УДК 681.32

А. В. Бессонов, К. А. Кноп, Ю. Т. Лячек
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Декомпозиция задачи размещения компонентов

Предложен метод размещения многополюсника и связанных с ним двухполюсников на минимальной площади с учетом трассировки соединений в произвольных направлениях.

Печатная плата, топологическая трассировка, размещение компонентов

Задача размещения компонентов на печатной плате может быть решена последовательным расчетом оптимальных положений каждого компонента, считая остальные компоненты неподвижными [1].

Функционал Ф, соответствующий сумме квадратов длин проводников:

$$\Phi = \sum_{i,\,j} c_{ij} \left(x_i - x_j \right)^2 + \sum_{i,\,j} c_{ij} \left(y_i - y_j \right)^2$$

(x и y – координатные векторы для n ячеек, а c_{ij} представляет связность ячеек i и j), имеет единственный минимум, который можно найти, приравняв нулю все частные производные:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = 0 \Rightarrow \sum_j c_{ij} \left(x_i - x_j \right) = 0\,;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y_i} = 0 \Rightarrow \sum_j c_{ij} \left(y_i - y_j \right) = 0\,.$$

После очевидных преобразований получим следующие равенства:

$$x_{i\,\mathrm{opt}} = \frac{\sum_j c_{ij} x_j}{\sum_j c_{ij}}, \quad y_{i\,\mathrm{opt}} = \frac{\sum_j c_{ij} y_j}{\sum_j c_{ij}},$$

определяющие оптимальные координаты положения очередного элемента.

Для получения хорошего приближения достаточно всего нескольких уточняющих итераций.

Однако подобное размещение дает приемлемое решение только для весьма специфических сетей, на реальных же примерах элементы имеют тенденцию перекрываться. В связи с этим решение, полученное силовым методом, всегда нуждается в коррекции. Для этого используются методы дискретизации координат элементов, например метод приведения по квадрантам. На каждой итерации происходит расчет координат компонентов в текущей области размещения на основе квадратичного функционала. Далее область размещения разделяется на две области и осуществляется следующая итерация для каждой из областей. Площади областей пропорциональны площадям попавших в них компонентов.

Обычно суммарная площадь компонентов существенно меньше, чем площадь платы, поэтому каждый компонент получает свою долю дополнительной площади. При этом, например, двухполюснику дополнительная площадь не нужна, а многополюснику, напротив, требуется большая дополнительная площадь для возможности реализации его межсоединений.

Чем больше размеры двухполюсника, тем большую долю дополнительной площади он получит.

Для уменьшения негативного влияния отмеченного фактора при вычислении площади области размещения в [1] предложено вводить поправочные коэффициенты, учитывающие число задействованных контактов каждого из компонентов, что позволяет многоконтактным компонентам получить добавочный ресурс, необходимый для прокладки соединений.

Это несколько улучшает ситуацию, но не кардинально.

Существенно лучшие результаты можно получить, если для каждой функциональной группы компонентов (например, микросхемы и связанных с ней двухполюсников) обеспечить вариант компактного размещения. Далее и на этапе автоматического размещения, и при ручном редактировании можно рассматривать микросхему и ее «обвязку» как один комплексный компонент. При этом, во-первых, существенно снижается размерность задачи автоматического размещения и, во-вторых, рациональнее распределяется площадь. Однако и эти действия также не гарантируют отсутствия перекрытий компонентов, но способствуют снижению их числа.

Рассмотрим вариант, когда многополюсник и связанные с ним двухполюсники расположены на одной стороне печатной платы.

Требуется разместить двухполюсники по периметру компонента, минимизируя число пересечений трасс и суммарную длину соединений с учетом ограничений на прокладку остальных (не инцидентных размещаемым двухполюсникам) трасс.

По-видимому, при односторонней установке двухполюсники следует ставить перпендикулярно направлению ближнего ряда контактов во избежание блокировки контактов микросхемы, не инцидентных двухполюснику (рис. 1).

