

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

2612/82

31/4-82

11-82-100

И.И.Меламед, М.Г.Осетинский,
В.Л.Пахомов, Н.В.Хуторной

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
ДИСКРЕТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
ГЕНЕРАТОРАМИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1982

В последнее время широкое распространение в промышленном производстве больших интегральных схем /БИС/ получили микрофотонаборные генераторы изображений /МФГИ/ типа ЭМ-519, ЭМ-549, ЭМ-559, управляемые от мини- или микро-ЭВМ. Эти установки входят в состав автоматизированных систем проектирования фотошаблонов /АСПФ/ нижнего уровня иерархии^{1/}.

Формирование посредством МФГИ необходимого геометрического рисунка производится путем последовательного экспонирования фотопластины через диафрагму прямоугольной формы. При формировании изображения МФГИ может перемещаться по двум координатам, изменять угол поворота, и, в определенных пределах, размеры диафрагмы. Допускаются наложения экспонируемых прямоугольников друг на друга. Необходимо, чтобы площадь рисунка была покрыта прямоугольниками без просветов или в пределах заданной погрешности покрытия /см. рис./.

Время формирования рисунка (T_{ϕ}) определяется набором и количеством покрывающих прямоугольников, а также порядком их экспонирования. Время T_{ϕ} ограничено предельным временем работы ($T_{пр}$) МФГИ или квантом времени, выделенным в АСПФ для работы установки.

Увеличение степени интеграции БИС, номенклатуры и объемов их производства требует существенного сокращения цикла изготовления БИС. Становится актуальной задача разработки математических методов оптимального управления работой МФГИ в соответствии с определенным критерием оптимальности. Выбор последнего определяется спецификой решаемой задачи.

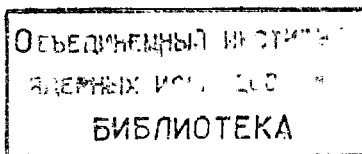
1. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ МФГИ

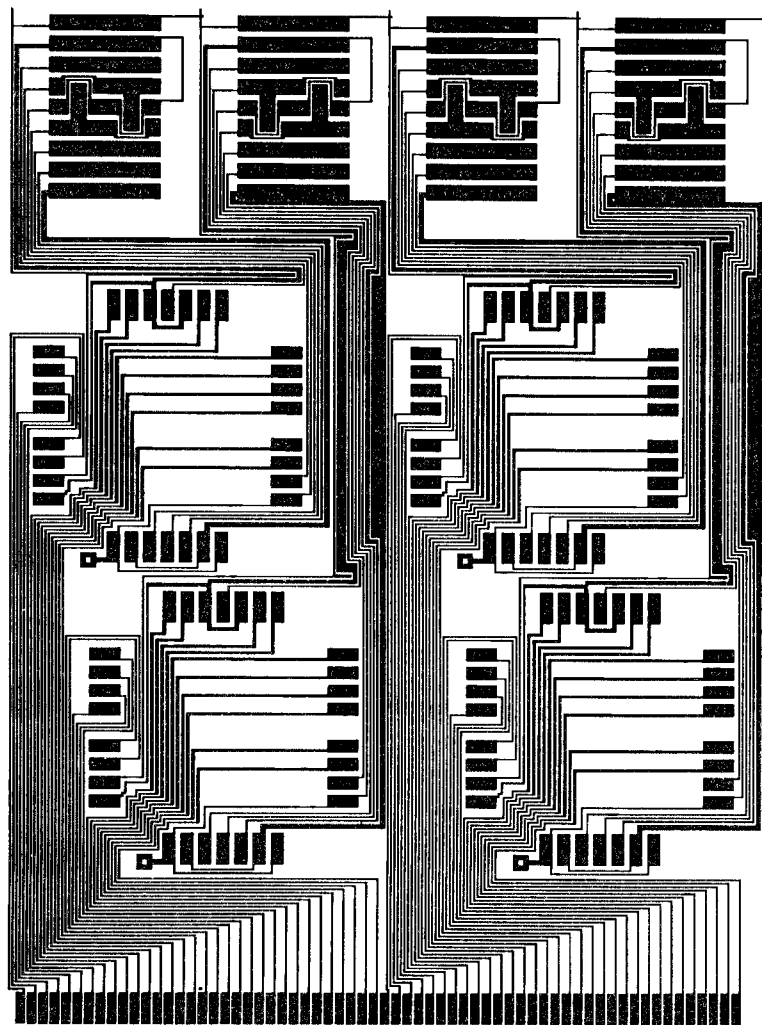
МФГИ в процессе работы может находиться в одном из двух состояний^{2/}:

1/ собственно экспонирования фотопластины через диафрагму прямоугольной формы;

2/ подготовки к экспонированию. Это состояние будем называть установкой диафрагмы, включающей в себя перемещение координатного стола, формирование размеров и угла поворота диафрагмы. Выполнение всех операций происходит параллельно.

Параметры, задающие размеры диафрагмы, ее положение и ориентацию относительно фотопластины, являются дискретными и изме-





руются безразмерными величинами - шагами МФГИ. Работа МФГИ по формированию промежуточного фотшаблона начинается и заканчивается в одной и той же точке - базовой точке координатного стола МФГИ.

Будем считать, что геометрический рисунок расположен в плоскости XOY и известно некоторое частное покрытие R этого ри-

сунка N прямоугольниками. Каждый прямоугольник R_i характеризуется пятью целочисленными параметрами: $r_1^i, r_2^i, r_3^i, r_4^i, r_5^i$, из которых r_1^i, r_2^i - координаты опорной точки, r_3^i, r_4^i - линейные размеры и r_5^i - угол поворота относительно опорной точки. Выбор опорной точки зависит от конкретного типа МФГИ/для ЭМ-549 - это левая нижняя точка прямоугольника, для ЭМ-559 - точка пересечения диагоналей прямоугольника/.

Включим в множество R прямоугольник R_0 с нулевыми параметрами $r_j^0 = 0, j = 1, 5$.

Произвольное упорядочение прямоугольников R_1, R_2, \dots, R_N будем представлять как перестановку $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$ конечного множества индексов $\{1, 2, \dots, N\}$. Все множество перестановок обозначим S_N .

Перестановка $S \in S_N$ определяет экспонирование прямоугольников в следующем порядке: $R_0, R_1, R_2, \dots, R_N, R_0$. В дальнейшем будем просто писать порядок S .

Введем семейство векторов $\{\sigma_i\}$ ($i = 1, N+1$): Компонента $\sigma_{ij} / j = 1, 5$ вектора σ_i задает величину изменения /в шагах/ j -го параметра и зависит от взаимного расположения прямоугольников R_{i-1} и R_i :

$$\sigma_{ij} = r_j^i - r_j^{i-1}, \quad i = 1, N$$

и

$$\sigma_{N+1, j} = r_j^0 - r_j^N.$$

Введем две величины. Положим $\delta_i^D = 1$, если $\sigma_{i3} \neq 0$ и $\sigma_{i4} \neq 0$, $\delta_i^D = 0$, если либо $\sigma_{i3} = 0$, либо $\sigma_{i4} = 0$, $\delta_i^A = 1$, если $\sigma_{i5} \neq 0$ и $\delta_i^A = 0$, если $\sigma_{i5} = 0$. Тогда число изменений размеров диафрагмы i (K_D) и число изменений угла поворота (K_ϕ) равно

$$K_D = \sum_{i=2}^N \delta_i^D \quad \text{и} \quad K_\phi = \sum_{i=2}^N \delta_i^A.$$

Скорость v_j изменения параметра $j / j = 1, 5$ является нелинейной функцией величины изменения этого параметра /величины $\sigma_{ij} /$ и, как правило, определяется для каждого типа МФГИ экспериментально.

Обозначим время собственно экспонирования одного прямоугольника через T_Φ . Время формирования рисунка при заданном порядке S равно

$$T_\Phi(S) = \sum_{i=1}^{N+1} \max_{j=1,5} \{\sigma_{ij} / v_j\} + N + T_\Phi. \quad /1/$$

Стоимость $C(S)$ экспонирования этого рисунка равна

$$C(S) = C_1 \times T_\Phi + C_2 \times T_{ЭВМ}, \quad /2/$$

где C_1 и C_2 - удельные стоимости работы МФГИ и ЭВМ, а $T_{ЭВМ}$ время решения на ЭВМ задачи определения порядка S экспонирования прямоугольников.

