

Сравнительный анализ методов исключения тестовой оснастки при выполнении измерений параметров рассеяния электронных компонентов на печатной плате

А.А. Савин^{1,2}, В.Г. Губа², А.А. Ладур²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

²Научно-производственная компания ТАИР

Аннотация: в данной работе с помощью математического имитационного моделирования и экспериментально выполнено сравнение двух методов исключения влияния тестовой оснастки на результаты измерений S-параметров электронных компонентов печатных плат. Рассматриваемые методы реализуются при наличии всего одной меры в составе калибровочной оснастки. Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне частот до 20 ГГц при помощи векторного анализатора цепей Кобальт.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, печатная плата, электронные компоненты, параметры рассеяния, тестовая оснастка

1. Введение

При разработке современных радиоэлектронных устройств и систем требуется информация о параметрах используемых электронных компонентов. Для выполнения измерений параметров рассеяния необходимы тестовые оснастки, позволяющие подключить тестируемый компонент к векторному анализатору цепей (ВАЦ). С целью исключения систематической погрешности выполняются калибровочные измерения и процедура исключения (англ. de-embedding) параметров оснастки. Калибровочная оснастка может содержать одну или больше калибровочных мер. Калибровочные оснастки с несколькими мерами, как правило, используют традиционные для ВАЦ способы калибровки, должны обеспечивать высокую электрическую повторяемость в трактах разных мер и требуют выполнения большого числа измерений. Поэтому вопросы метрологии актуально рассмотреть для оснастки с одной мерой.

Наиболее часто на печатной плате можно встретить электронные компоненты с двумя основными электрическими контактами. Традиционно тестовая оснастка для измерения S-параметров таких компонентов содержит два коаксиально-полосковых перехода, линию передачи на печатной плате и область подключения исследуемого устройства (ИУ) в средней части линии. В оснастке, которая используется для получения калибровочных измерений, вместо области подключения ИУ находится идеальная перемычка нулевой длины. Такую оснастку можно представить в виде двух равных по длине частей, расположенных слева и справа от перемычки. На рисунке 1 показана модель данной калибровочной меры или тестовой оснастки без ИУ.

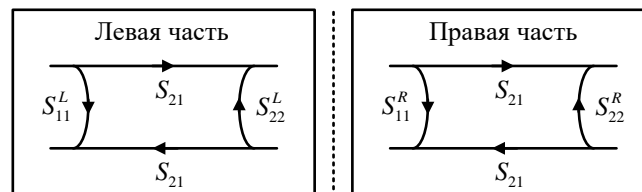


Рисунок 1. Упрощенная модель калибровочной меры или тестовой оснастки. Перемычка нулевой длины или место подключения ИУ показаны пунктирной линией.

Части оснастки можно считать взаимными устройствами с равными коэффициентами передачи (КП) S_{21} . Коэффициенты отражения (КО) левой и правой частей обозначены индексами «L» (англ. Left) и «R» (англ. Right). Зная КП и КО частей оснастки не сложно выполнить их исключение при выполнении основных измерений, например, используя Т-матрицы. Однако изначально на каждой частоте известны только результаты калибровочных измерений, то есть 4 параметра рассеяния меры целиком: S_{11}^m , S_{21}^m , S_{12}^m и S_{22}^m . В модели на рисунке 1 калибровочная оснастка целиком является взаимным устройством и $S_{21}^m \approx S_{12}^m$, что часто подтверждается на практике. Знак примерного равенства указывает на возможное отличие измерений, например, за счет влияния шумов и остаточной систематической погрешности калиброванного ВАЦ, которые рассматриваемая модель не учитывает. Чтобы оснастка была симметричным устройством $S_{11}^m \approx S_{22}^m$, необходимо выполнение равенств $S_{11}^L = S_{22}^R$ и $S_{22}^L = S_{11}^R$.

