

DOI: 10.11991/yykj.201712001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20180223.1246.002.html>

# 一种测量微波介质基板复介电常数的方法

吴秉琪, 刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610004

**摘 要:** 为了测量微波介质基板的复介电常数, 提出了一种基于微带线测量的方法。通过使用微带线相关理论模型和电磁场仿真软件计算微带线辐射损耗, 编写相应的计算机程序可以测得微波介质基板的复介电常数。在测量中, 通过使用除长度外其他参数均相同的 2 条微带线的测量数据进行计算, 减弱了由于实际测量中引入同轴接头而产生的测量误差。对多种常见的微波介质基板进行了测量, 结果表明: 与标称值相比, 介电常数实部误差为 1% 左右, 损耗角正切误差为 10% 左右, 该测量方法切实可行和精确性高。

**关键词:** 微带线; 印刷电路板; 微波测量; 介电常数测量; 损耗角正切; 辐射损耗; 有效介电常数; 宽带测量

中图分类号: TN972

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2018)04-100-04

## A method for measuring complex permittivity of microwave dielectric substrate

WU Bingqi, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

**Abstract:** In this paper, a measurement method is proposed to measure the complex permittivity of the microwave dielectric substrate. The microstrip radiative loss was calculated by relevant theoretical model of microstrip and electromagnetic field simulative soft, and the complex permittivity of microwave dielectric substrate could be measured by corresponding computer programme. The errors from the coaxial connectors were compensated by measuring two microstrips, which have the same parameters except length. Various common microwave dielectric substrates were measured. The results show that the error of real part of permittivity is about 1%, and the loss tangent measurement error is about 10%. The proposed method is valid and accurate in practice.

**Keywords:** microstrip; printed circuit board (PCB); microwave measurement; permittivity measurement; loss tangent; radiative loss; effective permittivity; broadband measurement

介电常数和损耗角正切是介质基板的重要参数, 在天线设计<sup>[1-2]</sup>与微波电路设计<sup>[3-4]</sup>中, 微波介质基板的介电常数对其性能指标有重要影响。许多学者已经进行了广泛和深入的研究以测量这 2 个参数<sup>[5-9]</sup>。通过使用 2 段微带线测量介质基板的介电常数的方法, 在文献[10]中最先提出, 并用来测量介质基板的实介电常数。与各种谐振法相比, 使用该方法的优点为: 减弱了在实际测量中由于使用同轴接头造成的测量误差; 可以方便地测量随频率和位置变化而变化的介电常数; 可以测量在 1 个频带

范围内的介电常数, 即测量是宽带的。为了实现从测量数据到介质基板介电常数的转化, 文献[10]使用了针对多层板的广义频域格林函数法。本文使用了描述微带线工作特性的精确模型, 建立了有效介电常数与介电常数之间的关系, 通过编制计算机程序, 可以快速准确地求解得到介质基板的介电常数。

本文对使用 2 条微带线测量实介电常数的方法进行了推广, 使其可以用来测量介质基板的损耗角正切值。在测量过程中, 考虑了金属导带的粗糙度与辐射损耗的影响。通过使用矢量网络分析仪对微带线进行幅频响应和相频响应测量, 可以一次性得到介质基板的介电常数实部和损耗角正切这 2 个关键参数, 提高了测量效率。本文对多种介质基板进行了测量, 取得了符合预期的结果。

收稿日期: 2017-12-04. 网络出版日期: 2018-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目( NSFC 61271074 ).

作者简介: 吴秉琪( 1992- ) 男, 硕士研究生;

刘长军( 1973- ) 男, 教授.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

## 1 介电常数实部测量

### 1.1 介电常数实部测量理论

根据传输线理论,电磁波在一段传输线上传输产生的相位变化为

$$\varphi = 2\pi f \frac{\sqrt{\varepsilon_r} L}{c}$$

对于传输准横电磁模电磁波的微带线,分析其传播特性需要使用有效介电常数,即  $\varepsilon_{\text{eff}}$ ,则电磁波在一段微带线上传输而产生的相位变化  $\varphi$  为

$$\varphi = 2\pi f \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} L}{c}$$

