

矩形波导斜切口面辐射特性的 FDTD 分析

高文军, 吕善伟

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 应用时域有限差分 (FDTD) 法, 结合时域近场-远场转换公式, 分析矩形波导斜切口面的辐射特性. 分析的斜切口面是把矩形波导管两个窄边同时渐削, 宽边尺寸保持不变形成的辐射口面. 应用 FDTD 法分析, 较精确地解决了波导边缘的绕射问题. 计算了主模激励时主面辐射方向图, 与实验结果基本吻合. 本文为这种波导斜切口面天线的分析设计提供了一种较精确、方便有效的方法.

关键词: 口面天线; FDTD; 波导; 天线方向图

中图分类号: TN823; TM15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1912-02

Analysis of an Inclined Aperture Antenna Based on an Open-Ended Rectangular Waveguide Using FDTD Method

GAO Wen-jun, LYU Shan-wei

(Dept of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An inclined aperture antenna based on an open-ended rectangular waveguide was analyzed using FDTD method in conjunction with the time-domain near zone to far zone transformation. The antenna is tapered at the opening on both narrow sides of a rectangular waveguide, while the wide sides are maintained. The diffraction field of the fringe is calculated using FDTD and the field pattern excited by the dominant mode is validated.

Key words: aperture antenna; FDTD; waveguide; antenna pattern

1 引言

波导终端斜切口面作为一种天线, 特别适合高速飞行器使用, 不仅容易实现共形安装, 而且能够使波束展宽、倾斜, 并可通过调节倾角来改善驻波比特性. 本文讨论的矩形波导斜切口面是把矩形波导管两个窄边同时渐削, 宽边尺寸保持不变形成的辐射口面. 文献[1]分析这种口面的辐射方向图时, 假定口面场是波导中 TE_{10} 模的延续, 并假设该口面嵌在无限大导体平面上, 显然, 这种方法得到的是近似结果, 在波束主方向上有可参考性, 而不能计算有限接地板上口面后半空间的辐射特性. 由于辐射口的渐变, 较精确分析波导斜切口面上场的分布特性比较困难. 而 FDTD 的优点之一是能够用来分析具有复杂结构的电磁场问题, 包括用来计算复杂结构天线的辐射方向图.

本文应用 FDTD 方法分析矩形波导斜切口面的辐射特性, 结合时域近场-远场转换公式^[2,3], 只经过一次计算, 就可以得到天线的宽频带特性. 计算中, 分析实际模型, 自动计及波导边缘的绕射场, 采用正交非均匀网格划分, 在斜切口面边缘采用阶梯近似. 主模激励时得到的主面辐射方向图与实验结果基本吻合.

2 矩形波导斜切口面

矩形波导斜切口面示意图如图 1, a 、 b 分别为激励波导

的宽边与窄边, 辐射口面法向相对波导轴线倾角为 α , 辐射口面尺寸为 a 、 B , B 、 b 满足关系式

$$B = b / \cos \alpha \quad (1)$$

文献[1]中分析的模型是假设辐射口面在无限大导体平面上, 计算得到半空间辐射场. 本文直接计算波导斜口辐射的全空间时域波形, 然后计算全空间方向图, 因此本文模型更接近实际情况. 在计算中不计波导壁的厚度.

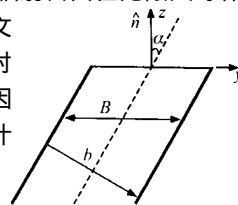


图 1 矩形波导斜切口面

3 近场-远场转换

应用 FDTD 分析天线的特性时, 由于受计算机条件的限制, 容易得到天线的近区场, 因此天线的辐射方向图需要由天线的近区场变换得到. 选取包围天线的一个闭合面, 在该闭合面上天线的近区场通过 FDTD 计算得到, 然后根据等效原理, 应用近场-远场转换求得天线的远区辐射场, 便得到天线的辐射方向图.

本文计算中, 采用文献[4]中的近场-远场转换方法. 由于在 FDTD 的计算中, 电场和磁场的空间分布相差半个空间步长, 所以这里的等效磁流和等效电流也相差半个空间步长. 这种方法省去了文献[2]中在等效面上电场或磁场取平均值的

近似,而采用等效磁流和等效电流分别在两个面上积分,提高了计算精度。

在等效面上,等效电、磁流密度的分布如图 2 所示,其值为

$$J_s|_{S_e} = \hat{n} \times H|_{S_h} \quad (1a)$$

$$M_s|_{S_h} = -\hat{n} \times E|_{S_e} \quad (1b)$$

对于远区观察点,用 r_e 和 r_h 分别表示等效面 S_e 和 S_h 上的等效源到观察点的矢量,磁、电矢量位 A 和 F 的积分表达式可以近似为

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \iint_{S_e} \hat{n} \times H|_{S_h} \exp(jk\hat{r} \cdot r_e) dS' \quad (2a)$$

$$F(r) = \frac{\epsilon_0}{4\pi r} \iint_{S_h} \hat{n} \times E|_{S_e} \exp(jk\hat{r} \cdot r_h) dS' \quad (2b)$$

