

## ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ СЖАТИЯ ВИДЕО

*Дам Чонг Нам, аспирант Московского физико-технического института (государственного университета),  
chong.dam@phystech.edu.*

### APPLICATIONS OF COMPLEX WAVELET TRANSFORM IN VIDEO COMPRESSION

*Dam Trong Nam*

*In presented paper, the principles of inter-frame coding are shortly given on the example of wavelet-based video coder. The construction and properties of discrete wavelet transform (CWT) and complex wavelet transform (CWT) which is based on the dual tree complex wavelet transform (DTCWT) are considered. Motion compensation method for real videos using CWT is proposed. Comparisons between proposed method and reference methods which are based on using value of luma component (block matching (BM) and overlapped block matching (OBM)) are presented. The experiments with real high-definition videos show that proposed method gives higher PSNR of prediction error (from 0,2 to 0,5 dB) and smaller compressed output for quantized prediction error (from 6 % to 25 %) over reference methods even in conditions when reference methods work well.*

**Key words:** inter-frame coding, DWT, CWT, DTCWT, motion compensation, block matching, overlapped block matching.

**Ключевые слова:** межкадровое кодирование, ДВП, КВП, ДДКВП, компенсация движения, метод сопоставления блоков, метод сопоставления перекрывающихся блоков.

#### Введение

В большинстве современных видеокодеков используется дискретное косинусное преобразование (ДКП), характерными недостатками которого являются блокинг-эффект и мозаичный эффект. В отличие от ДКП, дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) работает не с блоками маленького размера, а с тайлами и даже с кадрами, вследствие чего ДВП лишено таких дефектов [1]. Следовательно, применение ДВП для компрессии статических и подвижных изображений перспективно. Действительно, на данный момент алгоритмы ДВП представлены в широко распространенных системах компьютерной математики, таких как Mathcad, MATLAB, Mathematica, более того, ДВП применяется в международном стандарте сжатия статических изображений JPEG2000 [2] и стандарте сжатия подвижных изображений MPEG-4 [3]. При этом используется двухканальное вейвлет-разложение. Применение многоканального вейвлет-разложения [4] обеспечит более высокие степени сжатия при заданном качестве восстановленного изображения.

Однако, при сжатии подвижных изображений и двухканальное, и многоканальное ДВП, основанные на действительных вейвлет-коэффициентах, имеют ряд недостатков. Первым недостатком является неинвариантность к сдвигу, состоящая в том, что малейшие смещения изображения в кадре приводят к значительным изменениям значений вейвлет-коэффициентов, что не позволяет использовать вейвлет-коэффициенты для процедуры анализа и компенсации движения, являю-

*Приведен принцип межкадрового кодирования на примере вейвлет-видеокодера. Рассмотрены построение и свойства дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и комплексного вейвлет-преобразования (КВП), основанного на двойном дереве комплексного вейвлет-преобразования (ДДКВП). Предложен метод компенсации движения реальных видео с помощью комплексного вейвлет-преобразования (КВП). Приведено сравнение предложенного метода с эталонными методами – методом сопоставления блоков (СБ) и методом сопоставления перекрывающихся блоков (СПБ). Экспериментами с реальными видео высокого разрешения показано, что предложенный метод выигрывает у эталонных методов от 0,2 до 0,5 дБ PSNR остатка предсказания и от 6 % до 25 % объема сжатого потока для квантованного остатка предсказания в режимах, когда эталонные методы хорошо работают.*

щей очень важной в видеокодеках для уменьшения временной избыточности, и тем самым увеличения степени сжатия. Вторым недостатком является отсутствие концепции фазовых соотношений, как в случае преобразования Фурье, которая может предоставить более точное описание и возможность компенсации движения. К счастью, широко известное в задаче обработки сигналов преобразование Фурье имеет привлекательные свойства для задачи сжатия изображений, такие как простое свойство линейности фазовых соотношений, кодирующих смещения исходного сигнала, и гладкость амплитуды, инвариантной к сдвигу [5]. Комплексное вейвлет-преобразование (КВП), вдохновленное преобразованием Фурье, является мощным фактором решения упомянутых проблем ДВП в задаче сжатия подвижных изображений.

