

# Кодирование изображений по схеме L2L на основе целочисленного ДКП-ОДКП преобразования

к.т.н. Ключеня В. В., проф., д.т.н. Петровский А. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники





# Актуальность



## Свойства преобразователя по схеме L2L

- Линейность ФЧХ
- Короткая импульсная характеристика фильтра
- Критически или максимальная децимация для банка фильтров
- Высокий уровень  $C_g$  (Coding gain)
- Сохранение структурной регулярности и отсутствие постоянной составляющей в субполосах преобразования кроме низкочастотной субполосы *H*<sub>0</sub>(*z*), т. е. эффекта DC leakage
- Коэффициенты преобразования должны хорошо представляться в формате с фиксированной запятой
- Обеспечить обратимое «целое к целому» преобразование
- Структура преобразования должна достаточно просто отображаться на аппаратное и программное обеспечение
- Модульность, высокий вычислительный параллелизм, минимальная емкость памяти, максимальная производительность

## ДКП в математической модели сжатия цифровых изображений







Свойство «уплотнение» энергии

Пример восстановления изображения по 15% ДКП коэффициентов

### Основные свойства ДКП:

- Некоррелированность коэффициентов. Коэффициенты независимы друг от друга.
- «Уплотнение» энергии. Преобразование сохраняет основную информацию в малом количестве коэффициентов.
- Сепарабельность или разделимость, т. е. вычисления производятся по строкам и столбцам изображения.
- *Симметричность*, операции над строками и столбцами, так же как и формулы прямого и обратного преобразования ДКП симметричны.
- Ортогональность, базисные функции ДКП ортогональны.

## ОБРАТИМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

$$\begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$





Sweldens, W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets / W. Sweldens // Applied Computational Harmonic Analysis. – April 1996 – Vol.  $3 - N_{\odot}$ . 2. –P. 186–200.

# Блочные лестничные структуры

## Блочная лестничная структурная параметризация



Suzuki, T. Integer DCT Based on Direct-Lifting of DCT-IDCT for Lossless-to-Lossy Image Coding / T. Suzuki, M. Ikehara, // IEEE Transactions on image processing. – November 2010 – Vol.19. –  $N_{2}$ . 11. – P. 2958-2965.



 $\begin{bmatrix} \mathbf{y}_i \\ \mathbf{y}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{x}_j \end{bmatrix}$ 

$$\begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & -T^{-1} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ T & I \end{bmatrix},$$

#### Вывод:

уменьшает ошибки округления путем слияния многих операций округления, в качестве **Т** и **Т**<sup>-1</sup> можно использовать матрицы прямого и обратного целочисленного ДКП.



1. Suzuki, T. Integer DCT Based on Direct-Lifting of DCT-IDCT for Lossless-to-Lossy Image Coding / T. Suzuki, M. Ikehara, // IEEE Transactions on image processing. – November 2010 – Vol. 19. – No. 11. – P. 2958-2965.

# Свойства и недостатки прямой блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП



Преобразование ДКП является равнополосным максимально децимированным банком фильтров [83] с линейной ФЧХ (импульсные характеристики обладают свойством симметрии), постоянная составляющая локализована первым фильтром банка [5]. Однако все фильтры ОДКП имеют постоянную составляющую, т. е. присутствует так называемый эффект DC-leakages [16].



б – АЧХ ДКП-ОДКП стандарта ЈРЕС на арифметике с фиксированной запятой, разрядность данных 12 бит



## ЦЕЛОЧИСЛЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАИЕ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДКП-ОДКП



в – рекоструированное изображение с применения SIB-блока

применения SIB-блока;

**ДКП-ОДКП-SIB** перфективно восстанавливает изображение, избавляет от эффекта шахматной доски.

## Алгоритм вычисления БЛСП на 2D целочисленных ДКП-ОДКП

Режим без потерь (lossless)



**Выво**д: число операций округления на 1D преобразование вектора *M*×1 сокращается в 2*M* раз по сравнению с прямой реализацией БЛСП, следовательно, шум округления значительно уменьшится.

