

DOI: 10.7652/xjtuxb201508003

粗糙导体表面提取印刷电路板 介质参数的微分外推方法

贾琦, 黄斌科

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对在高速传输/互连结构中小尺寸印刷电路板(PCB)金属导带表面粗糙对信号传输损耗和相移影响增大的问题,提出了一种宽频带下提取 PCB 板介质参数的方法。该方法基于带状线模型,首先计算表面光滑导体和粗糙导体时的表面阻抗;然后利用表面阻抗计算表面粗糙导体模型的传播常数;最后借助微分外推方法分离光滑导体下的传播常数,从而在宽频带下提取介质基板的介电常数和损耗角正切。仿真结果表明:在从直流到 20 GHz 的频带上,分离导体表面粗糙影响后,提取的介电常数和损耗角正切与实际采用的聚四氟乙烯材料参数相比,在 1 MHz 下,相对介电常数误差为 2%,损耗角正切为 5%;在 10~20 GHz 的高频范围内,相对介电常数最大误差为 1%,损耗角正切最大误差为 8.6%。该方法基于等效表面阻抗理论,在保证计算精度的同时,有效地节约了计算资源,适于在宽频带下提取 PCB 板的介质参数。

关键词: 印刷电路板;表面粗糙;表面阻抗;微分外推;介质参数

中图分类号: TN811.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)08-0011-06

A Differential Extrapolation Method to Extract Dielectric Parameters of PCB with Roughened Conductor Surface

JIA Qi, HUANG Binke

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A method to extract dielectric parameters of PCB board in a wide band is proposed to focus on the problem that rough conductor surfaces of small-scale printed circuit board in high-speed transmission/interconnection structures increase their impact on transmission loss and phase constant. Surface impedance for conductors with smooth surface and rough surface is respectively calculated based on a stripline model and then propagation constants of the stripline model with rough conductors are obtained. A differential extrapolation method is proposed to separate the dielectric loss from the total loss so that dielectric parameters such as permittivity and loss tangent are extracted in a wide frequency band. Simulation results from DC to 20 GHz with eliminating the effects of conductor surface roughness and comparisons with the actual FR4 material parameters show that the extracted permittivity and loss tangent have errors of 2% and 5% respectively at 1MHz and both the maximum errors reach to 1% and 8.6% respectively in a high frequency band from 10 GHz to 20 GHz. The proposed method is based on the equivalent surface impedance theory, and can save computing resources effectively without decreasing

收稿日期: 2014-11-28。 作者简介: 贾琦(1992—),女,硕士生;黄斌科(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471293)。

网络出版时间: 2015-05-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150515.1747.004.html>

accuracy, and it is suitable for extracting dielectric parameters of PCB board in wide band.

Keywords: printed circuit board; rough surface; surface impedance; differential extrapolation; dielectric parameters

为了增加导体与介质之间的黏性,在 PCB 板的加工中铜箔表面的粗糙不可避免。随着传输信号带宽增大到几十 GHz 以上,数字速率提高到几十 Gb/s 以上,在传输/互连结构中导体表面粗糙会引起传输信号的损耗和相移增大等问题^[1-2]。在 PCB 板加工和平面微波器件设计中,针对介质材料选取问题,需要研究宽频带下获取 PCB 基板材料的介质参数。因此,考虑导体表面粗糙的影响,对宽频带下 PCB 板传输性能进行精确表征,进而实现 PCB 板介质参数的宽带精确提取已成为目前的研究热点问题。

