

双极化口径耦合微带天线 FDTD 分析^{*}

Application of FDTD Method to the Analysis of Dual-Polarization Microstrip Antennas

尹家贤 谭怀英 刘克成

(国防科技大学电子工程学院,长沙 410073)

YIN Jiaxian, TAN Huaiying, LIU Kecheng

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha 410073)

【摘要】 本文应用时域有限差分法(FDTD)分析了双极化口径耦合多层微带贴片天线。文中结果表明,FDTD 在分析多层复杂结构的微带天线时是非常有效的。采用 Gauss 脉冲激励,通过 FFT,一次计算就可得到天线谐振频率、耦合、频带宽度、增益等参数的宽频带特性。计算结果对天线的优化设计具有一定的指导作用。

关键词: 双极化微带天线,FDTD,分层介质

Abstract: a direct three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method is applied to the full-wave analysis of dual-polarization aperture-coupled microstrip antenna. FDTD is an efficient tool for analyzing complicated structure microstrip antennas. Using Gauss pulse source excitation, the parameters of antenna, such as resonance frequency, return loss, coupling level, gain, etc. can be obtained by FFT. Computed results are useful for optimal design of antenna.

Key terms: Dual-polarization Microstrip antenna, FDTD, Layered dielectric

一、引言

通信和雷达系统的发展对天线提出了愈来愈高的要求。在通信系统中,为了增加通信容量,要求天线为双极化工作;在雷达系统中,特别是合成孔径雷达(SAR),为了得到目标及环境特征的全极化信息,也要求天线为双极化工作。能够实现双极化工作的天线形式有多种,微带天线由于其馈电网络、辐射元的设计比较灵活,加工制作成本低,便于批量生产等优点,因此,用微带天线实现双极化工作已受到人们的关注^[1,2]。对口径耦合微带天线的分析方法主要有两类:一类是积分方程法,如矩量法、混合位积分方程法、谱域法。这类方法的共同点是需要得到格林函数,但是分层介质、多层导体结构的格林函数非常复杂,而且还存在着索末菲积分问题,使这类方法难以得到准确的数值结果。另一种方法是时域有限差分法(FDTD)。FDTD

采用时间和空间的中心差分对 Maxwell 方程直接离散化^[3], 因此在计算复杂结构的电磁问题时具有非常大的灵活性。采用 Gauss 脉冲激励, 通过 FFT, 一次计算就可得到天线的宽频带特性。双极化微带天线和两个端口耦合问题是设计中的难点。本文利用 FDTD 对双极化微带天线的谐振频率、耦合、频带宽度、增益等问题进行了分析, 计算结果对天线的优化设计具有一定指导作用。

二、分析方法

2.1 双极化微带天线结构

双极化微带天线的结构如图 1 所示。图中最下面部分为微带线, 为防止两个端口的微带线重叠, 微带线的端头作 90°弯; 微带线的接地板上有一对互相垂直的激励缝; 最上层为贴片。

2.2 计算网格设置

双极化微带天线的计算空间设置如图 2 所示。天线完全处于计算空间之中, 计算空间的吸收边界采用理想匹配层吸收边界(PML)^[4], 分为 5 层, 设定的反射系数 $R = 0.01$ 。为了保证介质基片的截断处和微带馈线的截断处无反射, 介质基片和微带馈线必须深入到 PML 中。介质基片的厚度为 0.94mm, 空间步长 $\Delta x = \Delta y = 0.2\text{mm}$, $\Delta z = 0.188\text{mm}$, 这样介质层为 5 个空间步长, 可保证计算精度。

