

УДК 621.317

РАЗРАБОТКА КАЛИБРОВОЧНОЙ ПЛАТЫ НА ОСНОВЕ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ПОВЕРКИ И ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОБНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В.В. Макаров, А.В. Клеопин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
makarov_vv@vniiftri.ru,
kleopin@vniiftri.ru*

Аннотация. В статье говорится о разработке калибровочной платы, проведении её исследования импульсным и гармоническим методами. Предварительно было проведено моделирование и получены расчётные значения геометрических размеров для изготовления калибровочной платы. Получены значения амплитудных частотных характеристик калибровочной платы, используемые для измерений.

Ключевые слова: калибровочная плата, пробники напряжения, поверка.

DEVELOPMENT OF A CALIBRATION BOARD BASED ON A COPLANAR LINE FOR VERIFICATION AND TESTING OF HIGH FREQUENCY VOLTAGE PROBES

V.V. Makarov, A.V. Kleopin

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
makarov_vv@vniiftri.ru,
kleopin@vniiftri.ru*

Annotation. The article talks about the development of a calibration board, its study by pulse and harmonic methods. Preliminary simulation was carried out and the calculated values of the geometric dimensions for the manufacture of the calibration board were obtained. The values of the amplitude frequency characteristics of the calibration board are obtained, which are used for measurements.

Key words: calibration board, voltage probes, verification.

Пробники напряжения, подключаемые к входным каналам осциллографов, широко используются при разработке, диагностике, техническом обслуживании и ремонте радиоэлектронной аппаратуры. Пробники предназначены для подключения к различным электрическим цепям и решают задачи развязки измерительных цепей от узлов осциллографа, увеличения входного сопротивления и уменьшения входной ёмкости, коррекции амплитудно-частотной характеристики системы «пробник — осциллограф», повышения чувствительности осциллографов, согласования выходов источников сигналов со входом осциллографа, выделения противофазных сигналов и подавления синфазных сигналов.

Принцип действия пробников напряжения основан на согласовании различных электрических сопротивлений со стороны источника сигнала и осциллографа, то есть на передаче по кабелю, представляющему собой распределённую линию передачи, сигнала с минимальными искажениями.

В настоящее время значительно возросли метрологические характеристики как цифровых осциллографов, так и подключаемых к ним пробников напряжения. Широко используются пассивные пробники с полосой пропускания до 500 МГц. Полоса пропускания активных и/или дифференциальных пробников достигает 30 ГГц [1]. В связи с этим крайне актуальным является вопрос метрологического обеспечения и подтверждения нормируемых характеристик осциллографических пробников.

Для определения метрологических характеристик пробников необходимо подавать нормированное испытательное напряжение непосредственно на иглу пробника. Для относительно низкочастотных пробников с полосой пропускания до 10...30 МГц эта задача решается при помощи несложных и достаточно «грубых» электрических подключений. Однако современные широкополосные пробники требуется подключать к микрополосковым копланарным линиям, обеспечивающим согласованную передачу энергии высокочастотных колебаний с малыми потерями в широкой полосе частот. Такие микрополосковые линии выполняются в виде калибровочных плат, примеры которых представлены на рис. 1.

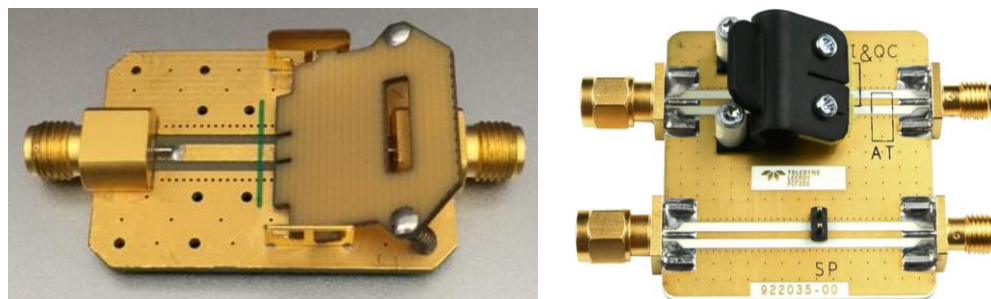


Рис. 1. Примеры серийных калибровочных плат Keysight E2655C и LeCroy PCF200

Разработка и моделирование расчётных характеристик полосковой линии

Копланарная линия относится к интегральной линии передачи квази-открытого типа, в которой распространяются волны квази-ТЕМ- и Н-типа. Токонесущие проводники копланарной линии образованы узким проводником и двумя полубесконечными слоями металла, расположенными на одной стороне диэлектрической подложки. Структура электромагнитного поля в копланарной линии для чётного типа волн представлена на рис. 2.

