

УДК 528.854

А.А. Дудкин, Д.А. Вершок, А.М. Селиханович

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск,
Беларусь, doudkin@newman.bas-net.by

Выделение контуров на полутоновых изображениях топологических слоев интегральных схем

Предлагаются алгоритмы выделения контуров на полутоновых изображениях топологических слоев интегральных схем, основанные на дискретных ортогональных преобразованиях двумерных сигналов, обеспечивающих высокое быстродействие. В качестве оператора преобразования используется двумерная функция Уолша, а аппроксимация выделенных контуров прямолинейными отрезками осуществляется на основе модифицированного преобразования Хафа.

Введение

Определение контуров занимает центральное место при обработке информации в системах технического зрения, представляя собой начальный и решающий этап в распознавании и идентификации объектов. В частности, выделение контуров применяется при решении задачи идентификации объектов по их форме, при наложении и совмещении разных слоев одного объекта, а также при сегментации изображений.

Все методы и алгоритмы нахождения контуров объектов можно разделить на две категории [1-3]:

1. Методы, основанные на выделении областей, включают такие алгоритмы, как «расширение области» за счет объединения пикселей и алгоритм «разбиения и объединения областей». Эти алгоритмы гарантируют получение замкнутых контурных линий, однако они чувствительны к шумам и контрастности изображения.
2. Методы, основанные на выделении краевых точек на изображении, включают в себя градиентные методы, операторы Собеля, Робертса, Лапласа, детектор контуров Канни, детектор разрывов Ли и др. Эти методы, как правило, не чувствительны к шумам и контрастности изображения, но требуют применения алгоритма объединения краевых точек на следующем этапе, что также не всегда гарантирует выделение замкнутых контуров.

Эффективность методов трудно оценить из-за сложности определения наилучших параметров каждого из них и отсутствия универсального критерия эффективности [1], [4]. Выбор того или иного метода сегментации зависит от конечной цели всего процесса обработки изображений, типа обрабатываемых изображений, имеющих вычислительных мощностей. Труднее всего выбрать алгоритм для сегментации сильнозашумленных изображений, каковыми и являются изображения топологических слоев интегральных схем, являющиеся объектом исследования настоящей работы. Поэтому разработка алгоритмов сегментации, способных функционировать с зашумленными и искаженными изображениями, является особенно актуальной и важной задачей.

В докладе предлагается алгоритм выделения контуров на основе дискретного ортогонального преобразования Уолша, а для аппроксимации границ используется преобразование Хафа (ПХ). Преобразование Уолша позволяет получить более тонкую контурную линию, что полезно для последующего этапа выделения прямых на основе ПХ. Кроме того, предложен новый алгоритм дискретного ортогонального преобразования двумерных сигналов, который имеет два основных отличия от известных алгоритмов [5-7]. Во-первых, он имеет меньшее число операций умножений и сложений. Во-вторых, коэффициенты преобразования вычисляются за один раз без вычисления одномерных преобразований.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

2D-функции A_{mn} могут быть представлены следующим образом [7]:

$$A_{mn} = A(m,n,x,y) = f(m,x) \otimes f(n,y) = f(n,y) \otimes f(m,x),$$

где $m, n = 0, \dots, N-1$, $f(m,x)$ и $f(n,y)$ – строчный и столбцовый векторы значений соответствующих функций f_m и f_n ортогонального преобразования A_N , \otimes – символ Кронекера умножения, N – размерность преобразования, m, n – номера функций.

Пусть матрица значений ДЭФ для $N=4$ имеет вид [5]:

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w_1 & w_2 & w_3 \\ 1 & w_2 & w_4 & w_6 \\ 1 & w_3 & w_6 & w_9 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \text{def}_0 \\ \text{def}_1 \\ \text{def}_2 \\ \text{def}_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} w_0 & w_0 & w_0 & w_0 \\ w_0 & w_1 & w_2 & w_3 \\ w_0 & w_2 & w_0 & w_2 \\ w_0 & w_3 & w_2 & w_1 \end{bmatrix},$$

где $w = \exp(-j2\pi/N)$. Тогда, например, имеем следующую 2D-функцию:

$$A_{20} = \text{def}(2,0, x, y) = \text{def}(0, y) \otimes \text{def}(2,x) = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_0 \\ w_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \otimes [w_0 \ w_2 \ w_0 \ w_2] = \begin{bmatrix} w_0 & w_2 & w_0 & w_2 \\ w_0 & w_2 & w_0 & w_2 \\ w_0 & w_2 & w_0 & w_2 \\ w_0 & w_2 & w_0 & w_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Аналогичным образом можно построить любую другую двумерную функцию A_{mn} .

