

Методика экспериментального определения параметров печатных плат в диапазоне до 50 ГГц

М.Р. Кириллова, О.Ю. Журавлева, С.С. Чуркин, А.В. Можаровский, М.Е. Суворова

ООО «Радио Гигабит»

Аннотация: В настоящей работе представлено исследование методики IEEE P370, которая позволяет выделить характеристики испытуемого устройства (ИУ) и подобрать «эффективные» параметры печатной платы (ПП) в диапазоне до 50 ГГц. Основной целью работы является проектирование оптимальной конструкции калибровочных структур (тест-купон), выполненных на микрополосковых линиях (МПЛ), для экспериментального исследования калибровки 2x-Thru. Разработанный тест-купон был изготовлен на основе материала Megtron6. Сравнение результатов калибровки матриц рассеяния изготовленных структур с результатами моделирования позволили определить «эффективные» параметры материалов ПП, такие как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь подложки, а также шероховатость поверхности фольги в диапазоне 10 МГц-50 ГГц.

Ключевые слова: IEEE P370, печатная плата, тест-купон, 2x-Thru, калибровка.

1. Введение

Повсеместное развитие систем связи, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн (5G NR FR2), миниатюризация и интеграция приемопередатчиков приводят к необходимости решения двух важных задач: исключение влияния подводящих трактов на результаты измерения испытуемого устройства (ИУ) и определение «эффективных» параметров ПП.

Первая проблема обусловлена тем, что большинство измерительных инструментов, таких как векторные анализаторы цепей (ВАЦ) и рефлектометры во временной области (TDR), используют коаксиальные разъемы в качестве измерительных портов. При этом тестируемые устройства, как правило, не имеют коаксиальных интерфейсов. Таким образом, необходимо использование дополнительных подводящих трактов (fixtures) для подключения измерительного оборудования к выводам ИУ, в частности, переходы от МПЛ к разъему, кабелю, волноводу и т.д. В миллиметровом диапазоне такие системы подведения могут существенно исказить результаты измерений, маскируя истинный отклик ИУ. Для исключения влияния подводящих трактов применяются различные алгоритмы калибровки, например, SOLT, TRL, 2x-Thru, использующие калибровочные меры, изготовленные на ПП совместно с ИУ (тест-купоны). При этом к недостаткам TRL относится ограничение по ширине полосы, а SOLT требует очень высокой точности изготовления калибровочных мер.

Калибровка 2x-Thru, предложенная в стандарте IEEE P370 [1], проста в изготовлении и в то же время широкополосна. Данная калибровка позволяет сместить опорные плоскости измерения с коаксиальных разъемов прямо на микрополосковые выводы ИУ, и тем самым исключить искажения результатов измерений, вызванные подводящими трактами. К ограничению калибровки 2x-Thru относится требование идентичности подводящих трактов, обусловленное алгоритмом обработки.

В практике пассивных устройств на ПП в Ka-диапазоне и выше частотный отклик устройства может иметь смещение в сторону нижних частот (десятки и сотни МГц) из-за эффекта скин-слоя на шероховатой поверхности меди и дополнительной индуктивности линии. Кроме того, значение эффективной диэлектрической

проницаемости и уровень вносимых потерь увеличиваются с ростом шероховатости, в особенности при использовании тонких подложек [2].

Дисперсионные свойства линий на ПП могут быть экспериментально определены с помощью различных методик (например, IPC-TM-650 2.5.5.5), однако выполнение точных и длительных измерений может быть нецелесообразно с учетом возможных производственных разбросов параметров ламинатов и допусков производства ПП. Таким образом, добавление тестовых структур на ПП устройств, модулей, или панелей, является обоснованным для производственного контроля и позволяет решить проблему точного определения параметров материалов ПП вплоть до 50 ГГц.

При разработке устройств миллиметрового диапазона параметры материалов ПП могут быть заданы в настройках САПР. Зачастую данные специфицированы производителями только до частот порядка 10 ГГц. В случае неприемлемого расхождения результатов экспериментов и моделирования устройств в более высоких диапазонах также целесообразно использовать калибровку с помощью тест-купонов.

