

Моделирование влияния изгибов проводников на ВЧ сигнал

Юрий Шлепнев

Опубликовано в LinkedIn 2 апреля 2021 г.

Изгибы часто присутствуют в печатных платах, оказывая негативное воздействие на качество сигнала. Оценить это воздействие можно, в том числе, с помощью моделирования. Например, с помощью программы Simbeor [1], которая поддерживает электромагнитный анализ. Изгибом можно пренебречь в узких цифровых межсоединениях, но не в более широких трассах, используемых в ВЧ структурах, которые в настоящее время часто применяются в печатных платах.

В текущее время достаточно много работ по изучению изгибов. Одной из недавних работ является статья Jose Moreira по оптимизации и влиянию изгиба на качество сигнала [2]. Автор предложил соотнести измерения, проведенные в Advantest, с анализом в Simbeor и предоставил все необходимые данные измерений для структур, показанных на Рис.1. Это отличная возможность подтвердить электромагнитную теорию при помощи измерений.

Далее приводится схема всех этапов проверки и ее результаты.

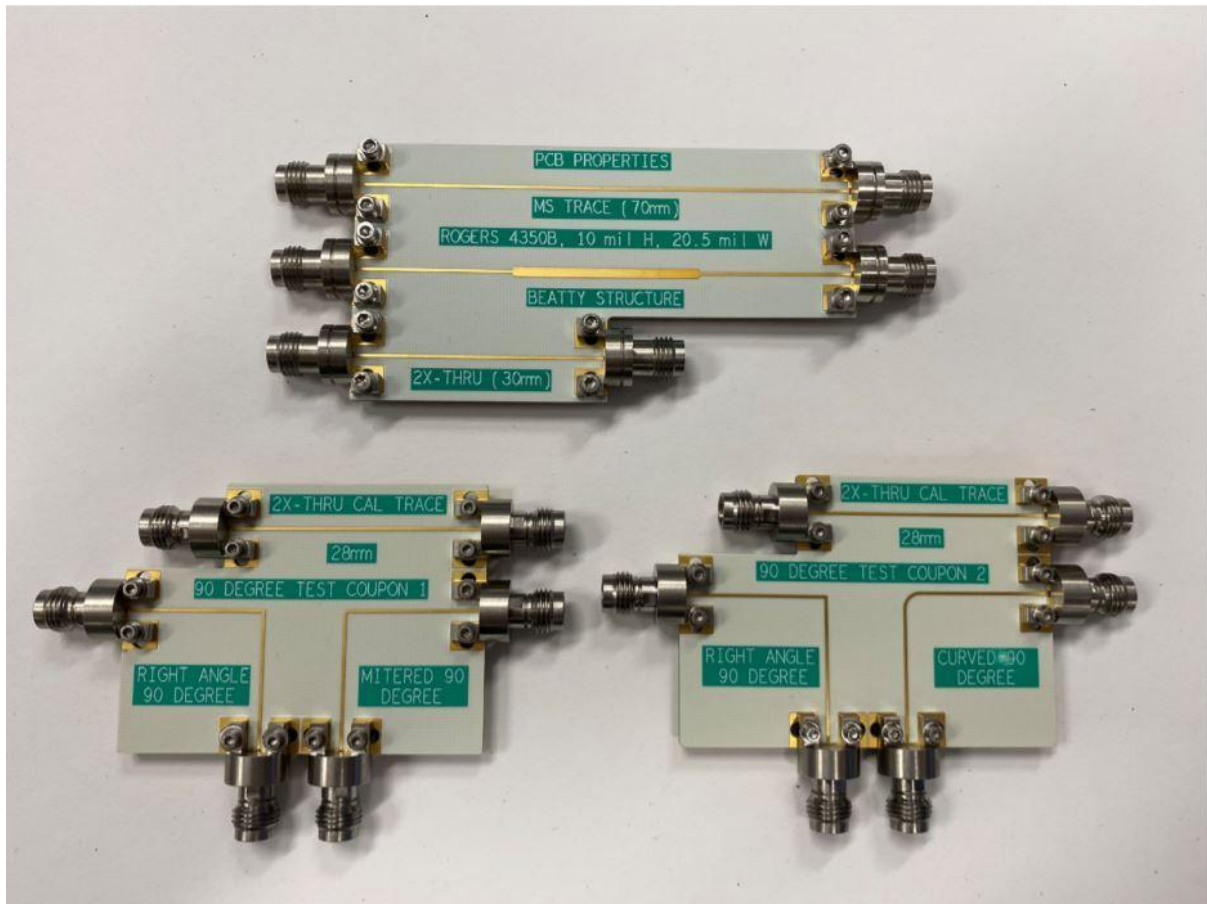


Рисунок 1. Тестовые структуры от Advantest для определения модели материала (вверху) с некомпенсированными и косыми изгибами (внизу слева) и некомпенсированными и изогнутыми изгибами (внизу справа).