Как следует из (1), 2D-функции $\text{def}(m,n,x,y)$ имеют как одинаковые столбцы, так и столбцы, отличающиеся на соответствующие значения w . Функции, расположенные в столбцах, имеют как одинаковые строки, так и строки, отличающиеся на соответствующие значения w . Эти свойства 2D-функций используются для организации параллельных вычислений – одинаковые компоненты можно вычислять только один раз и при необходимости использовать ранее полученные результаты.

Алгоритм преобразования в двумерном базисе

Пусть дана матрица сигналов отсчета $S_N = [s_{ij}]$, $i, j = 0, \dots, N-1$, и $(N \times N)$ – массив состоит из матриц значений 2D-функций $A_{mn} = [a_{ij}^{mn}]$, $m, n, i, j = 0, \dots, N-1$. Требуется определить все элементы f_{mn} матрицы коэффициентов F . Коэффициенты f_{mn} определяются следующим образом [1], [7]:

$$f_{mn} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} s_{ij} a_{ij}^{mn}. \quad (2)$$

Обозначим $g_n^i = \sum_{k=0}^{N-1} s_{ik} a_{ij}^{nn}$ и $h_n^j = \sum_{k=0}^{N-1} s_{kj} a_{ki}^{nn}$, $n=0, \dots, N-1$, сумму элементов i -й

строки и j -го столбца матрицы S_N соответственно. Легко увидеть, что h_n^j и g_n^i имеют одинаковые слагаемые и могут быть вычислены параллельно. Мы используем следующий алгоритм для вычисления h_n^j и g_n^i .

Начало: $j=0$; $d_0^i = 0$ для $i=0, \dots, N-1$.

1. $C_0 = 0$.

2. $U_{k-1j} = s_{k-1j} a_{k-1j}^{nn}$, $C_k = C_{k-1} + U_{k-1j}$, (3)

$$d_{j+1}^{k-1} = d_j^{k-1} + U_{k-1j} \text{ для } k=1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

$$h_n^j = C_N, \quad g_n^i = d_N^i. \quad (5)$$

3. $j=j+1$; если $j < N$, перейти к 1.

4. Конец.

Получив h_n^j и g_n^i , мы можем вычислить диагональные элементы f_{nn} матрицы F :

$$f_{nn} = \sum_{j=0}^{N-1} h_n^j \text{ или } f_{nn} = \sum_{i=0}^{N-1} g_n^i. \quad (6)$$

Заметим, что соответствующие слагаемые $h_n^j a_{m-nj}$ всех коэффициентов f_{mn} для $m > n$ получаются аналогично вычислению h_n^j следующим образом:

$$f_{mn} = \sum_{j=0}^{N-1} h_n^j a_{m-nj}, \quad (7)$$

где a_{m-nj} – элементы матрицы A_{mn} , которые составляют двумерный базис.

Вычислив h_n^j , мы можем вычислить все элементы f_{mn} матрицы F , которые расположены в строке n справа от диагонального элемента f_{nn} . Для этого мы используем (7). Аналогично, вычислив g_n^i , мы можем вычислить все коэффициенты f_{nm} для $m > n$, которые расположены в столбце n ниже f_{nn} :

$$f_{nm} = \sum_{i=0}^{N-1} g_n^i a_{m-ni}. \quad (8)$$

Если $n=0$, то коэффициенты f_{m0} и f_{0m} есть элементы соответственно 0-й строки и 0-го столбца матрицы F . Вычислив их по формулам (7) и (8), размерность задачи N уменьшается на 1. Далее, для $n=1, 2, \dots, N-1$ находятся другие элементы матрицы F . Таким образом, алгоритм вычисления коэффициентов состоит из N итераций. Следующие операции выполняются на i -й итерации, $i=0, \dots, N-1$:

1. Вычислить h_n^j и g_n^i по формулам (3) – (5).

2. Построить f_{nn} ;

если $n \neq N-1$, то построить f_{nm} и f_{nn} для всех $n < m \leq N-1$.

Следует заметить, что на каждой итерации вычисляются $2(N-n)-1$ элементов матрицы F .

Далее рассмотрим использование некоторых двумерных функций для выделения контуров на полутоновых изображениях. При этом вычисления осуществляются по приведенному выше алгоритму.

Выделение контуров в базисе Уолша

2D-функции Уолша [8] могут применяться непосредственно для выделения контуров. Значения коэффициентов C_{01} , C_{10} , C_{11} соответствуют функциям $wal(0,1, x, y)$, $wal(1,0, x, y)$, $wal(1,1, x, y)$ и вычисляются, когда выполняется прямое преобразование, а коэффициенту C_{00} присваивается нулевое значение. При выполнении обратного преобразования вычисляется только значение коэффициента C_{00} . При этом коэффициенты C_{01} , C_{10} , C_{11} могут принимать значения по модулю или их истинные значения в зависимости от распределения интенсивностей на изображении, полученном после преобразования. Если используются истинные значения, то вычисленный коэффициент C_{00} должен браться по модулю.

