

DOI:10.13203/j.whugis20180064



文章编号:1671-8860(2019)10-1449-08

# 基于俯仰轴相交和球拟合的天线旋转中心测量方法

李宗春<sup>1,2</sup> 路志勇<sup>2</sup> 郭迎钢<sup>1</sup> 张冠宇<sup>1</sup> 何 华<sup>1</sup> 冯其强<sup>1</sup>  
陈少卿<sup>2</sup> 王俊威<sup>1</sup>

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室,河北 石家庄,050081

**摘 要:**针对传统天线旋转中心测量时,俯仰轴生成方式不严密对其精度和可靠性产生不利影响的问题,提出了俯仰轴相交和球拟合两种新的旋转中心测量方法。对不同方位下标志点绕俯仰轴的运动轨迹进行圆拟合,得到含有方位信息的俯仰轴,多条俯仰轴求交点作为旋转中心,称之为俯仰轴相交法,较传统方法可靠性更高。对标志点的运动轨迹进行球拟合,取所有球心的均值作为旋转中心,称之为球拟合法,避免了圆拟合及求交点的过程,方法更为严密。以 3 台  $\varphi$  3 m 上行阵天线为实验对象,应用全站仪和工业摄影测量技术获取标志点在规划姿态下的坐标,采用两种新方法处理观测数据,均得到了内符合精度达亚毫米级的旋转中心。

**关键词:**上行天线组阵;本地连接测量;天线旋转中心;工业摄影测量;俯仰轴相交;球拟合

**中图分类号:**P258      **文献标志码:**A

上行天线组阵技术<sup>[1-2]</sup>利用多台天线向同一个深空探测器发射上行信号<sup>[3]</sup>,具有提升系统性能、增强可操作性、降低成本和提高系统运行灵活性等明显优势<sup>[4-5]</sup>。为了实现各发射信号在目标处的同相合成,需要精确测定各天线参考点的相对位置<sup>[6]</sup>。具有长基线的天线阵可以支持相关的科学应用,如国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)的建立和维持<sup>[7]</sup>、深空探测、射电天文学研究等。ITRF 的建立和维持需要综合利用甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、多普勒轨道学与无线电定位集成卫星(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, DORIS)等空间大地测量技术来实现<sup>[8]</sup>,多种大地测量技术的综合利用要求将相应的观测台站并置<sup>[9]</sup>。并置台站的本地连接<sup>[10]</sup>误差是构建毫米级精度地球参考框架的重要影响因素<sup>[11-12]</sup>,这就需提高天线参考点测量结果的精度和可靠性。为此,本文分析了传统测量方法所存在的缺陷,并就如何获取精密、可靠的天线参考点进行了深入的探讨。

天线旋转中心<sup>[13]</sup>是指天线方位轴与俯仰轴的交点,通常位于天线内部,不易直接观测,一般通过先观测天线上的标志点,再采用相关算法间接得到。标志点的布设、观测方法以及数据处理方法直接影响着旋转中心的精度和可靠性。

国内外许多学者对天线旋转中心测量方法进行了研究。文献[14]分析讨论了在天线方位旋转受限的条件下,轴拟合、圆拟合等的几何条件对旋转中心精度的影响。文献[15]和文献[16]对 VLBI 天线参考点的自动监测进行了研究。文献[17]通过三维空间圆拟合来获取方位轴和俯仰轴,两轴相交得到 VLBI 天线的旋转中心。文献[18]采用旋转天线的方法,运用最小二乘曲线拟合得到旋转中心,外符合精度达到 1 cm。文献[19]在上海天文台余山  $\varphi$  25 m 射电望远镜归心测量中,对测量结果进行拟合,取俯仰轴与方位轴交点作为旋转中心,外符合精度达到 1 mm。文献[20]在上海天文台  $\varphi$  65 m 天马望远镜的方位轴和俯仰轴正交度测量中,通过不同的拟合方式求取方位轴和俯仰轴,对比了各拟合方式的特点。文献[21]对国家授时中心吴平站  $\varphi$  40 m 天线的旋转中心进行了测定,在 2000 国家大地坐标系下的点位精度优于 8 mm。文献[22]对利用 GNSS

数据监测 VLBI 天线进行了仿真分析,期望对旋转中心实现 1 mm 级的监测。

以上文献大多应用全站仪测量天线上标志点、拟合方位轴和俯仰轴,取两轴交点为旋转中心,如图 1 所示。此方法存在两个缺陷:①标志点数目较少,易受测量误差、结构变形等干扰,测量结果不可靠;②生成俯仰轴的方式不够严密,主要表现为拟合俯仰轴时只在一个方位下进行观测,且标志点轨迹至多能覆盖 1/4 圆周,不利于圆心的准确拟合,而且受自重变形等因素的影响,用圆拟合标志点运动轨迹会引入模型误差。以上因素导致俯仰轴的测量结果可靠性不高,而方位轴的拟合不受这些因素的影响,这就导致方位轴和俯仰轴精度不匹配,从而影响了旋转中心的精度和可靠性。

