УДК 658.512.011.56

Оптимизация форм и размеров проводников в процессе сжатия топологии

А.С. Плеханов

Nangate, apl@nangate.com

***Аннотация* — В статье предложен метод оптимизации форм и размеров проводников во время сжатия топологии путем определения положения их границ в пределах допустимых интервалов. Метод используется в субмикронных топологиях, в которых проводники представлены в виде полигонов.**

***Ключевые слова* — компакция топологии, улучшение электрических характеристик схемы, описание топологии в виде полигонов.**

I. Введение

Сжатие (компакция) топологии является важной процедурой в САПР интегральных микросхем. В задачу компакции входит не только уменьшение площади, занимаемой схемой, но и улучшение характеристик схемы путем оптимизации форм и размеров проводников. Появление новых технологий требует описания топологии как множества полигонов, расположенных в нескольких слоях. В данной статье предложен метод, позволяющий оптимизировать размеры и форму таких полигонов.

Классический метод одномерной компакции использует граф ограничений. Известно [1], что граф ограничений представляет собой направленный, взвешенный граф G=(N,E), где N - множество вершин, E - множество ребер. Каждая вершина графа соответствует некоторому объекту топологии и характеризуется его координатой. Ребро описывает множество ограничений между парами объектов и имеет длину L, равную длине максимального ограничения между соответствующими объектами. Ограничения возникают из-за технологических правил, таких, как минимальное расстояние между объектами, конструкции некоторых объектов, например, шин земли и питания и ограничений, накладываемых разработчиком данной топологии. Соответствующие ребрам неравенства имеют вид:

$$X_j - X_k \geq L_i, \tag{1}$$

где L_i - длина ребра между вершинами графа, имеющими координаты X_j и X_k. Традиционный подход к описанию топологии предполагает представление проводников в виде множества прямоугольников. Часть таких прямоугольников имеют фиксированные размеры и называются терминалами, другие прямоугольники могут менять размер по одному направлению и называются сегментами проводников.

Компакция топологии заключается в определении минимально возможных координат объектов путем вычисления минимальных координат вершин графа, соответствующих этим объектам. После компакции топологии, длины некоторых сегментов увеличиваются, что приводит к ухудшению электрических характеристик схемы, в частности, к увеличению задержек. Поэтому, после этапа компакции включают этап минимизации суммарной задержки сигналов, возможной за счет того, что многие объекты имеют некоторый диапазон допустимых координат [2]. Варьируя координатами объектов в этих диапазонах, можно оптимизировать задержку сигналов. Математически задача сводится к поиску минимума функции вида:

$$f = \sum_i W_i (X_j - X_k), \tag{2}$$

где производится суммирование по всем сегментам проводников, X_j, X_k - координаты вершин графа, соответствующие топологическим объектам, подключенным к данному сегменту проводника, W_i - некоторый параметр, характеризующий проводник и зависящий от его ширины, удельного сопротивления и удельной емкости слоя, в котором он находится. При минимизации этой целевой функции, необходимо учитывать ограничения, накладываемые на координаты вершин, выраженные ребрами графа (1).

Минимизация подобных функций может производиться с помощью Симплекс-метода [3]. Однако, специфика данной задачи позволяет осуществлять минимизацию целевой функции значительно быстрее и с использованием существенно меньшего объема оперативной памяти на основе самого графа ограничений, поскольку все неравенства (1) содержат только две переменные, причем коэффициенты при этих переменных равны +1 или -1. Это достигается за счет следующих упрощений:

1) Начальное допустимое решение получается путем ранжирования графа, что значительно быстрее, чем алгоритм, используемый в стандартном Симплекс-методе.

2) Переход от одного допустимого значения к другому сводится к анализу ребер и изменению координат группы вершин, в то время как в Симплекс-методе необходимо построение и анализ специальных таблиц на основе множества неравенств, количество которых в случае сжатия топологии может превышать десятки тысяч.

