УДК 004.052.2
DOI 10.17513/snt.40066

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИАДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В МОДУЛЯРНЫХ КОДАХ

Чистоусов Н.К., Калмыков И.А., Духовный Д.В., Ефременков И.Д., Кононов М.Н.

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

В настоящее время бурное увеличение числа низкоорбитальных группировок космических аппаратов связано с тем, что только они позволяют обеспечить доступ к широкополосной передаче контента в любой точке планеты. При этом для организации связи предлагается применять системы OFDM. Повысить скорость передачи можно за счет перехода при обработке сигналов от быстрого алгоритма вычисления ДПФ к вейвлет-преобразованиям, которые выполняются в кольце целых чисел с использованием модулярных кодов классов вычетов. Параллельное выполнение модульных операций по основаниям кода (а это операции: сложение, вычисление и умножение) служит основой построения устройств цифровой обработки сигналов реального масштаба времени. Однако введение избыточных оснований в кортеж модулярного кода позволяет создавать корректирующие коды. При этом для обнаружения ошибки вычислений, а затем для ее исправления необходимо вычислить позиционную характеристику кода. В статье в качестве такой характеристики выбраны коэффициенты полиадической системы кодирования. Поэтому разработка численного метода вычисления коэффициентов полиадической системы кодирования, позволяющего сократить время на обнаружение и коррекцию ошибок при выполнении Добеши-4 в модулярных кодах, является актуальной задачей.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование Добеши, модулярные коды класса вычетов, численный метод вычисления коэффициентов полиадической системы кодирования, коррекция ошибок

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

A NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING THE COEFFICIENTS OF A POLYADIC CODING SYSTEM FOR ERROR CORRECTION IN MODULAR CODES

Chistousov N.K., Kalmykov I.A., Dukhovny D.V., Efremenkov I.D., Kononov M.N.

North-Caucasian federal university, Stavropol, e-mail: kia762@yandex.ru

Currently, the rapid increase in the number of low-orbit spacecraft groupings is due to the fact that they are the only ones that allow access to broadband content transmission anywhere in the world. At the same time, it is proposed to use OFDM systems to organize communication. The transmission speed can be increased by switching from a fast DFT calculation algorithm to wavelet transformations in signal processing, which are performed in a ring of integers using modular residue class codes. Parallel execution of modular operations on the basis of codes, and these are addition, calculation and multiplication operations, serves as the basis for building real-time digital signal processing devices. However, the introduction of redundant bases into the modular codes tuple allows you to create corrective codes. At the same time, in order to detect a calculation error, and then to correct it, it is necessary to calculate the positional characteristic of the code. In the article, the coefficients of the polyadic coding system are chosen as such a characteristic. Therefore, the development of a numerical method for calculating the coefficients of the polyadic coding system, which reduces the time for detecting and correcting errors when performing Dobsha-4 in the modular codes, is an urgent task.

Keywords: the Dobshy wavelet transform, modular residue class codes, a numerical method for calculating the coefficients of a polyadic coding system, error correction

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

Единственная возможность организации доступа к широкополосному интернету за полярным кругом базируется на развертывании группировки низкоорбитальных спутников (НС) [1]. По мере увеличения требований к скорости передачи появляются работы, связанные с использованием технологии OFDM в НС. Для повышения производительности систем OFDM в работах [2, 3] предлагается замена быстрого преобразования Фурье (БПФ) на ортогональные вейвлет-преобразования (ОВП) Добеши. Дальнейшее увеличение скорости выполнения цифровой обработки сигналов в системах OFDM возможно за счет привлечения арифметических кодов, поддерживающих параллельные вычисления. Так, в работах [4, 5] были разработаны математические и структурные модели систем OFDM, в которых ОВП выполнялись с использованием модулярных кодов классов вычетов (МККВ). Если в кортеж оснований ввести избыточные модули, то код можно использовать для поиска и коррекции ошибок, возникающих при искажении остатков при вычислении ОВП. Поэтому разработка численного метода вычисления коэффициентов полиадической системы кодирования (ПСК), позволяющего сократить время на обнаружение и коррекцию ошибок при выполнении Добеши-4 в МККВ, является актуальной задачей.