Основной методов исключения влияния тестовой оснастки являются алгоритмы получения значений параметров рассеяния левой и правой частей из измеренных значений параметров рассеяния калибровочной оснастки. В статье [1] и патенте [2] представлен алгоритм обработки измерений симметричной оснастки, который, как утверждают авторы, может быть применен и в случае несимметричной оснастки. Алгоритм использует аппарат ABCD-параметров и алгоритм Левенберга-Марквардта для решения системы нелинейных уравнений. Далее будем обозначать этот алгоритм «В» (от англ. Bisect). Кроме алгоритма «В» рассмотрим простой алгоритм «S» (от англ. Simple). Его суть поясняет рисунок 1 с заданием параметров частей по формулам:

$$S_{21} = \sqrt{S_{21}^m}; S_{11}^L = S_{11}^m; S_{22}^R = S_{22}^m; S_{22}^L = S_{11}^R = 0. \quad (1)$$

Фактически, алгоритм (1) предполагает, что при прямом зондировании (слева направо) отражения относим к левой части оснастки, а при обратном – к правой.

Важно отметить, что существуют другие подобные [1, 2] алгоритмы определения параметров оснастки. В работе [3] рассмотрен способ «разрезания» оснастки путем ее представления эквивалентными схемами с Y- и Z-параметрами. Еще один алгоритм [4] использует представление оснастки во временной области. Для реализации алгоритма [4] линия на плате должна обеспечивать фильтрацию во временной области сигналов, отраженных от разных коаксиально-полосковых переходов, и возможность установки ИУ на плату после выполнения калибровочных измерений.

2. Результаты имитационного моделирования

Моделирование алгоритмов «В» и «S» выполнено методом Монте-Карло. Модуль КП S_{21} принят равным 0 дБ, модули всех КО S_{ii} частей оснастки приняты равными -30 дБ. Аргументы КП и КО независимы, случайны с равномерным законом распределения вероятностей от 0 до 360 градусов. СКО случайной погрешности измерений ВАЦ -80 дБ. Порядок моделирования следующий. На первом этапе выполняется расчет измеренных значений S-параметров оснастки без ИУ при известных параметрах левой и правой частей. Затем выполняется обработка этих калибровочных измерений с целью определения оценок параметров левой и правой частей двумя алгоритмами. Далее рассчитываются измерения тестовой оснастки вместе с ИУ, производится их коррекция, и находятся погрешности измерений параметров ИУ. Число испытаний для накопления статистики 1000.

Сначала рассмотрим результаты моделирования для взаимной симметричной калибровочной оснастки. При моделировании в каждом статистическом испытании были введены условия $S_{11}^L = S_{22}^R$ и $S_{22}^L = S_{11}^R$. На рисунке 2а пунктирными (алгоритм

«В») и сплошными (алгоритм «S») линиями показаны минимальные и максимальные погрешности измерений КО ИУ для разных методов исключения. Штрихпунктирной линией показана погрешность измерений ВАЦ без коррекции отражений оснастки (только смещение плоскости измерений от плоскости коаксиальной калибровки ВАЦ до плоскости подключения ИУ). Видим, что максимальная погрешность алгоритмов практически одинакова. Однако алгоритм «В» в ряде случаев может обеспечивать существенно меньшую погрешность измерений КО. Анализ показал, что погрешность алгоритма «В» ниже 0,01 реализуется менее чем в 20 % случаев. Максимальные и минимальные погрешности измерений КП практически не зависят от модуля КП ИУ. По результатам моделирования найдены следующие погрешности измерений модуля КП ИУ: 0,319/0,013 дБ для алгоритма «S»; 0,308/0,005 дБ для алгоритма «В» и 0,383 дБ по расчетной формуле для ВАЦ при заданных параметрах искажающей части. Через слеш указаны максимальные и минимальные значения. Расчеты выполнены в диапазоне модулей КП ИУ от 0 до -25 дБ при модуле КО ИУ -5 дБ.

Далее рассмотрим результаты моделирования для взаимной несимметричной оснастки. При моделировании такой оснастки выполнение одновременно двух даже приближенных равенств $S_{11}^L \approx S_{22}^R$ и $S_{22}^L \approx S_{11}^R$ маловероятно. Значения максимальной погрешности измерений КО ИУ показаны на рисунке 2б. Точность работы алгоритма «S» не меняется при изменении свойства симметрии оснастки. При этом качество работы алгоритма «В» ухудшилось и в ряде случаев превышает погрешность ВАЦ. Для примера на рисунке 3 приведены гистограммы, показывающие распределение погрешности измерений. Результаты моделирования данного типа оснастки в части определения погрешности измерений модуля КП ИУ: 0,322/0,012 дБ для алгоритма «S»; 0,326/0,015 дБ для алгоритма «В» и 0,383 дБ по расчетной формуле для ВАЦ.

