

УДК 658.5.011.56:004.932.001.57

С.Г. Антощук, О.В. Бабилунга, А.А. Николенко, Е.В. Ткаченко

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина
milit@milit.tm.odessa.ua

Иерархический подход при контурном анализе изображений

Предложен ряд моделей представления визуальной информации на базе иерархического подхода, на основании которых сконструирован базис гиперболического вейвлет-преобразования (ГВП), разработан ряд методов выделения контуров с регулируемой детальностью в пространстве ГВП, а также иерархический метод идентификации.

Во многих автоматизированных системах обработки изображений выполняется распознавание отдельных объектов (или их фрагментов) по заданным оптико-геометрическим параметрам и выделение их на фоне совокупности других объектов. Наиболее информационно значимой частью изображений объектов являются их контуры. При этом распознаваемый объект обычно является составной частью достаточно сложной сцены и наблюдается в совокупности с множеством других, не интересующих наблюдателя. В то же время в рамках своего внешнего контура объект может включать множество мелких деталей, затрудняющих восприятие исходного объекта в целостном виде. В некоторых практических приложениях приходится определять мелкие детали для конкретного объекта, выделяемые из множества его окружающих [1]. Для решения таких задач распознаваемый объект представляется иерархической пирамидальной моделью данных: «объект – подобъект – ... – элементарный подобъект». Процесс распознавания целесообразно проводить на разных уровнях детализации объекта в зависимости от поставленной задачи. Такое решение возможно на базе иерархического подхода, основанного на модели представления объектов распознавания в виде набора (пирамиды) контурных препаратов, полученных с использованием вейвлет-преобразования (ВП).

В общем случае изображение объекта с иерархической структурой $I_j(x, y)$ есть совокупность изображений отдельных подобъектов и фона:

$$I_j(x, y) = I_{j1}(x, y) + I_{j2}(x, y) + \dots + I_{jk}(x, y) + I_{j\phi}(x, y), \quad (1)$$

где k – число объектов (подобъектов) на изображении; $I_{ji}(x, y)$ – изображение i -го объекта или его видимой части ($i = 1, \dots, k$) на j -уровне иерархии; $I_{j\phi}(x, y)$ – изображение фона на j -уровне иерархии.

При этом

$$\left. \begin{aligned} I_{ji}(x, y) &= 0 && \text{при } (x, y) \notin D_{ji} \\ I_{j\phi}(x, y) &= 0 && \text{при } (x, y) \notin D_{j\phi} \end{aligned} \right\}$$

где $D_{ji} \subset D$ – область i -объекта на j -уровне иерархии, входящая в дискретное поле зрения D ; $D_{j\phi} \subset D$ – область фона на j -уровне иерархии; $D_{j1} \cup D_{j2} \cup \dots \cup D_{jn} \cup D_{j\phi} = D_j$, $D_{jl} \cap D_{jm} = 0$ при $l \neq m$, $D_j \cap D_g \neq 0$.

Предлагается получать иерархическое представление на этапе контурного анализа. Для чего производится выделение наиболее информационно значимой части изображений объектов – контуров. Для контурного описания объекта с иерархической структурой предложена модель пирамидального представления, в соответствии с которой изображение подвергается ВП с разными масштабами; на выбранных уровнях производится выделение контуров объектов; на выходе модели формируется пирамидальное представление контурных препаратов:

$$KP(x, y) = KP^{(1)}(x, y) + KP^{(2)}(x, y) + \dots + KP^{(k)}(x, y), \quad (2)$$

где $KP(x, y)$ – пирамидальное представление контурных препаратов; $KP_j(x, y)$ – контурный препарат на j уровне иерархии; k – количество уровней иерархии [2].

Для реализации модели (2) разработан базис вейвлет-преобразования, названного гиперболическим (ГВП) [2]:

$$W(s, x_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-x_0}{s}\right) dx,$$

где $f(x)$ – преобразуемая (анализируемая) функция; x_0 – координата (определяет положение вейвлета на оси x); s – масштабный коэффициент (множитель $\frac{1}{\sqrt{s}}$ вводится для нормировки); $\psi(x) = \frac{1}{\pi x} G(x)$ – базисная функция преобразования ($G(-x) = G(x)$, $G(x) = 1(x-\varepsilon) - 1(x-\gamma)$; $1(t)$ – единичная функция Хевисаида).