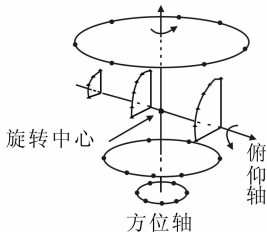


图 1 传统天线旋转中心生成示意图  
Fig. 1 Sketch Map of Generating Traditional Rotation Center

为此,本文拟构建基于俯仰轴相交和球拟合两种天线旋转中心测量方法,以提高旋转中心的测定精度和可靠性。

### 1 俯仰轴相交获取天线旋转中心

已有的天线旋转中心获取方法都只是利用某一方位下的俯仰轴与方位轴求交点,该交点的精度和可靠性不高。故可考虑在多个方位(3 个及以上,在全圆内等间隔分布)下获取俯仰轴,以这些俯仰轴的交点作为旋转中心。

#### 1.1 1/4 圆模型

理想情况下,当方位角固定时,天线上标志点绕俯仰轴运动的轨迹可以看作是 1/4 圆,如图 2 所示。

#### 1.2 俯仰轴相交获取旋转中心

单个标志点对应的多方位下的俯仰轴相交可以得到一个旋转中心,如图 3 所示。

基于此思路,本文提出了俯仰轴相交法:连续、均匀地选取天线姿态,测量天线上的标志点,对每个标志点在既定方位下绕俯仰轴的运动轨迹进行圆拟合以得到俯仰轴,取各俯仰轴的交点作

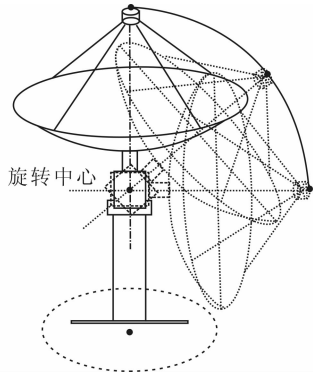


图 2 标志点绕俯仰轴运动的轨迹  
Fig. 2 Trajectory of a Target Point Around the Elevation Axis

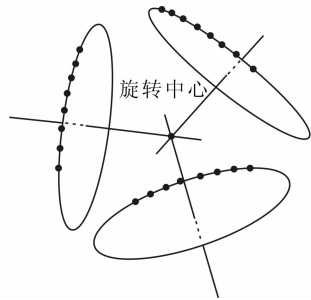


图 3 俯仰轴相交法得到的旋转中心  
Fig. 3 Rotation Center Obtained by Elevation Axes Intersection Method

为旋转中心,并取多点所对应的旋转中心的均值作为最终结果,来提高其精度和可靠性。具体步骤如下:

1) 获取观测数据。建立工程控制网,定义工程坐标系,在天线面板上布设标志点,利用工业摄影测量系统和全站仪测量系统进行联合测量,获取不同姿态下的标志点在工程坐标系下的坐标。

2) 拟合圆,取过圆心的圆平面法线作为俯仰轴。空间圆的表达式为:

$$\begin{cases} AX + BY + CZ + D = 0 \\ (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2 = R^2 \\ AX_0 + BY_0 + CZ_0 + D = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $(X, Y, Z)$  为目标点坐标;  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为圆心  $O$  的坐标;  $A, B, C, D$  为空间圆所在平面的方程参数;  $R$  为空间圆半径。

俯仰轴  $l$  过圆心  $O$  且垂直于空间圆所在平面,方向为  $u = (u_x, u_y, u_z)$ , 则  $l$  的方程可表示为:

$$\frac{x - X_0}{u_x} = \frac{y - Y_0}{u_y} = \frac{z - Z_0}{u_z} = a \quad (2)$$

式中,  $a$  为比例参数,其绝对值等于轴线上点  $(x, y, z)$  到圆心的距离。

3) 俯仰轴相交得旋转中心。根据式(2)列误

差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L} \tag{3}$$

式中,  $\mathbf{X} = [x_r \ y_r \ z_r \ a_1 \ a_2 \cdots a_n]^T$

$$\mathbf{L} = [O_1 \ O_2 \cdots O_n]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & -\mathbf{u}_1^T & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -\mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \cdots & -\mathbf{u}_n^T \end{bmatrix}$$

依据最小二乘原理计算俯仰轴交点:

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{L}) \tag{4}$$

参数  $\mathbf{X}$  的前 3 个分量 ( $x_r, y_r, z_r$ ) 即为旋转中心坐标。

4) 取所有标志点所对应旋转中心的平均值作为最终的旋转中心。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{rj}, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{rj}, \bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{rj} \tag{5}$$

式中, ( $x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}$ ) 表示第  $j$  个目标点对应的旋转中心坐标; ( $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ) 表示最终的旋转中心坐标。

5) 精度评定。取  $n$  个旋转中心均值的中误差来评价其内符合精度,即

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n ((x_{rj} - \bar{X})^2 + (y_{rj} - \bar{Y})^2 + (z_{rj} - \bar{Z})^2)}{n(n-1)}} \tag{6}$$

2 球拟合获取天线旋转中心

理想情况下,天线上标志点随方位、俯仰角变化的运动轨迹可以看作是半球面模型。根据该运动模型,只要获取不同姿态下标志点的三维坐标,通过球拟合获得球心,此球心即为旋转中心。此模型避免了圆拟合和求轴线交点的过程,相比于俯仰轴相交法更为严密,能进一步减小模型误差。

2.1 半球面模型

$M$  为球面上任意一点,球心为  $M_0 (x_0, y_0, z_0)$ 、半径为  $r$  的半球面如图 4 所示。

2.2 球拟合获取旋转中心

基于半球面模型提出球拟合法,方法为:连续、均匀地选取天线姿态,测量其上的标志点,通过球拟合得到球心,取所有球心的均值作为旋转中心。该方法可将加工装配、温度及风荷载等因素的影响随机化,提高测量结果的精度和可靠性。具体步骤如下:

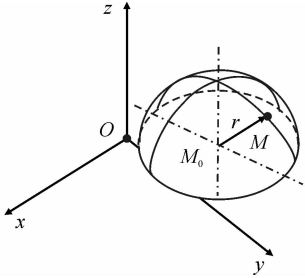


图 4 半球面模型  
Fig. 4 Hemispherical surface model

- 1) 获取观测数据。与 § 1.2 中步骤 1) 相同。
- 2) 拟合球。球面方程可表示为:

$$f = (X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2 + (Z - z_0)^2 - r^2 \tag{7}$$

式中, ( $X, Y, Z$ ) 为目标点的坐标; ( $x_0, y_0, z_0$ ) 为球心坐标;  $r$  为球的半径。

如图 5 所示,将半径、球心坐标看作未知参数,以点到拟合球面的距离平方和最小为准则,对球面方程线性化后依据最小二乘原理求解球心坐标。

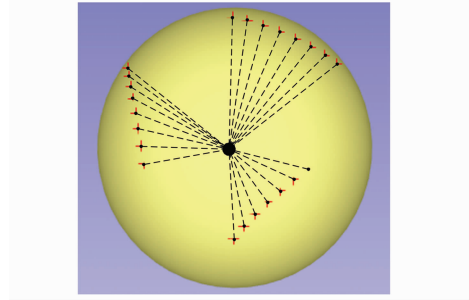


图 5 球面拟合  
Fig. 5 Spherical Surface Fitting

- 3) 计算球度,评价球拟合的质量。将第  $j$  个标志点的运动轨迹拟合为球,计算其球度为:

$$\lambda_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\|P_{ij} - M_{0j}\| - r_j)^2}{k}} \tag{8}$$

式中,  $P_{ij}$  表示第  $j$  个点的第  $i$  个运动位置;  $M_{0j}$  表示第  $j$  个点的拟合球心;  $k$  为第  $j$  个点的运动位置数。

- 4) 取所有球心的均值作为天线旋转中心,公式同式(5)。

5) 精度评定。用球拟合所得球心均值的中误差来评价旋转中心的内符合精度,按照式(6)进行计算。

3 数据采集与分析

以 3 台  $\varphi 3\text{ m}$  天线组成的上行阵为实验对

象,对其旋转中心进行了测量。工程控制网及天线的分布如图 6 所示,其中 T1、T2、T3 表示 3 台天线,J001~J004 为工程控制网的 4 个控制点。

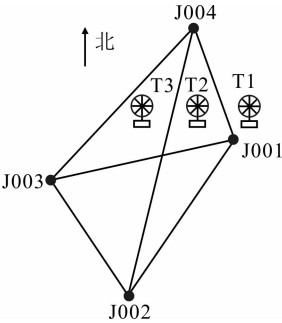


图 6 工程控制网及天线的分布  
Fig. 6 Engineering Control Network and Antennas Distribution

3.1 观测方案

为了描述天线与探测器的关系,需要通过 GNSS 观测引入地心大地坐标系;为了满足高精度的三维坐标测量需求,通过全站仪观测构建三维控制网;为了获取可靠的测量信息,通过工业摄影测量技术获取天线面板上大量标志点的坐标。

