

## 一种改善 RTK 测量精度的新方法<sup>\*</sup>

张鲜妮<sup>1)</sup> 王 磊<sup>2,3)</sup>

(1) 池州学院资源环境与旅游系, 池州 247000  
(2) 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221008  
(3) 国土环境与灾害监测国家测绘局实验室, 徐州 221008

**摘 要** 提出一种通过测量球面坐标,拟合球心间接求取测量点坐标的新方法。通过实例验证,RTK 球心拟合测量点法的平面精度和 GPS 静态观测相比,误差不超过厘米级,可以避免对中杆倾斜引起的测量误差,而且在一定程度上提高了 RTK 平面观测精度。

**关键词** RTK;对中杆;球面模型;测量误差;测量精度

**中图分类号**:P207

**文献标识码**:A

## A NEW METHOD FOR IMPROVING RTK MEASUREMENT ACCURACY

Zhang Xianni<sup>1)</sup> and Wang Lei<sup>2,3)</sup>

(1) Department of Resource Environment and Tourism, Chizhou College, Chizhou 247000  
(2) School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008  
(3) Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Xuzhou 221008

**Abstract** On the basis of the analysis of impact factors of surveying accuracy of RTK, focusing on analyzing measurement error caused by human factor i. e. centering rod tilt, a new method which is by surveying spherical coordinates and fitting sphere centre coordinates to calculate measured point coordinates is put forward. Through examples, compared with GPS static observation, the error of RTK method is of less than cm level. This not only proves that RTK fitting sphere centre can avoid the error caused by centering rod tilt, but also improves RTK plane accuracy to a certain extent.

**Key words**: RTK; centering rod; spherical model; measurement error; measurement precision

## 1 引言

实时动态测量(RTK)技术,是一种基于载波相位观测值的实时动态定位技术,它能够实时地提供测站点在指定坐标系中的三维定位结果<sup>[1]</sup>。RTK的测量误差一般主要由两类误差组成:一类是系统因素误差,主要包括与卫星有关的误差、与信号传输

有关的误差、与信号接收有关的误差和基准站的误差<sup>[2,3]</sup>;另一类是与人为操作有关的误差,主要指仪器的对中整平误差、基准站的选取、天线高的测量等<sup>[4,5]</sup>。

虽然第一类误差是 RTK 标称测量精度的主要误差,但是在工程实际应用中发现往往由于第二类误差过大,导致测量精度远远大于 RTK 标称精度,

\* 收稿日期:2011-03-20

基金项目:池州学院校级研究生科研启动项目(2010RC057);国土环境与灾害监测国家测绘局实验室开放基金(LED2011B08)

作者简介:张鲜妮,女,1983年生,硕士,主要研究方向为数字测绘。E-mail: zxianni@yahoo.com.cn

测量成果不可用。在第二类误差中,由于对中杆的高度较高,对中杆的微小偏斜就会引起天线相位中心和测量点存在较大的偏差。事实上在实际测量中,无论测量人员如何细心操作,由于水准气泡的制作工艺、外界环境的变化以及人类本身的操作水平有限,无法使对中杆一直处于铅垂状态,总存在不同程度的倾斜状态;且对中杆的对中整平过程比较耗时。工程实践已经表明,对中杆的偏斜是引起第二类误差的重要原因,某种程度上也是直接决定 RTK 测量成果是否达到其标称精度的关键。

那么是否能够寻找一种可以避免 RTK 对中杆对中整平误差,实现快速测量,而且精度较高的测量方法,来保证测量的可靠性呢? 本文针对这一问题进行了研究。

2 RTK 对中杆偏斜状态引起的测量误差

如图 1 所示,以对中杆的铅垂状态作为  $z$  轴,按右手准则建立  $x$  和  $y$  轴。假设在 RTK 测量中,天线高为  $r$ ,对中杆产生  $\delta$  偏斜,则由于对中杆不铅垂,导致的平面位置偏差可以用式(1)和(2)

$$e_x = r \sin \delta \cos \theta \tag{1}$$

$$e_y = r \sin \delta \sin \theta \tag{2}$$

估计。高程偏差用式(3)

$$e_z = r(1 - \cos \delta) \tag{3}$$

估计。当  $\theta = 0^\circ$  和  $180^\circ$  时,  $x$  方向上测量偏差最大;当  $\theta = 90^\circ$  和  $360^\circ$  时  $y$  方向上测量偏差最大。