Первым шагом является определение свойств материала. Как правило результаты недостаточно соотносятся без идентификации материала. Идентификация материала может быть выполнена с помощью измерений S-параметров для длинных и коротких линий (верхняя структура на Рис. 1) с помощью GMS-параметров без отражения [3] в программе Simbeor. S-параметры были измерены на частоте до 60 ГГц и предоставлены Jose Moreira из Advantest. Все показатели качества измеренных S-параметров оказались хорошими или приемлемыми, а TDR двух отрезков линии были согласованными для определения модели материала до 60 ГГц. Все тестовые структуры представляют собой микрополосковые линии, покрытые толстым слоем никеля (стандартное значение 6 мкм) и относительно толстым слоем золота (0,1 мкм - толще, чем обычно). Это покрытие необходимо учитывать

в модели - оно оказывает существенное влияние на потери. Нам известны свойства диэлектрика Rogers 4350B в соответствии с данным производителя (что может быть отправной точкой для идентификации материала). Для никеля мы также можем взять модель Ландау-Лифшица [4]. Неизвестными здесь являются в основном параметры шероховатости модели. Результатом идентификации являются модели и параметры, представленные на рис. 2, что обеспечивает корреляцию в GMS-параметрах, представленных на рис. 3. Для учета высокочастотной дисперсии для всех моделей в данной работе был использован Simbeor 3DML.

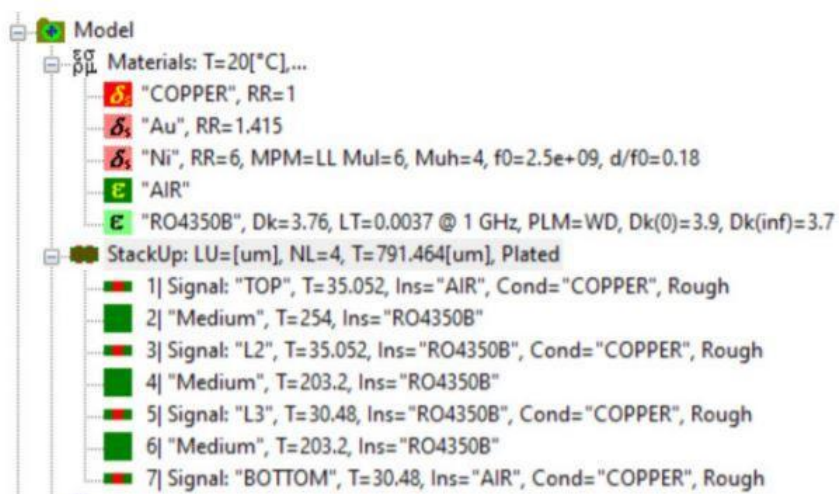


Рисунок 2. Материалы моделей и стек. Параметр шероховатости задается для шероховатых поверхностей меди в стекe как Модель Huray-Bracken с коэффициентами SR=0.6um и RF=8.

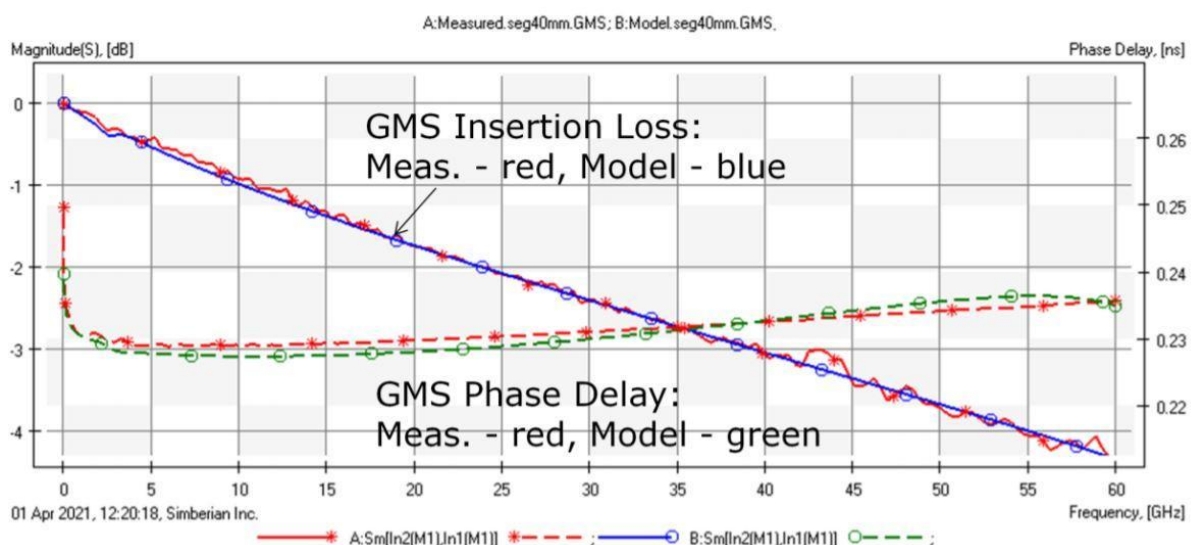


Рисунок 3. Измеренный и промоделированный параметр передачи GMS без отражений шириной 20.5 mil, отрезок микрополосковой линии 40 мм (разница между длиной и короткой линиями) после настройки материалов моделей.

S-параметры отрезков линии и поперечное сечение трассы также могут быть использованы в Simbeor для проверки с помощью метода ETF, они также применяются здесь для резонатора Bitty standard (структура с более широкой линией посередине на Рис. 1) для проверки моделей материалов.