3.1.1 GNSS 观测

用 3 台 Leica GPS System 500 按照 GNSS 控制测量中的 C 级测量技术要求进行施测,以北京房山、上海、拉萨 3 个国际 GPS 服务机构基准站的 GNSS 观测数据及其大地坐标和运动速度计算 J002 和 J004 点的大地坐标,以 J004 点高精度计算结果为控制基准,采用 Leica GEO office 8.4 软件进行局域网数据处理,得到控制点坐标成果如表 1 所示,J004 至其他各点的大地方位角及斜距如表 2 所示。

表 1 GNSS 观测数据处理结果

Tab. 1 Processing Results of GNSS Observation Data				
点名	大地坐标	中误差/mm	大地直角坐标/m	
J001	B *°16'18.259 7"	±0.4	X	* 7 024.7 281
	L *°35'53.355 5"	±0.3	Y	* 8 845.355 3
	H 66.411 4 m	±0.8	Z	* 9 209.548 0
J002	B *°16'17.058 7"	±0.3	X	* 7 012.947 2
	L *°35'52.390 5"	±0.2	Y	* 8 875.978 8
	H 66.416 7 m	±0.6	Z	* 9 180.479 0
J003	B *°16'17.985 0"	±0.3	X	* 6 994.109 6
	L *°35'51.871 3"	±0.3	Y	* 8 865.146 8
	H 66.416 6 m	±0.7	Z	* 9 202.901 3
J004	B *°16'18.968 5"	±0.0	X	* 7 012.004 5
	L *°35'53.034 7"	±0.0	Y	* 8 836.294 7
	H 66.414 8 m	±0.0	Z	* 9 226.708 5

注:\* 为省略数据

表 2 J004 至其他各点的大地方位角及斜距

Tab. 2 Geodetic Azimuth and Slope Distance from J004 to Other Points				
起点	终点	大地方位角	斜距/m	
J001	J004	160° 21' 49.119"	23.205	
J002	J004	194°53' 29.198"	60.933	
J003	J004	223°00'3.620"	41.466	

以最长边 J004—J002 的大地方位角为方位基准,结合表 1 可知,GNSS 观测数据的处理结果精度较高,满足工程需求。

3.1.2 全站仪控制测量

用 Leica MS50 全站仪按照三等控制网测量技术要求施测,忽略垂线偏差的影响。以 J004 为原点,以 J004 点所在的大地经线北方向为 X 轴,水平向西方向为 Y 轴,J004 点的法线向上方向为 Z 轴,构建工程坐标系,得到控制点的平面坐标如表 3 所示。

表 3 控制点坐标及精度

Tab. 3 Coordinates and Precision of Control Points			
点名	X/m	Y/m	RMS/mm
J001	-21.855 9	-7.797 8	±0.10
J002	-58.887 4	15.661 6	±0.10
J003	-30.327 4	28.281 6	±0.11
J004	0	0	±0.00

由表 3 可知,控制点的平面坐标精度很高,都在 0.1 mm 左右。

3.1.3 工业摄影测量

工业摄影测量需要回光反射标志的配合,在天线面板上均匀地布设了摄影测量标志。此工程中,3 台 φ 3 m 天线结构一致,均由 8 块相同的扇形面板组成,各面板标志布设方案相同,可按照图 7(a)所示的方案实施。为了实现工业摄影测量坐标系与工程坐标系的转换,需要一定数量的公共点,其分布如图 7(b)所示。公共点处安装有特制的靶座,既可安放球棱镜配合全站仪测量,又可安放摄影测量工装,且通过高精度加工保证了摄影测量工装与球棱镜的同心。标志和工装的实际分布如图 7(c)所示。

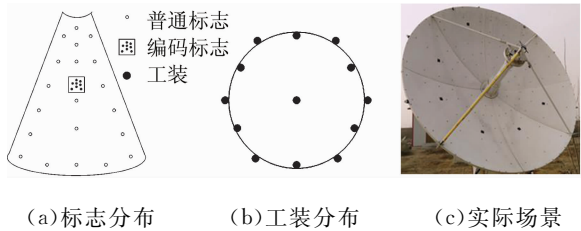


图 7 标志及工装分布图

Fig. 7 Distribution of Markers and Fixtures

分别在方位为  $60^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$  和  $300^{\circ}$  的位置,俯仰从  $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$ (间隔  $10^{\circ}$ )对各天线进行摄影测量,得到标志点在各工业摄影测量坐标系下的坐标。通过全站仪观测,获取公共点在工程坐标系下的坐标,然后将所有标志点的坐标统一转换至工程坐标系下。

