УДК 621. 397

СОГЛАСОВАННЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРЫ

Приоров А.Л.

Введение

вейвлет-теории Использование прочно вошло в основные направления обработки сигналов: удаление шума, сокращение избыточности представления сигналов и изображений (сжатие) [1,2]. Одной из актуальных задач цифровой обработки является сжатие видеопотоков. Эволюция развития методов сжатия видеопотоков проходит путь от методов покадровой обработки (использующих кадров ПО времени, прореживание кодированние опорных кадров

Работа посвящена изучению согласованных трехмерных цифровых вейвлет-фильтров. Рассматриваются фильтры для работы с трехмерными объектами двух классов. Первый класс — видеопоследовательности при наличии движения, второй — тела, синтезируемые искусственно с использованием стандартных средств визуализации. Получено математическое выражение для расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) согласованных 3D вейвлет-фильтров произвольной кратности. Анализ свойств данной АЧХ показал возможность применения согласованных 3D вейвлет-фильтров в различных практических задачах, одна из которых — оценка параметров движения в видеопоследовательности, вторая — классификация тел, что может быть полезно в задаче распознавания как объемных тел, так и их проекций.

вычисление векторов движения с целью предсказания прореженных кадров) до методов кодирования целостных видеофрагментов в трехмерном (3D) пространстве, где используются две пространственные координаты, а третья координата - временная [3]. Последние методы обладают лучшими возможностями для кодирования видеопотоков с высокими коэффиицентами сжатия при минимальных потерях. Один из вариантов добиться этого кодирование движения во фрагменте в глобальном смысле (т.е. не на уровне оценки смещения блока пикселей, а на уровне описания движения произвольных однородно движущихся областей фрагмента). Решение этой задачи в общем случае требует значительных вычислительных затрат. Одним из способов приблизиться к ее решению является разложение фрагмента по системе ортогональных функций (например 3D вейвлет-функций). В этом случае каждый трехмерный блок коэффициентов дерева разложения нужно оценивать, учитывая параметры движения (вектор скорости и т.п.). Это позволяет несколько уменьшить эффект блочности восстановленного фрагмента по сравнению со стандартными методами сжатия (например, JPEG2000) [3]. Согласованные 3Dвейвлет-фильтры позволяют подойти к решению этой задачи с другой стороны, а именно, на первой стадии обработки оценить характер движения и в последующем заложить характер движения фрагмента в структуру используемого вейвлет-фильтра.

Другое направление многомерной цифровой обработки сигналов связано с обработкой 3D объектов (распознавание, классификация). Это обусловлено значительным развитием средств трехмерной визуализации. Разработаны многочисленные критерии оценки 3D объектов: в пространственной области (по форме поверхности тела, по осям симметрии и т.д.), в области трансформант (например, 3D Фурье-разложение, разложения по сферическим функциям [4] и т.д.), комбинированные методы, использующие вычисление 3D моментов во

временной области и в области трансформант [5]. Рассматриваемые в работе трехмерные согласованные вейвлет-фильтры предлагается использовать как альтернативный инструмент оценки и дальнейшей классификации объемных тел. По способу работы предлагаемый метод относится к классу методов, работающих в области трансформант. Он направлен на выявление линейных областей (плоскостей) рассматриваемого тела и его дальнейшего описания посредством задания положения образующих плоскостей.

Согласованные 2D вейвлет-фильтры

Понятие "согласованного двумерного вейвлет-фильтра" введено и рассмотрено в работах [6-9] применительно к задаче сжатия изображений с минимальными потерями. В основе расчета такого фильтра лежит следующая задача: рассчитать такой двумерный вейвлет-фильтр, чтобы при многополосном вейвлет-разложении осуществить восстановление первоначального изображения, используя только отсчеты импульсной характеристики вейвлет-фильтра и отсчеты одной из полученных полос разложения (например, из низкочастотной области). Одним из результатов проведенных исследований стало получение алгоритма, позволяющего для заданного количества полос разложения получить соответствующий вейвлет-фильтр. Для обозначения такого фильтра и был предложен термин "согласованный двумерный вейвлет-фильтр". Свойство "согласованности" такого фильтра обусловлено тем, что его импульсная характеристика согласована с отсчетами обрабатываемого изображения, а амплитудно-частотная характеристика получена из отношения амплитудных спектров исходного и искаженного сжатием изображений.