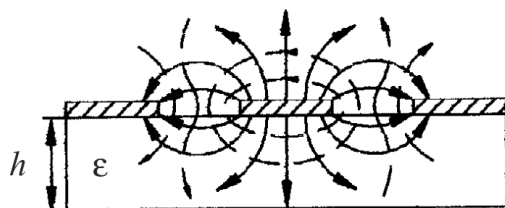


Рис. 2. Копланарная линия для чётного типа волн

Волновое сопротивление копланарной линии квазиоткрытого типа определяется по формуле [2]:

$$Z_B = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \frac{K(k')}{K(k)}; \quad \epsilon_{ef} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k')K(k_1)}{K(k)K(k_1)}$$

где K — полный эллиптический интеграл первого рода; $k' = (1 - k^2)^{-0,5}$; $k = a/b$; $k_1 = sh(\pi a/2h)/sh(\pi b/2h)$; $a = w/2$; $b = w/2 + s$; w — ширина центрального проводника; s — величина зазоров между проводниками.

Для расчёта требуемых электрических характеристик разрабатываемой калибровочной платы использовалась программа TXLINE 2003.

Заданные физические характеристики полоски и промежутков подбирались под требуемое сопротивление 50 Ом. Расчёт проводился для основного диапазона частот от 1 до 10 ГГц. На рис. 3 представлен один из вариантов расчёта.

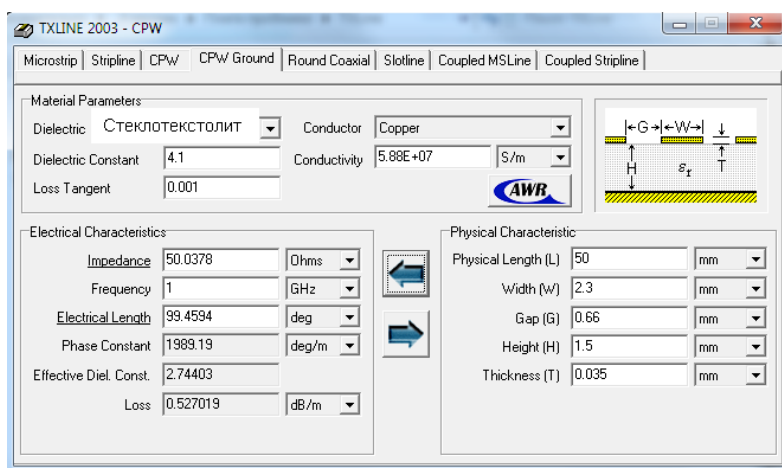


Рис. 3. Расчётные характеристики полосковой линии

Исследование характеристик калибровочной платы

В соответствии с полученными расчётными значениями геометрических размеров копланарной линии был изготовлен макет калибровочной платы (рис. 4).

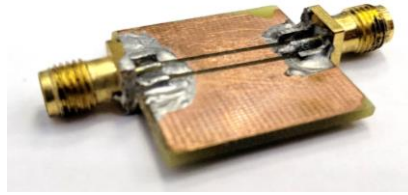


Рис. 4. Разработанная калибровочная плата

Экспериментальное исследование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) калибровочной платы проведено двумя методами:

- методом импульсной рефлектометрии на осциллографе WaveMaster 820Zi-A. В качестве источника широкополосного сигнала выступал импульс с длительностью фронта 25 пс, подаваемый с калибратора осциллографов 9500В. На рис. 5 представлены результаты измерений;
- методом гармонического анализа с использованием векторного анализатора цепей N5242A (рис. 6).

