

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенблат, Ф. Принципы нейродинамики: Персептрон и теория механизмов мозга: Пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
2. Minsky, M. Perceptrons: An introduction to Computational Geometry / M. Minsky, S. Papert. – The MIT Press. – 1969.
3. Hinton, G. A fast learning algorithm for deep belief nets / G. Hinton, S. Osindero, Y. Teh // Neural Computation. – 2006. – Vol. 18. – P. 1527–1554.
4. Hinton, G. Training products of experts by minimizing contrastive divergence // Neural Computation. – 2002. – Vol. 14. – P. 1771–1800.
5. Hinton, G. Reducing the dimensionality of data with neural networks / G. Hinton, R. Salakhutdinov // Science, 313 (5786). – 2006. – P. 504–507.
6. Hinton, G. A practical guide to training restricted Boltzmann machines // Tech. Rep. 2010-000). – Toronto: Machine Learning Group, University of Toronto, 2010.
7. Bengio, Y. Learning deep architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2009. – Vol. 2(1). – P. 1–127
8. Bengio, Y. Greedy layer-wise training of deep networks / Y. Bengio, P. Lamblin, D. Popovici, H. Larochelle // In book Schölkopf, J.C. Platt, T. Hoffman (Eds.), Advances in neural information processing systems, 11. – MA: MIT Press, Cambridge, 2007. – P. 153–160.
9. Erhan, D. Why does unsupervised pre-training help deep learning? / D. Erhan, Y. Bengio, A. Courville, P.-A. Manzagol, P. Vincent, S. Bengio // Journal of Machine Learning Research. – 2010. – Vol. 11. – P. 625–660.
10. Widrow, B. Adaptive switching circuits / B. Widrow, M. Hoff // In 1960 IRE WESCON Convention Record. – DUNNO. – 1960. – P. 96–104.
11. Головки, В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. – Кн. 4: учеб. пособие для вузов / Общая ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.
12. Rumelhart, D. Learning representation by backpropagation errors / D. Rumelhart, G. Hinton, R. Williams // Nature. – 1986. – N323. – P. 533–536.
13. Lippmann, R. P. An introduction to computing with neural nets // IEEEASSP Mag. – 1987. – vol. 4, no. 2. – P. 4–22.
14. Cybenko, G. Approximations by Superpositions of a Sigmoidal Function // Math. Contrl., Signals, Syst. – 1989. – Vol. 2. – P. 303–314.
15. Hinton, G. Greedy layer-wise algorithm // Journal of Machine Learning Research 1. – 2009. – P. 1–40.
16. Golovko, V. A Learning Technique for Deep Belief Neural Networks / V. Golovko, A. Kroshchanka, U. Rubanau, S. Jankowski // in book Neural Networks and Artificial Intelligence. – Springer, 2014. – Vol. 440. Communication in Computer and Information Science. – P. 136–146.
17. Golovko, V. Neural network model for transient ischemic attacks diagnostics / V. Golovko, H. Vaitsekhovich, E. Apanel, A. Mastyskin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2012. – 21(3). – P. 166–176.
18. Scholz, M., Fraunholz, M., Selbig, J. Nonlinear principal component analysis: neural network models and applications // In book Principal manifolds for data visualization and dimension reduction. – Springer Berlin Heidelberg, 2008. – P. 44–67.

Материал поступил в редакцию 30.12.14

GOLOVKO V.A., KROSHCHANKA A.A. Perceptrons and deep belief neural networks: training and application

This paper discusses and analyzes the basic paradigm of learning perceptron neural networks: from single layer perceptron to multilayer deep belief neural networks, which are considered now as a revolution in the field of data mining. It is shown the inconsistency of some of the myths about the possibilities of perceptron neural networks and is substantiated the transition to deep belief neural networks. The basic models of deep belief neural networks training are examined, which are based on the restricted Boltzmann machine (RBM) and auto-associative approach. A new method for training of RBM is proposed and is shown that traditional approach for restricted Boltzmann machine training is particular case of proposed technique, which is based on minimization of reconstruction square error. It is proved the equivalence of maximizing the probability distribution of the data in a restricted Boltzmann machine and the minimization of the total reconstruction squared error in layers of RBM. The application of deep belief neural network for compression, visualization and data recognition is considered.

УДК 681.4

Дудкин А.А.

ПОСТРОЕНИЕ ПОЛНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО СЛОЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИЗ СОВОКУПНОСТИ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ КАДРОВ

Введение. Современное производство интегральных схем (ИС) требует контроля всех критических процессов производства. Важной частью общей системы контроля являются системы технического зрения [1], в которых центральное место при обработке информации занимает идентификация объектов на изображениях.

Большие изображения, как правило, представляют совокупностью кадров с некоторым перекрытием соседних кадров. Задача формирования полного изображения по совокупности кадров получила название сшивки кадров.