以 T2 为例,在  $180^{\circ}$  方位下不同俯仰角所对应的工业摄影测量精度如表 4 所示。

表 4 工业摄影测量精度

精度	俯仰角				
	$10^{\circ}$	$30^{\circ}$	$40^{\circ}$	$50^{\circ}$	$60^{\circ}$
RMS/mm	$\pm 0.023$	$\pm 0.021$	$\pm 0.025$	$\pm 0.025$	$\pm 0.021$

同样以 T2 为例,在  $180^{\circ}$  方位下不同俯仰角所对应的公共点转换精度如表 5 所示。

表 5 公共点转换精度

项目	俯仰角				
	$10^{\circ}$	$30^{\circ}$	$40^{\circ}$	$50^{\circ}$	$60^{\circ}$
公共点个数	5	7	5	6	5
RMS/mm	$\pm 0.106$	$\pm 0.122$	$\pm 0.134$	$\pm 0.095$	$\pm 0.148$

由表 4、表 5 可知,工业摄影测量精度高,公共点转换精度较高,符合预期精度要求。

3.2 旋转中心的计算及分析

3.2.1 俯仰轴相交法的结果

用俯仰轴相交法得到 3 台天线的旋转中心在工程坐标系下的坐标,并根据式(6)计算其内符合精度,结果如表 6 所示。

表 6 旋转中心坐标及精度(俯仰轴相交)

天线	拟合点数	X/mm	Y/mm	Z/mm	RMS/mm
T1	136	-13 664.21	-11 219.18	970.35	$\pm 0.57$
T2	142	-12 746.45	-1 918.48	994.76	$\pm 0.21$
T3	143	-13 337.59	7 206.31	981.46	$\pm 0.18$

观察表 6 可知,俯仰轴相交法所得旋转中心的内符合精度达到了亚毫米级。

3.2.2 球拟合法的结果

以 T2 为例,通过球拟合求解旋转中心,按照式(8)计算球度,分布如图 8 所示。

通过图 8 可以看出,标志点对应的球度均在  $0.5\text{ mm}$  以内,表明利用球拟合计算旋转中心时,各标志点计算出的球心差异很小,能够据此获得高精度的旋转中心。

计算得到 3 台天线的旋转中心在工程坐标系下的坐标,并依据式(6)计算其内符合精度,结果如表 7 所示。

观察表 7 可知,球拟合法所得旋转中心的内

符合精度达到了亚毫米级。

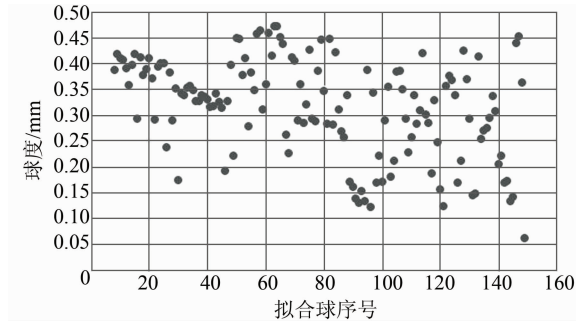


图 8 球度分布图

Fig. 8 Sphericity Distribution

表 7 旋转中心坐标及精度(球拟合)

天线	拟合点数	X/mm	Y/mm	Z/mm	RMS/mm
T1	124	-13 666.87	-11 216.16	973.49	$\pm 0.80$
T2	139	-12 748.05	-1 917.88	994.78	$\pm 0.09$
T3	123	-13 338.09	7 205.46	980.49	$\pm 0.10$

3.2.3 数据分析

1)两种新方法的主要影响因素。

对比表 6 和表 7 可以看出,T1 的精度最差,T2 和 T3 的精度相近,分析其原因,是由于观测过程中受到公共点的数量及分布等因素的影响。部分姿态下公共点数量如表 8 所示,公共点分布如图 9 所示。

表 8 部分姿态下公共点数量

方位角	俯仰角	T1	T2	T3
$60^{\circ}$	$30^{\circ}$	3	6	7
	$50^{\circ}$	3	5	5
	$70^{\circ}$	3	5	6
$180^{\circ}$	$30^{\circ}$	3	7	7
	$50^{\circ}$	4	6	4
	$70^{\circ}$	3	6	5
$300^{\circ}$	$30^{\circ}$	6	7	6
	$50^{\circ}$	6	5	5
	$70^{\circ}$	5	6	3

