

12.1;11.1;15.2

## Методика измерения потерь в направляемых линиях передачи в миллиметровом диапазоне частот

© Н.С. Князев, А.И. Малкин, В.А. Четкин

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия  
E-mail: n.s.kniazev@urfu.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2021 г.

В окончательной редакции 13 декабря 2021 г.

Принято к публикации 14 декабря 2021 г.

Разработана экспериментальная методика определения потерь в микрополосковых и копланарных линиях передачи для устройств, работающих в диапазоне частот 77–81 GHz, с целью измерения параметров линии передачи без использования специализированных устройств для подключения к исследуемым линиям. Получены параметры матриц рассеяния с использованием векторного анализатора цепей и повышающих преобразователей частоты, позволяющие полностью охарактеризовать исследуемый образец по качеству изготовления исследуемых линий. Проведен расчет потерь в волноводно-копланарных и копланарно-микрополосковых линиях.

**Ключевые слова:** потери, затухание, микрополосковая линия, копланарный волновод, электродинамические параметры.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52155.18981

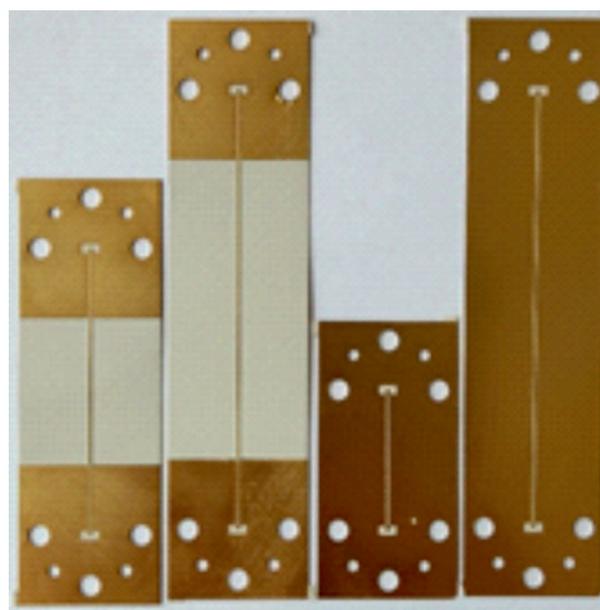
Погонное затухание в линиях передачи радиочастотных устройств используется для расчета мощностных характеристик выходного сигнала. Данный параметр зависит от многих факторов, например от тангенса угла диэлектрических потерь подложки, материалов и профиля печатной линии передачи, шероховатости поверхности металлизации и т.д. Параметры получаемых топологий в значительной степени зависят от технологий, используемых производителем печатных плат, и могут меняться в том числе в пределах различных партий, поэтому важным моментом является контроль погонного затухания в линии на реальных образцах. Прямое измерение потерь в линии подразумевает использование зондовой станции для подключения непосредственно к исследуемому участку, что является довольно дорогостоящим решением.

В настоящей работе предложена методика, позволяющая проводить измерение погонного затухания микрополосковых и копланарных линий передачи, работающих в диапазоне частот от 77 до 81 GHz, без использования зондовой станции. Исследованы частотные характеристики потерь в копланарных и микрополосковых линиях передачи в диапазоне частот от 77 до 81 GHz.

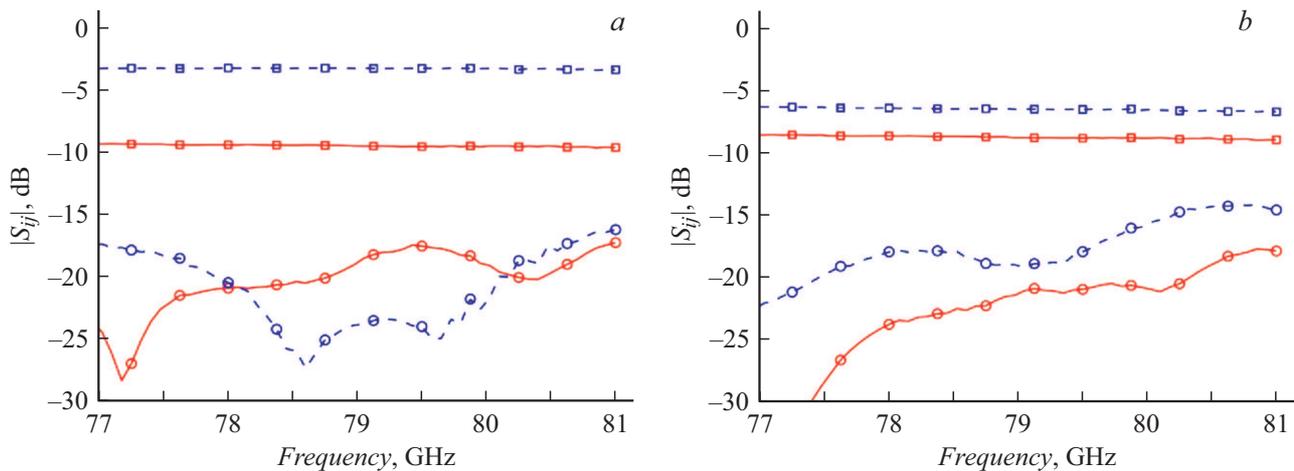
Измерения проводились на векторном анализаторе цепей R&S ZVA50 с повышающими преобразователями частоты, позволяющими проводить измерение полной матрицы рассеяния двухпортового устройства в диапазоне 75–110 GHz с применением волноводной линии передачи стандарта WR10. Подключение исследуемых типов линии передачи к волноводному входу измерительной системы осуществлялось при помощи переходов с копланарной линии на волновод WR10.

