

交叉馈电微带全向天线的时域有限差分法分析

党 涛¹ 郑万清¹ 陈妹²

(四川九洲电器集团有限责任公司第一研究所天线室, 四川绵阳 621000)¹ (四川九洲电器集团有限责任公司第一研究所天线室, 四川绵阳 621000)¹ (四川九洲电器集团有限责任公司微波技术研究部, 四川绵阳 621000)²

摘要: 提供了在新航行系统中应用的一种新型交叉馈电微带全向接收天线, 用三维变换方向隐式时域有限差分法(ADI-FDTD)进行仿真。给出了改进的 ADI-FDTD 计算公式便于提高计算效率和精度, 对新算法的稳定性、色散关系以及参数的选取进行了研究。然后用这种方法研究了交叉馈电微带全向天线的电压驻波比和辐射方向图特性, 得到一些有参考价值的结论。

关键词: 交叉馈电微带全向天线, 时域有限差分方法, 各向异性系数, 数值色散

Analysis of Cross-feed Omni-directional Patch Antenna Using Finite-Difference Time-Domain Algorithm

Dang Tao¹ Zheng Wanqing¹ Chen Mei²

(Institute No. 1, Jiuzhou Electric Group Limited Corporation, Sichuan Mianyang 621000)¹

(Institute No. 1, Jiuzhou Electric Group Limited Corporation, Sichuan Mianyang 621000)¹

(Microwave research Institute , Jiuzhou Electric Group Limited Corporation, Sichuan Mianyang 621000)²

Abstract: A novel Cross-feed Omni-directional Patch antenna used in new navigation system is presented in this paper. The three-dimensional alternating-direction implicit finite-difference time-domain (ADI-FDTD) method is applied to simulating the complex structure. Modified ADI-FDTD equations have been proposed so that the computational efficiency and precision can be increased. Then the stability, dispersive relation, and selection of additional parameters of the proposed algorithm have been studied. Finally, using the new method, voltage standing wave ratio, and radiation pattern of the patch antenna have been calculated, some characteristics of the antenna are discussed, and significant results are obtained.

Keywords: Cross-feed Omni-directional Patch antenna; finite-difference time-domain method; anisotropic coefficient; numerical dispersive

1 引言

新型航行系统的迅速发展对天线提出了许多新的研究方向, 促使许多新型天线的诞生。对于其配套的地面全向接收天线, 要求天线有尽可能小的体积、简便的安装方式和优越的接收性能。单极子天线结构简单, 但是辐射效率受到限制, 且需要配合接地面才能有效工作。微带天线由于其物理性能方面具有的许多突出优点而被广泛使用, 本文给出了一种新型交叉馈电微带全向天线, 其实现形式简单,

性能稳定, 在新航行系统中受到了广泛应用。

因为一个天线系统的设计和实验将是一项很复杂、耗费巨大的工作, 进行重复的实验是不现实的, 但是进行精确的数值仿真则可以为实际设计提供合理的参考。目前在天线数值计算中应用较多的是矩量法[1]、有限元法[2]和时域有限差分法(FDTD)[3], 而且这些方法被认为是成功的。特别是 FDTD 的提出是当代计算电磁学的一项重大突破, 它在时域内直接求解 Maxwell 方程, 能够很好地再现波动的全过程, 具有很好的稳定性和收敛性。因而在工程电磁学各个领域倍受重视, 对分析和设计复杂结构天

线具有重要意义。但是，在分析微带天线等复杂结构时，需要对计算网格进行更细致的划分，这就需要占用很多的计算机资源。

本文以分析新航行系统中的交叉馈电微带全向接收天线为目的，对变换方向隐式(ADI)的 FDTD[4]给出了一种改进方法，即通过添加各向异性参数来修正相速度误差，从而减少数值色散，有效提高了 ADI-FDTD 方法的计算精度和效率。采用这种改进的 ADI-FDTD 方法，研究了交叉微带全向天线的电压驻波比和辐射方向图等天线参数，得出了对设计这类天线有参考价值的结论。计算过程表明，在保证计算精度的前提下，有效地减少了计算机资源的占用。

2 交叉馈电微带全向天线的分析模型

交叉馈电微带全向天线如图 1 所示，振子采用印刷对称结构以最大限度减小其所占的体积。这种天线单元采用平行双线馈电方式，通过内外导体对天线正反面振子交叉馈电，实现相位差 180° ，达到了平衡馈电的目的。通过调整振子的高度为 L_1 ，宽度为 L_2 ， W_2 ，及馈电带线宽度 W_1 实现与外接 50 欧姆同轴线相匹配，同时便于调节辐射电阻。