2.3 微带线激励源设置

以往微带线激励源设置方法主要有两种, 一种方法是将激励源平面设在界面上, 并且激励源平面设为电壁^[5], 在微带线与接地平面之间加入强迫激励的 Gauss 脉冲, 而激励面的其余部分切向电场设为 0。由此计算的入射 Gauss 脉冲幅度减小, 且有较大的负值拖尾。另一种方法也将激励源平面设在界面上, 但激励源平面设为磁壁^[6], 并在激励源平面附近使用特殊的场分量迭代。这种方法计算的入射 Gauss 脉冲的失真明显小于前一种方法。由于源平面所在的界面是电壁或磁壁, 从微带不连续性或微带天线产生的反射在源平面要产生二次反射。为消除这种反射, 微带不连续性出现的位置与源平面之间要有足够的距离, 使得在反射脉冲到达源平面之前, 入射的 Gauss 脉冲已完全消失, 这时源平面切换成吸收边界。对于有限时间长度 Gauss 脉冲这一点是可以做到的。但对于正弦波激励时, 由于激励源始终存在, 源平面就无法切换成吸收边界。本文激励源设置采取一种新方法^[7]: 将激励设置划分出来成为一个单独的网格空间(激励空间), 而所研究的微带结构处于另一个网格空间内(微带结构空间)。激励空间的作用是迭代产生微带线入射波场, 然后将这入射波场通过连接面加入到微带结构网格空间中。为使激励空间仅有入射波, 空间两端用 PML 吸收层端接, 并将微带线延伸入 PML 中。对微带结构空间来说, 连接面就是总场、反射场分界面, 它的反射区域终端连接着 PML, 与馈电无关, 不存在二次反射, 这就解决了普通正弦波激励所存在的问题。这种源既可用于脉冲波激励, 也可用于正弦波激励。在计算过程中, 源平面无需切换成吸收边界。

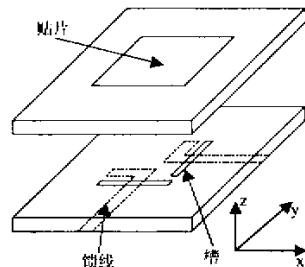


图 1 双极化微带天线示意图

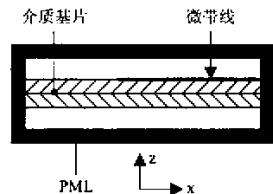


图 2 计算区域

计算天线的谐振频率、耦合、频带宽度时,采用 Gauss 脉冲激励,通过 FFT,一次计算就可得到上述参数的宽频带特性。而计算天线的方向图时,为减少计算机的计算量和存储空间,采用正弦波激励较好。强迫激励的高斯脉冲为:

$$E_z = e^{-(t-t_0)^2/T^2} \quad (1)$$

式中 $t_0=45\text{ps}$, $T=15\text{ps}$ 。

2.4 介质层中 PML 的处理

假设自由空间中 PML 中的电导率为 σ ,磁导率为 σ^* ,则 σ 和 σ^* 满足下列关系:

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \quad (2)$$

而在相对介电常数为 ϵ_r 的介质中的 PML,若要满足与自由空间中同样的反射系数,则其电导率应为 $\epsilon_r\sigma$,磁导率可由下式求得:

$$\sigma^* = \mu_0 \frac{\epsilon_r \sigma}{\epsilon_r \epsilon_0} = \mu_0 \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3)$$

由此可见,介质中 PML 的电导率是自由空间中的 ϵ_r 倍,磁导率保持不变。在 FDTD 的迭代公式中,只要用 $\epsilon_r\sigma$ 代替 σ ,用 $\epsilon_r\epsilon_0$ 代替 ϵ_0 ,就可得到介质中的 PML 迭代公式。

三、计算结果

矩形贴片的尺寸为 $8.2\text{mm} \times 8.2\text{mm}$,缝的中心与贴片边沿的距离为 1mm ,微带馈线的宽度为 1mm ,缝的宽度为 0.4mm ,缝的长度可变,当缝的长度为 5.4mm 时,天线的回波损耗和耦合衰减的频率特性如图 3 所示,天线增益如图 4 所示。当工作频率为谐振频率时,天线主极

