

8 mm点聚焦透镜天线的工程设计

任冬梅, 刘述章, 王国庆, 陈 虎

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】根据等离子体密度的测量要求, 设计了一种工作于8 mm频段的点聚焦透镜天线。对系统进行仿真和实验验证, 仿真及实验结果均证实了设计的可行性和正确性, 高次模可以忽略的理论也得到了有力的证明, 为天线的工程设计提供了一定的理论和参考价值。

关键词 点聚焦透镜天线; 圆锥喇叭; 相位中心; 空间分辨率
中图分类号 TN82 文献标识码 A

Engineering Design of 8 mm Spot-Focusing Lens Antenna

REN Dong-mei, LIU Shu-zhang, WANG Guo-qing, CHEN Hu

(School of Physical Electronics, Univ. of Elec. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, a spot-focusing lens antenna operating at 8 mm frequency band is designed according to the measurement of the density of the plasma. The feasibility and validity of the scheme is demonstrated by means of simulation and test of the system. The theory in which high order modes can be ignored is powerfully testified. In addition, some academic and reference value for engineering design of antennas is also presented here.

Key words spot-focusing lens antenna; conic horn; phase center; space resolution

点聚焦透镜天线是最近应用较多的天线, 特别是近年来有关焦面阵成像成为关注的焦点。焦面阵成像可用于检测隐蔽武器和炸药以及飞机自动着落系统^[1]。文献[2]在测量介电常数和损耗正切时用几何光学法设计了一点聚焦透镜天线, 充分利用其聚焦性能, 使得被测介质的边缘衍射效应减小到可以忽略的程度; 不足之处在于几何光学是以零波长近似为基础, 因而当频率很高时, 天线设计工作良好, 但对于低频就不适用。文献[3]用数值法设计的点聚焦透镜天线, 具有低损耗、低成本以及无彗形相差失真等优点, 适合于短焦透镜系统; 缺点是存在由透镜截取馈源部分旁瓣而引起的相位失真以及透镜阻抗不匹配引起的表面反射。基于此, 本文设计8 mm点聚焦透镜天线时注重把工程设计和场分析设计二者相结合, 采用HFSS仿真软件对模型在不同尺寸和考虑高次模影响的两种情况下进行仿真分析, 利用空间分辨率的变化情况去优化设计, 并对系统进行了实验验证。

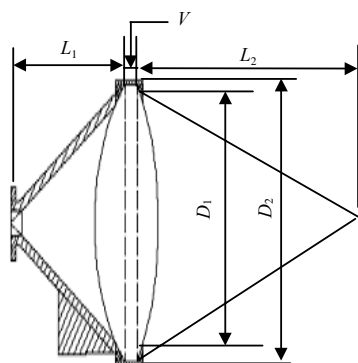


图1 设计的喇叭透镜天线

1 一体化天线设计方案

点聚焦透镜天线, 一般指的是一馈源发射电磁波, 经透镜后会聚为一点。一般点聚焦透镜天线是收发对称的, 会聚点在两透镜之间, 两透镜的光轴在同一轴上。本文设计的工作于8 mm频段的的天线系统如图1所示。当工作频率为35 GHz时, 经工程设计其分辨率和基本尺寸如下: 空间分辨率: $y_{-3} = 0.738f\lambda / D_1 = 15 \text{ mm}$; $L_2 = 200 \text{ mm}$; $V = 6 \text{ mm}$, 透镜天线的通光口径 D_1 为: 110 mm; 外口径 D_2 为: 120 mm, 由公式:

$$L_1 = \frac{nf}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{D^2}{4}}$$

得圆锥喇叭的总长度 L_1 为 $136 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$;

其张角为: $40.5^\circ \pm 0.1^\circ$ 。为了减小聚焦天线的尺寸, 透镜由两个不同的双曲面组成, 其曲面分别由下面两曲

线($i=1,2$)旋转而成 $(n^2 - 1)x_i^2 + 2n(1 - n)f_ix_i + f_i^2(1 - n)^2 - y_i^2 = 0$, 当 $i=1$ 时, $n=1.5163$, $f_1=104.48$ mm; $i=2$ 时 $n=1.5163$, $f_2=182.94$ mm。圆锥喇叭与外围电路的接口为标准8 mm圆波导($\Phi=7.13$ mm)。

