



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.031.6; 004.627

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОРА ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СХЕМЕ LOSLESS-TO-LOSSY

В.В. КЛЮЧЕНЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 23 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. На сегодняшний день широко распространены мобильные мультимедийные системы, которые используют стандарты H.261/3/4/5, MPEG-1/2/4 и JPEG для кодирования/декодирования видео, аудио и изображений [1–4]. Ядром этих стандартов является дискретное косинусное преобразование (ДКП) I, II, III ... VIII типов [ДКП]. Широкая поддержка в огромном количестве мультимедийных приложений формата JPEG схемотехническими и программными решениями и необходимость кодирования изображений по схеме L2L обуславливает актуальность проблемы создания декоррелирующего преобразования на основе ДКП и методов быстрого прототипирования процессоров вычисления целочисленного ДКП на программируемых системах на кристалле ПЛИС/FPGA. При этом во внимание принимаются такие характеристики, как структурная регулярность, модульность, высокий вычислительный параллелизм, малая латентность и потребляемая мощность. Прямое и обратное преобразования должны осуществляться по схеме обработки «целое к целому» с сохранением перфективной реконструкции исходного изображения (коэффициенты представляются целыми или двоичными рациональными числами; число операций умножения минимально, по возможности они исключаются из алгоритма). Известные целочисленные ДКП (BinDCT, IntDCT) не дают полного обратимого бит в бит преобразования. Для кодирования изображения по схеме L2L требуется, чтобы декоррелирующее преобразование было обратимым и реализовано в целочисленной арифметике, т. е. преобразование соответствовало бы схеме обработки «целое-в-целое» при минимальном числе операций округления, влияющих на компактность энергии в эквивалентных субполосах преобразования. В данной статье показано, как на основе целочисленного прямого и обратного ДКП создать новую универсальную архитектуру декоррелирующего преобразования на ПЛИС типа FPGA для систем трансформационного кодирования изображений, которые работают по принципу lossless-to-lossy (L2L), и получить лучшие экспериментальные результаты по объективным и субъективным показателям по сравнению с аналогичными системами сжатия.

Ключевые слова: ДКП, дискретное косинусное преобразование, L2L, lossless-to-lossy, архитектура, FPGA (Field-Programmable Gate Array), блочная лестничная структурная параметризация, БЛСП.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ключеня В.В. Проектирование процессора вычисления дискретного косинусного преобразования для систем сжатия изображения по схеме losless-to-lossy. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 5-13.

DESIGN OF A DISCRETE COSINE TRANSFORMATION PROCESSOR FOR IMAGE COMPRESSION SYSTEMS ON A LOSSLESS-TO-LOSSY CIRCUIT

VITALY V. KLIUCHENIA

Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 23 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Today, mobile multimedia systems that use the H.261 / 3/4/5, MPEG-1/2/4 and JPEG standards for encoding / decoding video, audio and images are widely spread [1–4]. The core of these standards is the discrete cosine transform (DCT) of I, II, III ... VIII types [DCT]. Wide support in a huge number of multimedia applications of the JPEG format by circuitry and software solutions and the need for image coding according to the L2L scheme determines the relevance of the problem of creating a decorrelated transformation based on DCT and methods for rapid prototyping of processors for computing an integer DCT on programmable systems on a FPGA chip. At the same time, such characteristics as structural regularity, modularity, high computational parallelism, low latency and power consumption are taken into account. Direct and inverse transformation should be carried out according to the “whole-to-whole” processing scheme with preservation of the perfective reconstruction of the original image (the coefficients are represented by integer or binary rational numbers; the number of multiplication operations is minimal, if possible, they are excluded from the algorithm). The well-known integer DCTs (BinDCT, IntDCT) do not give a complete reversible bit to bit conversion. To encode an image according to the L2L scheme, the decorrelated transform must be reversible and implemented in integer arithmetic, i. e. the conversion would follow an “integer-to-integer” processing scheme with a minimum number of rounding operations affecting the compactness of energy in equivalent conversion subbands. This article shows how, on the basis of integer forward and inverse DCTs, to create a new universal architecture of decorrelated transform on FPGAs for transformational image coding systems that operate on the principle of “lossless-to-lossy” (L2L), and to obtain the best experimental results for objective and subjective performance compared to comparable compression systems.

