

# 机载火控雷达天线阵面安装误差的高精度校准方法

张虎龙, 李娟妮

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

**摘要:** 机载火控雷达天线阵面机械安装误差会导致天线阵面相对于飞机轴线的方位角和俯仰角的系统误差, 该误差的大小直接影响到飞机火控系统的命中精度。以往常采用一台全站仪进行单站定位测量, 其精度无法满足某些机载火控雷达校准精准的要求。利用两台全站仪进行前方交会的方法, 实现雷达天线阵面上参考点的空间坐标测量, 进一步计算出天线阵面相对于飞机轴线的俯仰角和方位角, 将该角度作为机载火控雷达天线阵面安装误差的校准依据, 并进行了作业方法描述和校准精度分析。结果表明, 空间坐标测量精度优于 0.2 mm, 角精度优于 0.4 mrad, 满足校准精度小于 0.9 mrad 的要求。

**关键词:** 雷达天线; 全站仪; 前方交会; 安装误差; 精度校准

中图分类号: TN95-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2011)19-0004-03

## High Precision Calibration Method to Installation Error of Airborne Fire Control Radar Antenna Array

ZHANG Hu-long, LI Juan-ni

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The installation error of airborne fire control radar antenna array may lead to the system error of the antenna array's azimuth angle and pitch angle relative to aircraft axis, however it will influence the hit precision of airborne fire control system. To calibrate the installation error, the traditional metrical method using single total station can hardly meet the calibration precision. A new method of forward intersection by using two total stations to measure the space coordinates of those reference points on the antenna array is introduced, from which the pitch angle and the azimuth between antenna array and aircraft axis are calculated and considered as the calibration criterions of the installation error of antenna array. Experimental method is introduced and calibration precision is analyzed in this paper. The test proves that space coordinates are measured with an accuracy more than 0.2 mm and angle precision greater than 0.4 mrad, which is satisfied with the calibration precision as required less than 0.9 mrad.

**Keywords:** radar antenna; total station; forward intersection; installation error; precision calibration

## 0 引言

在飞行试验过程中, 机载火控雷达天线阵面机械安装误差需要进行精确的校准, 这对于提高武器火控系统的精度有着非常重要的意义。该安装误差导致了天线阵面相对于飞机轴线方位角( $A$ )和俯仰角( $E$ )系统误差<sup>[1]</sup> (本文称为机械安装角误差, 简称角误差)。在雷达安装后和校飞之前, 需要对该方位角和俯仰角进行高精度测量, 以此作为天线阵面安装误差校准依据, 达到补偿角误差的目的。首先在天线阵面上选取测量点, 作为计算方位角和俯仰角的参考点, 然后进行参考点空间坐标的精确测量, 进一步计算雷达天线阵面的安装角度。某型机载火控雷达角误差校准精度要求小于 0.9 mrad, 该机载

火控雷达天线阵面的直径为 700~1 400 mm, 相应地要求参考点的定位精度优于 0.5 mm。对此类测量单台全站仪的定位精度只有 2~3 mm, 计算出的角精度只有 5 mrad, 难以满足校准精度要求。采用两台全站仪进行前方交会实现的单点空间坐标测量, 其定位精度优于 0.2 mm, 用该方法测量天线阵面参考点的空间坐标, 解算出的天线阵面方位角和俯仰角误差小于 0.4 mrad。

## 1 测量原理

### 1.1 空间坐标测量原理

在此, 测量原理采用前方交会测量法<sup>[2]</sup>。在雷达天线阵面前方建立测量坐标系 D-XYZ(这里为左手系, 如图 1 所示), 自两个全站仪测量站点  $A(X_A, Y_A, Z_A)$  与  $B(X_B, Y_B, Z_B)$  以前方交会方式求解天线阵面任意参考点  $P$  的平面坐标( $X_P, Y_P$ ):

$$\begin{cases} X_P = \frac{X_A \cot B + X_B \cot A - Y_A + Y_B}{\cot A + \cot B} \\ Y_P = \frac{Y_A \cot B + Y_B \cot A + X_A - X_B}{\cot A + \cot B} \end{cases} \quad (1)$$

假定测量坐标系原点与测站点A重合(即 $X_A = Y_A = 0$ ),而且Y轴与AB的水平投影重合( $Y_B = S$ , $X_B = 0$ ),则P点的平面坐标求解公式简化为:

$$\begin{cases} X_P = \frac{S}{\cot A + \cot B} \\ Y_P = \frac{\cot A}{\cot A + \cot B} \end{cases} \quad (2)$$

之后可以再解求被测天线阵面参考点P与B站(和A站)全站仪竖轴间的水平距离a(及b):

$$\begin{cases} b = \sqrt{(X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2} \\ a = \sqrt{(X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2} \end{cases} \quad (3)$$