Материнский вейвлет ГВП $\psi(x)$ удовлетворяет ряду условий, предъявляемых к классу базисных функций:

- условию локализации: функция $\psi_0(x)$ локализована при $\forall x \in [-\gamma; -\varepsilon] \cup [\varepsilon; \gamma]$;
- условию допустимости: Фурье образ материнского вейвлета

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\widehat{\psi}_0(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty;$$

- условию осцилляций (знакопеременности)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0(x) dx = 0.$$

Это условие обеспечено нечетностью $\psi_0(x)$ и является необходимым условием для построения безусловного устойчивого базиса;

- условию ограниченности: норма базисной функции

$$\|\psi_0(x)\| = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_0(x)|^2 dx} = \frac{1}{\alpha\pi} \sqrt{2 \int_{\varepsilon}^{\gamma} \frac{dx}{x^2}} = \frac{\sqrt{2}}{\alpha\pi} \sqrt{\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\gamma}} < \infty.$$

Изменяя масштабный коэффициент s и величину сдвига вейвлетной функции, можно локализовать любые особенности изображения в пространстве масштабов. Частотно-избирательные свойства разработанного преобразования, позволяющие реализовать иерархическую модель (1), исследованы путем анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ГВП (рис. 1):

$$|\hat{\psi}_0(\omega)| = \frac{2}{\alpha\pi} \left| \int_{\varepsilon}^{\gamma} \frac{\sin \omega x}{x} dx \right| = \frac{2}{\alpha\pi} \sqrt{\left(\int_{\varepsilon}^{\gamma} \frac{\sin \omega x}{x} dx \right)^2}.$$

Максимальное значение модуля АЧХ соответствует $\omega_1 = \frac{\pi}{\gamma + \varepsilon}$ и определяется как

$$|\hat{\psi}_0(\omega)|_{max} = \frac{2}{\alpha\pi} \int_{\varepsilon}^{\gamma} \frac{\sin \frac{\pi}{\varepsilon + \gamma} x}{x} dx = \frac{2}{\alpha\pi} \left[Si\left(\frac{\pi\gamma}{\varepsilon + \gamma}\right) - Si\left(\frac{\pi\varepsilon}{\varepsilon + \gamma}\right) \right].$$

На рис. 1 приведены импульсная характеристика (а) и нормированные по амплитуде Фурье-образы базисных функций (б). Положение максимума АЧХ отражает частотно-избирательные свойства ГВП, что является важным в предлагаемом иерархическом подходе к анализу изображений.

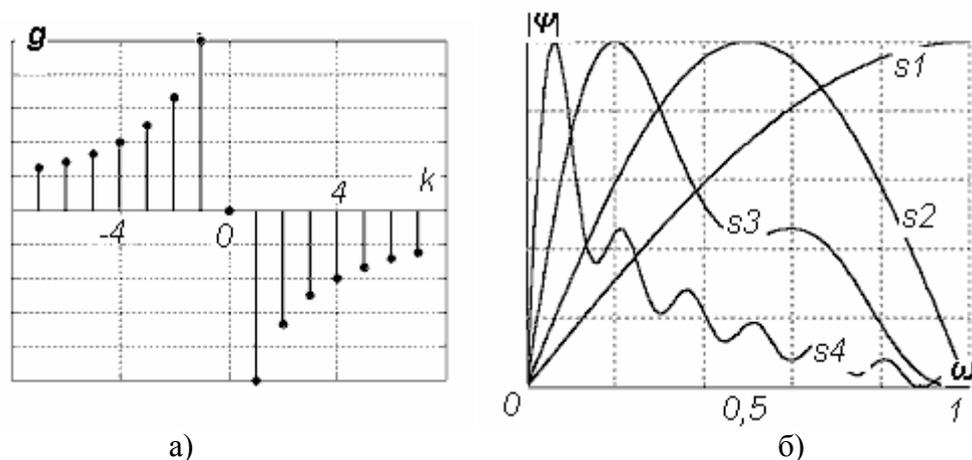


Рисунок 1 – Импульсная характеристика при масштабе $s3 = 8$ (а) и амплитудно-частотные характеристики ГВП при разных масштабах $s1 < s2 < s3 < s4$ (б)

