

# 毫米波多波束介质透镜天线的设计

丁晓磊 徐 磊

(航天长征火箭技术有限公司 100076)

**摘要:**本文提出了一种多波束介质透镜天线的设计方法，并给出了具体的设计过程和关键公式。该方法既适用于大扫描角透镜，又适用于小扫描角、短焦距透镜天线的轮廓设计。通过一个毫米波多波束介质透镜的研制过程证明，该方法不仅简单易行，而且设计的透镜天线纵向尺寸短、易于加工。对馈源形式分别为单波束角锥喇叭和单脉冲多模喇叭的情况进行了透镜性能测试，实测结果满足设计要求。

**关键词:**多波束，透镜，扫描角

## Design of a Millimeter Wave Multibeam Lens Antenna

Ding Xiaolei , Xu Lei

(Aerospace Long March Launch Vehicle Technology CO.,LTD ,China) dxiaolei@163.com, potatoemc@yeah.net

**Abstract:** A new method is proposed for the design of a millimeter wave multibeam lens antenna. The design procedures and formulas for the curved surface of lens are given. The method proposed in this paper is very suitable for the design of dielectric lens antennas with small scanning angle and  $F/D$  values less than one. A Millimeter Wave Multibeam Lens Antenna and two kinds of feed horns are also fabricated and tested, to verify the designs.

**Keywords:** multibeam; lens; scanning angle

## 1 引言

透镜天线是最常用的微波天线之一，和反射面天线相比，透镜无遮挡且可较方便地实现扫描，而且易做到较大角域的扫描而不致造成大的相差。在多模共口径天线<sup>[1]</sup>和多波束天线应用中，透镜更具优势。

在透镜天线应用于大扫描角或波束较多的多波束天线时，为使远远偏离轴向的点波束的增益满足要求，有关大扫描角的介质透镜的设计方法研究的较多<sup>[2][3]</sup>，但文献[2~3] 的设计方法，在设计小扫描角（如偏轴 2 个波束宽度）的介质透镜时，焦径比的选择需要大于 1，这在纵向尺寸受到限制且同时要求多波束的透镜天线中是无法满足应用的。

为满足小焦径比 ( $<1$ ) 多波束透镜的设计要求，本文提出了一种双折射面介质透镜轮廓曲线的设计方法。利用该方法设计的透镜，不仅易于加工，而

且纵向尺寸短。通过对毫米波介质透镜多波束性能和单脉冲性能的辐射特性测试表明，本文的设计方法是切实可行的。

## 2 透镜轮廓曲线的设计

透镜天线的工作原理是根据波在两种介质分界面上的折射定律。透镜的轮廓曲线和介质材料是根据使照射器（馈源）的波前实现所需的变换的要求来决定的。根据等光程条件和 Snell 定律，并利用射线追踪法进行透镜剖面曲线的设计。

图 1 是本文所设计的多波束介质透镜的剖面图，将其绕 x 轴旋转 180 度即是所设计的透镜。它能从焦点  $F_1$  和  $F_2$  发出的球面波无畸变地转变为传播方向与透镜轴成  $\pm \alpha$  角的两个平面波。 $F$  为透镜的焦距， $T$  为透镜的轴向厚度。由于透镜为轴对称结构，当馈源位于  $F_1$  和  $F_2$  所在的焦平面上的半径为  $a$  的圆内时，

经透镜折射后的波束方向与透镜轴的夹角将小于 $\alpha$ 。

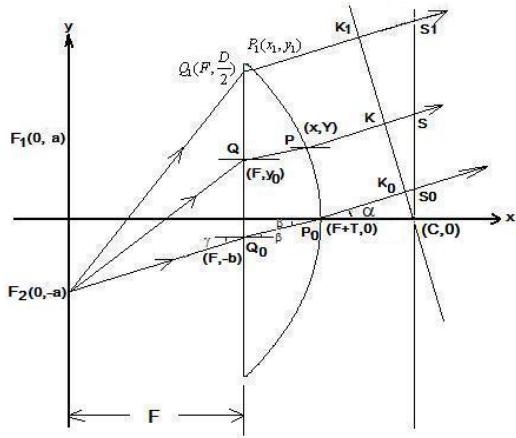


图 1 多波束介质透镜的剖面图

由图 1 可知, 照明面为垂直于轴向的平面, 透镜的设计就是确定出射面的曲面形状。鉴于透镜的轴对称结构, 只须确定如图 1 所示通过透镜轴的曲线形状即可。

图 1 中, 假定馈源相位中心位于  $F_2(0, -a)$ , 根据 Snell 定律和等光程条件, 利用射线追踪法即可确定透镜的曲面轮廓曲线。具体设计过程如下:

首先, 追踪通过点  $F_2(0, -a)$ 、 $Q_0(F, -b)$  和  $P_0(F+T, 0)$  的射线, 根据 Snell 定律, 得到  $a$  和  $b$  与已知量的关系。

$$b = T \operatorname{tg}(\alpha \sin \frac{\sin \alpha}{n}) \quad (1)$$

和

$$a = F \operatorname{tg} \theta + T \operatorname{tg}(\alpha \sin \frac{\sin \alpha}{n}) \quad (2)$$

式中  $n$  为介质折射率。

其次, 追踪通过点  $F_2(0, -a)$ 、 $Q_0(F, -b)$  和  $P_0(F+T, 0)$  的射线与通过点  $(C, 0)$  的等相位面的交点, 计算等光程常数  $K$ 。

$$K = \sqrt{F^2 + (a-b)^2} + n \sqrt{T^2 + b^2} \\ + [C - (F+T)] \cos \alpha \quad (3)$$

式中  $C$  为不小于  $F+T$  的常数。给定参数  $F$ 、 $T$ 、 $D$ 、 $\alpha$ 、 $n$  和  $C$  的值即可得到  $F_2(0, -a)$  到该等相位面的等光程常数  $K$ 。

最后, 根据 Snell 定律和等光程条件确定透镜的曲面轮廓曲线。

如图 1 所示, 假定透镜照明面上任一入射点为  $Q(F, y_0)$ , 对应的出射点为  $P(x, y)$ 。令  $Q$  点的入射角为  $\gamma_1$ , 折射角为  $\beta_1$ , 由 Snell 定律和等光程条件得

到:

$$K = \sqrt{F^2 + (y_0 + a)^2} \\ + n \sqrt{(x - F)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4) \\ + \frac{S - x}{\cos \alpha} - [y + (S - x) \tan \alpha] \sin \alpha$$

联立式 (3) 和式 (4), 求出不同  $y_0$  (取值范围为:  $-a, D/2$ ) 值对应的  $P$  点坐标  $(x, y)$  及镜像坐标  $(x, -y)$ , 即可确定透镜的曲面轮廓曲线。

给定透镜口径尺寸  $D$  和最大扫角  $\alpha$  后, 参数  $F$ 、 $T$ 、 $n$  的选择需要优化, 判断初始参数  $F$ 、 $T$ 、 $n$  选择的合理性, 关键是看  $y_0=D/2$  时  $P_1(x_1, y_1)$  的坐标值  $(x_1, y_1)$ , 若  $F < x_1 < F+T, Y_1 > \frac{D}{2}$ , 则有合理的解, 否则需适当增大  $F$ 、 $T$  或  $n$  的值。

### 3 性能测试

对于电大尺寸的毫米波介质透镜, 由于计算资源的限制, 很难进行软件仿真, 为验证本文的设计方法, 结合实际需要, 设计并加工了一个最大厚度为 50mm, 最大扫描角为  $\pm 5^\circ$ , 焦径比为 0.72 的介质透镜。透镜材料为聚苯乙烯。为验证该透镜的多波束及单脉冲性能, 进行验证试验时采用了两种形式的馈源。

#### 3.1 普通角锥喇叭馈源

该项测试的目的是对位于同一焦径面上不同偏移位置处的单个角锥喇叭, 考察偏轴波束的方向图形状。图 2 为 HFSS 软件仿真得到的 35.5GHz 时馈源的幅度方向图。图 3 和图 4 分别为馈源偏轴 8.5mm 和 9.5mm 时测试得到的 35.5GHz 时的透镜方向图。两种状态的偏移方向是相反的。为便于比较, 图中同时给出了馈源位于轴向的透镜方向图 (实线), 其半功率波束宽度为  $3^\circ$ 。

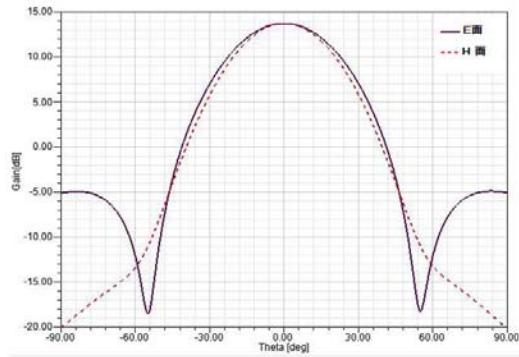


图 2 馈源的仿真方向图

由图 3 和图 4 可知, 波束偏轴超过 1 个波束宽度时, 方向图主波束基本无变化该透镜应用于多模共口径天线时, 馈源阵列的中心单元为单脉冲多模馈源<sup>[1]</sup>, 为考察透镜的和差方向图, 对馈源形式为单脉冲多模喇叭的状态进行了测试。测试用馈源的幅相方向图可参见文献[4]。图 5 为 35.5GHz 时透镜的 E 面和 H 面的和、差方向图。

