

时域门技术在传输/反射法介质电磁参数测量中的应用

曾国勋^{1,2} 葛 鹰¹ 张海燕^{1,2} 贺春华¹ 陈天立¹

(1 广东工业大学,广州 510006)

(2 毫米波国家重点实验室,南京 210096)

文 摘 在传输/反射法测量电磁参数的基础上,分析了传统的传输/反射法在电介质微波电磁参数计算中的局限性,采用时域门技术,测试了空气、聚乙烯石蜡和 BaM 型铁氧体等材料的电磁参数。结果显示时域门技术可显著提高材料的测量精度和稳定性。

关键词 矩形波导,传输/反射法,电磁参数,时域门

Application of Time Domain Gating Technology to Transmission/Reflection Method for Dielectric Electromagnetic Parameters Measurement

Zeng Guoxun^{1,2} Ge Ying¹ Zhang Haiyan^{1,2} He Chunhua¹ Chen Tianli¹

(1 Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

(2 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096)

Abstract On the basis of transmission/reflection method for measuring electromagnetic parameters, the limitation of the traditional transmission/reflection method in the calculation of the dielectric microwave electromagnetic parameters was analyzed. The electromagnetic parameters of air, the polyethylene wax and BaM-type ferrite were measured by using time domain gating technology. The results show that time domain gating technology can significantly improve the precision and the stability of measurement for materials.

Key words Rectangular waveguide, Transmission/reflection method, Electromagnetic parameters, Time domain gating

1 引言

在微波波段,介质材料的电磁参数的测量由于其具有与隐身技术、微波通信以及航天航空等方面密切相关而引起人们广泛的关注。已有的测量方法包括:时域测量法、自由空间波法、谐振腔法以及传输线法^[1-6]。而由于矢量网络分析仪的技术的发展,基于 Nicolson、Ross 和 Weir 等人^[1,7]于 20 世纪 70 年代提出从 S 参数数据来计算复介电常数 ϵ_r 和复磁导率 μ_r 的概念,简称为 NRW 法(传输/反射法),该法在测量电介质电磁参数中得到最为广泛的应用。本文采用时域门技术,测试了空气、聚乙烯石蜡和 BaM 型铁氧体

等材料的电磁参数。

2 实验方案

电介质电磁参数波导测试系统由华东电子测量仪器研究所研制的 AV3618 矢量网络分析仪和标准矩形波导组成。其中波导为 S 波段和 C1 波段。波导连接装置见图 1。端口 1 和端口 2 联接矢量网络分析仪的两端口,样品紧密填充在法兰盘内。采用 TRL 校准方案——校准端面见图 1。校准系统误差后,分别测量空气、石蜡、BaM 型铁氧体与 20% (质量分数,下同)石蜡混合物的电磁参数。在时域门状态下,采集相应各样品的 S_{21} ,重新计算相应材料的电磁参数。

收稿日期:2009-03-06;修回日期:2009-06-09

基金项目:国家自然科学基金对外交流与合作项目(50610105054);高等学校博士学科点专项科研基金(20050562002);广东省自然科学基金(036918);粤港关键领域重点突破招标项目(20061683)

作者简介:曾国勋,1968 年出生,讲师,主要从事微波吸收材料的制备及性能测试工作。E-mail: zenggx@gdut.edu.cn

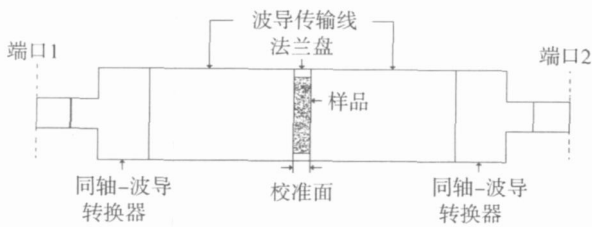


图 1 波导测量装置

Fig 1 Waveguide measuring device

3 结果与分析

3.1 电磁参数计算原理

在 NRW 的算法中,当采用矩形波导取样器 (TE₁₀ 波)时,通过信号流图,可以得到:

$$K = \frac{[S_{11}^2(\omega) - S_{21}^2(\omega)] + 1}{2S_{11}(\omega)} \quad (1)$$

