

Согласование импеданса при проектировании HDI печатных плат

Согласование (или подгонка) импеданса — это способ настройки входного импеданса нагрузки или выходного импеданса источника ее сигнала. Оно выполняется для достижения максимальных значений передачи мощности и уменьшения отражений сигнала от нагрузки. Другими словами, импеданс нагрузки должен быть равен характеристическому сопротивлению линии передачи. А если передаваемый сигнал не отражается, это значит, что нагрузка поглотила его полностью.

Перевод:
Сергей Шихов

sergey@aconf.ru

Согласование импеданса в HDI (*High-Density Interconnect*) платах заключается в предотвращении ошибок передачи, особенно потерь, вызванных сопротивлением линии передачи, а также свойствами диэлектрика печатной платы.

Для создания удобных в производстве трассировок печатных плат в импеданс-согласованных системах можно использовать микропереходы. Методы разводки трасс, выходящих за пределы посадочного места BGA (*BGA escape routing*) и структура веерного разведения типа dogbone (*Dogbone fanout structure*) позволяют реализовать импедансное согласование в HDI печатных платах.

Когда трассы печатных плат требуют согласования импеданса?

Согласование импеданса определяется не частотой сигнала, а его крутизной и временем нарастания/спада (*rise/fall time*). Если время нарастания/спада сигнала (измеренное от 10 до 90%) меньше шестикратной задержки распространения сигнала в трассе, то сигнал считается высокоскоростным. В этом случае необходимо точно согласовывать импеданс.

Сложности согласования импеданса в HDI печатных платах

При реализации согласования импеданса в высокоплотных платах (HDI) проектировщики сталкиваются со следующими проблемами:

1. В высокоплотных схемах компоненты имеют уменьшенный шаг между контактными площадками (например, у BGA-корпусов). Если шаг BGA составляет $\leq 0,65$ мм, разводка трасс и контроль их ширины становятся сложной задачей. В таких случаях применяют технологии *via-in-pad* и трассировки выводов BGA (*BGA escape routing*).

2. Использование глухих переходов (*blind vias*) в площадках позволяет избежать формирования антенн, характерных для сквозных переходных отверстий (*via stubs*), улучшая тем самым целостность сигнала.

3. Для обеспечения соответствия импеданса требованиям стандарта передачи сигналов в HDI-платах с контролируемым импедансом критически важны тщательная разводка трасс и правильная структура слоев в стеке (*stack-up*).

Проектирование ширины проводников для контроля импеданса в HDI

Импеданс проводника определяется его шириной и расстоянием до опорного слоя. В HDI печатных платах с BGA-компонентами с мелким шагом требуется тщательный подбор ширины дорожек и их расположения для обеспечения разводки между контактными площадками и переходами типа *via-in-pad*.

Контроль импеданса при разводке BGA в HDI платах

При работе с высокоплотным монтажом часто используются BGA-компоненты. Для трассировки проводников из-под компонентов с высокой плотностью и большим количеством выводов требуется специальная стратегия разводки. В случаях, когда необходим контролируемый импеданс (например, для ПЛИС (FPGA) и других высокоскоростных компонентов), разводка BGA представляет особую сложность.

Выбор стратегии разводки в первую очередь определяется шагом выводов BGA, который задает максимально допустимую ширину проводников между контактными площадками. Минимальная ширина проводников также ограничена технологическими возможностями производителя, стеком и заданным значением импеданса. При планировании разводки следует учитывать следующие рекомендации:

- Для BGA с мелким шагом на платах со средним количеством слоев применяют метод сужения проводников (neck-down) при входе/выходе из зоны BGA.
- Внешние проводники можно разводить напрямую к первому ряду контактных площадок.
- Для второго ряда площадок BGA ширину проводников значительно уменьшают для размещения между площадками первого ряда.
- Для разводки внутренних рядов используют внутренние слои, обычно не более двух рядов на слой для контроля импеданса и минимизации перекрестных наводок в HDI.

