# T

# Трассировка под произвольными углами с огибанием препятствий дугами — Snake routing

В статье рассмотрены преимущества и недостатки набирающего популярность змееобразного стиля трассировки проводников под произвольными углами с огибанием препятствий дугами (Snake routing). Раскрыты темы эффективного использования пространства платы, влияния произвольного угла на перекрестные связи, преимущество дугообразных поворотов и сохранение целостности сигналов. Проанализированы возможности САПР Altium Designer, позволяющие работать в змееобразном стиле трассировки.

### Игорь Зырин

igor.zyrin@altium.com

### Введение

Сегодня подавляющее большинство печатных плат трассируется с помощью проводников под углом 90° и 45°. Однако тенденция такова, что в ходе работы над проектом, стремясь обеспечить целостность сигналов (рис. 1), при поворотах проводников многие инженеры предпочитают трассировку с использованием дуг. Данный метод позволяет уменьшить общую длину проводников и снизить отражения в сигналах при повороте проводника. Для достижения максимальных показателей целостности сигналов инженеры-топологи используют произвольный угол трассировки с одновременным дугообразным поворотом. Такой подход требовал длительного кропотливого труда и предназначался только для критически важных высокоскоростных цепей. Это было связано с ограничениями алгоритмов в инструментах современных САПР. В САПР для проектирования печатных плат Altium Designer 20 в имеющиеся инструменты были внедрены новые алгоритмы, которые позволяют работать с проводниками под произвольным углом

и автоматически рассчитывать радиусы дуг при огибании препятствий. Благодаря новым инструментам удается выполнять трассировку проводников в змееобразном стиле (Snake Routing), который сочетает трассировку под произвольным углом со сглаживанием проводников на всех участках топологии, где может возникнуть острый угол.

Трассировка проводников под углом в 90° и 45° применялась не всегда. Первые печатные платы, еще до появления САПР, имели форму проводников без острых углов и прокладывались по кратчайшему пути (рис. 2) [1]. Это было связано с тем, что форма проводников не проектировалась на персональных компьютерах, а рисовалась специальными, устойчивыми к травлению, маркерами непосредственно на печатной платы того времени не был ограничен углом трассировки проводников и даже не думал рисовать острые углы). Огромные трудности возникали при необходимости размножения печатной платы или редактирования топологии. Сначала проектировался шаблон топологии на кальке, проводники

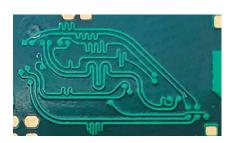


Рис. 1.

Фрагмент топологии платы обработки видеосигнала.
Фото представлено: Кугачев С.В. АО «НПО ИТ»

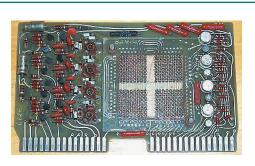


Рис. 2. Плата памяти из калькулятора Wang Model 362E (1968 год)

рисовались карандашами и корректировались ластиком, а затем топология кропотливо перерисовывалась на заготовку печатной платы. В дальнейшем топология переносилась на фотошаблоны, которые необходимо было периодически обновлять из-за их износа.

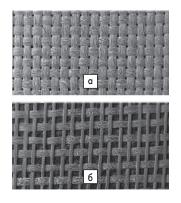
С появлением персональных компьютеров с САПР для проектирования печатных плат и печатающих устройств стало возможным размножать топологию сколько угодно раз. Однако, в связи с малой производительностью первых вычислительных станций, нельзя было выполнить трассировку под произвольным углом и использовать дуги в изломах при повороте проводника. В итоге появилась привычная сегодня топология проводников, расположенная под углом 90° и 45° с острыми углами. Из-за низкой скорости функционирования устройств в те времена это не приводило к каким-то проблемам при их работе. Однако с повышением быстродействия устройств возникла необходимость возврата к «хорошо забытому старому» стилю трассировки для высокоскоростных цепей, чтобы исключить отражения сигнала в острых углах и уменьшить общую длину проводников [2, 3].

# Змееобразный стиль трассировки (Snake routing)

В современных высокоскоростных проектах проектировщики сталкиваются с рядом ограничений, связанных с трассировкой под углом 90°, 45°. Змееобразный стиль трассировки позволяет получить ряд преимуществ, но при этом необходимо учитывать его особенности. Стиль змееобразной трассировки — это гибкие и плавные проводники, что подразумевает исключение острых углов на всех участках проводника, выполнение поворотов вокруг препятствий дугообразными сегментами и размещение проводников под произвольным углом (рис. 3).

