

文章编号 1005-0388(2002)03-0300-04

平板宽带单极与偶极天线的全波分析^{*}

王宏建¹ 高本庆¹ 范 斌² 刘瑞祥¹

(1. 北京理工大学电子工程系, 北京 100081; 2. 航空工业总公司 613 所光电部, 河南 洛阳 471009)

摘 要 采用时域有限差分法(FDTD)计算圆盘天线及宽带变形 vivaldi 天线的输入阻抗及方向图。利用镜像原理得到三角形单极、圆盘单极天线的输入阻抗。采取激励源区的准静态模型在保证精度的同时又无须将复杂的具体馈电结构建模, 三角形单极天线和圆盘单极天线的计算结果与有关文献的比较验证了该方法具有准确、实用性强等优点。对宽带变形 vivaldi 天线 FDTD 分析得到电流分布及输入阻抗, 经傅立叶变换由近场值得到天线远场方向图, 结果表明变形 vivaldi 天线具有输入阻抗和方向图的宽带特性。

关键词 输入阻抗, 方向图, 时域有限差分法, 宽带天线

中图分类号 TN820.1+2

文献标识码 B

Full wave analysis of the wide band monopole and dipole antennas

WANG Hong-jian¹ GAO Ben-qing¹ FAN Bin² LIU Rui-xiang¹

(1. Dept of Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Dept of Optical and Electronics, No. 613 Inst. of National Aerospace cooperation, Luoyang Henan 471009, China)

Abstract Finite Difference Time Domain (FDTD) was used to analysis the input impedances and patterns of the wide band circular disc antennas and the modified vivaldi antennas in the paper. The principle of mirror was applied to acquire the impedance of the trilateral and circular disc monopole with large ground plane, which otherwise was onerous for simulation due to the limited resource of the computer. The pattern of the antennas can be obtained by the fourier transformation of the near field value. The field in the source region can be treated by the quasi-static model for calculation. The results of the trilateral and circular disc monopole verified the feasibility of this method. A modified vivaldi antenna was proposed and the simulation confirms the wider band performance both in impedance and pattern.

Key words impedance, pattern, FDTD, wide band antenna

1 引 言

随着时域测量的发展,对超宽带天线的需要越来越迫切,双锥天线是极少数能用求解电磁场边值问题得出解析解的天线之一,然而由于不易架设等缺点限制了它的应用;此外有较宽频带的平板天线还有圆形平板、椭圆形平板天线^[1]和正方形平板^[2]天线,这类天线具有结构简单容易制作和相当宽的

带宽(3:1到10:1)。在工程中应用相当多的还有偶极子天线及其变形的平面偶极子天线和单极子天线,三角形偶极子天线具有超宽带特性更能满足工程需要^[3]。本文以变形 vivaldi^[4]天线、圆盘天线、三角形偶极天线为对象进行研究。对于圆盘天线和变形 vivaldi 天线可以采用等效偶极辐射来处理。然而理论分析十分复杂,这是由于天线表面复杂的边界条件所决定的。矩量法对于规则结构天线的计算具

有快速准确的优点,但对于不规则结构则不如时域有限差分法灵活。时域有限差分法^[5]尤其适合计算天线及其他结构的宽带特性,通过一次计算得到天线的频域特性。方向图和输入阻抗是天线的两个重要指标,时域有限差分法对天线方向图的计算已比较成熟,但对于输入阻抗这一重要参数计算的方法却并不多,计算输入阻抗的FDTD方法主要有三种。第一种已知馈线特征阻抗,计算天线散射参数,反演出天线的输入阻抗;第二种用FDTD网格精确模拟天线馈电结构;第三种用 δ -源激励模型或同轴磁流环激励模型,直接用经过傅立叶变换后的电压比电流得到天线的输入阻抗。其中第二种方法最为精确,但馈电结构复杂,且建模不具有普适性;第一种沿用微波电路的计算方法,但馈线特征阻抗的计算本身仍需计及复杂结构;第三种最为简单,但由于不能精确反应馈源部分场分布,所以精度稍差。文献[6]将准静态模型引入单极天线输入阻抗的计算,并得到较为准确的结果,本文将准静态模型简化,结合偶极天线和单极天线的特性,利用镜像原理方便的获得天线输入阻抗等参数,同时保证计算得准确性。