式中, S_{11} 、 S_{21} 分别为样品区的散射参数。反射系数为:

$$R = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2)$$

适当选取正负号使得 $|R| \leq 1$ 。

传输系数 T 为:

$$T = \frac{[S_{11}(\omega) - S_{21}(\omega)] - R}{1 - [S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)]R} \quad (3)$$

定义 Γ 为:

$$\frac{1}{\Gamma^2} = \left[\frac{r \cdot \mu_r}{2} - \frac{1}{c} \right] = - \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (4)$$

则:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{1}{\Gamma} \right) = \frac{1}{g} \quad (5)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \frac{1}{g}}{(1 - \frac{1}{g}) \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{c}}} \quad (6)$$

$$r = \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{c} \right)}{\mu_r} \quad (7)$$

式中, λ_0 是自由空间的波长, λ_g 波导在其主模时的截止波长, d 为样品的厚度, μ_r 、 r 为材料的复磁导率和复介电常数。

对于无损耗或损耗极小的介质,当样品厚度为样品的半个波导波长的整数倍时,满足 $d = \frac{\lambda_g}{2} \times n$ 时 ($n = 1, 2, 3, \dots$, λ_g 为波导波长),产生样品的厚度谐振,样品散射参数 S_{11} 的模值趋向于 0,使式 (1) 中的 K 值不稳定,这给 R 和 T 值带来较大的计算误差,从而影响测量精度。在文献 [7~8] 中提出了一种改进的 NRW 算

法可以克服厚度谐振问题,但是仅针对与非磁性材料的测量。当出现谐振的问题时,一个简单可行的解决方法是将样品的厚度减薄。以此来判断谐振峰是由样品厚度引起的,还是材料的本征谐振峰。

另外,在式 (4) 中,对 T 取自然对数的解具有多值性,设 $\frac{1}{T} = A e^{j\theta}$ 即:

$$\ln \left(\frac{1}{T} \right) = \ln (A e^{j\theta}) = \ln A + j(\theta + 2n\pi) \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

在 MaLab 等工具软件进行运算时,一般直接得出 $[\ln A, \theta + 2n\pi]$ 的解,这就需要对其结果进行补偿,即对 n 值进行判断。Weir^[9] 提出采用群延迟的方法来解决,文献 [10] 提出一种传输相移的修正,并通过 $n = \operatorname{int} \left(\frac{d}{\lambda_g} \right)$ 来估算测试起始频点的 n 值。对于较低起始频率,初始 n 值一般为 0。

此外在实际测量中,由于测量线间的移动和配合错位等原因,造成系统源和负载不能完全匹配,使测得的 S_{21} 数据具有许多毛刺峰,并直接影响电磁参数的计算结果^[11]。在时域响应里,这些毛刺峰类似于底噪。为了消除这些毛刺峰,实际操作中,采用矢网特有的时域门技术,将频域响应转变为时域响应。框定样品 S_{21} 的主响应,从而消除失配所引起的毛刺峰,提高测量的稳定性和精度。

3.2 实验结果

3.2.1 空气介质的电磁参数计算结果

图 2 是空气的电磁参数。测得的空气复介电常数实部为 0.985~1.035,与理想空气值相差 3.5%。图 2(a) 可见空气复介电常数虚部存在较大的震荡。图 2(b) 可见空气复磁导率实部位于 0.965~1.07,与理想空气值相差 7% [图 2(c)]。空气复磁导率虚部同样存在较大的震荡,见图 2(d)。图 2 各图存在较多的毛刺峰,这影响测量结果的精度和稳定性。图 3 是采用时域门后,得到的空气介质的电磁参数。对比图 2,图 3 中的各曲线明显光滑。从图 3(a) 可见,测得的空气复介电常数实部为 0.985~1.005,与理想空气值相差 1.5%;虚部值位于 0~0.006,精度比图 2(b) 提高一个数量级。空气复磁导率实部位于 1.004~1.035,与理想空气值相差 3.5%;虚部精度也提高一个数量级,见图 3(b)。磁导率与理想值偏差较大的来源可能由于本实验采用的波导传输线未镀金或银,而导致损耗偏大。而在 3.95 GHz 位置上,两条曲线的不连续是由于两个波导传输线的系统误差造成的。

