

# ПРАВДА О КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РАЗЪЕМА

ЭТО НЕ ТАК ЛЕГКО, КАК ПРОСТО СОЕДИНИТЬ  
МЕТАЛЛ И ПЛАСТИК ВМЕСТЕ

В статье, предназначенной для специалистов, предложен подход к проектированию высокочастотных разъемов и описаны все аспекты их проектирования.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СИСТЕМ

В области проектирования высокоскоростных разъемов существуют две противоположные идеи. Некоторые считают, что это очень простой процесс: если вы соедините кусочки пластика и металла, то получите передачу сигнала. Но есть и другое мнение: прочная конструкция разъема требует глубокого понимания электромагнитной теории, мудрости, которой обладают только колдуны и волшебники. Как и почти всегда бывает в жизни, истина находится где-то посередине. В этой статье я попытаюсь прояснить некоторые концепции проектирования высокоскоростных разъемов.

## ПРОТИВОПОЛОЖНЫЕ ВЗГЛЯДЫ И СООБРАЖЕНИЯ

Позвольте мне начать с утверждения: «Не все так просто». Если бы это было так, у компаний не было бы специализированных команд, занятых только проектированием разъемов. Эти группы состоят из инженеров по обеспечению целостности сигналов (SI), инженеров-механиков и инженеров-технологов. Обычно инженеры SI говорят о сопротивлении, перекрестных помехах и вносимых потерях (забавные вещи), инженеры-механики рассуждают о нормальной силе или циклах сопряжения (скучные вещи), а инженеры-технологии — об инструментах или формовании (еще более скучные). Я даже не буду рассматривать деловую сторону, ведь инженеры обычно не слишком заботятся о стоимости: «Кого волнует, что это слишком дорого? Это хорошая конструкция!» Как вы можете видеть, проектирование высокоскоростных разъемов — задача междисциплинарная, и она не столь проста, как соединение металла и пластика.

Впрочем, некоторые инженеры SI делают электрическую часть конструкции разъема похожей на волшебство. Когда

возникает проблема с некоторыми извилистыми линиями, мы, SI-волшебники, способны заставить их подниматься, опускаться, появляться и исчезать! Это может потребовать некоторого опыта и знаний, но все это, конечно, не магия. Я расскажу о том, что мы делаем на стороне SI в дизайне разъема.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТОРОНА КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РАЗЪЕМА

Существует несколько параметров, которые необходимо учитывать при работе с высокоскоростными конструкциями. Они включают перекрестные помехи, потери, полное сопротивление, общий режим, преобразование режимов, связь и тому подобное, и никогда не будет согласия относительно того, что следует учитывать в первую очередь и что менее важно. В конечном счете все сводится к тому, что нужно заказчику. Здесь я хочу обратить внимание на два аспекта, на которые я трачу большую часть своего времени при проектировании высокоскоростных разъемов, — дифференциальное сопротивление (обратные потери) и резонансы (вносимые потери).

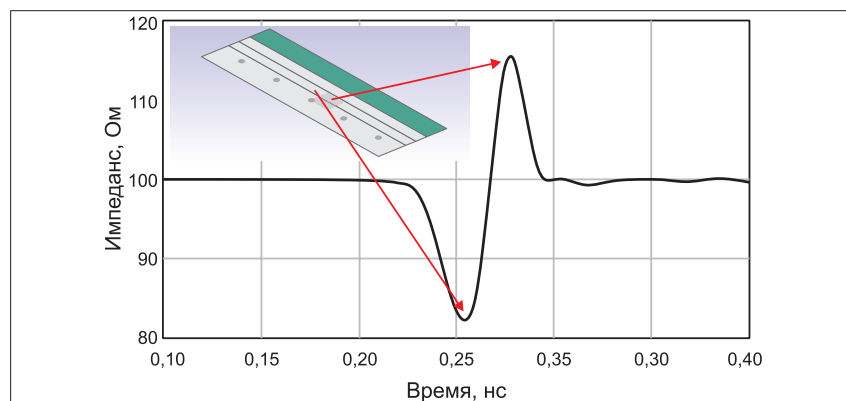
Поскольку конструкция высокоскоростных разъемов далеко не тривиальна,

вполне понятно, почему большинство компаний очень бережно относится к своим разработкам. Было бы трудно убедить любую компанию, работающую на этом рынке, поделиться своей интеллектуальной собственностью, но мы можем собрать определенную информацию о том, что актуально, и решить проблемы с помощью простой платы. Например, дифференциальная микрополоска с копланарным заземлением и несколькими отверстиями для шивания верхнего и нижнего слоя заземления служит хорошим испытательным средством для иллюстрации этих принципов проектирования.