根据以上原理,以天线高  $r = 2\text{ m}$  时,对中杆不同偏斜程度引起的测量误差如表 1 所示。从表 1 可以看出,随着对中杆倾斜角度的增加,平面坐标偏差和高程坐标偏差均越来越大。但平面坐标偏差对杆的倾斜比较敏感,当杆倾斜  $0.3^\circ$  时,平面偏差就高达  $10.5\text{ mm}$ ,此时由于对中杆的倾斜导致的测量误差和 RTK 的平面标称测量精度相当,导致测量结果不可靠。而高程坐标偏差,对 RTK 对中杆的倾斜不敏感,即使对中杆的倾斜高达  $5^\circ$ ,引起的高程偏差仅  $7.6\text{ mm}$ ,不足 RTK 高程标称精度的一半。

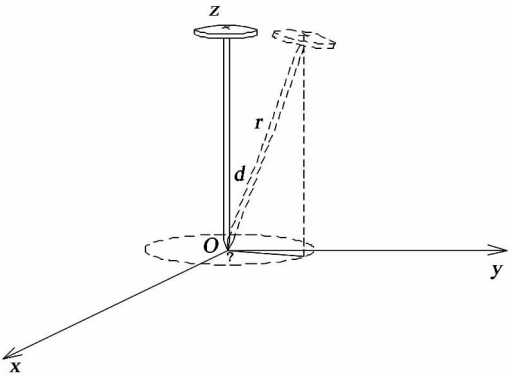


图 1 对中杆的偏斜引起的测量误差  
Fig. 1 Sketch of measuring error caused by middle pole tilt

表 1 对中杆的偏斜引起的测量误差(单位:mm)  
Tab. 1 Measuring error caused by middle pole tilt (unit:mm)

偏差	倾斜									
	0.1°	0.3°	0.5°	0.7°	0.9°	1°	2°	3°	4°	5°
$X_{\max}$	3.5	10.5	17.5	24.4	31.4	34.9	69.8	104.7	139.6	174.4
$Y_{\max}$	3.5	10.5	17.5	24.4	31.4	34.9	69.8	104.7	139.6	174.4
$Z_{\max}$	<0.1	<0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	1.2	2.7	4.9	7.6

3 一种改善 RTK 测量精度的新方法

如果将对中杆的下部(尖端)固定在测点上,另一端绕着铅垂位置小幅度(避免天线接收信号受影响)转动过程中,均匀采集的天线相位中心坐标,则采集的坐标符合以测量点为球心,天线高为半径的球面模型(图 2)。理论上我们可以通过 3 个以上的球面坐标,结合球面模型,利用最小二乘原理拟合出球心坐标,即测量点的坐标。采用这种测量方法,可避免杆倾斜引起的测量误差。

理想球心的最小二乘估值为:

$$(x_i - \hat{u}_1)^2 + (y_i - \hat{u}_2)^2 + (z_i - \hat{u}_3)^2 = R \tag{4}$$

显然式(4)是一个关于  $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3$  的非线性方程

组,很难直接利用最小二乘求解。注意到球面上任意两点  $(x_i, y_i, z_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$  满足:

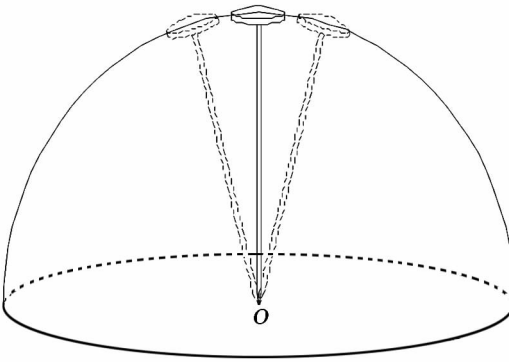


图 2 球面模型示意图  
Fig. 2 Sketch of constructed spherical model

$$(x_i - \hat{u}_1)^2 + (y_i - \hat{u}_2)^2 + (z_i - \hat{u}_3)^2 = (x_{i+1} - \hat{u}_1)^2 + (y_{i+1} - \hat{u}_2)^2 + (z_{i+1} - \hat{u}_3)^2 \tag{5}$$

将式(5)展开整理可得:

$$2(x_{i+1} - x_i)\hat{u}_1 + 2(y_{i+1} - y_i)\hat{u}_2 + 2(z_{i+1} - z_i)\hat{u}_3 = x_{i+1}^2 - x_i^2 + y_{i+1}^2 - y_i^2 + z_{i+1}^2 - z_i^2 \tag{6}$$

令  $a_i = 2(x_{i+1} - x_i)$ ,  $b_i = 2(y_{i+1} - y_i)$ ,  $c_i = 2(z_{i+1} - z_i)$ ,  $l_i = x_{i+1}^2 - x_i^2 + y_{i+1}^2 - y_i^2 + z_{i+1}^2 - z_i^2$

