

## 自由空间法测试超材料的电磁参数

裴志斌, 顾超, 屈绍波, 马华, 王甲富

(空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:**随着近年来超材料技术的迅猛发展,对超材料有效电磁参数的测量精度也要求越来越高。研究了超材料的有效电磁参数的测试技术,提出了利用自由空间法来测试超材料的有效电磁参数。与其它测试方法相比,自由空间法是一种非接触和非破坏性的测试方法,对测试材料样品没有非常严格的形状和工艺要求,只需厚度均匀且具有一定大的测试面积,以避免边缘绕射。探讨了在参数反演过程中产生的多值问题和相位模糊问题,并通过理论分析给出了一种有效的解决方案。用自由空间法测量了超材料样品在(8 GHz - 14 GHz)的有效电磁参数,并和波导法的测试结果进行了比较。结果表明自由空间法测试超材料的电磁参数是正确可靠的,具有实用价值。

**关键词:**自由空间法;波导法;超材料;电磁参数

**中图分类号:** O441.6; O482.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0086-05

1967年,前苏联科学家 Veselago<sup>[1]</sup>对电磁波在介电常数和磁导率同时为负值的媒质中的传播特点作了理论研究,预测它具有诸如负群速度、负折射率、理想成像、逆 Doppler 频移、反常 Cerenkov 辐射等种种奇异的物理性质。19世纪80年代,人们在实验中发现了微波段介电常数和磁导率小于1的手征媒质,然而实验结果的正确性受到了人们的怀疑。1996年和1999年, Pendry 等人<sup>[2-3]</sup>先后提出用细金属线阵列来实现负介电常数,用开口谐振环(Split Ring Resonator)阵列来实现负的磁导率,从而实现介电常数和磁导率同时为负值的媒质。2000年, Smith 等人<sup>[4]</sup>根据 Pendry 提出的理论模型,设计出了开口谐振环与导线阵列构成的左手材料,并通过棱镜实验验证了这种左手材料具有的负折射率特性。张等人<sup>[5]</sup>运用全波仿真方法,以无限长超材料圆柱壳为理论模型,研究了超材料在隐身中的应用。

最近, Smith 等人<sup>[6]</sup>和 Kochny<sup>[7]</sup>等人首先通过对周期性超材料结构单元的数值模拟提取了有效的电磁参数。Chen 等人<sup>[8]</sup>针对其他的超材料结构提出了一种改进的有效电磁参数提取方法。超材料有效电磁参数提取的主要方法:①应用等效媒质理论将非均匀的超材料近似替代为均匀的满足本构关系  $D = \epsilon_{\text{eff}} E$  和  $B = \mu_{\text{eff}} H$  的媒质;②电子工程中用来反演 S 参数的标准方法<sup>[9]</sup>被用来提取有效电磁参数。

目前,国内外关于通过试验测试来提取超材料电磁参数的文献还很少。自由空间法<sup>[10]</sup>是一种非接触和非破坏性的测试方法,利用天线将电磁波辐射到自由空间,再利用天线接收并测试材料对所发射电磁波的反射和透射信号,从而计算出材料的电磁参数。与其它测试方法相比,自由空间法对测试样品没有非常严格的形状和工艺要求,只需厚度均匀且有一定大的测试面积,以避免边缘绕射。在自由空间法测试过程中,电磁波是辐射到自由空间中的,即使采用聚焦天线,也难免产生多余反射而导致结果误差。通常用 TRF<sup>[11]</sup>技术校正测试系统和时域门技术<sup>[12-14]</sup>修正测试值,可以有效减小误差。

收稿日期:2008-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10474077,50632030);陕西省自然科学基金资助项目(2006E<sub>1</sub>135)

作者简介:裴志斌(1959-),男,河南武陟人,教授,主要从事电子材料及器件研究。

E-mail: guchao123abc@sina.com

### 1 测试系统

测试系统由喇叭聚焦透镜天线、矢量网络分析仪和控制计算机组成。该系统放置于测试平台上,计算机在整个测试系统中是控制中心,控制着网络分析仪的自动测试和电磁参数的计算,见图 1。