这是频域的远场矢量位表达式,同样的方法可以用到远区时域场解中,此时时延因子应根据等效面有所不同。

$$A(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \iint_{S_e} \hat{n} \times H|_{S_h} \left[t - \frac{r - \hat{r} \cdot r_e}{c} \right] dS' \quad (3a)$$

$$F(r, t) = \frac{\epsilon_0}{4\pi r} \iint_{S_h} \hat{n} \times E|_{S_e} \left[t - \frac{r - \hat{r} \cdot r_h}{c} \right] dS' \quad (3b)$$

式中,当时延因子非整数个时间步长时,需要在两个时间步之间进行线性插值运算,处理方法同文献[2,3]。

远区辐射电场可由下面的近场-远场转换公式计算:

$$E_\theta = -\frac{\partial}{\partial t} (A_\theta + \eta F_\phi) \quad (4a)$$

$$E_\phi = -\frac{\partial}{\partial t} (A_\phi - \eta F_\theta) \quad (4b)$$

式中对时间的偏微分采用时域差分实现, η 为自由空间中的波阻抗。

4 结果分析

选取波导尺寸为 $a \times b = 22.86\text{mm} \times 10.16\text{mm}$, 计算了 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 三种情况时斜切口面的辐射方向图。计算中,基本网格选取为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.0\text{mm}$, 斜切口面及其附近部分的网格最小,选择为 $\Delta x = \Delta y = 0.508\text{mm}, \Delta z = 0.5715\text{mm}$ 。采用

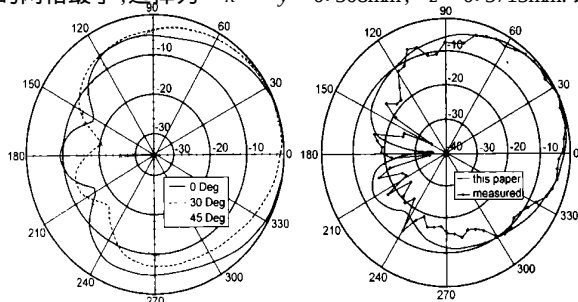


图3 口面辐射方向图
随切角的变化

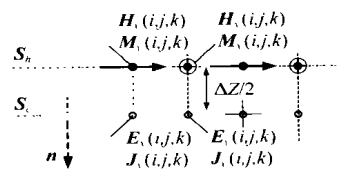


图2 等效面上电磁流的分布

完全匹配层(PML)吸收边界条件,边界取为10层,理论反射系数设为 10^{-6} , PML层中有耗介质电导率和磁阻率的幂指数取3。工作频率 $f = 9.375\text{GHz}$ 时的E面方向如图3所示。计算结果在主方向与文献[1]中的结果一致。

斜切角 $\alpha = 45^\circ$ 时计算结果与实验结果如图4所示,二者结果基本吻合。由于测试时实验件口面的背面连接有馈电波导等部件,波导壁厚为1mm,而计算中它们的影响未计入在内,所以背面和靠近口面平面处与实验数据相差较明显,趋势相近。

5 结论

应用时域有限差分(FDID)法较精确地分析了有限尺寸矩形波导口面辐射的方向图,特别是口面的背面方向图。由于辐射口的渐变,通常精确分析波导斜切口面场及其全空间辐射特性比较困难。而用FDID方法结合近场-远场变换公式,能够较方便计算复杂结构天线的辐射方向图。本文的结果验证了FDID的这一特点,为波导斜切口面天线以及口面场不易精确求解的口面天线的分析设计提供一种较精确有效的方法。

参考文献:

- [1] 吕善伟,张江林.矩形斜口面天线辐射特性[J].北京航空航天大学学报,2000,26(6):644-646.
- [2] Luebbers RJ, Kumz KS, Schneider M, Hunsberger F. A finite-difference time-domain near zone to far zone transformation[J]. IEEE Trans., 1991, AP-39(4):429-433.
- [3] 李朝伟.时域有限差分法在平面电路及天线中的应用研究[D].博士学位论文.北京:北京航空航天大学电子工程系,2000.
- [4] Martin T. An improved near-to far-zone transformation for the finite-difference time-domain method[J]. IEEE Trans., 1998, AP-46(9):1263-1271.

作者简介:



高文军 男,1973年11月生于内蒙古自治区和林格尔县,1998年获北京航空航天大学电磁场与微波技术专业硕士学位,同年考入该校攻读电磁场与微波技术专业博士学位。主要从事电磁场数值计算方法、微波馈源、超宽频带天线及馈线系统等方面的研究工作,发表论文10余篇。



吕善伟 男,教授、博士生导师,1937年生于辽宁大连,1960年毕业于北京航空学院无线电系。1961年从事微波测量的科研和教学工作,1962年在清华大学无线电系进修微波技术与天线。1963年至今在北航无线电系长期从事微波航空及宇航天线、微波通信系统方面教学和科研工作。获部级以上科技奖7项,在核心刊物上发表论文百余篇,出版著作5部,培养硕士、博士、博士后40余名。

图4 计算与测试结果
比较($\alpha = 45^\circ$)