# FDTD-PWS法用于分析毫米波透镜天线焦面场

张 岩 吕善伟 苗俊刚 李玉莹

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083) (中国航天科工集团公司 二院二十五所, 北京 100854)

**摘 要**: 提出一种新的节省计算空间的FDTD-PWS混合算法, 并应用于透镜天线的焦面场分析. 首先采用FDTD(Finite-Difference Time-Domain)求解得到聚焦透镜天线的口面场的幅度和相位分布, 再通过PWS(Plane Wave Spectrum)外推至焦平面, 求解得出焦面场分布. 根据天线场分布的对称性, 将PEC(Perfect Electric Conductor)和PMC(Perfect Magnetic Conductor)边界应用于FDTD的仿真过程, 使仿真模型缩减为原模型的1/4, 进一步节省了计算空间. 应用于毫米波聚焦透镜天线的焦面场仿真分析, 并对其焦面场进行平面近场扫描测试, 将仿真结果进行探头补偿后与实验数据作比较, 证明该方法是精确和高效的.

**关 键 词**: FDTD; PWS; FDTD-PWS混合算法; 焦面场; 透镜天线

中图分类号: O 441.4

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2007)06-0682-04

# Hybrid FDTD-PWS method for focal field analysis of lens antenna at millimeter-wave band

Zhang Yan Lü Shanwei Miao Jungang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Li Yuying

(Institute No. 25 of the Second Academy, Chinese Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

**Abstract**: A novel hybrid finite-difference time-domain (FDTD) method and plane wave spectrum (PWS) method was presented for analysis focal field distribution of lens antenna. Firstly, the amplitude and phase distribution in the aperture was simulated by the FDTD method. Moreover, the antenna model was reduced to 1/4 by the pertect electric conductor (PEC) and perfect magnetic conductor (PMC) boundary conditions. And secondly PWS method was applied to calculate the focal field distribution. In order to demonstrate the accuracy and efficiency of this new method, a lens antenna at millimeter-wave band was designed and simulated as an example. Then this lens antenna was measured by the planar-near-fields (PNF) method. Finally, the influence of the measurement probe was characterized also by the FDTD method and taken into account by the calibration. And it is found that the results of focal spot size obtained by the FDTD-PWS method are in good agreement with the experiment data by the probe compensation.

**Key words**: FDTD; PWS; FDTD-PWS hybrid method; focal field; lens antenna

聚焦透镜天线的外形结构紧凑、可靠性高, 而且同时具有加工精度要求较低、介质材料成本低等优点, 所以常在微波测量系统中被采用. 为了达到较好的聚焦效果, 通常聚焦透镜天线的口径要大于8倍工作波长, 所以传统设计方法采用了与光学折射镜相类似的方法[1]. 近期国内学者[2]采用射线追迹分析计算透镜天线的焦面场, 出于算法简化的考虑, 将透镜内部的多次反射忽略, 得到的焦面场分布必然存在一定的计算误差, 这是采用高频近似方法固有的一个问题. 然而随着工程

收稿日期: 2006-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60271012)

作者简介: 张 岩(1980-), 男, 北京人, 博士生, zhangyan_buaa@yahoo.com.cn

上对透镜天线聚焦性能指标的日益提高, 对聚焦天线的焦斑大小提出较为严格的指标, 所以定量获取焦面场的具体场分布越来越重要. 由于聚焦透镜天线属于电大尺寸天线, 若单纯采用某一种数值仿真计算方法就会对计算机的配置提出较高要求, 实践证明[3]普通 PC机实现难度极大, 要依赖高性能服务器或并行计算机才有可能顺利完成计算任务.

本文提出一种新的节省计算空间的 FDTD (Finite-Difference Time-Domain, 时域有限差分法)-PWS(Plane Wave Spectrum, 平面波谱法)混合算法对透镜天线的焦面场进行仿真. 首先采用 FDTD求解得到聚焦透镜天线的口面场的幅度和相位分布, 经过时域到频域、频域到谱域的变换, 得到口面场角谱, 通过 PWS外推至焦平面, 得到焦面场角谱, 再经谱域到频域的变换, 得到焦面场的场分布信息. 由于透镜天线场分布的对称性, 将 PEC (Perfect Electric Conductor)和 PMC (Perfect Magnetic Conductor)边界应用于 FDTD的仿真过程, 从而进一步节省计算空间, 使计算空间缩减为原模型的 1/4, 缩短了仿真时间, 在普通 PC机上即可完成仿真. 最后将 FDTD-PWS混合算法应用于实际的毫米波聚焦透镜天线仿真. 为了验证本文方法的可行性和正确性, 对焦面场进行了平面近场扫描测试, 并且根据实验时采用的探头进行仿真结果的探头补偿, 通过比较实验数据和经探头补偿后的仿真结果, 证明该方法在聚焦透镜天线的焦面场分析中是可行和高效的, 能够起到指导设计的作用.