Разводка по технологии Dogbone

Разводка по технологии Dogbone («собачья косточка», отсылка к форме) является наиболее распространенным методом вывода проводников (escape routing) и первого сегмента проводника от контактной площадки (fanout) для BGA-компонентов (рис. 1). Данная методика позволяет расположить переходное отверстие ближе к контактной площадке. При этом нет необходимости в заполнении и металлизации отверстия, поскольку компонент не припаивается непосредственно к площадке с переходным отверстием. Этот метод оптимален для монтажа BGA с шагом 1 и 0,8 мм.

Для BGA с шагом менее 0,5 мм предпочтительна технология microvia-in-pad. В этом случае вместо отвода тонкого проводника в сторону от площадки микропереходное отверстие размещается непосредственно в контактной площадке. Для предотвращения проникновения припоя на обратную сторону платы микропереход заполняется токопроводящим компаундом и покрывается медью.

Микропереходы для разводки выводов BGA

Если размер контактной площадки (включая гарантийный пояс) достаточно мал для микросхем BGA с мелким шагом, микропереходы для разводки необходимо выполнять с использованием внутренних слоев. Микропереходы отличаются от обычных переходов следующими характеристиками:

- **Глубина перехода.** Переходы должны пересекать не более одного-двух слоев. В платах стандартной толщины с большим количеством слоев возможны переходы через большее число слоев, но это потребует дополнительных производственных процессов. Рекомендуется использовать глухие (blind) и скрытые (buried) переходы, захватывающие один слой.
- **Соотношение сторон микроперехода (aspect ratio).** Оптимальное соотношение глубины к диаметру микроперехода — 0,75:1. Например, для 32-слойной платы толщина слоя (для двухслойного сердечника) составляет 2 мил (≈50,8 мкм), поэтому диаметр перехода не должен быть меньше 2,7 мил (≈68,6 мкм).

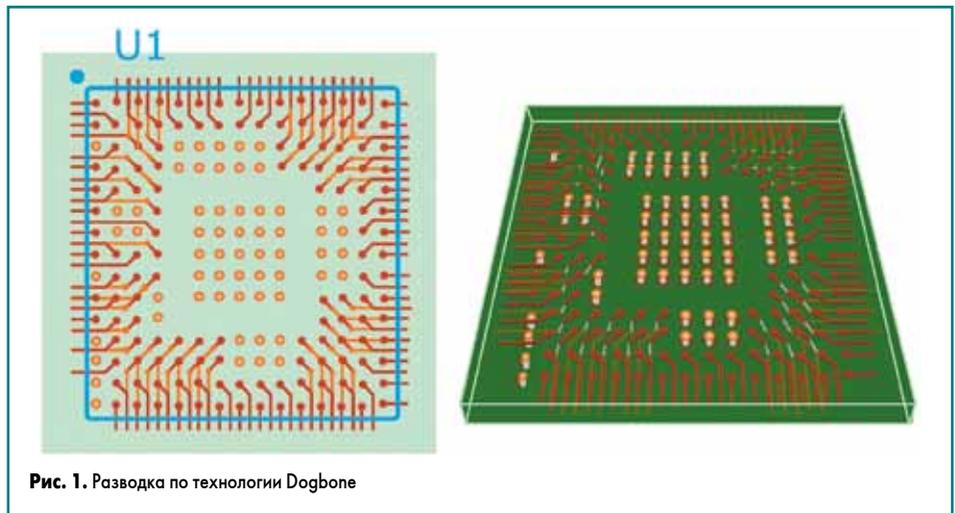


Рис. 1. Разводка по технологии Dogbone

Механическое сверление возможно до 8 мил (≈203 мкм), но при таком диаметре часто возникают поломки сверл, что увеличивает стоимость обработки до уровня лазерного сверления.

Лазерное сверление обеспечивает более высокую производительность, поскольку не требует таких же мер предосторожности, как механическое. При переходе на лазерную технологию общая стоимость изготовления платы снижается.