目前获取 PCB 板介质基板的介质参数的技术主要有谐振腔法^[3]、自由空间技术^[4]和传输线法^[5]等。谐振腔法基于谐振腔的品质因数的变化,但只适用于窄带情况,不适合测量损耗较大的材料。自由空间技术基于平面波的反射和传输,测试时需要入射到尺寸较大的(相对于最大波长来说)PCB 基板介质上。传输线法通过用 TEM 小室、同轴电缆来得到宽带材料的介质参数,这种方法中被测样品是非均匀的和各向异性的,要完全覆盖测试线的横截面。目前这 3 种方法在提取介质参数时均没有考虑导体表面粗糙的影响^[3-5]。文献[6]采用的坐标变换法只考虑了理想导体边界条件,无法分析粗糙表面对波传输损耗的影响。若采用数值方法对导体表面粗糙进行表征时,需要仿真大尺寸传输线结构和小尺寸粗糙结构共存时的电磁问题,对粗糙表面的建模占用计算资源较大。文献[7]在采用 FDFD 方法分析内壁粗糙的波导传输特性时,对表面粗糙的影响仍然采用表面阻抗进行等效修正,仿真结果和实际测试结果的一致性值得研究。文献[8]先采用实验的方法提取数据,然后用微分外推法处理数据分离介质基板的特性,这种方法不需要对粗糙结构做精确表征,数据处理便于操作,但该方法需要测量 3 组以上不同粗糙度下的传输参数,不仅测量工作量大,而且对传输参数的测量精度要求较高,否则曲线拟合结果波动较大,不易得到正确的结果。

针对以上问题,本文提出了一种通过快速计算介质基板的传输损耗提取 PCB 板的介质参数的方法。该方法简单精确,可有效节省计算资源。本文采用表面阻抗结合微分外推法提取 PCB 板的介质参数,首先建立带状线的分层模型,分别求出光滑与

粗糙导体模型的表面阻抗,然后由表面阻抗求出不同粗糙度下的衰减常数和相位常数,最后通过微分外推法拟合不同粗糙度的总损耗曲线,外推光滑情况的总损耗,准确地分离出导体损耗和介质损耗,进而精确地提取出 PCB 介质基板的介电常数和损耗角正切。

1 理论分析

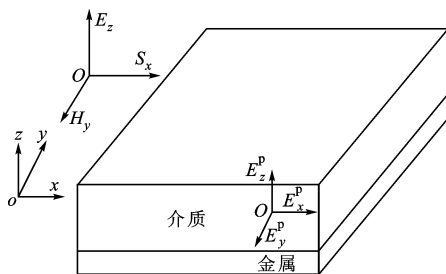
1.1 表面粗糙导体的表面阻抗

针对带状线结构,导体表面光滑与导体表面粗糙的模型如图 1 所示。当模型为理想导体时传输垂直极化的 TEM 波,其场分量由电场分量 E_z 、磁场分量 H_y 组成,坡印廷矢量为 S_x 。当模型为非理想导体时,带状线上传输的波不是理想的 TEM 波,为表面波(TM₀₀模),其场分量由磁场切向分量 H_y^p 、电场切向分量 E_x^p 和 E_z^p 组成(上标 p 表示平行于导体表面),在 $z > 0$ 的区域传播。表面阻抗定义为切向电场与切向磁场的比值^[9]

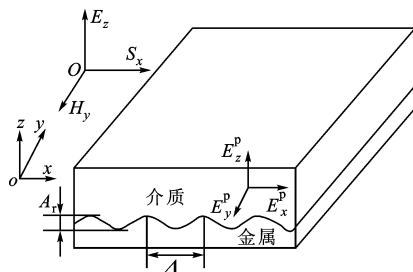
$$Z_s = -E_x^p / H_y^p, \quad z = 0 \quad (1)$$

首先,分析图 1a 所示的表面光滑导体模型,信号在带状线中传播的能量损耗与该模型的表面阻抗有关,光滑导体表面阻抗为复数形式

$$Z_{s0} = R_s + jX_s \quad (2)$$



(a) 表面光滑导体模型



(b) 表面粗糙导体模型

图1 带状线模型

光滑导体的表面阻抗 R_s 为

$$R_s = \frac{1}{\sigma \delta_{\text{skin}}} = \left(\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \right)^{1/2} \propto \omega^{1/2} \quad (3)$$

式中: σ 为电导率; δ_{skin} 为趋肤深度; ω 为角频率; μ_0 为真空磁导率。

在光滑的非理想导体和 TM_{00} 表面模式条件下, 电抗 $X_s = R_s$, 表面光滑导体模型的表面阻抗为 $Z_{s0} = R_s(1+j)$ 。

其次, 分析图 1b 所示的表面粗糙导体模型, 粗糙表面可以用与粗糙的表面周期 Λ 和平均峰谷值 A_r 有关的一维函数 $z_r = f(x)$ 来描述, 如正弦函数、矩形函数以及锯齿函数等。

