

槽线特征阻抗的全波分析及在天线设计中的应用

王宏建 高本庆 刘瑞祥
北京理工大学电子工程系, 100081

摘要

本文采用 FDTD 全波分析方法分析了不同类型槽线的特征阻抗, 计算中采用 MUR 吸收边界并结合局部吸收负载方法。计算结果同矩量法进行了比较; 结合实验结果验证了计算的正确性, 并对槽线在平板宽带天线设计中的应用进行了分析和计算。

关键词 槽线 特性阻抗 FDTD 平板宽带天线

The Full Wave Analysis of the impedance of the slotline
and the planar Wideband antenna

Abstract: Full wave method (FDTD) was used to analysis the impedance of three kinds of slotlines, the MUR's ABCs of the second order and partial absorbing load were taken into account to reduce the reflection on the boundary condition, the comparisons with the MOM and Serenade software as well as the experiment verified the accuracy and easiness of this method, finally, the Vivaldi antenna(based on the double-sided slotline) was calculated.

Key words: Slotline FDTD Wideband planar antenna impedance

1 前言

槽线是在介质基片上开槽而成, 不含接地板, 非常适合于微波集成电路中, 近些年来又在平板天线中采用了槽线过渡或槽线—微带转换作为馈线, 因而分析槽线本身的特性阻抗具有十分重要的意义。关于槽线阻抗的分析已有不少文献【1—7】，包括谱域法【3】，近似解法【6】然而都有自己的局限性，并且一般只能分析某种特定的槽线结构，J.J.LEE 于文献【8】中发表了采用矩量法的计算方法，可以计算各种槽线结构，但有个假设，槽线无限长，并且在传输线横截面中只考虑静态场分布，通过计算单位长度的电容和电荷分布并结合准 TEM 分析来确定特定频率下槽线的特征阻抗，然而，槽线中传输的既不是 TEM 模，也不是准 TEM 模，而是波导模【9】，该模没有截止频率，但有色散特性，它的相速和特征阻抗均随频率在变化，因此需要对槽线进行全波分析。

FDTD 全波解法可以对任何结构进行全波分析，无须假设槽线结构，且可给出时域特性，通过傅立叶变换可以得出槽线特征阻抗的频率特性。本文采用 MUR 吸收边界，结合槽线场的特性，利用局部吸收负载加强吸收效果，得出单根槽线特征阻抗的频率特性；在此基础上对槽线馈线扩展而成的平板宽带天线整体进行了 FDTD 分析。

2 理论分析

2.1 槽线特性阻抗分析

槽线的结构如图 1 所示，是在基片敷有导体层的一面上刻出一条槽而成，另一面为介质层（无导体片），可分为单面槽，双面槽和‘三明治槽’，对于不同类型可分别建模。结合槽线结构，可以看出电磁场主要集中于槽线附近，为此在采用 MUR 吸收边界的基础上加局部吸收负载进一步改善吸收效果。

在槽线上选取参考面，在参考面上通过求槽线的法向电场积分得到 V ，

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = V(t, z_1) \quad (1)$$

而环绕金属带的磁场积分得到 I ，

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I(t, z_1) \quad (2)$$

求取电压波和电流波的傅立叶变换

$$V(\omega, z_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(t, z_1) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

$$I(\omega, z_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t, z_1) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