Имеются исследования ортогональных или биортогональных КВП [6, 7]. В работе [8] предложен метод анализа движения с использованием КВП, не являющегося обратимым, что не позволяет использовать его для по-

строения предсказанного кадра. В [9] указано, что проводились исследования [10, 11] по построению обратимого КВП из полиномов Добеши. Однако, полученные вейвлет-фильтры в [10, 11] не обладают хорошими импульсными характеристиками, обеспечивающими инвариантность к сдвигу. Также в [9] показано, что очень трудно построить обратимое КВП, основанное на комплексных фильтрах, с привлекательными импульсными характеристиками для всех уровней разложения. Более того, легко заметить, что вычисления с комплексными коэффициентами сложнее и дольше, так что за последнее двадцатилетие существует единственное активное направление исследования КВП – КВП на основе двойного дерева комплексного вейвлет-преобразования (ДДКВП) [12, 13], которое в одномерном случае состоит из двух действительных ортогональных или биортогональных вейвлет-базисов, один из которых отвечает за «действительную часть», а второй за «мнимую часть», то есть, с одной стороны используются действительные вейвлет-коэффициенты, а с другой – вейвлет-преобразование носит комплексный характер.

Для обработки изображений КВП, в основном, применяется в задаче шумоподавления [14, 15]. КВП также находит применение в задачах классификации [16] и сегментации [17]. В задаче сжатия видео имеется крайне мало работ по использованию КВП [18], что объясняет новизну исследования КВП для задачи сжатия видео.

В данной работе рассмотрено применение КВП для компенсации движения реальных видео.

**Цель работы** – предложить метод построения предсказания кадров реальных видео в пространстве КВП (амплитуды и фазы) по найденному другим методом набору векторов движения и оценить эффективность предложенного метода в сравнении с эталонными методами, основанными на использовании яркостной составляющей кадра – методом сопоставления блоков (СБ) (block matching – BM) [1] и методом сопоставления перекрывающихся блоков (СПБ) (overlapped block matching – OBM), используемым в видеокодеке Dirac [19].

Для достижения поставленной цели в работе реализованы на языке программирования C++ решения следующих задач – чтения видео, поиска векторов движения с точностью до четверти пиксела методом полного перебора, построения предсказанных кадров разными методами с помощью опорного кадра и одним найденным набором векторов движения, записи предсказанных кадров и остатков предсказания для визуального сравнения методов предсказания, и сравнения эффективности методов разными метриками.

На реальных видео разного типа показано, что по сравнению с эталонными методами предложенный метод обеспечивает точное предсказание и меньший сжатый поток данных при одинаковом качестве восстановленного кадра. Преимущества данного метода заключаются в переходе из пространства яркости в пространство ДДКВП (амплитуды и фазы), легкой реализации с возможностью быстрого вычисления как в случае ДВП.

## Общий принцип межкадрового кодирования

Для уменьшения временной избыточности в современных видеокодеках используется процедура анализа и компенсации движения. В качестве примера на рис. 1 приведена общая схема вейвлет-видеокодера.

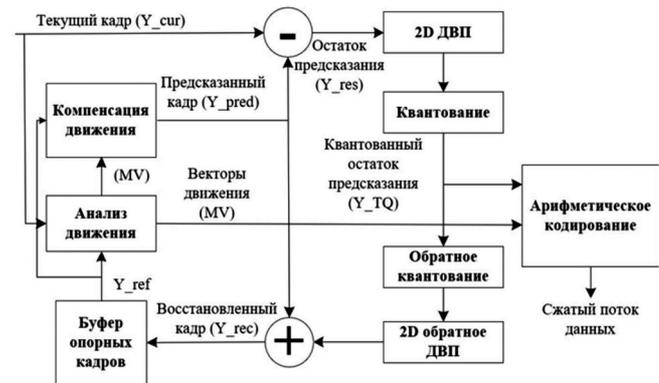


Рис. 1. Общая схема вейвлет-видеокодера

Текущий кадр ( $Y_{cur}$ ) поступает на вход блока анализа движения (далее БАД). Получив опорный кадр ( $Y_{ref}$ ) из буфера опорных кадров и текущий кадр, БАД определяет набор векторов движения (MV), описывающих перемещение блоков текущего кадра относительно опорного кадра и передающихся на блок арифметического кодирования. С помощью набора векторов движения и опорного кадра блок компенсации движения (далее БКД) строит предсказанный кадр, который нужно вычесть из текущего кадра для получения остатка предсказания, необходимого для дальнейшей обработки и передачи. По сравнению с полным текущим кадром, энергия остатка предсказания небольшая, однако, мы можем еще больше сократить объем передаваемых данных путем последовательного применения к остатку предсказания преобразования (дискретного косинусного преобразования, дискретного синусного преобразования или других ортогональных преобразований [1] в общем случае или ДВП в данном случае) и квантования. Затем квантованный остаток предсказания (далее КОП) и векторы движения поступают на блок арифметического кодирования для получения сжатого потока данных, который нужно передавать в канал связи или сохранять на каком-либо носителе.