Материал и методы исследования

Модулярные коды классов вычетов

В основу построения модулярных кодов класса вычетов положена идея представления целых чисел в виде наборов остатков [6, с. 11]:

$$C = (C_1, C_2, ..., C_n), \tag{1}$$

где $C_i \equiv C \bmod p_i$; p_i – основания МККВ; $i = 1, 2, .., n$.

В качестве оснований необходимо использовать взаимно простые числа $p_1, p_2, ..., p_n$, которые упорядочены согласно [7, с. 4]

$$p_1 < p_2 < .... < p_{n-1} < p_n. \tag{2}$$

Выбранный кортеж оснований задает диапазон, который определяет множество разрешенных комбинаций:

$$P_n = \prod_{i=1}^{n} p_1 . \tag{3}$$

В этом случае комбинация МККВ считается разрешенной, если имеет место:

$$C = (C_1, C_2, ..., C_n) < P_n. \tag{4}$$

С помощью МККВ можно эффективно выполнять модульные операции [8]:

$$C \circ H = \left(\left| C_1 \circ H_1 \right|_{p_1}^{+}, \left| C_2 \circ H_2 \right|_{p_2}^{+}, ..., \left| C_n \circ H_n \right|_{p_n}^{+} \right), \tag{5}$$

где $\circ$ – операции сложения, вычитания, умножения; $H_i \equiv H \bmod p_i$; $i = 1, 2, .., n$.

Из выражения (5) наглядно видна параллельная структура МККВ, благодаря которой модульные операции выполняются независимо от основания кода. Очевидно, что это позволяет уменьшить время, необходимое на вычисление модульных операций. Но из-за этого свойства МККВ обладают потенциалом, который может быть использован для обнаружения и исправления искаженных остатков кода. При этом данная ошибка не переносится на другие основания. Значит, ее можно определить при выполнении обратного преобразования, когда код МККВ переводится в позиционный код (МККВ-ПК).

Разработка численного метода вычисления коэффициентов ПСК

В отличие от двоичных помехоустойчивых кодов, в избыточных модулярных кодах однократной ошибкой является искаженный остаток. Если в кортеж оснований МККВ добавить два избыточных основания p_{n+1}, p_{n+2}, для которых имеет место:

$$p_{n-1} p_n < p_{n+1} p_{n+2}, \tag{6}$$

то такой МККВ сможет исправить однократную ошибку.

Введение оснований p_{n+1}, p_{n+2} способствует увеличению длины комбинации:

$$C = (C_1, C_2, ..., C_n, C_{n+1}, C_{n+2}), \tag{7}$$

а также расширению множества возможных комбинаций до значения:

$$P_{n+2} = \prod_{i=1}^{n+2} p_1 = P_n \prod_{i=n+1}^{n+2} p_1 . \tag{8}$$

Избыточная комбинация (7) не содержит ошибки, если справедливо:

$$C = (C_1, C_2, ..., C_n, C_{n+1}, C_{n+2}) \le P_n . \tag{9}$$

Поэтому при поиске ошибок в МККВ применяются позиционные характеристики (ПХ), которые показывают позицию числа C относительно P_n. Одной из таких характеристик являются старшие коэффициенты полиадической системы кодирования (ПСК). В данной системе число C разлагается на следующие коэффициенты:

$$C = \tilde{C}_1 + \tilde{C}_2 p_1 + \tilde{C}_2 p_1 p_2 + ... + C_n \prod_{i=1}^{n-1} p_i + \tilde{C}_{n+1} P_n + \tilde{C}_{n+2} P_n p_{n+1} . \tag{10}$$

Из (10) наглядно видно, что если справедливо условие (9), то два последних слагаемых должны равняться нулю. Другими словами, если комбинация МККВ не искажена, то старшие коэффициенты ПСК $\tilde{C}_{n+1} = 0$, $\tilde{C}_{n+2} = 0$. Если это условие не выполняется, то очевидно, что комбинация МККВ имеет ошибочный остаток. Кроме того, с помощью ПСК можно выполнить операцию перевода из МККВ в двоичный позиционный код.

