

# 双轴定位点波束天线波束指向计算

田 浩<sup>1</sup>, 赵 阳<sup>1</sup>, 孙 京<sup>2</sup>, 魏 承<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国航天科技集团公司五院总体部, 北京 100094)

**摘要:** 可移点波束天线是卫星系统对目标定位和跟踪的重要组成部件, 该天线依靠双轴定位机构来实现在俯仰和方位两个方向上精确运动和定位。由于天线波束反射中心与定位机构转动中心不重合, 双轴定位机构偏转角与波束中心指向角间存在复杂的数学关系。针对点波束天线指向计算问题进行了详细的分析, 获得了一种基于单变量非线性方程求根的迭代计算方法, 并对算法的正确性进行了仿真计算验证。

**关键词:** 可移点波束天线; 双轴定位机构; 波束指向计算

**中图分类号:** V433    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1328(2007)05-1215-04

## 0 引言

为实现对航海、航空、地面移动目标的大容量不间断通信, 可移点波束天线在现代通信卫星上得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>, 卫星天线的定向运动通过分解为相互垂直的双轴旋转运动来实现。

双轴定位机构 (Two - Axis Antenna Positioning Mechanism, TAAPM) 在应用于天线二自由度独立转动并获得精确空间指向定位方面, 具有结构简单、可靠性高、精度高的特点, 因此这种双轴定位机构在国外通信卫星和数据中继卫星上已经有了较多应用<sup>[3,4]</sup>。中国航天科技集团在中星 22 上首次采用了自主开发研制的偏馈双反射面 Ka 可移点波束天线, 该天线系统中就应用双轴定位机构来实现天线面的空间运动<sup>[5,6]</sup>。

该可移点波束偏馈双反射面天线波束定位原理如图 1 所示(图示中为天线反射线的初始指向, 未画出馈源及副面天线), 通过双轴定位机构转角的大小的变化可以改变天线波束指向, 从而实现对地定向或目标跟踪。

图 1 中,  $O_1$  为卫星中心,  $A$  点为副面天线焦点位置, 初始时反射抛物面的焦点与  $A$  重合,  $B$  点为双轴定位机构的转动中心,  $C$  点为抛物面天线反射中心,  $CD$  即为反射波束的空间指向, 其指向角在卫星本体坐标系下的方位角和俯仰角描述,  $L$  为  $BC$  间的距离。在此系统中, 馈源系统保持不动, 反射波束指向

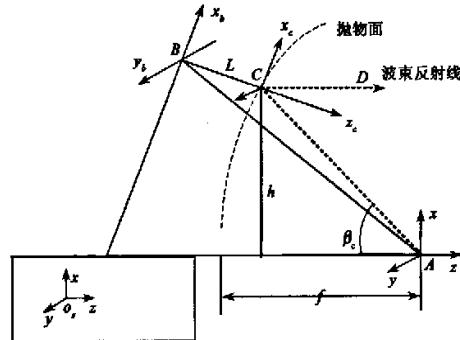


图 1 Ka 点波束天线双轴定位原理示意图

Fig. 1 Orientation principle of the Ka band antenna

的改变依靠抛物反射面的偏转来实现<sup>[5]</sup>。

在将双轴定位机构应用于点波束偏馈双反射面天线时, 由于抛物面天线反射中心与定位机构转动中心无法重合, 转动中心位于过抛物面天线的反射中心的法线延长线上, 导致天线波束的空间指向角与双轴定位机构转角间的变换表现为复杂的非线性关系。

## 1 天线波束指向计算

已知双轴定位机构转角求反射线的空间指向比较容易, 而根据反射线的空间指向计算机构转角则可以归结为一个非线性方程求解问题, 无法得到方程的解析解, 只能通过数值方法得到数值近似解。

取如图 1 所示坐标系,  $A - xyz$  为焦点坐标系,

$B - x_b y_b z_b$  为定位机构转动坐标系,  $C - x_c y_c z_c$  为抛物面反射中心固联坐标系, 图中  $h$  为初始时天线反射中心在焦点坐标系  $A - xyz$  下到  $yz$  平面的高度,  $\beta_c$  为入射线  $AC$  与  $yz$  平面的夹角,  $f$  为反射抛物面的焦距。则在  $A - xyz$  坐标系下, 反射抛物面方程为:

$$x^2 + y^2 = 4f(z + f) \quad (1)$$

$B$  点的坐标为

$$\begin{bmatrix} L \sin(\beta_c/2) + h \\ 0 \\ -L \cos(\beta_c/2) - (f - h^2/4f) \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.1 从定位机构转角计算波束指向