При использовании графа ограничений, задача решается путем построения леса деревьев с вершинами, имеющими фиксированную координату в корне каждого дерева. Для каждой вершины k в графе ограничений вычисляется вес как сумма по всем сегментам проводов, подключенным к объектам топологии, описываемым данной вершиной, который может быть получен дифференцированием формулы (2) по переменной, представляющей координату этой вершины, и взятый с обратным знаком:

$$g_k = \sum_i \pm W_i \quad (3)$$

Знак плюс ставится перед весом, описывающим сегмент провода, если данный сегмент уменьшается при увеличении координаты вершины, и знак минус в противоположном случае. Вес вершины показывает направление перемещения объектов топологии, описываемых этой вершиной, для уменьшения значения целевой функции. В случае перемещения нескольких вершин их вес вычисляется как алгебраическая сумма весов вершин, входящих в эту группу. С помощью построенного леса деревьев, выбираются группы вершин, изменение координат которых, с учетом ограничений, приводит к уменьшению значения целевой функции. После каждого перемещения группы, лес деревьев перестраивается и ищется новая группа для перемещения. За конечное число итераций достигается такая комбинация координат вершин (и соответствующих топологических объектов), при которой целевая функция принимает минимальное значение. Данный алгоритм является очень эффективным и не требует дополнительных затрат оперативной памяти [4].

II. Формулировка проблемы

С появлением новых технологий, описание топологии в виде терминалов и сегментов проводников становится невозможным. На смену ему приходит описание, основанное на полигонах. При этом возникают специфические проблемы, связанные с оптимизацией таких полигонов с точки зрения самой процедуры сжатия и электрических характеристик получаемых результатов. В случае описания топологии с помощью полигонов теряется разделение объектов на терминалы и сегменты проводов. Кроме того, в этом случае вершинам графа соответствуют не терминалы, а ребра полигонов, перпендикулярные направлению компакции (рис. 1).

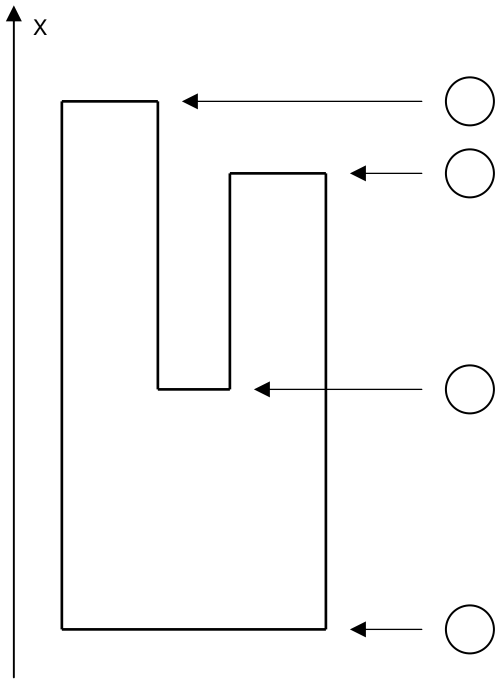

Рис. 1. Полигон и вершины графа

Поскольку понятие сегмента провода исчезает, необходимо найти целевую функцию, минимизация которой улучшает форму и размеры проводников, а также электрические характеристики всей схемы.

В роли целевой функции можно попробовать использовать сумму площадей всех полигонов, взятых с соответствующими слою коэффициентами. Преимуществами такой целевой функции является ее простота и соответствие целевой функции, используемой для топологии, описываемой терминалами и сегментами проводников, где минимизация длины сегмента проводника означает минимизацию площади, поскольку ширина проводника фиксирована. Однако, такой подход наталкивается на определенные трудности, заключающиеся в том, что в полигонах, содержащих короткие ребра, возникают впадины, что нежелательно с точки зрения электрических характеристик, а также может приводить к нарушениям технологических правил, если длина таких ребер меньше минимально допустимого расстояния между объектами в данном слое (рис. 2).