## ИМПЕДАНС

Если профиль поперечного сечения не изменяется вдоль направления распространения, дифференциальный импеданс не изменяется тоже. Однако иногда плоскость заземления пререзается под дорожкой сигнала, повышая сопротивление. Или переходные отверстия расположены слишком близко к сигнальной дорожке, или две сигнальные дорожки находятся слишком близко друг к другу, что снижает сопротивление. На рис. 1 проиллюстрированы эти явления.

Вот как мы формируем импеданс при проектировании разъема: если мы



▲ Рис. 1. Профиль дифференциального импеданса для дифференциальной микрополосковой трассировки. Импеданс увеличивается там, где есть срез плоскости заземления, и снижается там, где следы шире (ближе)

хотим, чтобы импеданс уменьшился, то добавляем металл или сближаем дорожки (или «землю»). Если хотим, чтобы он увеличился, то разносим металл, или дорожки, или «землю» дальше друг от друга. В предложенном примере все довольно легко — ведь мы просто попытались бы сделать поперечное сечение постоянным. В реальной конструкции разьема все было бы сложнее. Мы бы настраивали дифференциальный импеданс до тех пор, пока не достигли максимально возможного уровня. Недавно был проведен подробный анализ расчета импеданса и разницы между односторонним и дифференциальным режимом [1].

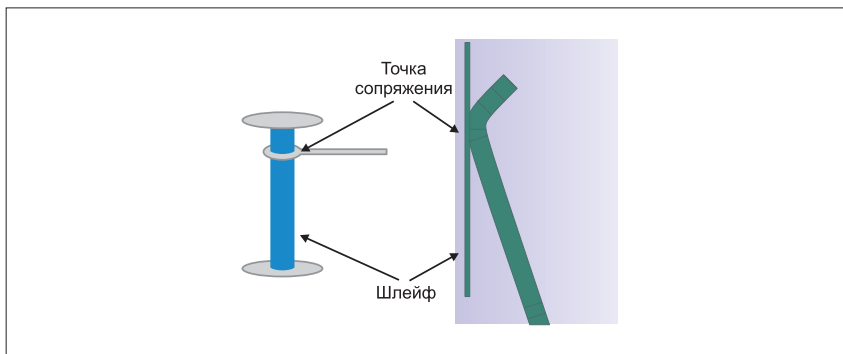
### РЕЗОНАНСЫ

После того как сформирован импеданс, обратим внимание на резонансы. Они появляются в виде вносимых потерь и обычно переносятся на обратные и перекрестные помехи.

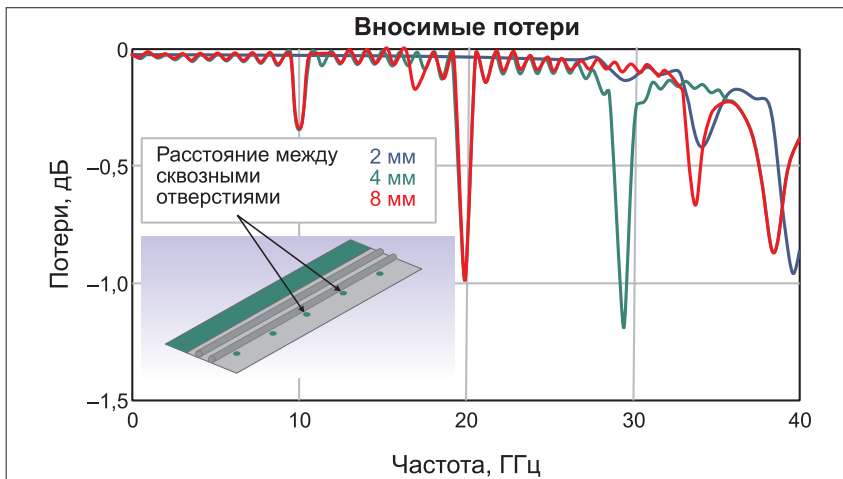
Есть два типа резонансов, которые необходимо устранить: один, вызванный шлейфами сигнальных линий, другой, обусловленный обратным контуром или структурой заземления.