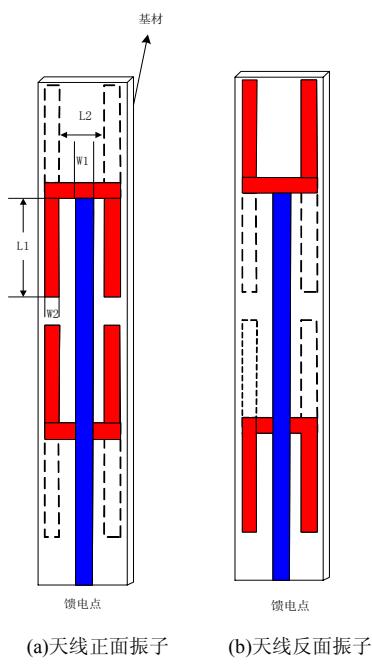


图 1 交叉馈电微带全向天线

采用 ADI-FDTD 方法仿真时，本文激励源设置采取一种新方法：将激励设置划分出来成为一个单

• 198 •

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场，然后将这种入射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，空间两端用理想匹配层(PML)吸收层[5]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。这种激励源既可用脉冲波激励，又可用正弦波激励，在计算过程中，源所在平面无需切换成吸收边界。计算天线的谐振频率、耦合频带宽度时，采用 Gauss 脉冲激励，通过快速傅立叶变换，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，则采用正弦波激励。

3 ADI-FDTD 算法的改进

Maxwell 旋度方程为：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t - \mathbf{J}_m \quad (1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J}_e \quad (1b)$$

在三维各向同性介质中，介电常数 ϵ_r 和 μ_r 分别乘以各向异性参数 $\bar{\epsilon} = \text{diag} [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]$ 和 $\bar{\mu} = \text{diag} [\mu_x, \mu_y, \mu_z]$ ，这些添加的参数与电磁场各分量对应。不失一般性，这里假设 $\bar{\epsilon} = \bar{\mu}$ 。于是，T. Namiki 的 ADI-FDTD 迭代公式[6]表达为：

过程一：

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} = C_e E_x|_{i+1/2,j,k}^n + D_e \left(\frac{\partial H_z}{\epsilon_x \partial y}|_{i+1/2,j,k}^n - \frac{\partial H_y}{\epsilon_x \partial z}|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \quad (2a)$$

$$H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} = C_h H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - D_h \left(\frac{\partial E_z}{\epsilon_x \partial y}|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{\partial E_y}{\epsilon_x \partial z}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \quad (2b)$$

过程二：

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = C_e E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2}$$

$$+ D_e \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \quad (3a)$$

$$H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} = C_h H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \\ - D_h \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} \right) \quad (3b)$$

其中

$$C_e = \frac{2\epsilon_0\epsilon_r - \sigma_e\Delta t}{4\epsilon_0\epsilon_r + \sigma_e\Delta t}, \quad D_e = \frac{2\Delta t}{4\epsilon_0\epsilon_r + \sigma_e\Delta t},$$

$$C_h = \frac{2\mu_0\mu_r - \sigma_m\Delta t}{4\mu_0\mu_r + \sigma_m\Delta t}, \quad D_h = \frac{2\Delta t}{4\mu_0\mu_r + \sigma_m\Delta t}.$$

式中 ϵ_x 为人为添加的计算参数，与媒质无关。

为了节省篇幅，在(2)和(3)中，其余四个电磁场分量 E_y 、 E_z 、 H_y 和 H_z 因形式与(2)和(3)类似，这里没有给出。不失一般性，利用二维 TE 波可以证明添加参数不影响 ADI-FDTD 的计算稳定性。设二维 TE 波的本征模

$$E_{x,y} = E_{x0,y0}\zeta_1 \exp\{-j(k_x x + k_y y)\} \quad (4a)$$

$$H_z = H_{z0}\zeta_1 \exp\{-j(k_x x + k_y y)\}. \quad (4b)$$

带入(2)得到本征模方程的解

$$p\zeta_1^2 - 2\zeta_1 + q = 0 \quad (5)$$

其中

$$p = 1 + \left(\frac{\Delta t}{\sqrt{\mu\epsilon\epsilon_y}\Delta x} \right)^2 \sin^2\left(\frac{k_x\Delta x}{2}\right),$$

$$q = 1 + \left(\frac{\Delta t}{\sqrt{\mu\epsilon\epsilon_x}\Delta y} \right)^2 \sin^2\left(\frac{k_y\Delta y}{2}\right).$$