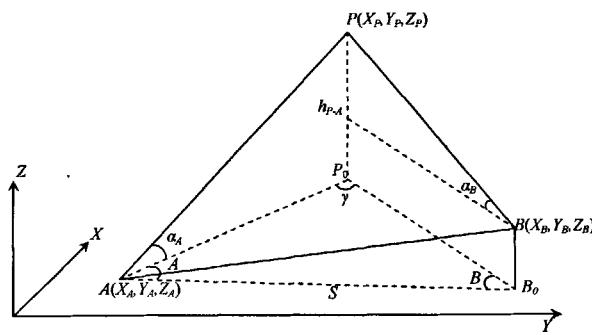


图1 前方交会测量图

采用“间接高程”法<sup>[2]</sup>求解被测天线阵面参考点P相对A站(和B站)全站仪横竖轴交点的高差 $h_{PA}$ (及 $h_{PB}$ ),得到:

$$\begin{cases} h_{PA} = btan \alpha_A \\ h_{PB} = atan \alpha_B \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 角度解算原理

在天线阵面的上下边缘选取两点作为计算俯仰角的参考点(分别为点 $P_T$ 和 $P_B$ ),同样在左右边缘选取两点作为计算方位角的参考点(分别为点 $P_L$ 和 $P_R$ );飞机轴线的两个参考点为 $P_1$ 和 $P_2$ ,如图2所示。

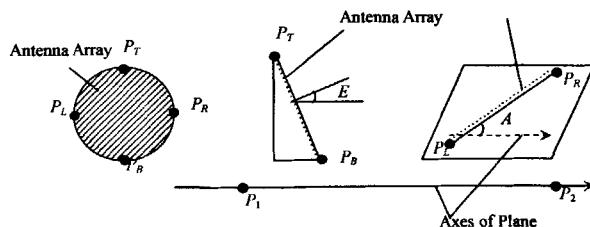


图2 角度解算原理图

假定被测参考点在D-XYZ坐标系下的测量坐标分别为: $P_T(X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1})$ , $P_B(X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1})$ , $P_L(X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1})$ , $P_R(X_{R1}, Y_{R1}, Z_{R1})$ , $P_1(X_{P1}, Y_{P1}, Z_{P1})$ , $P_2(X_{P2}, Y_{P2}, Z_{P2})$ ,

$Z_{P2})$ ,求解出直线 $P_1P_2$ 与D-XYZ坐标系X轴正向的夹角为 $\alpha$ ,将D-XYZ坐标系统绕Z轴旋转 $\alpha$ 角后,使X轴与直线 $P_1P_2$ 重合;进行坐标旋转<sup>[3]</sup>后,按式(5)计算出被测参考点在新坐标系下的坐标为: $P_T(X_T, Y_T, Z_T)$ , $P_B(X_B, Y_B, Z_B)$ , $P_L(X_L, Y_L, Z_L)$ , $P_R(X_R, Y_R, Z_R)$ , $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ , $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 。则有:

$$\begin{bmatrix} X_T & Y_T & Z_T \\ X_B & Y_B & Z_B \\ X_L & Y_L & Z_L \\ X_R & Y_R & Z_R \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T1} & Y_{T1} & Z_{T1} \\ X_{B1} & Y_{B1} & Z_{B1} \\ X_{L1} & Y_{L1} & Z_{L1} \\ X_{R1} & Y_{R1} & Z_{R1} \\ X_{P1} & Y_{P1} & Z_{P1} \\ X_{P2} & Y_{P2} & Z_{P2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

进一步得到方位角A与俯仰角E的计算公式:

$$\begin{aligned} A &= \arctan \frac{Y_R - Y_L}{X_R - X_L} \\ E &= \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Z_T - Z_B}{X_T - X_B} \end{aligned} \quad (6)$$

## 2 测量方法

### 2.1 测量系统组成

整个校准测量系统主要由2台全站仪和1台计算机组成<sup>[4]</sup>。另外,所需的附件有标准尺、卷尺、可粘贴标记、固定支座、游标卡尺等。这里采用莱卡公司生产的TPS1101型全站仪,相应的数据处理程序自行编写。TPS1101型全站仪的测角精度为 $1.5''$ ,直读精度为 $1''$ 。采用的标准尺长为3 000 mm,精度为0.02 mm。

### 2.2 测量作业方法<sup>[5]</sup>

(1)合理选择被测参考点位置,并在被测参考点位置处粘贴便于测量对准的反射标记;

(2)根据被测参考点的位置,选择合适的全站仪布设位置,使两台全站仪测量时的交会角分布在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 之间;

(3)采用平行光管法确定全站仪方位角起始方向线,将两台全站仪调焦至无穷远,并能互相看到对方的十字丝,使两台全站仪的视准轴达到平行并尽量重合,完后将两台全站仪的方位角置零;

