



# 基于三维空间直线拟合的卫星天线动态精密校准方法研究

陈天立<sup>1</sup> 赵建勋<sup>2</sup> 高杨<sup>1</sup> 荆伟<sup>1</sup>

(1 中国人民解放军 61081 部队 北京 100094;2 装甲兵工程学院 北京 100072)

**摘要:** 卫星天线的调试、校准都必须在关停的状态下实施,给日常的检修工作中带来了很大的不便。提出了利用全站仪观测实时运行天线的抛物面、馈源上安装的部分反射片坐标,对天线椭圆抛物型面进行拟合及对馈源三维直线进行拟合,得到瞬时的直线方程,计算出瞬时的准确的天线指向,解决动态天线在工作状态下的精密校准问题。经实际检验,效果较为理想。

**关键词:** 天线动态精密校准;椭圆抛物型面拟合;三维空间直线拟合

中图分类号: TN82 文献标识码: B

## Research of satellite antenna dynamic precision calibration method based on the three-dimensional straight-line fitting

Chen Tianli<sup>1</sup> Zhao Jianxun<sup>2</sup> Gao Yang<sup>1</sup> Jing Wei<sup>1</sup>

(1. The 61081 Group of PLA, Beijing 100094;2 Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** The satellite antenna testing, calibration must be implemented in the state shut down, the daily maintenance work to bring a great deal of inconvenience. This paper presents real-time operation of Total Station observations of the parabolic antenna, installed on the part of the feed reflector coordinates, elliptical parabolic antenna surface fitting and three-dimensional straight-line fitting on the feed, get the instantaneous linear equations to calculate the instantaneous and accurate antenna pointing, solve the dynamic state of the antenna in the work of precision calibration problems. The real test, the effect is better.

**Keywords:** antenna dynamic precision calibration; elliptic parabolic surface fitting; line fitting three-dimensional space

## 0 引言

现有的桁架式卫星天线口径较大,对天线形面精度要求高。在经过一段时间使用之后,由于设备老化及隙动差影响,天线位置指向会产生一定的偏差,需要实时进行校准。现有的天线调试、校准工作都必须在关停天线的状态下实施,然而天线大都是在实时在线工作,很难满足停机校准的要求。

为解决天线正常工作状态下的校准问题,本文提出了在天线的抛物面、馈源上安装部分反射片,利用全站仪测得这些点位的坐标,进行数学拟合,建立抛物面模型<sup>[1-4]</sup>、馈源三维直线模型<sup>[5-6]</sup>,求得瞬时的直线方程,计算出瞬时、准确的天线指向,实现对卫星天线的动态精密校准方法。

## 1 测量原理

如图 1 所示。在天线的抛物面、馈源上分别安装部分反射片,在合适的位置选定 2 个点,利用 GPS 观测 2 个点,

通过与国际 IGS 站的同步 GPS 联测<sup>[7-9]</sup>,解算出这 2 点方位、坐标或者利用 2 个已知坐标点,求得这两点直线的方位角。在合适的地点架设 1 或 2 台全站仪,根据导线测量原理,利用全站仪分别对天线的抛物面、馈源上反射片中心观测,进行坐标传递,得到天线的抛物面、馈源上反射片中心的坐标,然后对这些点位坐标进行数学拟合,建立抛物面模型、馈源三维直线模型,求得瞬时的直线方程,计算出瞬时的准确的天线指向。

## 2 数学模型构建

结合架设状态下天线椭圆抛物型面的拟合,查找适合的数据处理方法,利用每分钟的星历数据,可以求得天线此时应指向的位置。

### 2.1 解算卫星经度

$$\text{卫星星下点经度: } \varphi_2 = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (1)$$

