

Жан-Жак ДеЛисль (Jean-Jacques DeLisle)

Как надежно выровнять компрессионные разъемы для mmWave-приложений

На частотах ниже нескольких ГГц влияние отклонений процесса пайки и других факторов изготовления и сборки обычно незначительно, если используется надлежащая практика проектирования. На частотах в десятки ГГц влияние отклонений при изготовлении и сборке настолько существенно, что для многих приложений минимизация допусков на пути сигнала становится необходимой. Именно поэтому тестовые разъемы с компрессионным креплением приобретают все большую популярность в соединениях, предназначенных для верхней части диапазона mmWave (верхних mmWave) в приложениях для тестирования, создания прототипов и диагностики.

Еще один фактор, который следует учитывать, — компактность компрессионных разъемов, что является преимуществом, поскольку сегодня многие приложения для верхних mmWave также имеют гораздо более высокую плотность соединений на платах, в то время как свободное пространство сокращается. Однако и сами разъемы не лишены проблем. Компактный форм-фактор и неизбежно малые размеры способны привести к перекосу, ведь допуски у этих разъемов и посадочных площадок чрезвычайно жесткие. А потому вполне возможно перекосить коаксиальные компрессионные разъемы и узнать об этом, лишь когда будет запущена испытательная установка и появятся непредсказуемые результаты испытаний. К счастью, теперь есть решение этой проблемы, которое ускоряет сборку и обеспечивает легко читаемую визуальную индикацию правильного выравнивания компрессионных разъемов.

Почему именно компрессионные разъемы?

Сегодня увеличивается спрос на прецизионные высокочастотные тестовые разъемы, работающие с полосой пропускания 90 ГГц и более. Это результат постоянно растущих скоростей передачи данных, таких как 224 Гбит/с с импульсной амплитудной модуляцией 4-го уровня (PAM4), и повышенного интереса к разработке технологий связи и зондирования в полосе mmWave, действующих в диапазонах V (40–75 ГГц), W (75–110 ГГц) и выше. Более высокие скорости передачи данных, используемые в транзитных сетях и сетевой инфраструктуре, требуют применения радиочастотного испытательного оборудования для разработки, проверки и устранения неисправностей. Аппаратные компоненты коммуникационных и сенсорных систем в диапазоне mmWave, в том числе для устройств, функ-

ционирующих в нижней части V-диапазона, часто необходимо тестировать на частотах, во много раз превышающих их максимальную рабочую частоту, чтобы определить нелинейные и гармонические характеристики.

Максимальная частота линии передачи, будь то планарная или коаксиальная, диктуется размерами проводников и расстоянием между ними. Для реализации более высокочастотных линий передачи физическая геометрия планарных трасс и коаксиальных проводников в коаксиальном разьеме и кабеле обязательно меньше, чем у их низкочастотных аналогов. Для некоторых приложений это выгодно, поскольку позволяет повысить плотность монтажа. В качестве примера можно привести множество антенных фидов от современных/активных антенных систем, предназначенных для диапазона верхних mmWave.

По мере уменьшения физических размеров соединительных элементов, допуски, связанные с их размещением и креплением, также должны ужесточаться, а значит, многие стратегии выравнивания, предусмотренные аналогичных изделий более крупного размера, больше не пригодны для высокочастотных соединительных элементов минимального размера.

Основные параметры решения для соединительных элементов поверхностных дорожек печатных плат:

- полоса пропускания (Гц);
- вносимые потери (дБ);
- возвратные потери (дБ);
- VSWR;
- импеданс (Ом) обычно 50 или 100 Ом;
- мощность (дБ) обычно указывается для непрерывной волны и/или пиковой мощности;
- повторяемость;
- простота использования и настройки;
- стоимость.