### Дифференциальные пары

Одна из причин перехода на змееобразный стиль трассировки может быть связана с трас-



**Рис. 4.** Внешний вид стеклоткани препрега: a) LP-препрег; б) обычный препрег

сировкой дифференциальных пар. Наиболее широко для армирования материалов для печатных плат используется стеклоткань. Из стекла по определенной технологии формируют волоски стекловолокна, из которых получают нити стеклоткани. Далее эти нити переплетаются на ткацких станках в стеклоткань, которая на последующих операциях пропитывается полимерной системой (рис. 4). Удельное содержание отдельных компонентов в конечном материале определяет его электрические, механические и химические свойства. В случае если проводники дифференциальной пары идут параллельно плетению стекловолокна так, что один из них проходит в основном над стекловолокном, а другой в основном над эпоксидным материалом, характеристики этих проводников получаются различными, поскольку различна диэлектрическая проницаемость стекловолокна (она будет выше, для FR-4 = 5,8) и эпоксидного материала (она будет ниже, для FR-4 = 3,8) (рис. 5). В результате скорость распространения сигналов по разным проводникам дифференциальной пары получается различной. Из-за этого на приемной стороне ухудшается возможность распознавания передаваемого сигнала, а также возникает помеха общего вида. Существует несколько решений дан-

0.16

0,14

ص 0,12

0,1

0.08

0.06

0,04

0.02

50 МГц

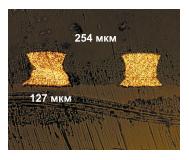
Выходное напряжение.

300 МГц

250 МГц

150 MFu

10 МГц

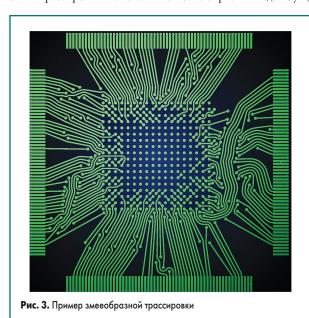


**Рис. 5.** Поперечное сечение дифференциальной пары

ной проблемы.. Например, компания Intel дает следующие рекомендации: увеличение ширины проводников, увеличение плотности плетения препрега, изменение направления стекловолокна относительно печатного рисунка или использование зигзагообразной трассировки дифференциальных пар (для САПР, поддерживающих трассировку под произвольным углом) [4]. Если использовать стиль змееобразной трассировки, то за счет отсутствия приоритета направлений данную проблему удается исключить, поскольку проводники в подавляющем большинстве случаев будут находиться под углом относительно направления плетения стекловолокна.

### Проводники на смежных слоях

В связи с отсутствием приоритетного направления трассировки практически невозможно обеспечить строго ортогональную трассировку печатных проводников на смежных слоях. Такой стиль трассировки используется для снижения перекрестных помех между проводниками, расположенными друг над другом на смежных слоях. Известно, что чем дальше проводники друг от друга и чем меньше пересечений на смежных слоях имеют, тем меньше взаимосвязь между ними. Но полностью избавиться от пересечений практически невозможно. Проводники под углом в 90° имеют минимальный уровень связи между



Угол, ° **Рис. 6.** Уровень наведенного напряжения в зависимости от угла между проводниками

40





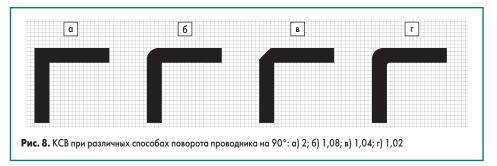
**Рис. 7.** Искажение сигнала при повороте проводника на 90°

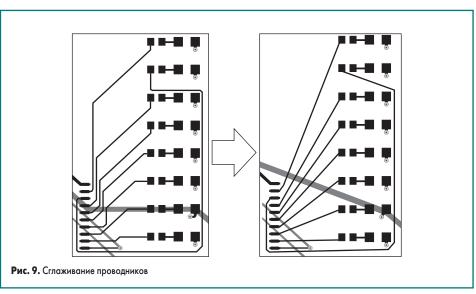
собой (ортогональная трассировка). Почти всегда ортогональная трассировка осуществляется за счет увеличения длины проводников и количества переходных отверстий, вследствие чего также вносятся искажения в сигнал. Уменьшая угол между проводниками, зачастую можно добиться заметного сокращения длины проводников и количества переходных отверстий, а следовательно, и уровня помех в сигнале.