Рис. 4 показывает практически идеальную корреляцию примерно до 45 ГГц. Корреляция на более высоких частотах нарушается из-за различий в геометрии реальной структуры (проявляется как разница в измеренных $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$), а также из-за режимов высокого порядка в модели.

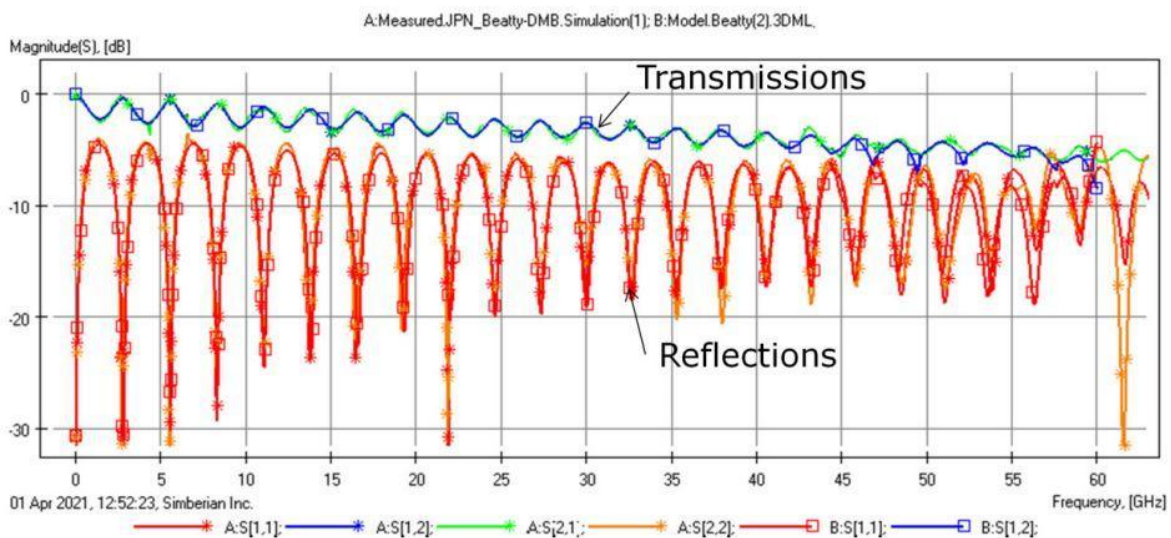


Рисунок 4. Проверка модели выявленного материала с помощью измеренных и откалиброванных S-параметров стандарта Битти - расположение резонансов демонстрирует правильное моделирование дисперсии.

Следующим шагом является создание моделей изгибов и соотнесение с результатами измерений. Вычисленный TDR по измеренным S-параметрам изгибов, представлен на Рис. 5 (рассчитан с помощью RCM в Simbeor). Эффект влияния изгибов здесь хорошо заметен из-за более широких, чем обычно, трасс.

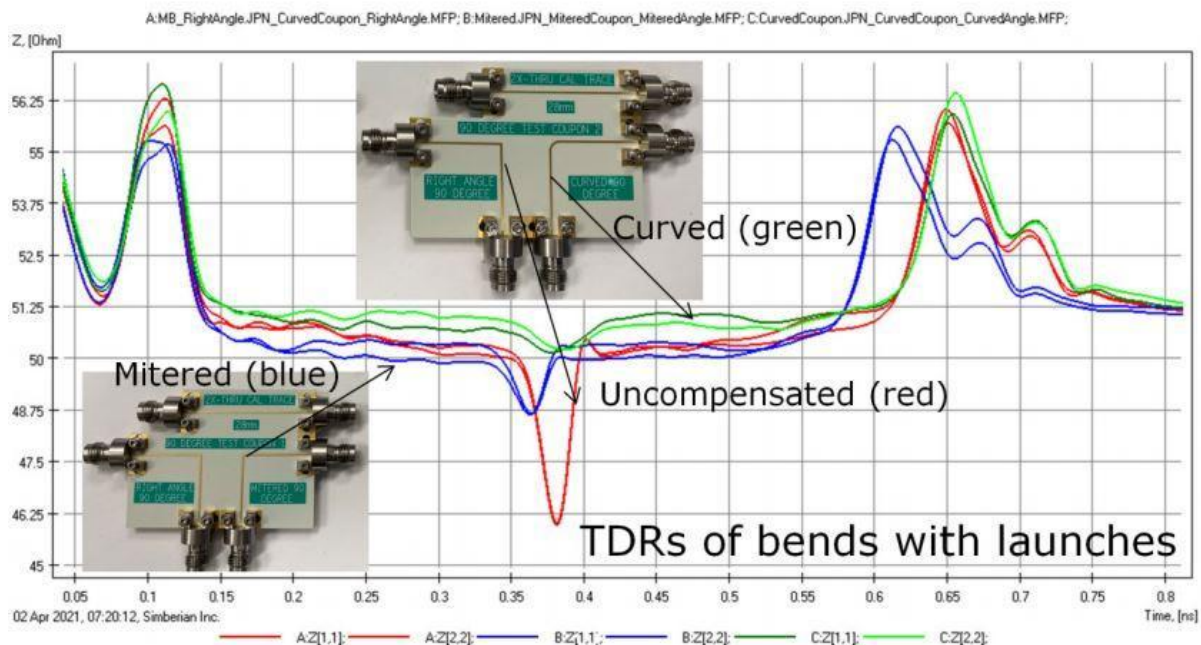


Рисунок 5. Значения TDR, рассчитанные по измеренным S-параметрам для трех тестовых структур с противоположных концов.

