

О трудностях сравнения систем трассировки

ЭТАП ТРАССИРОВКИ ЯВЛЯЕТСЯ ОДНИМ ИЗ САМЫХ ТРУДОЕМКИХ ЭТАПОВ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ. СЕГОДНЯ НА РЫНКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ САПР ПРИСУТСТВУЮТ ДЕСЯТКИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ: ОТ ПРОСТЕЙШИХ РЕДАКТОРОВ ДО СИСТЕМ, АВТОМАТИЗИРУЮЩИХ ВСЕ ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ. ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ОБЫЧНО ГОВОРЯТ О СООТНОШЕНИИ “ЦЕНА/КАЧЕСТВО”. И ЕСЛИ В СРАВНЕНИИ ЦЕН ВСЁ ПРОСТО, ТО В ОТНОШЕНИИ КАЧЕСТВА НЕ ВСЁ ТАК ОДНОЗНАЧНО. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПРОДУКТА, ТАКИЕ, НАПРИМЕР, КАК УДОБСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА, МЫ ОБСУЖДАТЬ НЕ БУДЕМ, ПОСКОЛЬКУ ПОДЧАС ТРУДНО ОТДЕЛИТЬ ОБЪЕКТИВНЫЕ ДАННЫЕ ОТ СУБЪЕКТИВНЫХ. ТАК, НАПРИМЕР, ПРИВЫЧКА К ОСОБЕННОСТЯМ КОНКРЕТНОГО РЕДАКТОРА МОЖЕТ ОКАЗАТЬСЯ РЕШАЮЩИМ ФАКТОРОМ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА. ОЦЕНИВАТЬ БУДЕМ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТОПОЛОГИИ ИЗДЕЛИЯ И ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОЦЕДУР АВТОМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ТОПОЛОГИИ: ПРОЦЕНТ НЕРАЗВЕДЕННЫХ ТРАСС, ЧИСЛО ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ, СУММАРНАЯ ДЛИНА ПРОВОДНИКОВ И ВРЕМЯ РАЗВОДКИ. ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ УКАЗАННЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕОБХОДИМО СОБЛЮДАТЬ ОГРАНИЧЕНИЯ, ТАКЖЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ НОРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ.

Сложность сравнения результатов работы различных трассировщиков заключается не только в том, что трудно выбрать весовые коэффициенты для противоречивых критериев, но и в том, что существенные различия моделей и алгоритмов, применяемых в системах трассировки, не позволяют осуществлять однозначное сравнение.

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА

Процент автоматически проложенных соединений

Заметим, что данный критерий не несет информации о качестве топологических решений, как в целом, так и для каждого отдельного проводника. Кроме того, он может адекватно характеризовать лишь результат работы трассировщиков, осуществляющих бесконфликтную разводку (PCAD, Blaze Router и т.д.).

Другие трассировщики (MAXROUTE, SPECCTRA и т.д.) при прокладке трасс вначале разрешают проводникам пересекаться и прокладывают их с малыми зазорами, а затем производят несколько циклов оптимизации, перекладывая проводники и увеличивая зазоры, где возможно. Так, при оптимизации учитываются нужды всех проводников, а не

только уже проложенных. Результат работы подобных трассировщиков характеризуется числом трасс, проведенных без нарушений, причем нарушением является как пересечение трасс, так и несоблюдение зазоров. Понятно, что устранить нарушение (локальный конфликт) обычно намного легче, чем провести всю трассу. Кроме того, далеко не все нарушения являются фатальными. Например, несоблюдение зазора в ряде случаев может быть устранено на этапе подготовки плат к производству путем подрезки проводника или контактной площадки.