式中  $c$  是真空中光速。

实际测量中,使用网络分析仪测量微带线不可避免地要引入同轴接头,使测量产生误差。为减弱该误差,加工2条除长度外其他参数均一致的微带线,并使用相同的同轴接头进行测量,如图1所示。

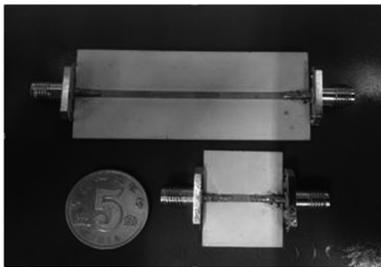


图1 测量使用的微带线

这样在测量过程中,由于2条微带线长度不一致而产生的相位差  $\Delta\varphi$  为

$$\Delta\varphi = 2\pi f \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} \Delta L}{c}$$

式中  $\Delta L$  为两条微带线的长度差,即  $\Delta L = L_1 - L_2$ 。

通过使用2条线的长度差数据进行运算使得同轴接头造成的影响得以削弱,因为4个同轴—微带线过渡是完全相同的。则有效介电常数  $\varepsilon_{\text{eff}}$  与相位差  $\Delta\varphi$  关系为

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left( \frac{\Delta\varphi c}{2\pi f \Delta L} \right)^2 \quad (1)$$

通过式(1)可计算得到介质基板的有效介电常数,为达到测量目的,即得到介质基板的介电常数,需要找到介质基板有效介电常数与介电常数之间的关系。文献[11]给出了微带线有效介电常数与介质基板介电常数、微带线几何形状之间的关系。同时由于微带线工作在准横电磁模式,其有效介电常数还和其工作频率有关,表现出一种与频率相关的特性。这里使用文献[12]给出的模型,它计算精度高、适用频率范围广。微带线的有效介电常数可以

描述为

$$\varepsilon_{\text{eff}}(f) = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{\text{eff}}}{1 + P(f)} \quad (2)$$

关于式(2)的详细定义,在文献[11]与文献[12]中有详细描述,这里不再赘述。

### 1.2 介电常数实部测量

根据前面的讨论,测量介电常数实部需要测量2条微带线在同一频率下由于长度不同产生的相位差。这一过程是通过测量微带线  $S_{21}$  的相位来实现的。根据相位数据由式(1)得到微带线有效介电常数,为实现由微带线有效介电常数计算得到介质基板实介电常数。这里采用了二分法来求解方程。测量的频率范围为1~11 GHz,测量步进40 MHz,测量在不同频率下介质基板的实介电常数。取计算结果的算数平均值,结果如表1所示。

表1 介电常数实部测量结果

项目	FR4	Ro4350B	Ro4003C	F4BMX-2
标称值	4.60	3.66	3.55	2.45
测量值	4.68	3.60	3.52	2.44
相对误差/%	1.74	1.64	0.86	0.41

## 2 损耗角正切的测量

### 2.1 损耗角正切和品质因数

损耗角正切用来表征电介质的介质损耗特性。在微带线中,损耗分为导体损耗、介质损耗和辐射。

损耗。所以通过测量微带线的损耗来计算得到介质基板的损耗角正切就需要建立这两者之间的关系。首先定义品质因数  $Q$  [13]:

$$Q = \omega \frac{W_m + W_e}{P}$$

式中:  $W_m$  和  $W_e$  是磁场和电场的平均储能。  $P$  是每秒的能量损耗。前面提到,微带线的损耗包含导体损耗、介质损耗和辐射损耗,相对应的品质因数有  $Q_c$ 、 $Q_d$  和  $Q_r$ ,在文献[11]中给出了  $Q_d$  和  $Q_c$  的表达式,对于介质损耗

$$Q_d = \frac{(1-q) + q\varepsilon_r}{(1-q)/Q_A + q\varepsilon_r/Q_S}$$

介质的品质因数与损耗角正切存在以下关系:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta_\varepsilon}$$