表面粗糙导体模型总的表面阻抗可以分为 2 部分: 光滑导体和介质之间的阻抗和由粗糙导体表面产生的阻抗增量。根据微扰法 (SPM), 由粗糙导体表面产生的阻抗增量可表示为^[9]

$$Z_{s1} = \frac{\omega \mu_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [jks + \gamma_m - (\gamma_m^2 - k^2 s^2)^{1/2}] H_k^2 \quad (4)$$

式中: $s = 2\pi/\Lambda$ 是与表面粗糙度有关的空间波数; H_k 是周期粗糙函数 $z_r = f(x)$ 傅里叶级数展开系数的第 k 项的幅值; γ_m 是金属导体的复传播常数

$$\gamma_m = (-j\omega\mu_0\sigma)^{1/2} = \left(\frac{\omega\mu_0\sigma}{2} \right)^{1/2} (1-j) = \alpha_m - j\beta_m \quad (5)$$

因此, 表面粗糙导体模型的表面阻抗为

$$Z_s = Z_{s0} + Z_{s1} = R_s(1+j) + \frac{\omega\mu_0}{2} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} [jks + \gamma_m - (\gamma_m^2 - k^2 s^2)^{1/2}] H_k^2 \quad (6)$$

通过 Z_{s1} 的计算可以表征带状线中导体粗糙表面对波传播的影响, 对于表征导体周期粗糙边界的影响具有普遍意义。

1.2 衰减常数和相位常数计算

利用表面阻抗可计算传输线衰减常数和相位常数, 为此, Sanderson 引入了等效表面位移的概念^[9]。等效表面位移度量了导体表面粗糙情况下带状线等效串联阻抗相对于光滑情况的改变量, 可方便表征导体表面粗糙对带状线传输特性的影响。等效表面位移可通过表面阻抗计算得到

$$d_i = \frac{Z_s}{j\omega\mu_0} = \text{Red}_i - j\text{Imd}_i \quad (7)$$

通过等效表面位移来计算衰减常数 α 和相位常数 β ^[10]

$$\alpha = \alpha_0 \frac{2\text{Imd}_i}{\delta_{\text{skin}}} \quad (8)$$

$$\beta = k_1 \left(1 + \frac{\alpha_0}{k_1} \frac{2\text{Red}_i}{\delta_{\text{skin}}} \right) \quad (9)$$

式中: $k_1 = \omega\epsilon_{r1}^{1/2}/c$ 为介质中准 TEM 模式的相位常数; c 为光速; α_0 为光滑导体的损耗; 根据惠勒增量准则^[11], 得到光滑导体的损耗为

$$\alpha_0 = \frac{\beta_0 \eta_0}{4pZ_0} \delta_{\text{skin}} \quad (10)$$

式中: $\eta_0 = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}} \right)^{1/2}$ 为填充相对有效介电常数 ϵ_{r1} 的介质的波阻抗; 考虑填充相对有效介电常数 ϵ_{r1} 的介质的光滑导体带状线模型, Z_0 和 β_0 为相应的准 TEM 模光滑带状线的特征阻抗和相位常数; p 为光滑导体横截面的周长。

利用等效表面位移概念得到了导体粗糙表面时带状线的衰减常数和相位常数, 至此实现了考虑导体粗糙表面时带状线传播常数的精确计算。

1.3 粗糙导体表面传输线的基板介质参数提取

基于 1.2 节计算得到的 PCB 板的传输损耗, 利用微分外推法拟合不同粗糙度下的总损耗曲线, 可外推出光滑时的总损耗, 进一步分离出导体损耗与介质损耗, 并得到相应的介质参数, 包括介电常数和损耗角正切。

根据表面阻抗求得总衰减常数 α , 包括导体损耗 α_c 和介质损耗 α_D 。如果导体表面完全光滑, 根据趋肤厚度模型, 导体损耗正比于 $\omega^{1/2}$ 。总损耗曲线的拟合由 $\omega^{1/2}$ 、 ω 和 ω^2 这 3 部分组成, 其中, 导体损耗遵循 $\omega^{1/2}$ 项, 介质损耗由 ω 、 ω^2 两项的和组成^[12]

$$\alpha = a\omega^{1/2} + b\omega + c\omega^2 \quad (11)$$

在考虑表面粗糙导体影响时, 总损耗不仅包括光滑导体的导体损耗和介质损耗, 还包括粗糙表面引起的导体损耗

$$a_1\omega^{1/2} + b_1\omega + c_1\omega^2 + a_2\omega^{1/2} + b_2\omega + c_2\omega^2 \quad (12)$$