Keywords: DCT, discrete cosine transform, L2L, lossless-to-lossy, architecture, FPGA (Field-Programmable Gate Array), block staircase structural parameterization, BLSP.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kliuchenia V.V. Design of a discrete cosine transformation processor for image compression systems on a lossless-to-lossy circuit. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 5-13.

Введение

В настоящее время особый интерес представляют схемы компрессии изображений, работающие по принципу L2L (lossless-to-lossy), осуществляющие сжатие и восстановление цифровых изображений как без потерь (режим lossless – декоррелирующее преобразование обратимо и реализуется в целочисленной арифметике), так и с контролируемым внесением артефактов (режим lossy). Кодирование по принципу L2L унифицирует схемы сжатия цифровых изображений в режимах lossy и lossless, когда требуется высокое качество и степень компрессии. Это обеспечивает возможность широкого применения схем кодирования изображений в соответствии с мультимедийными приложениями. Например, в стандартах JPEG [1], JPEG-LS [2] и JPEG2000 [3] режимы lossless и lossy не имеют между собой совместимости, так как декоррелирующие преобразования оптимизированы для работы в своем режиме. В стандарте JPEG XR [4] поддерживается схема L2L, однако эффективность кодирования недостаточная, особенно для изображений, у которых много высокочастотных компонент.

Выбор декоррелирующего преобразования для кодирования изображения по схеме L2L: lossless-to-lossy

В системах трансформационного кодирования изображений используется двумерное разделимое дискретное косинусное преобразование, где обработка сначала идет по строкам, а потом – по столбцам. Для блока изображения размера $M \times M$ пикселей процесс математически описывается выражением

$$\mathbf{y} = (\mathbf{C}(\mathbf{C}\mathbf{x})^T)^T = \mathbf{C}\mathbf{x}\mathbf{C}^T, \quad (1)$$

где \mathbf{x} – блок исходного изображения; \mathbf{y} – результат обработки; \mathbf{C} – матрица прямого преобразования ДКП; \mathbf{C}^T – транспонированная матрица или матрица обратного преобразования ДКП (ОДКП) $\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}^T$. Как правило, выбирается дискретное косинусное преобразование II типа или ДКП-II размера N :

$$[\mathbf{C}]_{m,n} = \sqrt{\frac{2}{M}}c_m \cos(m(n+1/2)\pi/M); [\mathbf{D}]_{m,n} = \sqrt{\frac{2}{M}}c_n \cos(n(m+1/2)\pi/M), \quad (2)$$

где $0 \leq m, n \leq M-1$; $[\mathbf{C}]_{m,n}$ – матрица прямого ДКП II типа; $[\mathbf{D}]_{m,n}$ – матрица ДКП III типа, являющаяся обратной для ДКП II типа; m – количество столбцов; n – количество строк; $M = 2^n$ ($n \in \mathbb{N}$); $c_m = 1/\sqrt{2}$ для $m=0$ и $c_m = 1$ при $m \neq 0$; $c_n = 1/\sqrt{2}$ для $n=0$ и $c_n = 1$ при $n \neq 0$.

Системы трансформационного кодирования изображений на основе ДКП являются системами сжатия с потерями данных. В статье [5] предлагается новый класс блочной лестничной структурной параметризации (БЛСП) для трансформационных преобразований, которая позволяет строить преобразователи в формате фиксированной запятой со свойством перфективного или полного восстановления данных, у которых коэффициент компрессии выше, чем на основе базовых лестничных структур [6] за счет уменьшения узлов округления путем объединения многих операций округления. Так, векторы \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j входных данных размера $M \times 1$ преобразуются в векторы \mathbf{y}_i и \mathbf{y}_j выходных данных на основе преобразования формата $M \times M$, невырожденные матрицы которого \mathbf{T} и \mathbf{T}^{-1} :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_i \\ \mathbf{y}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{x}_j \end{bmatrix}. \quad (3)$$

БЛСП трансформационного преобразования представляется как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{T}^{-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{0}$ – нулевая матрица и \mathbf{I} – единичная матрица размера $M \times M$. В качестве матриц трансформационного преобразования \mathbf{T} и \mathbf{T}^{-1} могут выступать матрицы любых декоррелирующих преобразований. Операции округления производятся после умножения на матрицу преобразования \mathbf{T} , и число их уменьшается с M^2 до M .