Мы наблюдаем, что некомпенсированный изгиб имеет провал почти 4 Ом (красные линии), изгиб с фаской - чуть более 1 Ом (синие линии), скругленный - менее 0,5 Ом (зеленые линии). Провалы изгиба находятся посередине графиков TDR. Все изгибы добавляют емкость. Мы также можем заметить, что реальные структуры имеют существенные отклонения - около 1 Ом вдоль трасс и около 1,5 Ом в местах перехода к линии передачи, что довольно значительно. Существует два способа выполнения построения и сравнения моделей. Первый способ - создание моделей для всех конструкций, включая соединители и места переходов к линии передачи. Это возможно, но для этого требуется геометрия или модели соединителей и более сложная настройка.

Другим вариантом является отсоединение разъемов и мест переходов к линии передачи и измерение S-параметров только для изгибов с небольшими сегментами трасс с обеих сторон. De-embedding - это способ избавления от влияния разъема, мест переходов к линии передачи и какого-то сегмента трассы из исходных S-параметров - в результате остаются S-параметры только для исследуемой структуры (в данном случае изгибов). Для

подобного процесса вычитания можно использовать идентифицированные S-параметры половина структуры с коротким сегментом линии (разъем+переход+половина линии передачи). Для подобного процесса вычитания можно использовать идентифицированные S-параметры половина структуры с коротким сегментом линии. Именно это было сделано в источнике [2] с помощью метода вычитания AFR (см. подробности в статье). Также Jose Moreira предоставил измеренные и выделенные S-параметры. Геометрия каждого изгиба импортирована в программу Simbeor из файла ODB++ вместе с материалами и данными о стекапе из проекта идентификации материалов (рис. 2).

Селекторы неоднородностей создаются для каждого изгиба, чтобы опорные плоскости фаз располагались точно на плоскости de-embedding. Выбор частотных точек для анализа с использованием рациональной интерполяции используется для всех вычислений - они одновременно строят рациональную компактную модель, что позволяет напрямую вычислять TDR для каждого изгиба. Процесс de-embedding в источнике [2] был выполнен с помощью S-параметра половины структуры с коротким сегментом линии - половина длины этой структуры обеспечивает расположение плоскостей de-embedding. Моделирование изгибов на самом деле выполняется очень просто. Далее наступает самый главный момент - сравнение результатов анализа с результатами измерений TDR и S-параметров (показано на рис. 6 - рис. 11).

Насколько оно прошло хорошо? Все зависит от того, как посмотреть. В целом можно сделать вывод, что корреляция является хорошей для некомпенсированных и скошенных изгибов с более значительными отражениями (рис. 6 - рис. 9). Корреляция параметра отражения для скругленного изгиба недостаточна. Это связано с проблемами процесса de-embedding. В конце концов, если эксперимент не соотносится с теорией, значит виноват эксперимент. Обратите внимание, что все de-embedded S-параметры имеют некоторые колебания как по амплитуде, так и по фазе, а вычисленные S-параметры являются сглаженными. Действительно ли это проблема моделирования или измерений? Являются ли эти

колебания физическими? В данном случае это связано с проблемой de-embedding из-за геометрии или особенностей материала в тестовых устройствах. Вариации в переходе от разъема к линии передачи и трассах хорошо видны на TDR на рис. 5, а также на рис. 12. Когда S-параметры половины структуры с коротким сегментом линии разделяются на S-параметры двух половин, то эти половины не совсем совпадают с параметрами переходов, которые должны быть удалены в структурах с изгибами. Таким образом, при выполнении вычитаний различия проявляются в виде пульсаций. Однако такие S-параметры имеют приемлемое качество и могут быть легко преобразованы в пассивные и причинно-следственные рациональные компактные макромодели, как это сделано здесь для расчетов TDR для некомпенсированных и скошенных изгибов. Не удалось добиться достаточной фиксации S-параметров для скругленного изгиба с отражениями ниже -20 дБ - т.к. шум, вносимый физическими различиями в тестовых устройствах, был сравним с эффектом прерывистости в этом случае.

