

К. т. н. П. И. ДМИТРИЕВ, С. В. ЗУДИН, М. С. ЛУЗИН,
к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия: г. Санкт-Петербург, АО “Авангард”
E-mail: pbas@rol.ru

Дата поступления в редакцию
19.06 2003 г.

Оппонент к. т. н. В. В. СИБИРЯКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

Предложена методика вычисления оптимального расположения компонентов, близкого к расположению, обеспечивающему минимум суммарной длины соединений.

Методы размещения компонентов электронных схем можно условно разделить на две группы — создающие начальное размещение и улучшающие уже существующее. Улучшающие методы, в основном, сводятся к перестановкам компонентов — парным или групповым. В качестве минимизируемого критерия обычно используется суммарная длина связей или, в более поздних вариантах, нагруженность сечений. Методы начального размещения более многочисленны — от чисто топологических до чисто алгебраических. Наиболее распространены методы последовательной установки компонентов на основе связности, методы, основанные на разбиении (чаще всего дихотомическом), методы, основанные на группировании, и методы силового размещения.

Силовое размещение давно входит в список классических методов САПР [1—5], однако по ряду причин на практике используется недостаточно широко. В данной работе обсуждаются нюансы, учет которых позволяет существенно повысить быстродействие и качество получаемых решений по сравнению с традиционными подходами.

Математическая модель силового размещения — квадратичный функционал и минимизирующая его система линейных уравнений — широко использовалась в ранее развитой теории электрических цепей, так что аппарат исследован всесторонне.

Функционал Φ выражает сумму квадратов длин проводников —

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

где x, y — координатные векторы для контактов компонентов;

a_{ij} — представляет связность компонентов i и j .

Функционал имеет единственный минимум, который можно найти, приравняв нулю все частные производные:

$$\frac{\delta\Phi}{\delta x_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij}(x_i - x_j) = 0;$$

$$\frac{\delta\Phi}{\delta y_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij}(y_i - y_j) = 0.$$

После очевидных преобразований получим следующие равенства:

$$x_i = \frac{\sum_j a_{ij}x_j}{\sum_j a_{ij}}; \quad y_i = \frac{\sum_j a_{ij}y_j}{\sum_j a_{ij}}. \quad (1)$$

Правые части этих равенств аналогичны известным формулам вычисления центра масс системы материальных точек.

В [3] показано, что силовое размещение позволяет уложить на плоскости планарную точечную модель схемы без пересечений, что является сильным аргументом в пользу применения этого метода, например, для схем с однослойной коммутацией.

Однако следует сделать несколько замечаний.

1. Не всем авторам известно, что существуют быстрые итерационные способы решения приведенной системы уравнений, которые не требуют обращения матриц [3, 4, 6].

Задача размещения может быть решена путем последовательного расчета оптимальных положений каждой ячейки, считая остальные ячейки неподвижными. Это соответствует процедуре покоординатного спуска. Для получения хорошего приближения достаточно всего нескольких уточняющих итераций. Число необходимых итераций зависит от близости начального расположения ячеек к оптимальному, от диаметра графа связей и от порядка обработки ячеек. Число операций на каждой итерации пропорционально числу ненулевых элементов матрицы \mathbf{A} , т. е. числу связей. Коэффициенты связи a_{ij} в процессе расчета не изменяются.

2. Силовое размещение дает приемлемое решение только для весьма специфических сетей, на реальных же примерах компоненты имеют тенденцию перекрываться, поэтому полученное силовым методом решение всегда нуждается в коррекции. Для этого используются методы дискретизации координат компонентов, например, метод приведения по квадрантам.

3. Силовое размещение минимизирует сумму квадратов длин и, вопреки утверждениям некоторых авторов, не обеспечивает глобального минимума суммарной длины проводников.

Поясним последнее замечание более подробно, рассмотрев одномерный случай.

Пусть имеется пара закрепленных с интервалом n компонентов и требуется разместить компонент, связанный с ними. Если размещаемый компонент имеет одинаковое количество связей с закрепленными компонентами, то оптимум, определяемый по формулам (1), находится посередине между ними (рис. 1).

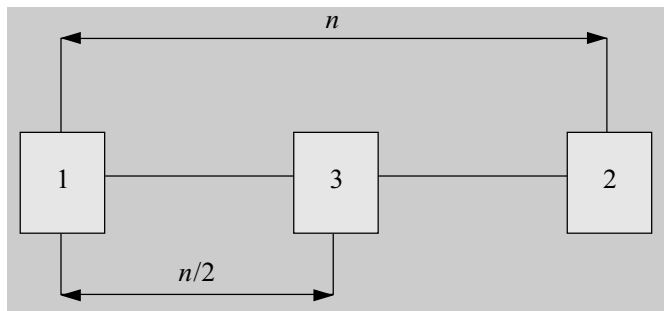


Рис. 1. Силовое размещение компонента (равное число связей с закрепленными компонентами)

Если число связей с размещаемыми компонентами не одинаково, то оптимальная для размещения компонента точка лежит на прямой, соединяющей размещенные компоненты, на расстоянии от них, обратно пропорциональном числу связей размещаемого компонента с размещенным (рис. 2). Таким образом, координаты оптимума зависят как от расстояния между размещенными компонентами, так и от числа связей с ними размещаемого компонента.