Если сшиваемые кадры имеют реперные метки (специальные знаки, по которым следует выполнить сшивку соседних кадров), либо некоторые другие опорные точки (общие точки кадров), то задача сшивки сводится к пересчету координат в единую систему координат [2]. При этом, если реперами являются области, вначале находится положение, при котором сумма норм ошибок для выбранных K меток минимизируется:

$$M = \operatorname{argmin}_{m,n} \sum_{i=1}^K \|X_i - Y_i(m,n)\|, \quad (1)$$

где векторы X_i и Y_i представляют соответствующие i -е выбранные области кадров.

Сложность сшивки обусловлена наличием нежелательных эффектов, обусловленных вводом с использованием ПЗС-матриц, неодинаковыми характеристиками источника света линзы камеры, отличиями в освещенности совмещаемых изображений. Кроме того, имеют место геометрические искажения: отличия в масштабе, повороте, сдвиге, ракурсе совмещаемых изображений. Поэтому важно провести коррекцию оптических искажений и рассовмещений.

Коррекция рассовмещения включает в себя компенсацию продольных и поперечных сдвигов, поворотов при сохранении перпендикулярности; нарушения перпендикулярности: изменения масштаба и т.д. [3]. Различают аппаратную и алгоритмическую (программную) коррекцию рассовмещения. Ряд поправок определяется в процессе

Дудкин Александр Арсентьевич, доктор технических наук, доцент, зам. зав. лабораторией идентификации Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

калибровки устройств ввода: координатного стола и исполнительных механизмов. Следует отметить, что получаемые наборы поправок уникальны для каждой копии оригинала топологии и каждой процедуры загрузки контролируемого оригинала. Поэтому в системах контроля, как правило, имеются подсистемы для устранения рассовмещений, которые не устраняются в результате работы других систем компенсации погрешностей устройства управления линейными шаговыми двигателями. Это касается погрешностей, обусловленных неоднородностью материала, климатическими факторами, искажениями геометрических размеров подложек и т.д.

Если совмещаемые кадры не имеют выделенных опорных точек, а известны лишь среднее значение перекрытия и некоторое допустимое отклонение от заданного значения, то сшивка кадров изображений основана на анализе информации в областях перекрытия соседних кадров и определении степени отличия перекрывающихся областей (используется функция расстояния, напр., евклидова) или их подобия (используются корреляционные функции), которые бы с максимально возможной точностью и достоверностью позволяли локализовать фрагмент [4]. На практике функции расстояния могут дополнительно учитывать параметры контраста, средней освещенности, шума и другие факторы, которые входят в формулы как слагаемые или коэффициенты:

$$p(x, y) = ap(x, y) + b + \varepsilon(x, y), \quad (2)$$

где a , b и $\varepsilon(x, y)$ – параметры контраста, средней освещенности и шума соответственно. Мера сходства может быть определена через функцию расстояния: считается, что пиксели схожи, если $d(p_1, p_2) \leq \lambda$, где λ – некоторый установленный порог. Если в качестве меры различия в некотором пикселе (k, l) будем брать среднеквадратичную ошибку

$$\varepsilon^2(k, l) = \sum_x \sum_y [p_1(x, y) - p_2(x + k, y + l)]^2, \quad (3)$$

которая минимизируется перебором всех допустимых сдвигов эталона по заданной области контролируемого снимка, то приходим к корреляционной функции подобия. Считается, что в точке экстремума реализуется сходство, если $\varepsilon^2(k, l) \leq \lambda$, где λ – некоторый установленный порог.

Корреляционный подход характеризуется большой вычислительной сложностью. Используя специальные преобразования, можно ускорить вычисления корреляции. Хороший результат дает дополнительное использование фильтрации [5] и автокорреляционных функций Фурье [6]. Широко используется при построении наилучшего совмещения перекрывающихся областей способ, когда выбираются некоторые общие области, которые существенно меньше, чем заданные совмещаемые области [7–8]. В рамках каждого из этих подходов возможно также использование алгоритмов параллельного совмещения для ускорения процесса вычисления.

С практической точки зрения, в связи с большой вычислительной сложностью, представляют интерес приближенные алгоритмы совмещения, дающие некоторое приемлемое квазиоптимальное решение.

В настоящей статье мы рассмотрим задачу сшивки изображения топологических слоев интегральных схем (ИС), имеющую место при восстановлении топологии и контроле изготовления ИС [9]. Кадры изображения имеют одинаковый масштаб и являются прямоугольными, следовательно, каждая область перекрытия также является прямоугольной. Кадры получены одной камерой, но в разные моменты времени и / или при различном освещении. Имеются также искажения, обусловленные эффектом перспективы, нечеткой фокусировки на границе кадра, разной высотой и присутствием тени.

Задача оптимальной сшивки. Растровое изображение зададим в виде матрицы $[P_{i,j}]$ частично перекрывающихся кадров, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$. Пусть неориентированный граф $G = (N, R)$ задает отношение соседства кадров (такие кадры частично перекрываются), где N – множество вершин графа, поставленных в

соответствие кадрам, а R – множество ребер графа, задающих отношение соседства пары кадров. Для простоты будем рассматривать соседство лишь по вертикали и горизонтали. Тогда для матрицы $[P_{i,j}]$ размерности $n \times m$ имеем: $N = \{n_{i,j} \mid i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ – множество вершин, а $R = \{r_k \mid k = 1, 2, \dots, 2nm - m - n\}$ – множество ребер.