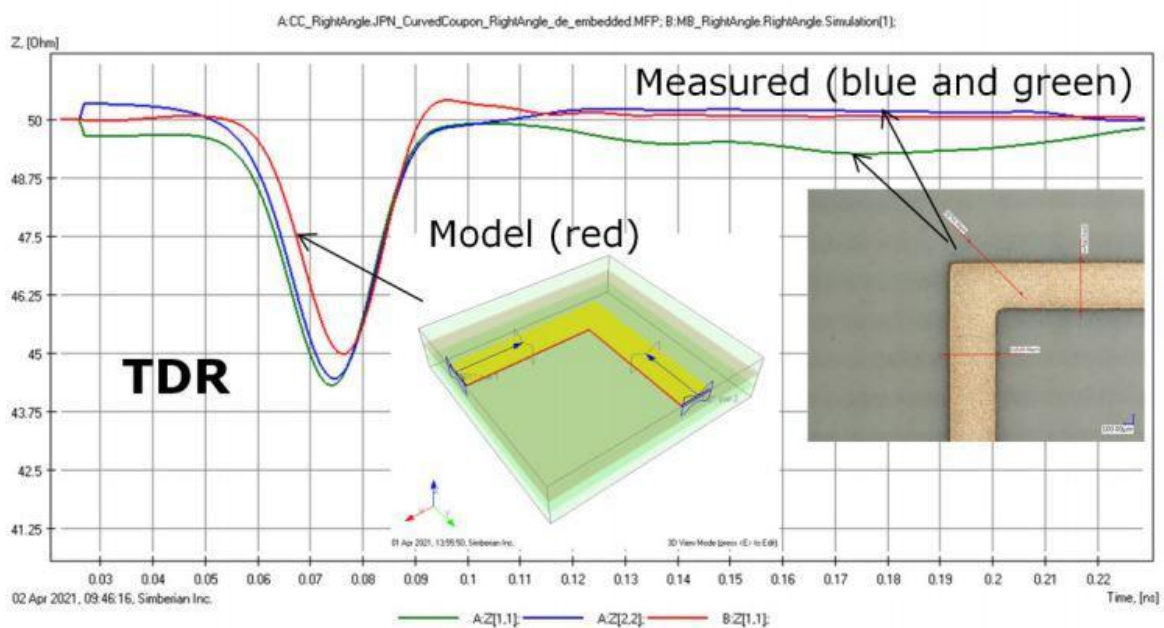


Рис. 6. TDR, рассчитанный по измеренным и de-embedded S-параметрам и моделированным S-параметрам некомпенсированного сгиба.

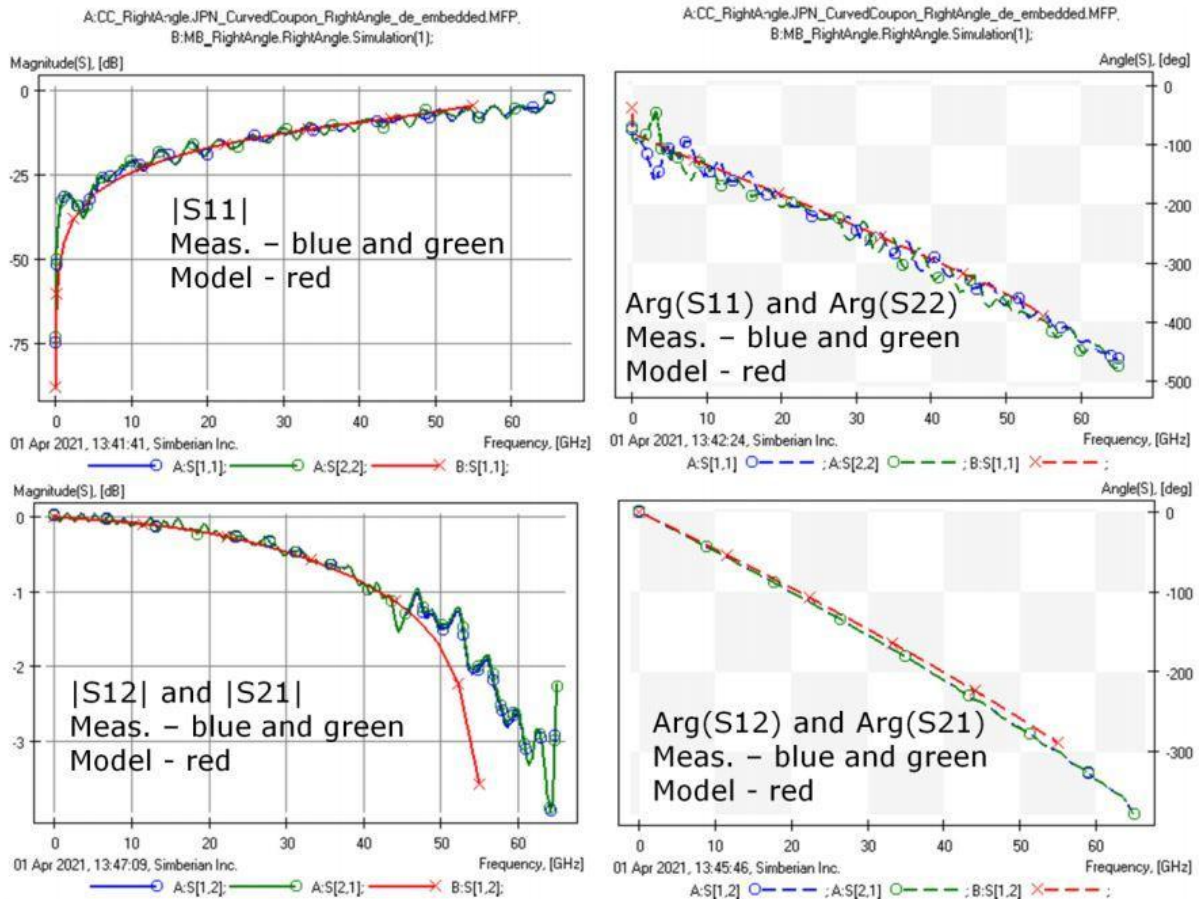


Рис. 7. Магнитуды и углы измеренных и моделируемых S-параметров некомпенсированного сгиба.