则式(6)可写成

$$a_i\hat{u}_1 + b_i\hat{u}_2 + c_i\hat{u}_3 = l_i \tag{7}$$

其中方程组个数为  $m - 1$  个,  $m$  为拟合点数。

令  $B = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m-1} & b_{m-1} & c_{m-1} \end{bmatrix}$ ,  $\hat{x} = (\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3)^T$

$$l = (l_1, l_2 \cdots l_{m-1})^T$$

则误差方程可写成

$$v = B\hat{x} - l \tag{8}$$

基于最小二乘原理可以拟合出球心的无偏估值为

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l \tag{9}$$

式中,在拟合数据质量均衡的情况下,  $P$  取单位权重,否则应对拟合数据进行权重重新分配。

基于以上球心拟合的最小二乘构造原理,作者用 Matlab 语言编写了球心拟合程序。为了估计拟合模型的合理性,利用数值模拟方式人为构造一组球面数据,如表 2 所示,实际球心为(0,0,0),球的实际半径为 3,利用数据截断误差模拟测量误差。模拟计算验证了构造的球心拟合程序是正确的,可以应用于实际测量点的拟合。

表 2 模拟的球面数据(单位:m)

Tab.2 Simulated spherical data (unit: m)

点号	X	Y	Z
1	3.000 0	3.000 0	3.000 0
2	3.000 0	2.000 0	3.741 7
3	3.000 0	1.000 0	4.123 1
4	4.000 0	2.000 0	2.645 8
5	2.000 0	4.000 0	2.645 8
6	5.000 0	1.000 0	1.000 0
7	0.000 0	4.000 0	3.316 7
8	1.000 0	3.000 0	4.123 1
实际球心	0	0	0
拟合球心	$-6 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$

4 实例分析

采用 RTK 采集了 1#、2#、3#点球面模型的天线相位中心的坐标,每个测点采集 10 个球面数据(表 3)。用静态 GPS 观测了 1#、2#、3# 3 个点的三维坐标,基于球面拟合模型,利用球面数据拟合了 1#、2

、3#测点的坐标,拟合的结果见表 4。

表 3 采用球面模型法采集的天线相位中心坐标(单位:m)

Tab.3 Antenna phase center coordinates with spherical model method (unit: m)

点号	X	Y	Z
1#	513 315.534 2	3 787 971.544	62.021 3
	513 315.601 6	3 787 971.514	62.019 9
	513 315.700 7	3 787 971.567	62.019
	513 315.776 8	3 787 971.661	62.013 1
	513 315.757	3 787 971.82	62.007 5
	513 315.726 1	3 787 971.885	62.001 2
	513 315.680 3	3 787 971.92	62.000 4
	513 315.620 9	3 787 971.922	62.002 9
	513 315.585 8	3 787 971.773	62.020 5
	513 315.596 6	3 787 971.644	62.024 9
2#	513 324.086 3	3 787 978.519	62.059 5
	513 324.164 3	3 787 978.506	62.060 3
	513 324.253	3 787 978.637	62.064 1
	513 324.287 9	3 787 978.725	62.060 2
	513 324.318 6	3 787 978.766	62.055 4
	513 324.232 4	3 787 978.817	62.056 0
	513 324.149 5	3 787 978.824	62.057 8
	513 324.071 6	3 787 978.706	62.063 2
	513 324.118	3 787 978.552	62.063 1
	513 324.169 9	3 787 978.539	62.062 9
3#	513 343.676 8	3 787 951.43	61.990 0
	513 343.734 1	3 787 951.327	61.986 4
	513 343.963 9	3 787 951.362	61.992 6
	513 344.104 7	3 787 951.5	61.985 8
	513 344.173 7	3 787 951.61	61.973 0
	513 344.165	3 787 951.663	61.970 0
	513 344.003 2	3 787 951.721	61.986 0
	513 343.835 3	3 787 951.638	61.998 6
	513 343.763 7	3 787 951.53	61.999 8
	513 343.792 3	3 787 951.458	62.000 3

表 4 球面拟合结果

Tab.4 Spherical fitting results

点号	X	Y	Z
1#静态	513 315.576 5	3 787 971.647	60.391 5
1#拟合	513 315.571 7	3 787 971.650	60.390 4
1#拟合误差 (mm)	-4.8	3	-1.1
2#静态	513 324.163 6	3 787 978.644	60.459 8
2#拟合	513 324.164 4	3 787 978.652	60.458 5
2#拟合误差 (mm)	0.8	8	-1.3
3#静态	513 343.861 4	3 787 951.521	60.297 4
3#拟合	513 343.864 3	3 787 951.526	60.298 3
3#拟合误差 (mm)	2.9	5	0.9