2 源等效模型

2.1 单极天线模型

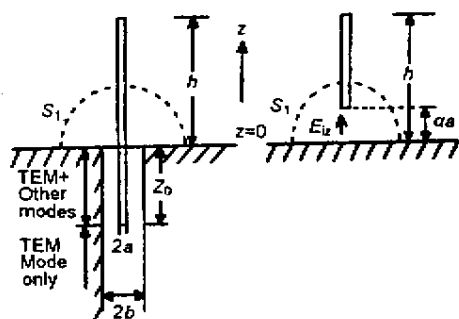
准静态模型^[6]可以较为准确地反映实际馈电结构,应用该模型得到馈电部分分布电容,更能体现出不同频率下天线输入阻抗等参数特性。当馈源部分结构很小时,可以将馈源结构场分布等效为静态场,只不过是时谐静态场,以 $e^{j\omega t}$ 变化,然而由于要进行馈电处分布电容的复杂计算,计算表明分布电容只对阻抗虚部准确性改善较大,并且只对馈电线较粗时有较大影响。图1所示为同轴馈电天线的馈电结构,激励区等效场分布为:

$$E_{iz} = \frac{v(t)}{\alpha a} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi z}{\alpha a}\right) \right) \quad (1)$$

$$\alpha = 2.18 \left(\frac{b}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

其中 $v(t)$ 为高斯源, a 、 b 为同轴线内、外导体半径。但式(1)~(2)只是说明了实际计算电压的积分区间,事实上这里采用的是电压源模型,取临近网格电流乘积后开方的办法得到电流项。

采用基本FDTD计算公式对电场和磁场积分得到电压和电流表达式,由于计算输入阻抗时,频域解对时域中激励源加入时刻十分敏感,应将激励源推迟 $\Delta t/2$,反映在计算公式里为输入导纳



(a) 实际结构 (b) 等效模型

图1 同轴馈电单极子天线激励源区结构图

$$Y_{in} = \frac{I_{in}}{V_{in}} \exp(j\pi f \Delta t) + j2\pi f \alpha(z) \quad (3)$$

其中 V_{in} 为电场积分, I_{in} 为 $z = \alpha a$ 处磁场环绕积分, $\alpha(z)$ 为分布电容,表达式见文献[6]。

2.2 偶极天线馈电模型

虽然采用准静态模型可以得到单极天线输入阻抗较为准确的解,然而由于分布电容计算十分繁琐,况且分布电容对计算结果影响只限于电纳,再加上偶极天线馈电区结构不同于单极天线,因此准静态模型不能简单套用。

对于偶极天线在激励区源仍采用(1)式表示,但输入阻抗的计算仍采用传统的电压比电流来获得,即:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \exp(-j\pi f \Delta t) \quad (4)$$

需要指出的是在式(4)未包含分布电容的影响,除了上面所述原因外,分布电容对较细内径的同轴线影响不大。

3 运用镜像原理和FDTD计算对称结构天线的输入阻抗

由于一般单极天线的接地板相对于天线本身,电尺寸很大,采用FDTD模拟整个天线会带来很大困难,同时对计算机资源也是极大的浪费。

由电动力学基本原理可知,无限大理想导体地面($\sigma = \infty$)对其天线的作用相当于用一位于地面下对称位置的天线像来代替地面的影响。位于理想导体地面上单极天线方向图相当于位于自由空间长度为其二倍的偶极天线方向图;而单极天线的输入阻抗是对应偶极天线的一半。

事实上,当接地面尺寸远大于天线尺寸时可以

认为接地面为无穷大,这样通过计算具有对称结构的偶极天线的输入阻抗得到单极天线的输入阻抗。

4 偶极天线的 FDTD 分析

4.1 天线电流的 FDTD 分析

可以通过对天线表面环绕磁场线积分来获得天线的表面电流^[5],见 2.1 节。由安培定律得到:

$$\oint_l \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = H_x(i, j - \frac{1}{2}, k) \Delta x + H_y(i + \frac{1}{2}, j, k) \Delta y - H_x(i, j + \frac{1}{2}, k) \Delta x - H_y(i - \frac{1}{2}, j, k) \Delta y \quad (5)$$