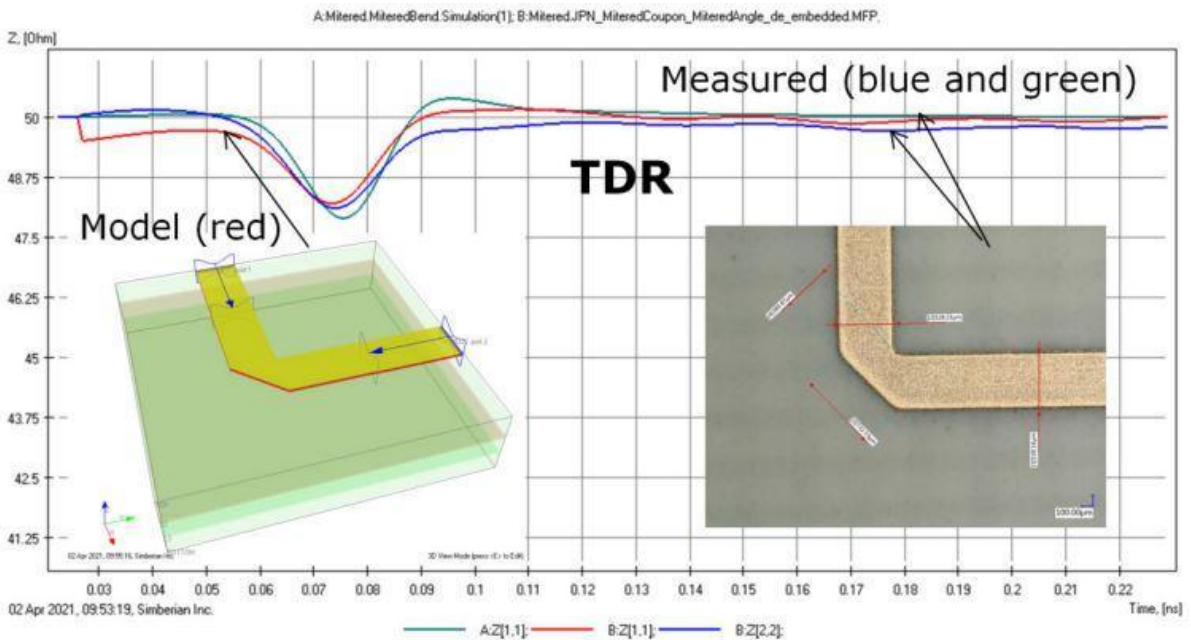


Рис. 8. TDR, рассчитанный по измеренным и de-embedded S-параметрам и по моделированным S-параметрам сгиба.