Решения для поверхностных соединительных элементов печатных плат

Существует множество методов организации соединений на высоких частотах для подключения контрольно-диагностического оборудования к поверхностным дорожкам или посадочным площадкам на печатной плате, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Учитывая желательность широкополосной работы, коаксиальные соединительные элементы и широкополосные планарные линии передачи обычны для подобных применений. Таким образом, проблема соединительных элементов заключается в обеспечении надежных, повторяемых, высокоточных соединений между посадочными площадками планарных линий передачи и тестовыми выводами высокочастотного испытательного оборудования.

Решения для поверхностных соединительных элементов печатных плат:

- коаксиальный кабель, непосредственно припаянный к поверхностным планарным линиям передачи;
- коаксиальные разъемы, припаянные к поверхности, сквозному отверстию или краевому монтажу;
- предварительно изготовленные или изготовленные на заказ одноразовые паяные тестовые провода;
- коаксиальная измерительная станция;
- компрессионные разъемы для поверхностного или краевого монтажа.

Традиционный метод заключается в непосредственной пайке центрального и внешнего проводников коаксиального кабеля (экрана) к посадочным площадкам на плате. Это часто применяется для соединения двух поверхностных линий передачи или при использовании половины коаксиального кабеля в сборе для подключения поверхностных линий передачи к внешнему оборудованию. Хотя этот метод

и функционален, низкие допуски, достижимые при ручной пайке и ручной подготовке отрезков коаксиального кабеля, означают, что метод, скорее всего, будет иметь самую низкую точность и воспроизводимость. В зависимости от используемой техники подобный способ, вероятно, не подойдет для mmWave-приложений, если только он не будет осуществляться квалифицированным специалистом со специализированным оборудованием.

Более доступный и универсальный подход — применение коаксиальных разъемов для поверхностного, сквозного или краевого монтажа, прикрепленных к посадочным площадкам с помощью припоя. При правильном соединении этот метод может создать прочное, надежное и компактное соединение, однако требует определенных усилий для обеспечения выравнивания, хотя некоторые типы разъемов можно собрать автоматически с помощью технологии pick and place. Основная проблема такого подхода состоит в ограничении допусков на паяные соединения между центральным и заземленным контактами коаксиальных разъемов и посадочными площадками. На частоте 100 ГГц длина волны в свободном пространстве составляет около 3 мм. Общепринятое правило гласит, что геометрические особенности порядка 0,1 или даже 0,05 длины волны являются значительными. То есть для высокочастотных и повторяемых паяных соединений требуются элементы размером менее 300 и даже 150 мкм. Это нелегко сделать вручную, без инструментов и участия опытного квалифицированного специалиста, но вполне осуществимо при машинной сборке.

Решить проблему воспроизводимости можно с помощью предварительно изготовленных или выполненных на заказ тестовых выводов для пайки. Однако частотные ограничения такого решения делают его более подходящим для применения с осциллографами, предназначенными для измерения сигналов во временной области до нескольких ГГц. Они используются вместо соединительных элементов с крючками или ручным креплением и способны достичь максимального заданного диапазона частот только 20 ГГц. Кроме того, они дороги в эксплуатации, бывают одно-разовыми или ограничиваются несколькими применениями. В конечном счете, эти типы соединителей не подходят для приложений для верхних mmWave.

Другой подход заключается в том, чтобы не прикреплять тестовые провода к опорным площадкам, а прижимать прецизионные контакты линий передачи к опорным площадкам. Пробная станция может тестировать эти контрольные точки и линии передачи на уровне платы, оказывая минимальное воздействие на тестовую плату. Некоторые прецизионные пробники достигают полосы пропускания 500 ГГц при использовании наконечников типа «земля»–сигнал–«земля» с волноводным соединением. В качестве альтернативы прецизионные пробники могут достигать 145 ГГц с применением коаксиального соединения. Некоторые пробники имеют несколько сиг-

нальных линий на одной головке, что может помочь при тестировании нескольких высокоскоростных дифференциальных линий. Однако прецизионные пробники предполагают наличие измерительной станции, которая обычно является статьей капитальных расходов и для работы с которой нужен опытный специалист.