这里 $\mu = \mu_0\mu_r$, $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ 。因 ϵx 为正数，由(5)式可得

$$\zeta_1 = (1 \pm j\sqrt{pq-1})/p, \quad (6a)$$

按照相同办法，由(3)和(4)可以得出

$$\zeta_2 = (1 \pm j\sqrt{pq-1})/q, \quad (6b)$$

进而得到

$$|\zeta_1| \cdot |\zeta_2| = 1. \quad (7)$$

可见增加各向异性参数并不改变 ADI-FDTD 算法的稳定性。

4 计算结果及其分析

如图 1 所示的天线，选取基材 $\epsilon r=2.7$ ，厚度 1mm，当 $L1=59mm$, $L2=7.6mm$, $W2=0.7mm$, $W1=0.85mm$ 。其天线在端口及辐射特性上均达到适用要求。

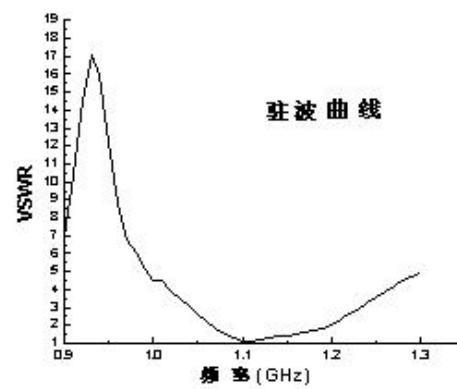


图 2 天线的驻波曲线

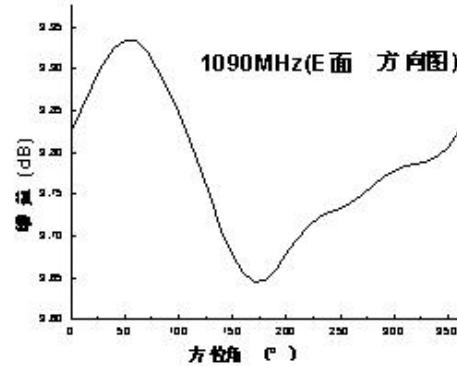


图 3 天线 E 面方向图

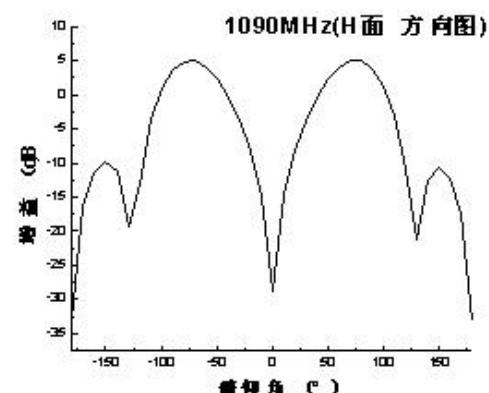


图 4 天线 H 面方向图

可见该天线虽然在 1100MHz 完全匹配，但是在

航管频段(1090MHz接收)仍具有很好的驻波特性,在辐射特性上,其E面具有非常好的全向特性。在工程应用中,可以根据实际测试结果对天线的尺寸进行微调以达到更佳的性能。

5 结论

如果利用传统的FDTD方法,对交叉馈电微带

参 考 文 献

- [1] PSYCHOUDAKIS D, KOH Y H, VOLAKIS J L, and HALLORAN J H. Design method for aperture- coupled microstrip patch antennas on textured dielectric substrates [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2763-2766.
- [2] JIN J M, VOLAKIS J L. A hybrid finite element method for scattering and radiation by microstrip patch antennas and arrays residing in a cavity [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1991, 39(11): 1598-1604.
- [3] 葛德彪, 闫玉波.电磁波时域有限差分方法[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [4] ZHENG F, CHEN Z, and ZHANG J. A finite- difference time-domain method without the Courant stability conditions [J]. Microwave and Guided Wave Letters. 1999, 9(11): 441-443.
- [5] Roden J A, Gedney S D. Efficient implementation of the uniaxial based PML media in three-dimensional nonorthogonal coordinates with the use of the FDTD technique [J]. Microwave and Optical Technology Letters. 1997, 14(2): 71-75.

作者简介:

党涛,男,四川乐山人,工程师,研究方向为天线仿真及设计;

郑万清,男,四川宜宾人,助理工程师,研究方向为天线仿真及设计。

全向天线进行仿真,实现起来比较困难。因为内部的细微结构使得精确建模和高效计算难以实现。采用本文介绍的改进算法,完全克服了上述困难。用这种改进算法研究了交叉馈电微带全向天线,结果表明:该天线在航管频段具有良好的电性能。根据应用需要,可以适当增加辐射单元数目以增加天线增益,压窄俯仰面波束宽度,具有很好的推广性。

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>