## 1　聚焦透镜天线结构设计

如果需要透镜天线在焦平面达到汇聚的效果, 理论上要求由天线口面各个点发出的电磁波在到达焦点处时等相位, 这是天线口面相位设计和透镜曲线设计的基本出发点. 由于天线口面中心到焦点的波程小于口面边缘任意一点到焦点的波程, 就要求口面上的相位分布具有中心区域相位滞后、边缘区域相位超前的特点. 工程上通常选用两个透镜加装在喇叭口处, 达到调整相位的目的. 其中内透镜起到将喇叭口面场相位校正为同相的作用, 外透镜二次调整相位使得天线在焦平面聚焦, 所以内外透镜曲线方程均为双曲线方程.

## 2　镜像原理的 FDTD实现

FDTD是一种简单有效的电磁场时域求解方法, 通过一次计算就可以得到系统的宽频带信息. 采用 FDTD仿真得到透镜天线的时域口面场, 给 PWS的谱域外推提供了初始数据.

由于圆锥喇叭透镜天线通常工作在 $TE_{11}$模式, 所以可以根据场分布的对称性进行模型的简化, 参见图 1.

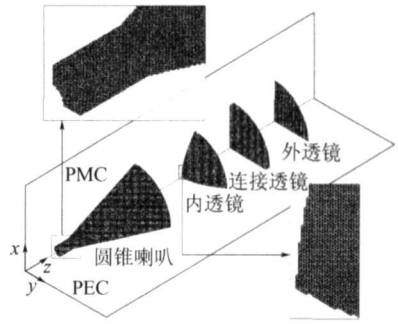



图 1　网格剖分示意图

根据镜像原理, 对位于 PEC和 PMC边界上的场量作以下处理.

1) PEC边界条件:

$$E_y^n(i, j+1/2, k) = 0$$

$$E_z^n(i, j, k+1/2) = 0$$

2) PMC边界条件:

$$H_x^{n+1/2}(i, j-1/2, k+1/2) = -H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2)$$

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k) = -H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k)$$

通过采用 PEC和 PMC边界处理对称性模型, 使得计算空间大大减小, 所需内存量仅为原整体模型内存需求总量的 1/4; 同时由于每时间步参与迭代计算的网格数大幅度减少, 所以每步迭代所需时间也相应缩短, 这样总计算时间也明显地减少.

## 3　PWS外推焦面场

FDTD时域采样得到透镜天线的时域口面场 $E_x(x, y, z=z_0, t)$后, 对时域口面场作 FFT得到频域口面场 $E_x(x, y, z=z_0)$. 根据文献[4]所述, 再对频域口面场作反 Fourier变换 (IFFT)得到口面处 ($z=z_0$)的平面波角谱 $F(k_x, k_y; z=z_0)$, 进而外推至焦平面 ($z=z_f$), 得到焦面处的平面波角谱:

$$F(k_x, k_y; z=z_f) = F(k_x, k_y; z=z_0) \cdot \exp[-j(z_f - z_0)\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}]$$

最后再作 FFT得到焦平面的场分布 $E_x(x, y, z=z_f)$.

## 4 设计实例与算法验证

### 4.1 天线设计

为了验证本文提出的新算法,设计并加工了一个工作在 Ka波段的聚焦透镜天线,绘于图 2 设计焦距为 27.6λ,透镜材料为聚四氟乙烯.

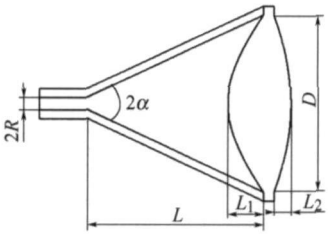



图 2 聚焦透镜天线示意图

其中几何尺寸分别为:天线口面内径 $D = 12\lambda$,内透镜厚度 $L_1 = 2.5\lambda$,外透镜厚度 $L_2 = 1.2\lambda$,$2R$ 为 WC28标准圆波导内径,圆锥喇叭长 $L = 12.3\lambda$,半张角 $\alpha = 24°$.