## Алгоритм вычисления БЛСП на 2D целочисленных ДКП-ОДКП

Двумерная блочная лестничная структурная параметризация для обработки изображений

Режим с потерями (lossy)

где 
$$\mathbf{C}_{2D} \mathbf{x}_i \triangleq \left( \mathbf{C} (\mathbf{C} \mathbf{x}_i)^{\mathrm{T}} \right)^{\mathrm{T}} = \mathbf{C} \mathbf{x}_i \mathbf{C}^{\mathrm{T}}$$
 и  $\mathbf{D}_{2D} \mathbf{x}_i \triangleq \left( \mathbf{D} (\mathbf{D} \mathbf{x}_i)^{\mathrm{T}} \right)^{\mathrm{T}} = \mathbf{D} \mathbf{x}_i \mathbf{D}^{\mathrm{T}}$ 



где  $\mathbf{x}$  – блок исходного изображения;  $\mathbf{y}$  – результат обработки;  $[\mathbf{C}]_{m,n}$  – матрица прямого преобразования ДКП и  $[\mathbf{C}]_{m,n}^{\mathsf{T}}$  – транспонированная матрица или матрица обратного преобразования ДКП (ОДКП)  $[\mathbf{D}]_{m,n} = ([\mathbf{C}]_{m,n})^{-1} = ([\mathbf{C}]_{m,n})^{\mathsf{T}}$  размера  $M \times M$ 

## БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ L2L НА ПЛИС





Сравнение существующих реализаций вычисления двумерного ДКП и модулей ДКП-ОДКП на Spartan-2 XC2VP30

Архитектура	DA1-DCT [31]	CORDIC Loeffler DCT [74]	pipelined 2D-DCT [81]	Универсальный процессор [33]	Предлагаемая
Функция	дкп	дкп	дкп	дкп/одкп	дкп/одкп
Number of 4 input LUTs	2990	10310	2618	2237	1109
Number of Slices	1872	5729	2823	1352	627
Number of Slice Flip Flops	1837	3736	3431	1170	887
Clock Frequency (MHz)	99	149	107	168	120
Max. Delay (ns)	10.1	6.7	9.3	6.2	8.3

Выводы:

- универсальный процессор ДКП-ОДКП требует в два раза меньше ресурсов кристалла FPGA;
- преимущества универсального ДКП-ОДКП процессора минимальная площадь кристалла среди выбранных схем и возможность выполнять как прямое, так и обратное ДКП.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОМПРЕССИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА ДКП-ОДКП В РЕЖИМЕ LOSSLESS



#### Выводы: изображения полностью восстанавливаются, $PSNR = \infty dB$ , MSE = 0.



PSNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K\_ = 0.99805; bpp = 8.0922



SNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K\_ = 1.0059; bpp = 8.0305



PSNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K = 0.99611; bpp = 8.071



R = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K\_ = 0.99611; bpp = 8.1681



PSNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K = 0.99805; bpp = 8.0175



PSNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K = 0.99805; bpp = 8.0602



PSNR = Inf dB; MSE = 0; SNR = Inf dB; K = 1; bpp = 8.0198







#### Результат преобразования изображения «целое в целое»



N=8

0.2031 0.1563 0.1875 0.1875 0.2969 0.2500 0.2656 0.3750

0.1719

0.1406 0.1563 0.3438 0.3438 0.2500 0.3438

0.1406 0.1563 0.2188 0.3594 0.2500 0.2031

Реконструированное изображение



0.2656 0.4375 0.2969 0.2188 0.2656 0.2656 0.3594 0.4219 0.2969 0.2031 0.3594 0.2813 0.2656 0.2656 0.3594 0.4219 0.2969 0.2031 0.3281 0.3281 0.3594 0.3281 0.2813 0.2188 0.2656 0.3906 0.3281 0.3281 0.3594 0.3281 0.2813 0.2188 0.2656 0.3125 0.3438 0.3594 0.3125 0.2969 0.2188 0.2500 0.4375 0.3125 0.3438 0.3594 0.3125 0.2969 0.2188 0.2500 0.4375  $0.2188 \quad 0.2188 \quad 0.2344 \quad 0.2188 \quad 0.2500 \quad 0.2969 \quad 0.4219 \quad 0.6250$ 0.2188 0.2188 0.2344 0.2188 0.2500 0.2969 0.4219 0.6250