Структура многополосного двумерного вейвлетразложения показана на рис. 1. Параметр D — есть кратность вейвлет-разложения, например, при параметре D=2 реализуется вейвлет-разложение на 4 частотные полосы

(одна низкочастотная, три — высокочастотные). Это стандартная кратность разложения, принятая во многих кодеках. При значениях $D=4,8,16\,$ реализуются разложения соответственно на 16, 64, 256 частотных плоскостей.

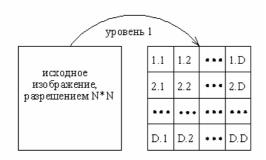


Рис. 1. Схема двумерного многополосного вейвлетразложения кратности D

Опуская сопутствующие математические расчеты, рассмотрим выражение для расчета согласованного вейвлетфильтра для кратности многополосного разложения, равной D. Пусть $f(n_1,n_2)$ – исходное изображение, $F^2(\omega_1,\omega_2)$ – квадрат модуля его Фурье-спектра, $H^2(\omega_1,\omega_2)$ – квадрат АЧХ низкочастотного согласованного вейвлет-фильтра, который вычисляется в соответствии с выражением:

$$H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2}) = \frac{F^{2}(\omega_{1}, \omega_{2})}{\sum_{k=0}^{D-1} \sum_{n=0}^{D-1} F^{2}(\omega_{1} + \frac{2k\pi}{D}, \omega_{2} + \frac{2n\pi}{D})}.$$
 (1)

Поиск соответствующей импульсной характеристики осуществляется путем решения классической фазовой задачи, более детально описанной в работе [10].

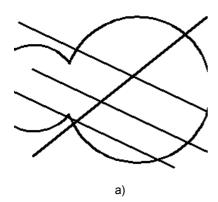
Далее в работе для краткости термин "квадрат АЧХ согласованного вейвлет-фильтра, соответствующего некоторому тестовому изображению" заменен на термин "Н-образ тестового изображения".

О принадлежности полученного фильтра к классу вейвлет-фильтров говорит, прежде всего, ортогональность его импульсной характеристики $h_{n,m}$ к ее целочисленным сдвигам [1, 2]:

$$\sum_{n} \sum_{m} h_{n,m} h_{n+2k,m+2p} = \delta_{k,p} .$$

В частотной области это свойство соответствует свойству квадратурно-зеркальности квадрата АЧХ соответствующего вейвлет-фильтра

$$H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2}) + H^{2}(\omega_{1} + \pi, \omega_{2}) + H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2} + \pi) + H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2} + \pi) + H^{2}(\omega_{1} + \pi, \omega_{2} + \pi) = 1$$



В случае многополосного разложения произвольной кратности это свойство запишем в обобщенном виде:

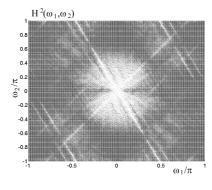
$$\sum_{k=0}^{D-1} \sum_{n=0}^{D-1} H^2 \left(\omega_1 + \frac{2k\pi}{D}, \omega_2 + \frac{2n\pi}{D} \right) = 1$$
 (2)

Отметим, что функция $H^2(\omega_1,\omega_2)$, заданная выражением (1), удовлетворяет равенству (2).