Перфективное целочисленное двумерное трансформационное преобразование ДКП на основе блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП определяется следующими разложениями:

– прямое преобразование (рис. 1, а)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D}_{2D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

– обратное преобразование (рис. 1, б)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2D} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D}_{2D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где \mathbf{C}_{2D} и \mathbf{D}_{2D} – матрицы прямого и обратного двумерного целочисленного ДКП.

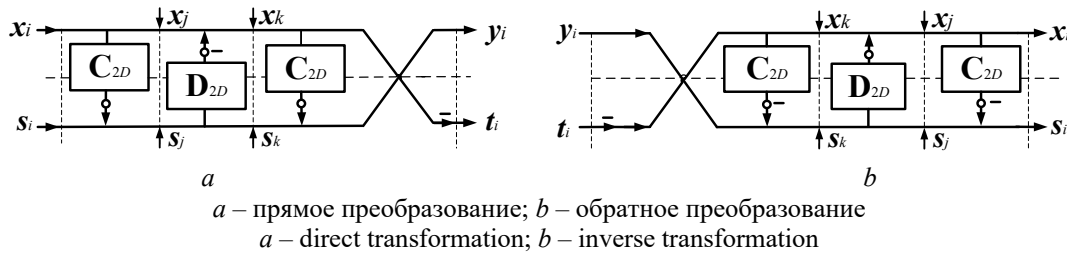


Рис. 1. Схема вычисления двумерного трансформационного преобразования ДКП на основе БЛСП: ДКП-ОДКП (кружок обозначает операцию округления)
Fig. 1. The calculation scheme of the two-dimensional transformation of DCT based on BLSP: DCT-IDCT (circle indicates rounding operation)

Анализ амплитудно-частотных и импульсных характеристик восьмиточечного прямого и обратного ДКП (см. рис. 2) показывает, что прямое ДКП является равнополосным максимально децимированным банком фильтров [7] с линейной фазочастотной характеристикой (импульсные характеристики обладают свойством симметрии), постоянная составляющая локализована первым фильтром банка. Все фильтры ОДКП имеют постоянную составляющую, т. е. происходит утечка энергии нулевой частоты в высокочастотные составляющие (эффект DC leakages). Это приводит к потере свойства регулярности первого рода банком фильтров ДКП-ОДКП, и в реконструированном изображении в системе преобразования ДКП-ОДКП на основе БЛСП будет проявляться артефакт «шахматной доски».