Преимущества компрессорных разъемов

Еще один распространенный вариант высокоточных разъемов для mmWave — резьбовые коаксиальные компрессионные разъемы. Этот тип становится все более популярным благодаря простоте использования, возможности многократного применения, воспроизводимости и производительности. Компрессионные разъемы во многом напоминают паяные коаксиальные разъемы, за исключением того, что соединения центрального проводника и заземления выполняются через точно спроектированные компрессионные контактные поверхности, аналогичные зондовой станции, и не требуют пайки для крепления. Вместо этого обычно используются монтажные винты, обеспечивающие крепление и выравнивание.

Поскольку пайка и сквозные отверстия не требуются, компрессионные разъемы для поверхностного монтажа применяются на дорожках в любом месте на поверхности платы, а не только на краю. Для торцевых компрессионных разъемов требуется прецизионная фрезерованная поверхность на краю платы, которая точно позиционируется относительно планарной линии передачи. Это не подходит для всех испытательных приложений, поэтому компрессионный разъем для поверхностного монтажа, который может крепиться к монтажным отверстиям в любом месте поверхности, исключает прокладку планарных линий передачи к краю платы.

Распространенные методы выравнивания компрессорных разъемов

Компрессионные разъемы для mmWave имеют компактные размеры. Габаритные размеры разъемов для плат 2,92 мм, обеспечивающих работу на частоте 40 ГГц в максимальном безмодовом режиме, обычно составляют примерно 10×6 мм с шагом между крепежными винтами около 7 мм. Размеры 1,35-мм разъемов уменьшаются до 10×4 мм с аналогичным шагом. Однако диаметр центрального контакта у 2,92-мм разъема составляет около 508 мкм, а диаметр центрального контакта у 1,35-мм разъема вдвое меньше — 254 мкм. Ширина трассировки посадочных площадок для этих разъемов примерно равна диаметру центрального контакта. Это означает, что допуски для достижения оптимального соединения с 1,35-мм разъемом составляют примерно половину от допусков для 2,92-мм разъема, оставляя мало места для ошибки.

Для того чтобы соединения были точными и воспроизводимыми, необходимы методы,

обеспечивающие выравнивание данных разъемов. Наиболее распространенный метод основан на использовании винтов, которыми компрессионный разъем крепится к радиочастотной плате. Другой распространенный метод предусматривает центровочные штифты, вставленные через специальные отверстия на корпусе компрессионного разъема и печатной плате.

Эти подходы сопряжены с некоторыми трудностями. Процесс изготовления ПП проходит в несколько этапов с использованием крупноформатных плат, которые подвергаются травлению, нанесению паяльной маски, шелкографии и фрезерованию на различных станках. Обычно платы обрабатываются разными операторами в условиях высокой скорости производства, что означает индексацию крупноформатных печатных плат на каждом этапе для каждой операции, часто с использованием механических и визуальных индикаторов.

Вся оснастка может быть изготовлена с разумными допусками, но они варьируются от платы к плате, и величина отклонения может быть непостоянной в разных партиях. Допуски на обработку платы также могут варьироваться в зависимости от типа и износа инструмента, квалификации оператора и калибровки станка. Это приводит к тому, что между операциями травления и механической обработки возникает разброс допусков, достигающий сотен микрометров. Поскольку превышение допусков имеет тот же порядок величины, что и площадь контакта и ширина дорожки, используемые в верхних mmWave соединительных элементах, оно может легко привести к проблемам смещения, основанным на несоосности винтов или штифтов с механически обработанными элементами печатной платы. Данный анализ не включает потенциальные проблемы с допусками, связанные с изготовлением винта или выравнивающего штифта вместе с монтажными отверстиями в корпусе разъема, которые также способны повлиять на общую точность выравнивания этих



Рис. 1. Потенциальные проблемы с допуском, возникающие при выравнивании винта или штифта с механически выполненными отверстиями в печатной плате