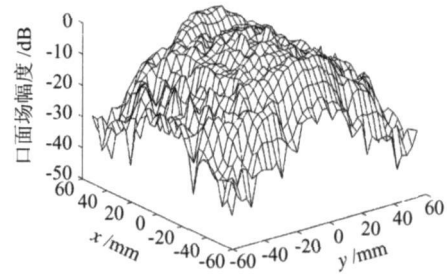
### 4.2 FDTD仿真

本算例中,FDTD采用均匀网格 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \lambda/16$,共剖分 $153 \times 312 \times 153 = 7\,303\,608$个网格,具体网格剖分情况绘于图 1.选取时间步长为 $\Delta t = 0.96\Delta t_{CFL}$,共迭代 5 000步.激励波形选用高斯调制脉冲 $E_x(t) = \exp[-(t-t_0)^2/2T^2] \cdot \sin(\omega_m t)$,其中 $T = \sqrt{6}/\pi(f_{max} - f_{min})$,$t_0 = 4T$,$\omega_m = \pi(f_{max} + f_{min})$,$f_{min} = 28.3$ GHz,$f_{max} = 38.8$ GHz 采用 10层的 PML吸收边界,理论反射系数为 $10^{-6}$,幂指数为 3.

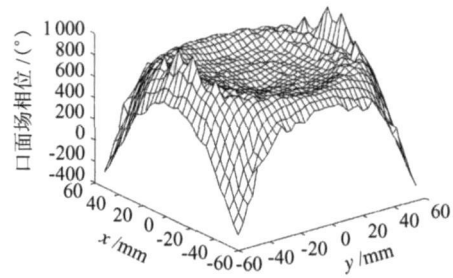
仿真平台为 Windows XP操作系统,奔腾 4双核 CPU(主频 3.0 GHz),2 GB内存.计算程序由 Fortran语言编写,编译器为 Fortran PowerStation 4.0.仿真共占用内存 1.4 GB,耗时 16 h.

如果采用 FDTD对原模型进行仿真计算,需要剖分的总尺寸为 $12\lambda \times 12\lambda \times 42\lambda$,采用 PEC和 PMC边界(以下简称 1/4模型)后,总尺寸缩减为 $6\lambda \times 6\lambda \times 42\lambda$.由于本文同时采用 PWS外推焦面场,使总尺寸进一步缩减为 $6\lambda \times 6\lambda \times 16\lambda$,即所需内存量约为原模型的 1/10.并且通过实际编译发现,当对原模型和 1/4模型对应的 FDTD程序进行编译时,由于内存溢出,编译器报错;而 FDTD-PWS程序可以正常编译并执行.由此可见,FDTD-PWS方法可以有效地解决电大尺寸天线的焦面场分析问题.

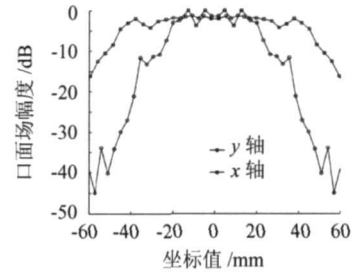
FDTD仿真过程中,采样面上的采样间隔为 $\Delta x_s = 7\Delta x = 0.44\lambda < \lambda/2$,$\Delta y_s = 6\Delta y = 0.38\lambda < \lambda/2$,满足奈奎斯特定律,从而保证了 PWS的外推精度.采样得到的透镜天线的时域口面场经过 FFT得到 $f = f_0$ 时的频域口面场($f_0 \in (f_{min}, f_{max})$),将场分布绘于图 3.



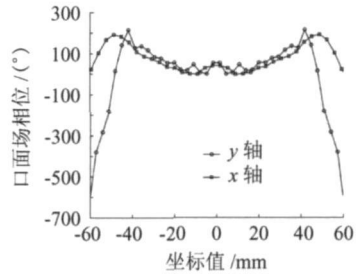

a 幅度(三维)




b 相位(三维)




c 幅度(二维)




d 相位(二维)

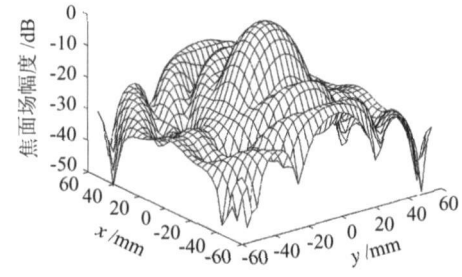
图 3 FDTD仿真采样得到的口面场分布

由图 3可看出,通过内透镜校正相位和外透镜的二次相位调整,口面相位分布符合由口面中心向边缘依次超前的设计要求.