В стандарте IEEE P370 предлагается использовать следующие МПЛ-структуры для тест-купонов:

- Калибровочная мера 2x-Thru – прямое соединение подводящих трактов, требуется для смещения опорных плоскостей;
- Резонансная структура (т.н. “Beatty” [3]) – МПЛ с последовательной неоднородностью, позволяет подобрать «эффективные» параметры ПП;
- Проверочная линия (опционально) – участок регулярной МПЛ, используется для проверки результатов калибровки.

2. Описание тестовых структур

Схематическое представление тестовых структур и основные принципы проектирования их топологии представлены на рисунке 1. Для подключения МПЛ тест-купона к измерительному оборудованию предусмотрены посадочные места для коаксиального коннектора, которые должны обеспечивать приемлемый уровень согласования и малые вносимые потери перехода [4]. Все МПЛ шириной w должны иметь импеданс $Z_0 = 50$ Ом. Подводящие тракты FIX-1, FIX-2 состоят из коаксиального коннектора, перехода на МПЛ и участка линии до опорной плоскости калибровки (рисунок 1, б). В структуре Beatty (рисунок 1, а) подводящие линии имеют ширину w , а последовательная неоднородность МПЛ – утроенную ширину $3w$. Одновременно с этим ее длина L_B равна $2x$, где x – длина подводящих МПЛ до опорной плоскости.

В стандарте [1] определены следующие правила:

- Общая длина меры 2x-Thru должна быть не менее трех длин волн λ_{\min} , соответствующей самой высокой частоте измерений;
- Подводящие тракты должны иметь регулярный участок МПЛ у опорной плоскости длиной L_p не менее 50 mil (1.3 мм);
- Тест-купон должен быть изготовлен на той же ПП, что и ИУ;
- Тест-структуры располагаются на том же слое печатной платы, что и линии ИУ;
- Коаксиально-микроразветвляющие переходы тестовых структур должны быть ориентированы в одном направлении на ПП, как показано на рисунке 1.

Последнее требование обусловлено ориентацией стеклоткани подложки относительно МПЛ. Дисперсионные характеристики линий ПП чувствительны к направлению распространения волны относительно рисунка стеклоткани. Кроме того, в стандарте рекомендуется применение трассировки МПЛ под малыми углами ($5-10^\circ$) к волокнам (рисунок 1), а также использование однородного состава стекловолокна для внутренних слоев.

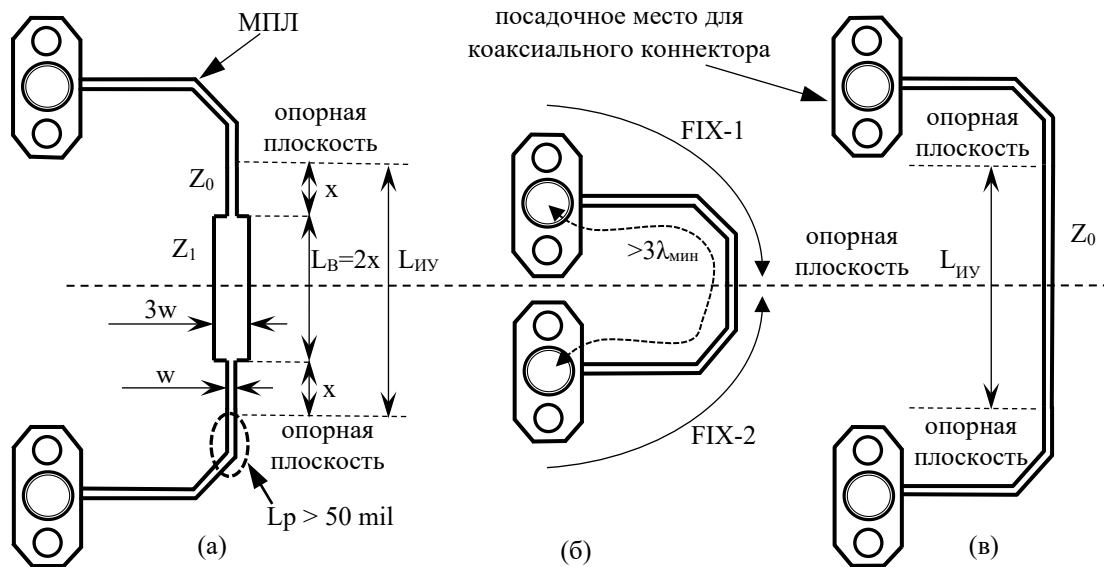


Рисунок 1. Схематическое представление топологии структур тестового купона по методике IEEE P370: а – Beatty; б – калибровочная мера 2x-Thru; в – проверочная МПЛ (опционально).