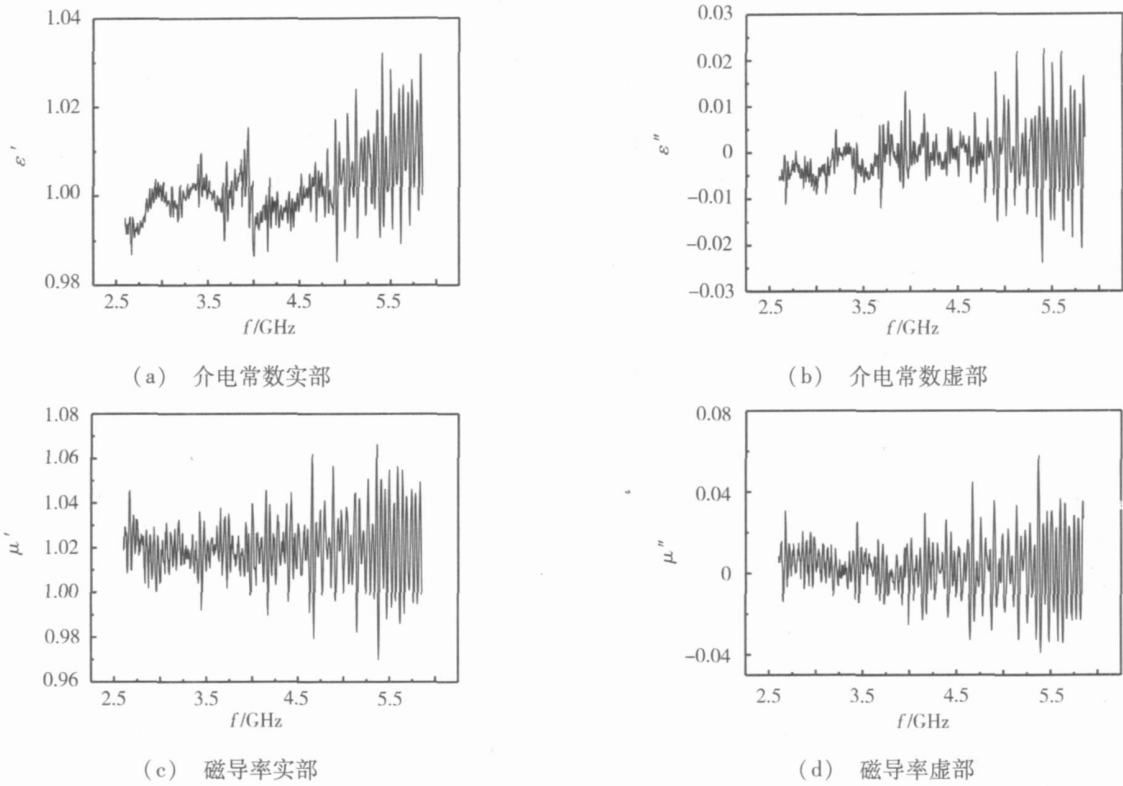


图2 2.6~5.85 GHz 空气的测量结果(无时域门)

Fig. 2 Electromagnetic parameters of air measured from 2.6 GHz to 5.85 GHz without time domain gating