式中: X 为卫星 X 位置信息, Y 为卫星 Y 位置信息

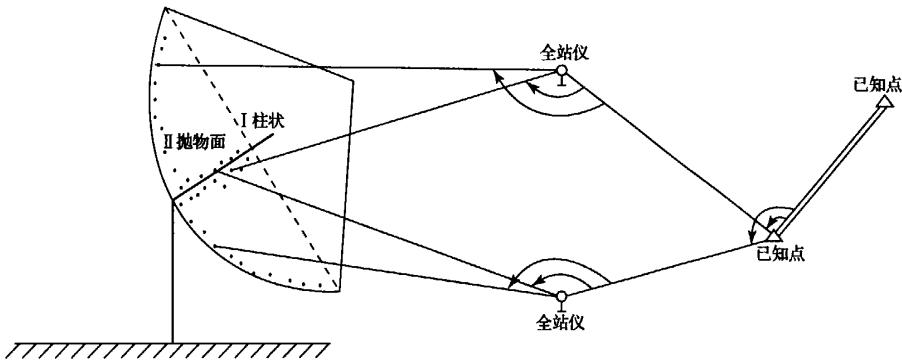


图1 示意图

## 2.2 解算天线指向

设地球站A的经纬度为 $\phi_1$ 和 $\theta_1$ ,静止卫星S的星下点S'的经纬度为 $\phi_2$ 和 $\theta_2$ 。这样, $\phi = \phi_2 - \phi_1$ ,为星下点S'对地球站A的经度差。 $R_E$ 为地球半径(6 378 km), $h_E$ 为卫星离地面上的高度, $\alpha$ 为地球站A与星下点S'在地球面上的大圆弧所对的地心角。

利用几何学和球面三角学的一些基本公式,不难求出:当A站天线对准卫星S时,其仰角 $\phi_e$ 、方位角 $\phi_a$ 与经度差 $\phi$ 、地球站纬度 $\theta_1$ 的函数关系为:

$$\tan\phi_e = \frac{(R_E + h_E)\cos\alpha - R_E}{(R_E + h_E)\sin\alpha} = \frac{\cos\alpha - \frac{R_E}{R_E + h_E}}{\sin\alpha} \quad (2)$$

$$\tan\phi_a = \frac{\tan\phi}{\sin\theta_1} \quad (3)$$

因此,方位角计算公式为:

$$\phi_a = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{\sin\theta_1}\right) \quad (4)$$

仰角计算公式为:

$$\phi_e = \arctan\left[\frac{\cos\theta_1\cos\phi - \frac{R_E}{R_E + h_E}}{\sqrt{1 - (\cos\theta_1\cos\phi)^2}}\right] \quad (5)$$

利用式(4)~式(5)对卫星星历数据进行解算,获得天线的方位和俯仰值。

## 2.3 精确模型

将卫星看成是不在赤道平面上的非静止轨道卫星,天线指向数据解算公式相应的变为:

$$\phi_e = \arctan\left[\frac{\cos\phi\cos\theta_2\cos\theta_1 + \sin\theta_2\sin\theta_1 - \frac{R_E}{R_E + h_E}}{\sqrt{1 - (\cos\phi\cos\theta_2\cos\theta_1 + \sin\theta_2\sin\theta_1)^2}}\right] \quad (6)$$

$$\phi_a = \arctan\left(\frac{\sin\phi\cos\theta_2}{\cos\phi\cos\theta_2\sin\theta_1 - \cos\theta_1\sin\theta_2}\right) \quad (7)$$

式中: $\phi_e$ 为天线俯仰角; $\phi_a$ 为天线方位角。

式(6)~式(7)中,由于要使用到卫星的星下点经纬度,我们首先要利用坐标转换将卫星星历数据XYZ转换成BLH坐标。使用的公式如下:

$$L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

$$B = \arctan\left\{\frac{Z(N + H)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)[N(1 - e^2) + H]}}\right\}$$

$$H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N$$

式中: $N$ 为椭球面卯酉圈的曲率半径, $e$ 为椭球的第一偏心率, $a, b$ 椭球的长短半径, $f$ 椭球扁率, $W$ 为第一辅助系数。

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \text{ 或 } e = \frac{\sqrt{2f - 1}}{f}$$

$$W = \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 B)}$$

$$N = \frac{a}{W}$$

计算纬度的时候使用迭代法可最终得到精确的数值。

## 2.4 三维直线拟合模型

设空间内方向向量为 $s = (m, n, p)$ ,且过点 $(x_0, y_0, z_0)$ 的直线方程为:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}$$

当点 $(x_i, y_i, z_i)$ 不在直线上时,分别记其在 $x$ 方向、 $y$ 方向、 $z$ 方向的误差为 $\epsilon_{i1}, \epsilon_{i2}, \epsilon_{i3}$ 。作为最佳拟合直线,必须同时考虑这3个方向的误差,根据最佳平方逼近原理,最佳直线应满足:

$$f(\epsilon_{i1}, \epsilon_{i2}, \epsilon_{i3}) = \sum_{i=1}^N (\epsilon_{i1}^2 + \epsilon_{i2}^2 + \epsilon_{i3}^2) \text{ 最小。因为各测量点}$$