Рекомендации по разводке типа dogbone для микросхем BGA с разным шагом

- Для BGA с шагом 0,8 мм:
 - ширина проводника: ≤10 мил (≈254 мкм);
 - диаметр микроперехода: ≈6 мил (≈152 мкм) (при использовании dogbone fanout).
 - Для BGA с шагом 0,5 мм:
 - применение заполненных и металлизированных микропереходов в площадках (filled and plated microvia-in-pad);
 - ширина проводников: 7–8 мил (≈178–203 мкм) для обеспечения достаточного зазора между соседними площадками.
- Микропереходы в вертикальном сечении могут располагаться встык (stacked) или

в шахматном порядке (staggered) для достижения нужной плотности разводки. В целях обеспечения надежности следует соблюдать требования стандарта IPC 6012 по размерам микропереходов и гарантийных поясков. Микропереходы в площадках особенно критичны для BGA с шагом ≤0,3 мм, где альтернативные методы разводки неприменимы.

Как размещать глухие переходные отверстия для трассировки BGA

Глухие переходы представляют собой ценный метод проектирования HDI печатных плат, позволяющий освободить дополнительное пространство для разводки на внутренних слоях. По сравнению с использованием сквозных переходов, данный тип переходных отверстий увеличивает доступное пространство для трассировки на внутренних слоях, что позволяет прокладывать дополнительные проводники для соединения выводов внутренних рядов BGA. На рис. 2 показано, как на поверхности платы с BGA с шагом 1 мм между обычными переходами можно провести только две трассы. Однако использование глухих переходов дает возможность развести шесть трасс под ними, что увеличивает пространство для разводки на 30%.

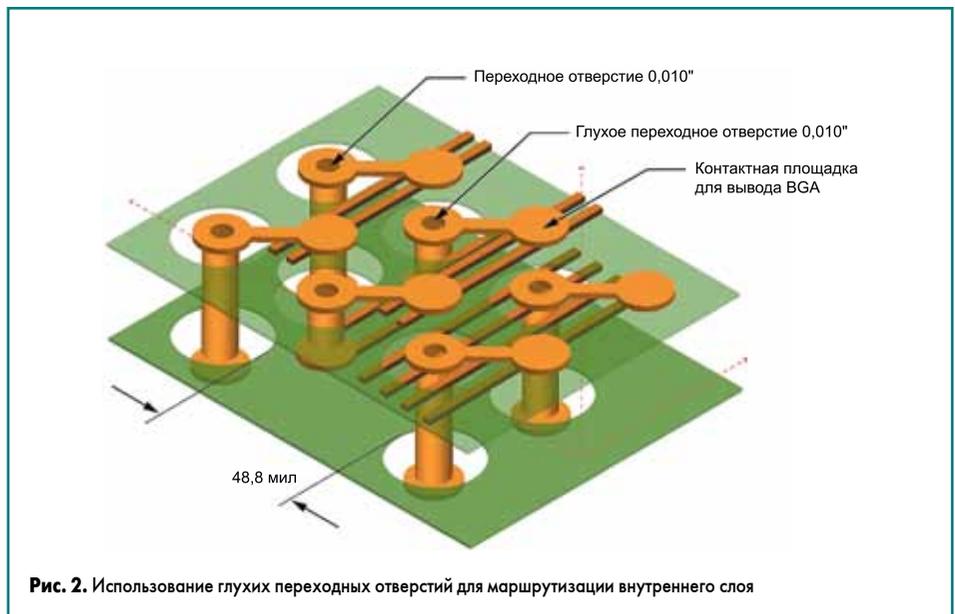
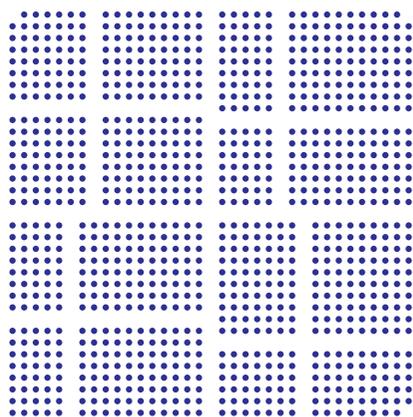
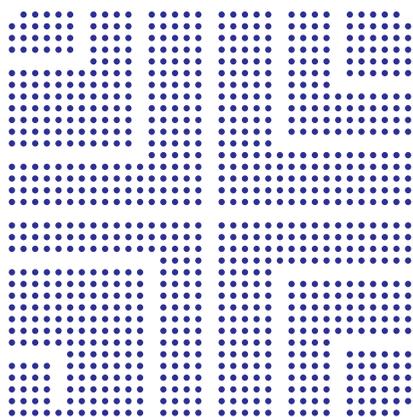