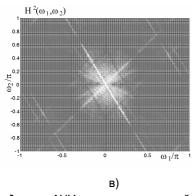
Несмотря на то, что выражение (1) было получено при решении задачи синтеза как согласованных вейвлетфильтров, так и близких к ним фильтров (обозначенных в [6, 7] как "оптимизированные вейвлет-фильтры") с целью минимизации ошибки восстановленного изображения, дальнейший анализ полученной двумерной функции (1) показал, что это выражение может быть использовано и для оценки свойств анизотропности обрабатываемых изображений, и для распознавания на изображении различных прямых. Под анизотропностью изображения понимается наличие в текстуре изображения одного или нескольких преобладающих направлений. Например, для тестового изображения "Барбара" преобладающее направление задают полоски на одежде, для изображения "Фотограф" преобладающее направление определяет тренога фотоаппарата, а на изображении "Корабли" - мачты кораблей.

Свойства двумерных согласованных вейвлет-фильтров изучены в работе [6], где приведен их обзор. Основным свойством АЧХ согласованного вейвлет-фильтра является хорошая чувствительность к линейным объектам различной природы. Это явно выраженные линии, полученные при оцифровке чертежа, и линии, образованные путем пересечения плоскостей (например, ребра куба, показанного в изометрической проекции, линия горизонта и т.п.), а также линейные объекты с плавным перепадом яркости. Главной особенностью согласованных 2D вейвлет-фильтров применительно к линейным объектам является то, что Н-образом линейных объектов является набор прямых линий, приведенных к началу координат с точным сохранением угла наклона, причем их длина и интенсивность отображения пропорциональна совокупной длине линий заданного угла наклона на первоначальном изображении.

Второй особенностью согласованных 2D вейвлетфильтров является то, что при увеличении кратности вейвлет-фильтра (т.е. параметра D в выражении (1)) уменьшается чувствительность к линейным объектам малой протяженности. Это позволяет выделять линейные объекты на общем фоне изображения (рис. 2), в том числе и при его высокой зашумленности. Видно, что при увеличении значения параметра D H-образ, соответствующий криволинейным объектам, вырождается.



б)



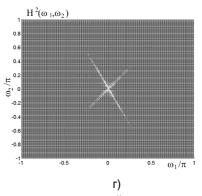


Рис. 2. Квадраты АЧХ согласованных вейвлет-фильтров для различных кратностей разложения: а) тестовое изображение; б) H-образ при кратности D=2; в) H-образ при кратности D=4; е) H-образ при кратности D=8

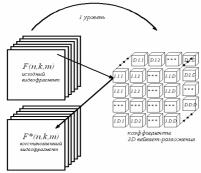
Следует отметить, что хорошей чувствительностью к выделению линейных объектов обладают все методы, основанные на спектральном анализе изображения (это преобразование Радона, методы риджлет- и курвлет-анализа изображений, и др.). Несмотря на это, метод, основанный на использовании согласованных вейвлет-фильтров, имеет некоторые преимущества:

- для выявления линейных объектов синтезируется фильтр, который уже на этапе формирования относится к классу ортогональных вейвлет-фильтров, что позволяет выполнять дальнейшую обработку изображения с использованием классической теории вейвлет-анализа;
- обеспечивается различная чувствительность к линиям разной длины, что достигается путем изменения кратности разложения.

По этой причине и проводится работа по исследованию трехмерных согласованных вейвлет-фильтров. Основная цель проводимой работы — разработка нового инструмента для оценки параметров движения в видеопоследовательности и для классификации объемных тел. Предполагается, что с использованием согласованных трехмерных вейвлет-фильтров удастся приблизиться к решению задачи оптимального распознавания трехмерных объектом по их проекциям.

Согласованные 3D вейвлет-фильтры

В основе расчета такого фильтра лежит задача, аналогичная двумерному разложению: рассчитать такой трехмерный вейвлет-фильтр, чтобы при многополосном вейвлетразложении осуществить восстановление первоначального объема, используя только отсчеты импульсной характеристики вейвлет-фильтра и отсчеты одной из полученных областей разложения (например, из низкочастотной области). На рис. З показана структура многополосного трехмерного разложения кратности D.