槽线的特征阻抗可表示为：

$$z_0(\omega) = \frac{V(\omega, z_1)}{I(\omega, z_1)} \quad (5)$$

假如槽线结构存在不连续，也可得到其 S11 和 S12 参量。

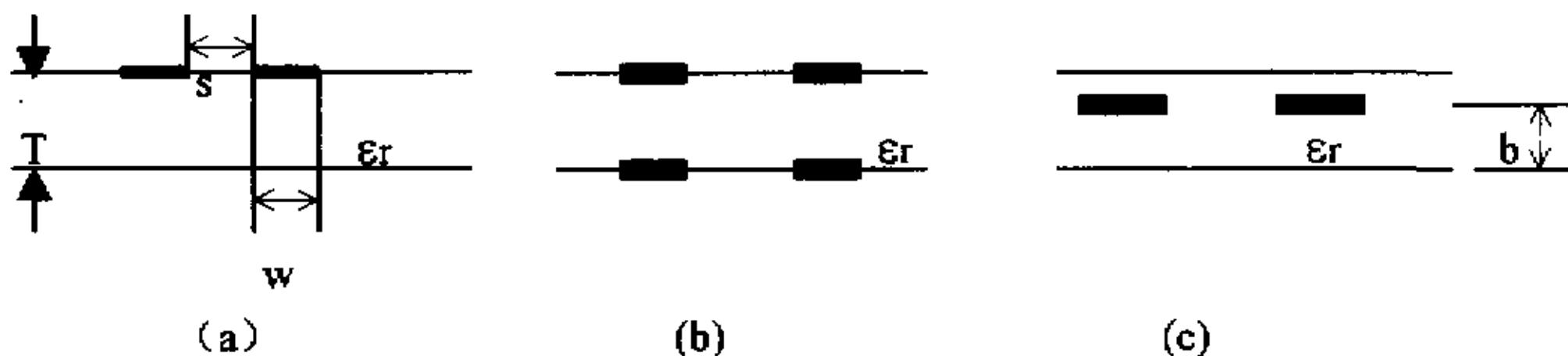


图 1 单面槽线 (a)、双面槽线 (b)、“三明治”槽线 (c) 的几何结构

在计算中由于有些节点切向电场分量位于两层介质的分界面，介电常数用两者的平均值 $\epsilon_r = (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})/2$ 代替。

2. 2 槽线在平板天线设计中应用及计算

宽带天线采用平板型具有尺寸短小和结构简单及近似二维等优点，但宽带天线设计的关键在于馈电部分的设计，本文采用 Vivaldi 天线，利用同轴—槽线馈电，关键也就在于槽线特征阻抗的计算。

天线几何结构如图 2 所示，包括三部分，平衡匹配段、阻抗转换段、宽带渐变张开段，天线是双面槽线张开而成，槽线阻抗设计成 50 欧姆来实现匹配，张开段用来实现宽带。

对天线也采用了全波分析，主要处理了包括天线喇叭张开线，同轴激励等问题。在天线前段，将天线由矩形端面改为类似槽线结构，更易于实现宽带。采用同轴线馈电时，一般的 Vivaldi 天线由于同轴接头和槽线一臂的并联电容使得难以得出馈电点处的输入阻抗，从而难以实现宽带匹配，而采用压缩源端槽线尺寸则可以大为改善，易于实现低