2 个天线之间的距离为天线焦距的 2 倍,且固定在水平支架上,其中接收天线可进行位置移动,以适应校准和测试不同厚度样品的需要。在接收天线上安装位置调节装置进行精密调距,其准确度优于 0. 01 mm。经精密加工的样品架,置于两天线的共焦面处,用于支撑和放置被测样品。矢量网络分析仪端口传输线采用同轴线,工作模式为 TEM 波。因被测材料需要线极化平面波,所以应将同轴线的 TEM 波转换为矩形波导的 TE 波,然后经过聚焦透镜天线发射。电磁波到达被测样品表面时,一部分波产生反射,反射波沿着相反路径进入矢量网络分析仪的端口 1;另一部分波进入被测样品,在被测样品的另一面,部分电磁波穿过交界面形成透射波。透射波被聚焦透镜天线接收,经过模式转换,进入矢量网络分析仪的端口 2。通过对反射波和透射波的测试,可以测得二端口网络的散射参数  $S_{11}$  和  $S_{21}$ 。

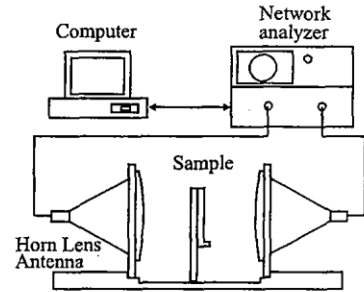


图 1 自由空间测试系统示意图  
Fig. 1 Schematic layout of the free space measurement system

### 2 校准

自由空间法主要的误差来源有 2 种:边缘散射和多次反射,采用点聚焦喇叭透镜收发天线、校准质量很高的 TRL 技术和时域门技术可以大大减少这些不利因素的影响。

TRL 校准技术包含 3 个标准,单端口的短路标准,两端口的直通标准和线标准。短路标准是在发射天线和接收天线的焦平面处分别放置一个金属板,执行短路校准;线标准是增加两测试端之间的距离,在双倍焦距的基础上增加四分之一中心波长,然后执行线标准;直通标准是设置两测试端间的距离为双倍焦距,直接执行直通校准见图 2。

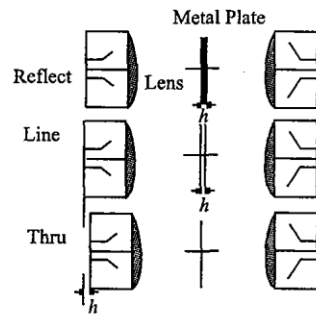


图 2 TRL 校准示意图  
Fig. 2 Schematic layout of TRL calibration procedure

在实际测试中,电磁波的直接传输路径是我们所关心的,在时域响应中,这条路径对应着最短的传输时间,如果将时域门选定在这段时间,就能有效的消除多径效应和背景干扰,将此区间的时域响应再返算到频域,就能得到消除多路反射及背景干扰的真实的幅频响应和相频响应,从而得到了比较准确的散射参数。

### 3 数据反演

1987 年,伦敦大学电子工程系的 Cullen 等人<sup>[13]</sup>利用菲涅尔反射定律,提出了一种有效的反演方法,为在自由空间测试材料的电磁参数提供了一种有效途径。1989 年,Ghoduaonkar 等人<sup>[14]</sup>用透镜天线作为测试的发射和接收源,并给出了天线与测试样品的相对尺寸要求。该方案可将入射电磁波聚焦在样品表面一个波长直径范围内,使投射到样品表面的电磁波范围变小,基本可以忽略样品的边缘散射。

设被测介质材料为各向同性,横向尺寸足够大,厚度为  $d$  的平板材料,其复电磁参数为

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r; \mu_r = \mu'_r - j\mu''_r \tag{2}$$

在自由空间中,设线极化平面波  $\vec{E}_i$  由自由空间向被测样品垂直入射,相位常数为  $k_0$ ,频率为  $f$ ,传播方向沿喇叭聚焦透镜天线的轴向。入射波在空气与介质材料的交界面遇到不连续,因此一部分电磁波被反射回去,形成反射波;另一部分电磁波将穿过介质面向前传播,形成透射波。将被测材料作为二端口网络,通过对反射波和透射波的测试,可以得到二端口网络的散射参数  $S_{11}$  和  $S_{21}$ 。根据电磁波在不连续界面上满足的

边界条件,可得散射参数:

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}; S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2)$$

式中:  $\Gamma$  和  $T$  分别为介质样品与空气界面的反射系数和传输系数。

$$\Gamma = \frac{Z - 1}{Z + 1}; T = e^{-\gamma d} \quad (3)$$

式中:  $Z$  为介质材料的相对特性阻抗;  $\gamma$  为波在被测材料中的传播常数。

由式(2)、式(3)可以求得待测材料的特性阻抗和传播常数为

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2}} \quad (4)$$

$$\gamma = -\frac{1}{d} \ln \left( \pm \frac{S_{21}(Z + 1)}{S_{11}(Z - 1) - (Z + 1)} \right) + j \frac{2n\pi}{d}, (n = 0, 1, \dots, L) \quad (5)$$