Проведенные аналитические исследования и результаты машинных экспериментов показали (рис. 2), что ГВП обладает всем комплексом свойств, необходимым для пирамидального представления изображений: обеспечивает поиск (обнаружение, выделение) объектов на верхних уровнях пирамиды с низкой разрешающей способностью, в случае необходимости позволяет осуществить переход на более низкие уровни; обеспечивает регулируемую детализацию изображений с помощью масштабных коэффициентов; реализуется с помощью интеграла-свертки; обеспечивает высокую помехоустойчивость при подчеркивании перепадов интенсивности. При этом ГВП лишено недостатка низкочастотных пирамидальных методов представления изображений – размытия перепадов интенсивности. При представлении в пространстве ГВП наиболее информативная часть изображений – перепады интен-

сивности подчеркиваются, а не размываются. Поэтому такое представление рекомендуется для широкого круга прикладных задач, связанных с анализом и распознаванием изображений по их контурам.

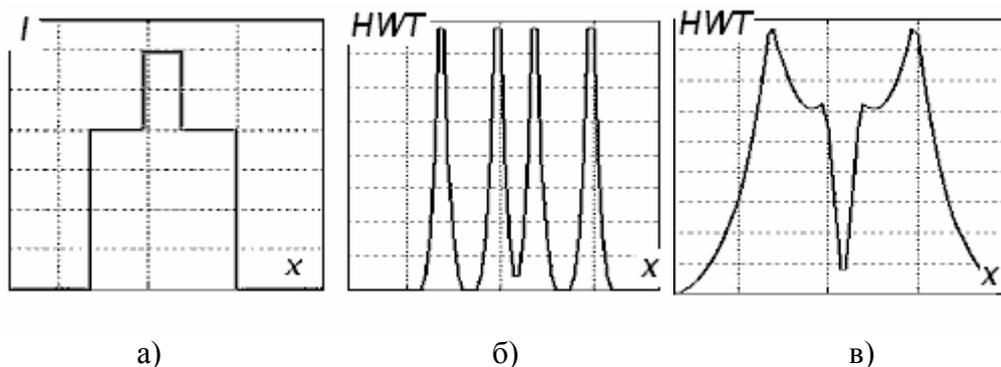


Рисунок 2 – Результаты моделирования: фрагмент строки тестового изображения в исходном пространстве (а) и после ГВП с масштабами $s1 = 2$ (б) и $s2 = 8$ (в)

Приведенные выше свойства ГВП чрезвычайно важны и создают основу для синтеза методов иерархического выделения границ на полутоновых изображениях в пространстве ГВП. Разработана методика выделения контуров с регулируемой детализацией в пространстве ГВП:

- изображение подвергается свертке с гиперболическими вейвлет-функциями разных масштабов от наибольшего к наименьшему;
- на контрастированном изображении выделяется область контура. При необходимости проводится процедура «скелетизации» (утончения) области контура;
- на изображениях наибольшего масштаба находится внешний контур объекта исследования;
- обработка следующего уровня проходит внутри контура изображения объекта.

На базе этой методики разработаны дифференциальные (пороговый и с помощью двукратного ГВП) и корреляционно-экстремальный методы выделения контуров. Последний представляет собой композицию вейвлет-анализа и теории статистических решений.

Проведены исследования качества и эффективности разработанных методов (рис. 3) по критерию Прэтта [3] в зависимости от масштаба преобразования.