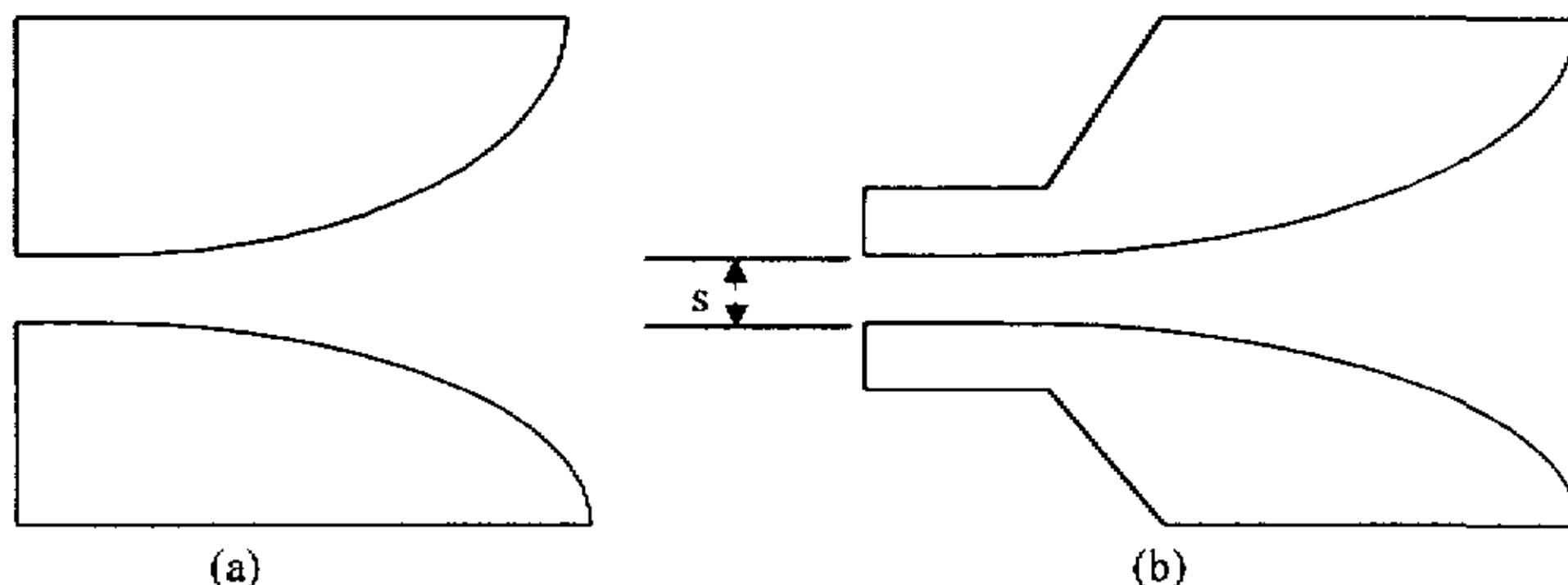


图 2 平板宽带天线结构图 (a) 为 Vivaldi 天线，(b) 为压缩源端后 Vivaldi 的天线(源端为槽线)

段匹配。

3. 计算结果及讨论

以图 1a 单面槽线为例，具体参数如下：

$$s=1.27\text{mm}, t=1.6\text{mm}, \epsilon_r=2.55, w=5\text{mm}-25.4\text{mm}$$

激励源采用高斯脉冲，激励源加在槽线上下金属缝隙之间(第一步仅计算槽线本身特性阻抗，假设其纵向为穷远)，

$$E_z = e^{-(t-t_0)^2/T_0^2}$$

其中 $T_0 = 83 \times 10^{-12} \text{s}$, $t_0=3T_0$

计算结果见图 3 所示，由图可见，本文计算结果同试验结果是比较吻合的，究其原因是由于槽线中传输的并非 TEM 模或准 TEM 模，因此 MOM 结果与试验差别较大；而采用 FDTD 则进行的是全波分析，不需要对其进行近似，采用 FDTD 还可以给出其频变特性，见图 4。(此外还采用商业软件 Serenade 对单面槽线进行了仿真，结果与 FDTD 分析结果是很接近的。)

图 5 为‘三明治’槽线分析结果，同样可以看出本文的结果同实验更为接近。

本文还对双面槽线渐变成 Vivaldi 天线进行了分析(此处采用同轴线激励)，分析包括两部分：槽线的特性阻抗分析和天线的方向图分析，前者保证了天线的宽带，后者确定天线的辐射特性。

图 6 为双面槽线特性阻抗频变特性，图 7 为 Vivaldi 天线的辐射方向图。由图可以看出，方向图带宽约为 4:1，结合实验可以看出采用 FDTD 全波分析方法所得结果是准确和可信的。(注：MOM 和 实验结果参考文献[8])