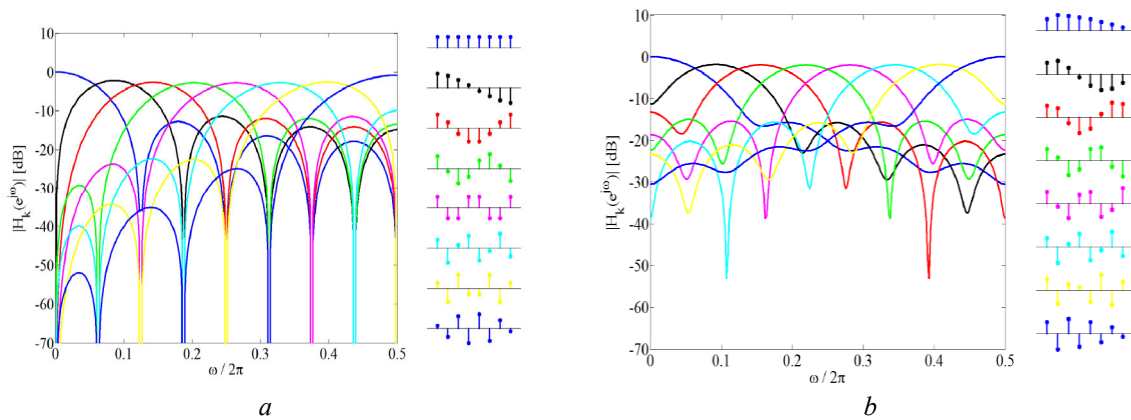


Рис. 2. Амплитудно-частотные и импульсные характеристики 8-точечного прямого (а) и обратного ДКП (b)
Fig. 2. The amplitude-frequency and impulse characteristics of the 8-point direct DCT (a) and inverse DCT (b)

Обратимое «целое к целому» декоррелирующее преобразование ДКП-ОДКП

Японские исследователи Сузуки и Икехара предложили совершенное 2D целочисленное декоррелирующее преобразование на основе БЛСП: ДКП-ОДКП с включенным дополнительным модулем ОДКП обработки ошибки округления (SIB-блоком) при вычислении преобразования каждого $M \times M$ блока изображения, в котором отсутствует артефакт «шахматной доски» в реконструированном изображении [5, 6, 8]: $s_i = \mathbf{D}_{2D} s_{i-1}$ для $i=1, 2, \dots, n-1$, s_0 является нулевой матрицей. Формулы для прямого и обратного преобразований для всех n -блоков изображения имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{n-1} \\ \mathbf{s}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{C}_{2D} & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{D}_{2D}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{n-1} \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{n-1} \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{C}_{2D} & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{D}_{2D}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{n-1} \\ \mathbf{s}_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{C}_{2D}\mathbf{x}_i \triangleq (\mathbf{C}(\mathbf{C}\mathbf{x}_i)^T)^T = \mathbf{C}\mathbf{x}_i\mathbf{C}^T$ и $\mathbf{D}_{2D}\mathbf{x}_i \triangleq (\mathbf{D}(\mathbf{D}\mathbf{x}_i)^T)^T = \mathbf{D}\mathbf{x}_i\mathbf{D}^T$, $\mathbf{s}_n \neq \mathbf{0}$ из-за ошибки целочисленного округления в каждой лестничной ступени.

Например, при выполнении прямого одномерного трансформационного преобразования (7) для нулевого блока \mathbf{x}_0 исходного изображения входной вектор $[\mathbf{x}_0 \ \mathbf{s}_0]^T$ проходит три ступени обработки согласно БЛСП прямого преобразования (5) для формирования результата обработки $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} - \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \\ -\mathbf{x}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

С другой стороны, вектор $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$, принимая во внимание (8)–(10), определится следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}[\mathbf{x}_0 - \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]]]] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \\ -\mathbf{x}_0 + \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0]] \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}[\mathbf{x}_0 - \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0]]]] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \\ -\mathbf{x}_0 + \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_0]]] \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 2\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] - \text{round}[\mathbf{C}[\text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]]]] \\ -\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}'_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\text{round}[\]$ – оператор округления; $-\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}'_0 = \mathbf{e}_0$ – ошибка округления после обработки 0-го сегментного блока. Для $\mathbf{s}_0 = \mathbf{0}$, $\mathbf{x}'_0 = \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]] \neq \mathbf{x}_0$, так как при целочисленном преобразовании теряется свойство ортогональности преобразования ДКП и $\text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}]]] \approx \mathbf{I}$.

Результат реконструкции нулевого блока \mathbf{x}_0 исходного изображения определяется на основе выполнения обратного преобразования согласно БЛСП (6) для вектора $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$, при этом оператор округления не меняется:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{s}_1 \\ \mathbf{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{s}_1 \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{s}_1] + \mathbf{y}_0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0k}] \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} - \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0j}] + \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Как видно из формул (8)–(14), округление результатов преобразований в БЛСП не влияет на обратимость декоррелирующего преобразования на основе ДКП-ОДКП. Следовательно, выполнение обратимого «целого к целому» трансформационного кодирования изображений возможно на основе целочисленных прямых и обратных ДКП. Также количество обрабатываемых блоков увеличивается всего лишь на 1 блок размером $M \times M$ по сравнению с общим количеством блоков $(N/M)^2$ для изображения $N \times N$ пикселей, поэтому время преобразования увеличится незначительно.