式中: $a_1\omega^{1/2}$ 和 $b_1\omega + c_1\omega^2$ 分别为光滑时的导体损耗和介质损耗; $a_2\omega^{1/2} + b_2\omega + c_2\omega^2$ 为粗糙表面引起的导体损耗。

要精确提取介质参数, 需要有效地分离导体损耗和介质损耗。微分外推法通过将粗糙的总损耗曲线外推到光滑情况, 从而分离导体损耗与介质损耗。通过拟合不同粗糙度的总损耗曲线 $\alpha = K_1\omega^{1/2} + K_2\omega + K_3\omega^2$, 建立辅助曲线 $K_1(A_r)$ 、 $K_2(A_r)$ 和 $K_3(A_r)$, 曲线的横轴为不同的粗糙度 A_r , 导体表面光滑时 $A_r = 0$, $K_1(0)$ 、 $K_2(0)$ 和 $K_3(0)$ 为导体光滑时拟合曲线的系数, 由此外推出光滑时的导体损耗和介质损耗。

最后,由相位常数 β 和介质损耗 α_D 求得 PCB 基板的介质参数:相对介电常数 ϵ_r 和损耗角正切 $\tan\delta$ 。介质损耗和相位常数与介电常数和损耗角正切关系为^[13]

$$\beta = \frac{\omega}{c}[(\text{Re}\epsilon_r)^2 + (\text{Im}\epsilon_r)^2]^{1/4} \cos(\delta/2) \quad (13)$$

$$\alpha_D = \frac{\omega}{c}[(\text{Re}\epsilon_r)^2 + (\text{Im}\epsilon_r)^2]^{1/4} \sin(\delta/2) \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)可得到介质基板的介电参数

$$\text{Re}\epsilon_r = x \left(\frac{x}{x+y} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$\text{Im}\epsilon_r = x \left(\frac{y}{x+y} \right)^{1/2} \quad (16)$$

式中: $x = \left(\frac{\beta c}{\omega} \right)^2$; $y = \left(\frac{2c\alpha_D}{\omega} \right)^2$ 。

由此可见,基于导体损耗和介质损耗随频率的变化规律,借助于微分外推方法可将导体表面粗糙损耗的影响有效分离,进而实现宽频带上介质基板参数的精确提取。

2 实验设计

由于掺入成分和制造工艺的不同,实际 FR4 产品的介电参数有一个很宽的范围,本文选用 PCB Fabrication 公司的 FR4 S1130 型号的材料做参考^[14]。该材料为传统的 FR4 材料,掺杂少,具有代表性。FR4 S1130 材料在 1 MHz 频率下,相对介电常数为 4.5,损耗角正切为 0.016。

按照图 2 所示的带状线结构参数模型,实验仿真中,导体宽度 $w = 184.5 \mu\text{m}$,导体的厚度 $t = 31 \mu\text{m}$,导体与上下两平行板之间的距离为 $h_1 = h_2 = 210 \mu\text{m}$,接地板宽度为 $w_1 = 5 \text{ mm}$,导体为标准的铜箔,电导率为 $\sigma = 5.818 \times 10^7 \text{ S/m}$,带状线的特性阻抗为 50Ω 。铜箔表面的粗糙度采用锯齿粗糙函数来表征,粗糙度周期 $\Lambda = 2A_r$, A_r 的计算范围为 $1 \mu\text{m}$ 到 $7 \mu\text{m}$ 。