На стороне декодера полученный сжатый поток последовательно проходит через блок арифметического декодирования, блок обратного квантования и блок обратного преобразования (ДВП в этом случае) для получения набора векторов движения и остатка предсказания, искаженного из-за квантования. В декодере недоступны исходные видеокдры, вследствие чего декодированные заранее кадры используются как опорные. Получив набор векторов движения, на основе буфера декодированных ранее кадров декодер реконструирует предсказанный кадр и прибавляет декодированный искаженный остаток предсказания для получения восстановленного кадра, который записывается в буфер декодированных кадров. Нужно отметить, что восстановленный кадр отличается от текущего кадра, доступного в кодере, вследствие этого в кодере необходимо повто-

ритель такой же процесс декодирования для получения таких восстановленных опорных кадров вместо текущих кадров.

Практической целью данной работы является разработка нового метода компенсации движения в БКД с использованием КВП. Для сравнения эффективности предложенного метода с существующими методами также реализованы в БКД наиболее популярные методы компенсации движения – метод СБ и метод СПб.

### Метод построения ДВП

На практике ДВП реализуется с помощью банка фильтров, основанных на двух фильтрах: нижних (ФНЧ) и верхних частот (ФВЧ) [1, 2, 5]. Схема построения ДВП для двумерного случая представлена на рис. 2 (Здесь  $h_0(n)$  – ФНЧ,  $h_1(n)$  – ФВЧ,  $\Phi$  – масштабирующая функция,  $\Psi$  – вейвлет-функция).

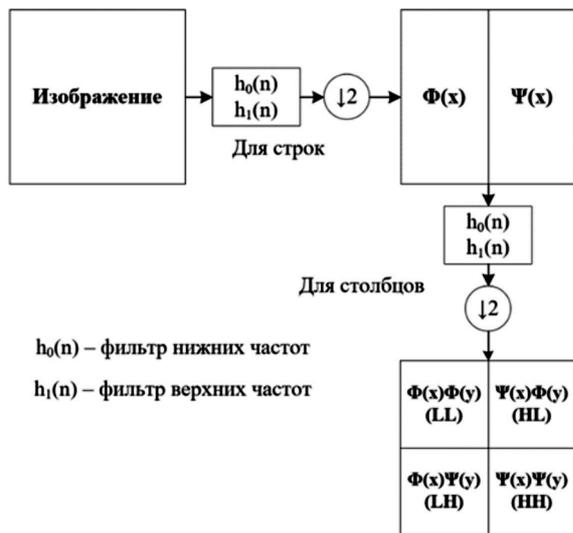


Рис. 2. Схема прямого двумерного ДВП

Стандартное действительное двумерное ДВП получается с помощью тензорного произведения одномерных ДВП по горизонтали и по вертикали, в результате чего получены масштабирующая функция  $\Phi(x, y) = \Phi(x)\Phi(y)$  и три вейвлет-функции  $\Psi_1(x, y) = \Phi(x)\Psi(y)$ ,  $\Psi_2(x, y) = \Psi(x)\Phi(y)$ ,  $\Psi_3(x, y) = \Psi(x)\Psi(y)$  (см. рис. 2).

При сжатии подвижных изображений ДВП, основанное на действительных вейвлет-коэффициентах, имеет недостатки – отсутствие концепции фазовых соотношений и неинвариантность к сдвигу, состоящая в том, что малейшие смещения изображения в кадре приводят к значительным изменениям значений вейвлет-коэффициентов, что не позволяет использовать их для процедуры анализа и компенсации движения, являющей очень важной в видеокодеках для уменьшения временной избыточности, и тем самым увеличения степени сжатия. В отличие от ДВП, КВП может решить эти проблемы и КВП легко реализуется на основе ДДКВП [8, 12].

### Метод построения КВП, основанного на ДДКВП

Одномерное ДДКВП обеспечивает разложение действительного сигнала с помощью двух комплексных масштабирующих и вейвлет-функций, которые получаются из двух независимых банков фильтров [8, 12] (см.