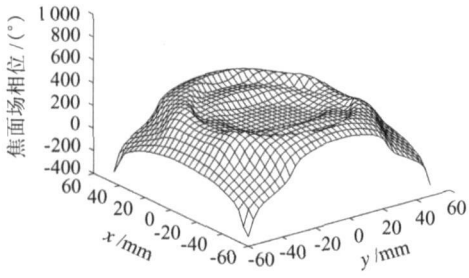
### 4.3 PWS外推

对频域口面场作 IFFT得到口面场角谱,然后采用 PWS外推得到焦面场角谱,再作 FFT得到焦面场分布绘于图 4.

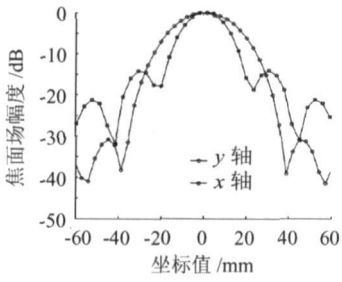
由图 4可看出:①焦点中心区域的电场幅度明显大于焦平面内的其它区域,达到了汇聚目的;



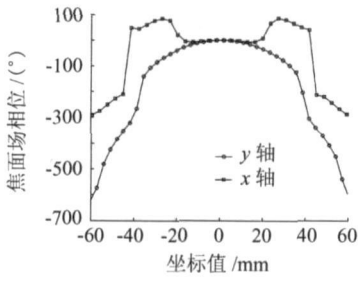

a　幅度 (三维)




b　相位 (三维)




c　幅度 (二维)




d　相位 (二维)

图 4　PWS外推得到的焦面场分布

②3 dB焦斑的区域内, 电场基本同相 ( $r<1.2\lambda$范围内, 相位差小于 10°; $r<\lambda$范围内, 相位差小于 5°).

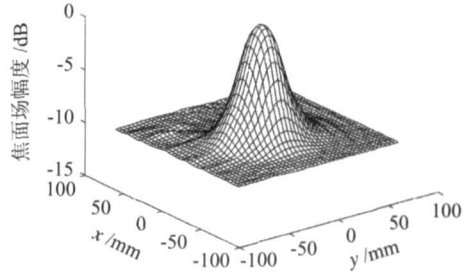
4.4　实测与探头补偿

为了验证仿真结果, 对焦面场进行测试. 将透镜天线置于 $z<z_0$ 区域, 并保证其口径面与 $z=z_0$ 面重合, 接收喇叭口面置于焦面 $z=z_f$ 进行平面近场扫描. 扫描采样点数为 41 × 41, 采样间隔为 $\Delta x_m=\Delta y_m=0.48\lambda<\lambda/2$ 由于接收喇叭口面距离透镜天线口面大于 $25\lambda$, 所以可以忽略二者之间的相互耦合. 实验结果绘于图 5a

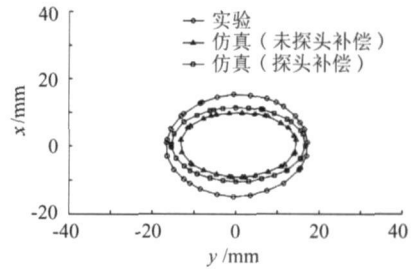
为得到更加精确的比较结果, 根据实验时所选用的接收喇叭, 对仿真结果进行了探头补偿, 即对接收喇叭也作 FDTD 仿真, 得到口面场的角谱 $B(k_x, k_y; z=z_f)$后, 再由 4.3节外推得到的透镜天线焦面场角谱 $A(k_x, k_y; z=z_f)$计算出喇叭接收得到的电压[5]:

$$V(x, y, z=z_f)=\iint_{-\infty}^{\infty} A(k_x, k_y; z=z_f)\cdot B(k_x, k_y; z=z_f)\, e^{-jk_z(z_f-z_0)}\, e^{-j(k_x x+k_y y)}\, dk_x\, dk_y$$

与实际测量结果进行比较, 绘于图 5b




a　三维图




b　3 dB焦斑比较

图 5　焦面场测量结果

由图 5b可看出, 计算结果在 $y$ 轴方向与实验吻合较好, $x$ 轴方向有较大误差, 初步分析是由实验测试系统造成, 深入分析还需进一步研究. 将 3 dB焦斑的仿真 (未探头补偿和探头补偿 )和实验数据列于表 1.