Моделирование системы анализа-синтеза на основе блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП в программной среде MATLAB с помощью инструментального модуля Fixed Point с использованием арифметики с фиксированной запятой для исходного изображения «Lena» 512×512 пикселей (рис. 3, а) показало, что без применения информационного SIB-блока s_n наблюдается эффект «шахматной доски»: PSNR = 84,6834 дБ, MSE = $2,2118 \times 10^{-4}$ (рис. 3, б), а с обработкой по схеме с SIB-блоком s_n PSNR = ∞ дБ, MSE = 0, т. е. исходное изображение восстанавливается без потерь (рис. 3, в).

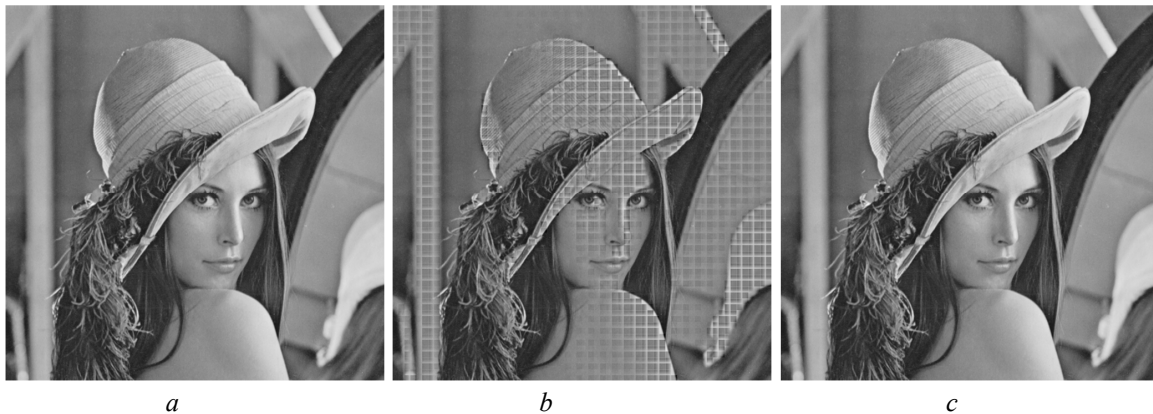


Рис. 3. Реконструкция изображения «Lena» 512×512 пикселей системой анализа-синтеза
Fig. 3. “Lena” 512×512 pixels image reconstruction by analysis-synthesis system

Система трансформационного кодирования изображений 2D ДКП-ОДКП процессора

Методы компрессии изображений, основанные на модификации и сжатии результатов преобразования изображения, называются методами трансформационного кодирования [7]. Согласно данному подходу, обратимое линейное преобразование \mathbf{T} , представляющее собой квадратную матрицу, используется для отображения множества целых чисел исходного изображения \mathbf{x} во множество вещественных чисел коэффициентов \mathbf{y} преобразования \mathbf{T} , которые затем квантуются и кодируются. Система трансформационного кодирования изображений (сжатия – кодер и восстановления – декодер) показана на рис. 4. В кодере реализуются четыре операции: разбиение изображения размера $N \times N$ на блоки $M \times M$ пикселей, прямое преобразование \mathbf{T}_A – преобразование анализа формата $M \times M$, квантование и кодирование.

Декодер выполняет обратную последовательность операций: декодирование символов, обратное преобразование T_S – преобразование синтеза формата $M \times M$, и объединение блоков в изображение. Так как значительное количество коэффициентов в частотных субполосах после операции квантования равно нулю для разных значений среднего числа бит на один пиксель rbb , то можно применить алгоритм кодирования серий нулей типа RLE (Run-Length Encoding) и энтропийное кодирование, используя алгоритм Хаффмана. Добавление блока кодирования RLE+Huffman [7] в систему сжатия изображения (рис. 4) позволит сжать изображение в 8 раз и получить результаты, сравнимые с предложенными в статьях [5, 9, 10–12]: на 0,25 bpp (сжатие 1:32), 0,5 bpp (сжатие 1:16), 1 bpp (сжатие 1:8) для монохромных 8-битных изображений.