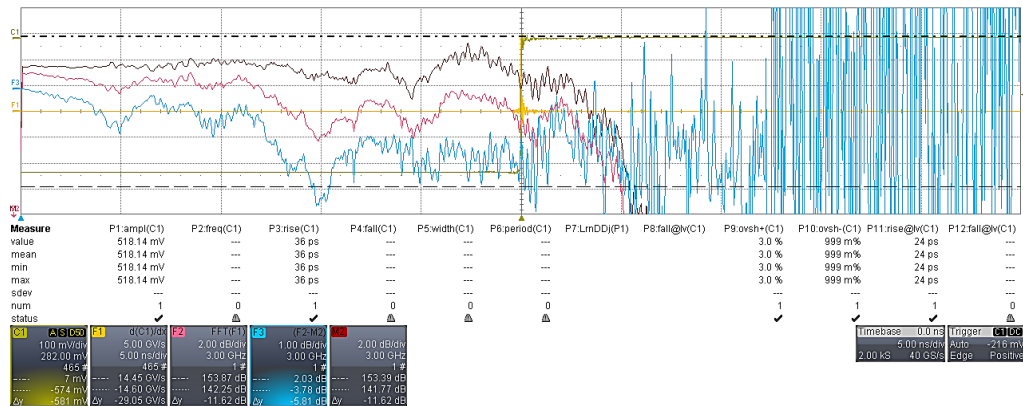


Рис. 5. Результат измерений АЧХ платы на осциллографе WaveMaster 820Zi-A

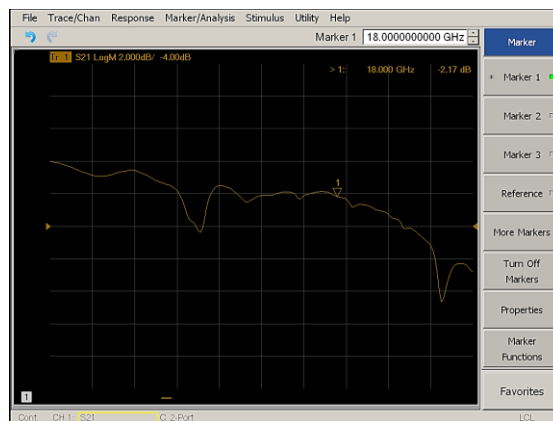


Рис. 6. Результат измерений АЧХ платы на анализаторе цепей N5242A

Сравнение полученных результатов показало достаточно низкий уровень различий, не превышающий 1,5 дБ в диапазоне частот до 8,75 ГГц. Различия между измерениями АЧХ калибровочной платы гармоническим и импульсным методами представлены на рис. 7.