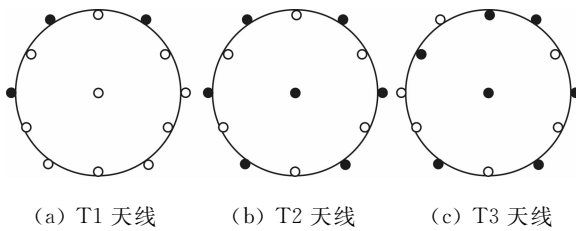


图 9 公共点分布图

Fig. 9 Distribution of Common Points

结合表 8 及图 9 进行分析,在观测 T1 的过程中,公共点较少且分布不均匀,导致公共点转换



的过程中损失了精度,影响了旋转中心的精度;在观测 T2、T3 的过程中,公共点数量较多且分布均匀,保证了最终旋转中心的精度。这也表明在使用本文提出的两种新方法时,公共点数量及分布对测量结果有较大的影响,在实施测量过程中应给予重点关注。

2)新方法的优势。

以 T2 为例,根据标志点绕俯仰轴旋转的运动轨迹拟合得到多条俯仰轴,以球拟合法获取的旋转中心为准,计算各俯仰轴到旋转中心的距离,如图 10 所示。

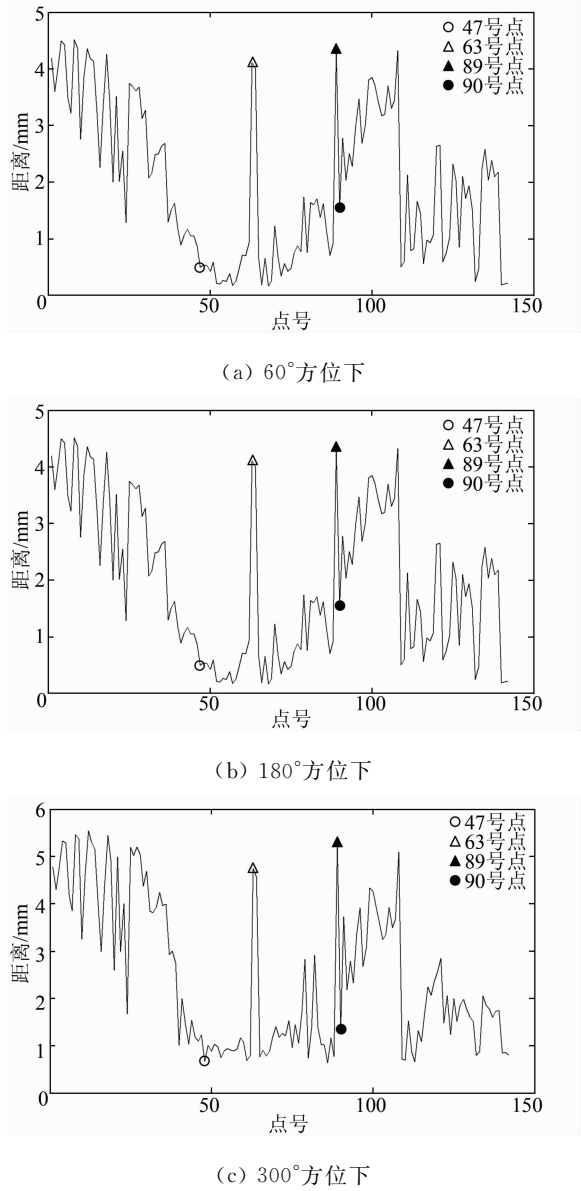


图 10 旋转中心到俯仰轴的距离  
Fig. 10 Distances from Rotation Center to Elevation Axes

观察图 10 可知,旋转中心到不同标志点所对应俯仰轴的距离从 0.2~8.8 mm 不等,差异明显。根据图 10 中 T2 旋转中心到俯仰轴距离的变化情况,选择距离较小的 47 号点、90 号点及距

离较大的 63 号点、89 号点,作进一步的分析。此 4 点按俯仰轴相交法计算交点,并计算到旋转中心的距离,如表 9 所示。

表 9 交点到旋转中心的距离/mm

点号	X	Y	Z	距离
47 号	-12 747.92	-1 918.38	994.30	0.58
90 号	-12 747.55	-1 918.21	994.21	0.72
63 号	-12 743.11	-1 918.74	994.55	5.01
89 号	-12 742.62	-1 918.80	994.34	5.52

从表 9 可知,在按照传统方法获取旋转中心时,如果标志点精度差或者稳定性低,会对旋转中心产生不利的影响。相比之下,本文提出的两种新方法均建立在大量观测数据基础之上,能够剔除不稳定或精度差的标志点。