Для выделения контуров используются два матричных оператора размерностью 3×3 пикселя [1], [2], которые могут быть получены из 2D-функций Уолша. Для этого в двумерные дискретные функции вставляется строка и столбец с нулевыми элементами. На рис. 1 представлены полученные операторы.

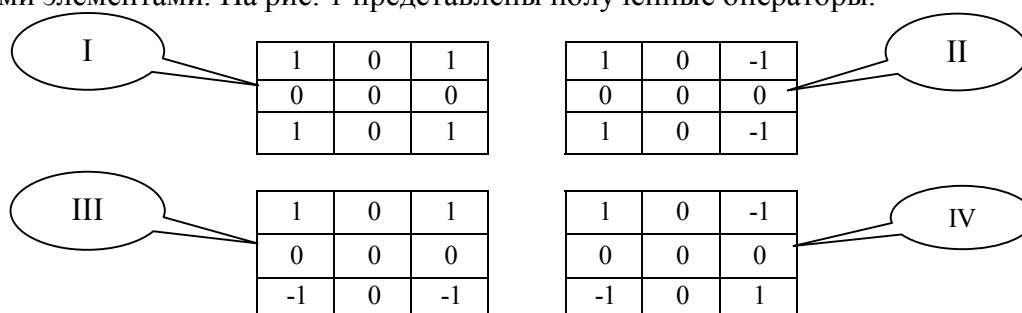


Рисунок 1 – Операторы Уолша

Контрастирование перепадов оператором $S(m, n)$ предполагает нелинейный подсчет значений пикселей в окне размером 3×3 для преобразования значения пикселя в точке (m, n) (рис. 2).

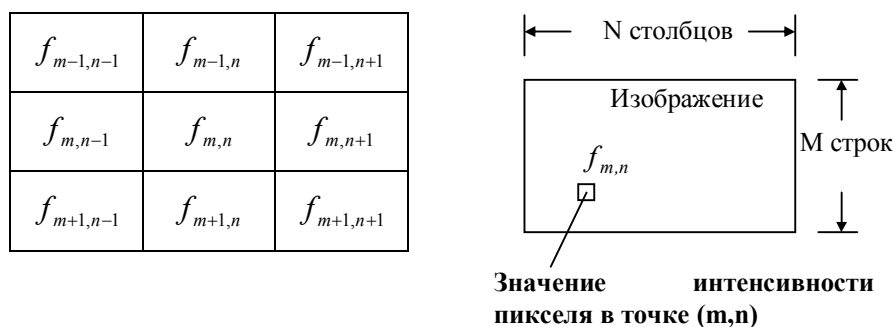


Рисунок 2 – Обозначения элементов для оператора выделения перепадов

Его значение определяется как

$$S(m, n) = \sqrt{d_{x(m,n)}^2 + d_{y(m,n)}^2} \tag{9}$$

или для снижения сложности вычислений как

$$S(m, n) = |d_{x(m,n)}| + |d_{y(m,n)}|, \tag{10}$$

где

$$d_{y(m,n)} = (f_{m+1,n-1} + 2f_{m+1,n} + f_{m+1,n+1}) - (f_{m-1,n-1} + 2f_{m-1,n} + f_{m-1,n+1}), \quad (11)$$

$$d_{x(m,n)} = (f_{m-1,n+1} + 2f_{m,n+1} + f_{m+1,n+1}) - (f_{m-1,n-1} + 2f_{m,n-1} + f_{m+1,n-1}). \quad (12)$$

Оператор перемещается по всей области изображения с шагом 1.

При выделении контуров с применением операторов Уолша возможны любые сочетания операторов, представленных на рис. 2. Наиболее эффективным оказалось применение операторов II и III. При этом значение пикселя в точке (m, n) вычисляется следующим образом:

$$S(m, n) = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (13)$$

или с целью сокращения вычислений

$$S(m, n) = |X| + |Y|, \quad (14)$$

где

$$X = (f_{m-1,n-1} + f_{m+1,n-1}) - (f_{m-1,n+1} + f_{m+1,n+1}), \quad (15)$$

$$Y = (f_{m-1,n-1} + f_{m-1,n+1}) - (f_{m+1,n+1} + f_{m+1,n-1}).$$

Для нахождения значений X и Y , соответствующих операторам II и III Уолша, можно использовать быстрый алгоритм вычислений.

При использовании этих операторов вся область изображения сканируется окном 3×3 с шагом 1. После применения оператора получается полутоновое изображение, на котором граничные точки определяются порогом, который задается значением $S(m, n)$. Выбор порога очень важен для окончательного результата [9].