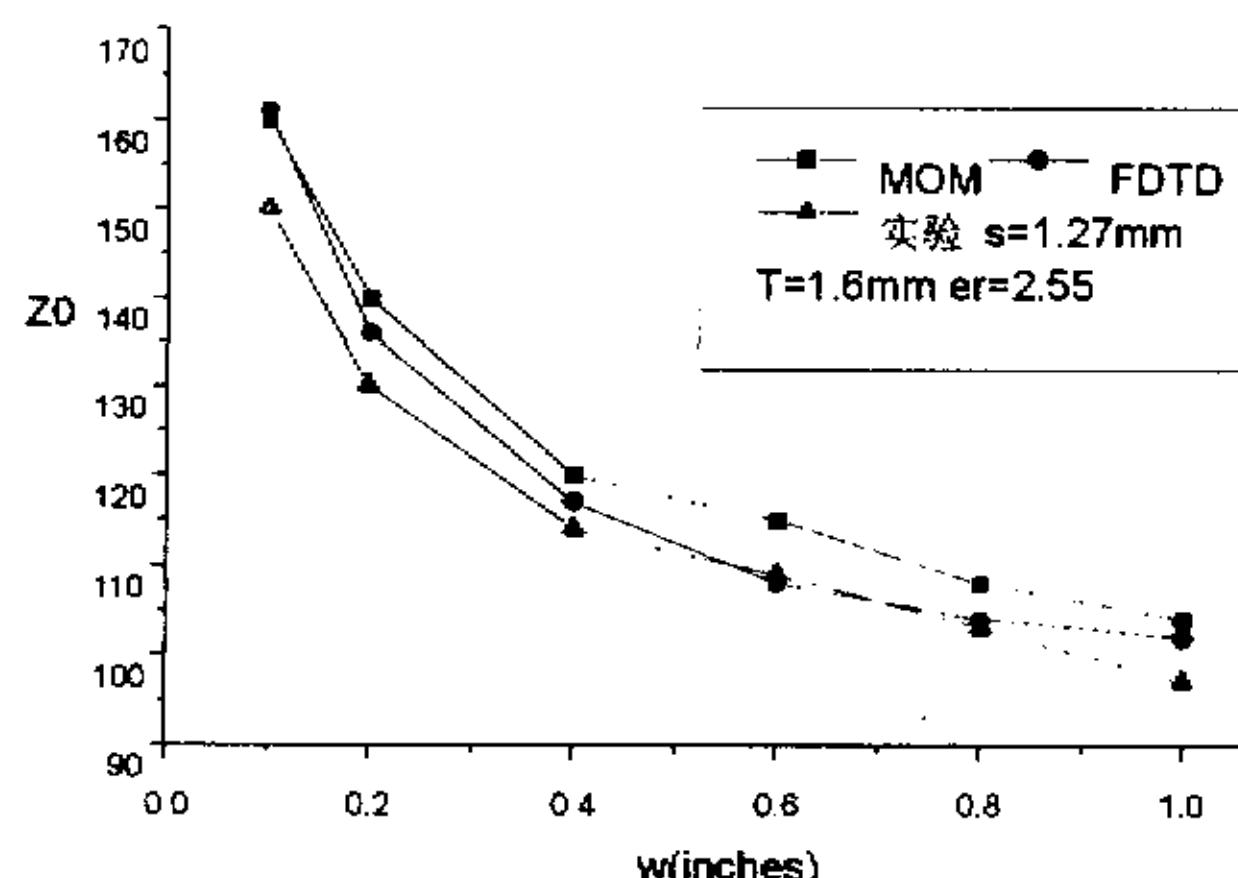


图 3 单面槽线特性阻抗 FDTD、MOM、实验结果对比