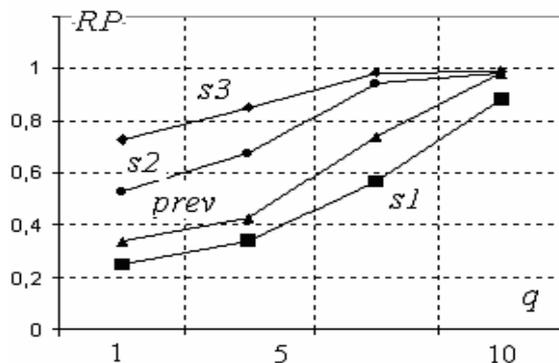


Рисунок 3 – Зависимость эффективности процедуры выделения контуров от отношения сигнал/шум при разных масштабах (*prev* – соответствует алгоритму Прэвитта)

Методы позволяют изменять уровень детализации изображений, обеспечивают высокую помехоустойчивость, разрешающую способность процедуры выделения контуров объектов при относительно высоком быстродействии и превышают известные по качеству в 1,2 – 3,2 раза (по критерию Прэтта) при отношениях сигнал/помеха 1 – 20 (по мощности). Наиболее существенный выигрыш получен в диапазоне отношений сигнал/помеха 2 – 7.

Результаты моделирования предлагаемого подхода, представленные на рис. 4, показывают возможность регулирования детализации при выделении контуров на разных масштабах преобразования.

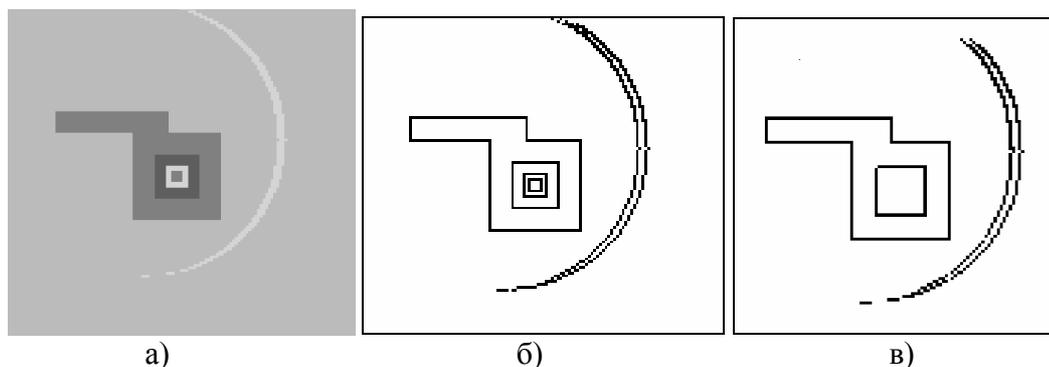


Рисунок 4 – Результат выделения контура на разных масштабах: исходное тестовое изображение (а), контурный препарат при $s = 1$ (б), контурный препарат при $s = 8$ (в)

Контурное представление объекта (или его отдельные составляющие) служит исходным для расчета геометрических идентификационных признаков. Для получения геометрических идентификационных данных и последующей классификации целесообразно представить контурные препараты в виде последовательности векторов признаков разного уровня.

Разработанный иерархический подход к распознаванию объектов изображений предусматривает выполнение таких этапов:

- 1) представление изображения в виде структуры изображений объект – подобъект (ы) – ... – подобъект (ы) в виде (1);
- 2) выделение контуров объектов, соответствующих одному уровню иерархии;
- 3) распознавание объектов и подобъектов.

Для получения геометрических идентификационных данных и последующей классификации целесообразно перейти от пирамидального представления (1) к иерархической последовательности векторов признаков.

В соответствии с предлагаемой концепцией иерархических моделей описание объекта может быть представлено совокупностью начальных векторов контурных признаков

$$K = \bigcup_{j=1}^M \bigcup_{i=1}^N K_i^{(j)}. \quad (3)$$

Здесь $K^{(j)}$ – упорядоченное множество пикселей с координатами $\{x_i, y_i\}$ контура некоторого графического объекта на плоскости, полученного с помощью сигнално-семантического преобразования масштаба j ; M – число масштабов сигнал-

но-семантического преобразования; N – количество объектов и подобъектов. На множествах K определено отношение принадлежности, при котором один или несколько подобъектов располагается внутри другого объекта или подобъекта.

