

УДК 621.372

А.Д. Плоткин, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053,**E-mail: adplotkin@mail.ru***ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**

Рассматривается двухдетекторный метод измерения потерь в полосковой линии, основанный на анализе распределения поля, и позволяющий минимизировать погрешности рассогласования. Проводится анализ погрешностей измерения. Рассмотрен способ увеличения разрешающей способности измерителя.

Ключевые слова: *Измерение, потери, полосковые печатные платы (ППП), детекторная головка, ориентированный граф, коэффициент отражения, коэффициент передачи, измеритель отношения, погрешность измерения.*

Повторяемость электрических характеристик полосковых печатных плат (ППП) определяется технологическим процессом их изготовления. ППП подвергаются воздействию агрессивных сред и абразивных материалов, термической и механической обработке, что может вызвать неточное воспроизведение рисунка ППП, ухудшение качества материала диэлектрика и изменить параметры полосковых схем, в частности, потери в линии. Таким образом, по изменению потерь в полосковой линии можно выявить возможные отклонения от нормы в технологическом процессе и устранить их.

Известны различные методы контроля ППП, в том числе и радиотехнический [1]. Однако радиотехнический метод ограничивается в основном контролем волнового сопротивления.

Так как обычно полосковые линии, входящие в состав СВЧ узлов, имеют малую длину (от единиц до десятков сантиметров), необходимо решить, в основном, задачу измерения малых ослаблений сигнала.

Целью настоящей работы является минимизация погрешности измерения малых потерь в полосковой линии для контроля ППП.

Методы измерения малых потерь в элементах волноводного и коаксиального трактов достаточно известны [2]. К ним, например, относятся методы замещения по сверхвысокой и промежуточной частотам.

Предлагаемый метод основан на анализе распределения поля вдоль линии с помощью двух зондов, связанных с детекторными головками.

Для определения потерь в линии необходимо знать значения сигналов в двух точках линии, расположенных в начале и конце линии, чтобы учесть влияние на результат измерения отражений, обусловленных конечным значением коэффициентов отражения генераторного и нагрузочного концов линии. Для определения сигналов с детекторных головок составим ориентированный граф, изображенный на рисунке 1.

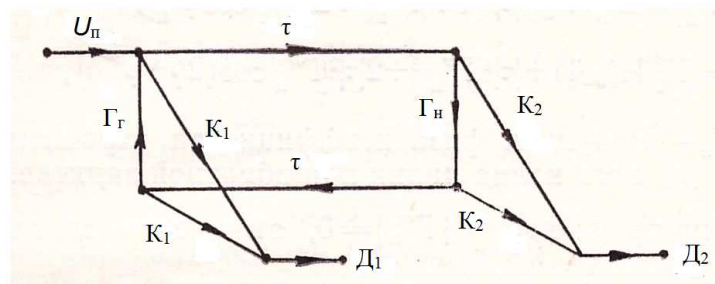


Рисунок 1 — Ориентированный граф высокочастотной части измерителя

Сигнал, воздействующий на детекторную головку, находящуюся в начале линии U_1 , будет иметь вид

$$U_1 = \frac{K_1 U_{\Pi}}{1 - \Gamma_{\Gamma} \Gamma'_{\text{Н}} \tau^2} (1 + \tau^2 \Gamma'_{\text{Н}}), \quad (1)$$

где U_{Π} — амплитуда падающей волны; Γ_{Γ} — коэффициент отражения генераторного конца исследуемой полосковой линии; $\Gamma'_{\text{Н}}$ — коэффициент отражения нагруженного конца полосковой линии;

K_1 — коэффициент передачи детекторной головки, расположенной у генераторного конца линии; τ — коэффициент передачи исследуемой линии, однозначно определяющий потери в ней.

Сигнал на выходе детекторной головки, расположенной у нагруженного конца полосковой линии, определяется выражением

$$U_2 = \frac{K_1 U_{\Pi}}{1 - \Gamma_{\Gamma} \Gamma'_{\text{H}} \tau^2} \tau (1 + \tau^2 \Gamma'_{\text{H}}), \quad (2)$$

где K_2 — коэффициент передачи детекторной головки, расположенной у нагруженного конца линии.