Пусть кадр имеет размеры $a \times b$. Зададим S_h и S_v – размеры перекрытия соседних кадров по горизонтали и вертикали соответственно, а также допустимое отклонение перекрытия по горизонтали Δh и по вертикали Δv . Положим, что $\Delta h < S_h$, $\Delta v < S_v$, $a > 2\Delta v + 2S_h$, $b > 2\Delta h + 2S_v$.

Определим функцию совмещения, характеризующую «схожесть» (степень близости) двух кадров P_1 и P_2 в перекрывающихся областях для разных положений кадров относительно друг друга как функцию расстояния $d(P_1, P_2, h, v)$ в некоторой метрике: евклидовой либо угловой (корреляционная функция сходства), где h и v – смещения кадров изображений относительно заданных S_h и S_v по горизонтали и вертикали соответственно, $-\Delta h \leq h \leq \Delta h$, $-\Delta v \leq v \leq \Delta v$. Для удобства запишем $d(P_1, P_2, h, v) = d(r_i, h, v)$, где r_i – дуга графа G , определяющая соседство между кадрами P_1 и P_2 .

Наилучшим совмещением двух кадров будем считать такое их расположение, при котором достигается минимум функции d . Пусть задана целевая функция, характеризующая совмещение всех кадров изображения

$$g = \sum_{i=1}^{2nm-m-n} d(r_i, h, v) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Задача заключается в нахождении такого расположения кадров, чтобы значение функции g было минимальным.

Алгоритмы сшивки. Тривиальным решением задачи сшивки является полный перебор всех комбинаций совмещения, что нереально даже при небольшом числе кадров, так как число вариантов равно $(2\Delta)^{2(nm-1)}$. С этой точки зрения предпочтительны алгоритмы, реализующие ограниченный перебор, которые обеспечивают существенное ускорение расчета и дают приемлемое качество сшивки.

Предлагаются две схемы приближенного решения задачи сшивки.

В первой схеме вместо общего критерия качества (4) используется локальный критерий – функция g' , оценивающая сшивку четверок кадров, расположенных в виде матрицы размерности 2×2 с применением функции расстояния. Сшиваются первые четыре кадра, которые фиксируются. Далее в зависимости от алгоритма перебора кадров – кандидатов для сшивки осуществляется добавление двух или трех кадров, при этом оценивается новая четверка кадров, в которую от старой входит два либо один кадр. Во второй схеме используется функция g'' , в которой в качестве функции совмещения $f_{i,j}(x, y)$ также используется функция оценки совмещения кадра со всеми соседними кадрами при условии, что они жестко фиксированы:

$$f_{i,j}(x, y) = \sum_{k=1}^{K_{i,j}} (|x - OptX_{i,j}^k| + |y - OptY_{i,j}^k|), \quad (5)$$

где $K_{i,j}$ – количество кадров, смежных (i, j) -му кадру; (x, y) – текущие координаты (i, j) -го кадра; $OptX_{i,j}^k, OptY_{i,j}^k$ – координаты (i, j) -го кадра, для которых функция оценки совмещения d между (i, j) -м кадром и k -м его соседом достигает минимума. Отметим, что $K_{i,j}$ равно числу ребер для вершины графа G , соответствующего (i, j) -му кадру.

Ниже описываются алгоритмы сшивки, реализующие эти схемы.

При сшивке по схеме 2 базовым является алгоритм сшивки четверки кадров, заданных в виде матрицы размерности 2×2 . Разновидности алгоритмов сшивки четверками на всем множестве кадров различаются порядком выбора четверок и порядком фиксации кадров. Фиксация означает неподвижность кадров. Примеры, иллю-

стрирующие порядок комбинирования четверок, показаны на рис. 1 и 25, где порядок указан цифрами (сшивка с добавлением двух и трех кадров соответственно). В обоих примерах сшивка кадров матрицы $[P_i, j]$ частично перекрывающихся кадров, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$, начинается с выполнения алгоритма сшивки кадров матрицы 2×2 , который применяется для подматрицы, составленной из кадров $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$. Относительные координаты оптимального размещения этой четверки $h_{ij Opt}$ и $v_{ij Opt}$ соответствующие d_{Opt} фиксируются.

В сшивке по горизонтали с добавлением двух кадров рассматривается следующая четверка кадров, состоящая из двух правых кадров предыдущей четверки, положение которых вычислено и остается неизменным, и двух новых кадров, координаты которых следует вычислить. В сшивке с добавлением трех кадров фиксируется один кадр предыдущей четверки кадров. Например, на рис. 1 и 2 первая четверка помечена номером 1, а следующая четверка кадров имеет номер 2.