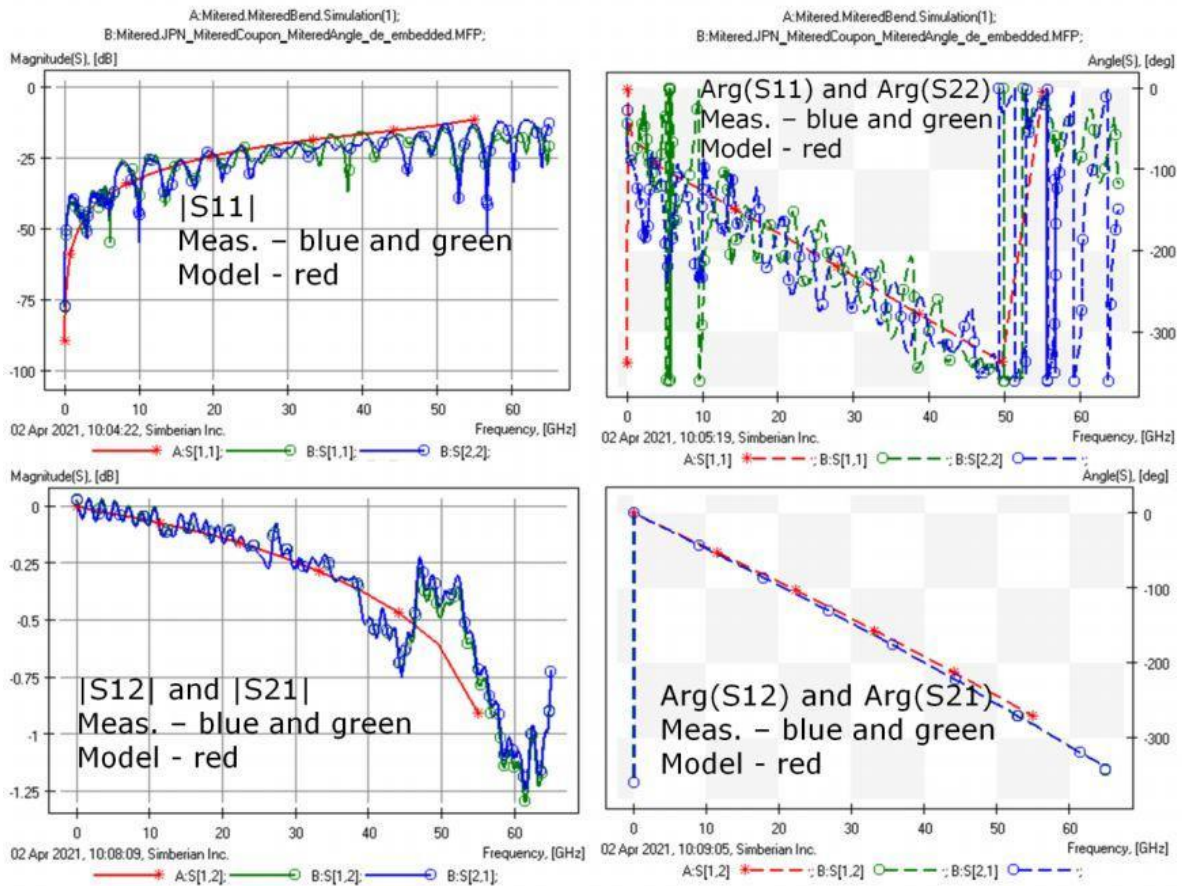


Рис. 9. Магнитуды и углы измеренных и моделируемых S-параметров скошенного сгиба.

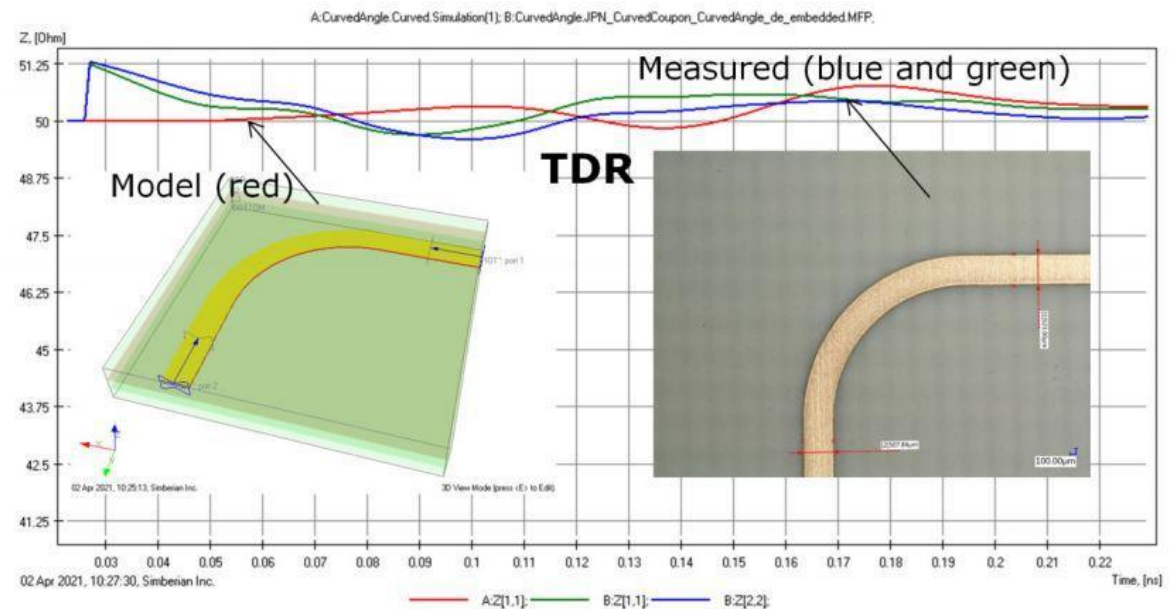


Рис. 10. TDR, рассчитанный по измеренным и de-embedded S-параметрам и по смоделированным S-параметрам скругленного сгиба.