Проводники, выполненные в змееобразном стиле, имеют меньший уровень связи между собой, чем параллельные проводники, но больший, чем ортогональные. Для определения уровня уменьшения связи в зависимости от угла в ходе работы [2] проведено моделирование печатной платы, посчитан уровень связи между проводниками и получен график увеличения наведенного напряжения на втором проводнике, если на первом проводнике будет сигнал амплитудой 1 В (рис. 6). Исследование проводилось в диапазоне частот 10-300 МГц. С повышением частоты будет расти и индуктивная связь между проводниками, а значит, и уровень наведенного напряжения. На рисунке показано, что поворот проводника на угол до  $10^{\circ}$ позволяет в 2 раза уменьшить величину наведенного напряжения вследствие паразитной связи между проводниками. Дальнейшие исследования показали, что снижение длины проводника за счет уменьшения углов пересечения между ними (относительно ортогональной трассировки) позволяет значительно сократить суммарный уровень перекрестных помех между проводниками и улучшить целостность сигналов. Оптимальный угол между проводниками составляет 25°, что дает уменьшение уровня наведенного напряжения между проводниками на 81% относительно уровня между параллельно расположенными проводниками длиной 50 мм (для справки: ортогональная трассировка с углом 90° дает 95%-ное уменьшение уровня наведенного напряжения).

# Поворот проводника и его сглаживание

Поворот на угол 90° сигнального проводника линии передачи связи является неоднородностью, которая вызывает отражение и искажение сигнала (рис. 7), и увеличивает емкость линии передачи на этом участке (угол 90° эквивалентен увеличению ширины проводника для сигнала, который распростра-





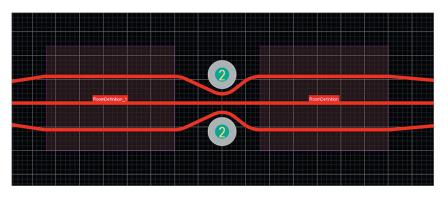
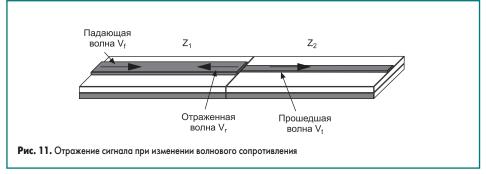


Рис. 10. Зоны с искусственным увеличением зазора между проводниками

няется по линии). Уменьшение угла до 45° и скругление углов сводит влияние неоднородности на нет [5]. При рассмотрении поворота проводника под углом 90° наихудшее значение КСВ (коэффициент стоячей волны) наблюдается при повороте без скруглений. Наилучшее значение достигается при скруглении как с внешней, так и с внутренней стороны (рис. 8). Чем меньше угол поворота, тем меньше отражений при повороте проводника, тем меньше искажений в сигнале. При использовании змееобразного стиля трассировки рекомендуется выполнять сглаживание «натягиванием» проводников для достижения минимальных углов поворота с обязательным скруглением проводника в месте излома. Это максимально минимизирует отражения сигнала и его искажение. Сглаживание проводников зачастую позволяет значительно сократить их общую длину (рис. 9). Снижение длины проводника закономерно уменьшает и искажения сигнала, а также и уровень наводок за счет сокращения его общей длины. Однако при сглаживании проводников необходимо следить за тем, чтобы проводники не прижимались, а находились на достаточном расстоянии друг от друга — таким образом можно снизить уровень их перекрестных помех. При использовании на печатной плате змееобразного стиля трассировки проводников за счет экономии пространства могут возникнуть участки, свободные от топологии. В таких местах целесообразно искусственно увеличивать зазор между проводниками (рис. 10), это позволит значительно снизить уровень их перекрестных связей.

# **Участки с различным** волновым сопротивлением

При проектировании линий передачи особое внимание необходимо уделять местам



с изменением волнового сопротивления; обычно это места, в которых изменяется ширина проводника. В местах с изменившимся волновым сопротивлением неизбежно происходит отражение сигнала, что приведет к изменению формы прошедшей части сигнала (сигнал исказится). Чем больше мест с изменившимся волновым сопротивлением, тем сильнее исказится сигнал, зачастую именно этот фактор вызывает наибольшие нарушения в целостности сигнала. Максимальное отражение сигнала происходит при резком изменении волнового сопротивления; чем плавнее переход, тем меньше искажается сигнал. Также это происходит на поворотах линии передачи, на переходных отверстиях, на разветвлениях (Т-образные участки) и на участках с измененной шириной проводника (например, при выходе из контактной площадки).

Задача конструирования печатной платы состоит в том, чтобы создать такую линию передачи на плате, в которой значение волнового сопротивления остается неизменным по ее длине.

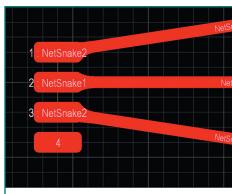
Те места линии передачи, в которых произошло изменение волнового сопротивления, называются неоднородностью волнового сопротивления, или просто неоднородностью. Например, место стыка двух сегментов линии с различными волновыми сопротивлениями является неоднородностью (рис. 11) [5].

