

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 681.3

### АЛГОРИТМ СУПЕРИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В ВИДЕОРЯДЕ

**Василенко С.И., Прокофьев А.В.**  
Кафедра информационных технологий

---

*Поступила в редакцию 01.07.2009, после переработки 29.09.2009.*

---

В данной работе построена модель и алгоритм супериерархического подавления шума в видеоряде, обладающие рядом преимуществ относительно последовательной компенсации движения. Приведены оценки экспериментальных данных на основе объективного показателя - пикового отношения сигнал-шум в сигнале.

Superhierarchical noise blanking model and algorithm were developed in this work. They have a set of advantages relating to the successive motion compensation. Experimental data estimations based on impatial characteristic - the peak ratio between the signal and the noise magnitudes in signal, were cited.

**Ключевые слова:** цифровая обработка сигнала, подавление шума, вейвлет-преобразование, компенсация движения.

**Keywords:** digital signal processing, noise suppression, wavelet transform, movement indemnification.

#### Введение

Эффективность применения алгоритмов выделения, распознавания, сопровождения объектов на основании данных видеоряда в значительной степени зависит от показателя отношения сигнал-шум входной информации [1]. При использовании данных методов в областях технического телевидения, характеризующихся высоким уровнем шума в сигнале, получаемом от приемника (например, рентгена, телевизора), необходима предварительная обработка входной информации с целью подавления шума с минимальными потерями «полезного» сигнала.

Стандартные алгоритмы подавления некоррелированных шумов в сигналах основаны на методах усреднения по нескольким наблюдениям во времени одного и того же сигнала. Предлагаемый метод подавления шума в видеоряде не является исключением. Его идея также заключается в усреднении выборок сигнала, применительно к видеоизображению - кадров. Особенность состоит в том, что сигнал в кадрах меняется во времени из-за перемещения или трансформации объектов на них и в процессе усреднения таких сигналов необходимо учитывать движение изменившихся областей. Для получения более высоких коэффициентов подавления шумов можно использовать набор из нескольких  $N$  кадров, таким образом,

улучшив отношение сигнал-шум в суммированном сигнале-кадре в  $\sqrt{N}$  раз. Но при этом в  $N$  раз также увеличивается вычислительная сложность метода, и увеличиваются ошибки вычисления, возникающие из-за большой разницы сигналов первого и последнего обрабатываемого кадра. Описанный метод *супериерархической* компенсации нивелирует подобные недостатки.

В существующих методах подавления шума в видеоряде улучшение требуемого показателя осуществляется с помощью:

- применения какого-либо сглаживающего фильтра для каждого кадра в отдельности - *внутрикадровое подавление шума*;
- усреднения соседних кадров потока с учетом векторов движения областей кадров - *межкадровое подавление*.

Супериерархическую компенсацию можно отнести к третьему классу методов подавления шума - комбинированному или 3D-фильтры. Она получила своё название из-за структуры способа поиска векторов движения и способа получения суммированного кадра видеопоследовательности, каждый из которых представляет собой иерархическую структуру.

## 1. Поиск векторов движения

Кадры видеопоследовательности - это временная выборка сигнала, представляющего собой комбинацию сигналов от различных объектов и фона. Средний уровень таких составляющих сигнала меняется от кадра к кадру незначительно и его можно считать постоянным (для нескольких соседних кадров):

$$S(t) = \bigcup_i S_i(t),$$

$$S_i(t) \approx S_i(t+1) \approx \dots \approx S_i(t+n), \quad (1)$$

где  $S_i(t)$  -  $i$ -ая составляющая сигнала кадра видеопотока в момент времени  $t$ .