рис. 3). Обозначим  $\Phi_h(t)$  и  $\Psi_h(t)$  масштабирующую и вейвлет-функцию соответственно,  $c_{h_{l,n}}$  и  $d_{h_{l,n}}$  – соответствующие коэффициенты, где  $h$  указывает определенный набор вейвлет-фильтров. Вейвлет-функции  $\Psi_h(t)$  и  $\Psi_g(t)$  из двойного дерева играют роль действительной и мнимой частей комплексного аналитического вейвлета  $\Psi^C(t) = \Psi_h(t) + j\Psi_g(t)$ . Мнимый вейвлет  $\Psi_g(t)$  приблизительно является преобразованием Гильберта действительного вейвлета  $\Psi_h(t)$ .

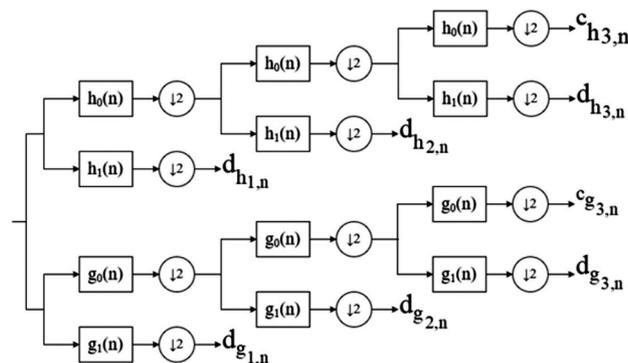


Рис. 3. Построение одномерного ДДКВП на основе пары банков фильтров

Схема построения двумерного ДДКВП представлена на рис. 4.

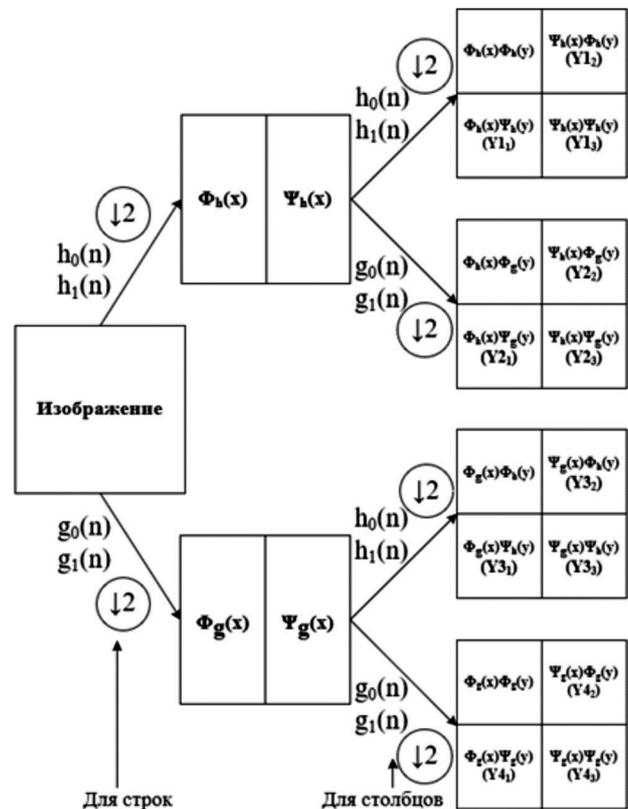


Рис. 4. Схема построения двумерного ДДКВП первого уровня

Здесь  $h_0(n), h_1(n)$  – ФНЧ и ФВЧ для верхней ветви,  $g_0(n), g_1(n)$  – ФНЧ и ФВЧ для нижней ветви. Нужно отметить, что для первого уровня может быть использован любой дискретный банк вейвлет-фильтров, т.е.  $h_0(n), h_1(n)$  и  $g_0(n), g_1(n)$  совпадают с условием, что прорежи-

вание второй ветви смещено на один отчет по сравнению с первой ветвью – выполняется условие задержки одного отчета [12]. В работе рассмотрено ДДКВП первого уровня в связи с избыточностью и сложной реализацией для следующих уровней. Сначала применяются ФНЧ и ФВЧ для верхней и нижней ветви со смещением прореживания к строкам данных, в результате чего получено два массива данных, к столбцам каждого из которых применив еще раз такую процедуру мы получим четыре массива данных ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ) (см. рис. 4).