Первый из них несколько экспертов в отрасли [2, 3] объяснили с помощью шлейфов на плате. В конструкции разьема это явление также имеет место и связано с износом контактов. И хотя геометрия механически отличается, с электрической точки зрения она одинакова: если вы позволите сигналу проходить между или через точку контакта и коротким замыканием в конце, это создаст резонанс, пропорциональный длине шлейфа. На рис. 2 показана параллель между шлейфами через плату и соединительными шлейфами. В идеальном электрическом исполнении в разьеме не допускается износа, поэтому шлейф отсутствует. Но механически это невозможно, и необходимо достичь компромисса между электрическими характеристиками и механической надежностью. Чем дольше износ, тем ниже частота, с которой будет резонировать разьем. Таково одно из различий между разьемом с частотой 1 ГГц и разьемом с частотой 40 ГГц: разьем с частотой 40 ГГц не может позволить себе длительный износ таким же образом, как плата с проводимостью 40 ГГц.

Даже если путь прохождения сигнала идеален, все равно могут быть резонансы. Обратный контур — то, с чем здесь надо работать. Расстояние между соединительными отверстиями будет определять частоты, на которых возникают резонансы в структурах «плоскость-плоскость». Это еще одно отличие при проектировании разьема для работы на частоте 1 ГГц по сравнению с разьемом для



▲ Рис. 2. Эффект сквозного шлейфа в точке сопряжения и разьема



▲ Рис. 3. Вносимые потери в зависимости от расстояния между сквозными отверстиями

работы на частоте 40 ГГц: чем выше частота, на которой действует разьем, тем короче должны быть соответствующие структуры обратного контура.

Если, например, разьем имеет контакты заземления, их придется прошивать таким образом, чтобы вывести резонанс за пределы минимально желаемой частоты. Еще раз мы используем пример микрополоски, чтобы проиллюстрировать данную концепцию. На рис. 3 показано это явление.

Чем ближе расположены сшивающие отверстия, тем выше резонансная частота верхней и нижней плоскостей заземления.

Может возникнуть соблазн поверить, что теперь все ясно. Не так быстро... Обратите внимание на рис. 3: резонансные частоты с шагом 8 мм имеют частоту, кратную 10 ГГц, но существуют и различные комбинации на разных частотах, когда вы посмотрите на пример с шагом 4 мм.

Предположим, что PMC (открытые) сверху и снизу и PEC (короткие) и в любом другом месте

Тангенциальное электрическое поле равно нулю в PEC и максимуму в PMC

Все возможные решения

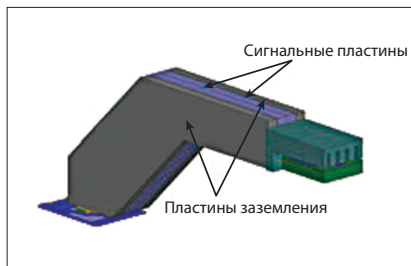
$$E_x = c_1 \cos \frac{m\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{a} \sin \frac{p\pi z}{c}$$

$$E_y = c_2 \sin \frac{n\pi y}{a} \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{p\pi z}{c}$$

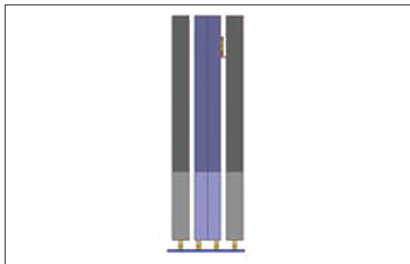
$$E_z = c_3 \cos \frac{p\pi z}{c} \sin \frac{m\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{a}$$

$m=0,1,2,\dots$   
 $n=0,1,2,\dots$   
 $p=0,1,2,\dots$   
\* $p$  и  $n$  не ноль одновременно

▲ Рис. 4. Базовая электромагнитная теория, используемая для решения задач с резонансными внутренними пространствами



▲ Рис. 5. Пример высокоскоростного разъема



▲ Рис. 6. Поперечное сечение с зазором между сигналом и заземлением (GS)

Так, есть некоторые проблемы на частотах 17 и 34 ГГц. Причина в том, что расстояние между соединительными отверстиями можно измерить не только вдоль направления верхней полосы заземления (как мы и делаем), но и поперек верхней полосы заземления. Последнее может стать доминирующим эффектом в некоторых случаях. Или комбинация обоих факторов может вызвать резонанс между плоскостью основания и полостью.

