

# 一种有效的星载可移点波束天线方案

闫鲁滨<sup>①</sup> 曾小金<sup>②</sup>

(航天科技集团五院总体专业部,北京 100086)

**摘要** 主要论述及计算了一种同步轨道通信卫星用可移点波束天线方案,介绍了方案的布局,采用物理光学法对扫描特性进行了计算,讨论了在采用该方案时遇到的问题并提出了解决手段。

**关键词** 可移点波束天线 卫星 软波导

## 1 需求背景

为了实现对航海、航空、地面移动目标的大容量不间断通信,卫星上采用了可移点波束天线,其中机械可移点波束由于机构相对简单,可靠性强获得了广泛的应用。应用机械可移点波束天线除了解决二维转动机构外,还需解决射频信号由卫星到馈源的传输问题。传统的解决方案是采用旋转关节及软波导。在星上采用旋转关节及软波导,远比地面问题复杂,需要解决真空润滑及长寿命高可靠性工作问题。同时这些部件的引入又带来了附加的电性损耗。

在同步轨道应用时,天线仅需转动 $\pm 8^\circ$ 即可覆盖地球所有区域,为了避开上述困难我们考虑采用了另一种解决方案实现波束的移动。在该方案中馈源保持固定,仅反射面在方位与俯仰面上 $\pm 4^\circ$ 的角域内转动,即可实现波束在 $\pm 8^\circ$ 区域内的移动。由于馈源在波束扫描过程中是保持不动的,无需使用旋转关节、软波导等部件,大大提高了工作的可靠性。本文介绍了该方案的布局,采用物理光学法对扫描特性进行了计算,讨论了在采用该方案时遇到的问题,并提出了解决手段。

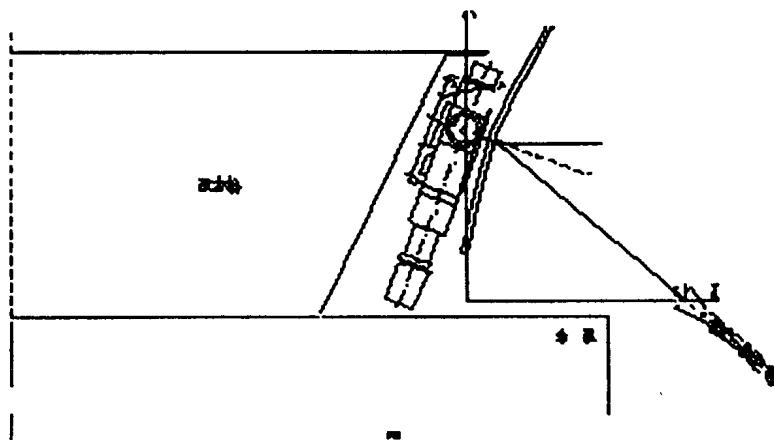
## 2 可移点波束天线方案

在我们的方案中,天线馈源及连接波导保持不动,仅天线反射面绕垂直轴及方位轴转动较小的角度。连接波导采用较短的硬波导,损耗较小,而功率容量超过几百瓦。馈源通过支架架于抛物面的斜下方。馈源系统由辐射器、方圆变换器、圆极化器、扭波导、正交模变换器组成。正交模变换器的收发口分别通过硬波导及两节半软波导联接到多工器上,天线系统实现收发共用。天线的配置如图 1 所示。

<sup>①</sup>研究员

<sup>②</sup>工程师

收稿日期:2002-09-04



天线配置图（可调波束天线）

图 1 Ka 波段可移点波束天线配置图

### 3 可移点波束天线波束移动时计算的天线方向图

#### 3.1 波束位于中心位置的天线方向图

以图 1 的天线参数,采用物理光学法计算得到天线的次级方向图,如图 2、图 3 所示。图中增益值已减去了 2 dB 的各项损耗。

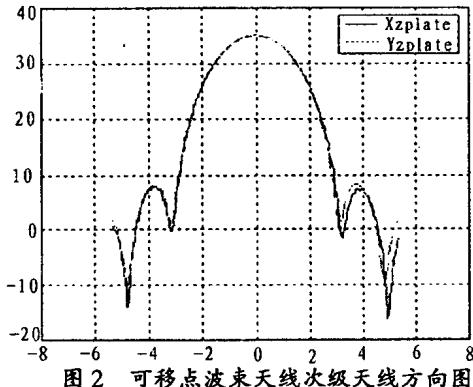


图 2 可移点波束天线次级天线方向图  
20GHz 下行, 波束于中心位置)

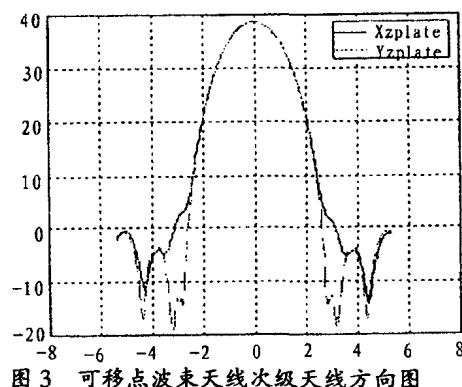


图 3 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 20GHz 上行, 波束于中心位置)