Puc. 3. Схема трехмерного многополосного прямого и обратного вейвлет-разложения кратности D

Аналитически выполнить расчет выражения для квадрата АЧХ согласованного трехмерного вейвлет-фильтра оказалось достаточно трудно. Поэтому соответствующее выражение получено путем обобщения одномерного и двумерного случая на трехмерную область (3а, 3б, 3в):

$$H^{2}(\omega) = \frac{F^{2}(\omega)}{\sum_{k=0}^{D-1} F^{2}\left(\omega + \frac{2k\pi}{D}\right)},$$
(3a)

$$H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2}) = \frac{F^{2}(\omega_{1}, \omega_{2})}{\sum_{k=0}^{D-1} \sum_{n=0}^{D-1} F^{2}(\omega_{1} + \frac{2k\pi}{D}, \omega_{2} + \frac{2n\pi}{D})},$$
(36)

$$H^{2}(\omega_{1}, \omega_{2}, \omega_{3}) = \frac{F^{2}(\omega_{1}, \omega_{2}, \omega_{3})}{\sum_{k=0}^{D-1} \sum_{n=0}^{D-1} \sum_{m=0}^{D-1} F^{2}\left(\omega_{1} + \frac{2k\pi}{D}, \omega_{2} + \frac{2n\pi}{D}, \omega_{3} + \frac{2nn\pi}{D}\right)}. (3B)$$

Конечно, для того чтобы практически с нулевой ошибкой выполнить сжатие видеопоследовательности в самом общем случае (с высоким уровнем детализации и с большим числом движущихся объектов) в 8 раз, порядок такого вейвлет-фильтра $N{ imes}M{ imes}K$ должен быть сопоставимым с порядком видеопоследовательности. Однако выражение (Зв) может быть использовано для расчета оптимизированных трехмерных вейвлет-фильтров, и в перспективе оно может использоваться для оценки движения в глобальном смысле, т.е. в рамках всей сцены наблюдения. Под оптимизированным трехмерным вейвлет-фильтром понимается фильтр $H_{ont}(j\omega_1,j\omega_2,j\omega_3)$ относительно небольшого размера $n \times m \times k$ (например, $20 \times 20 \times 20$), структура которого приближенно описывает структуру соответствующего согласованного $H(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)$:

$$\lim_{\text{(not nock)} \to (\text{NNMNK)}} \iiint \left(H_{\text{opt}}^{-2} \left(\omega_{1}, \omega_{2}, \omega_{3} \right) - H^{2} \left(\omega_{1}, \omega_{2}, \omega_{3} \right) \right) d\omega_{1} d\omega_{2} d\omega_{3} \to 0 \cdot$$

Аналогично двумерному случаю, вводится понятие "квадрат АЧХ согласованного 3D вейвлет-фильтра, соответствующего некоему объему", которое предлагается обозначить как H-образ этого объема.

В ходе исследования трехмерных согласованных вейвлет-фильтров установлено их основное свойство: *Н*образом плоскости является плоскость, отнесенная к началу координат при сохранении ориентации в пространстве. Н-образом исследуемого объема из нескольких

плоскостей с одинаковой ориентацией является плоскость с интенсивностью, пропорциональной удельному весу совокупности этих плоскостей относительно прочих элементов объема. И по аналогии с двумерным случаем, при увеличении кратности вейвлет-фильтра (параметр D (3)) уменьшается чувствительность к небольшим криволинейным объектам. На основании этого свойства формируются частные выводы, в том числе по оценке параметров движения, что будет рассмотрено ниже. На рис. 4а показан пример согласованного 3D вейвлет-фильтра кратности D=4, полученного для тетраэдра (в объеме размером $128{\times}128{\times}128$ пикселей).

Из-за сложности представления 3D объема H-образа на плоскости листа, на рис. 4б, 4в показано только по одной проекции H-образа $H^2(\omega_1,\omega_2,\omega_3)$. На рис. 4г представлена объемная интерпретация полученного H-образа, построенная средствами так называемой воксельной графики ("voxel" — элемент объемного изображения). Для уменьшения вычислительной сложности при отображении H-образа соответствующий объем переведен в бинарный формат:

$$\begin{cases} ecлu H^2(\omega_1, \omega_2, \omega_3) > T, mo H^2(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = 1 \\ uначе H^2(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = 0 \end{cases}$$

где порог T выбирается из условия $T=0.25\cdot \max \left(H^2(\omega_1,\omega_2,\omega_3)\right)$.