3)两种新方法的对比。

俯仰轴相交法和球拟合法获得的旋转中心虽然内符合精度都达到了亚毫米级,但二者存在一定的偏差,如表 10 所示。

表 10 两种新方法获取旋转中心的坐标偏差/mm

天线	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	距离
T1	2.70	-3.27	-2.71	5.03
T2	1.61	-0.55	0.12	1.71
T3	0.44	0.87	0.41	1.05

从表 10 可以看出,T1 天线对应的坐标偏差最大,达到了 5 mm,与公共点的数量较少和分布情况不佳有关。在公共点数量充足、网形结构好的情况下,T2、T3 旋转中心坐标偏差不超过 2 mm,结果良好。至于哪一种方法的精度更高,有待于在具备实验条件的情况下通过外符合精度来进行评价。

4 结 语

本文在分析传统天线旋转中心测量方法缺陷的基础上,提出了俯仰轴相交和球拟合法两种旋转中心测量方法。这两种方法综合应用空间大地测量技术和精密工程测量技术,顾及天线的整个工作场景,连续、均匀地选取天线姿态,利用工业摄影测量技术获取天线面板上大量标志点的观测值,分别采用含有方位信息的俯仰轴相交或球拟合的处理方式,避免了方位轴、俯仰轴的拟合精度不匹配对旋转中心精度的影响,甚至避开了轴线拟合法而采用更为合理的球拟合法,得到了精确、可靠的旋转中心。以 3 台  $\phi 3$  m 天线组成的上行

阵为实验对象对本文方法进行了验证,结果表明两种新方法获取的天线旋转中心内符合精度均能达到亚毫米级。该测量过程为更高性能天线组阵的标校和并置站的本地连接测量积累了经验。

由于实验条件的限制,未能实现旋转中心外符合精度评定。可考虑在并置台站的本地连接测量中采用本文方法,将计算结果与空间技术解算的基线值进行对比,以评定其外符合精度。

参 考 文 献

[1] Li Haitao, Li Yuhua, Kuang Naixue. Antenna Array Forming Technology in Deep Space Exploration [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2004, 23(4): 57-60(李海涛, 李宇华, 匡乃雪. 深空探测中的天线组阵技术[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(4): 57-60)

[2] Yu Zhijian, Li Haitao, Li Xiaomei. Research and Experiment Verification on Extendable Deep Space Antenna Arraying Techniques [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2015, 36(6): 1-7(于志坚, 李海涛, 李小梅. 可扩充深空天线组阵技术与试验验证 [J]. 遥测遥控, 2015, 36(6): 1-7)

[3] Yao Fei, Kuang Linling, Zhan Yafeng, et al. Key Techniques and Development Trend of Antenna Arraying for Deep Space Communication [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(10): 2 231-2 238(姚飞, 匡麟玲, 詹亚锋, 等. 深空通信天线组阵关键技术及其发展趋势 [J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2 231-2 238)

[4] Bai Yanfu. A Study of Key Techniques for Antenna Arraying for Deep Space Communication [D]. Xi'an: Xidian University, 2014(白岩夫. 高速率深空通信中天线组阵关键技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014)

[5] Zhou Sanwen, Lu Manhong, Huang Jianguo. Analysis on Combining Efficiency of Full-Spectrum Combining [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2009, 30(2): 46-52(周三文, 卢满宏, 黄建国. 天线组阵全频谱合成效率分析[J]. 遥测遥控, 2009, 30(2): 46-52)

[6] He Guolong, Li Guomin. A Parallel Carrier Phase Calibration Method for Uplink Antenna Arrays [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012, 31(1): 19-22(何国龙, 李国民. 上行天线组阵载波相位并行标校方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(1): 19-22)

[7] Chen Junyong. On the Definition and Adopted Parameters of International Terrestrial Reference

Frame 2000 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(9): 753-756(陈俊勇. 国际地球参考框架 2000(ITRF2000)的定义及其参数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9): 753-756)

[8] Schuh H, Bbehrend D. VLBI: A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61: 68-80

[9] Dong Wenliang, Sun Fuping, Zhu Xinhui, et al. A Method of Unifying the Global Crustal Vertical Motion Reference Datum [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 358-361(董文亮, 孙付平, 朱新慧, 等. 统一全球地壳垂直运动参考基准的方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(3): 358-361)

[10] Bergstrand S, Schmid R. Activities of the IERS Working Group on Site Survey and Co-location [C]. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting, South Africa, 2016

[11] Sun Zhongmiao, Fan Haopeng. Research Progress of VLBI Global Observing System (VGOS) [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 346-1 353(孙中苗, 范昊鹏. VLBI 全球观测系统(VGOS)研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 346-1 353)