Известен численный метод получения коэффициентов ПСК из комбинации МККВ [6, с. 158], который базируется на следующем преобразовании выражения (10) к виду:

$$C = \tilde{C}_1 + p_1(\tilde{C}_2 + p_2(\tilde{C}_3 + p_3(\tilde{C}_4 \ldots + p_n(\tilde{C}_{n+1} + p_{n+1}\tilde{C}_{n+1})))). \quad (11)$$

Используя выражение (11), можно вычислить коэффициенты ПСК:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 &= C - \left[C/p_1\right]p_1 = C - C_1^* p_1, \\ \tilde{C}_2 &= C_1^* - \left[C_1^*/p_2\right]p_2 = C_1^* - C_2^* p_2, \\ &\vdots \\ \tilde{C}_{n+2} &= C_{n+1}^* - \left[C_{n+1}^*/p_{k+1}\right]p_{k+1} = C_{n+1}^* - C_{n+2}^* p_{k+2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $C_i^* = \left[C_{i-1}^*/p_i\right]$; $i = 1,\ldots,n+2$.

Так как основу метода составляют модульные операции, то для перевода из МККВ в ПСК можно использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 &= C_1, \\ \tilde{C}_2 &= ((C_2 - \tilde{C}_1)u_{12}) \bmod p_2, \\ &\vdots \\ \tilde{C}_{n+2} &= ((C_{n+2} + \tilde{C}_1)u_{1n+2} + \tilde{C}_2)u_{2n+2} + \ldots + \tilde{C}_{n+1}u_{(n+1)(n+2)}) \bmod p_{n+2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $u_{ji} = \left(1/p_j\right) \bmod p_i = p_j^{-1} \bmod p_i$ – коэффициенты ПСК.

Основным недостатком этого метода является итерационный процесс, который приводит к увеличению временных затрат на получение коэффициентов ПСК из остатков МККВ. С целью устранения данного недостатка был разработан численный метод вычисления старших коэффициентов ПСК, реализованный на основе Китайской теоремы об остатках (КТО). Воспользуемся КТО и выполним перевод из МККВ, содержащего n рабочих оснований и одного контрольного p_{n+1}, в ПСК. При этом $P_{n+1}^* = P_n\, p_{n+1}$. Тогда:

$$C = \sum_{i=1}^{n+1} C_i B_i^{n+1} \bmod P_{n+1}^* = C_1 B_1^{n+1} + \ldots + C_n B_n^{n+1} + C_{n+1} B_{n+1}^{n+1} \bmod P_{n+1}^*, \quad (14)$$

где $B_i^{n+1} = m_i P_i = P_i^{-1} P_{n+1}^*/p_i$ – ортогональный базис; $m_i = P_i^{-1} \bmod p_i$ – вес базиса.

Представим ортогональные базисы для данного кортежа в виде коэффициентов ПСК.

$$\begin{aligned} B_1^{n+1} &= [\tilde{B}_{11}^{n+1}, \tilde{B}_{12}^{n+1}, \tilde{B}_{13}^{n+1}, \ldots, \tilde{B}_{1(n+1)}^{n+1}], \\ B_2^{n+1} &= [0, \tilde{B}_{22}^{n+1}, \tilde{B}_{23}^{n+1}, \ldots, \tilde{B}_{2(n+1)}^{n+1}], \\ &\vdots \\ B_{n+1}^{n+1} &= [0, 0, 0, \ldots, 0, \tilde{B}_{(n+1)(n+1)}^{n+1}]. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда коэффициенты ПСК, преобразованные из остатков МККВ, будут определяться:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1^{n+1} &= C_1 \tilde{B}_{11}^{n+1} = C_1^{n+1}, \\ \tilde{C}_2^{n+1} &= C_1 \tilde{B}_{12}^{n+1} + C_2 \tilde{B}_{13}^{n+1} \bmod p_2, \\ &\vdots \\ \tilde{C}_{n+1}^{n+1} &= C_1 \tilde{B}_{1(n+1)}^{n+1} + C_2 \tilde{B}_{2(n+1)}^{n+1} + \ldots + C_{n+1} \tilde{B}_{(n+1)(n+1)}^{n+1} + \gamma_n \bmod p_{n+1}, \end{aligned} \quad (16)$$

где γ_j – количество переходов при выполнении суммирования по модулю p_j; $j = 2,\ldots,n$.

Аналогичный подход используем для другого кортежа МККВ, содержащего n рабочих оснований и одно контрольное p_{n+2} в ПСК. При этом $P_{n+2}^{*} = P_n \, p_{n+2}$. Тогда:

$$C = C_1 B_1^{n+2} + \ldots + C_n B_n^{n+2} + C_{n+2} B_{n+2}^{n+2} \bmod P_{n+2}^{*}, \tag{17}$$

где $B_i^{n+2} = m_i P_i = P_i^{-1} P_{n+2}^{*} / p_i$ – ортогональный базис; $m_i = P_i^{-1} \bmod p_i$ – вес базиса.