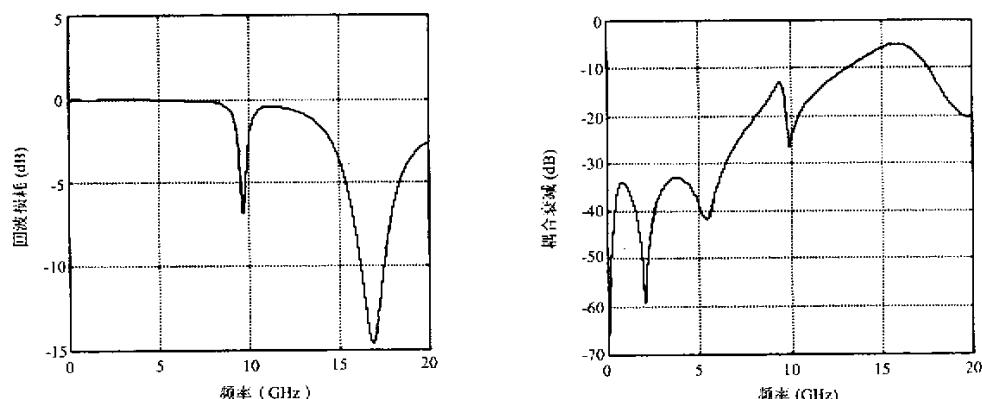


图 3 双极化微带天线回波损耗及耦合衰减

化和交叉极化方向图如图 5 所示。由图中可看出,天线的交叉极化主要是由另一个方向的主模产生,因此交叉极化方向图的形状与主极化相同,最大值的方向也在天线平面的垂直方向。缝的长度变化时,天线的谐振频率、回波损耗、耦合衰减、增益变化情况如表 1 所示。由表中数据得知,当缝的长度缩短时,谐振频率升高,回波损耗加大,但两个极化之间的耦合减小,相应的交叉化分量也减小,而天线的增益变化较小。从回波损耗的角度来说,缝越长越好;而从耦合的

角度来看, 则缝越短越好, 所以需在两者之间作出最佳选择。

表 1 双极化微带天线特性随耦合缝长度的变化情况

耦合缝长度(mm)	谐振频率(GHz)	回波损耗(dB)	耦合衰减(dB)	天线增益(dB)	交叉极化(dB)
5.4	9.68	-6.83	-16.44	6.89	-13.86
5.0	9.77	-4.43	-19.92	6.99	-16.71
4.6	9.82	-2.83	-21.48	6.90	-18.79
4.2	9.87	-1.76	-22.86	6.74	-20.75
3.8	9.92	-1.06	-24.02	6.45	-22.50

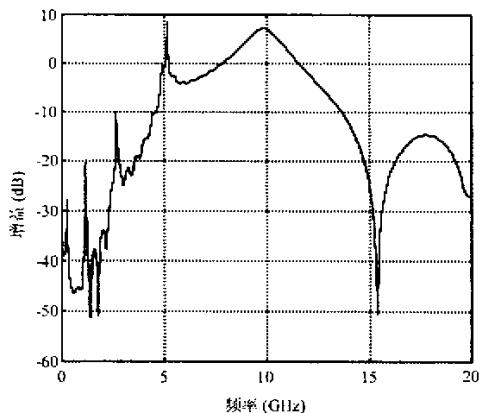


图 4 双极化微带天线增益

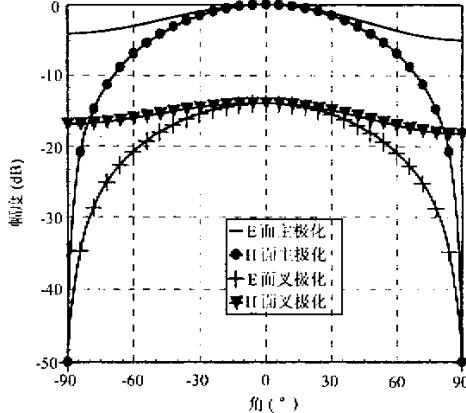


图 5 双极化微带天线方向图

四、实验结果

利用上述的单元计算结果, 设计制作了单端馈电的 18 元双极化微带天线线阵, 耦合缝长度为 5.4mm, 其余尺寸与计算时所用的尺寸一样, 单元间距为一个介质波长, 天线基片材料的相对介电常数为 2.65。图 6 为阵的两种极化馈电端口之间实测的耦合曲线, 线阵的耦合测量结果与单元的耦合计算结果有一些差别, 这主要由于在宽频带内, 阵的两种极化馈电端不可能匹配得很好, 反射波的存在引起了起伏。图 7 为天线两种极化的实测方向图。由于馈电点在线阵的端头, 而微带线是有耗传输线, 靠近馈电点的辐射元电流大, 远离辐射元的电流小, 因此, 天线方向图的零深较高, 实测的