Структура Beatty создает стоячую волну, которая на частотной зависимости коэффициента отражения формирует минимумы, расстояние между которыми в квазистатическом приближении можно описать выражением (1):

$$\Delta f = \frac{1}{2t_d} = \frac{c}{2L_B \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость; L_B – длина неоднородности Beatty. В миллиметровом диапазоне эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} становится частотно-зависимой из-за эффектов скин-слоя, шероховатости медной фольги, возникновения мод высших типов и прочих явлений (в т.ч. на стеклоткани). Таким образом, квазистатическое приближение применимо только в диапазоне частот до единиц гигагерц. С ростом частоты увеличивается ϵ_{eff} и уменьшается интервал Δf . Более точный аналитический расчет отклика структуры Beatty в широком диапазоне частот будет представлен в перспективных исследованиях авторов.

3. Результаты моделирования и измерений тестовых структур

Для подбора «эффективных» параметров ПП использовались модели тестовых структур, представленные на рисунке 2. Подложка выполнена из материала Megtron6 R5670 толщиной 0.125 мм с номинальной диэлектрической проницаемостью $D_k = 3.62$ (стеклоткань #2116, содержание смолы 54%) и тангенсом угла диэлектрических потерь $D_f = 0.005$ [5]. МПЛ структуры имеют следующие размеры: $L_B = 10$; $L_{МПЛ} = 5$; $m_{S_w0} = 0.23$; $m_{S_w1} = 0.69$ мм.

В моделировании параметрически задаются D_k , D_f и среднеквадратичное отклонение (СКО) шероховатости медной фольги R_{RMS} . Megtron6 поставляется с HVLP-фольгой, для которой характерна средняя шероховатость $R_z = 1.5-2$ мкм (average peak-to-valley). Реалистичная оценка СКО для заданного значения шероховатости определяется, как $R_{RMS} = 0.29 \times R_z$ [6]. САПР использует эти параметры для расчёта градиента проводимости меди перпендикулярно её поверхности. В результате чего увеличивается поверхностное сопротивление и индуктивность МПЛ, а моделирование

более полно описывает эффекты увеличения вносимых потерь и частотных сдвигов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Тест-купон, представленный на рисунке 3 а, б был изготовлен и измерен на ВАЦ Keysight PNA N5224. Полученные матрицы рассеяния были обработаны в программе Keysight PLTS AFR, которая использует продвинутое калибровку 2x-Thru для экстракции истинных откликов тестовых структур.