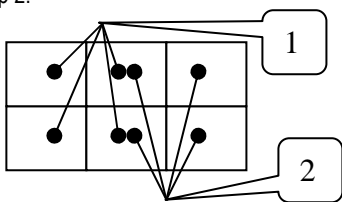


Рис. 1. Сшивка по горизонтали с добавлением двух кадров

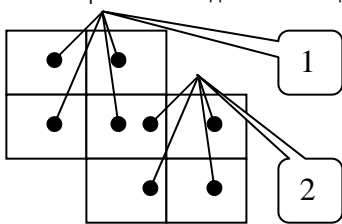


Рис. 2. Сшивка с добавлением трех кадров

Множество кадров разобьем на два подмножества: $P^* = \{P_j^* \mid j = 1, \dots, k\}$, где положение кадров фиксировано, и $P^- = \{P_j^- \mid j = 1, \dots, 4 - k\}$, где положение кадров следует вычислить при $0 < k < 4$.

А1. Алгоритм сшивки кадров матрицы размерности 2×2 с фиксированным положением некоторых кадров

1. Начало. Положение кадров $P^* = \{P_j^* \mid j = 1, \dots, k\}$ фиксировано, т.е. заданы координаты этих кадров $h_{i Opt}, v_{i Opt}$. Устанавливаем начальное перекрытие кадров h_j, v_j : сшиваемые кадры P_j располагаются в координатах, обеспечивающих перекрытие, равное S_h и S_v для соседних по горизонтали и по вертикали кадров.

2. Вычисляем значение функции d и полагаем g_{Opt} равным этому значению, а координаты кадров $P_j - h_{j Opt} = h_j, v_{j Opt} = v_j$.

3. Для каждого кадра P_j последовательно рассматриваем все варианты сдвига кадра по горизонтали и вертикали на 1, и для каждого из положений вычисляем значение функции d , фиксируем g_{Opt} и соответствующие координаты $h_{j Opt}$ и $v_{j Opt}$.

Повторяем до тех пор, пока g_{Opt} уменьшается и сдвиг по горизонтали и вертикали не превышает Δh и Δv соответственно.

4. Устанавливаем начальное перекрытие кадров (аналогично п. 1).

5. Для каждого кадра P_j последовательно выполняем все варианты сдвига кадров по горизонтали и вертикали на -1 , для каждого

из положений вычисляем значение функции d , фиксируем g_{Opt} и соответствующие координаты $h_{j Opt}$ и $v_{j Opt}$.

Повторяем до тех пор, пока g_{Opt} уменьшается и общий сдвиг по горизонтали и вертикали не превышает Δh и Δv соответственно.

6. Конец. Значения $h_{j Opt}$ и $v_{j Opt}$, соответствующие g_{Opt} , есть относительные координаты оптимального размещения четверки.

На базе алгоритма А1 строятся алгоритмы склейки кадров матрицы. Пример такого алгоритма приведен

А*2. Алгоритм сшивки с добавлением двух кадров

1. Обработка первых двух строк кадров $P_{ij}, i=1, 2, j=1, \dots, m$:

1.1. Применить алгоритм А1 для четверки кадров $P_{ij}, i=1, 2, j=1, 2, P^* = \{P_{11}\}$. Положить $j = 2; i = 2$.

1.2. Пока $j \neq m$, выполнить: $P^- = \{P_{1j}, P_{2j}\}, P^* = \{P_{1, j+1}, P_{2, j+1}\}$, применить алгоритм А1, $j = j + 1$.

Обработка следующей строки. Положить $j = 1$.

Пока $i \neq n$ и $j \neq m$, выполнить: $P^- = \{P_{ij}, P_{i, j+1}\}, P^* = \{P_{i+1, j}, P_{i+1, j+1}\}$, применить алгоритм А1, $j = j + 1, i = i + 1$, перейти к п. 2.

Конец.

Однако, порядок перебора четверок существенно влияет на качество склейки. Если функция $d(r, h, v)$ имеет несколько оптимумов, то можно ожидать существенного снижения результата, так как в алгоритмах поиск прекращается при достижении локального минимума.

Общая схема сшивки. Предлагается следующая общая схема сшивки, которая реализована в программном обеспечении обработки топологических слоев ИС:

1) Выбор и настройка алгоритма сшивки.

Выбор алгоритма заключается в указании типа алгоритма совмещения кадров: сшивка кадров в столбцах; сшивка кадров в строках; сшивка четверками кадров или покadroвая сшивка с различными схемами перебора кадров.

Настройка выбранного алгоритма заключается в задании меры сходства, порогов различия при вычислении расстояния между пикселями с учетом яркостных искажений кадров и критерия останова Err , характеризующего точность совмещения (в алгоритме по схеме 2).

2) Выполнение алгоритма сшивки.

3) Вычисление координат кадров в заданной системе координат.

4) Анализ сшитого изображения и дополнительная оптимизация сшивки.