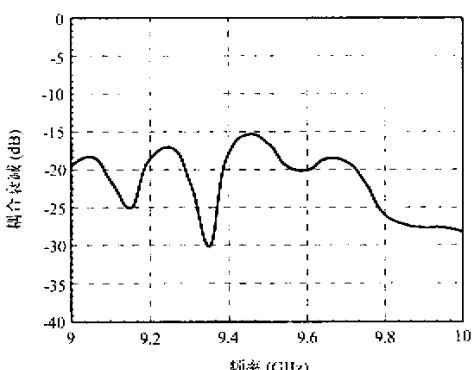
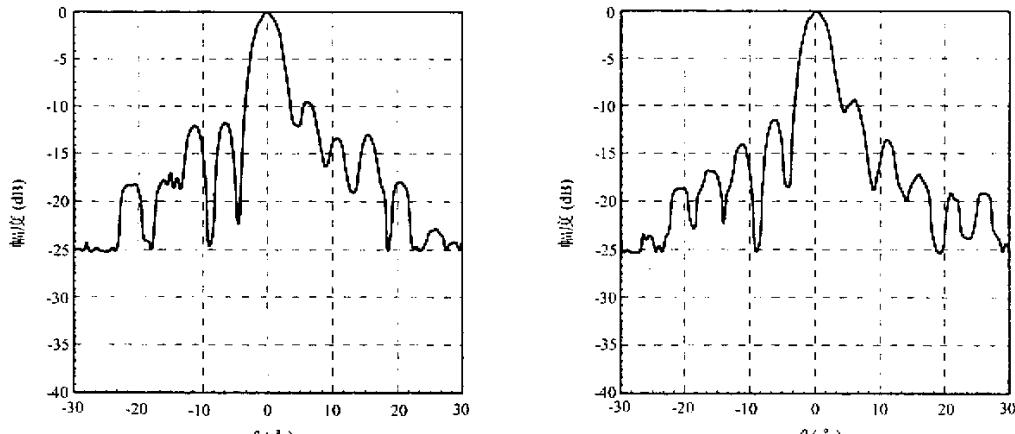


图 6 18 元线阵双极化端口的耦合衰减



(a) 水平极化

(b) 垂直极化

图 7-18 元双极化微带天线阵方向图

方向图符合上述分析,从而也说明上述方法的计算结果是可靠的。

参 考 文 献

- [1] R. Zahn, P. Shutte, H. Braumann, Advanced antenna technologies for X-band SAR. Proc. IEEE, IGARSS'95(3):2060~2062.
 - [2] J. Huang. Dual polarized microstrip array with high isolated and low-cross polarization. Microwave and Optical Technology Letters, 1991, 4(3):99~103.
 - [3] 王长清,祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法. 北京:北京大学出版社,1994.
 - [4] Jean-Pierre Berrenger. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of computational physics, 1996, 127(2):363~379.
 - [5] X. Zhang, K. K. Mei. Time-domain finite difference approach to the calculation of the frequency-dependent characteristics of microstrip discontinuities. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1988, 36(12):1775

~1787.

- [6] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra, J. A. Kong. Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of microstrip circuits. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1990, 38(7): 849~857.

[7] 尹家贤, 谭怀英, 刘克成. FDTD 中微带线激励源设置的新方法. 电波科学学报, 2000, 15(2): 204~207

尹家贤 男,1964年生,1984年和1994年在国防科技大学电子技术系获学士、硕士学位,1998年起在国防科技大学电子工程学院攻读博士学位。现任国防科技大学电子工程学院副教授。研究方向:电磁场数值计算、微带天线的数值计算及工程应用。

刘克成 男,1937年生,国防科技大学电子工程学院教授,中国电子学会高级会员。研究方向:电磁场数值计算、超宽带天馈系统以及目标特性测量等。

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>