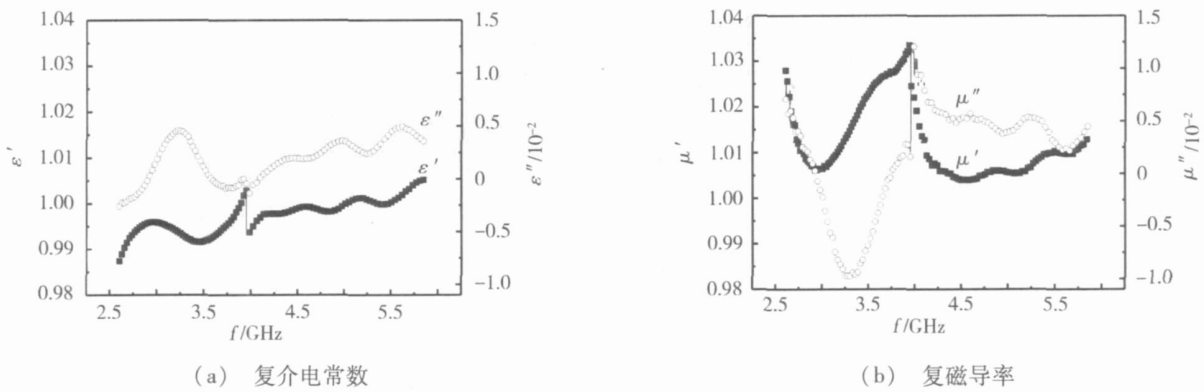


图3 2.6~5.85 GHz 空气的测量结果(带时域门)

Fig. 3 Electromagnetic parameters of air measured from 2.6 to 5.85 GHz with time domain gating

3.2.2 BaM 型铁氧体与 20% 石蜡混合物的电磁参数

图4 是未用时域门技术得到的 BaM 型铁氧体与 20% 石蜡混合的电磁参数。

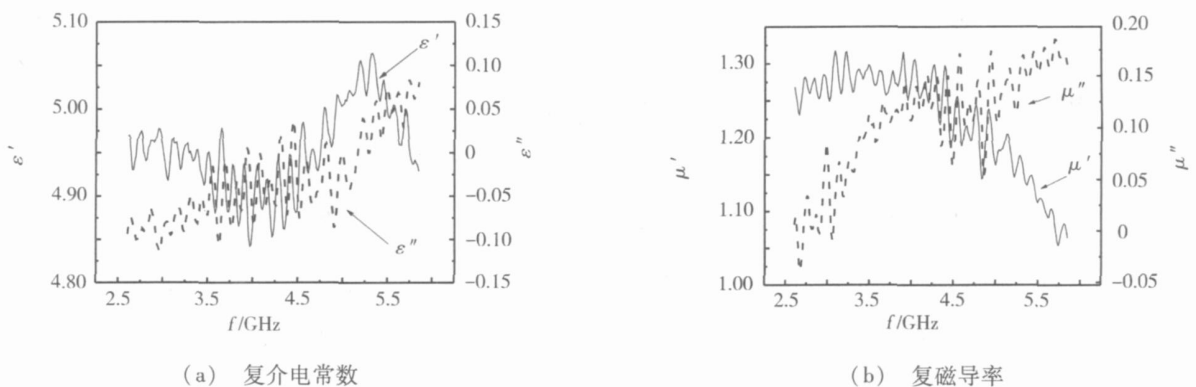
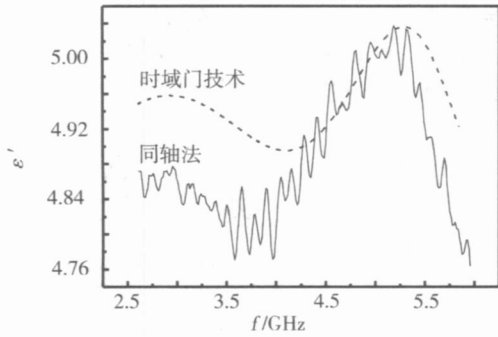