Эксперименты. Качество сшивки (степень близости решения к оптимальному) проверялось экспериментально. Оценка полученных решений осуществлялась следующими тремя способами:

- сравнением с оптимальным вариантом сшивки, полученным полным перебором всех возможных совмещений кадров в областях перекрытий;
- визуально, поскольку даже оптимальное совмещение не означает, что получено абсолютное совпадение в области перекрытия вследствие того, что разные кадры имеют различные шумовые составляющие.
- выполнением сшивки специально подготовленных кадров изображения, для которых известна оптимальная сшивка.

Использованы четверки смежных кадров фотошаблонов двенадцати топологических слоев, по одной из каждого слоя, выбираемыми случайным образом. Размер кадров 640×442 пикселя, глубина цвета $- 8, S_h = 35, S_v = 25, \Delta = \Delta h = \Delta v = 1, 2, \dots, 8$. Таблица 2.1 показывает зависимость времени t сшивки по алгоритму А1 и значения функции g оценки сшивки от величины смещения Δ .

В таблице 2.2 содержатся оценки работы предложенных алгоритмов сшивки и сравнение с решением, получаемым полным перебором, в зависимости от величины смещения Δ : при $\Delta \leq 5$ оно составляет менее 1 %, при $\Delta > 5$ может превышать 20 %, визуальное смещение относительно оптимального составляет не более чем на один пиксель, что подтверждает корректность и приемлемое качество сшивок.

Таблица 1. Время и значения функции оценки шивки для алгоритма A1

Идентификатор слоя	$\Delta=1$		$\Delta=2$		$\Delta=3$		$\Delta=4$		$\Delta=5$	
	g	t	g	t	g	t	g	t	g	t
S1	98,52	0,1	97,75	0,5	96,79	3,0	95,18	10,0	93,89	26,2
S2	83,09	0,1	82,46	0,6	82,08	3,0	81,62	10,4	81,49	62,8
S3	73,60	0,1	73,57	0,5	73,12	3,0	72,69	9,9	72,45	26,4
S4	102,90	0,2	101,10	0,5	100,24	2,5	99,67	8,6	97,60	22,9
S5	107,94	0,2	105,21	0,6	104,31	3,0	103,21	10,1	102,56	26,4
S6	125,87	0,3	122,01	0,6	118,31	3,5	116,66	11,7	114,48	30,4
S7	126,57	0,1	124,64	0,4	122,21	2,4	119,23	8,3	117,48	22,5
S8	102,37	0,1	101,79	0,4	101,64	2,3	100,62	7,8	99,77	20,7
S9	108,61	0,1	105,78	0,4	101,54	2,5	100,99	8,9	98,57	24,2
S10	131,96	0,1	126,94	0,7	122,95	3,4	120,53	11,4	110,15	28,7
S11	138,81	0,2	137,09	0,5	133,53	2,6	130,38	8,9	117,97	29,5
S12	154,27	0,1	152,58	5	150,58	2,4	150,58	2,5	138,09	22,1

Таблица 2. Оценка точности алгоритмов

Тип алгоритма	$\Delta=2$		$\Delta=3$		$\Delta=4$		$\Delta=5$		$\Delta=6$		$\Delta=7$	
	g	t	g	t	g	t	g	t	g	t	g	t
Четверка слоя S1												
Схема 1	97,75	0,5	96,79	3,0	95,18	10,0	93,89	26,2	86,89	58,0	93,75	114,0
Схема 2	99,36	0,1	96,79	0,2	94,97	3,0	93,89	24,0	85,11	54,0	85,32	87,0
Полный перебор	97,75	9,0	96,57	67,0	94,85	104,0	93,83	999,0	71,76	2704	85,13	
Четверка слоя S2												
Схема 1	82,46	0,6	82,08	3,0	81,62	10,4	81,49	62,8	81,08	63,6	81,05	1249
Схема 2	79,34	0,3	84,26		82,22		85,32		82,16		83,05	
Полный перебор	82,46	9,0	82,08	65,0	81,59	290,0	79,16		81,03	2620	80,13	

Эксперименты со специально подготовленными кадрами изображения также показали, что предложенные алгоритмы дают шивки, близкие к оптимальным, за которые принимаются начальные расположения перекрывающихся кадров. На изображении топологического слоя выделяются четыре кадра заданного размера с перекрытиями по горизонтали и вертикали, генерируемыми случайным образом в интервалах $[S_h - \Delta h, S_h + \Delta h]$, и $[S_v - \Delta v, S_v + \Delta v]$ соответственно (координаты этих кадров представляют собой результат оптимальной шивки). Вычисляются значения функции совмещения. Затем выполняется шивка сгенерированных кадров предложенными алгоритмами, вычисляются соответствующие значения функций совмещения, которые сравниваются со значением для оптимальной шивки. Кроме того, выполняется визуальный анализ результатов шивки.

К примеру, на изображении SS4 размером 1269x863 с глубиной цвета 32 кадры имеют размер 634x431. Для заданных $S_h = 40$, $S_v = 25$ и $\Delta h = \Delta v = 5$ сгенерированы следующие координаты: SS4_01 (26, 408), SS4_00 (0,0), SS4_11 (618, 421), SS4_10(611, 24). Значение функции совмещения равно 242,98. Применение алгоритма A1 при тех же параметрах шивки дает результат со значением функции 247,79, применение алгоритма по схеме 2 дает результат с заданной погрешностью в один пиксель со значением оценочной функции, равном 251,79. Визуальное сравнение результатов шивки кадров с исходным их расположением также подтверждает корректность и приемлемое качество шивок.