Вычислим ортогональные базисы для данного кортежа и представим их в виде коэффициентов ПСК. Тогда:

$$\begin{aligned} B_1^{n+2} &= [\tilde{B}_{11}^{n+2}, \tilde{B}_{12}^{n+2}, \tilde{B}_{13}^{n+2}, \ldots, \tilde{B}_{1(n+1)}^{n+2}], \\ B_2^{n+2} &= [0, \tilde{B}_{22}^{n+2}, \tilde{B}_{23}^{n+2}, \ldots, \tilde{B}_{2(n+1)}^{n+2}], \\ &\vdots \\ B_{n+1}^{n+2} &= [0, 0, 0, \ldots, 0, \tilde{B}_{(n+1)(n+1)}^{n+2}]. \end{aligned} \tag{18}$$

Тогда коэффициенты ПСК, преобразованные из остатков МККВ будут определяться:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1^{n+2} &= C_1 \tilde{B}_{11}^{n+2} = C_1^{n+2}, \\ \tilde{C}_2^{n+2} &= C_1 \tilde{B}_{12}^{n+2} + C_2 \tilde{B}_{13}^{n+2} \bmod p_2, \\ &\vdots \\ \tilde{C}_n^{n+2} &= C_1 \tilde{B}_{1n}^{n+2} + C_2 \tilde{B}_{2n}^{n+2} + \ldots + C_n \tilde{B}_{n)n}^{n+2} + \gamma_{n-1} \bmod p_n., \\ \tilde{C}_{n+1}^{n+2} &= C_1 \tilde{B}_{1(n+1)}^{n+2} + C_2 \tilde{B}_{2(n+1)}^{n+2} + \ldots + C_{n+1} \tilde{B}_{(n+1)(n+1)}^{n+2} + \gamma_n \bmod p_{n+2}. \end{aligned} \tag{19}$$

При этом значения коэффициентов ПСК ортогональных базисов рабочих оснований в равенствах (15) и (18) совпадают. Значит, один раз вычисленные коэффициенты ПСК по рабочим основаниям можно использовать для параллельного вычисления двух старших коэффициентов $\tilde{C}_{n+1}^{n+1}, \tilde{C}_{n+1}^{n+2}$. Это позволит сократить время как на коррекцию ошибки, так и на выполнение обратного преобразования из МККВ в позиционный код через систему ПСК.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим выполнение ДВП Добеши в МККВ, используя математическую модель вычислений [4, 5]. Входной поток считается набором аппроксимирующих $\{a(j)\}$ и детализирующих коэффициентов $\{d(j)\}$, где $j = 1, \ldots, N/2$, N – количество отсчетов. Пусть разрядность входных данных будет не меньше одного байта. Тогда информационные модули – $p_1 = 63$, $p_2 = 64$, $p_3 = 65$, а контрольные – $p_4 = 67$, $p_5 = 71$. Тогда разрешенный диапазон $P_3 = 262080$, а полный диапазон $P_5 = 1246714560$.

Пусть первые четыре отсчета, равные $\{a(1) = 158, d(1) = 154, a(2) = 187, d(2) = 150, \ldots\}$, поступают на вход преобразователя ПК-МККВ, на выходе которого имеем

$$a(1) = 158 = (32, 30, 28, 24, 16),$$

$$d(1) = 154 = (28, 26, 24, 20, 12),$$

$$a(2) = 187 = (61, 59, 57, 53, 45),$$

$$d(2) = 150 = (24, 22, 20, 16, 8).$$

Представим коэффициенты Добеши-4 в виде целых чисел, используя $V = 256$, а затем переведем их в МККВ:

$$\left| c_1 V \right|_{p_i}^{+} = \left| \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} V \right|_{p_i}^{+} = 122 = (59, 58, 57, 55, 51),$$

$$\left| c_2 V \right|_{p_i}^{+} = \left| \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} V \right|_{p_i}^{+} = 215 = (26, 23, 20, 14, 2),$$

$$\left| c_3 V \right|_{p_i}^{+} = \left| \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} V \right|_{p_i}^{+} = 56 = (56, 56, 56, 56, 56),$$

$$\left| c_4 V \right|_{p_i}^{+} = \left| \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} V \right|_{p_i}^{+} = -33 = (30, 31, 32, 34, 38).$$