Для калибровки измерительной системы использовалась техника UOSM [1] (Unknown through–Open–Short–

Match), которая подразумевает выполнение двух полных однопортовых калибровок по OSM-технике с применением стандартных волноводных калибровочных мер: короткое замыкание (КЗ), смещенное КЗ, согласованная нагрузка и измерение на проход с использованием произвольной линии передачи, к которой предъявляется требование взаимности характеристик в прямом и обратном направлениях. В качестве проходной линии использовался отрезок микрополосковой линии с минимальной длиной, который подключался к волноводу при помощи копланарно-волноводных переходов.



**Рис. 1.** Исследуемые линии передачи: микрополосковые (слева) и копланарные (справа).



**Рис. 2.** Модули коэффициентов отражения  $S_{11}$  (кружки) и передачи  $S_{21}$  (квадраты) для копланарной линии длиной 61.35 mm (сплошная линия) и 18.85 mm (штриховая линия) (a) и микрополосковой линии длиной 43 mm (сплошная линия) и 21 mm (штриховая линия) (b).

В качестве объектов исследования использовались копланарные и микрополосковые линии передачи разной длины, показанные на рис. 1. Для каждой длины линии было измерено по три образца. Использование линии передачи разной длины позволяет из измеренных характеристик рассчитать затухание в линии на единицу длины. Наибольший интерес представляют такие параметры матрицы рассеяния, как комплексные коэффициенты отражения  $S_{11}$  и  $S_{22}$  и коэффициент передачи  $S_{21}$  [2], поскольку они позволяют полностью охарактеризовать исследуемый образец по качеству изготовления линии (коэффициент отражения), влиянию структуры используемой диэлектрической подложки и методов нанесения металлизации (коэффициент передачи).

Предлагаемая экспериментальная методика состоит в измерении коэффициентов передачи исследуемых линий разной длины, после чего проводится вычисление потерь на единицу длины линии, а также потерь во всех преобразователях типов линий.

Первоначально были исследованы образцы копланарной линии передачи. На рис. 2, a показаны усредненные значения коэффициентов передачи и отражения для трех образцов. Измеренные коэффициенты отражения имеют довольно малое значение, а нелинейность их характеристики объясняется тем, что волноводно-копланарный переход имеет резонансную структуру. Несмотря на широкополосность используемого перехода, резонансный характер его структуры может проявляться в коэффициенте отражения. Влиянием данного эффекта на результат измерения вносимого затухания можно пренебречь ввиду малости его величины.

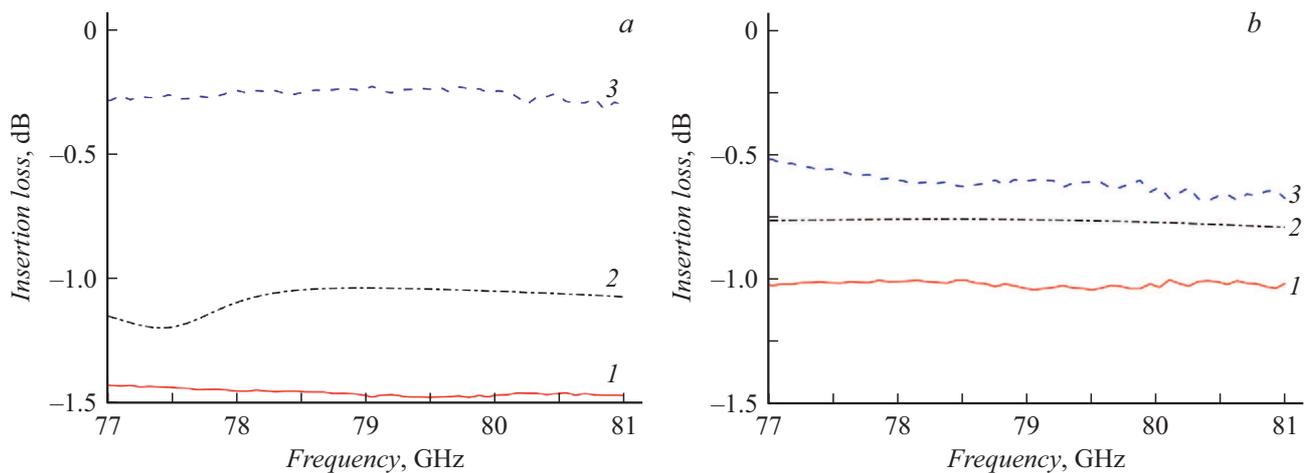
Затем было определено погонное затухание на 10 mm в копланарной линии. Для этого при одинаковых частотах вычисляется разность значений коэффициента передачи для длинной копланарной линии и значений коэффициента передачи для короткой копланарной ли-