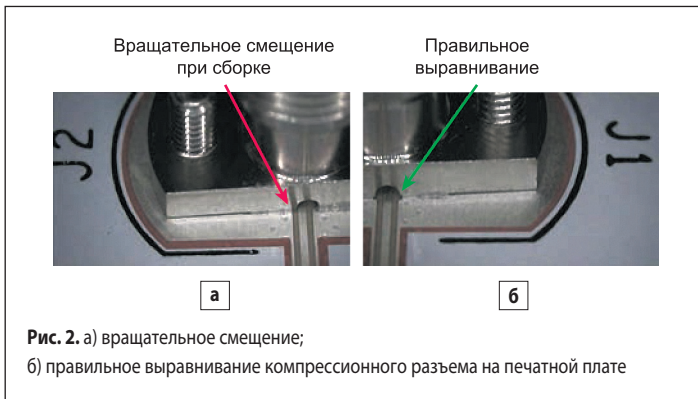


Рис. 2. а) вращательное смещение;
б) правильное выравнивание компрессионного разъема на печатной плате



Рис. 4. а) вид сбоку на пазы для визуального совмещения на коаксиальном разъеме с резьбой 1,35 мм для компрессионного монтажа;
б) вид сверху на пазы для визуального совмещения на коаксиальном разъеме с резьбой 1,35 мм для компрессионного монтажа

методов. Некоторые примеры таких проблем с допусками показаны на рис. 1.

К проблемам с выравниванием относится и достаточный люфт между двумя винтами, вызывающий нежелательное вращение вокруг оси коаксиального разъема (рис. 2). Размеры между сигнальной дорожкой и заземлением корпуса разъема являются критическими для электрических характеристик интерфейса соединения, поэтому такой тип несоосности может привести к ухудшению характеристик линии передачи, усложнить тестирование и сделать результаты тестирования недействительными. Небольшое смещение, связанное с методами выравнивания винтов и контактов, бывает сложно обнаружить сборщику. Оператор может узнать о проблеме только во время электрических испытаний, когда устранение неисправности соединения значительно затруднено.

Желательно использовать визуальный инструмент для выравнивания или индикатор, чтобы получить четкое представление о выравнивании. Как правило, у этих типов компрессионных разъемов периметр внешнего корпуса является единственной особенностью, которая дает полезное визуальное представление о выравнивании. На внешнем корпусе данных разъемов есть несколько утолщенных поверхностей, но это обычно не считается критической характеристикой, поэтому они могут не обрабатываться с тем же уровнем допуска, что и внутренние кромки коаксиальных проводников.

Электрические испытания считаются основным методом обеспечения выравнивания таких разъемов, при этом измеряются характеристики тестируемого устройства или системы и подтверждается их соответствие техническим допускам.

В качестве альтернативы соединительный элемент может быть протестирован с помощью рефлектометра временной области (TDR) или анализатора сети. На рис. 3а показаны результаты TDR для выровненного и смещенного разъема, а на рис. 3б — результаты возвратных потерь для выровненного и смещенного разъема. Данный тип тестирования может занять много времени и ввести в заблуждение, если есть иные проблемы со связью с другим радиочастотным оборудованием или между платой и радиочастотным оборудованием, либо дефекты в линиях передачи.