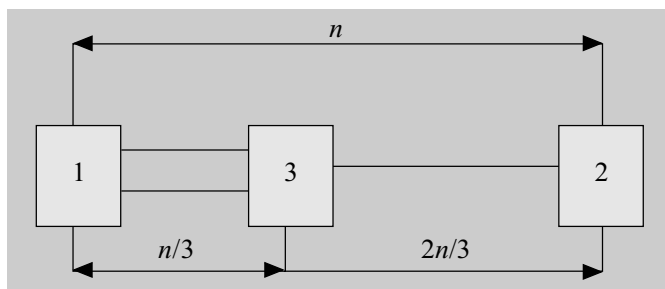


Рис. 2. Силовое размещение компонента (неравное число связей с закрепленными компонентами)

Если же критерием оптимальности является суммарная длина соединений, то при равном числе связей размещаемого компонента с парой размещенных перемещение его вдоль отрезка, соединяющего центры размещенных компонентов, не изменяет суммарной длины соединений. Оптимумом является любая точка этого отрезка (интервал между размещенными компонентами), а не одна точка посередине. И хотя суммарная длина не изменяется, перемещение без уменьшения длины дает дополнительные возможности для оптимизации размещения.

Когда же число связей с размещаемыми компонентами не одинаково, то минимум суммарной длины обеспечивается размещением в непосредственной близости от компонента, связанного с размещаемым максимальным числом связей, — вне зависимости от числа связей и координат другого компонента (рис. 3). Смещение от этой позиции увеличивает суммарную длину соединений.

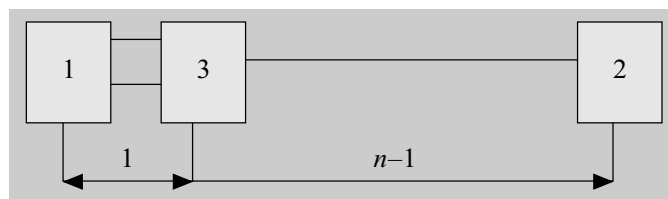


Рис. 3. Оптимальное размещение компонента по критерию минимума суммарной длины соединений

Процесс размещения итерационный. На каждой итерации происходит расчет координат компонентов в текущей области размещения на основе квадратичного функционала. После этого происходит разделение области размещения на две области и осуществляется следующая итерация для каждой из областей. При дискретизации решения, основанной на разбиении монтажного пространства, оптимальная точка легко может оказаться за пределами области размещения. В этом случае несоответствие критериев особенно сильно отражается на результате размещения.

Для снижения влияния указанного негативного фактора предлагается при подсчете использовать не координаты закрепленных компонентов, лежащих за пределами допустимой области размещения, а координаты проекций их контактов на область размещения (рис. 4). То есть если в некоторой области имеются компоненты, связанные с компонентами, находящимися в других областях, то в расчете

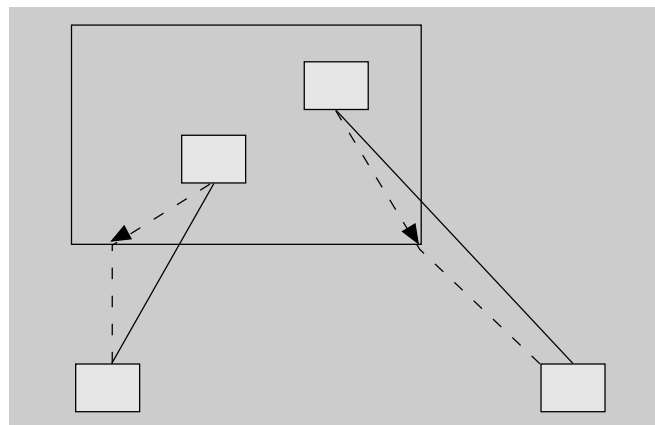


Рис. 4. Коррекция координат компонентов

учитывается квадрат расстояния не до такого компонента, а до его проекции на область размещения. Поскольку после каждого разделения размеры области размещения уменьшаются, то происходит постепенная коррекция координат компонентов, приближающая их к точке, оптимальной по критерию минимальной суммарной длины.

На рис. 5 приведен пример одномерного случая с равномерным разбиением области размещения (в данном случае интервала).

Важно подчеркнуть, что, в отличие от традиционных подходов [6], при расчете используются координаты контактов, а не центров компонентов. Кроме того, при перемещении компонента проверяются все восемь (с учетом стороны установки) возможных его ориентаций с перестроением связывающих деревьев и выбором лучшего варианта.