Не всегда удается добиться стабильности волнового сопротивления на всех участках линии передачи. Следуя идеологии плавных проводников при змееобразном стиле трассировки, необходимо создавать элементы сглаживания на стыках проводника с различ-

ной шириной: на выходах проводника из контактных площадок (рис. 12), на участках с изменением ширины, на входах в переходные отверстия и т.д.

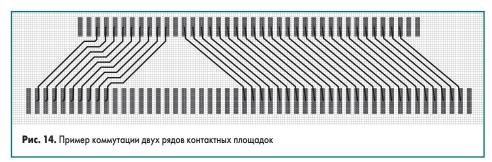
### Эффективное использование пространства платы

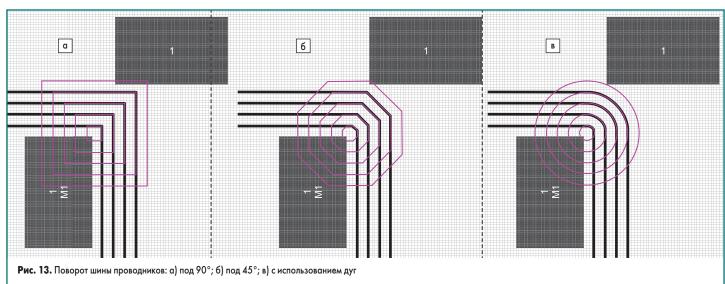
Одним из ключевых факторов современной электроники является эффективное использование полезной площади платы и уменьшение массогабаритных показателей конечного устройства. Печатные проводники неизбежно занимают свободное пространство платы для обеспечения коммутации электронных компонентов разрабатываемого устройства. Следовательно, чем меньше пространства платы занимают печатные проводники, тем плотнее можно выполнить компоновку печатной платы и тем меньший размер будет иметь разрабатываемое устройство. Наибольшей эффективности использования свободного пространства платы можно достичь с помощью змееобразного стиля трассировки проводников, который предполагает применение дуг при огибании препятствий. На рис. 13 пока-



**Рис. 12.** Плавный выход проводников из контактных площадок

зано, что на одном и том же участке печатной платы, между двух препятствий с поворотом проводников на 90°, только дугообразный способ огибания препятствия позволяет провести все пять проводников без нарушения правил проектирования. Комбинация дугообразного способа поворота проводника с произвольным углом его направления дает положительный эффект в различных ситуациях при проектировании печатной платы. На рис. 14 показано, что при одном и том же расстоянии между двух рядов контактных площадок змееобразный стиль трассировки не имеет ограничений на количество допустимых проводников по сравнению с самым популярным на данный момент стилем поворота проводников под 45°. Во многих случаях именно сглаженные дугами проводники могут обеспечить максимальный и при этом равномерный по всей длине зазор между проводниками. На рис. 15 видно, как змееобразный стиль трассировки проводников позволяет преодолеть узкие места печат-





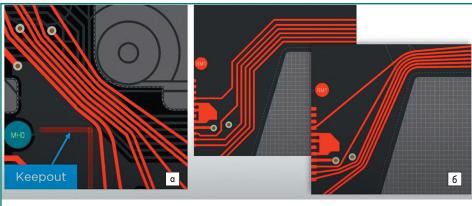


Рис. 15. Змееобразный стиль трассировки: а) узкое место; б) сложный контур

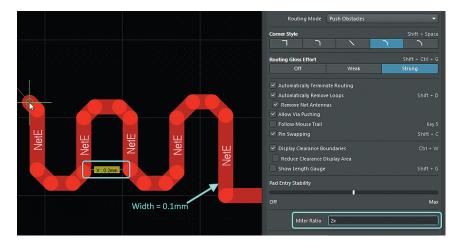


Рис. 16. Параметр Miter Ratio (коэффициент скоса)

ной платы (рис. 15а) и получить оптимальный путь проводников на плате со сложным контуром (рис. 156).

### **Snake Routing B CAMP Altium Designer**

Для обеспечения поддержки нового змееобразного стиля трассировки (Snake Routing) инструментами интерактивной трассировки Altium Designer команда исследований и разработки (R&D) компании Altium подготовила новые алгоритмы с использованием современных программных технологий. Исследования в этой области заняли более четырех лет и были внедрены в Altium Designer 20. Комплект изменений затронул все основные направления работы с топологией: трассировка, редактирование перемещением или расталкиванием, оптимизация формы и выравнивание длин цепей. Этот комплект изменений позволил получить естественную работу с дугами во всех направлениях [6].

