

8mm 点聚焦透镜天线设计和分辨率分析

朱佩涛 刘述章 任冬梅

电子科技大学应用物理研究所 四川 成都 610054

Email:zpt2091@163.com

摘要: 根据等离子体密度的测量要求, 设计了一种工作于 8mm 频段的点聚焦透镜天线。并对天线设计和分辨率进行分析, 采用计算机模拟对设计的系统进行仿真, 验证了设计的合理性和正确性。
关键词: 点聚焦透镜天线 分辨率 计算机模拟

一、引言

点聚焦透镜天线应用在等离子体微波干涉仪中, 人们充分利用其在会聚点处的电磁波集中的特性, 对超高速飞行的弹体及高温电离尾迹进行测量, 是微波干涉仪的关键部件。天线设计的合理性、加工的精度性, 直接影响系统测量所要达到的技术指标。

透镜天线的工作原理与光学透镜十分相似, 射照器(即点辐射源)所辐射的球面波经透镜折射后转化为平面波。透镜天线主要有馈源和透镜两部分组成。馈源放置在透镜的焦面上。点聚焦的透镜天线, 几何形状如图 1, 与普通透镜天线不同, 不是要求球面波经透镜折射后转化为平面波, 而是要求经透镜后, 在焦面上聚焦, 以满足测量的需要。

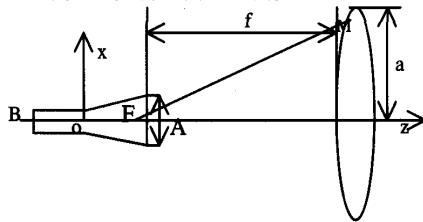


图 1 点聚焦透镜天线几何形状

二、点聚焦透镜天线设计的原理

点聚焦透镜天线的设计要依据给定的技术指标。技术指标是天线设计的依据, 也是对天线进行优化的目标。天线设计就是设计

——仿真、试验——优化设计的过程。

1. 馈源喇叭的设计

经典的天线原理文献^{[1] [2]}, 都给出了喇叭的设计方法。点聚焦透镜天线馈源采用圆锥喇叭, 设计时, 应充分考虑所设计透镜天线要实现的功能。点聚焦透镜天线, 对焦平面上的焦斑有要求, 另外, 相位中心的位置也是作为馈源的喇叭要考虑的一个方面。点聚焦透镜天线对增益的要求不再严格, 一般不再按最佳增益喇叭进行设计。

2. 介质透镜的设计

透镜天线是将由馈源辐射的球面波前经透镜折射后转化为平面波前, 如果透镜的表面是入射波的等相位面, 则称为单面透镜, 透镜方程为

$$r = \frac{(n-1)f}{n \cos \alpha - 1} \quad (1)$$

$$t = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{a^2}{n^2-1}} \quad (2)$$

式中 n 是折射率, f 是透镜的焦距, r 是焦点 F 到透镜轮廓线上任一点 M 的距离, α 是 FM 与光轴的夹角, t 是透镜的厚度, a 为透镜口径半径。

毫米波透镜一般利用对电磁波为透明的介质材料制成, 其折射系数大于 1。实际应用中, 多采用折射率为 1.3 到 1.6 的介质制成的透镜。

这里要求透镜要能够聚焦, 因此采用双面透镜, 用两个单面透镜合成。

3. 点聚焦透镜的分辨率

按照分辨率的 Rayleigh 判据^[3]，如果一个衍射斑的峰值与相邻衍射斑的第一个最小点吻合，则称 2 个目标可分辨，峰值与最小点间的距离，为焦斑的半径。由峰值 3dB 点形成的圆斑直径为点聚焦透镜天线的分辨率。