(4)近似量取两个全站仪测站(A,B)间的距离 $S'$ ,精确到cm即可满足要求;

(5)在雷达天线阵面下方布置已经选好的

3 000 mm长的标准尺,标准尺最左端刻度线对应为点M,最右端刻度线对应为点N,并使点M和N处于同一水平线上,MN=3 000 mm;

(6) 自测站A与B按前述前方交会法,测定M,N以及被测参考点P<sub>T</sub>和P<sub>B</sub>,P<sub>L</sub>和P<sub>R</sub>,P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>的平面坐标(X',Y');

(7) 解算两测站基线的比例尺归化系数: $\lambda = MN / \sqrt{(X'_M - X'_N)^2 + (Y'_M - Y'_N)^2}$ ,此时可以计算两测站A与B间水平投影的实长S,S =  $\lambda S'$ ;

(8) 按下式计算各被测参考点的平面坐标:

$$\begin{cases} X_P = \lambda X'_P \\ Y_P = \lambda Y'_P \end{cases}$$

(9) 按前述间接高程方法解求各被测参考点的高程;

(10) 按第1.2节所述方法进行天线阵面方位角和俯仰角的解算。

### 3 精度分析及检查

采用前述方法测量基线AB长度的相对误差优于<sup>[6]</sup> $10^{-5}$ ,全站仪的测角精度高达 $1.5''$ ,在交会角比较理想的情况下,满足参考点坐标测量的精度要求;前方交会法平面点位中误差 $M_P$ 的关系式如下<sup>[7]</sup>:

$$M_P = \sqrt{\frac{m^2}{\rho^2} \cdot \frac{a^2 + b^2}{\sin^2 \gamma} + m_A^2 \left(\frac{a}{S}\right)^2 + m_B^2 \left(\frac{b}{S}\right)^2} \quad (7)$$

式中:m为内角的测角中误差;m<sub>A</sub>,m<sub>B</sub>为测站点的点位中误差。

高程中误差关系式为:

$$m_h = \sqrt{\tan^2 \alpha m_s^2 + \left(\frac{S}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \left(\frac{m_s}{\rho}\right)^2} \quad (8)$$

表1 两台全站仪交会测量结果

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>T</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>R</sub>	A/mrad	E/mrad
X/mm	8 617.8	8 575.0	8 574.4	8 571.1	8 111.9	8 993.1		
Y/mm	25 103.5	12 321.7	4 335.3	4 330.1	4 335.0	4 336.8	-5.4	5.9
Z/mm	-437.0	-252.7	1 500.4	621.1	1 061.3	1 061.4		

表2 一台全站仪单站测量结果

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>T</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>R</sub>	A/mrad	E/mrad
X/mm	8 619	8 577	8 576	8 573	8 113	8 994		
Y/mm	25 102	12 321	4 335	4 332	4 335	4 335	-3.3	3.4
Z/mm	-436	-252	1 502	621	1 062	1 062		

表3 精确检查对照表

	C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> /mm	C <sub>2</sub> C <sub>3</sub> /mm	C <sub>1</sub> C <sub>3</sub> /mm
全站仪交会测量结果	102.2	103.1	99.8
游标卡尺测量结果	102.18	103.02	99.92

精度检查主要是对机载火控雷达参考点的坐标进行检查,分两步进行。第一步是空间坐标测量结果正确性检查;第二步为相对距离法精度检查。前者采用全站仪A单站测量出6个被测参考点的空间坐标值,将结果与两台全站仪交会测量的坐标值进行比较,如果最大差异在2~3 mm范围内,说明交会测量的方法和结果是正确的,但还不能说明精度是否满足要求;接着进行第二步精度检查,在两台全站仪前方布设3个检查点C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>,C<sub>3</sub>,形成一个边长约为10 cm的等边三角形,用游标卡尺(精度为0.02 mm)将三角形三条边精确测量<sup>[8]</sup>出;通过前方交会测量出三角形的三个顶点坐标,用空间两点距离求解公式(如公式(9))解算出三角形三条边的长度,然后再与游标卡尺的测量结果进行比较,如果最大差异在0.2 mm范围内,则说明交会测量精度满足要求。

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (9)$$

### 4 实验结果

表1是基于本文所提出的全站仪交会测量方法测量出被测参考点的坐标,并且求解出机载火控雷达天线阵面的方位角A和俯仰角E;表2是基于单台全站仪测量出被测参考点的坐标,同样也得到天线阵面的方位角A和俯仰角E。将两表结果进行比较可以看出,坐标值的最大差异小于等于2 mm,方位角和俯仰角则需要与雷达自身数据进行比较,交会测量结果当作最终校准依据。