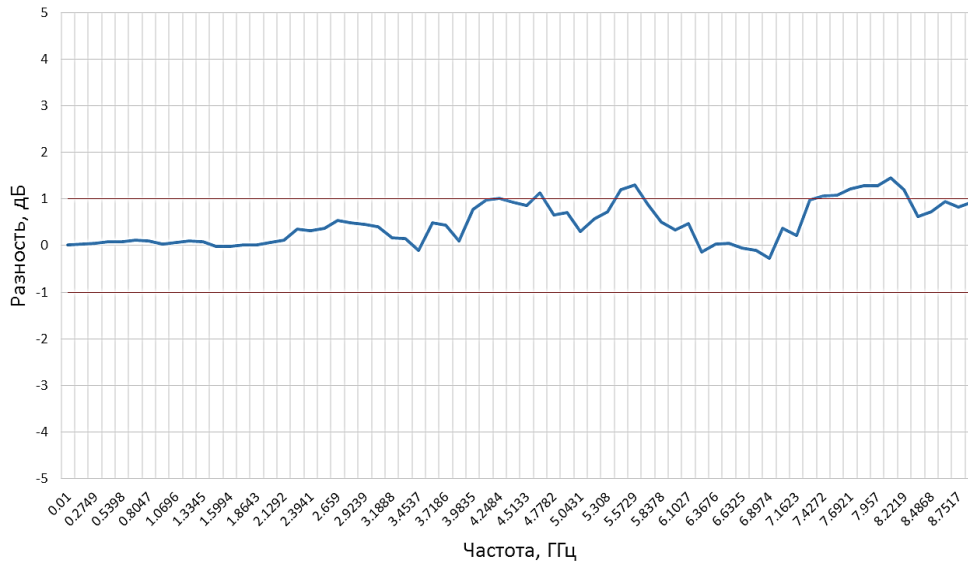


Рис. 7. Разность измерений с помощью анализатора цепей и осциллографа

Спад АЧХ калибровочной платы на частоте 9,4 ГГц достигает $-4,4$ дБ. Основные возможные причины спада в АЧХ — ограничение, связанное с диэлектрическими характеристиками применяемого материала подложки, или проблемы пайки разъёмов и геометрической неточности изготовления полосковой линии.

Результаты измерений АЧХ калибровочной платы свидетельствуют о достаточной равномерности АЧХ в диапазоне частот от 0 до 8,75 ГГц, что обеспечивает возможность проведения испытаний и поверки пробников с аналогичной полосой пропускания.

Использования калибровочной платы

На рис. 8 представлен пример исследования метрологических характеристик пробника RTM-ZP10. Данный пробник имеет полосу пропускания 500 МГц.

Наиболее широкополосный осциллографический пробник, проходивший поверку во ФГУП «ВНИИФТРИ» с использованием разработанной калибровочной платы, имеет полосу пропускания 4 ГГц. По результатам поверки получены соответствующие значения времени нарастания переходной характеристики пробника: 104 ± 4 пс в режиме 12,5X; 105 ± 4 пс в режиме 5X, что подтверждает значение полосы пропускания не менее 4 ГГц.

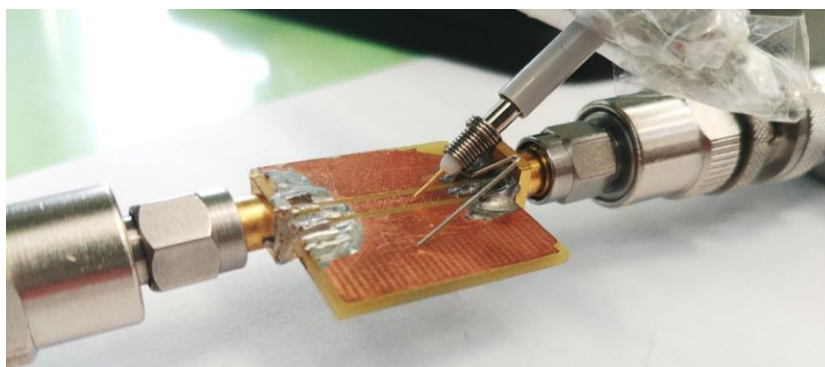


Рис. 8. Подключение пробника RTM-ZP10 к калибровочной плате

Заключение

По итогам работы получены следующие результаты:

- проведено моделирование, получены расчётные значения геометрических размеров для изготовления калибровочной платы;
- разработана калибровочная плата, проведено её исследование импульсным и гармоническим методами;
- получены значения АЧХ и ФЧХ калибровочной платы, которые используются при выполнении измерений, установлен диапазон рабочих частот калибровочной платы до 8,75 ГГц;
- проведены исследования метрологических характеристик типовых серийных пробников с максимальной полосой пропускания 4 ГГц.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на совершенствование калибровочной платы с использованием современных материалов подложки, например Al_2O_3 , имеющих меньшее значение диэлектрической проницаемости.

Список литературы

1. Пробники и принадлежности для осциллографов семейства Infiniium. Технические характеристики // Keysight Technologies [сайт]. — URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06782/data-sheets/5968-7141.pdf>.
2. Михайлов В.Ф., Нарытник Т.Н., Брагин И.В., Мошкин В.Н. М59 Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах: учеб. пособие. — СПб.: СПбГУАП, 2003. — 337 с.

Статья поступила в редакцию: 22.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 28.10.2021 г.

Статья принята в работу: 01.11.2021 г.