若双轴定位机构转角大小为绕  $y_b$  轴的转  $\alpha$  角, 绕  $x_b$  轴的旋转角  $\beta$ , 空间任意点在坐标系  $C - x_c y_c z_c$  与  $A - xyz$  的变换可以通过方向余旋矩阵及平移向量来描述:

$$U_4 = D_3 \cdot D_2 \cdot D_1 \cdot (U + T_1) + T_4 \quad (3)$$

式中:  $U$  - 空间任意点在  $A - xyz$  的坐标;

$U_4$  - 空间任意点在  $C - x_c y_c z_c$  的坐标;

$T_1$  - 从点  $A$  到点  $B$  的平移向量(式 4);

$T_4$  - 从点  $B$  到点  $C$  的平移向量(式 5);

$D_i$  - 旋转变换矩阵( $i = 1, 2, 3$ )(式 6、7、8)

$$T_1 = [-L \sin(B/2) - h, 0, L \cos(B/2) + (f - h^2/4f)]^T \quad (4)$$

$$T_4 = [0 \ 0 \ -L]^T \quad (5)$$

$$D_1 = D_{1y} = \begin{bmatrix} \cos(-B/2) & 0 & -\sin(-B/2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-B/2) & 0 & \cos(-B/2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D_2 = D_{2x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D_3 = D_{3y} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

取  $U = [0 \ 0 \ L]^T$  为馈源焦点在天线焦点坐标系下的坐标, 则代入上式(3), 得到原焦点在  $C - x_c y_c z_c$  坐标系下的坐标  $U_4$ , 相应的反射线  $CD$  的单位矢量在  $C - x_c y_c z_c$  下的分量形式为:

$$R_c = [-x_4 \ -y_4 \ -z_4]^T U_4 / |U_4| \quad (9)$$

该单位矢量在  $A - xyz$  坐标下的分量可表示为:

$$\begin{aligned} R_a &= [x_{Ra} \ y_{Ra} \ z_{Ra}]^T \\ &= [D_3 \ D_2 \ D_1]^T \cdot R_c \end{aligned} \quad (10)$$

波束指向角用方位角  $hori$  和俯仰角  $vert$  表示为:

$$(hori, vert) = [\tan^{-1}(y_{Ra}/z_{Ra}), \tan^{-1}(x_{Ra}/z_{Ra})] \quad (11)$$

应用上述方法只能完成从机构转角到天线波束指向的计算, 而从天线波束指向计算所需的机构转角则存在一定的困难, 一般均通过预先编制计算机机构转角与波束指向角的对应关系表的方案来解决此问题。

### 1.2 从波束指向角反解机构转角

根据几何光学原理可知, 如图 2 所示的直线  $BC$ 、 $CD$ 、 $BA$ 、 $CA$  共面, 设反射线  $CD$  的反向延长线与  $BA$  交于  $E$  点。

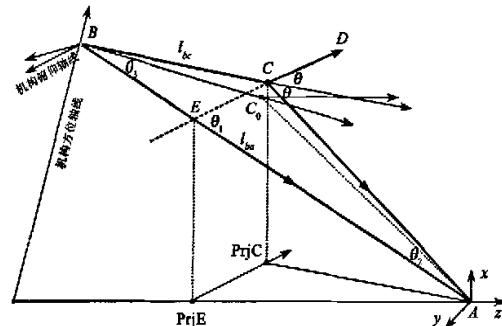


图 2 从波束指向角反解机构转角示意图

Fig. 2 Calculation of the rotate angle by beam pointing

设平面图形中的夹角如图 2 所示, 则向量  $\overrightarrow{BA}$  已知, 向量  $\overrightarrow{CD}$  的单位向量已知, 有

$$\cos(\theta_1) = \frac{\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{CD}}{\|\overrightarrow{BA}\| \|\overrightarrow{CD}\|} \quad (12)$$