По аналогии с ДВП, ДДКВП может быть построено двумя масштабирующими функциями  $\Phi(x)\Phi(y)$ ,  $\Phi(x)\Phi^*(y)$ , и шестью следующими вейвлет-функциями:  $\Phi(x)\Psi(y)$ ,  $\Psi(x)\Phi(y)$ ,  $\Psi(x)\Psi(y)$ ,  $\Phi(x)\Psi^*(y)$ ,  $\Psi(x)\Phi^*(y)$ ,  $\Psi(x)\Psi^*(y)$ , где  $\Phi^*(y)$  и  $\Psi^*(y)$  комплексно-сопряженные к  $\Phi(y)$  и  $\Psi(y)$ , и  $\Phi(x)$ ,  $\Phi(y)$ ,  $\Psi(x)$ ,  $\Psi(y)$  комплексны, т.е.  $\Phi(x) = \Phi_h(x) + j\Phi_g(x)$ ,  $\Phi(y) = \Phi_h(y) + j\Phi_g(y)$ ,  $\Psi(x) = \Psi_h(x) + j\Psi_g(x)$ ,  $\Psi(y) = \Psi_h(y) + j\Psi_g(y)$ . Подставив комплексное представление и выделив действительную и мнимую части каждого из шести вейвлетов, получим из четырех массивов данных ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ) все комплексные коэффициенты ДДКВП следующим образом:

$$\begin{aligned} Y_{re1} &= (Y_1 + Y_4) & Y_{im1} &= (Y_3 - Y_2) \\ Y_{re2} &= (Y_1 - Y_4) & Y_{im2} &= (Y_3 + Y_2) \end{aligned}$$

После нормировки

$$\begin{aligned} Y_{re1} &= (Y_1 + Y_4)/2 & Y_{im1} &= (Y_3 - Y_2)/2 \\ Y_{re2} &= (Y_1 - Y_4)/2 & Y_{im2} &= (Y_3 + Y_2)/2 \end{aligned}$$

Из двух комплексных коэффициентов ( $Y_{re1}, Y_{im1}$ ) и ( $Y_{re2}, Y_{im2}$ ) вычисляются амплитуды и фазы ( $A_1, Ph_1$ ) и ( $A_2, Ph_2$ ), с которыми выполняется процесс предсказания кадра в предложенном методе.

### Предложенный метод компенсации движения

Схема предложенного алгоритма построения предсказанного кадра реальных видео показана на рис. 5.

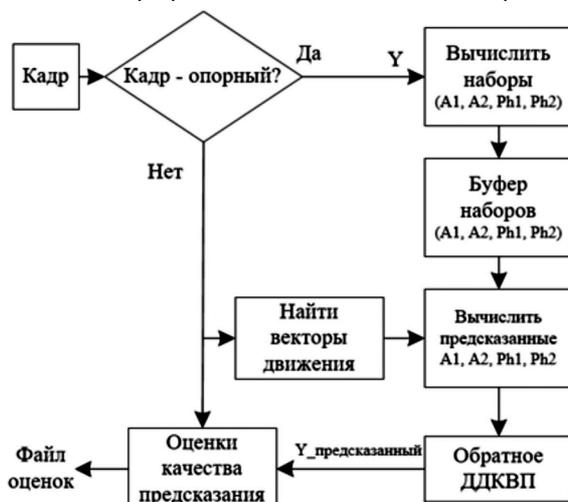


Рис. 5. Предложенный алгоритм построения предсказанного кадра

На вход поступают кадры, если этот кадр – опорный, то сохраняются амплитуды и фазы всех возможных смещенных кадров с точностью до четверти пиксела, иначе выполняется процесс нахождения векторов движения с точностью до четверти пиксела методом СБ с помощью алгоритма полного перебора. Затем на основе найденных векторов движения и буфера наборов амплитуд и фаз определяются амплитуды и фазы каждого блока предсказанного кадра. После чего вычисляется предсказанный кадр обратным ДДКВП. Блок «оценки качества предсказания» получает предсказанный кадр, вычисляет метрики для сравнения и записывает результаты в файл оценок.

### Результаты экспериментальных исследований

В этой работе кадр номера 0 выбран в качестве опорного кадра, предсказание кадра выполняется для следующих кадров и качество предсказания оценивается метрикой PSNR остатка предсказания и энтропии КОП.

Метод СБ реализован с алгоритмом полного перебора с маленьким размером блока 4x4 и 8x8, что позволяет определить точные векторы движения с точностью до четверти пиксела. При этом яркость смешенного на долю пиксела определяется с помощью возмозточечной линейной интерполяции, используемой в стандарте H.265 для интерполяции яркости (H265L) [20, 21].