按照第 1 部分的步骤,提取介质参数。

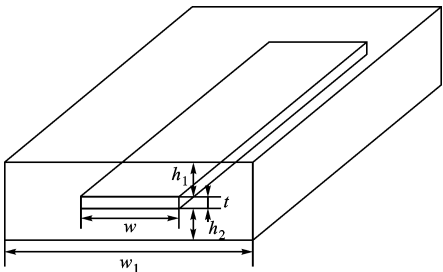


图 2 带状线结构参数模型

3 实验结果分析

根据带状线的实验模型仿真,表面阻抗随频率的变化曲线如图 3 所示。由图 3 中不同粗糙度模型的表面阻抗与频率之间的关系曲线可知,导体表面粗糙度增加,产生的附加阻抗增大,总的表面阻抗增大;粗糙度确定时,随着频率的增加,由于集肤效应更加明显,表面阻抗相应地增加。

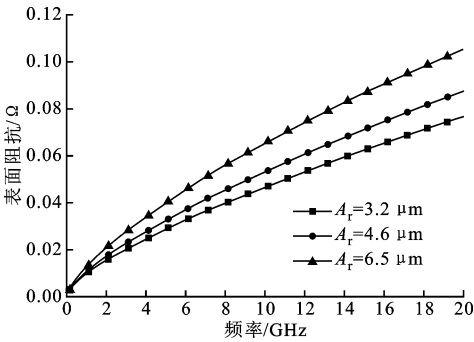


图 3 表面阻抗随频率的变化曲线

总损耗和相位常数随频率的变化曲线分别如图 4、图 5 所示,由图 4 可见导体表面越粗糙,由于表面阻抗越大,总损耗越大。由图 5 可见,不同粗糙度的相位常数曲线几乎一致,导体表面粗糙对相位常数的影响可以忽略。

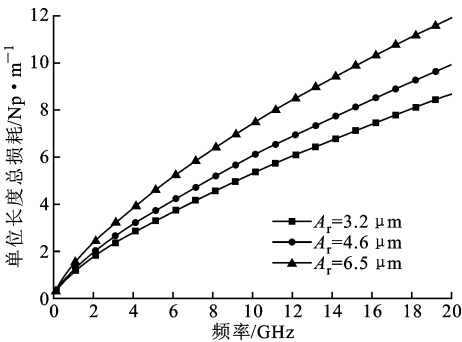


图 4 总损耗随频率的变化曲线

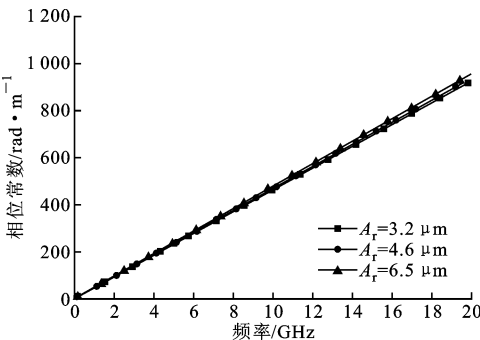


图 5 相位常数随频率的变化曲线

根据拟合的总损耗曲线的系数 K_1 、 K_2 、 K_3 ，采用三次多项式拟合辅助曲线 $K_1(A_r)$ 、 $K_2(A_r)$ 和 $K_3(A_r)$ ，如图 6 所示。曲线的横轴为不同的粗糙度 A_r ，导体表面光滑时 $A_r=0$ ， $K_1(0)$ 、 $K_2(0)$ 和 $K_3(0)$ 为导体光滑时拟合曲线的系数。由图 6 可得 $K_1(0) = 8.38 \times 10^{-16}$ ， $K_2(0) = 6.09 \times 10^{-11}$ ， $K_3(0) = -1.59 \times 10^{-22}$ 。