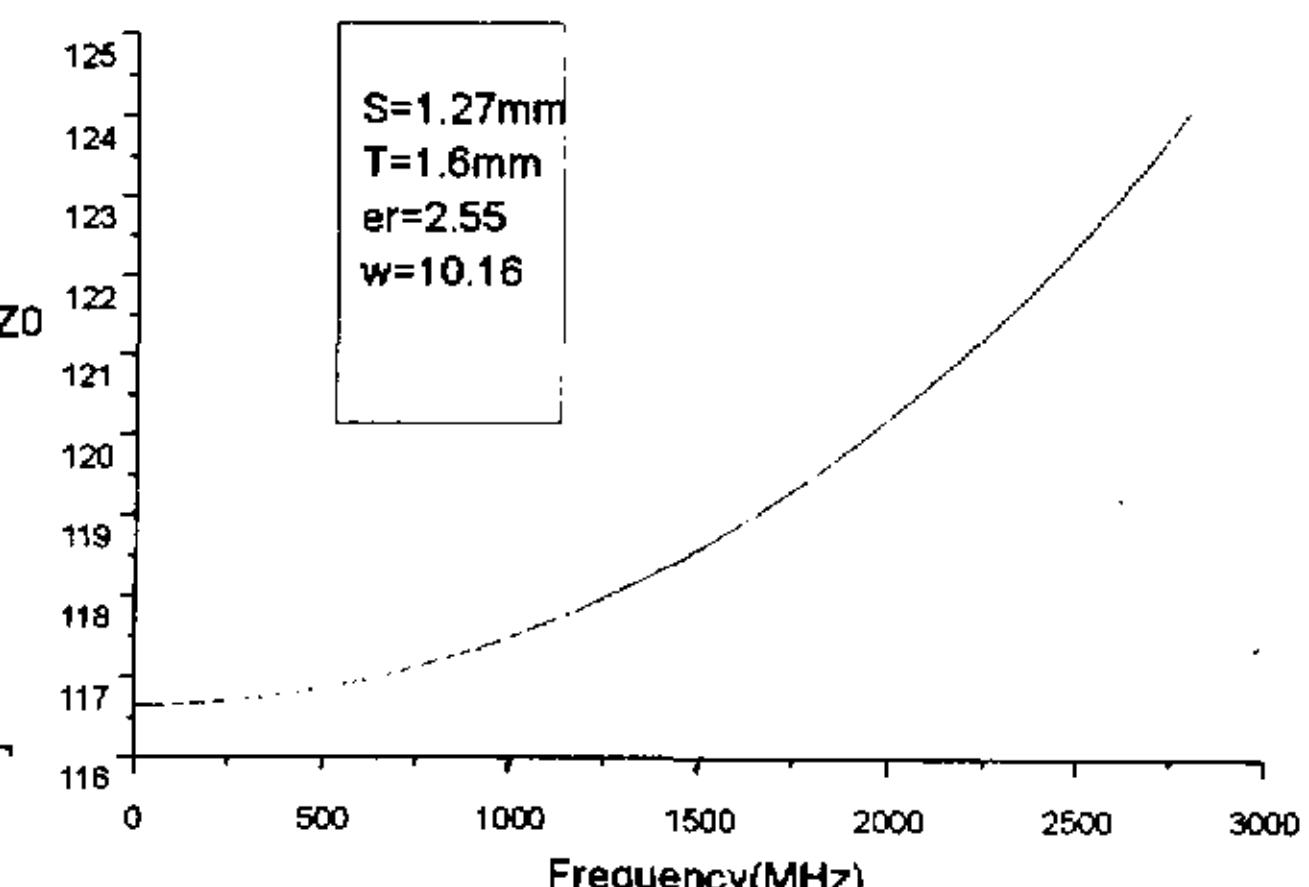


图 4 单面槽线特性阻抗的频变特性