$Z$  和  $\gamma$  与复电磁参数之间的关系为

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_{\text{eff}}}{\epsilon_{\text{eff}}}}; \gamma = jk_0 \sqrt{\mu_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}}} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,利用式(4)、式(5)所得到材料的电磁参数不是唯一的,而存在多组解,这就是参数反演中的多值问题和相位模糊问题。由  $Z$  和  $\gamma$  的物理意义,以及上式中的  $\pm$  号选取应满足  $\text{Re}(Z) > 0$  和  $\text{Im}(\gamma) > 0$  的条件,可以解决多值问题。相位模糊问题产生的实质是三角函数的计算,因此不能通过单纯的计算解决。考虑到电磁波为垂直入射,式(5)中的  $n$  为

$$n = \left[ \frac{d}{\lambda} \right] \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为材料内部电磁波的波长; “[ ]” 为高斯函数。

可见,  $n$  的取值取决于材料样品的厚度  $d$ 。多数情况下采用的方法是选取  $d$  非常小的样品,使  $d < \lambda$ , 则  $n = 0$ 。当样品厚度  $d$  在一个波长和 2 个波长之间时,  $n = 1$ , 以此类推。

### 4 实验结果

首先采用空气作为标准介质样品进行测试,这是因为空气的介电常数和磁导率是已知的 ( $\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$ )。在测试系统校准完后,通过精密调距装置增加两聚焦透镜天线的距离,以形成厚度  $d = 5 \text{ mm}$  的被测空气介质样品。在此状态下,测试空气的介电常数和磁导率,如图 3 所示的测试结果可知,在 8 GHz - 12 GHz 空气的  $\mu'$  和  $\epsilon'$  均接近于 1, 而  $\mu''$  和  $\epsilon''$  均接近于 0, 说明实测值与理论值 ( $\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$ ) 是吻合的。超材料样品(图 4)用方形的 SRR 环印刷在 RT5870 高频板上(覆铜厚 0.017 mm, 基板厚 0.381 mm, 基板的介电常数  $\epsilon = 2.33, \tan \alpha = 0.0012, \alpha$  为损耗角)。

由图 5、图 6 可见,自由空间法测得的超材料样品的电磁参数与波导法的测试结果之间的差距基本能稳定地保持在 4% 以内,这说明了利用自由空间法测试超材料电磁参数有比较好的精度,可以满足超材料电磁参数的测试要求。

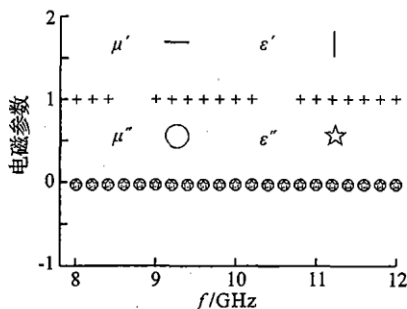


图 3 空气的有效电磁参数(自由空间法)  
Fig. 3 The effective electromagnetic parameters of air ( free space method)

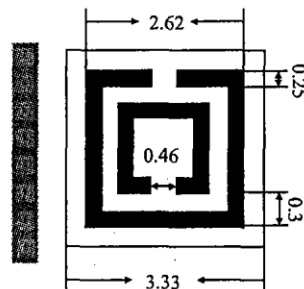


图 4 超材料样品示意图  
Fig. 4 Schematic layout of metamaterial sample

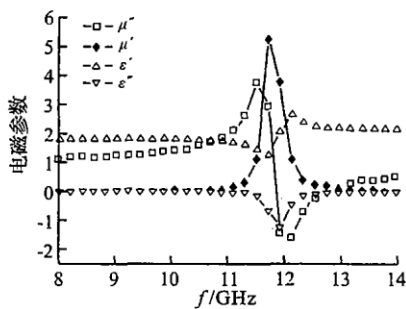


图5 超材料的有效电磁参数(自由空间法)

Fig. 5 The effective electromagnetic parameters of metamaterial sample ( free space method)