Обозначим общий множитель в выражениях (1) и (2) в виде

$$U_0 = \frac{K_1 U_{\Pi}}{1 - \Gamma_{\Gamma} \Gamma'_{\text{H}} \tau^2},$$

Тогда получаем:

$$U_1 = K_1 U_0 (1 + \tau^2 \Gamma'_{\text{H}}), \quad (3)$$

$$U_2 = K_2 U_0 \tau (1 + \tau^2 \Gamma'_{\text{H}}). \quad (4)$$

Определим сигналы, снимаемые с детекторных головок. При этом имеется в виду, что характеристика детектора квадратичная. Напряжения, снимаемые с детекторных головок, расположенных в начале и конце линии соответственно, равны:

$$U_{\text{Д1}} = K_1^2 |U_0|^2 \left[1 + |\tau|^4 \left| \Gamma'_{\text{H}} \right|^2 + 2 |\tau|^2 \left| \Gamma'_{\text{H}} \right| \cos(2\psi + \Phi'_{\text{H}}) \right], \quad (5)$$

$$U_{\text{Д2}} = K_2^2 |U_0|^2 |\tau|^2 \left[1 + \left| \Gamma'_{\text{H}} \right|^2 + 2 \left| \Gamma'_{\text{H}} \right| \cos \Phi'_{\text{H}} \right], \quad (6)$$

где $|\tau|$ и ψ — модуль и аргумент коэффициента передачи исследуемой полосковой линии; $\left| \Gamma'_{\text{H}} \right|$ и Φ'_{H} — модуль и аргумент коэффициента отражения нагрузки, на которую нагружена линия.

При идеально согласованной нагрузке $\left| \Gamma'_{\text{H}} \right| = 0$ и отношение сигналов $M_1 = \frac{U_{\text{Д2}}}{U_{\text{Д1}}}$ — пропорционально квадрату модуля коэффициента передачи

$$M_1 = \frac{U_{\text{Д2}}}{U_{\text{Д1}}} = \frac{K_2^2}{K_1^2} |\tau|^2. \quad (7)$$

Для реальных детекторных головок справедливо неравенство $K_1 \neq K_2$. Поэтому уравнение (7) содержит два неизвестных и неразрешимо относительно $|\tau|$. Для решения задачи, т.е. определения $|\tau|$, поменяем в измерительной схеме местоположение генератора и нагрузки [3]. Тогда напряжения, снимаемые с детекторов, запишутся и виде:

$$U'_{\text{Д1}} = K_1^2 |U_0'|^2 |\tau|^2 \left[1 + \left| \Gamma''_{\text{H}} \right|^2 + 2 \left| \Gamma''_{\text{H}} \right| \cos \Phi''_{\text{H}} \right]; \quad (8)$$

$$U'_{\text{Д2}} = K_2^2 |U_0'|^2 \left[1 + |\tau|^4 \left| \Gamma''_{\text{H}} \right|^2 + 2 |\tau|^2 \left| \Gamma''_{\text{H}} \right| \cos(2\psi + \Phi''_{\text{H}}) \right], \quad (9)$$

где $\left| \Gamma''_{\text{H}} \right|$ и Φ''_{H} — модуль и аргумент коэффициента отражения нагрузочного конца линии при обратном включении линии.

Полагая по-прежнему $\left| \Gamma''_{\text{H}} \right| = 0$, отношение сигналов будет равно

$$M_2 = \frac{U'_{\text{Д2}}}{U'_{\text{Д1}}} = \frac{K_1^2}{K_2^2} |\tau|^2. \quad (10)$$

Решая совместно уравнения (7) и (10), получаем

$$|\tau|^2 = \sqrt{M_1 M_2}. \quad (11)$$

Затухание в линии децибелах определяются по формуле $A = 10 \lg |\tau|^2$.

Реальная нагрузка обладает конечным значением модуля коэффициента отражения. Вследствие этого возникает один из источников погрешности определения $|\tau|^2$. При $\Gamma_H \neq 0$ величина $|\tau|^2$ будет определяться не выражением (11), а подстановкой формул (5), (6), (8), (9) в (7) и (10) соответственно.

$$|\tau|^2 = \sqrt{M_1 M_2} \sqrt{\frac{\left(1 + |\Gamma'_H|^2 + 2|\Gamma'_H| \cos \varphi'_H\right) \left(1 + |\Gamma''_H|^2 + 2|\Gamma''_H| \cos \varphi''_H\right)}{\left[1 + |\tau^4| |\Gamma'_H|^2 + 2|\tau^2| |\Gamma'_H| \cos(2\psi + \varphi'_H)\right] \left[1 + |\tau^4| |\Gamma''_H|^2 + 2|\tau^2| |\Gamma''_H| \cos(2\psi + \varphi''_H)\right]}}. \quad (12)$$

Относительная погрешность измерения модуля коэффициента передачи по мощности исследуемой линии за счет конечного значения коэффициента отражения нагрузки Γ'_H и Γ''_H будет равна

$$\delta = 1 - \sqrt{\frac{\left(1 + |\Gamma'_H|^2 + 2|\Gamma'_H| \cos \varphi'_H\right) \left(1 + |\Gamma''_H|^2 + 2|\Gamma''_H| \cos \varphi''_H\right)}{\left[1 + |\tau^4| |\Gamma'_H|^2 + 2|\tau^2| |\Gamma'_H| \cos(2\psi + \varphi'_H)\right] \left[1 + |\tau^4| |\Gamma''_H|^2 + 2|\tau^2| |\Gamma''_H| \cos(2\psi + \varphi''_H)\right]}}. \quad (13)$$

Эту погрешность можно минимизировать, если расстояние между детекторными головками сделать кратным длине волны в полосковой линии, то есть выполнить равенство $\cos(2\psi + \varphi_H) = \cos \varphi_H$ и применить подвижную полосковую нагрузку из поглощающего материала.