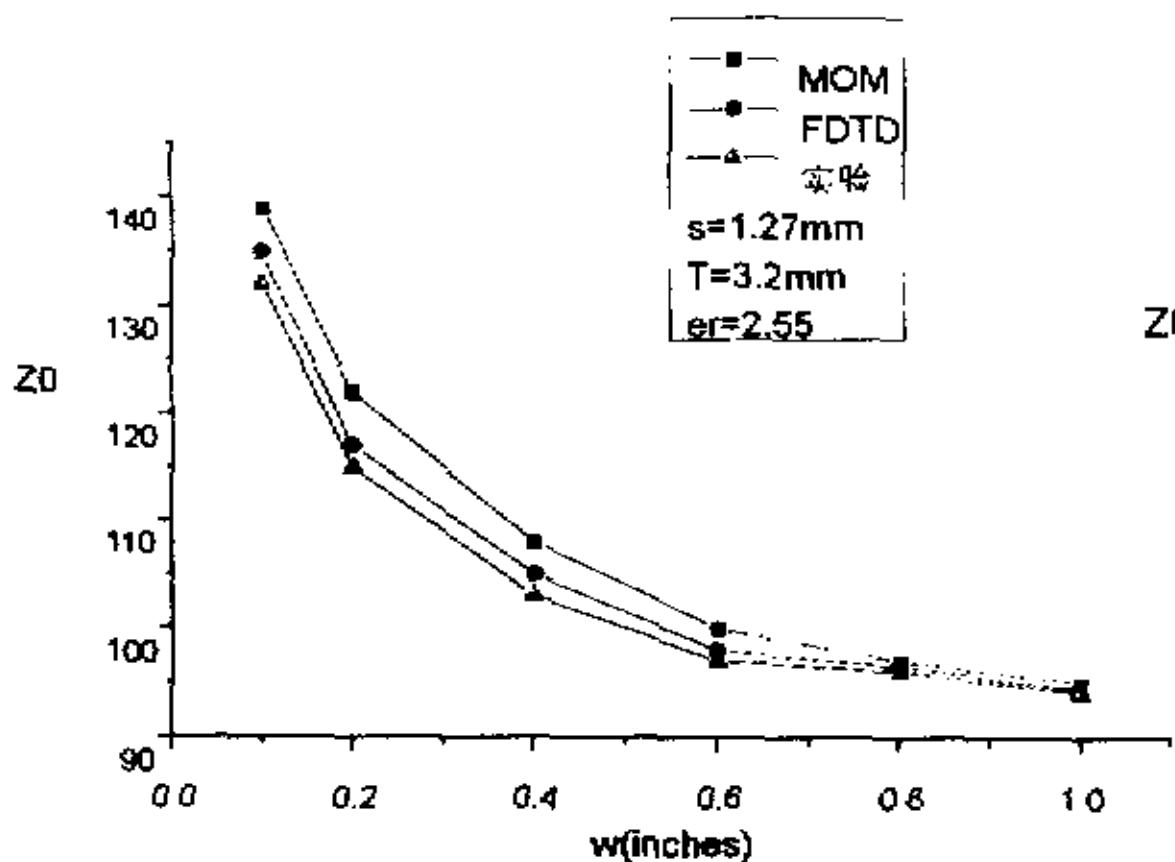


图 5 “三明治”槽线特性阻抗的 FDTD、MOM、实验对比