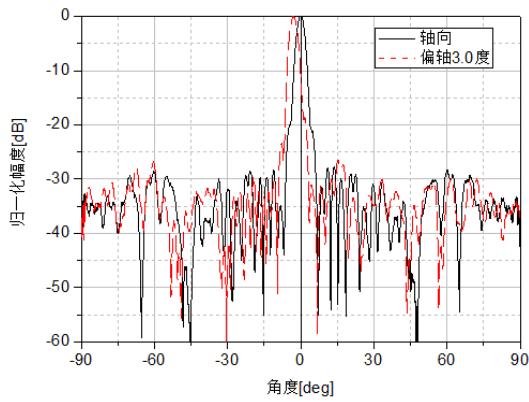


图 3 馈源偏移 8.5mm 时的透镜方向图

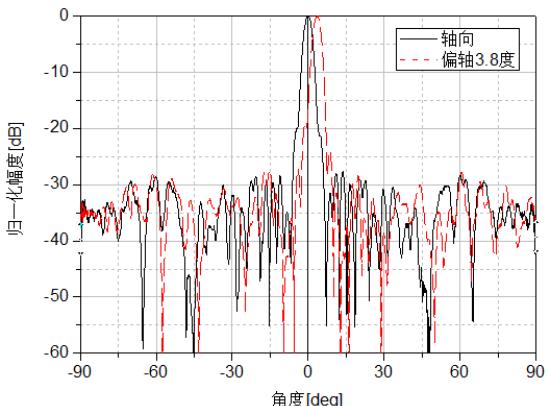


图 4 馈源偏移 9.5mm 时的透镜方向图

### 3.2 单脉冲馈源

由图 5 可知, 该透镜的和波束副瓣及差波束零深均是比较理想的。图 5a 中的差波束 E 面和图 5b 中的差波束 H 面的峰值略有差别, 主要是因为单脉冲馈源差波束 E 面和 H 面的不一致性造成的。

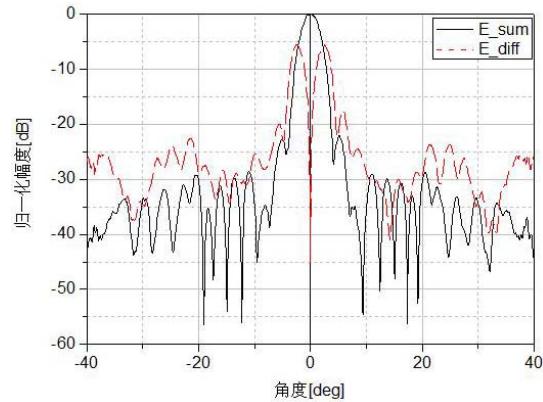


图 5a 透镜 E 面的和、差方向图

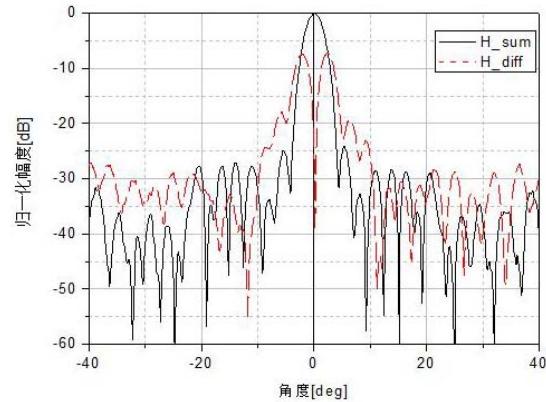


图 5b 透镜 H 面的和、差方向图

### 4 结论

为满足小焦径比 ( $<1$ )、小扫描角且波束形状无明显畸变的多波束透镜的设计要求, 本文提出了一种双折射面介质透镜轮廓曲线的设计方法, 并给出了具体的设计过程和关键的设计公式。利用该方法设计的透镜, 不仅易于加工, 而且纵向尺寸短。为验证设计方法的可行性, 加工了透镜实物并进行了透镜多波束性能和单脉冲性能的测试, 各项测试结果满足设计要求。由此证明, 本文提出的多波束介质透镜的设计方法是切实可行的。

## 参 考 文 献

- [1] 张凤林, 丁晓磊, 刘昊, 三模共口径天线, 专利号: ZL 200610120765.4
- [2] ANN LEE PEEBLES, A Dielectric Bifocal Lens for Multibeam Antenna Applications, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-36, No.5,pp. 599- 606, May 1988
- [3] F.S.Holt and Mayer, A Design Procedure for Dielectric Microwave Lenses of Large Aperture Ratio and Large Scanning Angle,*IRE Trans. Antennas Propagat.*,pp.25-30,January 1957
- [4] 丁晓磊, 徐磊, 张凤林, 毫米波双通道多模单脉冲馈源的设计, 2009 年全国微波毫米波会议论文集, pp.598-601

作者简介:

丁晓磊, 女, 博士, 主要研究方向为天线设计。

徐磊, 男, 硕士, 主要研究方向为天线设计。

## 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](http://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](http://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](http://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>