DEC

00.001101 00.001010 00.001100 00.001100 00.010011 00.010000 00.010001 00.011000 00.001011 00.001010 00.001001 00.001010 00.010110 00.010110 00.010000 00.010110 00.001100 00.001001 00.001001 00.001010 00.001110 00.010111 00.010000 00.001101 00.010011 00.001100 00.001010 00.001011 00.010001 00.011100 00.010011 00.001110BIN 00.010111 00.010010 00.010001 00.010001 00.010111 00.011011 00.010011 00.001101 00.011001 00.010101 00.010101 00.010111 00.010101 00.010010 00.001110 00.010001 00.010100 00.010110 00.010111 00.010100 00.010011 00.001110 00.010000 00.011100 00.001110 00.001110 00.001111 00.001110 00.010000 00.010011 00.011011 00.101000

HEX

0.1719 0.1563

0.2813

0.1875

0.2969

0.3594

0.3906

00.001101 00.001010 00.001100 00.001100 00.010011 00.010000 00.010001 00.011000 00.001011 00.001010 00.001001 00.001010 00.010110 00.010110 00.010000 00.010110 00.001100 00.001001 00.001001 00.001010 00.001110 00.010111 00.010000 00.001101 00.010011 00.001100 00.001010 00.001011 00.010001 00.011100 00.010011 00.001110 00.010111 00.010010 00.010001 00.010001 00.010111 00.011011 00.010011 00.001101 00.011001 00.010101 00.010101 00.010111 00.010101 00.010010 00.001110 00.010001 00.010100 00.010110 00.010111 00.010100 00.010011 00.001110 00.010000 00.01110000.001110 00.001110 00.001111 00.001110 00.010000 00.010011 00.011011 00.101000

0.0d 0.0a 0.0c 0.0c 0.13 0.10 0.11 0.18 0.0d 0.0a 0.0c 0.0c 0.13 0.10 0.11 0.18 0.0b 0.0a 0.09 0.0a 0.16 0.16 0.10 0.16 0.0b 0.0a 0.09 0.0a 0.16 0.16 0.10 0.1 0.0c 0.09 0.09 0.0a 0.0e 0.17 0.10 0.0d 0.0c 0.09 0.09 0.0a 0.0e 0.17 0.10 0.0 0.13 0.0c 0.0a 0.0b 0.11 0.1c 0.13 0.0e 0.13 0.0c 0.0a 0.0b 0.11 0.1c 0.13 0.0 0.17 0.12 0.11 0.11 0.17 0.1b 0.13 0.0d 0.17 0.12 0.11 0.11 0.17 0.1b 0.13 0.0d 0.19 0.15 0.15 0.17 0.15 0.12 0.0e 0.11 0.19 0.15 0.15 0.17 0.15 0.12 0.0e 0.11 0.14 0.16 0.17 0.14 0.13 0.0e 0.10 0.1c 0.14 0.16 0.17 0.14 0.13 0.0e 0.10 0.1c 0.0e 0.0e 0.0f 0.0e 0.10 0.13 0.1b 0.28 0.0e 0.0e 0.0f 0.0e 0.10 0.13 0.1b 0.28

Выводы: изображение перфективно декодируется бит в бит, происходит преобразование

«цело к целому».