在 $x$ 方向、 $y$ 方向、 $z$ 方向的误差 $\epsilon_{i1}, \epsilon_{i2}, \epsilon_{i3}$ 服从正态分布,所以最佳直线应满足:

$$\sum_{i=1}^N \epsilon_{i1} = 0, \sum_{i=1}^N \epsilon_{i2} = 0, \sum_{i=1}^N \epsilon_{i3} = 0$$

关于最速下降法求函数方程组

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N$$

的一组实根算法为:

1) 定义目标函数为:

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N f_i^2$$

2) 选取一组初值  $x_1, x_2, \dots, x_N$ 。

3) 计算目标函数值

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N f_i^2$$

4) 若  $F < \epsilon$ , 则  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$  即为方程的一组实根, 过程结束; 否则继续。

5) 计算目标函数在  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  的偏导数

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 2 \sum_{j=1}^N f_j \frac{\partial f_j}{\partial x_i}, i = 1, 2, \dots, N$$

再计算

$$D = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2$$

6) 计算

$$x_i - \lambda \frac{\partial F}{\partial x_i} \Rightarrow x_i, i = 1, 2, \dots, N$$

式中:  $\lambda = F/D$ 。

重复步骤 2)~5), 直到满足精度要求为止。

针对空间直线拟合算法, 此时方程组的个数为 1 个, 未知数的个数为 3 个。

在上述过程中, 如果  $D = 0$ , 则说明遇到了目标函数的局部极值点, 此时可改变初值再试一试。

此时方向向量  $(m, n, p)$  便可求得, 又因为直线过点

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ y_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ z_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \end{cases}$$

所以直线

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}$$

即可求得。

## 2.5 抛物面拟合模型

若在椭圆抛物面表面上测定的一系列点坐标  $[x_i \ y_i \ h_i]^T$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 满足一般二次曲面的方程:

$$a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 h + a_4 xy + a_5 yh + a_6 hx + a_7 x^2 + a_8 y^2 + a_9 h^2 = 0 \quad (8)$$

简写为:

$$a_0 + [a_1 \ a_2 \ a_3] \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{D} \mathbf{X} = 0$$

式中:  $a_0, a_1, \dots, a_9$  为待定系数,

$$\mathbf{X} = [x \ y \ h]^T,$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} a_7 & \frac{a_4}{2} & \frac{a_5}{2} \\ \frac{a_4}{2} & a_8 & \frac{a_5}{2} \\ \frac{a_5}{2} & \frac{a_5}{2} & a_9 \end{pmatrix}.$$

## 3 设计实施方案

1) 在天线调整完成后往天线的抛物面、馈源上分别安装反射片;

2) 在楼顶通视条件良好(净空、无干扰)的地点埋设 2 个 GPS 观测装置;

3) 架设 2 台双频 GPS 接收机与国际 IGS 站(北京房山、长春、武汉、西安)同步观测 3 个时段, 每个时段 4 h, 采样间隔 30 s;

4) 解算出两点的坐标及直线的方位角, 作为导线的起始坐标及起始方位角;

5) 在与天线中心位置大概等高的平方楼顶架设 2 台全站仪;

6) 选择天气良好、无风的情况下分别对天线的抛物面、馈源上反射片中心观测(在天线下一次转动前完成并记录准确时间);

7) 计算出天线的抛物面、馈源上反射片中心的坐标;

8) 按照模型对反射片中心的坐标进行拟合, 求得实时天线指向的方位角、俯仰角;

9) 根据记录的天线转动时间, 查找当时星历, 反算出当时天线指向的方位角、俯仰角;

10) 2 种结果比较, 求得差值, 完成天线的精密校准。

## 4 实测解算分析

通过对实时运行的天线进行观测与解算, 得到如表 1 所示的对比数据。

表 1 对比数据

时间	实时观测 解算值	实时星历 反算值	差值
10:00	方位角 * * * °10'49"	方位角 * * * °11'09"	-20"
	俯仰角 * * * 38'23"	俯仰角 * * * 39'33"	-70"
11:00	方位角 * * * °59'30"	方位角 * * * °59'57"	-27"
	俯仰角 * * * 54'49"	俯仰角 * * * 55'50"	-61"
12:00	方位角 * * * °52'43"	方位角 * * * °53'19"	-36"
	俯仰角 * * * 05'30"	俯仰角 * * * 06'24"	-54"
14:00	方位角 * * * °46'21"	方位角 * * * °46'59"	-38"
	俯仰角 * * * 07'17"	俯仰角 * * * 08'44"	-87"
16:00	方位角 * * * °58'50"	方位角 * * * °59'05"	-15"
	俯仰角 * * * 44'06"	俯仰角 * * * 45'01"	-55"