Близко расположенные кадры видеопоследовательности зачастую отличаются только положением, размером и ориентацией некоторых областей - перемещающихся объектов. Поэтому, если учесть степень изменения таких объектов, то можно рассматривать набор кадров на небольшом временном интервале как временную выборку стационарного сигнала:

$$S(t) = \bigcup_i S_i(t) = \bigcup_i H(S, t, t+1) = \dots = \bigcup_i H(S, t, t+n) S_i(t+n), \quad (2)$$

где  $H(S, t, t+n)$  - некий оператор, учитывающий изменения перемещающихся объектов кадра  $S$  и не влияющий на остальные составляющие сигнала.

Если рассматривать зашумленный видеоряд, как сигнал с некоррелированным аддитивным шумом:

$$S_\xi(t) = S(t) + \xi(t) = \bigcup_i S_i(t) + \xi(t), \quad (3)$$

где  $\xi(t)$  - шум в кадре на момент времени  $t$ ,  
то стандартный метод усреднения сигнала при использовании оператора  $H$  согласно 2 формально можно представить в следующем виде:

$$\hat{S}_\xi(t) = \frac{\sum_n S_\xi(t+n)}{n} = \frac{\sum_n (\bigcup_i H(S_\xi, t, t+n) S_i(t+n) + \xi(t+n))}{n} \rightarrow$$

$$\rightarrow \bigcup_i \frac{\sum_n H(S_\xi, t, t+n) S_i(t+n)}{n} + \eta(n). \quad (4)$$

Полученная таким способом оценка видеоряда  $\hat{S}_\xi(t)$  (суммированный кадр) будет характеризоваться большим отношением сигнал-шум по сравнению с исходными кадрами  $S_\xi(t)$ , так как её шумовая составляющая  $\eta(t)$  равна усредненной шумовой составляющей исходного сигнала  $\xi(t)$ .

Для описания оператора  $H$  перейдем к рассмотрению сигнала кадра видеопотока в виде матрицы яркости изображения  $T_{i,j}^n$ , а составляющих кадр сигналов - в виде подматриц, объединение которых дает исходный кадр. Перемещению объектов от кадра к кадру соответствует изменение положений таких подматриц, а трансформации (вращению, масштабированию) - изменение значений элементов подматриц. Искомый оператор, учитывающий изменения в кадрах, должен выполнять следующие функции:

- принимать решение об изменении подматриц, вызванное движением в кадрах;
- определять для изменившихся подматриц одного кадра их новое положение в другом кадре;
- устранять найденное смещение и изменение значений подматриц.

То есть оператор  $H$  - это оператор поиска, так называемых, *векторов движения* с дальнейшей *компенсацией движения*.

Подобный подход используется во многих методах сжатия видеопоследовательности, когда для уменьшения размера потока данных вместо набора кадров передается только один метакадр и значения векторов движения, необходимые для восстановления остальных кадров. Вектора движения определяются при помощи различных алгоритмов нахождения движения в видеоряде, например, [4].

Поиск векторов движения в предлагаемом методе подавления шума производится для подматриц изображения кадра, имеющих равный размер  $m \times m$  пикселей и основывается на минимизации значения суммы абсолютных разностей элементов (пикселей) в подматрицах кадров:

$$\min_{k,l \in [0,w]} \sum_{i=x}^{x+m} \sum_{j=y}^{y+m} |T_{i,j}^1 - T_{i+k,j+l}^2| \rightarrow (k,l) \quad x \in [1, N-m], y \in [1, M-m], \quad (5)$$

где:

$x, y$  - положение подматрицы в матрице изображения;

$N, M$  - размер матрицы изображения;

$w$  - размер области (окна) поиска переместившейся подматрицы;

$T_{i,j}^1$  и  $T_{i,j}^2$  - матрицы изображений кадров;  
 $(k, l)$  - вектор движения подматрицы.

Выбор метода отыскания минимума зависит от требуемой вычислительной сложности и точности определения вектора движения и может быть различным - от полного перебора  $w^2$  подматриц из области поиска до более сложных алгоритмов, например, описанных в [3] и [7].