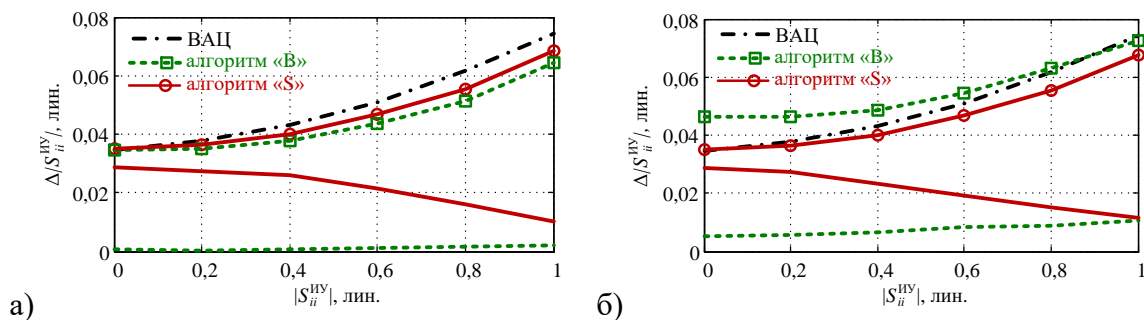


Рисунок 2. Максимальные погрешности измерений модуля КО ИУ для симметричной (а) и несимметричной (б) оснастки (модуль КП ИУ минус 10 дБ).

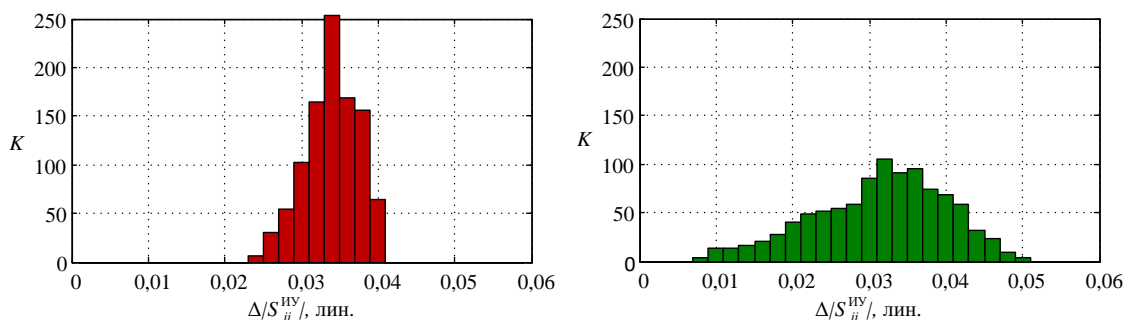


Рисунок 3. Гистограммы распределения погрешности измерений КО ИУ (для модуля КО ИУ 0,4 и модуля КП ИУ минус 10 дБ): слева для алгоритма «S», справа для алгоритма «B»; K – количество попаданий в интервал при обработке 10^3 результатов статистических испытаний.

Также в результате моделирования установлено, что алгоритм «S» требует в 50 раз

меньше времени расчета, чем алгоритм «В». Оценка получена на ПК с процессором Intel Core i7-2630QM (2 ГГц, 6 Мбайт кэш) и объемом оперативной памяти 6 Гбайт.

3. Результаты экспериментальных исследований

Результаты моделирования показали зависимость погрешности измерений КО ИУ от типа алгоритма обработки калибровочных измерений, свойства симметричности оснастки и модуля КО ИУ. Точность измерений КП ИУ, напротив, практически не меняется при изменении условий моделирования.