Эксперименты показали, что для изображений с небольшим рассогласованием перекрывающихся кадров предпочтителен алгоритм A1: качество решения лучше, однако по времени оба алгоритма сравнимы. Кроме того, для некоторых изображений возможно закливание второго алгоритма, поскольку не удается достичь величины максимального сдвига, меньшей Err . При его использовании рекомендуется задать $Err > 1$. В этом случае целесообразна дополнительная оптимизация шивки.

Повышение точности шивки. Анализ кадров изображений и результатов шивки показал, что шивка имеет определенные ошибки координат, одинаковые для каждого кадра в столбце, а также ошибки, одинаковые для каждого кадра в строке. Основываясь на этих данных, был предложен алгоритм повышения точности шивки. Он предполагает поиск оптимального смещения для каждого столбца, и для каждой строки. При этом производится расчет оптимального перекрытия кадров соседних строк (столбцов) путем вычисления значения для каждой пары, и затем определяются наиболее часто встречающиеся значения, которые используются для последующей корректировки сдвигов.

Общий алгоритм работы модуля коррекции шивки:

- 1) вычислить текущий размер областей наложения кадров;
- 2) вычислить максимальный размер возможных сдвигов (если размер области наложения кадров менее 5 пкс, максимальный размер сдвигов устанавливается равным 5 пкс, иначе максимальный размер сдвигов устанавливается равным 1/3 от размера области наложения кадров);
- 3) вычислить сдвиги по строкам (рис. 3):
 - для всех строк: для каждого кадра в строке вычисляется сдвиг соответствующий наименьшей ошибке при перекрытии текущего кадра и следующего по горизонтали;
 - для каждого столбца определяется наиболее часто встречающийся сдвиг между кадрами данного столбца и соседними кадрами по горизонтали следующего столбца и столбец смещается на найденное значение сдвига относительно следующего столбца;
- 4) вычислить сдвиги по столбцам (рис. 4):
 - для всех столбцов: для каждого кадра в столбце вычисляется сдвиг соответствующий наименьшей ошибке при перекрытии текущего кадра и следующего по вертикали;
 - для каждой строки:
 - а) определяется наиболее часто встречающийся сдвиг между кадрами данной строки и соседними кадрами по вертикали следующей строки;

