c(1), \dots, Y_c(N)\}$  преобразуется в набор остатков  $\{X_1(j), \dots, X_{n+r}(j)\}$ . Для коррекции ошибок, вызванных помехами в канале связи, используется преобразование из МККВ-ПСС (11). Исправленные комбинации МККВ переводятся в поток последовательной информации  $X(j)$  с помощью выражения (12).

### Результаты исследования и их обсуждение

1. В качестве метода ЦОС, реализуемого в МККВ, выбираем ДВП Хаара.
2. Пусть разрядность входных данных  $M = 8$  бит. Тогда согласно (6) выбираем основания  $p_1 = 5, p_2 = 7, p_3 = 11$ , так как  $P_n = 385 > 2^8$ .
3. Пусть кратность пачек ошибок  $\gamma = 2$ . Тогда  $p_4 = 13, p_5 = 17, p_6 = 19, p_7 = 23$  – контрольные основания помехоустойчивого кода МККВ (7, 3).
4. Основаниями для вычисления ОДВП и ДВП Хаара в МККВ согласно (7) выбраны  $m_1 = 63, m_2 = 64, m_3 = 65$ , а  $m_4 = 71, m_5 = 73$  – контрольные основания. Получил код (5, 3). Пусть на вход системы OFDM поступили два отсчета  $X(1) = 111, X(2) = 96$ , которые с помощью алгоритма (9) были преобразованы в МККВ по основаниям внешнего кода

$$X(1) = 111 = (1, 6, 1, 7, 9, 16, 19), X(2) = 96 = (1, 5, 8, 5, 11, 1, 4).$$

Эти комбинации с помощью MUX преобразуются к виду

$$\{Y_1(1) = 1, Y_2(1) = 6, Y_3(1) = 1, Y_1(2) = 7, Y_2(2) = 9, Y_3(2) = 16, Y_1(3) = 19, \dots\}$$

Выбираем  $Y_1(1) = 1, Y_2(1) = 6, Y_3(1) = 1$  и для данного набора остатков находим контрольные остатки согласно (8). Вычислим ортогональные базисы для МККВ (5,3) с рабочими  $m_1 = 63, m_2 = 64, m_3 = 65$  и контрольными  $m_4 = 71, m_5 = 73$ . Рабочий диапазон  $M_3 = 262080$ .

$$B_1^* = K_1 \cdot M_3 + \ddot{B}_1 = 1069 \cdot 262080 + 133120 = 21561280.$$

$$B_4^* = K_4 M_3 = 3139 \cdot 262080 = 822669120.$$

$$B_2^* = K_2 \cdot M_3 + \ddot{B}_2 = 80 \cdot 262080 + 257985 = 21224385.$$

$$B_5^* = K_5 M_3 = 4402 \cdot 262080 = 1153676160.$$

$$B_3^* = K_3 \cdot M_3 + \ddot{B}_3 = 1674 \cdot 262080 + 133056 = 438854976.$$

Воспользуемся алгоритмом [6].

Вычислим ранг числа  $Y(1)$   $\ddot{r}_{Y(1)} = \left[ \frac{1 \cdot 133120 + 6 \cdot 257985 + 1 \cdot 133056}{262080} \right] = 6$ . Тогда

$$Y_4(1) = m_4 - \left[ (K_4)^{-1} \sum_{c=1}^k Y_c(1) |K_c|_{m_{c+f}}^+ + \ddot{r}_{Y(1)} \right]_{m_4}^+ = 71 - \left[ 19(1 \cdot 4 + 6 \cdot 9 + 1 \cdot 41) + 6 \right]_{71}^+ = 64.$$

Аналогичным вычислим  $Y_5(1) = 49$ . Получили  $Y(1) = (1, 6, 1, 64, 49)$  и  $Y(2) = (7, 9, 16, 66, 38)$ .