Операция поиска вектора движения для любой подматрицы считается выполненной, если найденная минимальная сумма абсолютных разностей её элементов и элементов подматрицы с рассматриваемым вектором движения  $(k, l)$  меньше среднего уровня шума в кадрах:

$$\sum_{i=x}^{x+m} \sum_{j=y}^{y+m} |T_{i,j}^1 - T_{i+k,j+l}^2| < \Delta \times m^2,$$

$$\Delta = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |T_{i,j}^1 - T_{i,j}^2|. \quad (6)$$

Принятие решения об изменении подматрицы и, соответственно, поиск вектора движения осуществляется в том случае, если не выполняется условие 6 с нулевыми значениями  $k$  и  $l$ .

Найденных таким образом векторов движения достаточно для дальнейшей компенсации перемещения объектов кадра при получении оценки видеоряда на основе усреднения кадров.

## 2. Вейвлет-преобразование

С целью уменьшения вычислительной сложности процедура поиска векторов движения в предлагаемом методе проводится не для изображений кадров, а для результатов их  $n$ -уровневого двумерного вейвлет-преобразования (ВП) [5], являющегося комбинацией одномерных ВП для строк и столбцов матриц изображения:

$$v_j^{(i+1)} = \sum_{k \in Z} v_{2j+k}^{(i)} h_k,$$

$$w_j^{(i+1)} = \sum_{l \in Z} v_{2j+l}^{(i)} g_l, \quad i, j \in Z, \quad (7)$$

где:

$v_j^{(i+1)}$  - сглаженный сигнал на уровне  $i + 1$ ,

$w_j^{(i+1)}$  - коэффициенты преобразования на уровне  $i + 1$ ,

$h_k, g_k$  - низкочастотный и высокочастотный фильтры применяемого вейвлета.

**Примечание:** Первый уровень иерархии, давший название рассматриваемому методу, состоит в вычислении вейвлет-преобразования по схеме Мала, представляющей собой иерархическую структуру Рис.1.

Одним из результатов такого преобразования на  $n$ -ном шаге являются сглаженные и уменьшенные в  $2^n$  раз проекции исходных изображений кадров, которые и используются для поиска векторов движения. Из этого и вытекает уменьшение вычислительной сложности процедуры поиска векторов движения. Так, при

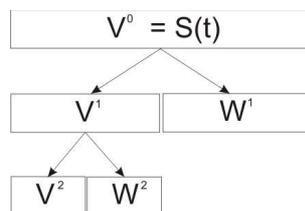


Рис. 1: Схема алгоритма Мала

отыскании минимума для критерия 5 с помощью полного перебора подматриц из окна поиска, необходимо вычислить не  $w^2$  сумм абсолютных разностей пикселей, а  $\left(\frac{w}{2^n}\right)^n$ .

Другим результатом ВП является возможность подавления шума обработкой вейвлет-коэффициентов перед обратным вейвлет-преобразованием:

$$v_j^{(i)} = \sum_{k \in Z} \left( v_k^{(i+1)} h_{j-2k} + w_k^{(i+1)} g_{j-2k} \right), \quad i = 0 \dots n, j \in Z. \quad (8)$$

Она заключается в удалении коэффициентов с малыми амплитудами, то есть с высокой вероятностью относящихся к шумовому сигналу. Проведение данной процедуры является аналогом внутрикадровых методов подавления шума в видеоряде. По результатам многочисленных исследований (например, [2] [6]) отношение сигнал-шум в преобразованных кадрах увеличивается по сравнению с исходными. Что согласно 6 в свою очередь уменьшает количество подматриц, для которых принимается решение о необходимости поиска вектора движения и уменьшает ошибки вычисления векторов для изменившихся подматриц.