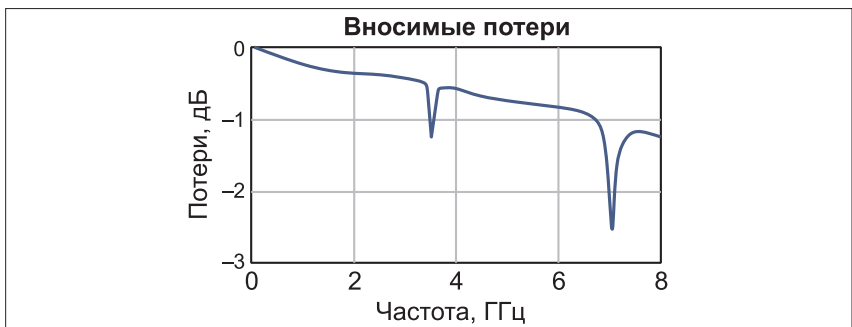
Имейте в виду, что это очень простая микрополосковая линия. В реальной конструкции разъема все сложнее. Один из способов определить, в чем заключается проблема, — посмотреть на поля на резонансной частоте. Мои коллеги и я более глубоко изучили эту проблему в прошлом [4]. На рис. 4 показана концепция, лежащая в основе данного подхода.

Итак, мы обратили внимание на принцип резонансов и задали вопрос: «Откуда они берутся?» Согласно фундаментальной электромагнитной теории, резонансы возникают, когда есть полость и электромагнитные поля попадают в ловушку внутри такой полости. Следует отметить, что режимы (возможные решения) могут быть функцией  $x$ ,  $y$  или  $z$  и доминирующий режим будет зависеть от размеров полости. Аналогично, в нашем примере с микрополосковой линией резонансные частоты резонатора от верхней до нижней плоскости могут быть функцией сквозного расстояния в направлении  $x$ , в направлении  $y$  или их комбинации, и это не всегда очевидно, особенно если при проектировании разъема может возникнуть проблема.

Для того чтобы расширить основную теорию, мы заменим идеализированную

Таблица 1. Резонансные частоты и связанные с ними значения добротности

Собственная мода	Частота, ГГц	Добротность
Режим 1	3,51222 + i0,0168414	104,275
Режим 2	4,12226 + i0,0298971	68,9426
Режим 3	4,30938 + i0,287067	75,0604
Режим 4	6,60204 + i0,0417242	79,1167
Режим 5	6,96437 + i0,00724670	480,520
Режим 6	7,33819 + i0,0328868	111,569
Режим 7	7,49119 + i0,0385306	97,2123
Режим 8	9,31173 + i0,0579627	80,3268
Режим 9	10,4051 + i0,0188731	275,660
Режим 10	10,7925 + i0,0444612	121,371



▲ Рис. 7. График вносимых потерь для структуры зазора GS, показанный на рис. 6

полость геометрией, подобной разьему. Сделаем это с помощью решателя собственных мод для определения частот, на которых могут возникать резонансы. Решение по собственным модам не только значительно быстрее, чем полная развертка частоты. Как только решение становится доступным, доступны и графики полей. Это позволяет видеть области, в которых резонанс наиболее силен, и помогает инженеру решать проблему с теоретической и фундаментальной точки зрения, а не методом проб и ошибок.

Решение на основе собственных мод получено только для структуры заземления путем удаления сигнальных выводов, что позволяет рассматривать структуру заземления как резонансную полость, подобную основной полости, описанной на рис. 4. В дополнение к списку возможных резонансных частот, собственный преобразователь также предоставляет добротность, связанную с каждым резонансным режимом. Коэффициент добротности указывает, насколько сильно режим будет резонировать при возбуждении. Чем выше значение добротности, тем сильнее резонанс для этого режима.

Мы моделируем общую геометрию, которая используется в высокоскоростных разъемах и состоит из четырех пластин (металлических штырей, встроенных в пластик). Внутренние сигнальные пластины, составляющие дифференциальную пару, зажаты между двумя

пластинами заземления, как показано на рис. 5.