对于实际微带线,上方介质为空气,可以视为一种无耗介质,所以有  $Q_A \rightarrow \infty$ 。

对于导体损耗

$$Q_c = \frac{\pi Z_{01} h f u}{c R_s K}$$

式中:  $R_s$  是微带线导带金属的表面电阻,  $K$  是电流分布系数。为提高精度, 引入金属表面粗糙度均方根值对  $R_s$  进行修正得到

$$R_s(\Delta) = R_s \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \arctan 1.4 \left( \frac{\Delta}{\delta} \right)^2 \right]$$

式中:  $\delta$  是导带金属的趋肤深度,  $\Delta$  是表征金属表面粗糙度的物理量。对于金属表面电阻, 采用文献 [14] 给出的表达式

$$R_s = 8.26 \times 10^{-3} \sqrt{f} \text{ Ohms}$$

计算得到  $Q_c$  和  $Q_d$  后, 在忽略微带线辐射损耗的条件下, 可以得到衰减因子  $\alpha$ 。

$$\alpha(\text{dB/m}) = \frac{20\pi}{\ln 10} \frac{c}{Q_u f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3)$$

式中:  $c$  为真空中的光速,  $Q_u = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$ ,  $\epsilon_{\text{eff}}$  可以通过式(2) 计算得到。在损耗角正切的测量中, 常忽略对辐射损耗造成的影响。主要原因是对于多层板来说, 辐射问题计算过于复杂。文献 [15] 分析了忽略辐射损耗对测量损耗角正切造成的影响, 并给出了相应的解决方法, 本文采用这种方法来计算微带线的辐射损耗, 使测量结果更准确。

### 2.2 损耗角正切的测量

在实际使用中, 微波介质基板生产厂商大多只提供工作频率 10 GHz 时的损耗角正切数据, 为验证本文测量方法的正确性与准确度, 以 Rogers 4350B 板材制作的微带线的测量数据为例, 测量 10 GHz 频率下介质板的损耗角正切, 并与标称值进行对比。

在仿真软件中建立模型, 采用 Rogers 4350B 作为介质基板材料并设置微带线长度为 40 mm, 即 2 条实际制作的微带线长度的差值。计算辐射损耗时, 设置辐射边界距离模型边缘  $\lambda_g/4$  长。设置仿真求解频率为 10 GHz, 则辐射边界距离模型边缘 7.5 mm。

图 2 给出了微带线的损耗组成。

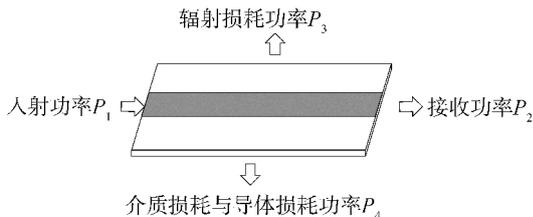


图 2 微带线损耗构成示意

通过测量可得: 长度为 60 mm 的 Rogers 4350B 微带线的插入损耗是 -0.93 dB, 相对应的相同材料的长度为 20 mm 微带线的插入损耗为 -0.34 dB, 则由长度变化造成的插入损耗的变化为

$$|\Delta S_{21}| = -0.59 \text{ dB}$$

通过仿真得到, 对于长度为  $\Delta L = L_1 - L_2$ , 材料为 Rogers 4350B 的微带线, 其辐射损耗当输入功率为 1 W 时, 辐射损耗功率为 22.68 mW。在微带线匹配良好的情况下, 各损耗存在关系如下:

$$P_2 = P_1 - P_3 - P_4$$

因为通过式(3) 计算衰减因子只考虑到了介质损耗与导体损耗, 未考虑到辐射损耗的作用, 所以在计算介质基板的损耗角正切时, 需要将辐射损耗造成的衰减去掉, 才符合公式使用条件。

$$|S_{21}|(\text{dB}) = 10 \log \left( 1 - \frac{P_3}{P_1} - \frac{P_4}{P_1} \right)$$

将仿真数据代入得到  $P_3 = 0.22P_1$  和  $P_4 = 0.043P_1$ , 则微带线的插入损耗为

$$|S_{21}|(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{P_1 - P_4}{P_1} \right) \approx -0.384 \text{ dB}$$