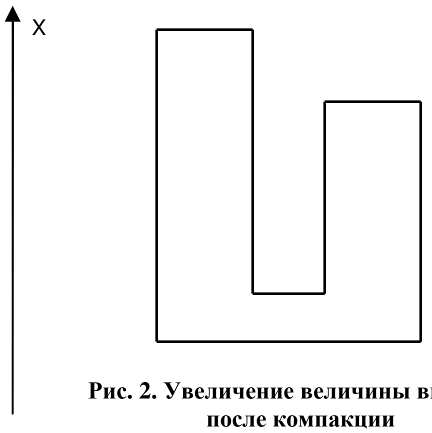

Рис. 2. Увеличение величины впадины после компакции

В качестве целевой функции можно использовать следующую формулу:

$$f = \prod_i S_i^{V_i} P_i^{H_i} \ , \tag{4}$$

где Si - площадь, Pi - периметр полигона, Vi, Hi - некоторые коэффициенты. Однако, в данной статье в качестве целевой функции предлагается использовать следующую формулу, которая получена логарифмированием предыдущей:

$$f = \sum_i K_i S_i + M_i P_i \ , \tag{5}$$

где f – безразмерная целевая функция, Mi, Ki – весовые коэффициенты, имеющие размерность обратную длине и обратную квадрату длины соответственно. Данная формула дает целевую функцию в общем виде, позволяя задавать приоритет минимизации площади и/или периметра полигонов в зависимости от соответствующих коэффициентов. Данные коэффициенты могут зависеть как от слоя, в котором лежит полигон, так и являться функцией от длин сторон полигона. Необходимо определить, как будет изменяться данная целевая функция при изменении координат вершин графа ограничений и координат соответствующих им сторон полигонов. Если окажется, что данная функция является линейной, то возможно воспользоваться математическим аппаратом минимизации целевой функции, аналогичным тому, который был разработан для работы с графом ограничений, показанным выше. Для того, чтобы найти эту функцию, примем во внимание следующие соображения.

Поскольку используется одномерная компакция, длины сторон полигонов, перпендикулярные направлению компакции (которым ставится в соответствие вершины графа ограничений), не изменяются. Соответственно, площадь полигона будет пропорциональна длинам таких ребер. Поэтому вес вершины графа ограничений должен быть пропорционален длине этого ребра полигона. При таком определении, при изменении координаты вершины графа (и координаты соответствующей стороны полигона) площадь будет пропорциональна этой координате со знаком плюс или минус в зависимости от того, увеличивается или уменьшается площадь полигона при увеличении координаты вершины. Очевидно, что одиночный полигон должен иметь сумму весов всех вершин, равную нулю. Данное выше определение соответствует этому факту. При учете длины периметра в целевой функции заметим, что периметр будет пропорционален длинам сторон полигона, параллельным направлению компакции. Этот вес, соответствующий минимизации периметра, должен быть добавлен к весу двух вершин графа ограничений, которые соединены этой стороной со знаком плюс или минус (рис. 3).

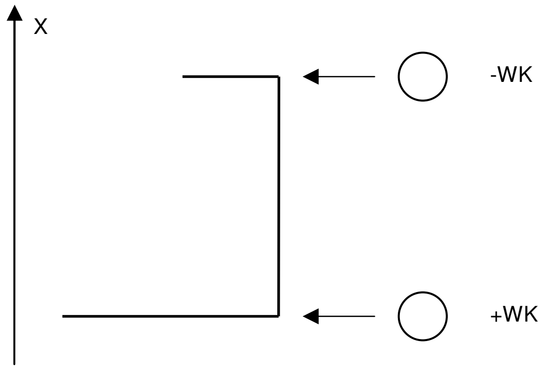

Рис. 3. Учет длины периметра в весе вершин

Необходимо также умножить оба слагаемых, входящих в целевую функцию, на коэффициент, задающий важность минимизации полигонов в соответствующем слое и зависящий от удельной проводимости и удельной емкости слоя, в котором находится полигон. Таким образом, формула (5) может быть записана в следующем виде:

$$f = \sum_m W_m L_m (X_j - X_k) + W_m K_m (X_j - X_k) \ , \tag{6}$$

где Wm – коэффициент для слоя, Lm – длина стороны полигона, перпендикулярного компакции, Km – весовой коэффициент целевой функции, X_j, X_k - координаты вершин графа.

Данная формула является линейной относительно координат вершин графа. Поэтому возможно использовать процедуру оптимизации, которая была разработана для графа ограничений, применявшегося для топологий, описываемых терминалами и сегментами проводников. Отличие состоит только в вычислении величин весов вершин графа. В данном случае вес вершины будет определяться формулой:

$$g = \sum_{n} \pm W_i L_n \pm W_i K_i \, . \qquad (7)$$

Следует заметить, что хотя коэффициент K может иметь любое значение, в большинстве случаев его можно задать, основываясь на следующем факте – впадины в полигонах, размер которых меньше минимально допустимого расстояния между сторонами полигона (spacing), должны уменьшаться в процессе оптимизации, а остальные увеличиваться (рис. 4).