Топологический трассировщик TopoR (от TOPOlogical Router) — Windows версия FreeStyle Router [1-3] — использует два режима разводки: с полным контролем конструктивно-технологических ограничений и с частичным контролем. В режиме с частичным контролем между незакрепленными компонентами величина зазора не фиксируется и может варьироваться в некоторых пределах. Это позволяет провести между незакрепленными компонентами большее число трасс в расчете на последующую разводку. Топологический трассировщик не допускает пересечений трасс в одном и том же слое даже на ранних стадиях оптимизации топологии. Несоблюдение зазора хоть и фиксируется как

нарушение, однако в большинстве случаев средства топологического редактирования и автоматического перемещения компонентов без нарушения целостности разводки позволяют устранить подобные нарушения в считанные секунды.

Таким образом, во-первых, при сравнении результатов трассировки нельзя отождествлять число неразведенных трасс и число трасс, проведенных с конфликтами, а во вторых, ни то, ни другое число не несет информации о принципиальной возможности получить 100%-разводку без нарушений (например, с помощью ручного редактирования) и о трудоемкости получения подобного результата.

Число переходных отверстий

Особую сложность в электронных САПР представляет проблема минимизации количества межслойных переходов. В [4] утверждается: “Если допустить возможность введения переходов в произвольных точках связывающих деревьев, задача расщепления с минимизацией числа переходов становится, по-видимому, чрезвычайно трудной”. На практике стараются прокладывать участки проводников строго ортогонально — вертикально в одном слое и горизон-

тально в другом, — а лишние переходы удаляют только после завершения трассировки. Причём простейшим способом: фрагмент трассы переносится из одного слоя в другой, если при этом уменьшается число переходов. Возможности такой процедуры весьма скромные, обычно получается значительно больше переходов, чем необходимо. Огромное количество избыточных переходов ухудшает параметры изделия. Существенно увеличивается трудоемкость изготовления.

При повышении рабочей частоты переходные отверстия становятся источником неоднородностей в линии передачи, что отражается на работоспособности высокоскоростных плат (сотни МГц). Завышенное число межслойных переходов приводит к неэкономному использованию площади подложки. Важно даже не то, что обычно диаметр межслойного перехода существенно превосходит ширину проводника, и при этом переход занимает место как минимум в двух слоях, а то, что оккупируя пространство в нескольких слоях, переход является разделителем трасс в этих слоях, что препятствует уплотнению топологии и экономному использованию ресурсов монтажного пространства. Этот фактор совершенно напрасно недооценивается разработчиками аппаратуры.

В программируемых БИС в качестве межслойных переходов выступают программируемые переключатели, вносящие существенную задержку сигнала в цепи, что в ряде случаев может привести к неверному срабатыванию логических элементов. В подобных устройствах необходима не только минимизация числа межслойных переходов, но и обеспечение одинаковости их количества в связях, инцидентных входам одного и того же логического элемента.

Критерий минимума числа межслойных переходов является объективным показателем качества разводки, однако, поскольку зачастую минимизация числа переходных отверстий достигается за счет увеличения длины трасс, сравнивать варианты с близкими количествами межслойных переходов можно лишь при близких значениях суммарной длины проводников.

Длина проводников

Суммарная длина проводников также является весьма важным показателем качества трассировки. Завышенная суммарная длина проводников приводит к неэкономному использованию ком-

мутационных ресурсов монтажного пространства, не позволяя в ряде случаев получить 100%-реализацию печатных соединений на плате.

Однако знание значения суммарной длины проводников не позволяет судить о качестве трассировки. Более объективным показателем является превышение суммарной длины соединений над суммарной длиной кратчайших связывающих деревьев (или деревьев Штейнера) как в целом, так и для отдельных проводников.

При увеличении длины проводников в общем случае возрастают значения паразитных параметров проводников (емкость, индуктивность) и уровень паразитных связей между ними, что может сказаться на работоспособности устройства и потребовать внесения схемных или конструктивных изменений. “В общем случае перекрестные возмущения прямо пропорциональны волновому сопротивлению, частоте и длине линии и обратно пропорциональны расстоянию между проводниками [5]”. Это означает, что необходимо уменьшать длину проводников и уровень параллельности трасс, а расстояние между параллельными участками — увеличивать. При этом увеличение зазора между данным проводником и взаимодействующими с ним проводниками приводит к тому же эффекту, что и уменьшение длины взаимодействующих участков проводника.