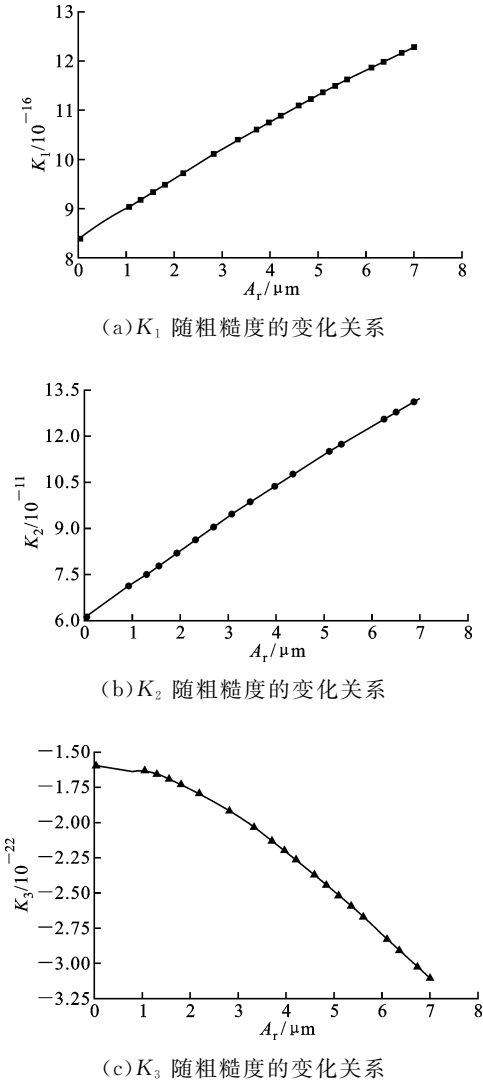


图 6 总损耗拟合曲线系数随粗糙度的变化关系

由外推得到光滑模型的介质损耗，利用公式 (13)、(14) 可得到基板介质参数随频率的变化曲线，介电常数和损耗角正切如图 7 所示。由图 7 可见，从直流到 20 GHz 的频带上，随着频率的增大，介电常数缓慢增加，而损耗角正切减小，且基本呈线性关系。

在低频段，FR4 S1130 材料在 1 MHz 频率下，相对介电常数为 4.5，损耗角正切为 0.016，根据图 7 的曲线数据，本文提取的相对介电常数在 1 MHz 下，误差为 2%，损耗角正切为 5%。在高频段，将本

文提取的介质参数与文献[15]利用 PCB 板测试小车进行实验测试的结果作对比，10 GHz 时，本文提取出的相对介电常数误差在 1% 以内，损耗角正切误差为 2.6%。20 GHz 时，本文提取的相对介电常数误差范围在 1% 以内，损耗角正切误差较高，为 8.6%。文献[14-15]中的介质参数数据与本文提取介质参数的方法有较好的一致性。从模型仿真结果可见，在 0~20 GHz 频带范围内上实现了平面介质基板材料参数的精确提取。

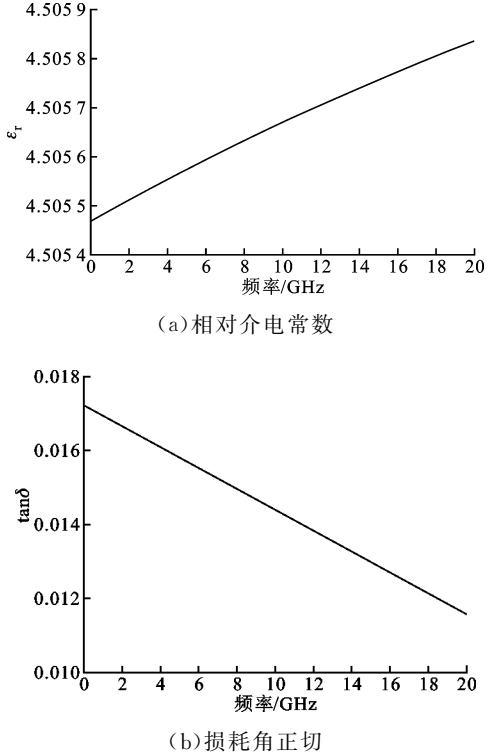


图 7 介质参数随频率的变化规律

4 结 论

本文研究了 PCB 板中导体表面粗糙对传输信号特性的影响，提出了一种精确高效提取 PCB 板介质参数的方法。基于带状线模型，通过等效表面阻抗表征导体表面的粗糙，分析了粗糙度对 PCB 板传输损耗和相移等传输特性的影响，实现导体表面粗糙的宽带精确表征。然后，基于传输损耗仿真结果，利用微分外推方法，分离导体表面粗糙的影响，从而在宽带下提取介质基板的介电常数和损耗角正切。仿真结果表明在从直流到 20 GHz 的频带上，去除导体表面粗糙影响后提取的相对介电常数和实际 PCB 板材料参数相似，0~20 GHz 范围内，最大误差在 2% 以内。而损耗角正切跟实际结果相比，低频段误差为 5%，高频段 10~20 GHz 上最大误差为