由平面三角几何有

$$\theta_1 + \theta_2 = 2\theta \quad (13)$$

$$\frac{\sin(\pi - \theta)}{l_{ba}} = \frac{\sin(\theta)}{l_{ba}} = \frac{\sin(2\theta - \theta_1)}{l_{ba}} \quad (14)$$

上式是单变量  $\theta$  的非线性超越函数, 可变形为:

$$f(\theta) = l_{ba} \sin(\theta) - l_{ba} \sin(2\theta - \theta_1) = 0 \quad (15)$$

上述非线性方程可由非线性方程的数值解法求得, 这样将从指向角到定位机构转角的双变量变换转化为以  $\theta$  为单变量的非线性方程求根问题, 可以证明方程(15)在  $[0, 45]^\circ$  范围内有唯一根。从而点  $E(x_E, y_E, z_E)$ 、点  $C(x_c, y_c, z_c)$  的坐标可由三角

形的正弦定理通过下式求得:

$$l_{\alpha} = l_{\alpha} \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta_1)}, l_{\alpha} = l_{\alpha} \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta_3)} \quad (16)$$

$$E = B + l_{\alpha} \frac{\overrightarrow{BA}}{\|\overrightarrow{BA}\|},$$

$$C = E + l_{\alpha} \frac{\overrightarrow{CD}}{\|\overrightarrow{CD}\|} \quad (17)$$

从而得到在坐标系  $A - xyz$  下描述的向量  $\overrightarrow{BC}$  为:

$$\overrightarrow{BC}_A = C - B \quad (18)$$

而  $\overrightarrow{BC}$  在天线面坐标系  $C - x_c y_c z_c$  下可描述为  $[0 \ 0 \ l_{\alpha}]^T$ , 因而有:

$$(D_1 D_2)^T \cdot [0 \ 0 \ l_{\alpha}]^T = D_1 \cdot \overrightarrow{BC}_A \quad (19)$$

从而有:

$$\begin{bmatrix} l_{\alpha} \sin \alpha \\ -l_{\alpha} \cos \alpha \sin \beta \\ l_{\alpha} \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} = D_1 \cdot \overrightarrow{BC}_A \quad (20)$$

表 1 验证计算结果

Table 1 Verification of the calculation results

	反射线指向角	双轴定位机构转角 $(\alpha, \beta)$	验证反射线指向角
1	(0, -8)	(-0.09234, +3.90566)	(+0.00000, -8.00000)
2	(0, 8)	(-0.09234, -3.90566)	(+0.00000, +8.00000)
3	(8, -8)	(+3.58039, +3.98954)	(+8.00000, -8.00000)
4	(8, 8)	(+3.58039, -3.98954)	(+8.00000, +8.00000)
5	(8, 0)	(+3.70135, +0.00000)	(+8.00000, +0.00000)
6	(-8, 0)	(-3.69234, +0.00000)	(-8.00000, +0.00000)
7	(-8, 8)	(-3.75462, -3.78790)	(-8.00000, +8.00000)
8	(-8, -8)	(-3.75462, +3.78790)	(-8.00000, -8.00000)
9	(0, 0)	(-0.00000, +0.00000)	(-0.00000, +0.00000)

\* 天线反射线初始指向(0,0), 表中单位(°)

### 3 结论

可移点波束抛物面天线反射中心与定位机构转动中心不重合导致天线面反射线空间指向角与双轴定位机构转角间的变换存在复杂的非线性关系, 本文在分析了从定位机构转角到天线反射线的空间指向角计算方法后, 利用空间解析几何方法, 将天线定位机构转角与反射线指向角间的双变量变换关系转化为针对单变量的非线性方程求根问题, 从而简化了从空间指向角到机构转角的计算复杂性, 所采用的方法同时也便于编程。通过验证计算证明了方法的有效性, 本文所采用的计算方法在中星 22 地面应用软件开发中得到成功应用。

通过上式即可求得双轴机构所需转角  $(\alpha, \beta)$ 。

### 2 计算验证

考虑到该天线系统应用在地球同步卫星, 抛物面天线的波束指向角在空间的变化范围并不大, 仅  $(-8, 8)$ °左右, 双轴定位机构的转角范围约为  $\pm 4$ °。因此验证计算时机构转角的取值范围限制在  $\pm 4$ °内进行。