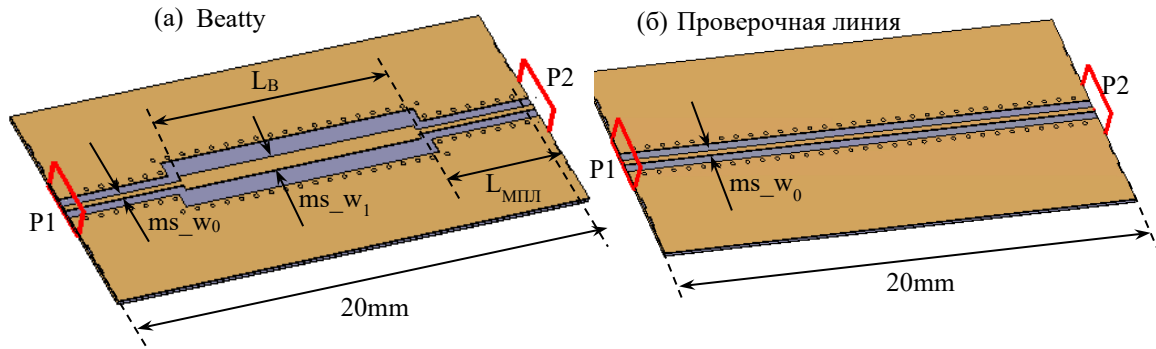
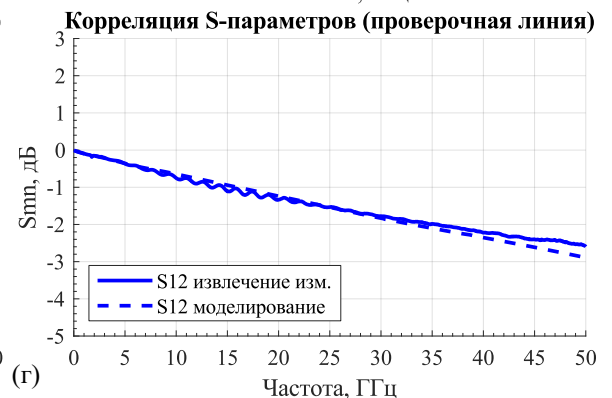
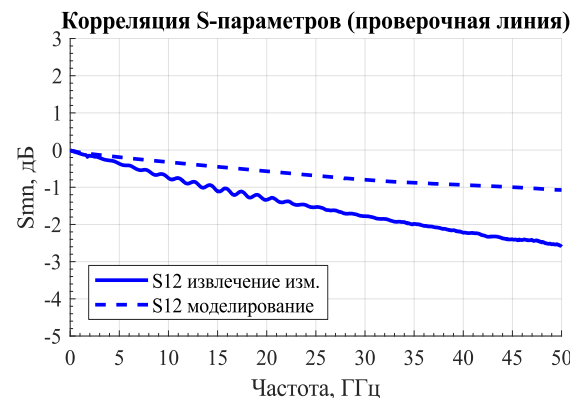
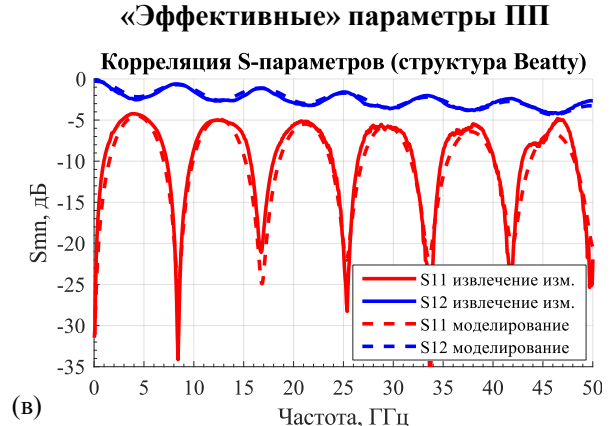
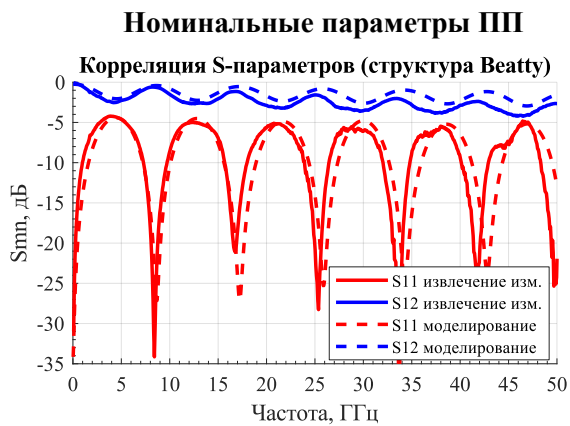
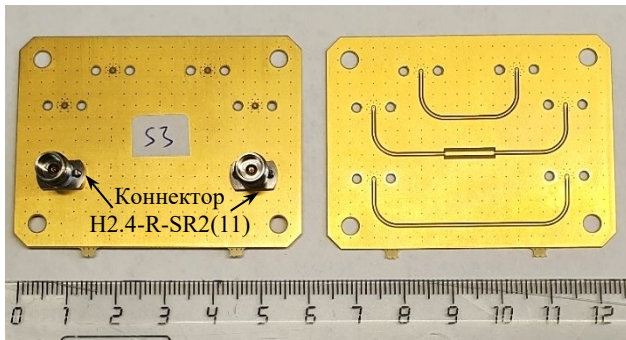


Рисунок 2. Трехмерные модели тестовых структур в САПР: а – Beatty; б – проверочная линия.