Установлено, что H-образом тетраэдра является пересечение шести плоскостей, что соответствует теории о привидении каждой плоскости к началу координат (рис. 4).

С целью получения численной характеристики полученного квадрата AЧX согласованного 3D вейвлетфильтра, по аналогии с двумерным случаем, в работе используется функция углового распределения интенсивностей $\Theta(\alpha,\beta)$ значений квадрата AЧX, полученная путем перевода в полярную систему координат и интегрированием по переменной ρ :

$$H^2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \rightarrow H^2(\alpha, \beta, \rho), \qquad \Theta(\alpha, \beta) = \int H(\alpha, \beta, \rho) d\rho,$$
 где $\omega_1 = \rho \cos(\alpha) \sin(\beta), \quad \omega_2 = \rho \sin(\alpha) \sin(\beta), \quad \omega_3 = \rho \cos(\beta).$

Функция углового распределения для объекта на рис. 4 показана на рис. 5. На рис. 5б максимумы функции распределения специально выделены.

Для подтверждения полученного вывода на рис. 6а рассмотрена объемная фигура, состоящая из девяти граней (верхняя, нижняя и семь боковых). Н-образом этой фигуры является набор пересекающихся плоскостей. Это хорошо видно на рис. 6в.

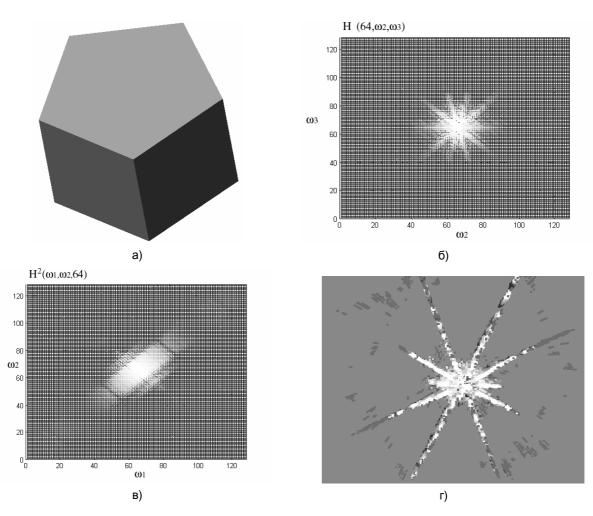


Рис. 4. Пример расчета согласованного 3D вейвлет-фильтра для объемного тела: а) тетраэдр; б), в) проекции квадрата AЧX согласованного 3D вейвлет-фильтра; г) визуализация квадрата AЧX согласованного вейвлет-фильтра (бинаризованный H-образ кратности D=4)