Тогда третий и четвертый отсчеты сигнала равны:

$$S_i(3) = \left| a_i(1)\left|c_3 V\right|_{p_i}^+ + d_i(1)\left|c_2 V\right|_{p_i}^+ + a_i(2)\left|c_1 V\right|_{p_i}^+ + d_i(2)\left|c_4 V\right|_{p_i}^+ \right|_{p_i}^+ \quad (21)$$

$$S_i(4) = \left| a_i(1)\left|c_4 V\right|_{p_i}^+ - d_i(1)\left|c_1 V\right|_{p_i}^+ + a_i(2)\left|c_2 V\right|_{p_i}^+ - d_i(2)\left|c_3 V\right|_{p_i}^+ \right|_{p_i}^+ \quad (22)$$

Рассмотрим реализацию (21) и (22) по модулю $p_1 = 63$

$$S_1(3) = \left|32 \cdot 56 + 28 \cdot 26 + 61 \cdot 59 + 24 \cdot 30\right|_{63}^+ = 35.$$

$$S_1(4) = \left|32 \cdot 30 - 28 \cdot 59 + 61 \cdot 2 - 24 \cdot 56\right|_{63}^+ = 54.$$

Аналогичным образом проводим вычисления по другим основаниям. Получаем:

$$S_1(3) = (35, 46, 22, 58, 40). \qquad S(4) = (54, 59, 3, 31, 64).$$

Определим ортогональные базисы для двух кортежей оснований и представим их в коде ПСК. Для первого кортежа оснований $p_1 = 63$, $p_2 = 64$, $p_3 = 65$, $p_4 = 67$, имеем базисы

$$B_1^4 = 2229760 = [1, 1, 33, 8], \quad B_2^4 = 5761665 = [0, 63, 63, 21],$$

$$B_3^4 = 13237056 = [0, 0, 33, 50], \quad B_4^4 = 13890240 = [0, 0, 0, 53].$$

Для второго кортежа $p_1 = 63$, $p_2 = 64$, $p_3 = 65$, $p_4 = 71$ имеем базисы

$$B_1^5 = 1181440 = [1, 1, 33, 4], \quad B_2^5 = 2616705 = [0, 63, 63, 9],$$

$$B_3^5 = 13237056 = 41, \quad B_4^5 = 13890240 = [0, 0, 0, 15].$$

В таблицах 1 и 2 показан процесс вычисления коэффициентов ПСК для разрешенной комбинации. Для вычисления коэффициента $\tilde{S}_i$ ПСК суммирование в столбцах выполняется по модулю p_i, при этом вычисляется, сколько раз сумма превысила модуль γ_i, которое учитывается в коэффициенте $\tilde{S}_{i+1}$.

Таблица 1

Вычисление коэффициентов ПСК для первого кортежа

Основания	Остатки	mod 63	mod 64	γ_2	mod 65	γ_3	mod 67
$p_1 = 63$	35	35·1 = 35	35·1 = 35		35·33 = 1155		35·8 = 280
$p_2 = 64$	46		46·63 = 2898		46·63 = 2898		46·21 = 966
$p_3 = 65$	22			45	22·33 = 726		22·50 = 1100
$p_4 = 67$	58					74	58·53 = 3074
ПСК		35	53		14		0

Таблица 2

Вычисление коэффициентов ПСК для второго кортежа

Основания	Остатки	mod 63	mod 64	γ_2	mod 65	γ_3	mod 71
$p_1 = 63$	35	35·1 = 35	35·1 = 35		35·33 = 1155		35·4 = 140
$p_2 = 64$	46		46·63 = 2898		46·63 = 2898		46·9 = 414
$p_3 = 65$	22			45	22·33 = 726		22·41 = 902
$p_4 = 67$	40					74	40·15 = 600
ПСК		35	53		14		0

Таким образом, старшие коэффициенты, полученные по модулю 67 и 71, равны нулю. Значит, комбинация не содержит ошибку. Пусть исказился первый остаток $S_1^* = 30$. В таблицах 3 и 4 показан процесс вычисления коэффициентов ПСК.