Экспериментальные измерения получены при помощи ВАЦ Кобальт С1220 [5] в диапазоне частот от 100 кГц до 20 ГГц. Для экспериментов изготовлены различные оснастки. Получены измерения параметров SMD чип-конденсаторов емкостью 100 нФ (корпус 0402) в двух схемах подключения к линии, устройства ESD-защиты LXES15AAA1-117, аттенюатора поверхностного монтажа с ослаблением 8 дБ, усилителей AM1063 и GSA606 и других устройств. Рассмотрим подробно результаты измерений параметров рассеяния усилителя AM1063 производства компании Atlanta Micro, которые изображены на рисунках 4 – 6. Разными линиями показаны результаты после исключения тестовой оснастки различными методами: алгоритм «S» сплошной линией; алгоритм «B» пунктирной линией; алгоритм без коррекции отражений штрихпунктирной линией. Для получения измерений использованы две оснастки с разной суммарной длиной подводящих линий: 74 мм в «длинной» оснастке и 21 мм в «короткой». В данных оснастках установлены разные экземпляры усилителей.

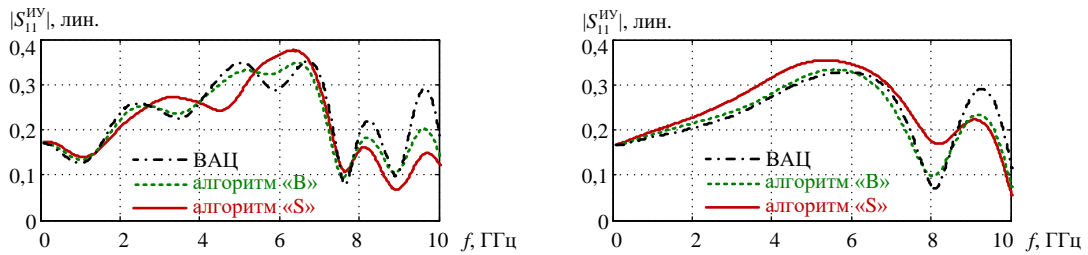


Рисунок 4. Модуль КО усилителя S_{11} в линейном масштабе для длинной (слева) и короткой (справа) оснастки в диапазоне частот до 10 ГГц.

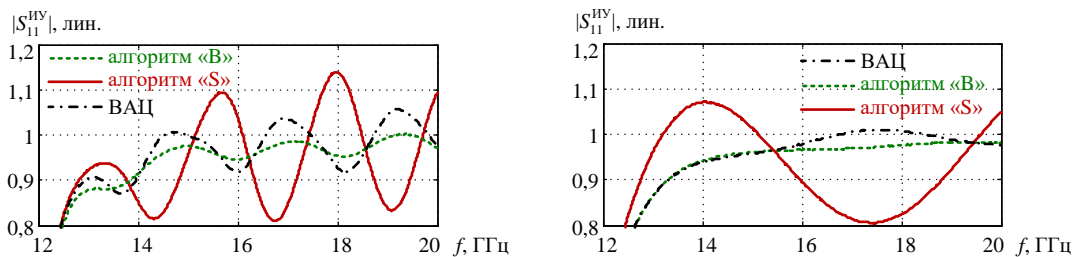


Рисунок 5. Модуль КО усилителя S_{11} в линейном масштабе для длинной (слева) и короткой (справа) оснастки в диапазоне частот выше 10 ГГц.

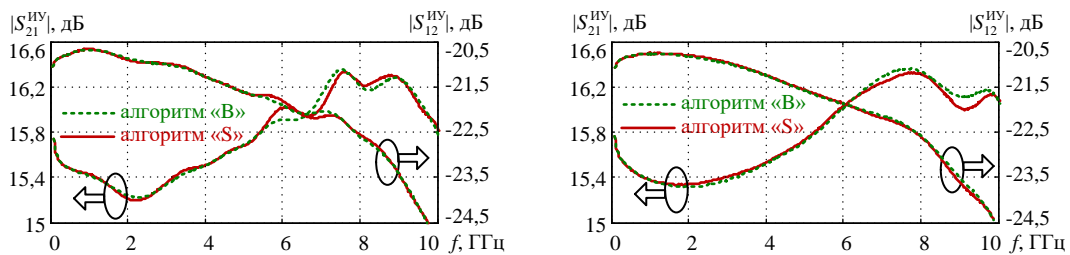


Рисунок 6. Модуль КП усилителя для длинной (слева) и короткой (справа) оснастки в прямом S_{21} (левые оси) и обратном S_{12} (правые оси) направлении (диапазон частот до 10 ГГц).