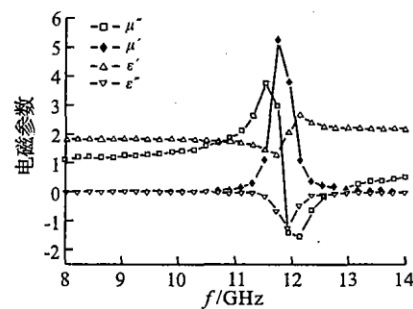


图6 超材料的有效电磁参数(波导法)

Fig. 6 The effective electromagnetic parameters of metamaterial sample ( waveguide space method)

## 5 结束语

本文系统地说明了利用自由空间法测试超材料电磁参数的理论依据和实验方法,并就参数反演过程中遇到的多值问题和相位模糊问题加以研究,进而提出了一种有效的解决方案。最后分别用自由空间法和波导法测试了空气和超材料样品的电磁参数。结果表明自由空间法具有较高的精度,可以满足超材料电磁参数的测试要求。

### 参考文献:

- [ 1 ] Veselago V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10: 509 - 514.
- [ 2 ] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures[R]. Phys Rev Lett, 1996 - 76 - 4773, 1996.
- [ 3 ] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism From Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena[J]. IEEE Trans Microwave Theory Technique, 1999, 47: 2075 - 2084.
- [ 4 ] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84: 4184 - 4187.
- [ 5 ] 张介秋, 陈必武, 赵威, 等. 超材料圆柱壳电磁隐身效果数值仿真研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(3): 67 - 70.  
ZHANG Jieqiu, CHEN Biwu, ZHAO Wei, et al. Numerical Analysis of Metamaterial Cylindrical shells Electromagnetic Invisibility Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(3): 67 - 70. (in Chinese)
- [ 6 ] Smith D R, Vier D C, Kochny Th, et al. Electromagnetic Parameter Retrieval from Inhomogeneous Metamaterials[R]. Phys Rev E, 2005 - 71 - 036617, 2005.
- [ 7 ] Koschny T, Markos P, Smith D R, et al. Resonant and Antiresonant Frequency Dependence of the Effective Parameters of Metamaterials[R]. Phys Rev E, 2003 - 68 - 065602, 2003.
- [ 8 ] Chen X, Grzegorzczak T M, Wu B, et al. Robust Method to Retrieve the Constitutive Effective Parameters of Metamaterials [J]. Phys Rev E, 2004 - 70 - 016608, 2004.
- [ 9 ] Chen L F, Ong C K, Neo C P, et al. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization [M]. New York: Wiley, 2004.
- [ 10 ] 唐宗熙, 张彪. 用自由空间法测试介质电磁参数[J]. 电子学报, 2006, 1(1): 189 - 192.  
TANG Zongxi, ZHANG Biao. Free - Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Medium [J]. 2006, 1(1): 189 - 192. (in Chinese)
- [ 11 ] Smith D R, Schultz S, Markas P, et al. Determination of Effective Permittivity and Permeability of Metamaterials from Reflection and Transmission Coefficients[R]. Phys Rev B 2002 - 65 - 195104, 2002.
- [ 12 ] Ghodgaonkar D K. Varadan V V, Varadan V K. Free - space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies[J]. IEEE Trans Instrum Mea, 1990, 39: 387 - 394.

- [ 13 ] Cullen A L. A New Free Wave Method for Ferrites Measurement at Millimeter Wave Length[J]. Ratio Science , 1987 , 22 (7) :116821170.
- [ 14 ] Ghoduaonkar D K, Varadan V V , Varadan V K, et al . Free space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , 1989 , 37 (2) : 789 - 793.

(编辑:徐楠楠)

## Measurement of Electromagnetic Parameters of Meta - materials by Free - space Method

PEI Zhi - bin, GU Chao, QU Shao - bo, MA Hua, WANG Jia - fu  
(Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** With the rapid development of meta - materials, the requirements for the precision of measurement of the effective electromagnetic parameters become increasingly high. A research on the measurement of the effective electromagnetic parameters has been made and free - space method is presented. Compared with other methods, this free - space method is a untouchable and nondestructive test method , and when using this method, the sample is not strictly required in shape and technology but it should be homogeneous in thickness and big enough in test area to avoid diffraction effects at the edges. An effective way is proposed for solving the multi - valued problem and phase - shift ambiguity problem in the parameter inversion process by the theoretical analysis. The effective electromagnetic parameters of air and meta - material samples are tested by using the free - space method , and in comparison with the results of the wave - guide method in the band (8 GHz - 14 GHz) , the results indicate that this test method is correct, reliable and practical.

**Key words:** free - space method; wave - guide method; meta - materials; electromagnetic parameters