Преобладающая в большинстве трассировщиков тенденция назначения на слой проводников близких направлений прямо противоречит требованиям электромагнитной совместимости. Подобный подход как раз приводит к наличию большого количества протяженных параллельных участков проводников.

При топологической трассировке отсутствуют преимущественные направления трассировки в слое, трассировка ведется в произвольных направлениях, а не только под углами, кратными 45° , поэтому в получаемой топологии и суммарная длина трасс, и уровень их параллельности существенно меньше, чем в топологии, полученной с помощью любого другого трассировщика. Кроме того, возможность задания наряду с минимальными зазорами (в узких местах) номинальных (во всех остальных местах), а также возможность автоматической и интерактивной раздвижки и сжатия топологии без нарушения целостности разводки позволяет в широких пределах варьировать геометрические параметры, а следовательно, и уровень элек-

тромагнитных помех, даже без изменения топологического плана.

Время разводки

При сравнении результатов разводки печатных плат с близкими значениями метрических критериев далеко не последним критерием является время получения результата автоматической трассировки. Однако и с этим параметром нет однозначности.

Так, например, TороR, в отличие от других трассировщиков, осуществляет параллельную оптимизацию нескольких альтернативных вариантов топологии, различающихся значениями оптимизируемых параметров, и пользователь вправе выбрать одну или несколько понравившихся ему топологических конфигураций. Возможно, корректнее было бы разделить время трассировки на число вариантов, однако и здесь нет однозначности, поскольку число вариантов, участвовавших в оптимизации, и число вариантов, оставшихся на момент остановки, могут сильно различаться.

НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА

Выбор стратегии трассировки

Большинство трассировщиков используют какую-нибудь одну модель представления коммутационного пространства печатной платы и трассируемой схемы. Необходимость учета в рамках единственной модели всех многочисленных технологических требований существенно увеличивает её сложность и размерность. В свою очередь, высокая сложность модели заставляет выбирать для решения задачи трассировки наиболее простые алгоритмы, не способные учесть нюансы задачи, иначе время решения задачи становится непомерно большим. Примитивность алгоритмических решений заставляет, в свою очередь, прибегать к ухищрениям, позволяющим в ряде случаев несколько повысить качество разводки.

Во многих системах понятие “стратегия трассировки” включает не только задание конструктивно-технологических ограничений, таких как толщина проводников и зазоры между элементами топологии (проводниками, контактными площадками, барьерами и т.д.). Наряду с необходимой информацией, без которой трассировщик не может получать адекватные результаты, в стратегии трассировки обычно содержится и инфор-