表 1　3 dB焦斑数据

| 数据来源 | 3 dB焦斑大小 /mm | |
|---|---|---|
| | $x$ 轴 | $y$ 轴 |
| 仿真 (未探头补偿 ) | 19.0 | 27.7 |
| 仿真 (探头补偿 ) | 22.0 | 32.7 |
| 实验测试 | 30.3 | 33.8 |

由表 1可看出, 3 dB焦斑的电场正交方向 ( $y$ 轴 )长度大于电场方向 ( $x$ 轴 )长度, 即透镜在电场方向有更强的能量汇聚作用. 工程上通常要求 3 dB焦斑直径取最大值, 所以无论对于实验还是仿真, 3 dB焦斑最大长度更有意义. 本文中的透镜天线的 3 dB焦斑最大长度的仿真值和实验值分别为 32.7mm和 33.8mm, 仿真误差为 3.3%, 说明仿真结果是适用的.

(下转第 713页 )

## 4 结 束 语

本文针对大迎角飞行中推进系统稳定性及气动舵面 /推力矢量的协调控制问题, 构建了大迎角综合飞行 /推进控制系统的方案, 采用模糊方法设计了推进稳定性控制系统, 并用逆动力学和控制分配方法构建了指令-力矩-操纵机构的间接控制方案, 协调处理气动舵面和推力矢量的控制, 仿真获得了良好的效果.

本文采用的推进系统模型可调变量较少, 先进的推进系统可调变量大大增加, 其稳定性控制设计将更为复杂, 还需在建立其模型基础上开展深入研究. 另外可针对大迎角下气动特性的复杂性和参数不确定性, 在本方案基础上, 结合非线性鲁棒等方法进行设计.

### 参考文献 (**References**)


[1] 王立峰, 张津. 超机动飞行推进系统稳定性控制研究 [J]. 推进技术, 2000, 21(4): 1-4

Wang Lifeng, Zhang Jin. Propulsion system stability control for supermaneuvering flight[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 1-4 (in Chinese)

[2] 叶茂林, 申功璋. 带推力矢量综合飞行推进控制系统设计及其仿真研究[D]. 北京: 北京航空航天大学自动化科学与电器工程学院, 2002

Ye Maolin, Shen Gongzhang. Design and simulation research for integrated flight/propulsion system[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese)

[3] Delaat J C, Southwick R D, Gallops G W. High stability engine control[R]. AIAA-96-2586, 1996

[4] 柳嘉润, 申功璋. 基于逆动力学和在线参数辨识的飞机姿态控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 111-115

Liu Jiarun, Shen Gongzhang. Attitude control based on inverse dynamics and online parameter identification[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 111-115 (in Chinese)

[5] Yang Lingyu, Shen Gongzhang. A new optimal control allocation method for aircraft with multiple control effectors[R]. AIAA-2007-1052, 2007


(责任编辑: 张　婧)

(上接第 **685**页)

## 5 结 束 语

本文提出一种新的 FDTD-PWS混合算法, 应用于分析毫米波聚焦透镜天线的焦面场, 并与实验结果进行比较, 证明该方法是适用和有效的. 这种方法由于天线口面到焦面之间的空间不纳入 FDTD数值计算, 所以节省了大量计算空间, 并且缩短了计算时间, 提高了计算效率. 另外, 本文方法将透镜纳入计算, 这样就可以计算不同介质对焦斑大小的影响, 所以与传统设计法相比, FDTD-PWS混合算法对天线设计有更好的指导作用. 同时这种方法可以推广到需要研究焦面场分布的其它天线形式.

### 参考文献 (**References**)


[1] Kraus J D, Marhefka R J. 天线 (下)[M]. 第三版. 章文勋译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 140-147

Kraus J D, Marhefka R J. Antennas[M]. 3rd Edition. Translated by Zhang Wenxun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 140-147 (in Chinese)

[2] 窦文斌. 毫米波准光理论与技术 [M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 173-193

Dou Wenbin. Millimeterwave quasioptical theory and techniques [M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 173-193 (in Chinese)

[3] Godi G, Sauleau R, Thouroude D. Performance of reduced size substrate lens antennas for millimeterwave communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(4): 1278-1286

[4] 泽尔 E V. 口径天线与绕射理论 [M]. 邱文杰译. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987: 16-20

Jull E V. Aperture antennas and diffraction theory[M]. Translated by Qiu Wenjie. Chengdu: Chengdu Telecommunication Engineering College Press, 1987: 16-20 (in Chinese)

[5] Shi Jin, Cracraft M A, Slattery K P, et al. Calibration and compensation of near-field scan measurements[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(8): 642-650


(责任编辑: 娄　嘉)