Условие $\cos(2\psi + \varphi_H) = \cos \varphi_H$ выполняется путем соответствующего подбора частоты, на которой проводится измерение.

При прямом и обратном включениях будем использовать одну полосковую нагрузку с модулем и аргументом коэффициента отражения Γ_H и φ_H . Для определения величины M_1 подвижная нагрузка устанавливается так, чтобы величина сигналов с детекторных головок была максимальной, т.е. чтобы выполнялось условие $\cos(2\psi + \varphi_H) = \cos \varphi_H = +1$. При обратном включении, для определения отношения M_2 , подвижная нагрузка устанавливается с другой стороны линии, чтобы напряжение на выходе детекторных головок было минимальным, то есть $\cos(2\psi + \varphi_H) = \cos \varphi_H = -1$. Тогда выражение для минимизированной относительной погрешности будет иметь вид

$$\delta_{\min} = 1 - \frac{1 - |\Gamma_H|^2}{1 - |\tau^4| |\Gamma_H|^2}. \quad (14)$$

Минимизированная относительная погрешность измерения за счет конечной величины коэффициента отражения нагрузки, определенная по формуле (14) для $|\Gamma_H| = 0,1$ и потерь в отрезке полосковой линии $A = 1$ дБ, составляет $\delta_{\min} = 0,4\%$. Для неподвижной нагрузки, при тех же параметрах линии $|\Gamma_H| = 0,1$, $A = 1$ дБ, максимальная относительная погрешность составляет $\delta_{\max} = 4\%$.

Таким образом, модуль коэффициента передачи исследуемой линии однозначно определяется по результатам измерения отношений сигналов M_1 и M_2 детекторных головок при прямом и обратном включениях линии.

Рассмотренная методика позволяет исключить влияние неидентичности характеристик детекторных головок на результат измерения, погрешность, связанную с конечным значением коэффициента отражения генераторного конца линии, и существенно уменьшить погрешность из-за рассогласования исследуемой линии с нагрузкой.

Как указывалось выше, потери, подлежащие измерению, весьма малы, т.е. коэффициент $|\tau|$, а следовательно, отношения сигналов M_1 и M_2 близки к единице. Обычные измерители отношений не могут обеспечить измерения с высокой разрешающей способностью, для чего необходимо ее увеличение, по крайней мере, в десять раз. Это достигается следующим образом [4]. Сравниваются между собой не сигналы с детекторных головок, а их разность с калиброванной частью одного из сигналов. Показание индикатора измерителя отношений при прямом включении линии равно

$$M' = \frac{U_{Д1} - U_{Д2}}{U_{Д1}} = n \left(1 - \frac{U_{Д2}}{U_{Д1}} \right) = n \left(1 - \frac{K_2^2}{K_1^2} |\tau|^2 \right), \quad (15)$$

при обратном включении

$$M'' = \frac{U_{Д1} - U_{Д2}}{U_{Д1}} = n \left(1 - \frac{U_{Д1}}{U_{Д2}} \right) = n \left(1 - \frac{K_1^2}{K_2^2} |\tau|^2 \right), \quad (16)$$

где n — коэффициент деления калиброванного делителя.

Решая совместно (15) и (16), определим $|\tau|^2$

$$|\tau|^2 = \sqrt{\left(1 - \frac{M'}{n} \right) \left(1 - \frac{M''}{n} \right)}. \quad (17)$$

Разрешающая способность измерителя отношений повышается в n раз.

На рисунке 2 показана структурная схема двухдетекторного измерителя малых потерь при прямом включении линии. Когда линия включается в обратном направлении, т.е. меняются местами генератор и нагрузка, место включения делителя также изменяется. Положение делителя в этом случае показано на рисунке пунктиром.