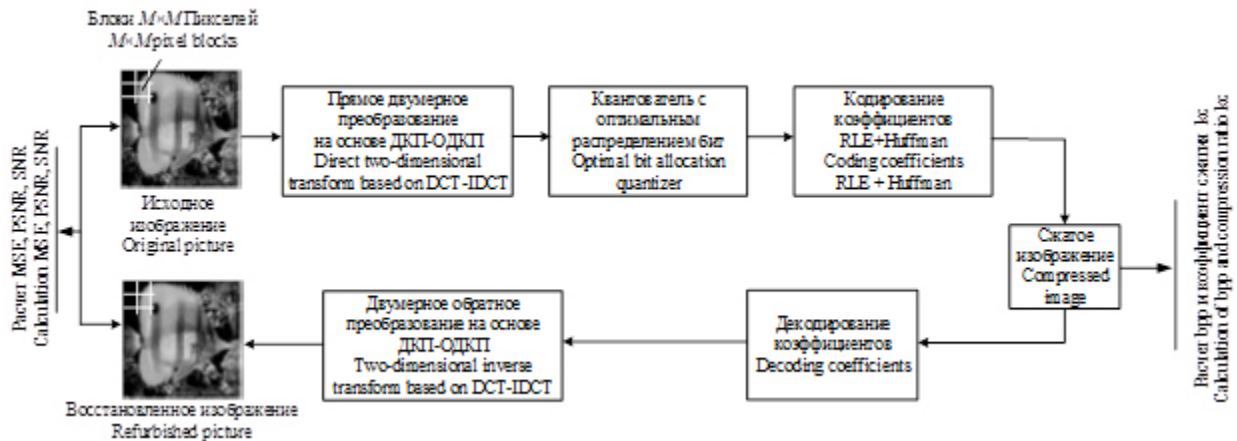


Рис. 4. Трансформационное кодирование изображений двумерным преобразователем ДКП-ОДКП
Fig. 4. Transformational images coding based on the two-dimensional converter DCT-IDCT

Вычисление и кодирование по принципу L2L (lossless-to-lossy) или на основе блочной лестничной структурной параметризации хорошо «ложится» на структуру системы компрессии на основе общего универсального модуля ДКП-ОДКП и будет иметь вид, представленный на рис. 5.