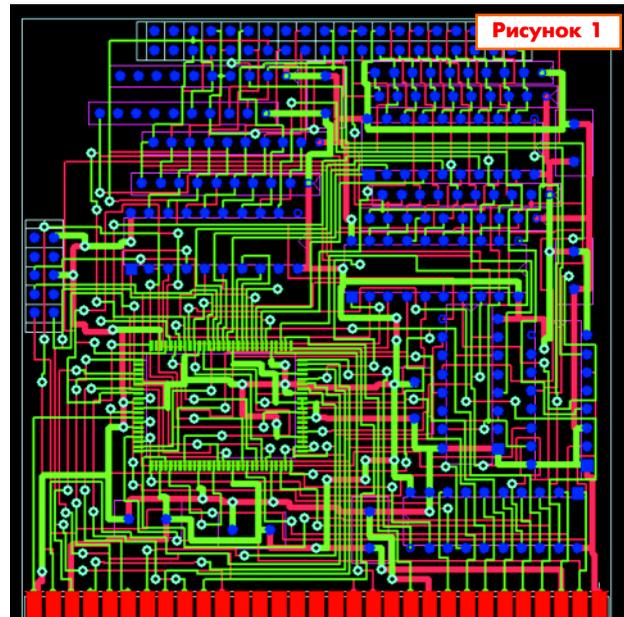


Рисунок 1

Плата, разведенная с помощью shape-based трассировщика

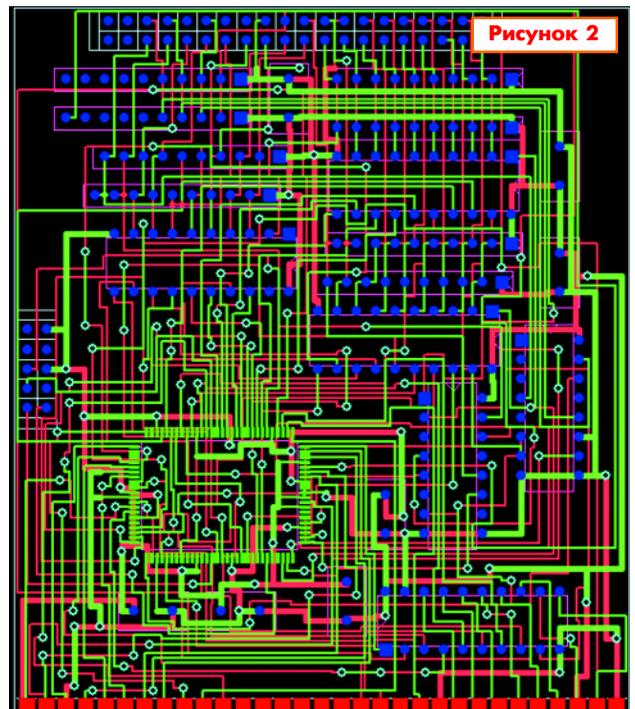


Рисунок 2

Плата, разведенная с помощью shape-based трассировщика после увеличения зоны трассировки

мация, управляющая процессом трассировки.

В стратегии трассировки осуществляется назначение трасс на слои. Там же задается последовательность чередования процедур: трассировка памяти, обычная трассировка, процедуры *rip-up* (разрыв и перекладка трасс) и *push and shove* (раздвижка и отталкивание ранее проведенных трасс при прокладке проводника), а также число проходов каждой из процедур. В стратегии определяется конфигурация многоконтактных трасс (без ветвлений, с разветвлениями только на контактах, с введением дополнительных точек ветвления) и порядок их прокладки (сначала длинные, потом короткие или наоборот).

В ряде систем для трассировки схем с планарными компонентами предусмотрена возможность генерации переходных отверстий рядом с контактными площадками компонентов и соединения их короткими проводниками (Fan Out). При использовании сеточных трассировщиков это мера вынужденная, так как в противном случае, в связи с последовательным характером прокладки трасс и отсутствием анализа необходимых коммутационных ресурсов, слишком велика вероятность блокировки контактов, следствием чего является низкий процент разведенных трасс. В то же время, это вносит определенную «жесткость», поскольку заранее фиксирует направление подхода проводника к конкретному контакту компонента.

Для некоторых фирм сложная стратегия трассировки — предмет особой

гордости. Так, например, сотрудники фирмы ALTIUM пишут в статье [6]: «Файлы стратегии трассировщика Situf являются на сегодняшний день одними из самых сложных. Они воплощают в себе многолетний опыт исследований в области автоматической трассировки печатных плат».

Наличие файлов стратегии, особенно сложных, создает у пользователя иллюзию возможности управления процессом трассировки путем изменения значений тех или иных параметров. При этом ответственность за некачественный результат разводки автоматически перекладывается на пользователя (неправильно установлены параметры). Немало пользователей тратят время на многочисленные эксперименты, пытаясь найти секрет «хорошей» стратегии, как в средние века алхимики пытались найти философский камень.

Что трассировать сначала — длинные или короткие трассы? Соединять ли эквипотенциальные контакты, имеющие одинаковое значение одной из координат (трассировка памяти)? Какие весовые коэффициенты задавать для трасс, идущих в различных направлениях в разных слоях? Как лучше назначить трассы на слои? Как выбрать весовые коэффициенты для переходных отверстий и для трасс, идущих в различных направлениях? — На эти вопросы нельзя дать однозначного ответа.