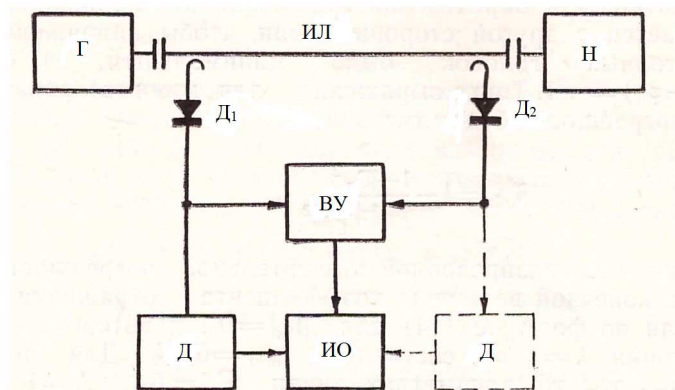


Рисунок 2 — Структурная схема двухдетекторного измерителя малых потерь
Г — генератор; Н — нагрузка; Д₁, Д₂ — детекторные головки; ВУ — вычитающее устройство; ИО — измеритель отношений; Д — делитель; ИЛ — исследуемая линия

Относительная погрешность за счет конечной величины Γ_H определяется по формуле (14). На результат измерения будут оказывать влияние погрешности индикаторного устройства и неквадратичность детекторов.

В описываемом измерителе исключено влияние наводок на результаты измерений за счет полного экранирования элементов связи детекторных головок. В качестве элементов связи служат щели в заземляющей пластине несимметричной полосковой линии и индуктивно-емкостные зонды, связанные с детекторными головками. Индуктивно-емкостные зонды находятся над щелями связи в заземляющей пластине и полностью экранированы. Элементы связи обеспечивают достаточный уровень сигнала с выхода детекторных головок при развязке около 30 дБ.

Ввиду отсутствия эталона экспериментальная проверка метода проводилась с тремя детекторными головками. Третья детекторная головка располагалась на равном расстоянии от первой и второй по длине линии. Таким образом, измерялись общие потери всего отрезка полосковой линии и его половины. Потери в прямом отрезке полосковой линии на материале ФАФ-4, длиной 0,16 м, составили $A = 0,138$ дБ на частоте $f = 2600$ МГц; длиной 0,08 м — 0,07 дБ.

Сравнивая потери СВЧ энергии в образцовой плате и исследуемой плате, изготовленной различными технологическими приемами, можно судить о величине потерь относительно образцовой платы. Если эти потери будут превышать величину, допустимую для данного образца, следует считать, что в технологическом процессе изготовления исследуемой платы есть факторы, ухудшающие её параметры.

Причиною отличия потерь является изменение диэлектрических характеристик основания полосковой линии, геометрических размеров диэлектрика и полоскового проводника, фактора травления и т.д.

Контролируя потери в полосковой линии предложенным методом можно отбраковать ее или признать годной.

Дальнейшие исследования предполагают определение причин брака микрополосковых полосковых печатных плат путем измерения диэлектрической проницаемости подложки, тангенса угла потерь, фактора травления и т.п.

Бibliографический список использованной литературы

1. Конструирование и технология печатных плат / А.Т. Жигалов, Е.П. Котов, К.Н. Шихаев, Б.А. Хохлов. — М.: Высш. шк., 1973. — 119 с.

2. Измерения в электронике: справочник / Под. ред. Б.А. Доброхотова. — М.: Энергия, 1975. — 316 с.

3. Бондаренко И.К. Измерение амплитудно-частотных характеристик протяженных трактов / И.К. Бондаренко, В.В. Саламатин // Материалы V научно-технической конференции «Радиоизмерения» — Каунас, 1973. — С. 63–67.

4. А.с. 282459 СССР, МКИ4 G01R 27/06. Измеритель отношения/ В.В. Саламатин (СССР). — № 724818/24-9; заявл. 21.05.69; опубл. 15.10.70. Бюл. № 30.

Поступила в редакцию 19.02.2014 г.

Плоткін О.Д. Вимірювання втрат в полоскової лінії

Розглядається двохдетекторний метод вимірювання втрат в полоскової лінії, заснований на аналізі розподілу поля, що дозволяє мінімізувати похибки неузгодженості. Проводиться аналіз похибок вимірювання. Розглянуто спосіб збільшення роздільної здатності вимірювача.

Ключові слова: Вимірювання, втрати, полоскові печатні плати (ППП), детекторна голівка, орієнтований граф, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт передачі, вимірювач відносин, похибка вимірювання.

Plotkin A.D. Measurement of losses in the strip line

The two-detector method of measurement of losses in the strip line, based on the analysis of distribution of a field, and allowing to minimize mismatch errors is considered. The analysis of errors of measurement is carried out. The way of increase in resolution of the measuring instrument is presented.

Keywords: Measurement, losses, the strip printed-circuit boards (SPCB), the detector head, the focused count, reflection coefficient, transfer coefficient, the relation measuring instrument, measurement error.