### 3. Иерархический поиск векторов движения

В предлагаемой модели поиск векторов движения организован по иерархической схеме Рис. 2, являющейся комбинацией методов, описанных выше:

- 1) Рассчитывается  $n$ -уровневое двумерное ВП (количество уровней зависит от разрешения кадра).
- 2) Для самого нижнего  $n$ -го уровня ВП кадра по критерию 5 производится поиск значений векторов движения для изменившихся подматриц сглаженных проекций кадров.
- 3) Производится обратное ВП с удалением шумовых вейвлет-коэффициентов.
- 4) На основе найденных векторов движения на предыдущем уровне вейвлет-преобразования кадра по критерию 5 производится поиск значений векторов для уровня преобразования выше  $(n-1, n-2, \dots, 0)$  со значительно меньшими размерами области поиска. Уменьшение окна поиска обусловлено наличием информации о возможных значениях искомых векторов.
- 5) Пункты 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет восстановлен исходный кадр.



Рис. 2: Иерархическая схема поиска векторов движения

Таким образом, поиск вектора движения осуществляется на самом низком уровне вейвлет-преобразования изображений кадров с последующим иерархическим их уточнением на восстановленных изображениях.

**Примечание:** Иерархическая схема поиска векторов движения создаёт второй уровень иерархии в структуре предлагаемого метода.

#### 4. Супериерархическая компенсация

Увеличение отношения сигнал-шум в видеоряде производится с помощью получения суммированного кадра, содержащего усредненные значения сигналов нескольких скомпенсированных кадров. Количество усредняемых кадров зависит от условий решаемой задачи и значительно прореживает видеоряд.

Стандартный способ формирования суммированного кадра - *последовательная* компенсация движения (Рис. 3), которая выполняется по следующему алгоритму:

- 1) В качестве суммированного кадра берется первый кадр из видеоряда.
- 2) Суммированный кадр сравнивается с последующим (обрабатываемым) в видеоряде на предмет поиска векторов движения.
- 3) С учетом значений векторов движения усредняются пиксели суммированного и обрабатываемого кадров:

$$T_{i,j}^C = \frac{T_{i,j}^C + T_{i+k_i,j+l_j}^n}{2} \quad (9)$$

где  $T_{i,j}^C$  - суммируемый кадр,  $T_{i+k_i,j+l_j}^n$  - очередной обрабатываемый кадр,  $k_i, l_j$  - значения вектора движения для подматрицы, к которой принадлежит усредняемый пиксель.

- 4) В качестве обрабатываемого кадра берется последующий кадр из видеоряда и производятся операции, начиная с пункта 2, до тех пор, пока количество усредненных кадров не достигнет требуемой величины.

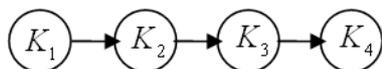


Рис. 3: Схема последовательной компенсации движения

Такой способ компенсации движения обладает рядом характерных недостатков:

- по мере увеличения числа обработанных кадров в суммированном кадре улучшается отношение сигнал-шум, а в исходном видеоряде оно постоянно. Поэтому при обработке каждого нового кадра точность нахождения вектора смещения на основе критерия 5 уменьшается из-за различия значений среднего шума в кадрах;
- расстояние между движущимися объектами на суммированном и обрабатываемом кадрах увеличивается, что влечет увеличение размеров области поиска, которые могут превысить заданные или существенно увеличить время поиска.

В рассматриваемом методе для формирования суммированного кадра используется *иерархическая* компенсация (Рис. 4), в которой процесс усреднения сигнала разбивается на несколько уровней, число которых зависит от количества обрабатываемых кадров:

- 1) Исходные кадры разбиваются на пары нулевого уровня, в которых осуществляется поиск векторов движения с помощью иерархического поиска.
- 2) Пиксели пар кадров обрабатываемого уровня усредняются с учетом движения:

$$T_{i,j}^{(L+1)N} = \frac{T_{i,j}^{LN} + T_{i+k_i,j+l_j}^{L(N+1)}}{2} \quad (10)$$

где

$T_{i,j}^{(L+1)N}$  - суммированный кадр с номером  $N$  нового уровня  $L + 1$ ,

$T_{i,j}^{LN}, T_{i+k_i,j+l_j}^{L(N+1)}$  - соседние кадры с номерами  $N$  и  $N + 1$  обрабатываемого уровня  $L$ ,

$k_i, l_j$  - значения вектора движения для подматрицы, к которой принадлежит усредняемый пиксель.