根据上述方法, 编写 C 程序进行验证计算, 其中针对(15)所描述的非线性方程采用牛顿-拉斐尔迭代法, 计算中的相关量均采用双精度变量。

验证计算过程为, 输入抛物面天线波束反射线相对星本体的方位、俯仰角, 输出驱动机构转角, 然后根据计算所得机构转角反算天线反射线的指向角, 验证计算结果如表 1 所示(计算结果保留 5 为小数)。

### 参考文献:

- [1] 刘明治, 高桂芳. 空间可展开天线结构研究进展[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 82-87 [LIU Ming-zhi, GAO Gui-fang. Advances in the study on structure for space deployable antenna[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(1): 82-87]
- [2] 贾杰, 周凤岐, 周军. 卫星天线定向复合控制全物理仿真系统误差及模型分析[J]. 宇航学报, 2006, 27(2): 126-130 [JIA Jie, ZHOU Feng-qi, ZHOU Jun. Satellite antenna pointing complex controlling full-physical simulation system error model and its examination analysis[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(1): 126-130]
- [3] Nakamaru K, Kondo K, Katagi T, Kitahara H, Tanaka M. An overview of Japan's engineering test satellite VI (ETS-VI) project[J]. ICC 89, BOSTONICC/89. Conference Record, 1989, 3: 1582-1586
- [4] 郭小清, 杜云飞. 卫星天线双轴定位机构建模与仿真[J]. 航空计算技术, 2004, 34(3): 87-89 [YAN Xiao-qing, DU Yun-fei.

Modeling and simulating on two-axes position mechanism of satellite antennas[J]. Aeronautical Computer Technique, 2004, 34(3): 87 - 89]

[5] 闫鲁滨,曾小金. 一种有效的星载可移点波束天线方案[J]. 空间电子技术, 2002, (4): 53 - 58 [YAN Lu-bin, ZENG Xiao-jin. A validated scheme of satellite carried antenna with spot beam[J]. Space Electronic Technology, 2002, (4): 53 - 58]

[6] 李长江,廖瑛. 卫星天线双轴定位系统虚拟样机动力学仿真[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(4): 52 - 56. [LI Chang-jiang, LIAO Ying. The dynamic simulation of the virtual prototype of the two-axes position mechanism for satellite antennas[J]. Chinese Space Sci-

ence and Technology, 2005, 25(4):52-56]



作者简介:田浩(1968-),男,哈尔滨工业大学副教授,飞行器设计在读博士研究生,研究方向为复杂航天器动力学分析与设计。

通信地址：哈尔滨工业大学 359 信箱  
(150001)

电话：(0451)86402079

E-mail: dongda@hit.edu.cn

## Beam Pointing Calculation of a Dual-axis Oriented Antenna

TIAN Hao<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, SUNG Jing<sup>2</sup>, WEI Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, the Fifth Academy, Beijing 100094, China

**Abstract:** Movable antenna with spot beam is a key component in the pinpointing and tracking of the ground object through a satellite, it uses a dual-axis orienting mechanism to realize the moving and pointing in the yaw and pitch channels. Due to the nonidentity of the reflection center and the rotation center of the mechanism, it induces a complex mathematical relation between the mechanical deflection angle and the pointing angle. This paper focuses on a detail analysis of the pointing calculation of the mentioned antenna, and introduces an iterative arithmetic aiming at the single variable nonlinear equation, and validates the method through a simulation in the end.

**Key words:** Movable antenna with spot beam; Dual axis orienting mechanism; Pointing calculation

(上接第 1174 页)

## Polynomial Guidance Law for Lunar Soft Landing

SUN Jun-wei, CUI Ping-yuan

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** With the assumption that vertical optimal landing trajectory can be represented as three-order polynomial, explicit guidance law is designed for lunar soft landing according to open-loop optimization criterion. The explicit expression of thruster directional angle, that is control variable, is obtained by analyzing the geometrical relation of acceleration vectors. The guidance law proposed in this paper is function of local time that is relative to lander's state variable and landing final constraint only. The guidance law needs no iteration, which is easy to be implemented by suboptimum closed-loop real-time control.

**Key words:** Lunar soft landing; Polynomial guidance

## 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>