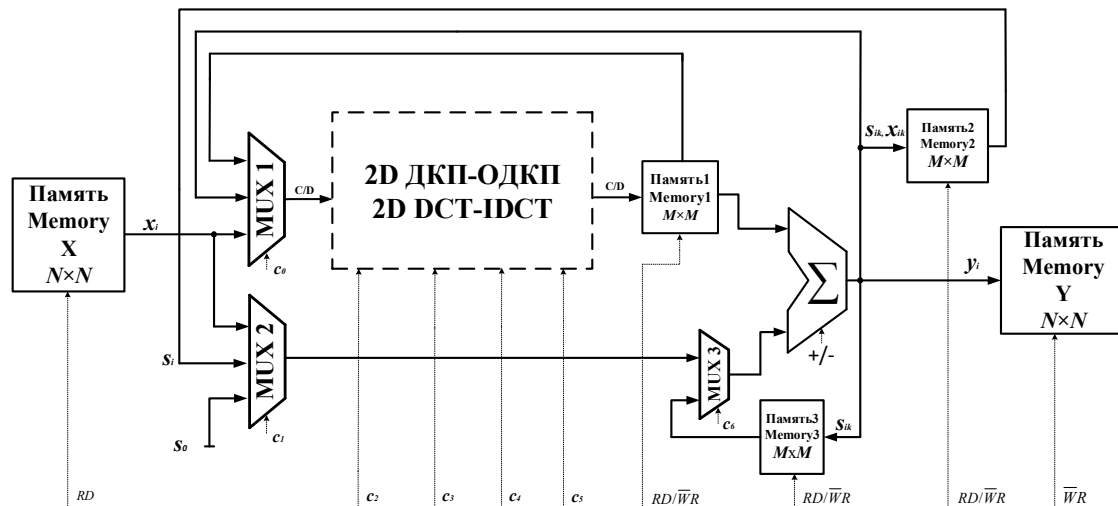


Рис. 5. Структура преобразователя L2L на основе 2D ДКП-ОДКП процессора
Fig. 5. Structure of the L2L converter based on the 2D DCT-IDCT processor

Преобразователь L2L состоит из памяти X размером $N \times N$, где хранится исходное изображение, мультиплекторов, процессорного модуля вычисления ДКП и ОДКП, памяти 1 для хранения промежуточных вычислений 1D или 2D ДКП или ОДКП размерностью $M \times M$, памяти 2 для хранения результатов вычислений ошибки округления в виде S_{ik} -блока размерностью $M \times M$, памяти 3 как дополнительного буфера для хранения результатов вычислений предыдущего цикла блоков s_{ik} размерностью $M \times M$, сумматора, памяти Y размером $N \times N$ для хранения закодированного изображения в виде блоков размерностью $M \times M$.

и управляющих сигналов для настройки работы преобразователя согласно блочной лестничной структурной параметризации в трех режимах:

- первый, режим без потерь (lossless) на основе БЛСП с использованием дополнительного нулевого информационного блока **SIB** для накопления ошибки целочисленного округления на каждом шаге лестничной структуры по формуле (7) и алгоритму вычисления, представленному на рис. 6;
- второй, режим с потерями (lossy) на основе БЛСП 2D ДКП-ОДКП, вычислительное ядро которого представлено на рис. 1, и вычисление происходит по формулам (5), (6);
- третий, режим с потерями (lossy) работает, как в стандарте JPEG, и вычисление происходит по формуле (2).

В первом режиме вычислительный процесс происходит на основе ядер прямого или обратного декоррелирующего преобразования двумерной блочной лестничной структурной параметризации и пространственной диаграммы вычисления коэффициентов в режиме без потерь (см. рис. 6). Преобразование изображения Y происходит за $(N/M)^2$ итераций. Преобразователь на основе ДКП-ОДКП с использованием дополнительного информационного **SIB**-блока по схеме L2L предлагается реализовать на основе рекурсивной структуры процессора (рис. 6), которая позволит за три процессорных цикла в режиме кодирования без потерь выполнить преобразование БЛСП на базе двумерных матриц целочисленного ДКП и ОДКП (рис. 1).

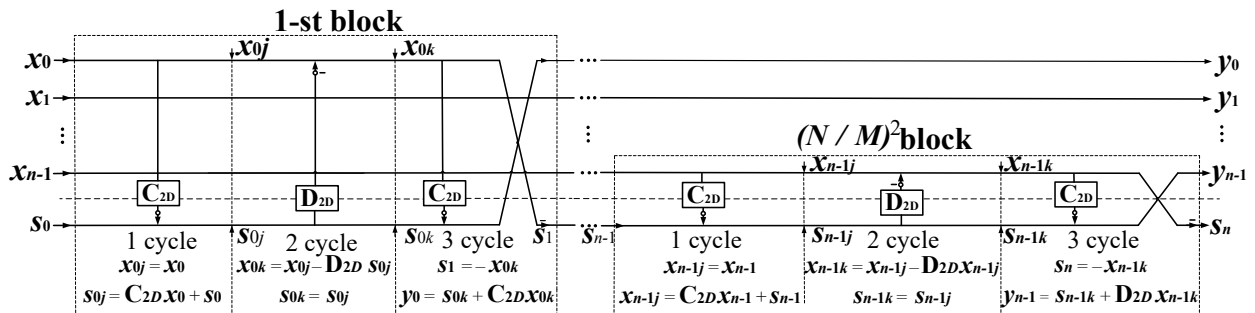


Рис. 6. Алгоритм БЛСП на 2D целочисленных ДКП-ОДКП с SIB-блоком для $(N/M)^2$ блоков изображения
Fig. 6. Algorithm of BLSP on 2D integer DCT-IDCT with SIB-block for $(N/M)^2$ image blocks

Заключение

Анализ перфективного целочисленного декоррелирующего преобразования изображений на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП показывает наличие артефакта «шахматная доска» в реконструированном изображении, который обусловлен наличием постоянной составляющей в каналах ОДКП.