- 3) Если к новому уровню относятся несколько суммированных кадров, то он принимается за очередной обрабатываемый уровень - кадры разбиваются на пары, производится вычисление векторов движения для пар и повторяются операции с пункта 2. Иначе полученный кадр является искомой оценкой видеоряда.

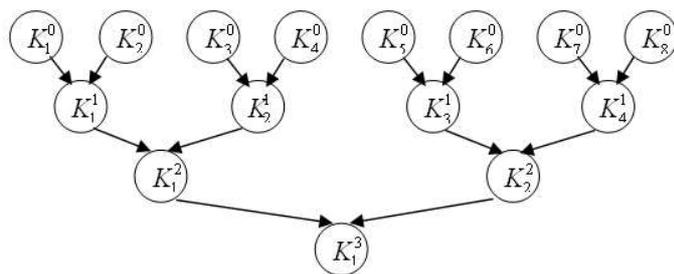


Рис. 4: Схема иерархической компенсации движения

**Примечание:** третий уровень иерархии заключается в иерархической компенсации движения, а объединение всех уровней представляет собой многомерную иерархическую структуру метода подавления шума, получившего название *супериерархического*.

У такой схемы компенсации движения отсутствуют недостатки, характерные для последовательной компенсации:

- В обрабатываемых кадрах равного уровня одинаковое соотношение сигнал-шум, что не влияет на точность определения векторов движения.
- Расстояние между движущимися объектами увеличивается только с возрастанием уровня обработки суммированных кадров и с меньшей в два раза скоростью. Учитывая равное отношение сигнал-шум в суммированных кадрах одного уровня, можно произвольно выбирать кадр из пары, значения которого будут компенсированы при учете движения. Это позволяет строить более гибкие схемы иерархической компенсации движения, с меньшими расстояниями между движущимися объектами в сравниваемых кадрах.

## 5. Экспериментальные данные

Описанный алгоритм подавления шума в видеоряде был апробирован на наборе тестовых кадров, полученных добавлением шума различного уровня к «идеальному» полутоновому изображению глубиной 8 бит. Оценка отношения сигнал-шум производилась на основе вычисления объективного критерия - пикового отношения сигнал-шум - *PSNR (peak signal-to-noise ratio)*:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{NM255^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (T_{i,j} - \tilde{T}_{i,j})^2} \right), \quad (11)$$

где:

$N, M$  - размеры изображения кадра,

$T_{i,j}$  и  $\tilde{T}_{i,j}$  - сравниваемые кадры.

Для анализа эффективности работы метода использовался следующий подход: сначала вычислялось значение оценки PSNR для необработанного кадра и кадра

без шумовых флуктуаций, полученного путем добавления к «идеальному» кадру значения средней яркости шума (для того, чтобы не учитывать постоянную составляющую при расчете PSNR). Затем вычислялось значение второй оценки - значение PSNR для обработанного суммированного кадра и кадра без шумовых флуктуаций. Разница между полученными значениями и есть количественный показатель эффективности работы метода - изменение отношения сигнал-шум в сигнале.

На рисунках 5, 6, 7 представлены гистограммы тестовых кадров без шума, с шумом и гистограмма кадра после обработки предложенным методом. В Таблицах 2 и 3 приведены результаты вычислительных экспериментов с набором тестовых последовательностей кадров, полученных добавлением распределенного по разным законам и с разными параметрами аддитивного шума (Таблица 1). В проведенных экспериментах применялись разные типы вейвлетов, уровни вейвлет-преобразования и пороги, влияющие на эффективность подавления шума при внутрикадровой обработке, а также на точность вычисления векторов движения. Разное количество обрабатываемых кадров влияет на эффективность межкадрового подавления шумов при усреднении.