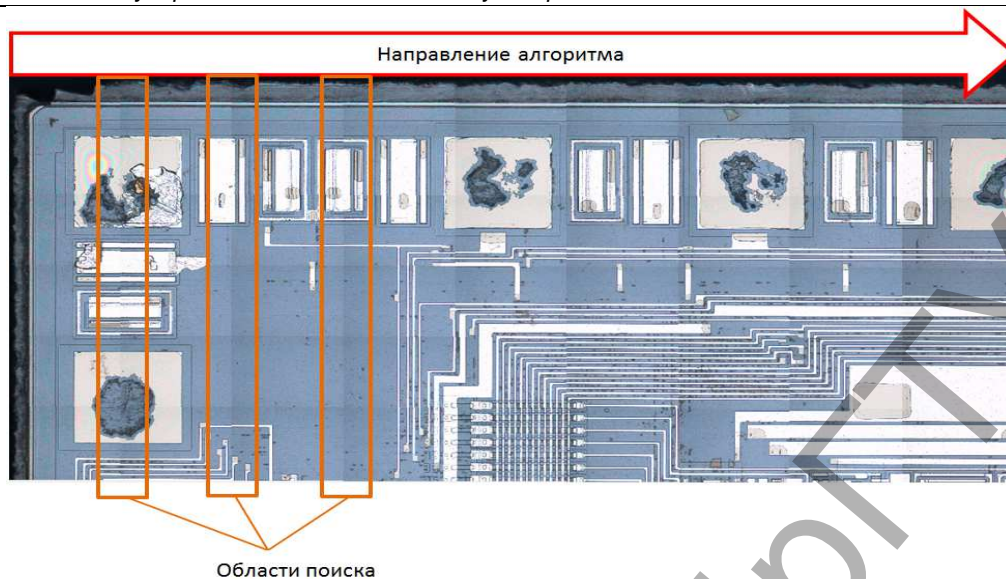


Рис. 3. Направление анализа и области поиска при вычислении сдвига по строкам

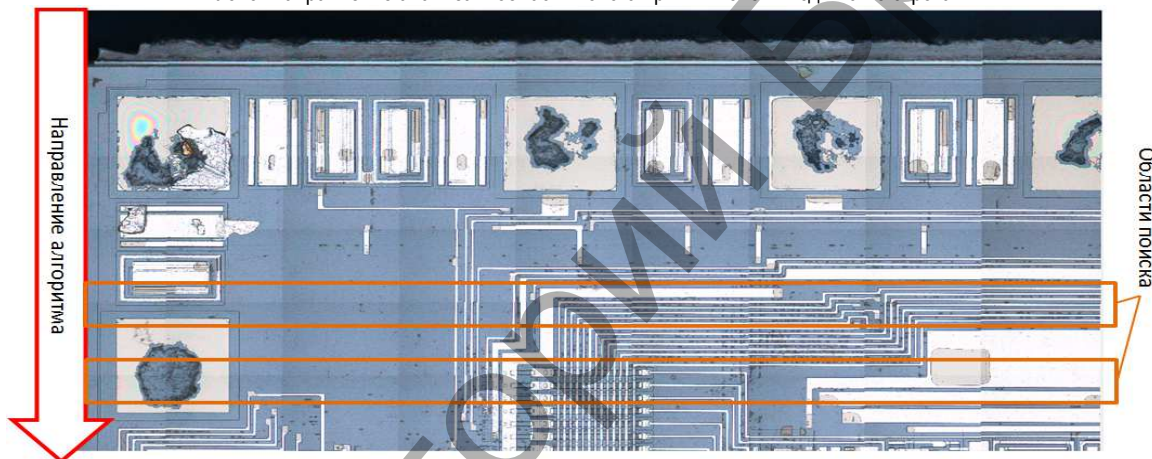


Рис. 4. Направление анализа и области поиска при вычислении сдвига по столбцам

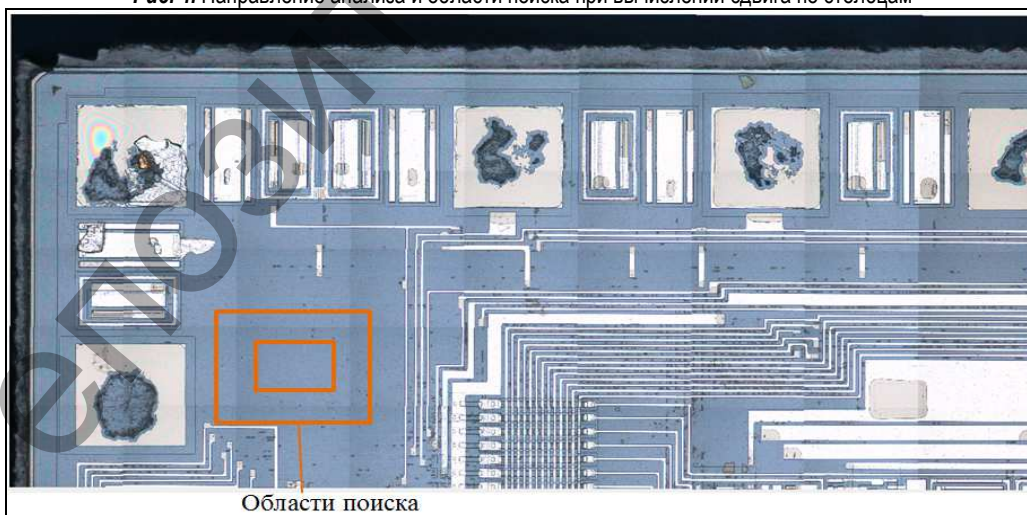


Рис. 5. Области поиска при определении особых точек

- б) строка смещается на найденное значение сдвига относительно следующей строки;
- 5) определить особые точки (рис. 5):
 - для всех кадров вычисляется суммарная ошибка перекрытия с соседними кадрами;
 - вычислить среднее значение ошибки по всем кадрам;

- найти кадры, для которых значения ошибки превышают среднее значение на указанный порог (20 %), рассчитать новое смещение данного относительно соседних кадров с минимальной ошибкой перекрытия. Ошибка перекрытия кадров рассчитывается по формуле:

$$\epsilon = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M |I_1(i) - I_2(i)|, \quad (6)$$

где M – количество точек области перекрытия, I_1 и I_2 – яркость точек 1-го и 2-го кадра в соответствующей позиции в области перекрытия.

Заключение. Предложенные алгоритмы имеют следующее преимущество применительно к обработке топологических слоев ИС и их шаблонов, представленных в виде множества перекрывающихся кадров: не требуется больших вычислений для формирования полного изображения. Эксперименты показали возможность автоматического определения координат совмещения кадров изображения ИС.

Выбор той или иной схемы склейки зависит от степени и характера погрешностей, вносимых устройством ввода. Приведенные варианты первого алгоритма расположены в порядке повышения требований точности к устройству ввода и соответственно снижения вычислительной нагрузки на аппаратную часть системы обработки изображений.