Для МФГИ типа ЭМ-559, ЭМ-559А и ряда других время T_{Φ} под- считывается не по формуле /1/, а по несколько иной формуле:

$$T_{\Phi}(S) = \sum_{i=1}^{N+1} \max_{j=1,5} \{ \sigma_{ij} / v_j \cdot T_M \cdot T_3 \}, \quad /1'/$$

где T_M - так называемое "мертвое время", то есть время, в те- чение которого источник освещения выходит на режим готовности после очередного экспонирования, T_3 - время подготовки оче- редной i -й порции управляющих кодов для записи в регистры МФГИ. Временем записи информации из ОЗУ ЭВМ в регистры МФГИ, а также временем собственно экспонирования для этих устройств можно пренебречь.

Для МФГИ типа ЭМ-533, ЭМ-508, установки "Плаз" и некоторых других параметр r_5 отсутствует, а временем изменения пара- метров r_3, r_4 можно пренебречь по сравнению с суммарным вре- менем работы установки. В этом случае

$$T_{\Phi}(S) = \sum_{i=1}^{N+1} \max \{ |x^i - x^{i-1}| / v_x \cdot |y^i - y^{i-1}| / v_y \} + N \cdot T_3. \quad /1'/$$

Если $v_x = v_y$, то расстояние между двумя последовательными со- стояниями экспонирования определяется метрикой Чебышева.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная задача оптимального управления работой МФГИ фор- мулируется теперь следующим образом:

Задача 1.

Для заданного набора из N прямоугольников найти такой по- рядок S^* их обхода, для которого

$$C(S^*) \leq C(S) \quad \text{для всех } S \in S_N$$

при условии

$$T_{\Phi}(S^*) \leq T_{\text{пр.}}$$

Однако возможен случай, когда для любого $S \in S_N$ $T_{\Phi} > T_{\text{пр.}}$. В этом случае более важным, чем минимизация стоимости, становится минимизация времени T_{Φ} .

Задача 2.

Для заданного набора R из N прямоугольников найти такой порядок S^* их обхода, для которого

$$T_{\Phi}(S^*) < T_{\Phi}(S) \quad \text{для всех } S \in S_N.$$

Пусть скорости v_3 и v_4 существенно меньше, чем v_1, v_2, v_5 . Тогда задача 1 переходит в следующую задачу.

Задача 3.

Найти S^* , такой, что

$$K_D(S^*) < K_D(S) \quad \text{для всех } S \in S_N$$

при условии

$$T_{\Phi} \leq T_{\text{пр.}}$$

Задача 2 в этом случае формулируется следующим образом:

Задача 4.

Найти S^* , такой, что

$$K_D(S^*) < K_D(S) \quad \text{для всех } S \in S_N.$$

Аналогично, если v_5 много меньше, чем $v_i / i = 1,4$, полу- чаем задачи 5 и 6.

Задача 5.

Найти S^* такой, что

$$K_{\Phi}(S^*) < K_{\Phi}(S) \quad \text{для всех } S \in S_N$$

при условии $T_{\Phi} \leq T_{\text{пр.}}$

Задача 6.

Найти S^* такой, что

$$K_{\Phi}(S^*) < K_{\Phi}(S) \quad \text{для всех } S \in S_N.$$

В литературе^{/3/} была рассмотрена лишь задача 2. Причем предложенный там метод ее решения рассчитан на решения задачи на большой ЭВМ. Однако АСПФ нижнего уровня базируется на мини- и микро-ЭВМ. Поэтому для совершенствования технологии изготов- ления фотшаблона с целью снижения вероятности сбоев установки и сокращения цикла проектирования бездефектного фотшаблона необходимо уметь решать задачи 1-6 на мини- и микро-ЭВМ.