#### 3.2 波束偏离中心位置的天线方向图

波束偏离可移范围中心时计算的辐射方向图如下。增益数值已减去了 2 dB 的各项损耗。为了分开圆极化对波束指向的影响,在以下的计算中均采用线极化。

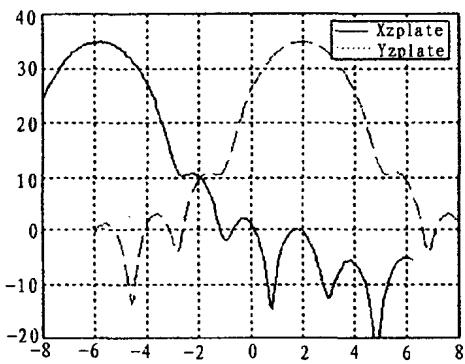


图4 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 20GHz 波束上偏 8°)

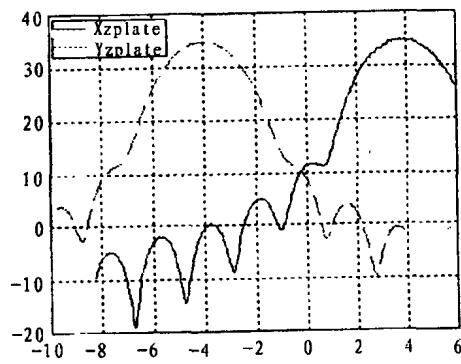


图5 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 20GHz 波束上偏 8°)

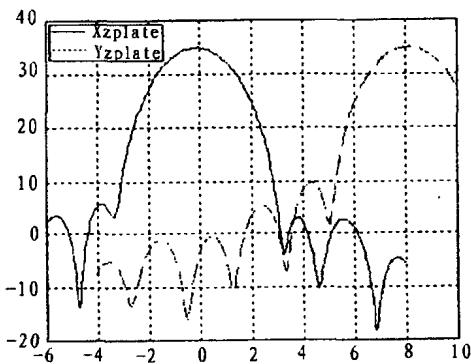


图6 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 20GHz 波束下偏 8°)

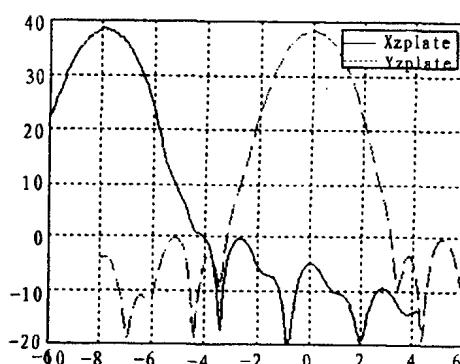


图7 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 20GHz 波束侧偏 8°)

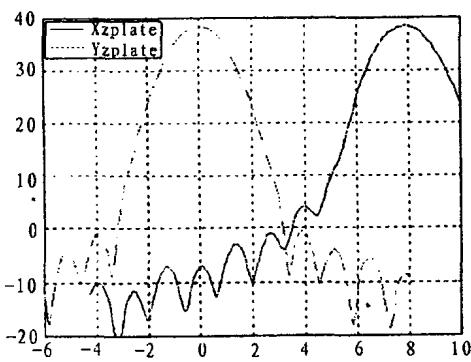


图8 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 30GHz 波束上偏 8°)

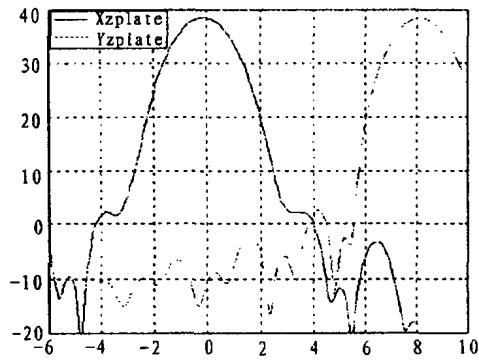


图9 可移点波束天线次级天线方向图  
(频率 30GHz 波束侧偏 8°)

## 4 计算结果分析及结论

由图2到图9可以看到,可移点波束天线波束移动所造成的覆盖区增益损失,20 GHz时,最大不超过0.5 dB. 30 GHz时,变化可以忽略。波束移动造成的增益影响是不大的。