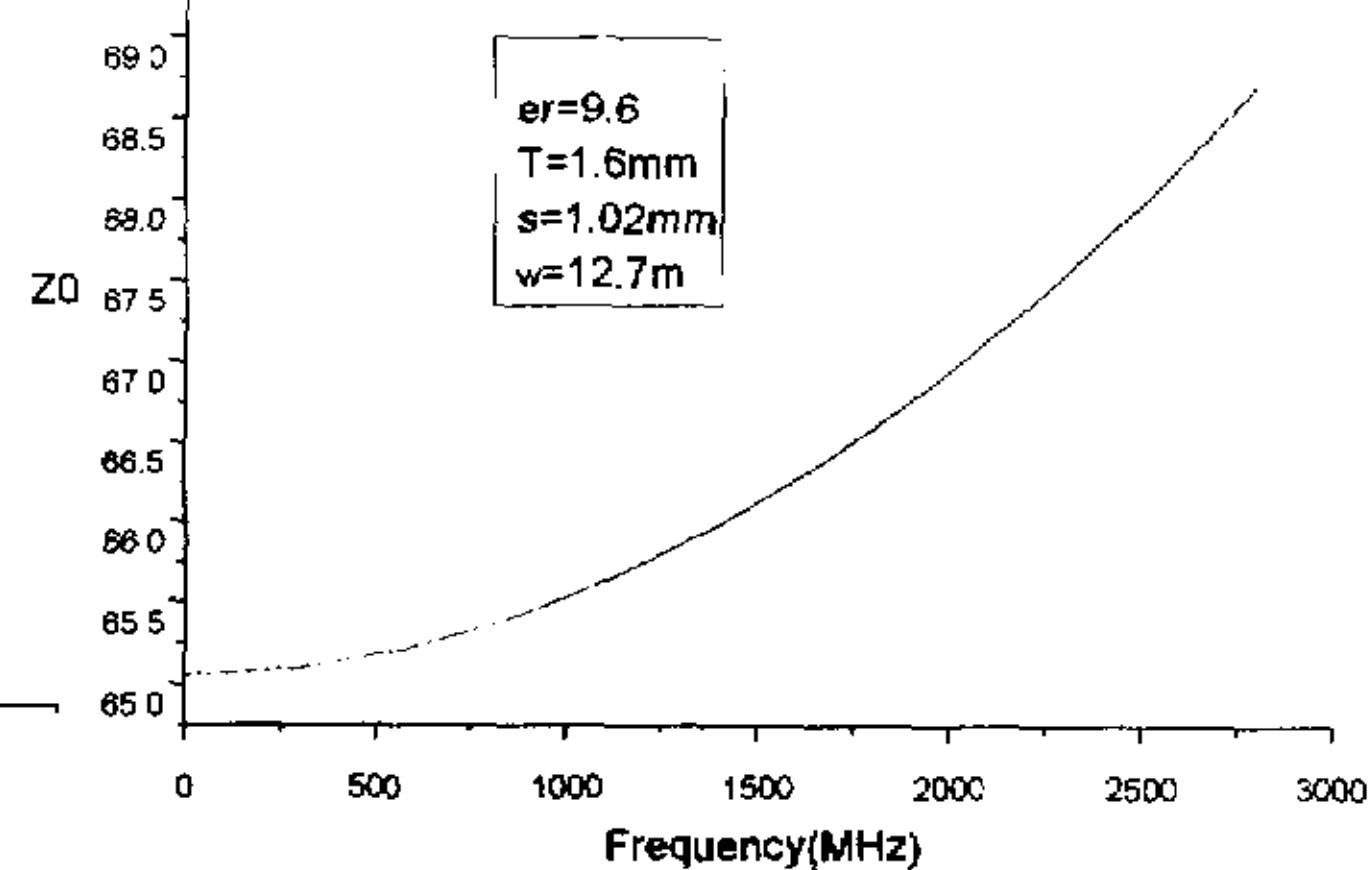


图 6 双面槽线特性阻抗频变特性(变量为槽线的截面宽度)