单个圆透镜的方向因子为：

$$F = \frac{2J_1(aR)}{aR} \quad (3)$$

$$R = \frac{2\pi\rho}{\lambda f} \quad (4)$$

a 为透镜口径半径， ρ 为焦面上观察点与光轴的距离， f 为焦面与透镜口径的距离。

双圆透镜的方向因子是单个圆透镜的方向因子的乘积，即

$$F = \left(\frac{2J_1(aR)}{aR} \right)^2 \quad (5)$$

当 $F=0.5$ ，即 3dB 时，有

$$\frac{2\pi a\rho}{\lambda f} = 1.617 \quad (6)$$

$$\rho = 0.51 \frac{\lambda f}{2a} \quad (7)$$

考虑加工、电磁波衍射、反射等因素，根据文献^[4]，点聚焦透镜天线的分辨率可以修正为

$$y_{-3} = 1.02 \cdot k \cdot \frac{\lambda f}{2a} \quad (8)$$

k 为加工、电磁波衍射、反射等因素因子， k 可取为 1.25。由式(8)知，当焦距一定时，透镜口径增大到一定程度，再对系统提出增大分辨率的要求是不可行的。

三、点聚焦透镜天线的设计方案

点聚焦透镜天线的主要技术指标：8mm 波段，分辨率<15mm，透镜焦距为 200mm。

当工作频率为 35GHz 时，喇叭馈源的设计基本尺寸如下：喇叭口径半径 $A=9.798mm$ ，圆波导半径为 $B=3.5685mm$ ，口径到圆波导的长度为 88.58mm，圆波导长 30mm。

对于馈源喇叭，用以上尺寸算得， $S=0.04$ ，喇叭张角为 4.02 度，E 面主瓣宽度（3dB）为 13.06 度，H 面主瓣宽度为 16.54 度，增益为 16.3 dB。

喇叭馈源的设计中，相位中心到透镜顶点的距离为透镜的焦距。相位中心的位置取决于

喇叭的尺寸，尤其是取决于喇叭的张角。对于大张角喇叭，相位中心靠近喇叭颈部，当喇叭张角变小时，相位中心向喇叭的口径移动。利用文献^[1]查表计算得，相位中心距口径 1.16mm。

透镜的设计，选取介质材料为聚四氟乙烯 ($\epsilon_r=2.1$)，考虑透镜重量和效率，让透镜的 $f / D=1$ ，即 $f=D=200mm$ ，用公式(1)、(2)设计，可以设计出双曲面透镜，得透镜厚度为 86mm。喇叭馈源的边缘照射电平为 10dB 时，照射角为 22.296 度。由于，双曲面加工时精度上要求高，及馈源的相位中心靠近喇叭口径，就可以采用球面去拟合双曲面，如图 2。拟合后透镜口径为 197.248mm，这在工程上是可行的。

利用公式(8)，得点聚焦透镜的分辨率为 11.3mm。

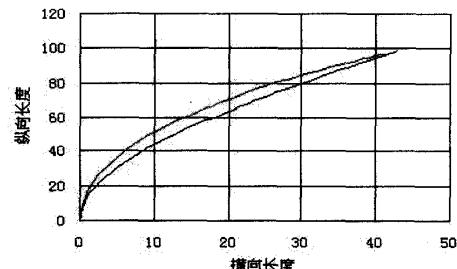


图 2 双曲线与圆的拟合

四、计算机模拟的结果

设坐标原点如图 1，在喇叭与圆波导的交界面上，对喇叭进行仿真，如图 3、图 4 得到 E 面主瓣宽度约为 13.1 度，H 面主瓣宽度约为 13.4 度。基本与理论计算的主瓣宽度吻合。