Достоинства мини-ЭВМ^{/4/} - дешевизна, малые габариты, высо- кая надежность, простота эксплуатации и программирования, опе- ративность общения с пользователем - привели к тому, что миро- вой парк мини-ЭВМ насчитывает сейчас более 200 тыс. машин и ежегодно возрастает примерно на 30%. Типичная мини-ЭВМ - это машина с 8-16-разрядной сеткой, оперативной памятью /ОЗУ/ 8-64 Кслов, арифметикой с фиксированной запятой и относительно небольшой скоростью вычислений.

Особенности мини-ЭВМ порождают ряд специфических задач, например, задачу выбора представления данных о фотшаблонах в ОЗУ машины, т.к. диапазон изменения данных /от 0 до $1,5 \times 10^5$ /

значительно превышает размеры разрядной сетки. Особенности организации системы ввода-вывода и малый объем ОЗУ мини- и микро-ЭВМ могут привести к тому, что хорошие алгоритмы решения задач 1-6 на универсальных ЭВМ окажутся неэффективными на мини- и микро-ЭВМ.

3. ЗАДАЧА КОММИВОЯЖЕРА

Решение сформулированных задач требует разработки методов решения хорошо известной задачи дискретного программирования - задачи коммивояжера /ЗК/. Напомним, что задача коммивояжера состоит в нахождении замкнутого гамильтонова маршрута /тура/ на взвешенном графе. Большая размерность ЗК, которые необходимо решать в АСПФ, делают невозможным применение даже самых быстрых методов точного решения. Только использование эвристических алгоритмов в сочетании с методами декомпозиции способно привести к удовлетворительным с практической точки зрения решениям.

Проведенное в^{5/} теоретическое и экспериментальное исследование основных типов эвристических алгоритмов показало, что качество их существенно зависит от типа матрицы расстояний, диапазона задания элементов матрицы и размерности задачи. При этом целесообразно выделять следующие типы матриц расстояний: несимметричные неметрические /НМ/, симметричные неметрические /СНМ/, несимметричные псевдометрические /НПМ/, симметричные метрические. В последнем случае существен вид метрики: евклидова, манхеттенская, аффинная, чебышевская и т.д.

Для матриц типа НМ и СНМ наиболее эффективными являются алгоритмы типа "Иди в ближайший" по матрице аффинности дуг^{6/}, для ЗК с метрическими и псевдометрическими матрицами - алгоритм Карга-Томпсона^{7/}. Исключение составляет ЗК с метрическими матрицами с чебышевской метрикой. В этом случае лучше алгоритмы типа "Иди в ближайший" по матрице расстояний.

При решении ЗК большой размерности оправдано применение алгоритмов, гарантирующих не слишком большое отклонение величины решения (L) от оптимального ($L_{\text{опт}}$) при $N \rightarrow \infty$ /N - число вершин графа/. Алгоритмы, для которых с вероятностью 1 справедлива оценка

$$L_{\text{опт}} \leq L \leq L_{\text{опт}}(1 + \epsilon),$$

где $\epsilon \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$, называются асимптотически точными^{8/}. Класс асимптотически точных алгоритмов достаточно велик. В частности, асимптотически точными являются все три вышеупомянутых типа алгоритмов.

4. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ

Для БИС высокой степени интеграции задачи 1-6 имеют размерность $N = 10^4 - 10^5$. Однако в случае позитивного топологического

рисунка /покрывается внутренность односвязанных контуров/ и применения контурного алгоритма покрытия^{9/} имеет место естественная декомпозиция сформулированных задач. В этом случае множество R из N прямоугольников распадается на M непересекающихся подмножеств. Одно подмножество образуют прямоугольники, покрывающие отдельную фигуру геометрического рисунка.

Суммарное время работы на МФГИ в этом случае равно

$$T_{\phi}(S) = \sum_{i=1}^M T_{\phi}^i + \Delta T_{\phi}.$$

где T_{ϕ}^i - время, затрачиваемое МФГИ на формирование i -й фигуры /вычисляется по формуле /1/, в которой N заменяется на N_i - число прямоугольников в i -й фигуре/, а ΔT_{ϕ} - время перехода МФГИ от последнего прямоугольника одного множества к первому прямоугольнику другого.