При дискретизации координат компонентов область размещения разбивается на части, площадь ко-

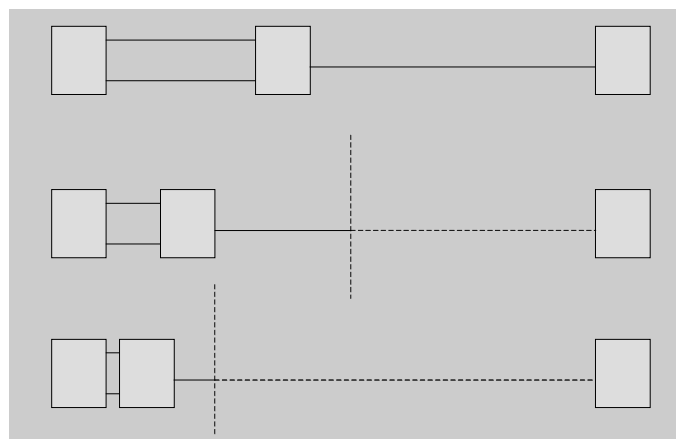


Рис. 5. Иллюстрация коррекции силового размещения

торых пропорциональна площади попавших в них компонентов, причем традиционный подход заключается в разделении области (прямоугольной) поперек длинной стороны с чередованием соответственно вертикальных и горизонтальных разрезов.

В отличие от традиционного подхода, описываемая методика предполагает разбиение с учетом размеров и ориентации компонентов, поэтому возможны ситуации, когда осуществляются несколько вертикальных или горизонтальных разбиений подряд.

Кроме того, при вычислении площади области вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие число задействованных контактов каждого из компонентов, что позволяет многоконтактным компонентам получить добавочный ресурс, необходимый для прокладки соединений.

Для многозвенных цепей вычисляются кратчайшие связывающие деревья [7], и в расчетах участвуют только звенья этих деревьев, а не полные графы для каждой из цепей, как в большинстве реализаций.

Таким образом, предложенная методика включает:

- вычисление оптимального расположения компонента, близкого к расположению, обеспечивающему минимум суммарной длины соединений, но обладающего меньшей комбинаторной сложностью;
- дискретизацию решения с учетом размеров, ориентации компонентов и числа задействованных контактов;
- построение (перестроение) кратчайших связывающих деревьев каждой из цепей.

Реализация методики с учетом указанных нюансов позволила получить достаточно эффективную программу автоматического размещения компонентов AuTOP (AuTO Placer).

При запуске программы начинается автоматический поиск вариантов размещения. На первой итерации используются координаты компонентов исходного варианта размещения. Если компоненты предваритель-

но не размещались, то все они расположены в точке с координатами (0,0), и кратчайшие деревья для цепей мало отличаются от случайных.

Последующие итерации используют кратчайшие связывающие деревья, полученные на основе предыдущего размещения компонентов. Размещение продолжается, пока пользователь не остановит этот процесс. Во время размещения пользователю предоставляется возможность видеть лучший (по критерию длины соединений) результат. Если полученный результат удовлетворяет пользователя, то он останавливает процесс размещения, сохраняет его и переходит к следующим этапам проектирования.

О быстродействии программы позволяет судить приведенная **таблица**.

Число компонентов	Суммарное число контактов	Число вариантов за 1 мин
37	554	2714
150	1187	383
367	1745	144

Программа AuTOP позволяет быстро найти приемлемый вариант взаимного расположения компонентов, но она не контролирует соблюдение конструктивно-технологических ограничений. Поэтому варианты плат с высокой плотностью компоновки, полученные с помощью программы автоматического размещения, обычно нуждаются в редактировании для ликвидации нарушений (узких мест и пересечений контуров компонентов). Обычно для этого достаточно нескольких минут.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств.— М.: Сов. радио, 1977.
2. Тетельбаум А. Я. Силовое размещение планарного графа // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.— 1988.— № 3.— С. 131—137.
3. Тетельбаум А. Я. Об одном методе оптимального размещения конструктивных единиц и внешних контактных площадок / В кн.: Автоматизация проектирования в электронике. Вып. 11.— Киев: Техника, 1975.— С. 98—103.
4. Петренко А. И., Тетельбаум А. Я. Формальное конструирование электронно-вычислительной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1979.
5. Полубасов О. Б., Зудин С. В. К вопросу о квадратичном размещении ячеек на БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 5—6.— С. 10—13.
6. Parakh Ph. N., Brown R. B., Sakallah K. A. Congestion driven quadratic placement / 35th Design Automation Conference.— San Francisco, Calif.— 1998.— P. 275—278.
7. Зудин С. В., Лузин С. Ю., Полубасов О. Б. Выбор конфигурации соединения компонентов электронных схем до этапа размещения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4—5.— С. 3—6.