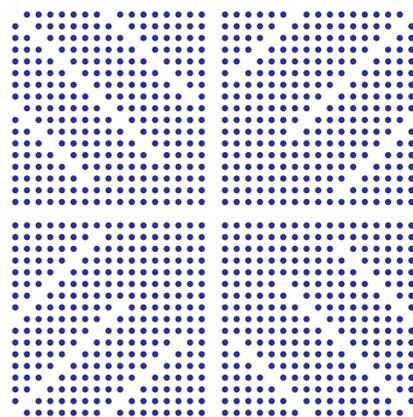
Рис. 2. Использование глухих переходных отверстий для маршрутизации внутреннего слоя



Крестообразные каналы



L-образные каналы



Диагональные каналы

Рис. 3. Размещение глухих переходов в форме креста, L-образной или диагональной формы создает «бульвары» на внутренних слоях, что позволяет обеспечить более плотную маршрутизацию. Источник изображения: The HDI Handbook от Happy Holden

Применение данного метода при разводке трасс от BGA с большим количеством выводов сокращает число необходимых сигнальных слоев в 4 раза. При этом глухие переходы размещаются в виде крестообразных, L-образных или диагональных структур, формируя так называемые бульвары (рис. 3). Выбор конкретной конфигурации зависит от распределения выводов питания и «земли».

В своей книге «The HDI Handbook» Хэппи Холден приводит пример BGA с 1153 выводами (34×34, шаг 1 мм), показанный на рис. 4. Холден отмечает: «На каждом сигнальном слое имеется 132 возможных направления разводки (одна трасса между переходами плюс 20 трасс в перекрестных каналах, по пять трасс в каждом). Это означает, что для подключения данной микросхемы BGA к остальной схеме потребуется восемь сигнальных слоев (плюс пять экранирующих слоев). Сквозные переходы создают ограждение, что делает разводку крайне ресурсоемкой по количеству слоев».

Хэппи Холден поясняет: «Использование «бульваров» позволяет увеличить количество трасс на слое и сократить общее число сигнальных слоев за счет создания дополнительного пространства для разводки. Глухие переходы формируют четыре крестообразных «бульвара» (как показано на рисунке). Такая конструкция обеспечивает +48 направлений разводки на слой (8×6 трасс) и улучшает целостность сигналов внутренних цепей. Это позволяет исключить два слоя трассировки и два опорных слоя».

Далее он уточняет: «На обратной стороне платы проявляется еще одно преимущество «бульваров» с глухими переходами. Хотя сквозные переходы проходят через всю плату, «бульвары» теперь организованы внутри области BGA.» На рис. 5 слева: 58 дискретных компонентов соединены через 104 перехода под BGA. Справа: «бульвары» позволяют соединить 183 компонента, используя 366 общих переходов.