Задача коммивояжера, которую необходимо решать в этом случае, имеет следующую особенность. Тур должен проходить подряд через вершины одного множества, а потом переходить к вершинам следующего. Такая задача известна как кластерная задача коммивояжера^{10/}, для ее решения разработаны методы сведения ее к обычной ЗК, а также специальные алгоритмы. Но пользуясь моделью кластерной задачи коммивояжера, можно решать задачи 1-6 как последовательность задач о коммивояжерах. С этой целью для каждого множества решаем разомкнутую задачу коммивояжера с нефиксированной начальной и конечной вершинами, а затем, заменяя вершины одного множества одной метавершиной и пересчитывая соответствующую матрицу расстояний, решаем обычную задачу коммивояжера для метавершин.

5. ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

Задачи 1-6 были сформулированы в этой статье как задачи определения порядка S экспонирования выбранного набора R прямоугольников. Однако нетрудно заметить, что эти задачи могут быть поставлены как задачи определения оптимальных значений S и R одновременно. Методы решения задачи, так же как подробное исследование алгоритмов решения ЗК для мини-ЭВМ, авторы предполагают опубликовать в последующих статьях.

Из вышеизложенного ясно, что АСПФ должна содержать достаточно богатый набор эвристических алгоритмов решения ЗК и набор улучшающих процедур, например, по типу 3-оптимизации^{11/}. Необходимо также провести большую работу для выделения типа матрицы расстояний типичных задач и способы моделирования таких матриц. Отметим, что в основу создания подобной системы может быть положена система программных модулей решения транспортных задач комбинаторного типа^{12/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казенков Г.Г. и др. Автоматизированная система проектирования фотошаблонов на базе ЭВМ БЭСМ-6. В кн.: Микроэлектроника. Под ред. А.А.Васенкова, вып. 9, М., "Сов. радио", 1976.
2. Осетинский Л.Г., Осетинский М.Г. Программно-управляемый технологический комплекс для изготовления фотошаблонов БИС. Электронная техника, сер. 9. Экономика и системы управления, вып. 3, 1980.
3. Петренко А.И. и др. К вопросу о формировании графической информации приборами последовательного действия. УСИМ, №2, 1975.
4. Брусенцов Н.П. Миникомпьютеры. "Наука", М., 1979.
5. Бородин В.В. и др. Экспериментальное исследование эффективности эвристических алгоритмов решения задачи коммивояжера. Автоматика и телемеханика. №11, 1980.
6. Бородин В.В. и др. Исследование эффективности некоторых эвристических методов решения задач маршрутизации. В сб.: Управление транспортными процессами. Изд. АН СССР, 1977.
7. Karg R.L., Thompson G.L. Huristic Approach to Solving Travelling Salesman Problem. Manag.Sci., V10, No. 2, 1964.
8. Перепелица В.А., Гимади Э.Х. К задаче нахождения минимального гамильтонова контура на графе со взвешенными дугами. В сб.: Дискретный анализ, вып. 15, изд. Института математики СО АН СССР, Новосибирск, 1969.
9. Осипов Л.Б., Широ Г.Э. Алгоритмические методы подготовки информации для микрофотонаборных установок. "Электронная техника", Серия 10. Микроэлектронные устройства, вып. 2, 1978.
10. Chisman J.A. The Clustered Trabeling Salesman Problem. Compute of Oper Res., 1975, v.2, No.2.
11. Меламед И.И., Плотинский Ю.М., Рубинштейн М.И. Система программных модулей решения транспортных задач комбинаторного типа. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Проблемы развития и повышения эффективности транспортной системы страны". Часть 2. Изд. МИИТ, М., 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 февраля 1982 года.

Меламед И.И. и др. Применение методов дискретного программирования для управления генераторами изображений

11-82-100

Рассматривается принцип работы программируемых генераторов изображений для получения точных фотошаблонов интегральных схем и печатных плат. Формулируется основная задача управления работой таких генераторов. Приводится обзор задач, сводимых к проблеме коммивояжера с различными метриками.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Melamed I.I. et al. Application of Discrete Programming Methods to Control Mask Generators

11-82-100

Controlled mask generators of domestic manufacture used to obtain accurate photomasters of integral circuits and printed circuit board are described. The primary problem of controlling the mask generator operation is formulated. The problems reduced to a salesman problem with different metrics are listed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.