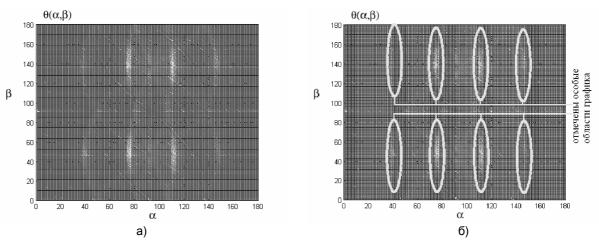


Рис. 5. Угловое распределение квадрата AЧX согласованного 3D вейвлет-фильтра

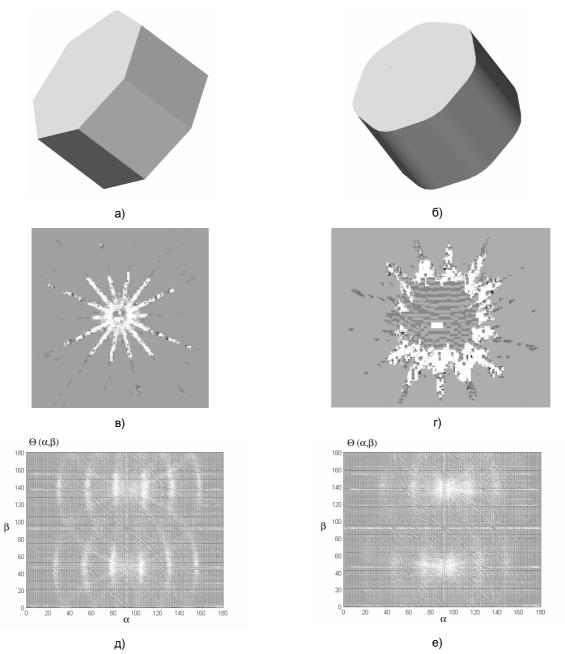


Рис. 6. Примеры расчета согласованных вейвлет-фильтров: а), б) примеры тестовых объемных тел; в), г) бинаризованные H-образы (кратность D=4); д), е) функции углового распределения

Отметим, что основное свойство согласованных 3D вейвлет-фильтров состоит в том, что H-образом произвольной плоскости объемного тела является плоскость. Это распространяется и на объемные тела сложной формы со сглаженными участками поверхности. В этом случае любая поверхность может быть рассмотрена как совокупность плоскостей меньшей площади. Соответствующий пример приведен на рис. 66. Здесь рассматривается объемное тело, аналогичное телу, представленному на рис. 6a, но со скругленными гранями. Видно, что общая площадь поверхности тела практически не изменилась, однако удельный вес отдельных плоскостей уменьшился, и, как следствие, уменьшается возможность выделения этих плоскостей с использованием H-образа.

Один из вариантов применения предлагаемого инструмента анализа — использование Н-образов для классификации объемных тел путем выделения различных плоскостей поверхности тела и комплексной оценки их взаимной ориентации, что предлагается выполнять на базе вычисления 3D моментов полученных Н-образов [5].

Как уже отмечалось, другой вариант использования инструмента H-образов — выявление движения в видеопоследовательности и оценка его параметров.

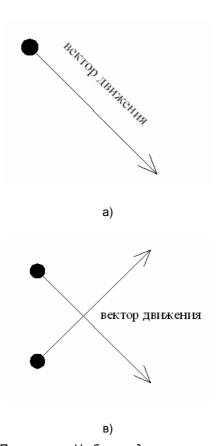
На рис. 7 показан пример функции $H^2(\omega_1,\omega_2,\omega_3)$ для простого движения точки в плоскости листа. Видно, что прямолинейному движению соответствует на H-образе некоторая плоскость, которая в проекции на рис. 7б вырождается в прямую линию с углом наклона, соответствующим вектору движения объекта. Соответственно, при прямолинейном движении нескольких объектов с различными направлениями движения H-образом будет являться пересечение нескольких

плоскостей, что в проекции вырождается в пересечение прямых линий. Отметим, что криволинейному движению соответствует конус с вершиной в точке начала координат.

Сформулируем некоторые частные свойства согласованных трехмерных фильтров, касающиеся анализа движения в видеопоследовательности:

- 1. Прямолинейному движению объекта произвольной формы соответствует Н-образ, представляющий собой плоскость с углами наклона, однозначно определяющими направление и скорость движения.
- 2. Движению нескольких объектов с различными векторами движения соответствует H-образ, представляющий несколько наклонных плоскостей.
- 3. Движению нескольких объектов с одинаковыми векторами движения соответствует H-образ, представляющий собой одну наклонную плоскость.
- 4. Криволинейному движению соответствует конус с вершиной в точке (0,0,0).
 - 5. Н-образ неподвижных объектов тождественно равен нулю.
- 6. При увеличении кратности разложения (параметр D в разложении (3)) уменьшается чувствительность H-образа к небольшим движениям в кадре.

Приведенные свойства согласованных вейвлет-фильтров позволяют использовать их для решения задачи обнаружения однородно движущихся областей в видеофрагменте. Рассмотрим небольшой пример, показывающий перспективы использования согласованных 3D вейвлет-фильтров. Съемка осуществляется камерой, почти равномерно двигающейся вдоль наблюдаемой сцены (например, скоростная купольная видеокамера работает в режиме автопанарамирования).