Structured Standart Cell ASIC 34×34 rows, 1153 I/O @ 1mm

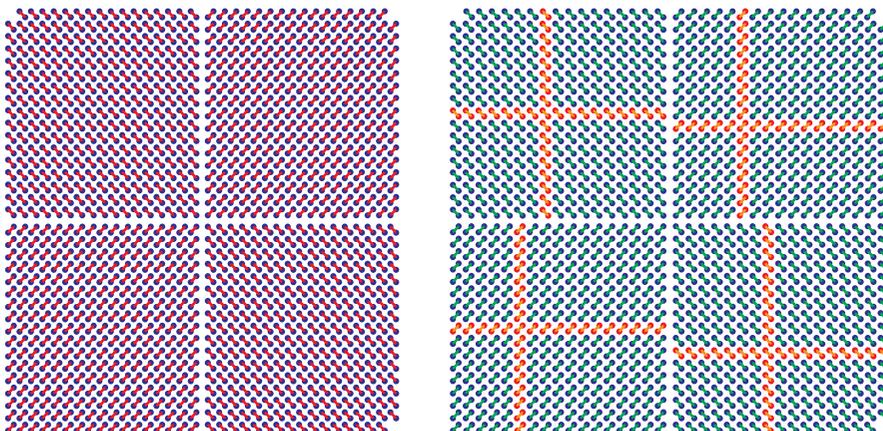


Рис. 4. На рисунках показано размещение глухих переходных отверстий для создания «бульваров» под BGA с целью улучшения трассировки. Слева: обычный 4-квadrантный разветвитель BGA.

Справа: добавлены глухие переходные отверстия, которые обеспечивают 48 дополнительных направлений разводки в «бульварах», созданных на внутренних слоях, в результате чего для разводки компонента требуется на четыре слоя меньше.

Источник изображения: The HDI Handbook от Happy Holden

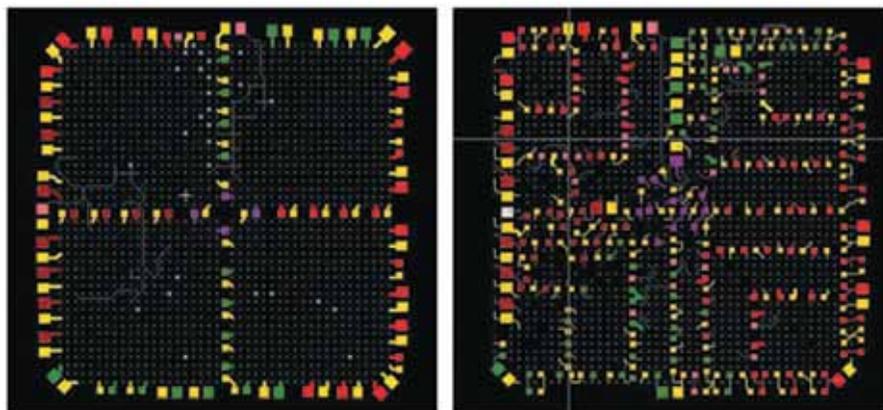


Рис. 5. На этих рисунках показана задняя сторона двух BGA.

Один из них — традиционный квадрантный разветвитель со сквозными отверстиями, позволяющий подключать 58 дискретных элементов. Другой использует глухие переходные отверстия, с помощью которых можно подключить 183 дискретных элемента.

Источник изображения: The HDI Handbook от Happy Holden

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad f_{3db} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Рис. 6. Схема фильтра нижних частот Т-типа с индуктивностью переходного отверстия, паразитной емкостью между платой и контактной площадкой, а также индуктивностью вывода в качестве основных частей

Длина участка разводки и ширина проводников

Согласование импеданса практически всегда критично при работе с высокоскоростными ИС. При анализе длины участка разводки (fanout) необходимо учитывать взаимосвязь между топологией разводки и контролем импеданса. Из-за длины проводников (если таковые имеются) и паразитной емкости/индуктивности переходных отверстий участок разводки микросхемы BGA будет обладать собственным импедансом.

Следует определить полосу пропускания сигнала, чтобы оценить влияние импеданса дорожек. Участок трассы в зоне разводки BGA можно не учитывать, если его длина существенно меньше длины волны, соответствующей верхней границе полосы пропускания. Оптимальный подход — это расчет нагрузочного импеданса, который является функцией длины проводников разводки и входного импеданса сети, формируемой этими проводниками (после сужения neck-down).

В качестве практического правила рекомендуется ограничивать длину участка 10% от длины волны сигнала. Для цифрового сигнала с частотой среза 20 ГГц это соответствует критической длине 0,73 мм (в полосковой линии на подложке FR4). То есть крупные ИС, такие как ПЛИС (FPGA), потребуют согласования импеданса для всех цепей — как одиночных, так и дифференциальных пар.

Ключевыми факторами являются:

- индуктивность переходных отверстий;
- паразитная емкость между платой и контактной площадкой;
- индуктивность выводов ИС.