对于圆盘天线和变形 vivaldi 天线都可以采用该方法来处理,由傅立叶变换得到其频率特性。

三角偶极子天线的表面电流是沿纵轴分布,事实上由于对称结构,三角偶极子天线轴向两边电流幅度相等,流向相反,FDTD 分析验证了这一点。

4.2 天线的方向图分析

由 FDTD 分析得到天线近场值,经时域近场-远场变换得到天线远场方向图。采用格林定理所得时域近-远场变换公式为:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}, t) = \frac{-1}{2\pi Rc} \frac{\partial}{\partial t} \oint_s \hat{\boldsymbol{r}} \times [\hat{\boldsymbol{n}} \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}', t + \frac{\boldsymbol{r}' \cdot \hat{\boldsymbol{r}}}{c} - \frac{R}{c})] dS' (\boldsymbol{r} \rightarrow \infty) \quad (6)$$

5 计算结果及分析

5.1 圆盘单极天线三角形单极天线

采用镜像原理计算所得偶极圆盘天线的输入阻抗及单极圆盘的驻波系数如图 2、3 所示,圆盘结构数据同有关文献完全一致(直径为 50mm,厚度 1mm),只是将单极子天线改为偶极子天线,去掉中间大的接地板,所得输入阻抗为实际圆盘单极天线的两倍,在计算驻波系数时需加以换算。可以看出驻波系数计算值同实验值^[1]是非常接近的,基本都达到了 10:1 的阻抗带宽。同样采用镜像原理并经换算所得三角形单极天线输入阻抗如图 4 所示,计算值同实验^[7]的吻合也相当好。因此,采用镜像原理将不易仿真的单极接地天线转化为偶极天线计算是可行的。

5.2 变形 vivaldi 天线

vivaldi 天线自从问世以来在宽频领域得到广泛应用,本文设计的 vivaldi 天线结构图见图 5 所示,天线本身由导电性能优良的金属材料构成,偶极四臂成指数率张开,在天线的尖顶部上和下部接上不同的平滑过渡段,从而有效地展宽带宽。所得变形 vivaldi 天线(宽 54 mm,单臂高 30mm,厚度 1mm)的输入阻抗及方向图分别见图 6 和图 7 所示。对照图 2、图 4 可以看出,虽然三角形偶极天线也属于带宽天线,然而其低频段阻抗起伏过大,造成低频段驻波系数增高,而圆盘天线则在高频段驻波系数过高^[1]。变形 vivaldi 天线的带宽也最宽,采取合适的馈电接头输入阻抗带宽可达到 14:1,方向图带宽可达到 7.5:1,而圆盘单极天线的方向图带宽为 4.5:1^[1]。同样由以上分析可知,变形 vivaldi 单极接地天线输入阻抗也可由镜像原理得到。

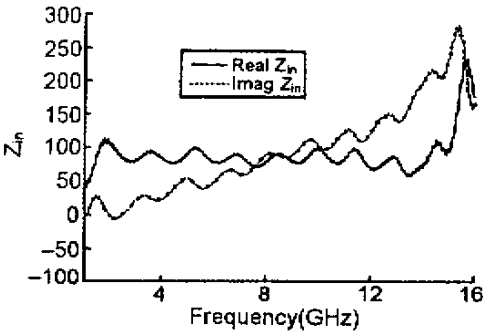


图 2 圆盘偶极天线输入阻抗随频率变化关系

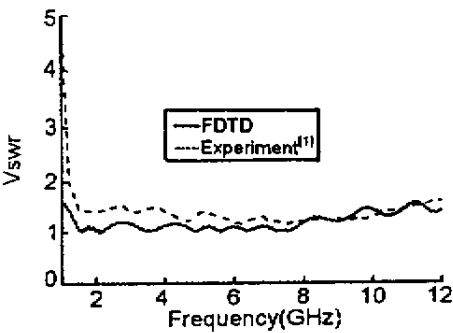


图 3 圆盘单极天线驻波系数随频率变化关系

6 结论

单极天线由于结构简单应用较广,然而当接地面较大时,由于计算机资源的限制不易对其进行仿真,需要多次实验才能确定结构参数,但采用简单的镜像原理,可将单极天线输入阻抗计算转化为偶极