Использование дополнительной коррекции шивки позволило получить необходимые данные для дальнейшей работы по восстановлению принципиальной электрической схемы ИС и значительно повысило качество работы проектировщиков СБИС.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Brown, L.G. A survey of image registration techniques / L.G. Brown // ACM (Assoc. Comput. Mach.) Comput. Surv. – 1992. – No. 24 (4). – P. 325-376.
2. Абламейко, С.В. Комбинированный метод оперативной координатной привязки аэрокосмических снимков и цифровых моделей карт / С.В. Абламейко, С.П. Боричев, А.Н. Крючков // Анализ цифровых изображений. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2002. – Вып. 1. – С. 122-130.
3. Миллер, Б.М. Компенсация сдвига изображения при съемке с использованием ПЗС в режиме задержки и интегрирования / Б.М. Миллер, Е.Я. Рубинович // Информационные процессы. – 2007. – Т. 7, № 1. – С. 45-54.
4. Zhang, Z. A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry / Z. Zhang // Artificial Intelligence Journal. – 1995. – Vol. 78. – P. 87-119.
5. Chimmitt, William J. Scene reconstruction from partially overlapping images with use of composite / W.J. Chimmitt, Jr.G. Hassebrook, L.G. Hassebrook // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. – No. 16 (9). – P. 2124-2135.
6. Прэртт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэртт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
7. Leitao, Helena C.G. Information contents of fracture lines / Helena C.G. Leitao, Jorge Stolfi // Proc. WSCG'2000, 8th Intl. Conf. in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Digital Interactive Media, Czech Republic, 7- 11 February, 2000. Univ. of West Bohemia Press, 2000. – Vol. 2. – P. 389-395.
8. Withers, J.A. Tracking Cell Splits and Merges / J.A. Withers, K. A. Robbins // Proc. of the IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, San Antonio, USA, 8-9 April, 1996. – P. 117-122 [Electronic resource]. – 1996. – Mode of access: <http://visual.cs.utsa.edu/research/chaos/pubs/splits/splits.html>. – Date of access: 11.07.200.
9. Аваков, С.М. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С.М. Аваков [и др.] // Фотоника (прил. к журн. «Электроника НТБ»). – 2007. – № 6. – С. 35-39.

Материал поступил в редакцию 07.12.14

DOUDKIN A.A. Layout restoring algorithms for a task of integrated circuits re-design

Approximate algorithms are proposed to form a complete set of image raster image frames topology layers of integrated circuits. The algorithms are based on the use of specific heuristics that provide a combination of overlapping areas without the use of reference points, and contribute to the qualitative analysis and the correct reconstruction of the topology of integrated circuits. The choice of a bonding scheme depends on the extent and nature of the errors introduced by the input device.

УДК 681.4

Дудкин А.А.

АЛГОРИТМ ОБЪЕДИНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В СИСТЕМУ НА КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

Введение. Одним из перспективных направлений микроэлектроники является создание систем на кристалле, (СНК, SOC, System-On-Chip) интегрирующих на одном чипе процессоры, логические, запоминающие устройства и др. элементы [1–7]. Подобное объединение возможно посредством генератора изображений ЭМ-5299, разработанного концерном «Планар». Этот генератор позволяет использовать методику формирования слоев металлизации на пластине, исключая применение шаблонов, и позволяющую формировать рисунок по всей поверхности пластины посредством специального лазера. Одной из задач программного обеспечения этого генератора является объединение годных интегральных схем (ИС) в виде системы на кристалле. Исходным для решения этой задачи является описание полупроводниковой пластины с заданием информации о годности расположенных на ней ИС, результатом - информация для управления соединением исправных ИС, расположенных на пластине, в систему.

В статье предложено описание пластин булевыми матрицами, которое позволило свести решение задачи объединения годных ИС (реконфигурации) к поиску максимальных подматриц, целиком состоящих из исправных ИС. Предложен алгоритм реконфигурации и рассмотрен пример проектирования. Применение математического аппарата работы с булевыми матрицами позволяет проводить оптимизацию объединения и получать решения, превосходящие аналоги. Кроме того, благодаря использованию математического аппарата

работы с булевыми матрицами алгоритм объединения обладает высоким быстродействием [8].

Описание топологии пластины

Кристаллическая пластина является подложкой, на которой располагаются те же самые не соединенные между собой цифровые устройства, из которых состоят однорядные структуры. Эти устройства являются элементами пластины.

Для описания системы ИС на пластине вводится система прямоугольных координат из осей X и Y . Пересечение осей координат совпадает с центром пластины. ИС располагаются в виде прямоугольной матрицы с некоторым шагом по x и по y . Расположение ИС на пластине задается парой чисел. Первое число является номером строки, второе число – номером столбца. ИС находится на пересечении строки и столбца. Размещение микросхемы на пластине задается координатами точек привязки микросхемы в системе координат пластины.

Таким образом, кристаллическая пластина имеет матричную структуру, состоящую из k строк и l столбцов, где $k \geq n$, $l \geq m$. На пересечении строки со столбцом этой матрицы также располагается один ее элемент. Каждый элемент пластины либо исправен, либо неисправен.

Кристаллическая пластина представляется в виде булевой матрицы S размерностью $k \times l$. Элемент s_{ij} этой матрицы, расположенный на пересечении строки с номером i со столбцом с номером j ($1 \leq i \leq k$, $1 \leq j \leq l$), соответствует элементу кристаллической пластины.