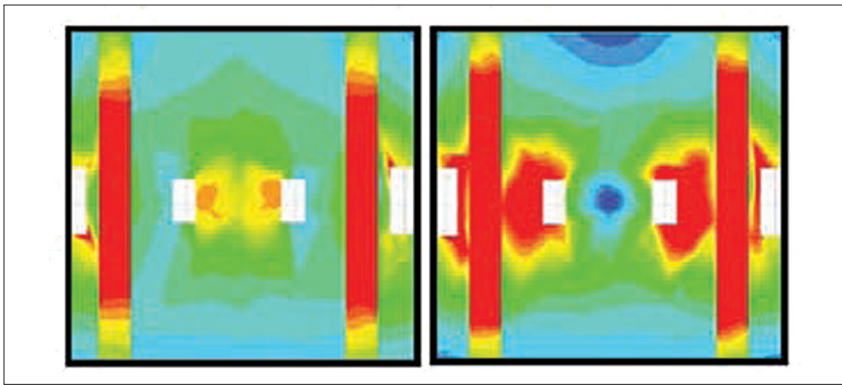
В первой конструкции между сигнальными и заземляющими пластинами был воздушный зазор, как видно на рис. 6. Это называется структурой разрыва (GS).

Данная структура была проанализирована с помощью решателя собственных мод. В таблице 1 обобщены резонансные частоты и связанные с ними значения добротности.

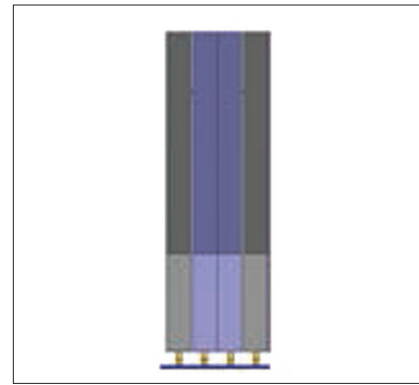
Та же геометрия была проанализирована в частотной области с полной разверткой частоты. В общем случае полная развертка во всем интересующем диапазоне частот по крайней мере на порядок медленнее, чем решение для собственных мод. Соответствующая кривая вносимых потерь для этой структуры показана на рис. 7.

Обратите внимание, что резонансы на рис. 7 совпадают с модами 1 и 5 в таблице 1. Решения на основе собственных мод определяют все частоты, на которых может резонировать данная структура, но не все моды будут возбуждаться дифференциальным сигналом. В случаях, когда собственный дифференциальный режим неочевиден, пользователь может просмотреть полное 3D-распределение поля решения для собственного режима.

Вместо того чтобы тратить время на вычисления для выполнения частотной развертки, можно использовать более эффективный способ исследовать, какие собственные моды имеют



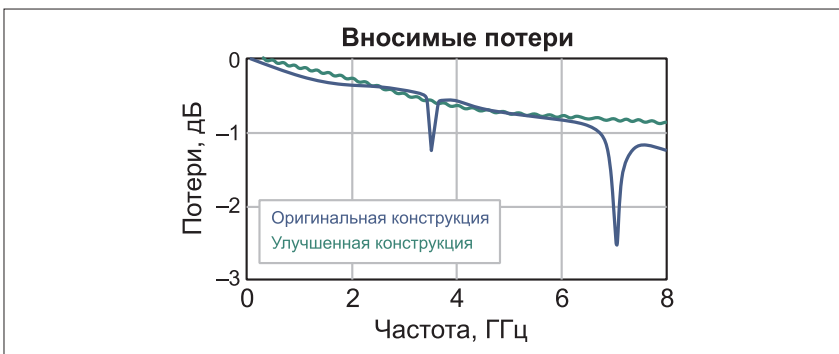
▲ Рис. 8. Распределения электрического поля, показывающие режим, возбуждаемый дифференциальной энергией (слева), и режим, не возбуждаемый дифференциальной энергией (справа)