Метод СПб [19] реализован с перекрывающимися блоками размера 6x6 и 12x12 с соответствующими окнами [3 5 8 5 3]/8 и [1 3 5 7 8 8 8 7 5 3 1]/8.

Как сказано выше, в предложенном методе можно использовать любой вейвлет-фильтр для построения ДДКВП. В работе исследованы разные вейвлеты для построения ДДКВП, такие как Legal5\_3, DD9\_7, CDF9\_7, DD13\_7 и другие. Результаты исследования показывают, что на качество предсказания очень мало влияет тип выбранного вейвлета и оказывается, что для качества предсказания и быстродействия лучше всего выбрать короткий фильтр Legal5\_3.

Если в качестве вейвлета выбран наилучший для предложенного метода фильтр Legal5\_3, то проводя оценку предсказания для нескольких кадров получим зависимость PSNR остатка предсказания от номера предсказанного кадра. В качестве примера на рис. 6 приведена эта зависимость для режима разбиения блока 4x4 и точности вектора движения четверти пиксела для видео «City» и «Stockholm».

Как показано на рис. 6, предложенный метод лучше двух эталонных методов (от 0,2 до 0,5 дБ по энергии остатка предсказания) даже в режиме высокой точности вектора движения (четверти пиксела) и маленького размера разбиваемых блоков (4x4), когда отлично работают эталонные методы.

На степень сжатия также влияет распределение КОП. Чтобы определить предел сжатия КОП арифметическим кодированием в разных методах, была исследована зависимость энтропии КОП от PSNR остаточного кадра, являющегося разностью текущего и восстановленного кадров. В качестве примеров на рис. 7 и 8 показана эта зависимость для видео «City» и «Stockholm» и кадров номер 1 и 2, когда оба эталонных метода хорошо работают.

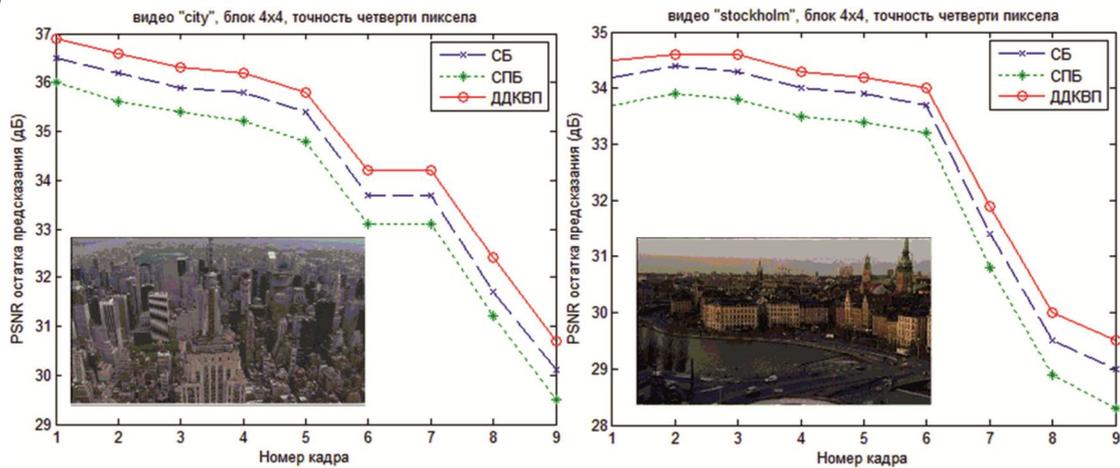


Рис. 6. Сравнение PSNR остатка предсказания в режиме разбиения блока 4x4 и точности вектора движения четверти пиксела для видео «City» (левый) «Stockholm» (правый)