Для реализации кодера изображения по схеме L2L предлагается выбрать перфективное 2D целочисленное декоррелирующее преобразование на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП с включенным дополнительным модулем ОДКП обработки ошибки округления при вычислениях ДКП каждого $M \times M$ блока изображения (**SIB**-блоком). При этом число операций округления на 1D преобразовании вектора $M \times 1$ сокращается с $3M$ до $3M/2M$. В трансформационном преобразовании декодера изображение $N \times N$ пикселей восстанавливается из всего цифрового потока и блока ошибки округления $M \times M$, который преобразуется на основе ДКП.

Процессор перфективного 2D целочисленного декоррелирующего преобразования на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП с дополнительным информационным **SIB**-блоком для кодирования изображений по схеме L2L предлагается реализовать на рекурсивной вычислительной структуре, что позволяет за три процессорных цикла в режиме кодирования без потерь выполнить прямое и обратное преобразования блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП блока изображения $M \times M$ и за $(N/M)^2$ итераций вычислить 2D трансформационное преобразование изображения $N \times N$ пикселей.

Список литературы / References

1. Pennebaker W. B. *JPEG: Still image compression standard*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1993.
2. Weinberger J. LOCO-I: a low complexity, context-based, lossless image compression algorithm. *Proceedings of the Data Compression Conference (DC'96)*. Snowbird, UT, 31 March – 03 April 1996: 140-149.
3. Skodras A. The JPEG2000 still image compression standard. *IEEE Trans. Signal Process. Mag.* 2001;18(5):36-58.
4. Dufaux F. The JPEG XR image coding standard. *IEEE Signal Process. Mag.* 2009;26(6):195-199.
5. Suzuki T. Integer DCT Based on Direct-Lifting of DCT-IDCT for Lossless-to-Lossy Image Coding. *IEEE Transactions on image processing*. November 2010;19(11):2958-2965.
6. Suzuki T. Integer fast lapped transforms based on direct-lifting of DCTs for lossy-to-lossless image coding. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2013;1:1-9.
7. Vaidyanathan P.P. *Multirate systems and filter banks*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA; 1993.
8. Suzuki T. Realization of lossless-to-lossy image coding compatible with JPEG standard by direct-lifting of DCT-IDCT. *Proceedings of the 17th IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP'2010)*, Hong Kong 26 – 29 September, 2010: 389-392.
9. Chokchaitam S. A new unified 2D-DCT accelerator lossless/lossy image compression based on a new integer DCT. *IEICE Trans. Inf. Syst.* Feb. 2005;Vol. E88-D (2):403-413.
10. Fukuma S. Lossless 8-point fast discrete cosine transform using lossless Hadamard transform. *Tech. Rep. IEICE, DSP99-103*. October 1999: 37-44.
11. Liang J. Fast multiplierless approximations of the DCT with the lifting scheme. *IEEE Transaction on Signal Processing*. Dec. 2001;49(12):3032-3044.
12. Komatsu K. Reversible discrete cosine transform. *Processing International Conference Acoustic, Speech, Signal Processing. Seattle, WA*. May 1998: 1769-1772.

Сведения об авторах

Ключеня В.В., к.т.н., доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kliuchenia V.V., PhD, Associate Professor at the Electronic Computing Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-701-54-89,
e-mail: vitaly.kliuchenia@gmail.com
Ключеня Виталий Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-701-54-89,
e-mail: vitaly.kliuchenia@gmail.com
Kliuchenia Vitaly Vasil'evich