Вычислим первые два отсчета ОДВП Хаара в МККВ согласно (10). При этом

$$\hat{h}_0 = \hat{g}_0 = \hat{g}_1 = \left[ 256/\sqrt{2} \right] \bmod P_k = 181 = (55, 53, 51, 39, 35) \quad \hat{h}_1 = 261899 = (8, 11, 14, 51, 48).$$

Тогда

$$y(1) = (1, 6, 1, 64, 49)(8, 11, 14, 51, 48) + (7, 9, 16, 66, 38)(55, 53, 51, 39, 35) = (62, 27, 32, 50, 52).$$

$$y(2) = (7, 9, 16, 66, 38)(55, 53, 51, 39, 35) + (7, 9, 16, 66, 38)(55, 53, 51, 39, 35) = (48, 33, 5, 35, 48).$$

Пусть при вычислении произошла ошибка и получена  $\tilde{y}_2 = (0, 33, 5, 35, 48)$ .

Представим ортогональные базисы МККВ (5,3) в виде коэффициентов ПСК

$$B_1^* = 21561280 = [1, 1, 33, 4, 15]; B_2^* = 21224385 = [0, 63, 63, 9, 1];$$

$$B_3^* = 438854976 = [0, 0, 33, 41, 23]; B_4^* = 822669120 = [0, 0, 0, 15, 44];$$

$$B_5^* = 1153676160 = [0, 0, 0, 0, 62].$$

В табл. 1 показан процесс получения коэффициентов ПСК из комбинации МККВ с помощью алгоритма [4].

**Таблица 1**

Процесс получения коэффициентов ПСК из комбинации МККВ

$m_i$	$y_i$	mod 63	mod 64	$\gamma_2$	mod 65	$\gamma_3$	mod 71	$\gamma_4$	mod 71
$m_1 = 63$	0*	$35 \cdot 0 = 0$	$35 \cdot 0 = 0$		0		0		0
$m_2 = 64$	33		$33 \cdot 63 = 2079$		2079		297		33
$m_3 = 65$	5			32	165		205		115
$m_4 = 71$	35					35	750		2200
$m_5 = 73$	48							14	3224
ПСК		0	31		1		68		0

Так как  $A_4 = 68, A_5 = 0$ , то производится коррекция ошибки

$$y(2) = y^*(2) - \bar{e} = [0, 31, 1, 68, 0] - [15, 16, 40, 68, 0] = [48, 15, 26, 0, 0].$$

Затем выполняется перевод в ПСС  $y(2) = 48 + 15 \cdot 63 + 26 \cdot 63 \cdot 64 = 105825$ , а после  $\{y(1), y(2), \dots, y(N)\} \rightarrow y$ . Для получения аналогового сигнала из потока  $y$ , который будет передан в канал связи, используется ЦАП.

Рассмотрим помехоустойчивый код (7, 3). Пусть на вход преобразователя МККВ – ПСК – ПСС подан  $X^*(1) = (0, 0, 1, 7, 9, 16, 19)$  с искажением двух первых остатков.

В табл. 2 показан перевод из МК в ПСК.

**Таблица 2**

Вычисление коэффициентов ПСК в помехоустойчивом МККВ

$p_i$	$X_i$	5	7	$\gamma_2$	11	$\gamma_3$	13	$\gamma_4$	17	$\gamma_5$	19	$\gamma_6$	23
5	0*	0	0		0		0		0		0		0
7	0*		0		0		0		0		0		0
11	1			0	6		3		9		15		18
13	7					0	35		98		35		35
17	9							2	45		108		189
19	16									9	208		144
23	19											19	95
ПСК		0	0		6		12		1		14		17

Представим ортогональные базисы МККВ (7,3) в ПСК

$$B_1 = 29745716 = [1, 4, 6, 2, 10, 7, 18]. \quad B_5 = 34994960 = [0, 0, 0, 0, 5, 12, 21].$$

$$B_2 = 21246940 = [0, 3, 9, 1, 12, 2, 13]. \quad B_6 = 34994960 = [0, 0, 0, 0, 0, 13, 9].$$

$$B_3 = 30421755 = [0, 0, 6, 3, 9, 15, 18]; \quad B_7 = 34994960 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 5].$$

$$B_4 = 8580495 = [0, 0, 0, 5, 14, 5, 5].$$

Тогда справедливо равенство

$$X^*(1) = \left| X(1) + \left| \Delta X_1 B_1 \right|_{P_{n+r}}^+ + \left| \Delta X_2 B_2 \right|_{P_{n+r}}^+ \right|_{P_{n+r}}^+ = \left| 111 + 7436429 + 21246940 \right|_{37182145}^+ = 28683480.$$

$$\text{где } \Delta X_1 = \left| X_1^* - X_1 \right|_{P_1}^+ = \left| 0 - 1 \right|_5^+ = 4; \quad \Delta X_2 = \left| X_2^* - X_2 \right|_{P_1}^+ = \left| 0 - 6 \right|_7^+ = 1.$$