8.6%。本文方法在保证计算精度的同时有效节约了计算资源,适于在宽频带下提取 PCB 板的介质参数。本文方法并不局限于特定材料的 PCB 板介质,因此有望推广到毫米波段介质参数的提取。

参考文献:

- [1] GOU Xichen, JACKSON D R, KOLEDINTSEVA M Y, et al. An analysis of conductor surface roughness effects on signal propagation for stripline interconnects [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(3): 707-714.
- [2] Rogers Corporation. Printed circuit design & FAB: understanding PCBs for high-frequency applications [EB/OL]. (2011-10-20)[2014-11-20]. <http://www.rogerscorp.com/documents/2236/acm/articles/Understanding-PCBs-for-High-Frequency-Applications.pdf>.
- [3] HEINOLA J M, STROM J P. Evaluation of dielectric properties of printed wiring board materials by using a microstrip-ring and strip-line ring resonator methods [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(3): 23-29.
- [4] NAKHKASH M, HUANG Yi, FANG M T C. A new free-space technique for measuring the complex permittivity and thickness of materials [J]. IEE Conference Publication, 1999, 461: 23-26.
- [5] NARAYANAN P M. Microstrip transmission line method for broadband permittivity measurement of dielectric substrates [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(11): 2784-2790.
- [6] 倪中非, 黄斌科, 师振盛. 用于非规则波导传输特性分析的高效坐标变换法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(8): 19-22.
NI Zhongfei, HUANG Binke, SHI Zhensheng. Irregular waveguide transmission characteristics for efficient analysis of coordinate transformation method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(8): 19-22.
- [7] 黄斌科, 胡红, 宁曰民, 等. 分析表面粗糙有耗波导传输特性的频域有限差分方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 85-88.
HUANG Binke, HU Hong, NING Yuemin, et al. Surface roughness analysis of lossy waveguide transmission characteristics of frequency-domain finite difference method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 85-88.
- [8] KOUL A, KOLEDINTSEVA M Y, SCOTT H, et al.

Differential extrapolation method for separating dielectric and rough conductor losses in printed circuit boards [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 421-433.

- [9] 钟顺时. 电磁场基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 158-159.
- [10] SANDERSON A E. Effect of surface roughness on propagation of the TEM mode [M]// YOUNG L. Advances in Microwaves. New York, USA: Academic Press, 1971: 1-57.
- [11] COHN S B. Problems in strip transmission lines [J]. IRE Transactions on Microwave Theory Technique, 1955, 3(2): 119-126.
- [12] KOUL A, ANMULA P K R, KOLEDINTSEVA M Y, et al. Improved technique for extracting parameters of low-loss dielectrics on printed circuit boards [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 191-196.
- [13] 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等. 微波工程 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 83-86.
- [14] PCB Fabrication Corp. FR-4 S1130 datasheet [EB/OL]. (2013-11-30)[2014-11-26]. <http://www.pcb-fabrication.com/PCB-fabrication/PCB-fabrication-images/S1130%20Material%20Features,%20Properties,%20parameters%20and%20Applications.swf>.
- [15] KOLEDINTSEVA M Y, KOUL A, ZHOU Fan, et al. Surface impedance approach to calculate loss in rough conductor coated with dielectric layer [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 790-795.

[本刊相关文献链接]

- 倪中非, 黄斌科, 师振盛. 用于非规则波导传输特性分析的高效坐标变换法. 2014, 48(8): 18-22. [doi: 10.7652/xjtuxb201408004]
- 赵重峰, 黄斌科, 师振盛. THz 频段圆波导传输特性的特征方程分析法. 2012, 46(6): 12-16. [doi: 10.7652/xjtuxb201206003]
- 廖斌, 王新刚, 黄加华, 等. 外加磁场对小功率电感耦合微波等离子体激励的影响. 2014, 48(6): 98-102. [doi: 10.7652/xjtuxb201406017]
- 刘媛萍, 黄斌科, 姜万顺, 等. 金属涂敷层对圆波导传输特性的影响分析. 2009, 43(10): 76-80. [doi: 10.7652/xjtuxb200910016]

(编辑 刘杨)