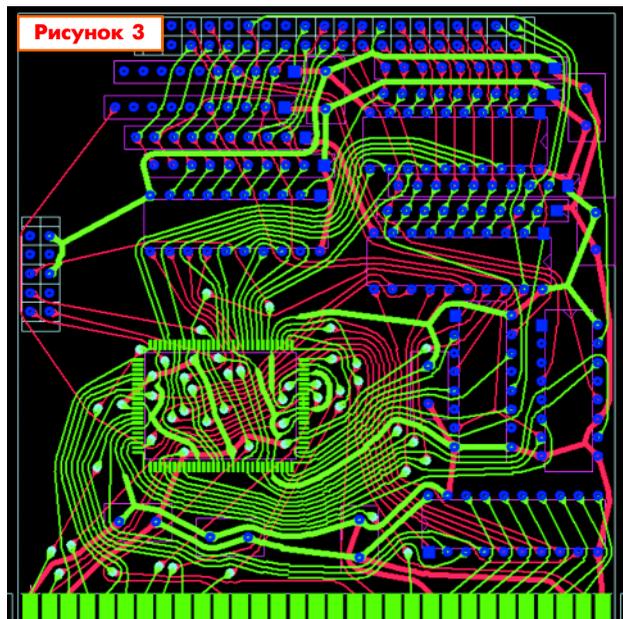
Единственное, что реально дает изменение стратегии, — это изменение последовательности прокладки провод-

ников, следствием чего может стать изменение процента разведенных трасс. Однако возьмем на себя смелость утверждать, что изменение процента разведенных трасс в этом случае носит случайный характер и мало зависит от искусства выбора стратегии.

Так, например, при трассировке некоторой тестовой платы (плата адаптера) средствами shape-based трассировщика за 40 минут был получен результат: суммарная длина проводников — 650 см, число переходных отверстий — 139 (рис. 1). При перетрассировке после увеличения вертикального размера платы на 1,2 см и, соответственно, площади зоны трассировки на 13,4% (объективно более благоприятные условия) суммарная длина проводников увеличилась с 650 до 734 см (что можно объяснить еще увеличением расстояний между некоторыми компонентами), а число переходных отверстий увеличилось (что уже логически необъяснимо) со 139 до 145 (рис. 2).

Функциональная эквивалентность

При синтезе топологии коммутационных плат особую сложность представляют схемы, в которых в качестве элементной базы используются БИС с большим числом внешних выводов (до нескольких сотен). Директивное назначение функций внешних выводов полужизной БИС до трассировки платы со-



Плата, разведенная топологическим трассировщиком

здает трудности при реализации соединений. Рост числа конфликтов межсоединений приводит к увеличению суммарной длины коммутационных соединений и числа межслойных переходов и, как следствие, площади, занимаемой проводниками.

В то же время, большинство конфликтов может быть перенесено с уровня разводки печатной платы на уровень разводки кристалла. Правда, в этом случае могут возникнуть сложности, в том числе и непреодолимые, уже при разводке кристалла. Может быть, поэтому в современных САПР слабо используются возможности программируемых БИС и БИС на основе БМК.

Тем не менее, гибкое перераспределение конфликтов межсоединений между двумя уровнями позволяет существенно повысить качество топологических решений на каждом из них. Наличие средств автоматического переключения цепей, подходящих к функционально эквивалентным контактам одного уровня, дает трассировщику дополнительные возможности оптимизации топологии. Например, упомянутая выше плата адаптера, разведенная за пять минут топологическим трассировщиком, содержит 50 межслойных переходов при длине проводников 499 см (рис. 3). Та же плата, разведенная с разрешением использования функциональной эквивалентности контактов ПЛИС фирмы ALTERA, содержит 5 межслойных переходов при длине проводников 380 см (рис. 4). Более того, при использовании функциональной эквивалентности кон-