Наибольшей информативностью среди точек контура обладают точки наибольшей кривизны (характерные точки (ХТ)), координаты $\{x, y\}$ которых образуют упорядоченное множество – начальный вектор признаков ХТ j -го уровня $T^{(j)}$. Справедливо

$$T = \bigcup_{j=1}^M \bigcup_{i=1}^N T_i^{(j)}. \quad (4)$$

На базе описаний (3), (4) получены топологические признаки объекта (количество и взаимное расположение объектов и подобъектов), спектральные, геометрические и другие характеристики объекта распознавания – первичный вектор контурных (характерных) признаков, полученный путем преобразования $v_r()$ или композиции преобразований $(\dots(v_2(v_1())))$ начального вектора соответствующих признаков:

$$C = v_m(\dots(v_2(v_1(K^{(j)}))) \text{ либо } C = v_m(\dots(v_2(v_1(T^{(j)}))))).$$

Выбор системы признаков, по которой осуществляется идентификация, производится на стадии предварительного анализа в соответствии с условиями конкретной прикладной задачи: уровнем помех, имеющимся вычислительным ресурсом, техническими требованиями по эффективности, уровнем иерархии. Например, на нижних уровнях иерархии определяющими могут быть площадь, периметр и другие простейшие характеристики формы объекта. На других уровнях детализации могут быть востребованы более полные характеристики формы.

Комбинирование моделей описания позволяет проводить как классификацию на основе вектора признаков, полученного в зависимости от соотношения между признаками разного уровня иерархии, так и независимую классификацию по вектору признаков на каждом уровне иерархии и принятие на ее основе окончательного решения по классификации объекта. Наиболее характерными являются следующие подходы к комбинированию моделей:

- полученная информация сопоставляется с моделями высокого уровня (начальный уровень i соответствует верхнему уровню иерархии), в случае необходимости эта информация сопоставляется с моделями более низкого уровня, т.е. распознавание проходит по схеме «объект – подобъект». Такая схема может использоваться не только при распознавании структурированных объектов, но и при распознавании сцен;
- производится одновременное описание объекта на всех уровнях иерархии, вычисление типовых (для данных моделей) признаков и принятие решений по их композиции;
- если первый подход к созданию иерархических моделей реализован по схеме «объект-подобъект» («сверху вниз» или «нисходящее» описание), то возможна и схема «снизу вверх» («восходящее» описание) – находятся сначала подобъекты (начальный уровень i соответствует нижнему уровню иерархии), их описания и топологические особенности, затем на основании этих данных переходят на следующий уровень иерархии.

Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки: первый подход представляется более гибким и адаптивным, второй – проще в описании. Использование гибких моделей предполагает описание изображений объектов на некотором абстрактном уровне, для описания объектов на разных масштабных уровнях могут использоваться различные системы признаков.

Иерархический подход к идентификации изображений объектов позволил создавать гибкие модели, избегать необходимости многократного сопоставления полученной информации с большим числом моделей в процессе идентификации объектов, получить универсальный подход для решения широкого круга прикладных задач.

Литература

1. Пуятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Antoshchuk S.G., Krylov V.N. Hyperbolic wavelet domain image processing // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії // Матеріали міжнар. конф. – Львів: Львівська політехніка. – 2004. – С. 219-220.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: В 2 т. – М.: Мир, 1982. – Т. 2. – 480 с.

С.Г. Антошук, О.В. Бабилунга, А.А. Николенко, Е.В. Ткаченко

Ієрархічний підхід при контурному аналізі зображень

Створено ряд моделей подання візуальної інформації на основі ієрархічного підходу, на підставі яких сконструйовано базис гіперболічного вейвлет-перетворення (ГВП), розроблено ряд методів виділення контурів з регульованою деталізацією у просторі ГВП, ієрархічний метод ідентифікації.

S.G. Antoschuk, O.V. Babilunga, A.A. Nikolayenko, E.V. Tkachenko

Hierarchical Approach at Countur Image Analysis

The series of models of visual representation on the base of the hierarchic approach being developed, on that base the principle of hyperbolic wavelet transform (HWT) is designed; the set of outlines selection methods with controlled detailing in HWT space is developed, as were as and the hierarchical method of identification.

Статья поступила в редакцию 11.07.2005.