В совокупности эти элементы образуют Т-образный ФНЧ, где частота среза -3 дБ представляет собой типичное расчетное значение для LC-контура (при условии равенства индуктивностей переходного отверстия и вывода ИС). Т-образный фильтр одновременно выполняет функцию согласования импеданса, модифицируя выходное сопротивление драйверной ИС (рис. 6).

Согласование импеданса участка разводки (fanout) затруднительно без определения импеданса переходных отверстий, соединяющих

проводники разводки с внутренними слоями. Однако этим можно пренебречь, если переходное отверстие короткое и проходит всего через несколько слоев. Суммарный входной импеданс, включающий переход и внутренний проводник, в основном определяется импедансом внутреннего проводника при малом числе задействованных слоев. Именно поэтому импеданс переходных отверстий часто не учитывается.

Основной недостаток заключается в том, что высокоскоростные BGA-компоненты (например, ПЛИС) могут потребовать обратного сверления (back drilling) для удаления остаточной части перехода под зоной разводки. Согласно стандарту IPC, в HDI-платах применяются глухие, скрытые и лазерные микропереходы диаметром менее 6 мил ($\approx 0,15$ мм), что исключает необходимость обратного сверления и ограничивает индуктивность переходов только толщиной задействованных слоев.

С увеличением количества слоев уменьшается толщина слоя и расстояние до опорной плоскости, поэтому для сохранения требуемого значения импеданса необходимо уменьшать ширину проводников. В случае дифференциальных пар следует учитывать связь между проводниками. Для точного контроля

импеданса рекомендуется использовать САПР со встроенным электромагнитным расчетным модулем (field solver), который помогает подобрать оптимальную ширину проводников для заданного HDI-стека.

Почему ширина дорожки не может быть больше размера посадочной площадки?

- Ширина проводника пропорциональна его импедансу и играет критическую роль при работе в HDI-режиме. Переходные отверстия становятся настолько малыми, что их необходимо изготавливать как микропереходы, как только ширина проводника становится достаточно маленькой.
- Если ширина проводника с контролируемым импедансом оказывается чрезмерно большой, можно либо уменьшить толщину диэлектрика платы, чтобы сократить ее, либо увеличить размер контактной площадки. С точки зрения надежности пока размер контактной площадки превышает значение, указанное в стандартах IPC, проблем не возникнет.
- Рекомендуется создавать импедансный профиль для стека платы. После расчета требуемой ширины для контроля импеданса следует указать полученное значение как правило проектирования. Желательно выполнить моделирование перекрестных наводок для предложенной ширины дорожки, чтобы проверить, не приведет ли это к чрезмерным наводкам.

Заключение

Согласование импеданса в HDI печатных платах напрямую влияет на качество сигнала, поэтому в таких сборках необходим тщательно рассчитанный контроль импеданса. Очень близкое расположение компонентов и проводников в HDI-платах делает эту задачу весьма сложной. Использование микропереходов, применение методов разводки для BGA с мелким шагом и метода верной разводки dogbone помогут разработчику эффективно осуществлять согласование импеданса в HDI-системах.



Комментирует Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами, «А-КОНТРАКТ»:

Трассировка высокоскоростных сигналов всегда являлась очень интересной и нетривиальной задачей для инженера. Кроме чисто геометрической головоломки, необходимо также определить стартовые параметры (правила проектирования, включающие величины ширины проводника, зазора, диаметра контактных площадок и площадок переходных отверстий), учитывая требования импедансов, целостности сигнала, технологических ограничений производства, доступности и стоимости базовых материалов.

Облегчить решение этой задачи может использование хороших практик, разработанных инженерами, которые уже сталкивались с трассировкой аналогичных схем (всевозможные reference design). Я с большим оптимизмом отношусь к потенциалу нейросетевых алгоритмов в решении подобных задач, поскольку именно с такими запросами ИИ-методы должны справляться довольно успешно.

Также не следует пренебрегать любыми возможностями моделирования предполагаемого проекта в САПР с учетом максимального количества параметров.