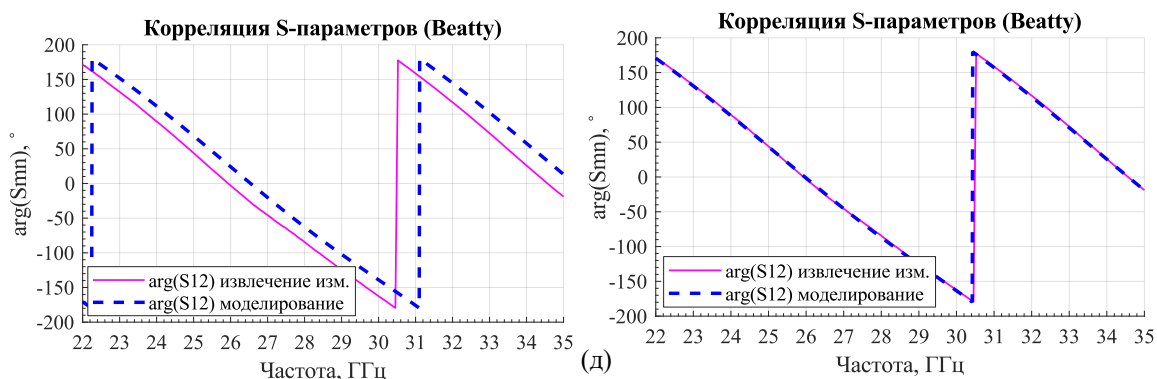


Рисунок 3. Измерения изготовленных тест-купонов: а – прототип тест-купона; б – измерительная установка; корреляция результатов извлечения измеренных данных и моделирования структур: в – Beatty, г – проверочной линии, д – фазовый сдвиг Beatty.

В САПР проводилась оптимизация ранее описанных параметров ПП для наилучшего совпадения результатов моделирования с выделенными результатами измерений. Таким образом, корреляция результатов моделирования и измерений до настройки параметров и после настройки показаны на рисунке 3, в-д. Были подобраны следующие «эффективные» параметры: $D_k = 3.62$, $D_f = 0.015$, $R_{RMS} = 1.5$.

4. Заключение

Очевидно, что методы извлечения истинных характеристик ИУ и определения точных параметров материалов ПП имеют важное значение в устройствах миллиметрового диапазона. Например, в интегрированной антенной решетке могут возникать дополнительные вносимые потери, резко снижающие ее коэффициент усиления, или АЧХ МПЛ-фильтра может иметь частотный сдвиг из-за индуктивного воздействия шероховатости меди. Рассмотренная в настоящем исследовании калибровка 2x-Thru эффективна как для актуализации расчетов устройств, так и для целей производственного контроля. В результате исследования изготовлен тест-купон на материале Megtron6, его характеристики измерены на ВАЦ в диапазоне до 50 ГГц. С помощью методики P370 были выделены характеристики ИУ и подобраны «эффективные» параметры моделирования в САПР, которые позволили добиться полной сходимости с экспериментом: $D_k = 3.62$, $D_f = 0.015$, $R_{RMS} = 1.5$.

Список литературы

1. Ye X. et al. IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50 GHz (P370) //The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA. – 2020. – С. 1-132.
2. Horn A. F., Reynolds J. W., Rautio J. C. Conductor profile effects on the propagation constant of microstrip transmission lines //IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, CA, USA. – 2010. – С. 868-871.
3. Beatty R.W. 2-Port 1/4L Waveguide Standard of Voltage Standing-Wave Ratio //Electronic Letters. – 1973. – Т. 9. – №. 2. – С. 24-26.
4. [Электронный ресурс] URL: https://www.hirose.com/ru/product/document?clcode=CL0338-0605-0-00&productname=H2.4-R-SR2-S&series=2.4mm&documenttype=Catalog&lang=ru&documentid=D141400_en (дата обращения: 21.01.2023)
5. [Электронный ресурс] URL: https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/ipcdatasheet_R-5775.pdf (дата обращения: 17.01.2023)
6. Olney B. Effects of Surface Roughness on High-speed PCBs //The PCB Design Magazine. – 2015. – С. 22-27.