图4 2.6~5.85 GHz, 未用时域门技术的 80% BaM 型铁氧体/石蜡的测量结果

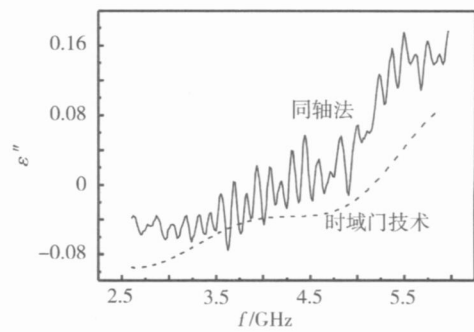
Fig. 4 Electromagnetic parameters of BaM ferrite composites measured from 2.6 GHz to 5.85GHz without time domain gating

铁氧体复介电常数实部为 4.85 ~ 5.05, 见图 4 (a)。复磁导率实部位于 1.05 ~ 1.35, 见图 4 (b)。图中曲线均存在系统噪音干扰引起的振荡和波动。

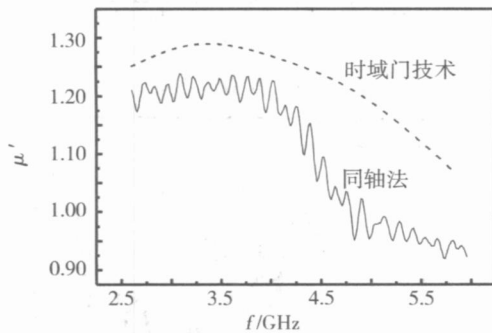
图 5 是 80% BaM 型铁氧体 / 石蜡的电磁参数。采用时域门技术得到的曲线光滑连续, 明显好于同轴法的测量结果。



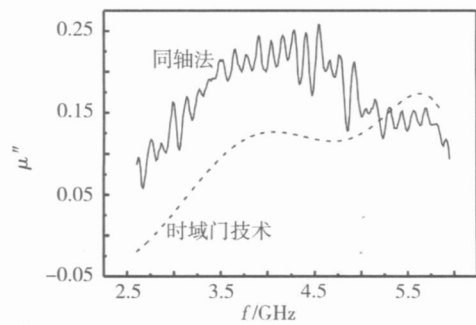
(a) 介电常数实部



(b) 介电常数虚部



(c) 磁导率实部



(d) 磁导率虚部

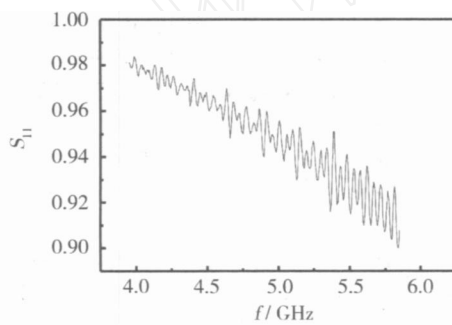
图 5 2.6 ~ 5.85 GHz, 80% BaM 型铁氧体 / 石蜡的电磁参数测量结果

Fig 5 Electromagnetic parameters of 80% BaM-type ferrite / paraffin measured from 2.6 to 5.85 GHz