тактов требуется существенно меньше времени для получения каче-

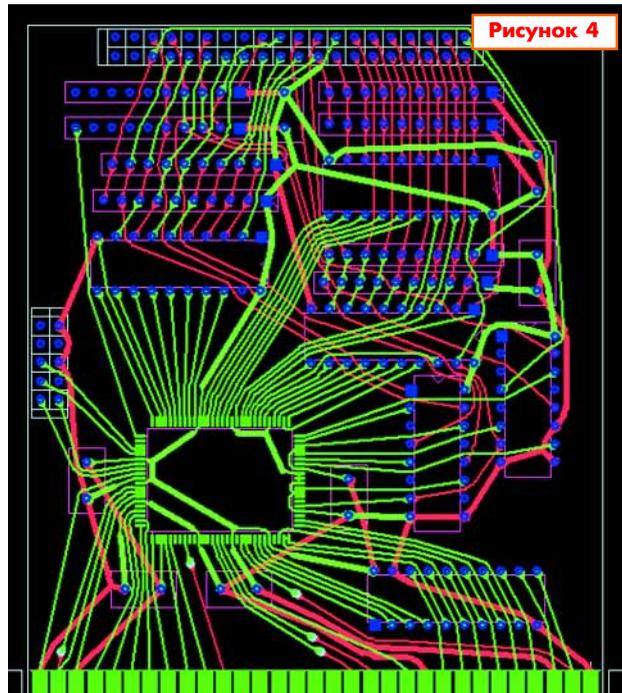
ственного результата, так, например, результат 20 межслойных переходов при длине 380 см был получен уже на третьей секунде. Это связано с тем, что устранение конфликтов существенно снижает размерность пространства решений при поиске оптимальных вариантов.

Итак, изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Существенные различия моделей и алгоритмов, применяемых в системах трассировки, не позволяют осуществлять однозначное сравнение результатов работы различных трассировщиков.

2. Средства управления трассировкой желательны снабдить гибкой системой автоматического назначения штрафов, позволяющей выбираться из локальных экстремумов. Любые фиксированные правила или коэффициенты, эффективные в одном случае, будут неэффективны в другом.

3. Для большинства проектов достаточно знать, что температура компонента и уровень перекрестных помех не превышает некоторой величины. Поскольку изменение зазора, маршрута проводника или расположения компонента может на сотни или даже тысячи процентов изменять уровень электромагнитных помех, то на этапе синтеза топологии достаточно иметь простейшие (но с максимальным быстродействием) встроенные средства расчета уров-



Плата, разведенная топологическим трассировщиком с использованием функциональной эквивалентности контактов ПЛИС

ня перекрестных помех и тепловых режимов.

За любой дополнительной информацией о программе TopoR просим обращаться в компанию "ЭлекТрейд-М" по адресу info@eltrm.ru или телефону (095) 974-1480. По адресу www.eltrm.ru имеется демо-версия программы.

Литература

1. Лузин С.Ю., Полубасов О.Б. Трассировка печатных плат. Новые методы решения старых проблем // САПР и графика, 1997. № 11. С. 58–59.
2. Лузин С.Ю., Полубасов О.Б. Топологическая трассировка: реальность или миф? // EDA Expert. 2002. № 5. С. 42–46.
3. Сухарев А.В., Золотов А.И. Модели и процедуры оптимизации в автоматизации проектирования. (Программный комплекс FreeStyle Router) Учеб. пособие. СПб.: СЗТУ, 2001. 165 с.
4. Селютин В.А. Машинное конструирование электронных устройств. М.: Советское радио, 1977. 384 с.
5. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат с учетом требований электромагнитной совместимости // Технологии приборостроения. 2002. № 3. С. 3–13.
6. Хингстон Д., Логхид Ф., Ирвин Р. Новый топологический автотрассировщик // Chip News. 2002. № 2. С. 60–64.