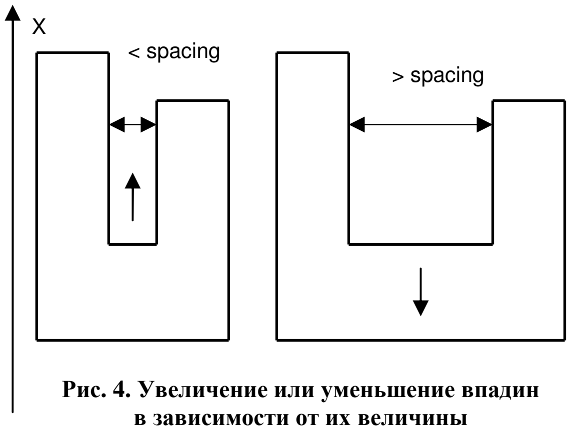

Рис. 4. Увеличение или уменьшение впадин в зависимости от их величины

Этого можно достичь, если коэффициент K выбрать равным S / 2, где S - минимально допустимое расстояние между сторонами полигона для слоя, в котором лежит полигон. В случае, если длина стороны полигона больше, чем минимально допустимое расстояние, первое слагаемое, ответственное за минимизацию площади, будет больше, чем второе, ответственное за минимизацию периметра, и общий вес вершины будет соответствовать увеличению такой впадины при минимизации целевой функции. В случае, если длина стороны полигона меньше, чем минимально допустимое расстояние, первое слагаемое будет меньше, чем второе, и общий вес вершины будет соответствовать уменьшению значения целевой функции при уменьшении такой впадины. Формулу (6) можно переписать в виде:

$$f = \sum_{m} W_m L_m (X_j - X_k) + W_m S_l (X_j - X_k)/2 \, . \qquad (8)$$

Данная формула содержит параметры S – минимально допустимое расстояние, которое можно получить непосредственно из технологии, и параметры W также для каждого слоя, которые вычисляются на основании удельного сопротивления и емкости слоя или передаются как внешние параметры.

Таким образом, для топологий, описывающих проводники как полигоны, возможно использование очень эффективного алгоритма оптимизации на графе ограничений, если вершинам графа соответствуют стороны полигонов, перпендикулярные направлению компакции, а веса вершин вычисляются по формуле (7).

III. Заключение

В данной статье предложен метод оптимизации форм и размеров проводников в процессе сжатия топологий, в котором проводники представлены в виде полигонов. Предложена целевая функция оптимизации и показано, как вычисляются соответствующие коэффициенты в этой функции на основе длин сторон полигонов. Также показано, что процедура оптимизации, основанная на графе ограничений и использованная ранее для оптимизации топологий, описываемых при помощи терминалов и сегментов проводников, также может быть использована и для топологий, описываемых с помощью полигонов. Рассмотрена проблема и предложено решение минимизации впадин во время компакции. Данный алгоритм оптимизации был реализован и использован в системе автоматического создания библиотек стандартных ячеек на этапе компакции топологий. Время работы алгоритма не превышает одной секунды для стандартных ячеек, содержащих порядка ста транзисторов, при использовании на рабочей станции с процессором Pentium IV частотой 3 Ггц и оперативной памятью 4 гигабайта.

Литература

1. Chi-Yuan Lo, Ravi Varadarajan An O(nlog(n)). Compaction Algorithm, 27th ACM/IEEE Design Automation Conference, 1990, pp. 382-387.
2. Sching L.Lin Jonathan Allen. Minplex - A compactor that minimizes the boundary rectangle and individual rectangles in a layout. // Proceeding of the 23rd Design Automation Conference, 1986, pp. 123 - 130.
3. В.В.Лесин, Ю.П.Лисовец. Основы методов оптимизации. М.: изд. МАИ, 1995. С. 154-186.
4. А.С. Плеханов. Метод минимизации задержек сигналов при сжатии топологии с учетом технологической сетки. Автоматизация и современные технологии. 2001. № 1. С. 20-26.