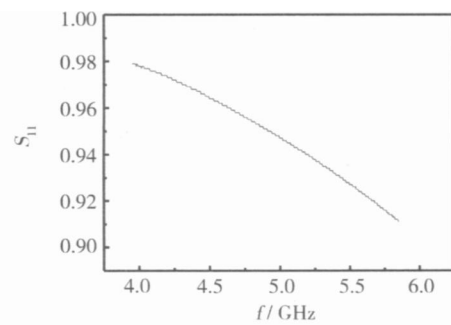
3.2.3 聚乙烯石蜡的电磁参数计算结果

多尖锐的毛刺峰, 见图 6 (a)。

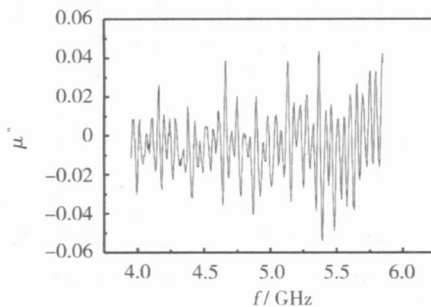
用常规方法测得的石蜡样品的 S_{21} 曲线, 存在许



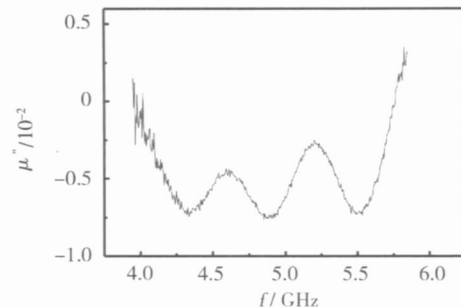
(a) 无时域门的 S_{21} 实部曲线



(b) 带有时域门的 S_{21} 实部曲线



(c) 无时域门的磁导率虚部曲线



(d) 带有时域门的磁导率虚部曲线

图 6 在 3.95 ~ 5.85 GHz, 石蜡样品的 S_{21} 与磁导率虚部曲线

Fig 6 S_{21} and imaginary part of permeability of polyethylene wax measured from 3.95 to 5.85 GHz

图 6(c)是根据图 6(a)结果得到的磁导率虚部曲线,磁导率虚部值为 $-0.05 \sim +0.05$,且振荡明显。图 6(b)是采用时域门测量得石蜡样品的 S_{21} 曲线。从图可见,曲线明显光滑,尖锐的毛刺峰消失。图 6(d)是根据图 6(b)结果得到的磁导率虚部曲线,磁导率虚部值为 $-0.008 \sim +0.005$,精度提高一个数量级。图 7

是聚乙烯石蜡的电磁参数。从图 7(a)可见,测得的聚乙烯石蜡复介电常数实部为 $2.222 \sim 2.245$,与 Pozar^[12]提供的聚乙烯材料的复介电常数一致。复介电常数虚部值为 $-0.006 \sim +0.003$,可认为近似等于零。聚乙烯石蜡复磁导率实部位于 $1.010 \sim 1.035$,虚部值位于 $-0.008 \sim +0.008$,可认为基本等于零。