Таблица 3

Вычисление коэффициентов ПСК для первого кортежа

Основания	Остатки	mod 63	mod 64	γ_2	mod 65	γ_3	mod 67
$p_1 = 63$	30	30·1 = 30	30·1 = 30		30·33 = 990		30·8 = 240
$p_2 = 64$	46		46·63 = 2898		46·63 = 2898		46·21 = 966
$p_3 = 65$	22			45	22·33 = 726		22·50 = 1100
$p_4 = 67$	58					71	58·53 = 3074
ПСК		30	48		44		24

Таблица 4

Вычисление коэффициентов ПСК для второго кортежа

Основания	Остатки	mod 63	mod 64	γ_2	mod 65	γ_3	mod 71
$p_1 = 63$	30	30·1 = 30	30·1 = 30		30·33 = 990		30·4 = 120
$p_2 = 64$	46		46·63 = 2898		46·63 = 2898		46·9 = 414
$p_3 = 65$	22			45	22·33 = 726		22·41 = 902
$p_4 = 67$	40					71	40·15 = 600
ПСК		30	48		44		48

Так как старшие коэффициенты ПСК не нулевые, то комбинация содержит ошибку. Для коррекции используется вектор ошибки для информационных оснований $\overline{e} = [5,5,35]$

$$S_{ПСК} = S^{*}_{ПСК} + \overline{e} = [30,48,44] + [5,5,35] = \left[\left|30+5\right|^{+}_{63}, \left|48+5\right|^{+}_{64}, \left|44+35\right|^{+}_{65} \right] = [35,53,14].$$

Затем исправленный результат переводим в позиционную систему счисления с помощью коэффициентов ПСК $S(3) = 35 + 53 \cdot 63 + 14 \cdot 63 \cdot 64 = 59822$.

Сравнительный анализ численных методов был проведен с использованием FPGA Xilinx Artix-7 (xc7a12ticsg325-1L). Для реализации численного метода [6, с. 158] потребовалось 239 нс. Разработанный численный метод для вычисления коэффициентов ПСК требует 110 нс, что в 2,17 раза меньше, чем метод [6, с. 158]. Этот результат достигается за счет параллельного выполнения операций умножений коэффициентов ПСК ортогональных базисов на остатки модулярного кода.

Заключение

В статье рассмотрен метод преобразования МККВ-ПСК, в котором при вычислении текущего коэффициента ПСК необходимо использовать предыдущий. Это приводит к снижению скорости преобразования МККВ-ПСК. Для устранения этого недостатка был разработан численный метод, в котором операции умножения выполняются параллельно. Проведенный сравнительный анализ схемотехнических решений на основе FPGA показал, что для преобразования МККВ-ПСК с помощью разработанного численного метода требуется 110 нс, а при использовании итерационного метода – 239 нс. Таким образом, время на коррекцию ошибок при выполнении Добеши-4 в МККВ будет сокращено в 2,17 раза.

Список литературы

1. Shreehari H.S. Makam Supreeth Starlink Satellite Internet Service // International Journal of Research Publication and Reviews. 2022. Vol. 3, No 6. P. 4501-4504.

2. Kansal L., Berra S., Mounir M., Miglani R., Dinis R., Rabie K. Performance Analysis of Massive MIMO-OFDM System Incorporated with Various Transforms for Image Communication in 5G Systems // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 621. DOI: 10.3390/electronics11040621.

3. Zainab Hdeib Al-Shably, Zahir M. Hussain Performance of FFT-OFDM versus DWT-OFDM under Compressive Sensing // J. Phys.: Conf. Ser. 1804. 2021. № 012087. DOI: 10.1088/1742-6596/1804/1/012087.

4. Olenev A.A., Chistousov N.K. Mathematical Modeling of Signal Processing Using Discrete Wavelet Transform and Non-Positional Modular Code Proceedings – 2023: International Russian Automation Conference. 2023. P. 437–442. DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272872.

5. Калмыков И.А., Чистоусов Н.К., Духовный Д.В. Разработка структурных моделей системы OFDM, использующих преобразования Добеши в GF(m) и кодах классов вычетов // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 8. С. 84-90. DOI: 10.17513/snt.39735.

6. Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Макоха А.Н. Нейрокомпьютеры в остаточных классах. Кн. 11. М.: Радиотехника, 2003. 272 с.

7. Mohan A. Residue Number Systems. Theory and Applications. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 351 p.

8. Liberato A., Martinello M. Residue Defined // Networking Architecture. 2018. Vol. 15(4). P. 1473–1487.