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- предложенный метод увеличивает отношение сигнал-шум в видеоряде в не зависимости от закона распределения аддитивного шума в нем;
- метод эффективно подавляет шумы различного уровня;
- использование различных типов вейвлетов, различных уровней преобразования и порогов приводит к увеличению отношения сигнал-шум в сигнале.

## Заключение

В работе рассмотрен и построен алгоритм, позволяющий увеличить отношение сигнал-шум в видеоряде с помощью прореживания его во времени, реализованный на основе комбинированного метода подавления шума. Преимуществами предложенного метода супериерархической компенсации движения являются:

- более точное вычисление векторов движения при их поиске на проекциях с меньшим уровнем шума;
- уменьшение количества вычислений в алгоритме иерархического поиска векторов движения, объединяющем процедуру фильтрации и вычисление значений векторов;
- гибкость схемы иерархической компенсации движения;
- высокая степень подавления шумов.

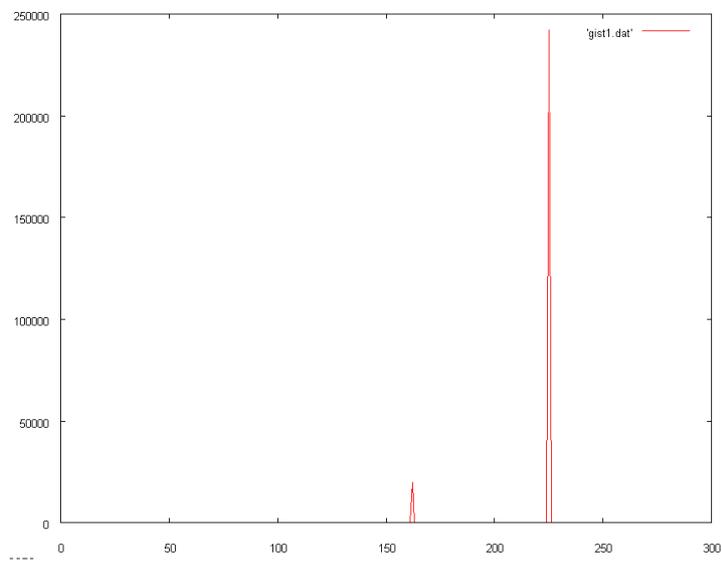


Рис. 5: Гистограмма тестового кадра без шума

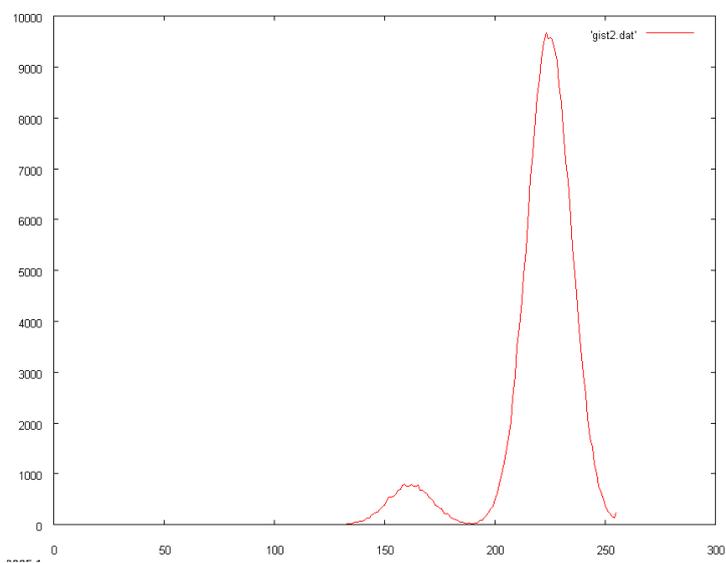


Рис. 6: Гистограмма тестового кадра с шумом (нормальное распределение,  $МОЖ=30$ ,  $Сигма=10$ ):  $PSNR=28,14$  ДБ