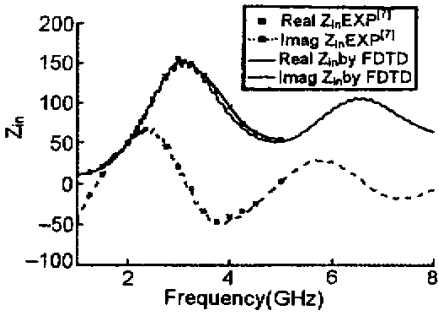
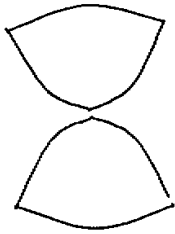


图 4 三角形单极天线阻抗随频率变化关系



变形 vivaldi 天线结构示意图

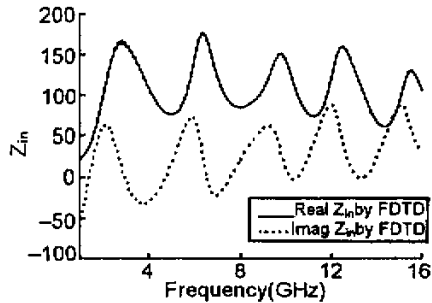


图 6 变形 vival 偶极天线阻抗随频率变化关系

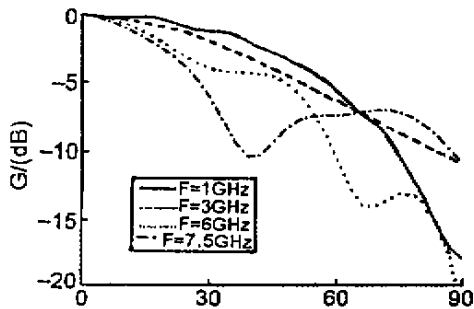


图 7 变形 vival 偶极天线方向图

天线的计算。圆盘单极天线和三角形单极天线的实例验证了镜像原理在输入阻抗计算的可行性。采用准静态模型对激励源区的场结构进行准确模拟,改善了计算精度。计算结果同有关文献的比较验证了该方法不仅简单,而且准确、适用性广。对基于 vi-

valdi 天线和圆锥天线的宽带变形偶极 vivaldi 天线的仿真表明该天线的传输特性比圆盘单极天线和三角形单极天线都有较大提高,输入阻抗带宽可达到 14:1,方向图带宽可达到 7.5:1,是一种结构简单易架设的宽带平板天线,不仅可以用作辐射器和接收器,同时也是一种典型的 ECM 天线形式。

参考文献

[1] Agrawal N P ,Kumar G ,Ray K P. Wide-band planar monopole antennas[J]. IEEE trans AP ,1998 46(2) :294 ~ 295.

[2] Ammann M J. Impedance bandwidth of the square planar monopole[J]. Microwave and Optical Technology Letters , 2000 24(3) :185 ~ 187.

[3] 王元坤,李玉权.线天线的宽频带技术[M].西安电子科技大学出版社,1995.

[4] Langley J D S Hall P S Newham P. Novelultrawidebandwidth vivaldi antenna with low crosspolarization[J].Electron. Lett. ,1993 29(28) :2004 ~ 2005.

[5] 高本庆.时域有限差分法 FDTD Method[M].国防工业出版社,1995.

[6] Liu Gang ,Grimes C A. A quasistatic FDTD source model for coaxially driven monopole antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters , 2000 26(1) :30 ~ 34.

[7] Brown H G ,Jr. Woodward O M. Experimentally determined radiation characteristics of conical and triangular antennas [J].RCA Rev. ,1952 ,13(3) :425 ~ 452.



王宏建 (1969-) ,男,河南人,现为北京理工大学电子工程系博士生,主要研究方向为天线分析与设计,电磁场数值计算。

高本庆 (1936-) ,男,安徽人,1959 年毕业于北京工业学院电子工程系,现为北京理工大学教授,博士生导师,中国电子学会会士,IEEE 高级会员。近期科研工作涉及毫米波技术、计算电磁学、电磁兼容与生物电磁学等。

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，一直致力和专注于微波、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>