▲ Рис. 9. Поперечное сечение с уменьшенным зазором GS

Таблица 2. Результаты решения с использованием уменьшения воздушного зазора GS

Собственная мода	Частота, ГГц	Добротность
Режим 1	3,12208 + i0,0171840	90,8441
Режим 2	3,84581 + i0,0295728	65,0247
Режим 3	3,97548 + i0,0308672	64,3983
Режим 4	6,30514 + i0,0302139	104,343
Режим 5	6,52638 + i0,0414596	78,7094
Режим 6	6,63072 + i0,0475010	69,7973
Режим 7	6,93874 + i0,00794452	436,700
Режим 8	9,20723 + i0,0595737	77,2776
Режим 9	9,37431 + i0,0524988	89,2826
Режим 10	9,52629 + i0,0439748	108,317



▲ Рис. 10. Уменьшение добротности приводит к улучшению кривой вносимых потерь

значение и это посмотреть на графиках их полей. Такой метод по крайней мере на порядок быстрее, чем традиционная полная развертка. Изучая поля, пользователь может определить, какие из них генерируются дифференциальным сигналом.

На рис. 8 показаны графики поля собственных мод, которые идентифицируют резонанс, возникающий с дифференциальной энергией (слева), и поле собственных мод, которое вряд ли будет возбуждено дифференциальной энергией (справа). Часто первый собственный режим (в данном примере на частоте 3,5 ГГц) относится к дифференциальному режиму, что имеет первостепенное значение. Кроме того, гармоники более высокого порядка (например, режим 5 на частоте 6,9 ГГц) также обычно актуальны.

Возвращаясь к структуре зазора GS, отметим, что производительность может быть улучшена за счет уменьшения силы резонансов. Другими словами, геометрия может быть настроена таким образом, чтобы резонансные моды давали более низкие добротности. Один из способов достижения этой цели с помощью такой геометрии — уменьшение воздушного зазора GS, как показано на рис. 9. Результаты собственного решения обобщены в таблице 2.

Снижение добротности очевидно при сравнении результатов в таблицах 1 и 2, особенно для режимов 1 и 5. Поэтому ожидается, что уменьшенная геометрия зазора GS будет работать лучше. Действительно, при моделировании полной развертки частоты кривая вносимых

потерь показала значительное улучшение (рис. 10).

Наконец, как мы видели ранее, добавление или удаление металла в разьеме окажет влияние на сопротивление. Изменение расположения пластин тоже влияет сопротивление. В большинстве случаев проектировщику придется пересмотреть настройку сопротивления, чтобы достичь оптимальных электрических характеристик.

#### ВЫВОДЫ

В идеальном мире SI мы бы просто сформировали импеданс, добавили больше соединений заземления везде, где мы видим  $t$ , и закончили бы на этом. Но нельзя просто игнорировать все происходящее вокруг разьема. Обычно мы фокусируемся на SI, механике и производстве. И на каждом этапе следим, чтобы по крайней мере сопротивление и вносимые потери работали должным образом, не говоря уже обо всех других показателях SI, способных «вступить в игру», — общем режиме, перекрестных помехах, преобразовании режимов, перекосе...

Нет, конструкция высокоскоростного разьема — это не просто пластик и металл, сшитые вместе. И не магия. Это процесс, требующий опыта и знаний, хотя некоторые вещи можно объяснить простыми словами. И даже некоторые более сложные. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Simonovich B. What is Differential Impedance and Why do We Care? [www.signalintegrityjournal.com/blogs/12-fundamentals/post/1665-what-is-differential-impedance-and-why-do-we-care](http://www.signalintegrityjournal.com/blogs/12-fundamentals/post/1665-what-is-differential-impedance-and-why-do-we-care).
2. Simonovich B. Via Stubs — Are They all Bad? [www.signalintegrityjournal.com/blogs/7-voice-of-the-experts-signal-integrity/post/355-via-stubs-are-they-all-bad](http://www.signalintegrityjournal.com/blogs/7-voice-of-the-experts-signal-integrity/post/355-via-stubs-are-they-all-bad)
3. Bogatin E. How Long a Stub is Too Long. [www.edn.com/how-long-a-stub-is-too-long-rule-of-thumb-18/](http://www.edn.com/how-long-a-stub-is-too-long-rule-of-thumb-18/)
4. Correia D., Rowlands M., Haser A. GSSG Resonance Method for Interconnect Designs. [www.signalintegrityjournal.com/articles/441-gssg-resonance-meth-od-for-interconnect-designs](http://www.signalintegrityjournal.com/articles/441-gssg-resonance-meth-od-for-interconnect-designs)