#### Система компрессии на основе двумерной блочной лестничной структурной параметризации в режиме lossy



## Система компрессии изображений в режиме lossy стандарта JPEG



1. Петровский, Н. А. Оптимальное распределение бит в параунитарном субполосном кодере изображений на основе алгебры кватернионов / Н. А. Петровский // Доклады БГУИР – 2014. – №1(79) – С.72-77

Сравнение режимов кодирования с потерями (lossy mode DCT) для двумерного ДКП (или DCT) и двумерной блочной лестничной структурной параметризации (или lossy mode L2L) с разным битрейтом от 0,1 до 8 bpp



20 L 

Bit Rate [bpp]

лестничную схемную параметризацию ДКП-ОДКП.

### Сравнение аналогичных систем сжатия по показателю PSNR с битрейтом 0.25, 0.5, 1.00 bpp



Восстановленное

#### изображение

#### Источник сравнения:

Suzuki, T. Integer DCT Based on Direct-Lifting of DCT-IDCT for Lossless-to-Lossy Image Coding/ T. Suzuki, M. Ikehara, // IEEE Transactions on image processing. – November 2010 – Vol.19. – №. 11. – P. 2958-2965

Изображение	bpp	2D ДКП-ОДКП	Suzuki	Komatsu	Fukuma	Tran	Chokchaitam	Выводы:
Lena	0.25	28.79	31.86	31.83	31.40	29.03	31.80	изображения с
	0.50	35.78	35.56	34.38	34.41	32.25	35.40	относительно
	1.00	40.53	39.12	36.68	38.70	35.52	38.82	СИЛЬНЫМИ
Barbara	0.25	25.12	26.95	26.93	26.94	23.70	26.69	высокочастотными
	0.50	32.42	30.68	30.65	30.67	27.14	30.32	компонентами 2D
	1.00	39.05	36.03	35.88	35.97	31.18	35.73	ДКП-ОДКП
Baboon	0.25	21.35	22.57	22.56	22.57	20.71	22.25	преобразование
	0.50	25.01	24.81	24.80	24.80	21.85	24.59	имеет выше
	1.00	31.10	28.27	28.24	28.25	24.54	28.06	эффективность –
Goldhill	0.25	27.04	29.37	29.35	29.36	27.35	29.06	от 1 до 3 дБ
	0.50	32.04	31.97	31.92	31.94	29.27	31.74	,
	1.00	37.40	35.36	35.19	35.27	31.31	35.13	



0,25 bpp, PSNR =25,12 дБ



0,25 bpp, PSNR = 21,35 дБ



0,25 bpp, PSNR = 27,04 дБ



0,5 bpp, PSNR =32,42 дБ



0,5 bpp, PSNR = 25,01 дБ



0,5 bpp, PSNR = 32,04 дБ



1 bpp, PSNR =39,22 дБ



1 bpp, PSNR = 31,10 дБ



1 bpp, PSNR = 37,40 дБ



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Предложена архитектура универсального процессора вычисления 2D декоррелирующего преобразования для кодирования изображений по схеме L2L (2D ДКП-ОДКП), особенностью которой является параллельное выполнение прямого и обратного ДКП в цикле синхронизации процессора и сокращение аппаратных затрат по сравнению со стандартной архитектурой разделимого 2D декоррелирующего преобразования на основе ДКП в два раза.
- Тестирование универсального процессора 2D ДКП-ОДКП вычисления 2D декоррелирующего преобразования изображений показало, что исходное изображение восстанавливается с точностью до бита, следовательно, преобразование 2D ДКП-ОДКП является обратимым «целое к целому» преобразованием и соответствует необходимым условиям трансформационного кодирования цифрового изображения по схеме L2L.
- В режиме кодирования цифровых изображений с потерями результаты сжатия 1:32, 1:16, 1:8 по объективному показателю PSNR сопоставимы с альтернативными преобразованиями (например, JPEG) и изображение восстанавливается без видимых артефактов «блочности» и «ореолов», а для изображений с относительно сильными высокочастотными компонентами 2D ДКП-ОДКП преобразование имеет выше эффективность – от 1 до 3 дБ.