нии. Теперь полученный результат следует разделить на разницу в длине. Длина длинной копланарной линии составляет 61.35 mm, короткой — 18.85 mm. Далее с использованием измеренного погонного затухания и длины копланарной линии между двумя копланарно-волноводными переходами вычисляются потери, вносимые используемыми копланарно-волноводными переходами. Полученные значения представлены на рис. 3, a.

По предложенной выше методике были рассчитаны параметры для микрополосковой линии передачи (рис. 2, b) и вычислены потери перехода с копланарной на микрополосковую линию (рис. 3, b). Представленные результаты демонстрируют большие потери в копланарной линии передачи по сравнению с микрополосковой. Такая зависимость объясняется тем, что копланарная линия передачи имеет меньшую ширину по сравнению с микрополосковой линией. Кроме того, для нанесения золочения используется подслоя никеля, имеющий меньшую удельную проводимость по сравнению с медью, золотом или серебром. Зависимость толщины скин-слоя можно оценить следующим образом:

$$\Delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}.$$

Здесь  $\rho$  — удельное сопротивление, равное  $2.44 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (золото),  $\mu$  — абсолютная магнитная проницаемость,  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота [Hz]. Толщина скин-слоя для золота на частоте 79 GHz составляет  $0.28 \mu\text{m}$ , в то время как для иммерсионного золочения производители заявляют толщину слоя золота  $0.05\text{--}0.1 \mu\text{m}$ . Таким образом, высокочастотный сигнал испытывает значительное затухание в подслое никеля. Приведенные на рис. 3 результаты трехмерного электромагнитного моделирования потерь соответствующих линий передачи также демонстрируют увеличение потерь в копланарной линии по сравнению с потерями в микрополосковой. Разница в абсолютных



**Рис. 3.** Вносимые потери в копланарной линии на длине 10 mm, определенные экспериментально (1), путем моделирования (2) и в переходе волновод–копланарная линия (3) (a), и в микрополосковой линии на длине 10 mm, определенные экспериментально (1), путем моделирования (2) и в переходе копланарная–микрополосковая линия (3) (b).

значениях потерь составляет 0.3–0.4 dB для каждого из типов линий передачи как для измеренных параметров, так и для результатов моделирования. Такое различие в величине потерь вызвано тем, что в использованной модели допущены некоторые упрощения, например не учтена шероховатость поверхности проводников, толщина и ширина проводников могут отличаться от параметров реальных образцов в силу технологических разбросов и т. д.

Полученные результаты показали необходимость экспериментального исследования линий передачи для учета всех факторов, влияющих на погонное затухание линии. Показана возможность использования предложенной экспериментальной методики измерения потерь в микрополосковых и копланарных линиях и преобразователях типов линий в миллиметровом диапазоне длин волн с использованием векторного анализатора цепей и повышающих преобразователей частоты, что дает возможность исключить дорогостоящее оборудование для подключения к тестируемой линии. Предложенная методика позволяет полностью характеризовать исследуемый образец по качеству изготовления.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта „Создание высокотехнологичного производства высокочастотного радара, предназначенного для использования в составе интеллектуальных систем помощи водителю, систем автоматического управления беспилотных транспортных средств и систем интеллектуального земледелия“ (соглашение № 075-11-2019-052 от 13 декабря 2019 г. между Минобрнауки РФ и АО „НПО автоматики им. акад. Н.А. Семихатова“).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М. Хибель, *Основы векторного анализа цепей* (МЭИ, М., 2018), с. 136–143.
- [2] D.M. Pozar, *Microwave engineering* (John Wiley & Sons, Inc., 2011), p. 178–188.