波束移动使天线的副瓣电平有所上升。理论值30 GHz仍可低于-25 dB, 20 GHz时低于-22 dB, 考虑到各种因素的影响, 实际值要高于这个数值。

## 5 方案可实现性遇到的问题及解决的方法

本方案中天线波束的移动依靠反射面的偏转来实现。馈源系统是保持不动的。如果反射面的转心与抛物面的投影中心重合, 当反射面在XZ面转 $\alpha$ 角时, 根据几何光学的原理, 波束中心在XZ面相同方向约转 $2\alpha$ 角。但在实际的结构中, 反射面的转心无法与抛物面的投影中心重合, 反射面的转心位于过抛物面的投影中心的法线的延长线上。在这种情况下, 抛物面的转角与波束的转角间存在比较复杂的数学关系, 详见附录。在实际执行动作时, 可将抛物面的转角与波束的转角间的数学关系编为程序置于地面控制机中, 根据所需的波束转角换算成反射面需转角度, 再作为指令发给天线控制器。

## 6 反射面旋转角度与波束指向间关系的理论计算

### 反射面旋转角与波束指向角的关系的计算

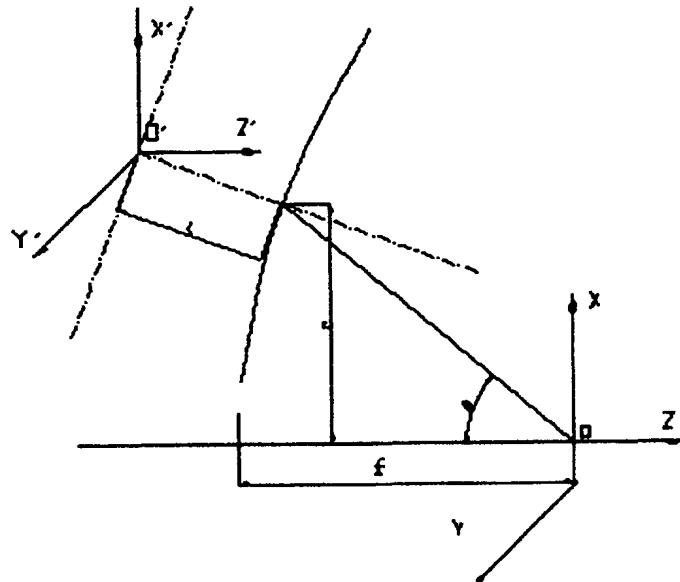


图 10 可移点波束天线坐标关系

入射线的方向为馈源到反射面中心点连线的方向,由此点抛物面法线的方向根据几何光学原理,可以得到反射线方向也即波束的指向。天线的原始坐标位置放于焦点(如图 10),经过反射面的旋转后,坐标移于反射面的中心点与法线坐标重合。只要求得原焦点在新坐标下的坐标值,即可求得入射线、反射线,也即是波束方向。

原始坐标到新坐标经过几个过程:

(1) xyz 坐标平移到旋转轴 x'y'z'

$$x_1 = x - [L \sin(B/2) + h]$$

$$y_1 = y$$

$$z_1 = z + [L \cos(B/2) + (f - h^2/4f)]$$

(2)  $x_1$  轴离开  $z_1$  轴转  $-B/2$  角

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(B/2) & 2 & \sin(B/2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(B/2) & 0 & \cos(B/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

(3)  $y_2$  轴离开  $z_2$  轴转  $\beta$  角( $\beta$  为反射面方位转角)

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

(4)  $x_3$  轴离开  $z_3$  轴,转  $\alpha$  角( $\alpha$  角为反射面俯仰转角)

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

(5) 坐标原点平移到抛物面的中心点

令:

$$D_1 = \begin{bmatrix} -L \sin(B/2) + h \\ L \cos(B/2) + (f - h^2/4f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} \cos(B/2) & 0 & \sin(B/2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(B/2) & 0 & \cos(B/2) \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

化简以上过程为：

$$U_5 = D_4 \times D_3 \times D_2 \times (U + D_1) + D_5$$

取  $U = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

代入上式，得到原焦点在新坐标下的坐标值  $U_5$ ，相应的反射线单位矢量为：

$$R = \begin{bmatrix} -X_5 \\ -Y_5 \\ -Z_5 \end{bmatrix} / |U_5|$$

这个单位矢量在 xyz 坐标下的单位方向矢量为：

$$A = [D_4 \times D_3 \times D_2]^{-1} \times R$$

则波束指向角表达如下：

$$\text{俯仰角 } \text{Vert} = \arctan(Ax/Az)$$

$$\text{方位角 } \text{Hori} = \arctan(Ay/Az)$$

在使用反射面方向图计算程序时，需要知道反射面旋转后馈源的位置（原抛物面焦点），在旋转后的反射面坐标（原点在旋转后反射面的焦点）的坐标值  $U_6$ ，可以得到

$$U_6 = D_4 \times D_3 \times (U + D_1) - D_1$$

分别使用完全不同的两种方法计算反射面旋转角与波束指向角的关系，所得的结果精确的一致，表明计算结果是正确的。

## 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>