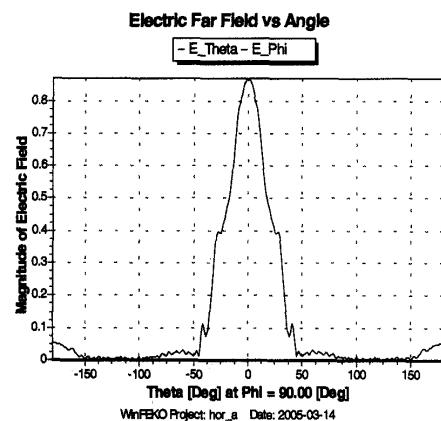


图 3 喇叭天线的 E 面方向图

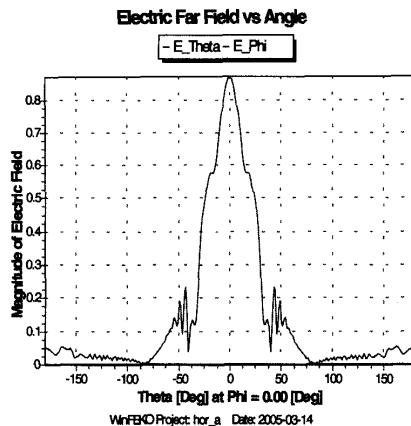


图 4 喇叭天线的 H 面方向图

把透镜安装在距离喇叭相位中心 200mm 的距离上, 经计算, 焦面应在 573mm 处。仿真透镜焦面位置, 仿真结果如图 5, 焦斑约在 571mm 处, 比计算结果前移 2mm。

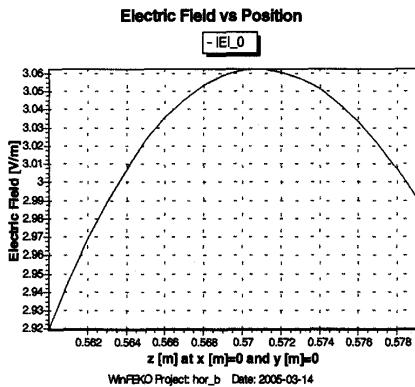


图 5 焦面附近电场幅值分布图

对点聚焦透镜天线的分辨率仿真, 结果如图 6、图 7, 从对数据的分析得出: 在 E 面的分辨率约为 14.5mm,

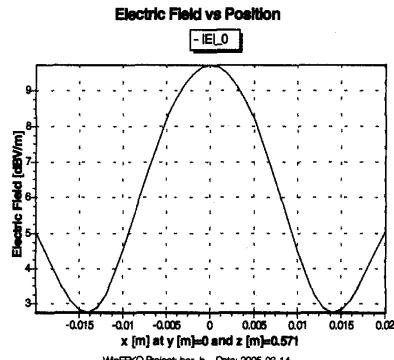


图 6 焦面 E 面方向图

H 面的分辨率约为 13.2mm。

仿真实验的分辨率比理论上的分辨率要大, 由文献^[3]知, 当 $f / D \approx 1$ 时, 这是合理的, 随着 f / D 的增加, 这两个结果才会靠近在一起。实验测量的分辨率达到了技术指标。通过实验可以得出, 点聚焦透镜天线的设计与分析是正确的。

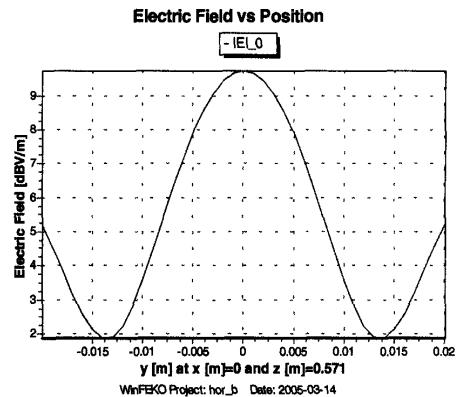


图 7 焦面 H 面方向图

五、结束语

本方法设计和分析的点聚焦透镜天线符合技术指标的要求, 由本方法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。同时, 为后续多波束聚焦透镜天线的研究提供了理论参考。

参考文献

- [1] 林昌禄, 陈海, 吴为公. 近代天线设计. 北京: 人民邮电出版社, 1990:420~427, 539~542
- [2] [美]S. 西尔弗, 江贤祚等译. 微波天线理论与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989:446~451
- [3] 窦文斌. 毫米波准光理论与技术. 北京: 电子工业出版社, 2000:157~158, 175~176
- [4] 爱金堡. 超高频天线. 北京: 人民邮电出版社, 1961: 394~407

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>