为求解介质基板的损耗角正切, 这里采用与前相似的方法, 编制计算机程序使用二分法求解损耗角正切。采用几种不同介质基板制造的微带线的测量结果如表 2 所示。

表 2 10 GHz 频率下损耗角正切测量结果

项目	Ro4350B	Ro4003C	FR-4
标称值	0.003 7	0.002 7	0.020
测量值	0.004 0	0.002 4	0.019
相对误差/%	8.10	11.10	5.00

### 3 结论

文章给出了一种使用除长度外其他各参数均相同的 2 条微带线测量微波介质基板复介电常数的方法, 结论如下:

1) 测量复介电常数的方法只需要一次性测量就可以得到微波介质基板的复介电常数, 测量效率高。

2) 测量适用频率范围广, 精度高。在宽频带下进行了测量, 与标称值相比, 介电常数实部误差为 1% 左右, 损耗角正切误差为 10% 左右。

3) 通过使用除长度外各参数均相同的 2 条微带线进行测量, 减弱了实际测量中由于引入同轴接头而产生的误差。同时在损耗角正切的测量中, 通过使用仿真软件引入对辐射损耗的计算进一步提高了测量精度。

4) 在微带线理论分析中, 通过合理选择微带线精确数学模型, 简化了分析、计算过程。

该方法可以快速、准确地测量微波介质基板复

介电常数,可以应用于微波电路设计与天线设计中,具有一定的实用价值。

## 参考文献:

- [1]杨弋澜,刘长军. 一种新型微带贴片微波整流天线设计[J]. 应用科技, 2017, 44(4): 60-63.
- [2]张鹤馨,刘长军. 一种基于子阵分解的高效整流天线阵列[J]. 应用科技, 2016, 43(4): 57-61.
- [3]郭峥,池少腾,杨自强. 2~12GHz 超宽带功分器的设计[J]. 应用科技, 2015, 42(4): 34-36, 57.
- [4]罗杰,冯菊,周海京,等. 小型化宽频带宽带微带滤波器的设计[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1430-1434.
- [5]郭富祥,赖展军,薛锋章. 基于微带谐振法的介电常数无损测量[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29(3): 346-351.
- [6]周建军,张宁,颜锦奎. 片状介质材料复介电常数优化计算及测量[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2017, 23(5): 674-680.
- [7]刘艳峰,王玉清. 测量电介质介电常数的一种新方法[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2016, 35(1): 24-26.
- [8]彭燕,陈岩,王克栋,等. 基于网络分析仪的溶液介电常数测量方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4): 29-31.
- [9]国家技术监督局. GB/T 12636-1990, 微波介质基片复介电常数带状线 测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [10]DAS N K, VODA S M, POZAR D M. Two methods for the measurement of substrate dielectric constant [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1987, 35(7): 636-638.
- [11]HAMMERSTAD E, JENSEN O. Accurate models for microstrip computer-aided design [C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Washington, DC, USA, 1980: 407-409.
- [12]KIRSCHNING M, JANSEN R H. Accurate model for effective dielectric constant of microstrip with validity up to millimetre-wave frequencies [J]. Electronics letters, 1982, 18(6): 272-273.
- [13]POZAR D M. 微波工程[M]. 张肇仪,周乐柱,吴德明,等,译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 228-229.
- [14]PUCEL R A, MASSE D J, HARTWIG C P. Losses in microstrip [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1968, 16(6): 342-350.
- [15]GUNAWARDENA A U A W, SAMARASINGHE W M S C, Ahamed A C M, et al. The effects of radiation losses on the measurement of loss tangent using microstrip ring resonators [C]//2015 IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka, 2015: 18-20.

## 本文引用格式:

- 吴秉琪,刘长军. 一种测量微波介质基板复介电常数的方法[J]. 应用科技, 2018, 45(4): 100-103.
- WU Bingqi, LIU Changjun. A method for measuring complex permittivity of microwave dielectric substrate [J]. Applied science and technology, 2018, 45(4): 100-103.