Аппроксимация контуров прямыми линиями

Для решения задачи аппроксимации предлагается алгоритм, основанный на модифицированном преобразовании Хафа [5]. Суть преобразования состоит в отображении точек из исходного пространства изображения (например $X - Y$) в некоторое параметрическое пространство. Отображение осуществляется с помощью параметрического уравнения, которое является уравнением искомой аналитической поверхности. При выделении с помощью ПХ прямых линий в качестве параметрического уравнения удобно использовать нормальное уравнение прямой

$$X \cdot \cos(Q) + Y \cdot \sin(Q) = R, \quad (16)$$

где Q – угол, образуемый нормалью к прямой и осью X ;

R – расстояние от начала координат до прямой.

Модификации классического ПХ заключаются в следующем:

А. Использование весового аккумулятивного значения AV вместо единичного при формировании массива-накопителя. Другими словами, когда по (1) вычислено очередное R_i при определенном Q_j , значение в соответствующей ячейке $H(R_i, Q_j)$ массива-накопителя увеличивается на величину AV . Более высокое значение AV выбирается для тех точек, которые с большей вероятностью принадлежат прямым линиям.

Б. Использование правила для выбора параметра Q . Определяются наиболее вероятные направления ее расположения. С этой целью, как и для первой модификации, проводится локальный анализ изображения в окне размером 3×3 пикселя.

После построения набора прямых линий, представленных в пространстве преобразования Хафа, производится поиск всех возможных точек пересечения этих прямых.

Затем точки пересечения связываются отрезками в так называемые элементарные контуры. В результате все исходное изображение покрывается набором этих

контуров и каждому элементарному контуру по одному из системных критериев присваивается цвет (объект/фон). Затем контуры, имеющие общие границы и одинаковый цвет, сливаются в один.

Заключение

Использование двумерных базисов обеспечивает непосредственное выполнение соответствующих двумерных преобразований, а предложенный алгоритм быстрого вычисления существенно сокращает вычислительные затраты. На основании этого алгоритма можно синтезировать специализированные аппаратные средства параллельной обработки. Описанный выше алгоритм реализует 2D-функции преобразования Фурье, но он может быть использован для вычисления ДЭФ и для вычисления 2D-функций других ортогональных базисов. Для этого следует изменить формулы (9) и (10) в соответствии со спецификой базиса.

Предложен быстрый алгоритм выделения контуров на основе функции Уолша, который по сравнению с градиентными алгоритмами дает более узкую контурную линию, т.к. обработка изображения производится окном с меньшим размером и обладает высоким быстродействием. Кроме того, при использовании функций Уолша нет необходимости в пороговой обработке и соответственно выборе величины порога, что является одним из ключевых вопросов при определении контуров градиентными операторами. Для аппроксимации границ используется преобразование Хафа, которое позволяет проводить аппроксимацию с заданной степенью точности.

Литература

1. Fu K.S. VLSI for pattern recognition and image processing. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo (1984).
2. Хармут Х.Ф. Теория секвентного анализа. Основы и применения. – М.: Мир, 1980. – 574 с.
3. Machnev A.G., Sadykhov R.H. Algorithm and structure of a unit for computing a two-dimensional Vilenkin-Chrestenson transform in signal processing applications // Proc. of the Latvian signal processing international conference. – Vol. 1. – P. 316-320 (1990).
4. Прэртт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
5. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, sensing, vision and intelligence. – New York etc.: McGraw-Hill, 1987. – XIII.
6. Yuen P.C., Feng G.C., Zhou J.P. A contour detection method: Initialization and contour model // Pattern Recognition Letters. – 1999. – Vol. 20. – P. 141-148.
7. Koschan. A Comparative Study on Color Edge Detection // Reprint from Proc. 2nd Asian Conference on Computer Vision ACCV'95. – Singapore, 5 – 8 December 1995. – Vol. III. – P. 574-578.
8. Садыхов Р.Х., Мачнев А.Г. Системные процессоры цифровой обработки изображений в двумерных базисах. – Минск: Ин-т техн. Кибернетики АН Беларуси, 1996. – 82 с.
9. Rosin P.L. Edges: saliency measures and automatic thresholding // Mach. Vision Appl. 9. – 1997. – P. 139-159.

A.A. Doudkin, D.A. Vershok, A.M. Selikhanovich

Contours Extraction on Halftone Images of Integrated Circuit Layouts

Algorithms of contours extraction on halftone images of integrated circuit layouts are proposed, that based on two-dimensional discrete orthogonal transformations. Walsh 2d-function is used as operator of transformation, and contour approximation is fulfilled with a given degree of accuracy by straight-line segments of different length using modified Hough transform.

Статья поступила в редакцию 06.07.2004.