Биения на графиках измеренных значений модулей КО и КП ИУ показывают наличие погрешности измерений. Половина размаха биений характеризует погрешности измерений. Наибольшие биения наблюдаются при использовании длинной оснастки. Погрешности алгоритма «В» ниже погрешности алгоритма «S», что указывает на наличие свойства симметрии оснасток (особенно для коротких оснасток). Это объясняется тем, что в их составе использованы идентичные переходы с близкими КО и равными длинами линий, подключающих ИУ слева и справа. Погрешность измерений модуля КО ИУ зависит длины оснастки и уровня КО. При уровне КО около 0,3 (рисунок 4) алгоритмы «S» и «В» имеют точность порядка 0,05 и 0,04, соответственно, что несколько лучше, чем без коррекции отражений от переходов. Это удовлетворительно согласуется с результатами моделирования (рисунок 2а). При уровне КО около 1 (рисунок 5) погрешность алгоритма «S» выше, чем полученная при моделировании. Причины в следующем. Во-первых, моделирование выполнено при условии, что калибровочная и тестовая оснастка одна и та же. В эксперименте это две разные, хоть и близкие по параметрам, оснастки. Во-вторых, результаты моделирования получены для модуля КП ИУ минус 10 дБ. В-третьих, КО переходов оснастки с ростом частоты возрастают и в диапазоне выше 10 ГГц могут превышать принятое при моделировании значение -30 дБ. Также, при моделировании не учитывалась остаточная систематическая погрешность ВАЦ, которая оказывает влияния на точность измерений всех алгоритмов, но ее уровень ниже неопределенности свойств оснастки. Погрешность измерений модуля КП ИУ не превышает 0,3 дБ вне зависимости от длины оснастки и уровня КП (рисунок 6), что полностью соответствует результатам моделирования.

4. Заключение

В работе основное внимание уделено сравнению известного метода исключения тестовой оснастки [1, 2] с простым предложенным методом. Путем моделирования исследована точность измерений параметров рассеяния ИУ при различных условиях работы алгоритмов. Для подтверждения выводов, полученных в ходе моделирования, проведен эксперимент и выполнен анализ биений на измеренных частотных характеристиках КО и КП ИУ. При использовании оснастки малой длины имеются хорошие предпосылки для обеспечения симметричности оснастки и алгоритм [1, 2] показывает высокую точность. Предложенный алгоритм требует гораздо меньше вычислительных ресурсов и его можно использовать при низком уровне модуля измеряемого КО. Точность измерений КП для обоих методов примерно одинакова.

Работа выполнена в рамках проекта по **государственному заданию Минобрнауки России № 8.7348.2017/8.9.**

Список литературы

1. Daniel E.S., Harff N.E., Sokolov V., Schreiber S.M., Gilbert B.K. Network analyzer measurement de-embedding utilizing a distributed transmission matrix bisection of a single THRU structure // 63rd ARFTG Conf., pp. 61-68, June 2004.
2. Daniel E.S. Bisect De-embedding for Network Analyzer Measurement // U.S. Patent, Patent No. US 7,643,957 B2, Date of Patent Jan. 5, 2010.
3. Sekiguchi T., Amakawa S., Ishihara N., Masu K. On the validity of bisection-based thru-only de-embedding // IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures, 22-25 March 2010, Hiroshima, Japan, pp. 66-71.
4. Savin A.A., Guba V.G., Sinogin M.V., Morozov O.Yu., Bykova O.N. A Simple Test Fixture De-embedding Method for PCB Components Measurements Using a Calibrated Vector Network Analyzer // Proc. of the 45th EuMC, 7-10 Sept. 2015, Paris, France, pp. 983-986.
5. User Manual. Specification. URL: http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/c1220/user_manual_Cobalt_part1_rus.pdf.