表3是进行精度检查时布设的等边三角形的三条边长结果,分别是用全站仪交会测量计算出的边长以及用游标卡尺测量出的边长。通过比较发现,两种结果的最大差异小于等于0.2 mm。天线阵面的直径为700~1 400 mm,由被测参考点的定位误差导致的角度误差小于0.4 mrad。

#### 4 结语

分数阶 Fourier 变换(FRFT)是针对非平稳信号提出的一种有效的检测方法。本文在 FRFT 的基础上提出了一种基于频域滤波的弱运动目标检测方法。该方法利用频域回波信号进行滤波,在滤除部分杂波后逆变换到时域,此时进行 FRFT 检测,能够较大地提高信杂比。与 FRFT 比较,在信杂比较小时具有较大的优势。在信杂比降低到 -4 dB 时,FRFT 基本检测不到目标,而频域滤波的方法在信杂比降低到 -9.5 dB 时仍能检测出目标。设置适当的恒虚警门限,该方法能较好地检测到目标。

#### 参考文献

- [1] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [2] OZAKTAS H M, O KUTAY M A, BOZDAGI G. Digital computation of the fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(9): 2141-2150.
- [3] 陶然, 张峰, 王越. 分数阶 Fourier 变换离散化的研究进展 [J]. 中国科学, 2008, 38(4): 481-503.
- [4] 文必洋, 王颂. 一种应用海杂波分形维检测海面目标的方法

(上接第 6 页)

#### 5 结论

试验表明,利用两台全站仪进行交会定位测量的精度能很好地满足机载火控雷达天线阵面角误差的校准要求,求解天线阵面相对于飞机轴线的俯仰角和方位角所采用的计算方法简单实用。在测量过程中要注意以下几点:全站仪测站位置保持稳定<sup>[9]</sup>;测量基线时标准尺保持水平;两台全站仪视准轴尽量重合;选择较好的交会角<sup>[10]</sup>。虽然整个作业过程工作量较大,但对于精度要求高,被测点较少,而且相对集中,测量环境变化小的工程测量问题,本文所提出的方法能予以很好的解决,并能够满足更多工程应用中的精确测量和校准问题。

#### 参考文献

- [1] 徐荣伟. 雷达天线型面检测的数据处理[D]. 长春: 长春理工大学, 2002.
- [2] 冯文灏. 近景摄影测量: 物体外形与运动状态的摄影法测定

- [J]. 华中科技大学学报, 2006(1): 68-70.
- [5] 承德保, 胡风明, 杨汝良. 利用改进分形特征对 SAR 图像目标检测方法的研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 164-168.
- [6] 刘宁波, 关键. 海杂波的多重分形判定及广义维数谱自动提取 [J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 126-131.
- [7] 何友, 关键. 雷达自动检测与恒虚警处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [8] 刘建成, 刘忠. 高斯白噪声背景下的 LFM 信号的分数阶 Fourier 域信噪比分析 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2337-2340.
- [9] SIM B L, TONG Y C, CHANG J S, et al. A parametric formulation of the generalized spectral subtraction method [J]. IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, 1998, 6(4): 328-337.
- [10] 王振力, 张雄伟. 基于分数阶谱相减的语音增强法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1096-1100.
- [11] MAURIZIO G, MAURIZIO L, MARCO L. Biparametric CFAR procedures for lognormal clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(3): 798-809.
- [12] 邹世杰, 刘锋. 基于分数阶 Fourier 变换的一种新的非均匀采样方法 [J]. 现代电子技术, 2009, 32(13): 69-72.
- [13] 李倩然, 周南. 基于频域滤波数字均衡器的设计 [J]. 电子设计工程, 2011(2): 162-164.

[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.

- [3] 唐泽圣, 周嘉玉. 计算机图形学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [4] 王晋疆, 邱旭, 金素坤, 等. 电子经纬仪工业测量系统及精度分析 [J]. 兵工学报, 2002, 23(3): 392-394.
- [5] 王晋疆, 刘文耀, 蔡怀宇, 等. 电子经纬仪工业测量系统的布设 [J]. 天津大学学报, 2003, 36(6): 757-760.
- [6] 龙华伟, 翟超. 空间前方交会法及其在测试技术中的应用 [J]. 计测技术, 2005, 25(6): 51-54.
- [7] 刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1822-1830.
- [8] 李宗春, 李广云, 汤延松, 等. 电子经纬仪交会测量系统在大型天线精密安装测量中的应用 [J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 26-29.
- [9] 黄桂平, 李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究 [J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 256-260.
- [10] 刘建新. 电子经纬仪测角原理及其在航天器检测中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2007, 24(2): 116-120.

作者简介: 张虎龙 男, 1979 年出生, 湖南岳阳人, 工程师。研究方向为光电测试、工程测量、近景摄影测量。

## 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>