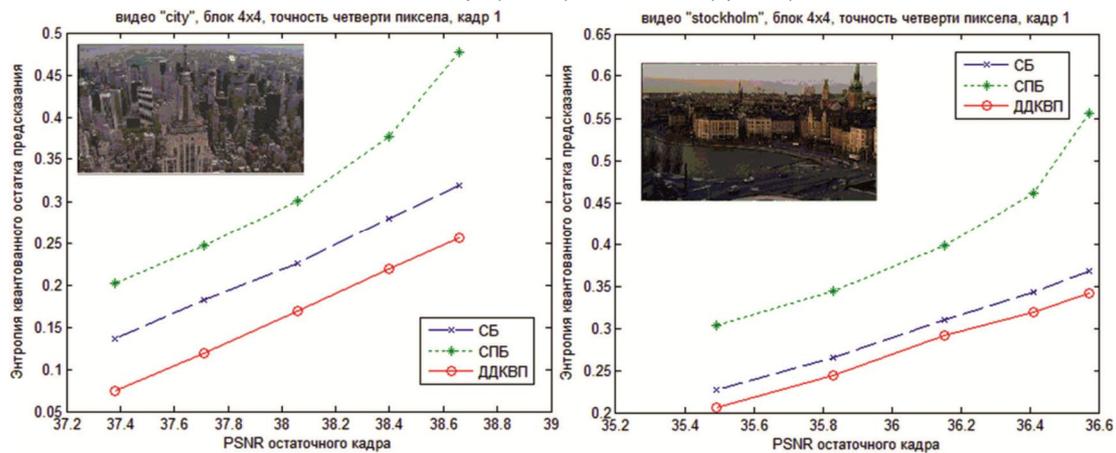


Рис. 7. Зависимость энтропии КОП от PSNR остаточного кадра для 1-ого кадра в режиме разбиения блока 4x4, точности четверти пиксела для видео «City» (левый) и «Stockholm» (правый)

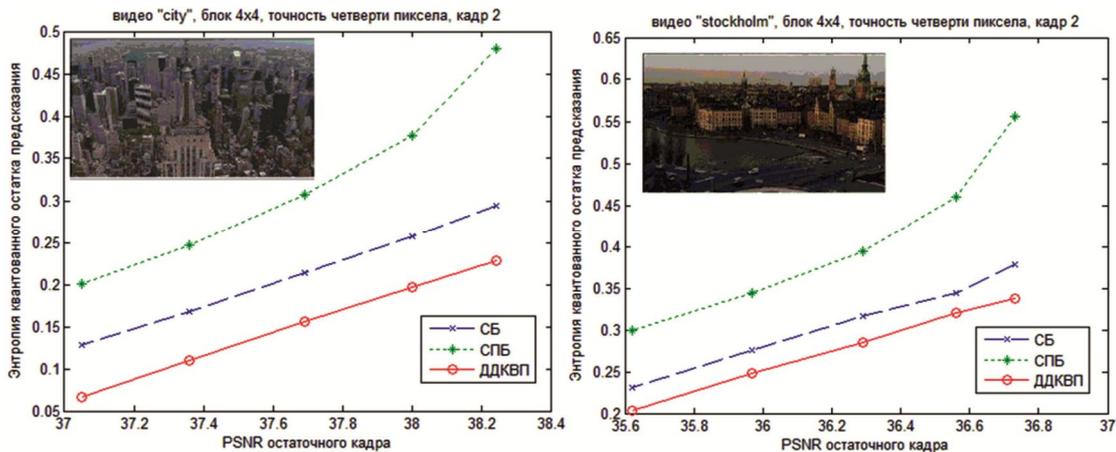


Рис. 8. Зависимость энтропии КОП от PSNR остаточного кадра для 2-ого кадра в режиме разбиения блока 4x4, точности четверти пиксела для видео «City» (левый) и «Stockholm» (правый)

На рис. 7, 8 видно, что при одинаковом качестве восстановленного кадра, т.е. при одном значении PSNR остаточного кадра, КОП по предложенному методу обладает самой минимальной энтропией.

Для количественного сравнения в работе при одинаковом качестве восстановления кадра также вычислено отношение энтропии квантованного остатка предсказания в предложенном методе к такой энтропии в эталонном методе, который дает минимальную энтропию из

двух эталонных методов. Сравнительный анализ показывает, что при маленьком отклонении между текущим (кадр 1 или кадр 2) и опорным кадром (кадр 0), когда отлично работают эталонные методы, предложенный метод может уменьшить объем сжатого потока данных для квантованного остатка предсказания от 20 до 25 % для видео «City» и от 6 до 8 % для видео «Stockholm». Следовательно, предложенный метод лучше подходит для задачи сжатия видео, чем эталонные методы.

## Заключение

В работе предложен метод предсказания кадра с использованием ДДКВП. Для проверки работоспособности и оценки эффективности предложенного метода была разработана экспериментальная программа на C++, выполняющая чтение видео, поиск векторов движения с точностью до четверти пиксела методом полного перебора, построение предсказанных кадров разными методами с помощью опорного кадра и одним найденным набором векторов движения, запись предсказанного кадра и остатков предсказания для визуального сравнения методов предсказания, и сравнение эффективности методов разными метриками.