Вычтем из полученного результата вектор ошибки  $\bar{e} = [4, 5, 2, 12, 1, 14, 17] = 28683369$ .

$$\begin{aligned} X(1) &= \left| X_1^*(1) - \bar{e} \right|_{P_{n+r}}^+ = [0, 0, 6, 12, 1, 14, 17] - [4, 5, 2, 12, 1, 14, 17] = 1, \\ &= [1, 1, 3, 0, 0, 0, 0] = 1 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 35 = 111. \end{aligned}$$

Двукратная ошибка в помехоустойчивом модулярном коде исправлена.

### Заключение

В статье представлены практические рекомендации, позволяющие разрабатывать математические модели отказоустойчивых и помехозащищенных систем с OFDM. Для повышения отказоустойчивости и помехозащищенности систем передачи были использованы избыточные МККВ, которые способны корректировать ошибки, возникающие как в процессе выполнения обработки сигналов, так и при передаче по каналу связи. На основе этих рекомендаций была разработана математическая модель отказоустойчивой и помехозащищенной системы с OFDM, а также приведен пример ее реализации. Для коррекции ошибок в МККВ был использован разработанный алгоритм вычисления коэффициентов ПСК, применение которого позволяет одновременно выполнять поиск ошибок и преобразование МККВ-ПСС, что сокращает временные затраты на ЦОС. Показаны примеры коррекции ошибок, возникающих при ЦОС и при передаче по каналу связи.

### Список литературы

1. Yücel G., Altun A.A. Comparative Performance Analysis of FFT Based OFDM and DWT Based OFDM Systems // Journal of New Results in Science. 2016. Is.12. P. 272–287.

2. Artee K.V., Kuldeep P. Comparative analysis of FFT OFDM and DWT OFDM for MIMO systems over Rayleigh fading channel // Journal of Engineering Technology and Medical Sciences. 2023. Vol 06, Is. 03. P. 40–43.

3. Калмыков И.А., Чистоусов Н.К., Калмыкова Н.И. Ортогональная обработка сигналов с использованием математических моделей целочисленных вейвлет-преобразований, реализованных в модулярных кодах классов вычетов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/rumagazine/archive/n3y2023/8273> (дата обращения: 21.09.2024).

4. Чистоусов Н.К., Духовный Д.В., Ефременков И.Д., Кононов М.Н. Численный метод вычисления коэффициентов полиадической системы кодирования для коррекции ошибок в модулярных кодах // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 6. С. 71–76. DOI: 10.17513/snt.40066.

5. Chervyakov N.I., Lyakhov P.A., Babenko M.G., Lavrinenko I.N., Lavrinenko A.V., Nazarov A.S. The architecture of a fault-tolerant modular neurocomputer based on modular number projections // Neurocomputing. 2018. Vol. 10. P. 96–107.

6. Olenev A.A., Kononova N.V., Peleshenko T.A., Dukhovnyj D.V. Improvement of the Cybersecurity of the Satellite Internet of Vehicles through the Application of an Authentication Protocol Based on a Modular Error Correction Code // World Electr. Veh. J. 2024. Is. 15. № 278. DOI: 10.3390/wevj15070278.

7. Boyvalenkov P., Chervyakov N.I., Lyakhov P., Semyonova N., Nazarov A., Valueva M., Boyvalenkov G., Bogaevskiy D., Kaplun D. Classification of moduli sets for residue number system with special diagonal functions // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 156104–156116.

8. Червяков Н.И., Нагорнов Н.Н. Коррекция ошибок при передаче и обработке информации, представленной в СОК, методом синдромного декодирования // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 2. С. 15–40.

9. Valueva M.V., Lyakhov P.A., Valuev G.V., Chervyakov N.I., Nagornov N.N. Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation // Mathematics and Computers in Simulation. 2020. Vol. 177. P. 232–243.