Одной из сильных сторон обновленного интерактивного трассировщика является улучшенная поддержка формирования изломов, которые могут быть определены короткими прямыми сегментами либо одной или несколькими дугами.

Для того чтобы исключить непреднамеренное создание острых углов в процессе трассировки, интерактивная трассировка и интерактивное перетаскивание теперь включают параметр Miter Ratio (коэффициент скоса).

Это значение, умноженное на текущую ширину трассы, равно расстоянию между стенками самой узкой U-образной формы (рис. 16). Установка значения этого параметра равным нулю позволяет создавать изломы с прямыми углами.

Трассы с дугами в изломах поддерживаются интерактивной трассировкой, режимом расталкивания (Push and Shove) и интерактивным перетаскиванием. Новые алгоритмы расталкивания решают задачи поддержки, добавляя

дуги в процессе расталкивания и перетаскивания трасс. Для выполнения змееобразной трассировки необходимо переключиться в режим размещения трасс под произвольным углом.

При разработке новых алгоритмов было уделено внимание Т-образным соединениям. Теперь при любом перемещении Т-образного соединения исключена ситуация, при которой в данном соединении возникают острые углы.

При перемещении курсора в процессе определения нового пути при интерактивной трассировке все новые трассы автоматически сглаживаются. Сглаживание (Glossing) уменьшает длину пути, а также улучшает форму изломов и сокращает их количество, что в целом приводит к более аккуратной трассировке, созданной из меньшего количества сегментов.

Для управления сглаживанием имеются дополнительные опции, позволяющие управлять поведением сглаживания. Наряду с настройкой эффективности (Gloss Effort) сглаживание определяется настройками стиля огибания (Hugging Style), коэффициента скоса и коэффициента минимальных дуг. С помощью этих настроек можно управлять тем, насколько плотно будут создаваться изломы и как будут формироваться кривые трассы вокруг крепежных отверстий.

Существующая трассировка сглаживается с помощью команды Route > Gloss Selected, которая также подчиняется текущим настройкам эффективности сглаживания, стиля огибания и коэффициентам скоса/дуг. Использование этих настроек позволяет выполнить необходимые конструктивные изменения, такие как преобразование скошенных изломов в дуги.

Для того чтобы соответствовать змееобразному стилю трассировки, надо установить в опциях Interactive Routing PCB Editor в диалоговом окне **Preferences** следующие значения параметров: Minimum Arc ratio (коэффициент минимальных дуг) равным 0 и параметр Hugging Style (стиль огибания) в значение rounded. Это сочетание параметров означает, что при огибании препятствий любого размера в изломах проводника будут создаваться дугообразные сегменты.



Рис. 17. Инструмент Teardrops

Литература

Инструмент Teardrops (рис. 17) (команда **Tools** > **Teardrops**), предназначенный для автоматического создания элементов плавного изменения ширины проводника, позволяет формировать элементы сглаживания на стыках проводника с различной шириной, в том числе и на Т-образных участках, и тем самым минимизировать отражения сигнала на таких переходах.

### Заключение

Для обеспечения современных требований целостности сигналов в высокоскоростных интерфейсах, а также для снижения массогабаритных показателей целесообразно использование змееобразного стиля трассировки проводников (Snake routing). Этот стиль трассировки проводников позволяет снизить риск возникновения проблем с дифференциальными линиями передачи, повысить целостность сигналов за счет снижения общей длины проводников и плавных переходов на участках с различным волновым сопротивлением и максимально эффективно использовать доступное пространство печатной платы. Современное программное обеспечение Altium Designer имеет весь необходимый набор инструментов для применения змееобразного стиля трассировки проводников в своих проектах.

- Bensene R. Wang Model 362E Calculator.
   Old Calculator Web Museum. 2019.
   www.oldcalculatormuseum.com/wang362e.html
- Зырин И. Д., Карабан В. М.
   Методы снижения паразитной связи между проводниками //
   Технологии электромагнитной совместимости. 2013. № 3.
- 3. Зырин И. Д., Карабан В. М., Морозов Е. А. Инновационный подход к трассировке печатных проводников. Материалы 17-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов. Харьков, XНУРЭ, 2013.
- Altera. PCB Dielectric Material Selection and Fiber Weave Effect on High-Speed Channel Routing. Intel, 2011. www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/ literature/an/an528.pdf
- 5. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017.
- 6. Улучшения трассировки в Altium Designer 20. www.altium.com/ru/documentation/altium-designer/nfs-20-0routing-improvements-ad?version=20.0