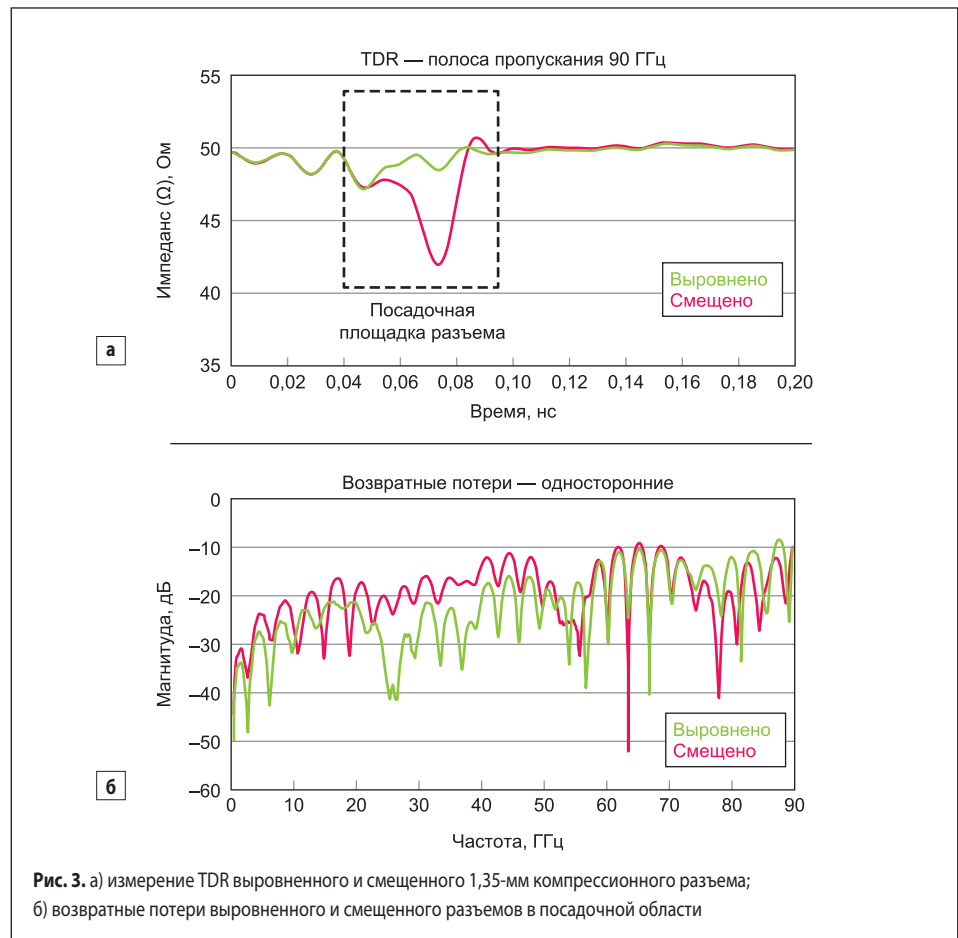


Рис. 3. а) измерение TDR выровненного и смещенного 1,35-мм компрессионного разъема;
б) возвратные потери выровненного и смещенного разъемов в посадочной области

Новая технология визуального выравнивания компрессионных разъемов

Для надежного выравнивания малогабаритных mmWave-разъемов требуется функция позитивной визуальной индикации выравнивания, которая предусмотрена в компрессионном разъеме и печатной плате. Использование контрольных точек на печатной плате — это стандартная практика для автоматизированного размещения компонентов (машины типа pick and place). Данная техника применяется и для выравнивания деталей неправильной формы или крупных элементов, таких как индукторы, конденсаторы и транзисторы. Хорошо зарекомендовало себя и использование металлических ориентиров на поверхности печатной платы вблизи посадочных площадок поверхностных дорожек, что позволяет минимизировать проблемы с допуском на выравнивание, вызванные процессом травления металла.