2 圆锥喇叭的相位中心

圆锥喇叭相位中心表如图2所示。其中, 横坐标为喇叭的长度, 纵坐标为相位中心离顶点的距离。从图中可以看出, 相位中心随着圆锥喇叭长度而逐渐靠近顶点。当圆锥喇叭长度大于9 mm时, 相位中心和顶点之间的距离就小于2 mm。虽然圆锥喇叭的相位中心并不完全在顶点上, 可以肯定, 当圆锥喇叭长度等于130 mm时, 相位中心已非常靠近顶点, 其引入的误差可以不考虑。

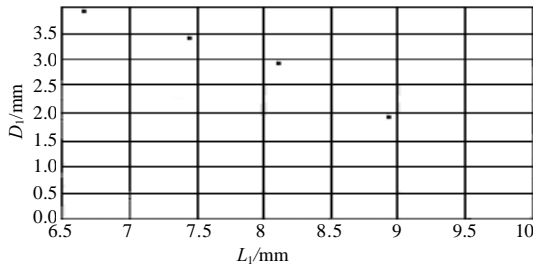


图2 喇叭相位中心与长度的关系

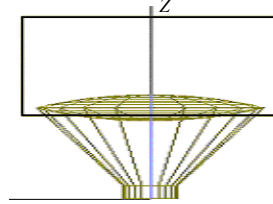


图3 点聚焦天线的仿真模型

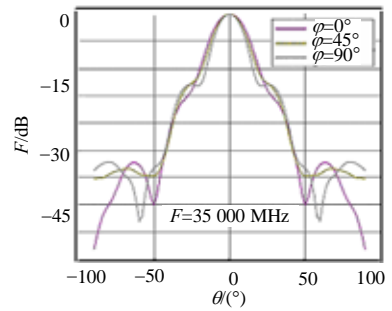


图4 天线的方向图

向图

3 HFSS仿真及分析

为了进行分析比较, 考查工程设计的可用性, 本文利用HFSS进行了仿真. 首先构造聚焦天线系统的仿真模型, 如图3所示。其中, 喇叭顶点处的波导直径为7.13 mm, 与图1中的圆波导一致; 喇叭长度仅为30 mm, 喇叭口径和透镜直径都是30 mm; 透镜焦距 $f \approx 30$ mm, 透镜内填充的为折射率 $n = 1.5163$ 的介质, 理论分辨率为6.3 mm; 观察盒子高度为40 mm, 以保证所需观察的焦平面在其内, 盒子长宽皆为35 mm。仿真结果如图4所示。其中, 纵坐标为天线的归一化方向性系数。

从图4中可看出, 点聚焦透镜天线的方向图与喇叭天线的方向图相差不大, 这是因为软件在计算天线系统的方向图时考虑远区场的情况, 点聚焦透镜天线的辐射场在焦平面附近会聚以后再次向远处辐射, 于是从无穷远处看, 点聚焦透镜天线方向图与喇叭天线大体上是一致的。然而在场结构上来看, 点聚焦透镜天线在焦平面处有个很明显的场会聚作用, 而这是喇叭天线所没有的。在计算空间分辨率时, 可如下操作: 在焦平面上做一个截面, 通过软件中的计算器, 用坡印廷矢量对截面积分, 便可得到功率。再把截面按比例分成若干个面, 对各个面做坡印廷矢量积分, 找出半功率面, 便找出了3 dB功率的点, 从而求得空间分辨率, 经过计算处理, 得出所仿真的模型的空间分辨率为6.5 mm左右, 与理论模型的分辨率6.3 mm比较吻合。而仿真结果显示的反射系数 S_{11} 在-33 dB左右, 反射比较小, 说明天线系统的匹配良好, 满足要求。

表1 尺寸变化的仿真结果

喇叭口径直径D/mm	30	45	60
焦平面功率/W	0.23	0.24	0.25
焦斑为7 mm时功率	0.15	0.12	0.14
焦斑大小/mm	≈ 6.5	7.0	≈ 7.0
S_{11} 参数/dB	-33	-28	-32