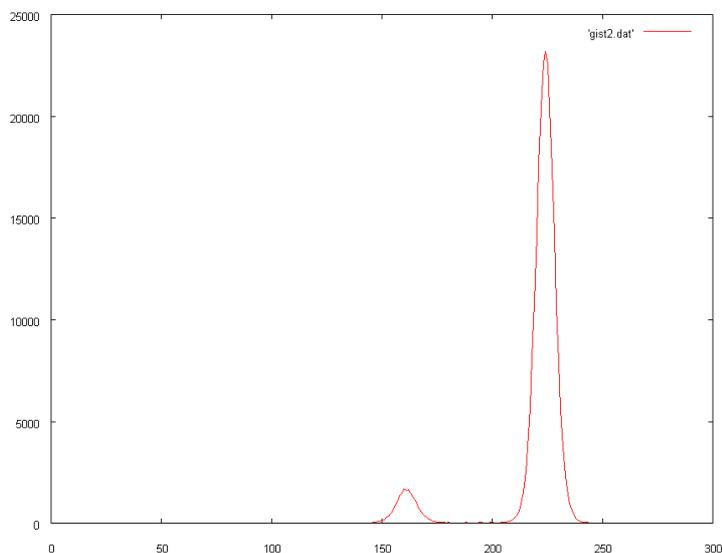


Рис. 7: Гистограмма суммированного кадра (при обработке 4-ех кадров):  
PSNR=34,56 ДБ

№ последовательности	Закон распределения шума	Параметр №1*	Параметр №2*	Оценка PSNR(дБ)
1	нормальный	30	10	28,14
2	нормальный	60	20	22,12
3	нормальный	90	30	18,60
4	равномерный	0	60	23,35
5	равномерный	0	120	17,33
6	равномерный	0	180	13,82

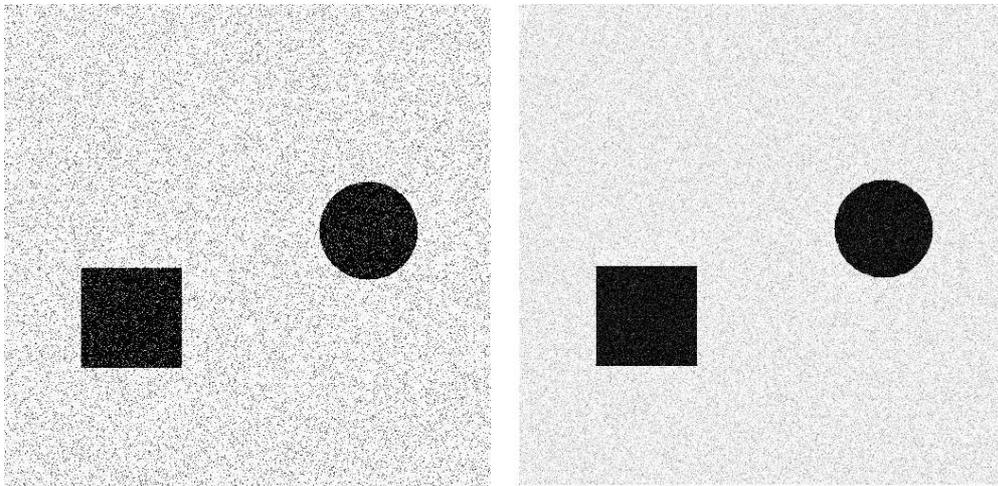
Таблица 1: Характеристики наборов тестовых данных, использованных при вычислительном эксперименте: \* для нормального закона распределения параметр №1 - МОЖ, №2 - сигма, \*\* для равномерного закона распределения параметр №1 - a, №2 - b.