В ходе работы с видео высокого разрешения «city» и «stockholm» (<https://media.xiph.org/video/derf/>) были получены следующие основные результаты:

– Качество предсказания предложенного метода мало зависит от типа вейвлета, что позволит построить ДДКВП любым вейвлет-фильтром и легко адаптировать предложенный метод в существующих вейвлет-видеокодеках.

– Предложенный метод обеспечивает меньшую энергию остатка предсказания. Конкретно, если отклонение между текущим и опорным кадром небольшое, то предложенный метод выигрывает у эталонных методов от 0,2 до 0,5 дБ PSNR остатка предсказания, в других случаях предложенный метод выигрывает больше 0,5 дБ PSNR остатка предсказания.

– При одинаковом качестве восстановленного кадра предложенный метод снижает объем сжатого потока для КОП от 20 до 25 % видео «City» и от 6 до 8 % видео «Stockholm». Следовательно, предложенный метод лучше подходит для сжатия чем эталонные методы.

## Литература

1. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика). Москва: Техносфера, 2012. – 1008 с. ISBN 978-5-94836-336-3.
2. ITU-T Recommendation T.800 (2002-08) – Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system.
3. ISO/IEC 14496-2 (Second edition 2001-12-01) – Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 2: Visual.
4. Дворкович А.В., Дворкович В.П. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. Москва: Техносфера, 2016. – 208 с. ISBN 987-5-94836-432-2.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с. ISBN 5-318-00666-9.
6. Lina J.M., Mayrand M. Complex Daubechies wavelets // Appl. Comput. Harmon. Anal., vol. 2, no. 3, pp. 219–229, 1995.
7. Spaendonck R.V., Blu T., Baraniuk R. and Vetterli M.

«Orthogonal Hilbert transform filter banks and wavelets» // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Apr. 6-10, 2003, vol. 6.

8. Magarey J. and Kingsbury N.G. Motion Estimation Using a Complex-Valued Wavelet Transform. // IEEE Trans. on Signal Processing, 46(4):1069-1084, 1998.

9. Kingsbury N.G. «Image processing with complex wavelets». // Phil. Trans. Royal Society London A, September 1999, Special issue for the discussion meeting on «Wavelets: the key to intermittent information?» (held Feb 24-25, 1999), 357, pp 2543-2560

10. Lawton W. Applications of complex valued wavelet transforms to subband decomposition. IEEE Trans. Signal Proc. 41, 3566-3568.

11. Belzer B., Lina J.M., and Villasenor J. Complex, linear-phase filters for efficient image coding. // IEEE Transactions on Signal Processing, 40(4):2425–2427.

12. Selesnick, R. Baraniuk, and N. Kingsbury «The dual-tree complex wavelet transform». // IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 6, pp. 123-151, Nov. 2005.

13. Selesnick I. «Matlab Implementation of Wavelet Transforms. Dual-Tree Complex Wavelet Transform» // <http://taco.poly.edu/WaveletSoftware>.

14. Naga Prudhvi Raj, V., Venkateswarlu. Denoising of medical images using dual tree complex Wavelet transform. // Proc. Technol.4, 238–244, C3IT- 2012.

15. Shi F. and Selesnick I.W. Video denoising using oriented complex wavelet transforms. // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing (ICASSP), June 2004, vol.2, pp.949-952.

16. Abdul Rehman, Yang Gao, Jiheng Wang, Zhou Wang, Image Classification Based on Complex Wavelet Structural Similarity, IEEE International Conference on Image Processing, Brussels, Belgium, Sept. 2011.

17. An Vo, Soontorn Orintara, A study of relative phase in complex wavelet domain: Property, statistics and applications in texture image retrieval and segmentation. // Signal Processing: Image Communication 25, 2010, pp.28-46.

18. Unan Y. Oktiawati and Vooi Voon Yap, A Motion Estimation Algorithm Using DTCWT. // ITB J. ICT, vol.6, no.1, 2012, pp.82-101.

19. Jianguo Zhang Ling Shao Lei Zhang Graeme A. Jones. Intelligent video event analysis and understanding. Springer, 2010 edition. - 251 pages. ISBN 978-3-642-17554-1.

Sullivan G.J., Jens-Rainer Ohm, Woo-Jin Han, Thomas Wiegand. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. // IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 22(12). 1649-1668 (2012).

20. Jill M. Boyce, Yan Ye, Jianle Chen, Adarsh K. Ramasubramonian. Overview of SHVC: Scalable Extensions of the High Efficiency Video Coding Standard. // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn. 26(1): 20-34 (2016).