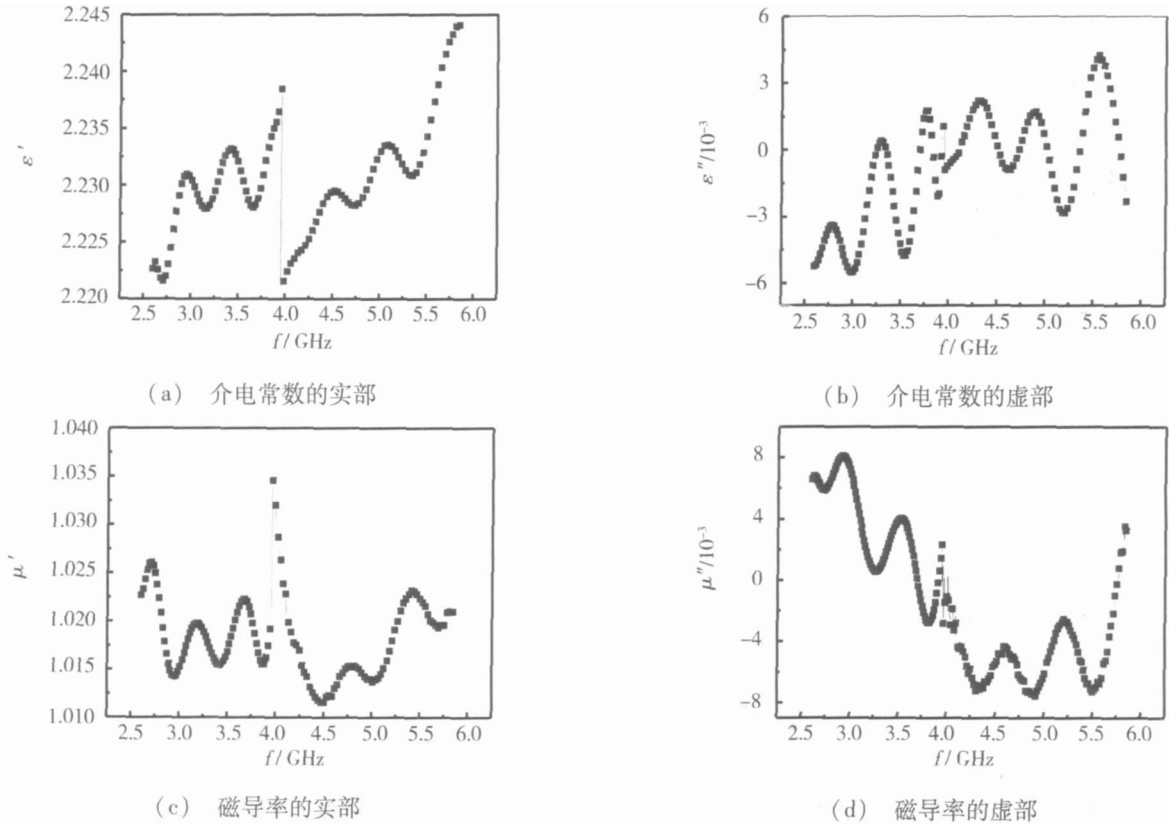


图 7 2.6~5.85 GHz 聚乙烯石蜡电磁参数测量结果(带时域门)

Fig 7 Electromagnetic parameters of polyethylene wax measured from 2.6 to 5.85 GHz with time domain gating

4 结论

(1)采用传统的采样技术得到的电介质电磁参数曲线存在较明显的系统噪声干扰现象。

(2)运用时域门技术,能有效抑制测量系统的噪声,可显著提高 S_{21} 的精度和稳定性,从而提高介质材料测量的精度和稳定性。

(3)空气和聚乙烯石蜡电磁参数测试结果表明,采用时域门技术,可使样品结果接近理想值。

(4)采用时域门技术得到的 80% BaM 型铁氧体/石蜡的电磁参数曲线光滑,明显好于某商业测试软件测试结果。

参考文献

- 1 Nicolson A M, Ross G Measurement of intrinsic properties of materials by time domain techniques IEEE Trans Instrum. Meas, 1970; 19(4): 377~382
- 2 Cook R J, Jones R G, Rosenberg C B. Comparison of cavity and open-resonator measurement of permittivity and loss angle at 35 GHz IEEE Trans Instrum. Meas, 1974; 23(4): 438~442
- 3 Wolfson B J, Wentworth S M. Complex permittivity and permeability measurement using a rectangular waveguide Microwave and Optical Technology Letters, 2000; 27(11): 180~182

- 4 Afsar M N, Birch J R, Clarke R N. The measurement of the properties of materials Proc IEEE, 1986; 74: 183~189

- 5 Chodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies IEEE Trans Instrum. Meas, 1989; 37(3): 789~793

- 6 Decreton M C, Gardiol F E Simple nondestructive method for the measurement of complex permittivity IEEE Trans Instrum. Meas, 1974; 23(4): 434~438

- 7 田步宁,杨德顺,唐家明等. 传输/反射法测量复介电常数的若干问题. 电波科学学报, 2002; (1): 10~15

- 8 田步宁,刘其中,杨德顺等. 传输/反射法测量复介电常数的三个方程研究. 宇航学报, 2002; (5): 21~27

- 9 Weir W B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. Proc IEEE, 1974; 62: 33~36

- 10 景莘慧,蒋全兴. 基于同轴线的传输/反射法测量射频材料的电磁参数. 宇航学报, 2005; (5): 630~634

- 11 HEWLETT PACKARD, Materials Measurement Produce Note 8510-3. 1997

- 12 Pozar D M. 微波工程. 第三版. 北京:电子工业出版社, 2006: 588

(编辑 李洪泉)

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2010年 第1期