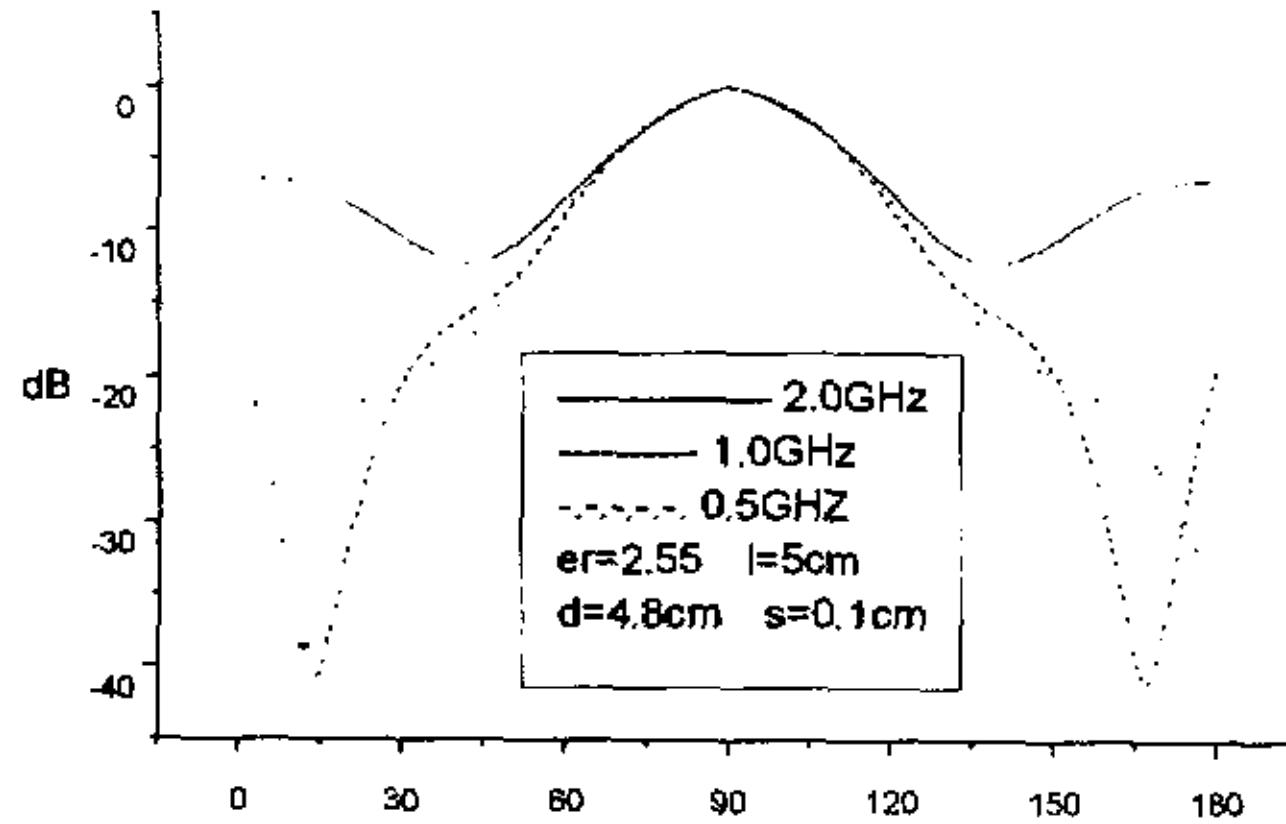


图 7 宽带平板图天线 H 面方向图

4. 结论

本文采用 FDTD 全波解法分析了具有色散特性的不同种类槽线特性阻抗，在此基础上对宽带平板天线的设计进行了分析和计算，结合实验和商业软件验证了该方法的正确性和易操作性，建模简单，适用性广，克服了频域解法的局限性和不准确性。

参考文献

- [1] H.C.Okean, "Properties of a TEM transmission line used in microwave integrated circuit application," IEEE trans. On MTT, pp327-328, May 1967
- [2] S.B.Cohn, "Sandwich slot line," IEEE trans on MTT, p532, 1976
- [3] R.J. and D.H.S., "Dispersion Characteristics for wide slotlines on low-permittivity substrates," IEEE trans on MTT, p723, 1985
- [4] S.B.Cohn, "Slot line on a dielectric substrate," IEEE trans on MTT, p768, 1969
- [5] E.Y., "Parallel-strip line embedded in or printed on a dielectric sheet," IEEE trans on MTT, p972, 1968
- [6] K.S.Y. "Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates," IEEE trans on AP, p1392, 1985
- [7] R.J. and D.H.S., "Characteristic impedance of a wide slotline on low-permittivity substrates," IEEE trans on MTT, p900, 1986
- [8] J.J.Lee, "Slotline Impedance," IEEE trans on MTT, p666, 1991
- [9] 闻润卿, 李英惠。“微波技术基础”, 北京理工大学出版社, 1988。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>