球面数据拟合结果比较表明,拟合点位平面精度不超过厘米级。说明采用球面模型拟合测量点的

方法,能有效避免杆的倾斜引起的误差,并在一定程度上提高了 RTK 的平面观测精度。

5 结论与不足

实例计算表明,球心拟合测量点的平面精度和静态观测相比,误差不超过厘米级,有效地避免了对中杆倾斜引起的测量误差,而且在一定程度上提高了 RTK 平面观测精度。

但该方法也存在一定的不足,由于高程误差对杆的倾斜不敏感,而球面模型拟合测量法的核心程序为最小二乘,在提高平面精度的同时(避免对中杆倾斜引起的误差),也一定程度上增加了高程方向上的误差,因此这种方法还有待改进。

参 考 文 献

1 徐绍铨,等. GPS 测量原理与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003. (Xu Shaoquan, et al. Principle and application of GPS measuring [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2003)

2 左淑红,左凤鸣,郑丽娜. 相对差分 GPS 精度分析[J]. 测绘空间与地理信息,2007,30(2):42-45. (Zuo Shuhong, Zuo Fengming and Zheng Lina. Precision analysis of relative difference GPS[J]. Surveying and Mapping Space and Geographic Information, 2007,30(2):42-45)

3 张振军,谢中华,冯传勇. RTK 测量精度评定方法研究[J]. 测绘通报,2007,(1):26-28. (Zhang Zhenjun, Xie Zhonghua and Feng Chuanyong. The method study of RTK survey precision assessing [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007,(1):26-28)

4 王虎,等. RTK 定位模型研究与精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(4):112-116. (Wang Hu, et al. Research and accuracy analysis on real time kinematic positioning model [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,(4):112-116)

5 包民先,高玉良,陆建雄. 提高 RTK 平面控制测量精度与可靠性试验研究[J]. 北京测绘,2010,9(4):65-67. (Bao Minxian, Gao Yuliang and Lu Jianxiong. Improving plane control measurement accuracy of RTK and reliability test research [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2010,9(4):65-67)

6 王晓,高伟,张帅. GPS RTK 测量精度的影响因素分析及实验研究[J]. 全球定位系统,2010,4:26-28. (Wang Xiao, Gao Wei and Zhang Shuai. Measurement precision influence factors analysis and experimental research of GPS RTK [J]. Global Positioning System, 2010,4:26-28)

7 郭建东,冒爱全,殷忠. RTK 测量的方法与精度实验[J]. 测绘科学,2006,31(3):59-61. (Guo Jiandong, Mao Aiquan and Yin Zhong. RTK measurement method and the precision experiments [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006,31(3):59-61)

(上接第 122 页)

行偏移大小,偏移方向为趋向影像底部,列偏移值代表辅影像上对应配准点相对主影像的列偏移值大小。偏移方向为趋向影像右侧。配准精度为 1 个像素。

如图 2 所示:图 2(a)为利用配准得到的偏移值数据对辅影像进行的重新采样的影像;(b)为生成干涉数据后的影像,图中红色区域为部分较为明显的干涉条纹;(c)为消除数据的平地相位之后的相位强度叠加影像,图中波状条纹区域为地震引起的地表形变较为明显的区域;(d)为进行相位滤波后的相位影像图,图中波状条纹区域为由地震引起的地表形变较为明显的区域。

4 结语

此平台的设计和实现对于利用地震前后 SAR 图像数据和震区的震害特征、破坏规律等先验知识,开展多特征、多信息的定量化检测具有一定意义。

参 考 文 献

1 陈文凯,等. 地震前后遥感影像分形特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(6):24-30. (Chen Wenkai, et al. Fractal characteristic analysis for remote sensing images

before and after earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,(6):24-30)

2 蔡山,等. 利用遥感资料绘制汶川地震烈度图方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2009,(1):31-35. (Cai Shan, et al. Study on mapping seismic intensity distribution from RS data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009,(1):31-35)

3 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003. (Shu Ning. The principles of radar interferometry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003)

4 Frigo M and Johnson S. The design and implementation of FFTW3 [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(2):216-331.

5 林卉,等. InSAR 干涉图滤波方法研究[J]. 测绘学报, 2005,34(2):113-117. (Lin Hui, et al. Research on filtering methods of InSAR interferogram [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005,34(2):113-117)

6 李红英,王耀南. 基于 VC 的 INSAR 原始数据读取与处理成像[J]. 测绘工程,2006,15(1):14-16. (Li Hongying and Wang Yaonan. Raw data reading and processing images of InSAR based on VC [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006,15(1):14-16)

7 Miao Fang, Ye Chengming and Kong Xiangsheng. D-InSAR to inspect the active fault of Kunlun mountain on Tibetan plateau [R]. Second International Conference on Space Information Technology, 2007.