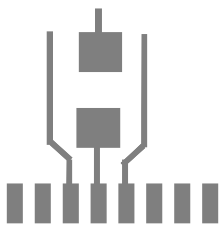
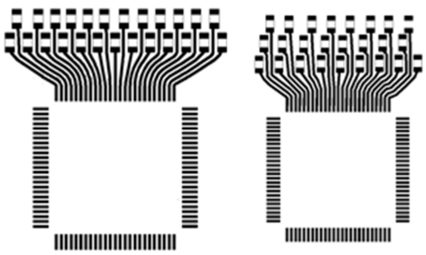


Рис. 1

Минимальное расстояние между смежными контактами микросхемы и двухполюсника зависит от расстояния между соседними контактами микросхемы (шаг), толщины проводников и зазоров между ними, а также размеров контактов микросхемы и двухполюсников и количества двухполюсников [2].

В некоторых случаях целесообразно расположить двухполюсники в несколько ярусов. В зависимости от соотношений размеров контактных площадок микросхемы и двухполюсников, а также от числа двухполюсников подобное расположение может оказаться экономичнее в части занимаемой площади и суммарной длины проводников. Например, на рис. 2, *а* и *б* приводятся примеры соответственно двухрядного и трехрядного расположения двухполюсников.



а *б*

Рис. 2

Отметим, что если на второй контакт двухполюсника назначена цепь, выходящая на опорные слои, то такие двухполюсники целесообразно ставить в первый ряд, поскольку в этом случае сокращается суммарная длина проводников (рис. 3).

Размещение двухполюсников на минимальной площади. Дан многоконтактный прямоугольный компонент, контакты одной из сторон которого (конкретно верхней) расположены горизонтально на равных расстояниях друг от друга.

Этот ряд контактов будем называть «первым рядом контактов». Над ним необходимо также горизонтально расположить нижние контакты двухполюсников, причем между каждыми двумя соседними контактами должен быть оставлен необходимый зазор для прокладки проводников, ведущих к другим (более верхним) рядам контактов. Эти двухполюсники и проводники будем называть «вторым рядом контактов».

Требуется расположить первый и второй ряды на минимальном расстоянии, позволяющем произвести «поконтактную» разводку проводников между ними с учетом заданной ширины проводника d_1, заданной ширины двухполюсника d_3 и минимального зазора d_2. После вычисления этого расстояния необходимо рассчитать общую площадь, занятую всем этим участком схемы – от первого ряда до верхней границы последнего ряда. Высота каждого двухполюсника равна H, а расстояние по вертикали между соседними двухполюсниками считаем равным d_2.

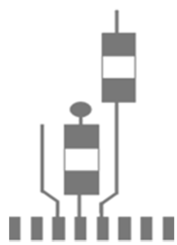


Рис. 3

Для выполнения вычислений введем следующие обозначения:

h – расстояние по вертикали между первым и вторым рядами;

(0, 0) – координаты самой левой точки O первого ряда;

$(A + (k - 1)B, h)$ – координаты левой точки L_k второго ряда, которая принадлежит нижнему контакту k-го (считая слева) двухполюсника;

m – количество рядов, т. е. $(m - 1)$ – количество проводников, проложенных между соседними двухполюсниками (второго ряда).

Вычисления для стандартной конфигурации. Стандартной будем называть такую конфигурацию, в которой:

1) середина второго ряда имеет общую вертикальную ось симметрии с серединой первого ряда (середины рядов находятся точно друг под другом);

2) зазоры между соседними контактами первого ряда минимальны, т. е. равны d_2; ширина проводников тоже минимальна и равна d_1;

3) зазоры между проводниками второго ряда, а также между проводниками и контактами двухполюсников такие же;

4) второй ряд содержит N двухполюсников и $(m - 1)(N - 1)$ проводников, а первый ряд содержит столько же (т. е. $N + (m - 1)(N - 1)$) контактов и выходящих из них одинаковых проводников.