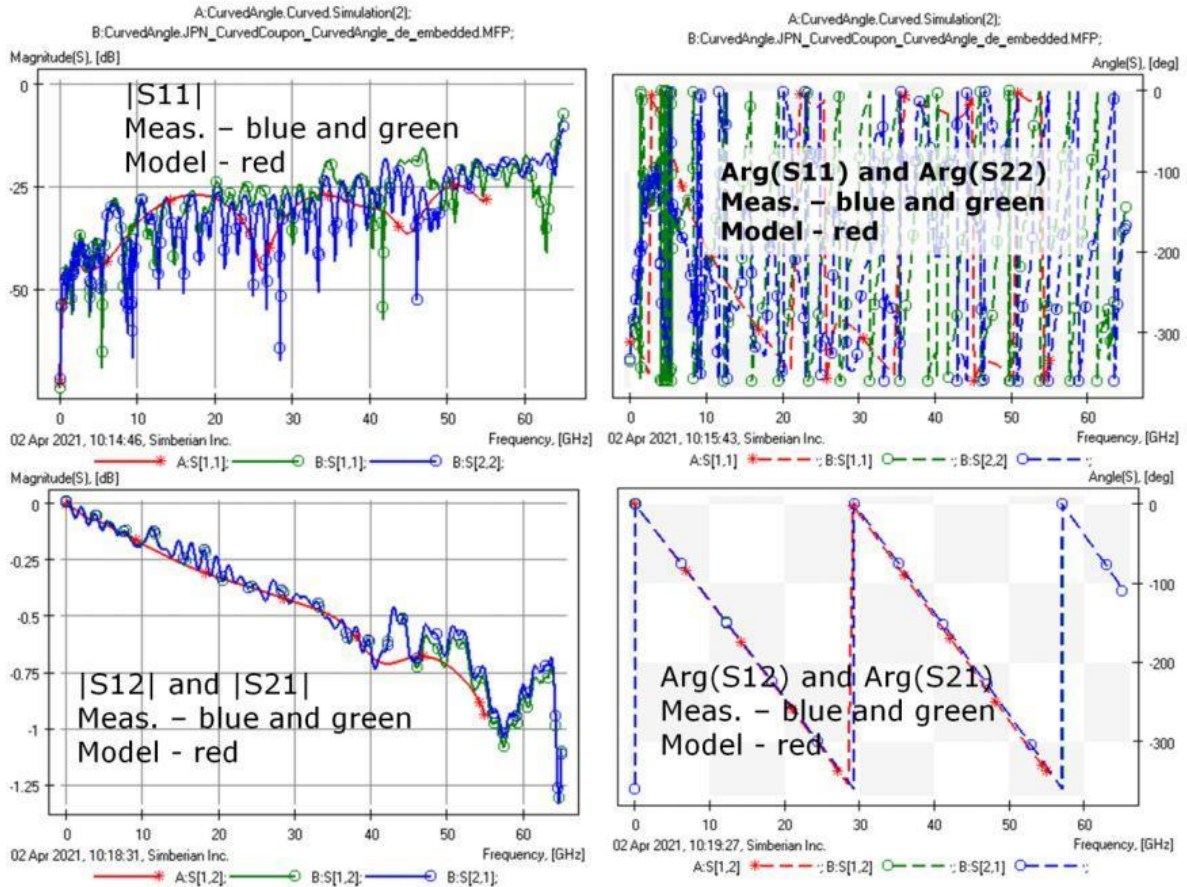


Рис. 11. Магнитуды и углы измеренных и смоделированных S-параметров скругленногогиба.

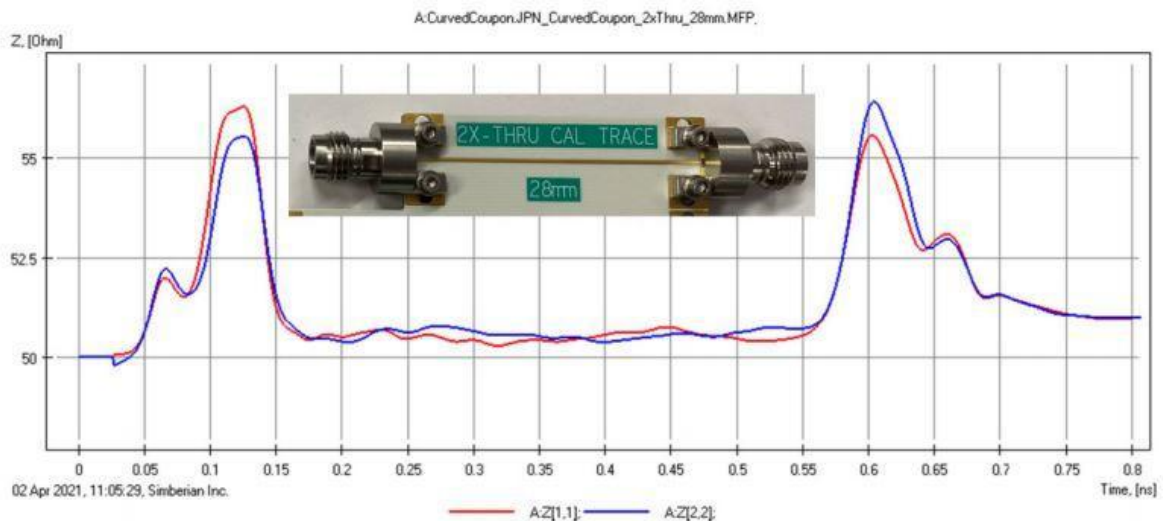


Рис. 12. TDR S-параметра половины структуры с коротким сегментом линии с противоположного конца, рассчитанный по измеренным S-параметрам - показывает нарушение симметрии и отличия от вычлененных структур.

Этот простой эксперимент демонстрирует возможности в сфере печатных плат, когда речь идет о корреляции анализа и

измерений. Высококачественные измерения выполнены при помощи Advantest с использованием современной техники de-embedding. Хорошая корреляция между анализом и измерениями была продемонстрирована для относительно отражающих изгибов - некомпенсированного и скошенного (с не очень оптимальным расположением надреза). Однако мы не смогли получить однозначного заключения для скругленного сгиба из-за геометрических отклонений в тестовых устройствах. Тем не менее, такие модели надежны (мое предвзятое мнение).

Источники:

1. Y. Shlepnev, How Interconnects Work: How Interconnects Work: Minimal-reflection 90-degree bends in strip lines, Simberian App Note #2021_01, March 2, 2021 <https://www.simberian.com/AppNotes/HowToMakePerfectBends-2021-03-02.pdf>
2. H. Barnes, G. Bianchi, J. Moreira, A Review of 90 Degree Corner Design for High-Speed Digital and mmWave Applications, IEEE EPEPS 2020 <https://ieeexplore.ieee.org/document/9231371>
3. Y. Shlepnev, Broadband material model identification with GMS-parameters, IEEE EPEPS 2015 https://www.simberian.com/AppNotes/Shlepnev_MaterialModelIdentification_GMS_epeps2015_paper.pdf.
4. Y. Shlepnev, S. McMorrow, Nickel characterization for interconnect analysis. - Proc. of the 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Long Beach, CA, USA, August, 2011, p. 524-529.