№ теста	Число кадров	Тип вейвлета	Уровень ВП	Порог	Оценка PSNR(дБ)	Разница оценок (дБ)
1	2	нет	нет	нет	30,99	2,85
2	4	нет	нет	нет	33,79	5,65
3	8	нет	нет	нет	36,35	8,21
4	2	Хаара	1	10	32,91	4,77
5	2	Хаара	1	20	33,89	5,75
6	2	Хаара	2	10	33,55	5,41
7	2	Хаара	2	20	34,98	6,64
8	4	Хаара	1	10	36,33	8,19
9	4	Хаара	1	20	36,31	8,17
10	4	Хаара	2	10	37,24	9,10
11	4	Хаара	2	20	37,22	9,08
12	8	Хаара	1	10	37,93	9,79
13	8	Хаара	1	20	37,97	9,83
14	8	Хаара	2	10	38,40	10,26
15	8	Хаара	2	20	38,34	10,20
16	2	В-сплайн 2-2	1	10	32,68	4,54
17	2	В-сплайн 2-2	1	20	33,65	5,51
18	2	В-сплайн 2-2	2	10	33,27	5,13
19	2	В-сплайн 2-2	2	20	34,44	6,30
20	4	В-сплайн 2-2	1	10	36,02	7,88
21	4	В-сплайн 2-2	1	20	35,86	7,72
22	4	В-сплайн 2-2	2	10	36,76	8,62
23	4	В-сплайн 2-2	2	20	36,29	8,15
24	8	В-сплайн 2-2	1	10	37,38	9,24
25	8	В-сплайн 2-2	1	20	37,05	8,91
26	8	В-сплайн 2-2	2	10	37,86	9,27
27	8	В-сплайн 2-2	2	20	37,01	8,87

Таблица 2: Результаты вычислительных экспериментов (тестовая последовательность №1 и различные параметры супериерархической компенсации)

№ теста	№ тестовой последов.	Число кадров	Оценка PSNR (дБ)	Разница оценок (дБ)
1	1	2	32,68	4,54
2	1	4	36,02	7,88
3	2	2	25,42	3,30
4	2	4	29,06	6,94
5	3	2	21,68	3,08
6	3	4	24,88	6,80
7	4	2	26,86	3,51
8	4	4	30,80	7,45
9	5	2	20,39	3,06
10	5	4	23,54	6,21
11	6	2	16,82	3,00
12	6	4	19,84	6,02

Таблица 3: Результаты вычислительных экспериментов над различными тестовыми последовательностями с одинаковыми параметрами супериеархической компенсации



*Рис. 8: Пример входного тестового кадра 13.95 дБ (слева) и суммированного 18.4 дБ (справа) при подавлении шума в видеоряде*

**Список литературы**

- [1] Андреев В.П., Белов Д.А., Вайнштейн Г.Г., Москвина Е.А. Эксперименты с машинным зрением. М.: Наука, 1987 г.
- [2] Батлук А.В., Чобану М.К. Исследование банков фильтров и применение лифтинг-схемы для декомпозиции изображений. Цифровая обработка сигналов. 2005 г. №2.
- [3] Гришин С.В., Ватолин Д.С., Стрельников К.Н. и др. Обзор блочных методов оценки движения в цифровых видеосигналах Программные системы и инструменты. Тематический сборник. М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2008 г.
- [4] Зубарев Ю.Б., Дворкович В.П., Нечепанов В.В., Соколов А.Ю. Методы анализа и компенсации движения в динамических изображениях. Электросвязь. 1998 г. №11.
- [5] Мала С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005 г.
- [6] Прокофьев А.В., Василенко С.И. Применение пакетного вейвлет-преобразования при анализе изображений. Труды 15-ой Всероссийской научно-технической конференции «Современное телевидение». М.: ФГУП МКБ Электрон. 2007 г.
- [7] Умняшкин С.В., Стрелков Ф.В., Жуков В.Г. Трехшаговые алгоритмы поиска перемещенных блоков изображений. Информационные технологии и системы управления. Сб. научн. тр. под ред. В.А.Бархоткина. М: МИЭТ, 2000.