Тогда общая длина первого ряда

$$W_1 = (d_1 + d_2)\,[N + (m - 1)(N - 1)] - d_2\,,$$

а длина второго:

$$W_2 = d_3 N + d_1(m - 1)(N - 1) + \\ + d_2[N + (m - 1)(N - 1) - 1].$$

При этом расстояние между левыми контактами соседних двухполюсников должно быть таким, чтобы там поместились один двухполюсник, $(m - 1)$ проводников и m зазоров. Другими словами,

$$B = d_3 + md_2 + (m - 1)d_1. \qquad (1)$$

Координату A первой (самой левой) точки второго ряда можно найти из следующих соображений: она левее первой точки первого ряда (0, 0) на половину разности длин рядов, т. е. на величину $(d_3 - d_1)N/2$. Таким образом,

$$A = -(d_3 - d_1)N/2. \qquad (2)$$

Отрезок OL_k назовем критичным, если для данного значения k длина этого отрезка в точности равна той минимальной длине, на которой можно поместить нужное число сечений проводников и зазоров между ними. Если критичных отрезков нет, можно уменьшить h до того значения, при котором они появятся. Поэтому будем считать, что критичный отрезок существует и идет от точки O к точке L_j.

На рис. 4 показано 3 ряда двухполюсников и критичный отрезок OL_2, ортогонально пересекающий 3 проводника и 3 зазора.

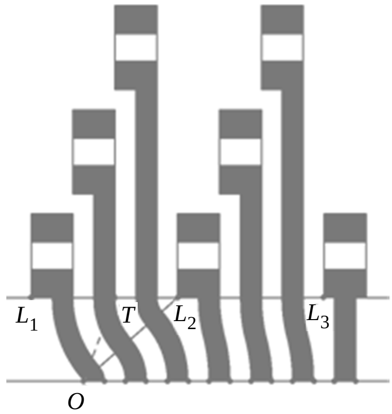


Рис. 4

Лемма. Критичный отрезок может идти только к такой точке, которая является левым контактом двухполюсника.

Доказательство. Предположим, что критичным является другой отрезок OT, пересекающий сколько-то отрезков и зазоров между ними. По предположению, OT имеет минимально возможную длину. Найдем ближайший справа от T левый конец двухполюсника (на рисунке – L_2). Отрезок TL_2 также пересекает сколько-то отрезков и зазоров и также имеет минимально возможную длину. Но тогда отрезок OL_2, пересекающий все те же отрезки и зазоры, что OT и TL_2 вместе взятые, имеет длину, меньшую, чем ломаная OTL_2, т. е. меньше критичной длины! Противоречие.

Согласно лемме искать концы критичных отрезков можно только среди левых концов контактов двухполюсников. Их координаты образуют арифметическую прогрессию, что позволяет упростить и постановку, и решение задачи, сведя ее к решенной в [2] задаче о минимуме расстояния между парой многоконтактных компонентов.

Условие допустимости разводки (Online DRC) с учетом леммы:

$$|OL_k| \ge (d_1 + d_2)m(k - 1) \text{ для любого } k$$

(до k-й левой точки должны проходить по m проводников к каждой из $(k - 1)$ предыдущих нижних границ двухполюсников и к следующим рядам).

Поскольку точку L_j считаем критичной, причем последней из критичных точек, это означает, что

$$|OL_{j-1}| \geq (d_1 + d_2)m(j-2), \quad (3)$$

$$|OL_j| = (d_1 + d_2)m(j-1), \quad (4)$$

$$|OL_{j+1}| > (d_1 + d_2)mj. \quad (5)$$

Складывая равенства, а также вычитая (3) из (4), а (5) из (3), получим

$$|OL_{j+1}|^2 - |OL_j|^2 > (d_1 + d_2)^2 m^2 (2j-1) \quad (6)$$

и

$$|OL_j|^2 - |OL_{j-1}|^2 \leq (d_1 + d_2)^2 m^2 (2j-3). \quad (7)$$

Выразим левые части (6) и (7) по теореме Пифагора:

$$|OL_{j+1}|^2 - |OL_j|^2 = (A + jB)^2 + h^2 - [A + (j-1)B]^2 - h^2 = B[2A + (2j-1)B], \quad (8)$$

$$|OL_j|^2 - |OL_{j-1}|^2 = (A - B + jB)^2 + h^2 - (A - 2B + jB)^2 - h^2 = B[2A + (2j-3)B]. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (6) и (7) соответственно, получим после преобразований:

$$2j - 3 \leq \frac{-2AB}{B^2 - m^2(d_1 + d_2)^2} < 2j - 1,$$

$$2j \leq \frac{B(3B - 2A) - 3m^2(d_1 + d_2)^2}{B^2 - m^2(d_1 + d_2)^2} < 2j + 2,$$

$$j = \left[0.5 \frac{B(3B - 2A) - 3m^2(d_1 + d_2)^2}{B^2 - m^2(d_1 + d_2)^2} \right]. \quad (10)$$

Получили явную формулу для номера j последнего критичного отрезка. Теперь из (4) получим уравнение для нахождения минимального значения h:

$$[A + B(j-1)]^2 + h^2 = [(d_1 + d_2)m(j-1)]^2,$$

где значение j получено по формуле (10), а A и B – по формулам (2) и (1).

Дополнение. Для реальных вариантов размещения важно, чтобы двухполюсники на рис. 4 укладывались в «свой» сектор, а именно, чтобы луч OL_1 выходил под углом к основанию (нижнему ряду контактов), не меньшим 45°. Это дополнительное условие в координатах переформулируется так: $h + A \geq 0$. Таким образом, чтобы это условие было выполнено, а высота h оказалась минимально возможной, необходимо положить $h^* = \max(h - A)$.

Далее приведены результаты вычислительных экспериментов (без учета дополнительного условия и с его учетом).

А. Двухполюсники 0.5×1.0	*Б. Двухполюсники* 1.0×2.0
$d_1 = d_2 = 0.2$, $d_3 = 0.5$	$d_1 = d_2 = 0.2$, $d_3 = 1$
25 двухполюсников в один ряд	
$H = 1$, $m = 1$, $N = 25$. Здесь $A = -3.75$, $B = 0.7$, $j = [3.12/0.33] = 9$, $A + 8B = 1.85$, тогда: $1.85^2 + h^2 = 3.2^2$, откуда $h \approx 2.6110$. Общая длина: $D = 12.5 + 0.2 \cdot 24 = 17.3$. Общая высота: $h + H = 3.6110$. Площадь: ≈ 62.47	$H = 2$, $m = 1$, $N = 25$. Здесь $A = -10.0$, $B = 1.2$, $j = [13.92/1.28] =$ $= 10$, $A + 9B = 0.8$, тогда: $0.8^2 + h^2 = 3.6^2$, откуда $h \approx 3.5100$. Общая длина: $D = 25 + 0.2 \cdot 24 = 29.8$. Общая высота: $h + H \approx 5.5100$. Площадь: ≈ 164.20
25 двухполюсников в два ряда (13 + 12)	
$H = 1$, $m = 2$, $N = 13$. Здесь $A = -1.95$, $B = 1.1$, $j = [3/0.57] = 5$, $A + 4B = 2.45$, тогда: $2.45^2 + h^2 = 3.2^2$, откуда $h \approx 2.05852$. Общая длина: $D = 6.5 + 0.2 \cdot 12 +$ $+ 0.2 \cdot 24 = 13.7$. Общая высота: $h + 2H + d_2 \approx 4.2585$. Площадь: ≈ 58.34. *Так как A + h > 0, то учет дополнительного условия не меняет площадь*	$H = 2$, $m = 2$, $N = 13$. Здесь $A = -5.2$, $B = 1.6$, $j = [11.2/1.92] = 5$, $A + 4B = 1.2$, тогда: $1.2^2 + h^2 = 3.2^2$, откуда $h \approx 2.9665$. Общая длина: $D = 13 + 0.2 \cdot 12 +$ $+ 0.2 \cdot 24 = 20.2$. Общая высота: $h + 2H + d_2 \approx 7.1665$. Площадь:≈ 144,76. *С учетом дополнительного условия* $h^* = 5.2$, *тогда:* $h^* + 2H + d_2 = 9.4$, *а площадь: ≈ 189.88*
25 двухполюсников в три ряда (9 + 8 + 8)	
$H = 1$, $m = 3$, $N = 9$. Здесь $A = -1.35$, $B = 1.5$, $j = [3.24/0{,}81] = 4$, $A + 3B = 3.15$, тогда: $3.15^2 + h^2 = 3.6^2$, откуда $h \approx 1.7428$. Общая длина: $D = 4.5 + 0.2 \cdot 16 +$ $+ 0.2 \cdot 24 = 12.5$. Общая высота: $h + 3H + 2d_2 \approx 5.1428$. Площадь ≈ 64.285. *Так как A + h > 0, то учет дополнительного условия не меняет площади*	$H = 2$, $m = 3$, $N = 9$. Здесь $A = -3.6$, $B = 2$, $j = [11.04/2.56] = 4$, $A + 3B = 2.4$, тогда: $2.4^2 + h^2 = 3.6^2$, откуда $h \approx 2.6833$. Общая длина: $D = 9 + 0.2 \cdot 16 +$ $+ 0.2 \cdot 24 = 17$. Общая высота: $h + 3H + 2d_2 \approx 9.0833$. Площадь ≈ 154.42. *С учетом дополнительного условия* $h^* = 3.6$, *тогда:* $h^* + 3H + d_2 =$ *9.8, а площадь ≈ 166.6*