[12] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions [J]. *Geophys Res Solid Earth*, 2016, 121(8): 6 109-6 131

[13] Ma Xiaping, Shen Yunzhong, Wang Jiexian, et al. Direct Solution of SLR and VLBI Antenna Rotation Center [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 257-262(马下平, 沈云中, 王解先, 等. 卫星激光测距与甚长基线干涉测量的天线旋转中心的直接解法[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 257-262)

[14] Dawson J, Sarti P, Johnston G M, et al. Indirect Approach to Invariant Point Determination for SLR and VLBI Systems: An Assessment [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(6): 433-441

[15] Lössler M. New Mathematical Model for Reference Point Determination of an Azimuth Elevation Type Radio Telescope [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2009, 135(4): 131-135

[16] Li Jinling, Zhang Jinwei, Guo Li. Discussion on Monitoring Method of Reference Point and Axis Offset of VLBI Antenna [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(11): 10-14(李金岭, 张津维, 郭丽. 甚长基线干涉测量天线参考点和轴线偏差监测方法探讨[J]. 测绘科学, 2014, 39(11): 10-14)

[17] Gil K H, Sang H J, Yun H S, et al. A Comparative Analysis of 3D Circle Fitting Algorithms for Determination of VLBI Antenna Reference Point [J]. *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry & Cartography*, 2015, 33(4):231-244

[18] Shen Yunzhong, Chen Tingwu. Determination of Space Coordinate Differences of Co-location Sites in Shanghai Observatory [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)* 2006, 34(2): 217-220 (沈云中,陈廷武. 上海天文台并址站的空间归心测量[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 217-220)

[19] Li Jinling, Qiao Shubo, Liu Li, et al. Site Survey at Sheshan 25 m Radio Telescope in 2008 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12): 1 387-1 391(李金岭, 乔书波, 刘鹏, 等. 2008年佘山 25 m 射电天线归心测量[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(12): 1 387-1 391)

[20] Deng Yong, Li Zongchun, Zhang Wancai, et al. Measurement of 65 m Antenna Azimuth Axis and Elevation Axis Orthogonality[J]. *Radio Engineering*, 2016, 46(7): 67-70 (邓勇, 李宗春, 张万才, 等. 65 m射电望远镜方位轴和俯仰轴正交度测量[J]. 无线电工程, 2016, 46(7): 67-70)

[21] Tian Zhen, Yang Zhiqiang, Shi Zhen, et al. Precise Measurement of 40 m Caliber Radio Telescope Phase Center's Reference Point Coordinates at the Haoping Station of National Time Service Center [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamic*, 2016, 36(10): 897-901(田镇, 杨志强, 石震, 等. 国家授时中心昊平站 40 m 口径射电天线相位中心参考点坐标的精密测定[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(10): 897-901)

[22] Li Jinling, Zhang Jinwei. Simulation Analysis of Monitoring of VLBI Antennas Reference Point Via GPS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12):1 387-1 391(李金岭, 张津维. 利用 GPS 测量监测 VLBI 天线参考点的仿真分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12):1 387- 1 391)

Two Measuring Methods for Antenna Rotating Center Based on Elevation Axes Intersection and Spherical Fitting

LI Zongchun<sup>1, 2</sup> LU Zhiyong<sup>2</sup> GUO Yinggang<sup>1</sup> ZHANG Guanyu<sup>1</sup> HE Hua<sup>1</sup>  
FENG Qiqiang<sup>1</sup> CHEN Shaoqing<sup>2</sup> WANG Junwei<sup>1</sup>

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China  
2 CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China

**Abstract:** In traditional method, the model of elevation axis fitting is not rigor, which influences the accuracy and reliability of rotation center. To overcome this drawback, two new methods are proposed to get rotation center respectively based on elevation axes intersecting and spherical fitting. The trajectory of target points in different azimuths are fitted to acquire elevation axes which contain azimuth information, and the intersection of elevation axes is taken as rotation center, which is called as the elevation axes intersection method. This method is more reliable than the traditional method. The target points are fitted as a sphere to obtain a series of spherical centers, and their average is taken as the rotation center, which is named as the spherical fitting method. This method avoids the process of circle fitting and axes intersecting, which is more reasonable than the others. An uplink antenna array consists of three  $\phi 3$  m antennas is taken as experimental object. Total station and industrial photogrammetric system are combined to get the coordinates of points on antenna. By employing the two new proposed methods, the antenna rotation centers are precisely acquired in a sub-millimeter level.

**Key words:** uplink array; local ties survey; antenna rotation center; industrial photogrammetry; elevation axes intersection; spherical fitting