表2 考虑高次模时各模型仿真结果

喇叭口径直径D/mm	30	45	60
焦平面功率/W	0.238	0.238	0.256
焦斑为7 mm时功率	0.142	0.116	0.136
焦斑大小/mm	≈ 6.5	≈ 7	≈ 7
S_{11} 参数/dB	-36	-25	-34

在以上仿真的基础上, 在软件和硬件所能承受的范围, 再把天线系统模型尺寸作适当放大。保持透镜介质折射率不变, 并使喇叭长度和透镜直径相等, 同时使 f/D 比值不变, 得到的仿真结果如表1所示。

从表1中可看出, 尺寸加大, 对天线辐射场结构不产生较大影响, 对空间分辨率影响也都不到1 mm; 尺寸

加大后,会导致散射和绕射,透镜的汇聚作用加强,得到的焦斑大小(空间分辨率)与理论推导的公式可以有很好的吻合。以上仿真都没有考虑高次模的影响,在原模型的基础上,考虑一定的高次模时,先用Solve Ports Only计算可能产生的高次模数。在图3的模型下,可考虑存在10个高次模(随着模式增高,高次模的影响越来越弱,所以考虑10个已经足够)。再进行仿真,所得方向图与原方向图的比较如图5所示,此时各个不同模式的反射系数 S_{11} 都小于 -25 dB。考虑高次模时,尽管尺寸增大,仿真所得的空间分辨率与理论公式还保持了较好的吻合度,如表2所示,其中 D 为喇叭的口径直径。

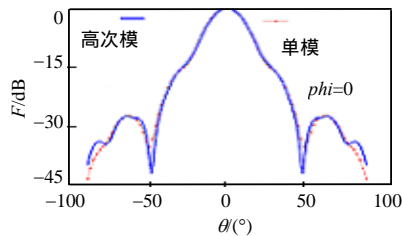


图5 原方向图与考虑高次模时的比较

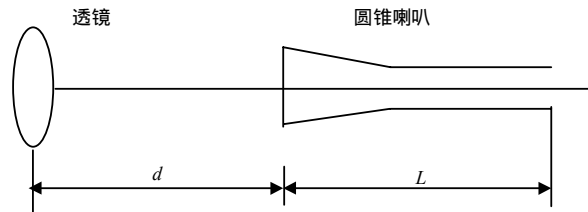


图6 测量装置示意图

4 透镜天线的空间分辨率的实验

实验装置如图6所示, d 为230 mm(喇叭的接收功率最大),透镜为单面透镜,其直径和焦距分别为197 mm、250 mm,采用波长为3.2 cm的均匀平面电磁波照射,透镜的理论空间分辨率为41.8 mm。圆锥喇叭符合最佳增益设计,口径为78 mm,斜颈为120 mm。实验测量的空间分辨率为44 mm,和理论上的空间分辨率41.8 mm较为吻合。通过实验可以得出,透镜天线的设计与分析是正确的。

5 结论

点聚焦透镜天线是最近应用较多的天线,把工程设计与场分析设计二者结合起来的资料不多。本文做了这方面的尝试,并取得了较好的效果。所设计的点聚焦透镜天线已成功应用于某干涉仪诊断系统中。

参 考 文 献

- [1] Goldsmith P F. Focal plane imaging systems for mm-wave[J]. IEEE Trans-MTT, 1993, 41(10): 1 664-1 675.
- [2] Vasundara V V. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1989, 37(3): 789-793.
- [3] Lee J J. Numerical method make lens antenna practical[J]. Microwaves, 1982,(9): 81-84.

编辑 孙晓丹

(上接第319页)

参 考 文 献

- [1] 张直中. 用微波雷达对多目标成像初探[J]. 现代雷达, 1992, 14(1): 1-17.
- [2] 杨 军, 王民胜, 保 铮. 一种ISAR多目标实时成像方法[J]. 电子学报, 1995, 23(4): 1-5.
- [3] 雷 杰, 邢孟道, 保 铮. 一种假目标干扰背景下的导弹目标成像方法[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(2): 102-107.
- [4] Chen V C., Shie Qian. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 486-499.
- [5] Berizzi F, Mese E D, Diani M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: Modeling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10: 1 880-1 890.
- [6] Chen V C, Hao Ling. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis[R]. Boston London: Artech House, 2002, 25-44.

编辑 漆 蓉