В примерах из вычислительных экспериментов хорошо видно, что при размещении больших двухполюсников учет дополнительного условия делает трехрядное размещение более экономичным, чем двухрядное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры / С. Ю. Лузин, Ю. Т. Лячек, Г. С. Петросян, О. Б. Полубасов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.

2. Определение минимальной ширины канала между парой компонентов при топологической трассировке / А. В. Бессонов, К. А. Кноп, Ю. Т. Лячек, Ю. И. Попов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. №. 10. С. 31–34.

A. V. Bessonov, K. A. Knop, Y. T. Lyachek
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

DECOMPOSITION OF THE PROBLEM OF COMPONENTS PLACEMENT

The method is proposed of placing a multipole and related two-terminal devices in the smallest space with any-angle routing.

PCB, topological routing, component placement

УДК 519.87

С. А. Алмаасали, В. И. Анисимов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Построение распределенных систем автоматизированного проектирования на основе методов диакоптики

Рассматриваются методы построения систем автоматизированного проектирования на основе диакоптических подходов к декомпозиции моделируемой системы. Приводится описание реализации распределенной системы автоматизированного проектирования.

Системы автоматизированного проектирования, диакоптика, моделирование систем, окаймленные матрицы, распределенные системы, интернет-технологии

Одним из перспективных направлений в области дальнейшего развития систем автоматизированного проектирования является внедрение в них интернет-технологий, что позволяет реализовать построение систем с распределенной архитектурой, при которой информационные ресурсы предоставляются потребителям посредством сетевых сервисов [1], [2]. При этом распределенная система может состоять из отдельных модулей, функционирующих независимо и взаимодействующих друг с другом посредством одного из SOA-ориентированных протоколов. При использовании универсально описанных интерфейсов вследствие такой структуры появляется возможность повторного использования программных компонентов, что позволяет снизить трудоемкость разработки САПР.

Использование интернет-технологий при разработке систем автоматизированного проектирования позволяет:

– обеспечить слабосвязаность программного обеспечения, вследствие чего взаимодействие между приложениями не нарушается каждый раз, когда меняется реализация какого-либо сервиса;

– обеспечить взаимодействие на любой платформе между различными приложениями, написанными на любом языке программирования;

– предоставить существующему или унаследованному программному обеспечению сервисный интерфейс без изменения оригинальных приложений;

– адаптировать приложения к условиям проектирования и потребностям заказчика.