方位角的实时观测解算值与实时星历反算值在  $-15''$ ~ $-36''$  之间, 故方位角的改正值可选在  $-20''$ ;

俯仰角的实时观测解算值与实时星历反算值在  $-54''$ ~ $-87''$  之间, 故俯仰角的改正值可选在  $-65''$ 。

通过以上实验数据分析, 在天线转动时对天线指向的方位角、俯仰角加上一定量的改正值, 可提高天线指向精度、延长天线使用寿命, 在作业实践中有显著效果。

(下转第 111 页)

- [5] 詹国涌,张学彦.一种基于1394高速传输设备的设计[J].中北大学学报:自然科学版,2007,28(12):57-59.
- [6] IEEE Std. 1394-1995 IEEE standard for a high-performance serial bus[S]. IEEE,1995.
- [7] IEEE Std. 1394a-2000 IEEE standard for a high-performance serial bus[S]. IEEE,2000.
- [8] 张岩滨.智能SFP光模块数据诊断功能的应用[J].世界电子元器件,2002(8):40-41.
- [9] 史磊,童子权,张铁磊.基于VXI总线的虚拟仪器系统[J].国外电子测量技术,2009,28(5):25-28.
- [10] 尹安东,赵韩,孙骏.基于混合系统理论的再生制动系统控制策略研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(5):467-472.
- [11] 张玉萍,佟为明,李辰.LonWorks总线实时通信协议的研究[J].仪器仪表学报,2009,30(8):1783-1788.

#### 作者简介

潘江江,男,1985年2月出生,北京航空航天大学在读硕士,主要研究方向为光纤总线应用技术。  
E-mail:fan728@sohu.com

(上接第74)

#### 作者简介

麻美阳,女,1984年出生,硕士研究生,主要研究方向为医学生物信号处理、智能检测技术。  
Email:mfuyang0710@163.com

(上接第101页)

## 5 结论

本方法经过实际数据解算证明:使用有价值的载波相位组合定位方法解算速度快,算法简单,能够满足实时导航定位的需要,定位精度明显高于使用码伪距导航精度,虽然比许多文献介绍的应用单个载波相位定位结果稍差,但避免了整周模糊度的复杂解算过程,更适用于工程导航应用。今后的工作中,可以尝试进行进一步的应用性研究,例如:可以在求取整周模糊度时,采用载波平滑伪距方法,可以将整周模糊度求取更准确,多比较几种波长较长,噪声较小的组合,可以得到更好和更有意义的结论;还可以考虑消除一些系统误差的影响,定位解算结果,可以将精度进一步提高。

#### 参考文献

- [1] 李晓红.基于单片机的卫星天线自动定位控制系统开发与研究[D].上海:华东师范大学,2008.
- [2] 谢玉堂.宽带无线通信系统中的载波同步及天线校准研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.
- [3] 于来法,付子微.大型抛物面天线精密校准测量自动化和精度[J].测绘学报,1992,21(4):284-290.

崔玉龙,男,1967年出生,博士,副教授,主要研究方向为电力电子技术与应用、智能检测技术。

Email:cuiyulong@mail.buct.edu.cn

- [4] 陈兴权,王解先.雷达天线型面测量拟合算法[J].大地测量与地球动力学,2008,28(4):111-114,120.
- [5] BERVOETS S G,廖祥春.最佳三维拟合直线[J].测绘科技通讯,1994,17(3):38-40,25.
- [6] 胡锦泉,郭庆,陈尚松.三维轨迹曲线参数的测量算法研究[J].国外电子测量技术,2010,29(9):30-32,38.
- [7] 赵庆祥,曾丹,张之江.编码结构光技术在人脸建模中的应用[J].电子测量技术,2010,33(1):114-117,124.
- [8] 腾云龙,师奕兵.GPS载波相位测量数据的时间序列分析建模研究[J].电子测量与仪器学报,2009,23(9):18-22.
- [9] 郭伟,潘仲明,王跃科.一种基于载波相位的声呐阵列波达方向估计算法[J].仪器仪表学报,2010,33(7):1472-1477.

#### 作者简介

陈天立,1982年出生,女,福建福州人,工程师,硕士,研究方向为卫星导航。

## 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>