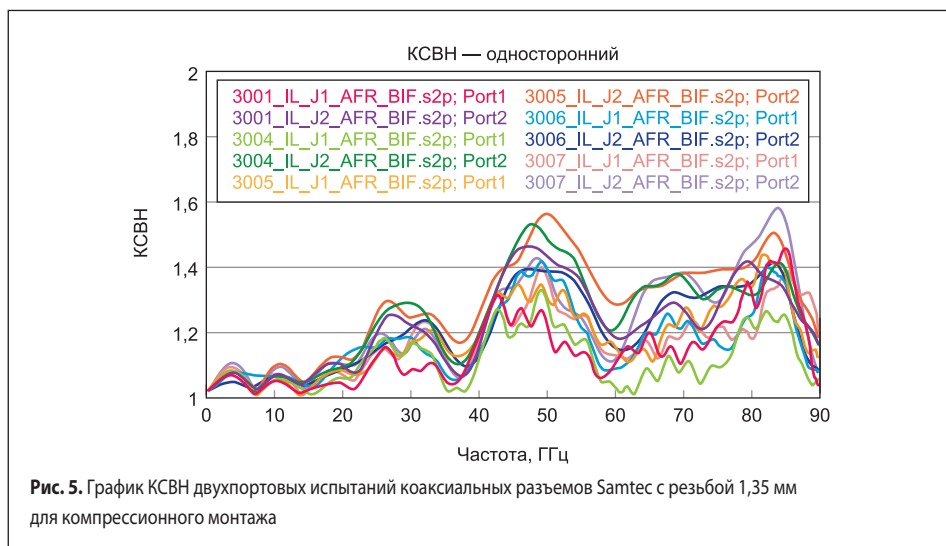
Еще одна возможность — включение прецизионных элементов в видимые области корпуса разъема, предназначенные для совмещения с контрольными точками печатной платы. Визуальные направляющие в коаксиальной области компрессионного разъема невозможны, поскольку при установке эта область скрыта коаксиальным корпусом. Визуальные направляющие должны быть расположены как можно ближе к корпусу разъема и хорошо видны во время сборки. Кроме того, они должны близко размещаться к поверхности печатной платы, чтобы свести к минимуму возможное смещение, вызванное перспективой. В качестве примера можно привести точно обработанные выравнивающие канавки на противоположных сторонах основания разъема с компрессионным креплением, обеспечивающие необходимые визуальные ориентиры.

Новые резьбовые компрессионные разъемы компании Samtec служат примером такого под-

хода. Визуальные направляющие для выравнивания выточены в основании корпуса разъема, как показано на рис. 4а,б. Эта методика позволяет визуально определить любое смещение по осям X, Y или вращение компрессионного разъема относительно поверхностного металлического слоя печатной платы. Если направляющие для выравнивания разъема специально разработаны для печатной платы, то существует визуальная гарантия, что центральный контакт разъема и углубление для планарной дорожки линии передачи будут выровнены с посадочной площадкой ПП.

Точность и воспроизводимость испытаний становятся основными проблемами для устройств, работающих в верхнем диапазоне частот mmWave. Подходящее решение для соединительных элементов должно обеспечивать хорошую производительность и воспроизводимость в течение нескольких циклов установки. На рис. 5 представлено измеренное значение КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) для 10 образцов (пять испытаний с использованием двухпортового анализатора сети), где 1,35-мм коаксиальные разъемы с компрессионным креплением собраны по обе стороны планарной линии передачи. С помощью данного метода можно получить характеристики КСВН как для разъемов порта 1, так и порта 2.

Результаты графика КСВН на рис. 5 показывают отличные характеристики, особенно в диапазоне 50–80 ГГц. КСВН ниже 1,2:1 на частоте отсечки разъема. Важно соблюдать точность выравнивания во время установки, поскольку подключение тестовых кабелей к разъему с компрессионным креплением



может привести к некоторому вращению. Для удержания разъема на месте во время подсоединения и отсоединения тестового кабеля следует использовать инструменты, позволяющие предотвратить проворачивание. Обычно для этого служат гаечный ключ или плоскогубцы, чтобы противодействовать силе динамометрического ключа, используемого для затягивания коаксиального разъема в соответствии со спецификацией.

Заключение

Более высокие скорости передачи данных для сетевых и транзитных коммуникаций, а также более высокие рабочие частоты для коммуникационных технологий и технологий зондирования приводят к увеличению

потребности в высокочастотных прецизионных соединительных решениях. Для того чтобы эти разъемы могли работать на более высоких частотах и с более высокой плотностью соединений при минимальной площади платы, все решение для соединительных элементов должно быть очень компактным. Точное выравнивание центрального контакта разъемов относительно посадочной площадки на таких высоких частотах является одновременно и сложной задачей, и критически важным требованием. Описанная технология визуального выравнивания, реализованная в новых резьбовых компрессионных разъемах Samtec, помогает решить проблемы выравнивания, связанные с mmWave-разъемами для компрессионной установки.