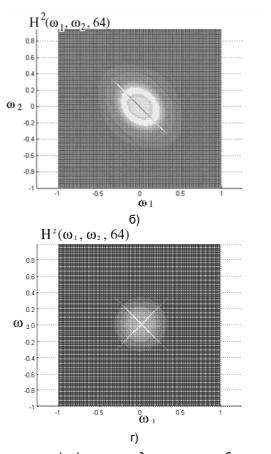


Рис. 7. Применение H-образов для оценки параметров движения: а), в) примеры движущегося объекта (разрешение кадра 128*128 пикселей, количество кадров — 128); б), г) проекции трехмерного H-образа

Полученный видеофрагмент будет содержать движения двух типов: равномерное перемещение фона и произвольное движение объектов наблюдения. Использование согласованных 3D вейвлет-фильтров высокой кратности позволит в каждый момент времени выполнять оценку перемещение фона, что позволит выделить движение объектов наблюдения на общем подвижном фоне.

Заключение

Работа посвящена изучению согласованных вейвлетфильтров. В этой связи рассматриваются трехмерные объекты двух классов. Первый класс - видеопоследовательности при наличии движения. Второй класс - тела, синтезируемые искусственно с использованием стандартных средств визуализации (например, AutoCAD, 3D Studio). Получено математическое выражение для расчета амплитудно-частотной характеристики согласованных 3D вейвлетфильтров произвольной кратности. Анализ свойств данной АЧХ показал возможность применения согласованных 3Dвейвлет-фильтров в различных практических задачах. Одна из них - оценка параметров движения в видеопоследовательности (вычисление преобладающих направлений и скоростей движущихся объектов с возможностью установки порога отсеивания незначительных движений кадра). Вторая задача – классификация тел, что может быть полезно в задаче распознавания как объемных тел, так и их проекций.

Литература

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. – 464 с.

- 2. Воробьёв В.П., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлетпреобразования. – СПб.: Военный университет связи, 1999. – 204 с.
- 3. Gonzalez J., Bernabe G., Garcia J.M. Reducing 3D fast wavelet transform execution time using blocking and streaming SIMD extensions // Journal of VLSI Signal Processing. 2005. № 41. P. 209-223.
- Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors // Proc. of symposium on geometry processing. Aachen, Germany. 2003. P. 156-164.
- Li Cui, Ying Li, Don Xu, Hua Li. Fractal scale descriptors base on wavelet moments for 3D objects // Proc. of 2007 int. conf. on wavelet analysis and pattern recognition. 2007. P. 1197-1202.
- 6. Кобелев В.Ю., Приоров А.Л. Анализ изображений при помощи согласованных двумерных вейвлет-фильтров // Радиотехника. 2008. № 1. С. 12-19.
- 7. Кобелев В.Ю., Приоров А.Л. Применение неразделимых вейвлет-фильтров в задачах сжатия изображений // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 21-26.
- 8. Кобелев В.Ю., Приоров А.Л. Синтез оптимизированных двумерных неразделимых вейвлет-фильтров для сжатия изображений // Телекоммуникации. 2006. № 9. С. 7-12.
- Кобелев В.Ю., Моисеев А.А., Волохов В.А., Смоляков А.В. Синтез двумерных неразделимых вейвлет-фильтров с перестраиваемыми коэффициентами // Докл. 8-ой межд. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA'06). Москва. 2006. Т. 2, С. 389-392.
- 10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 1, 312 с.

Уважаемые авторы!

Редакция научно-технического журнала "Цифровая обработка сигналов" просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

- 1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:
- Текст текстовый редактор Microsoft Word.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается:
 - краткой аннотацией на русском и английском языках;
 - номером УДК;
 - сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, телефоны, электронная почта).
- 2) Требования к иллюстрациям:
- Векторные (схемы, графики) желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.