

GPS-RTK 流动站误差影响分析与对策

周 立

(淮海工学院 空间信息科学系,江苏 连云港 222001)

Analysis and Countermeasure against the Error Influence of the Running-station for the GPS RTK

ZHOU Li

摘要:从 RTK 系统特点出发,分析 RTK 测量误差来源,探讨各类误差来源的影响特征与规律。在探讨与流动站及其观测作业有关的误差中,详细研究天线姿态误差、坐标系统转换误差、大地水准面差距内插误差影响。最后,提出相应的技术措施与对策,展望 RTK 技术发展的未来。

关键词:GPS;RTK;误差;高程异常;流动站

高精度 GPS 实时差分定位 RTK 技术是目前广泛使用的测量技术之一。RTK 技术与 GPS 静态定位技术相比,一方面,RTK 实时动态测量更高效、更灵活。另一方面,RTK 实时动态定位系统结构和数据采集与处理技术工艺相对复杂。其中与流动站进行实时定位相关的误差,对 RTK 作业精度及可靠性产生直接影响。为此,有必要对流动站误差影响特性进行研究,以便更好地发挥 RTK 技术优势,为 GPS 测量生产实践提供理论基础和技术指导。

一、RTK 流动站误差源分析

RTK 定位点坐标测量是通过 GPS 接收机接收卫星发来的信息和接收基准站的差分信息确定地面点的 3 维坐标。因此 RTK 流动站定位测量的主要误差来源有:① RTK 天线姿态误差;② 坐标系统转换误差;③ 大地水准面差距内插误差。

二、RTK 流动站相关的误差影响特性分析

1. RTK 天线姿态误差

RTK 动态作业时载体瞬时姿态改正精度将是一项重要的误差来源。进行动态观测作业时,由于受到各种因素的影响,不能保证流动站单杆的完全竖直。在待定点 P 上无法实时确定天线动态瞬时姿态,如图 1 所示。设地面坡度或天线对中杆单杆高度为 h 时,倾斜姿态角 θ 使 P 点铅垂方向 A 偏移 B ,即引起平面 ΔP 和高程 Δh 误差, θ 很小时,可推

出两项误差改正模型。

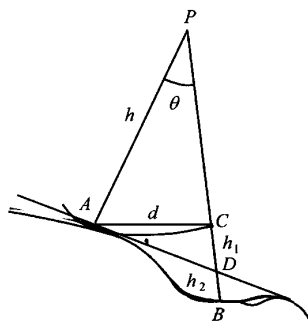


图 1 载体姿态对点位影响

设 β 为单杆在水平面上的投影与 X 轴的夹角(如图 2 所示), d 为单杆倾斜造成的点位位移。则单杆倾斜影响为

$$\begin{cases} \Delta x = h \sin \theta \cos \beta \\ \Delta y = h \sin \theta \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

假设: β 角值是随机的,在 $(0 \sim 2\pi)$ 上服从均匀分布,令 $e = h \sin \theta$ 。可单杆倾斜影响真误差求其中误差为

$$\begin{aligned} m_{\Delta x}^2 &= \frac{[\Delta x \Delta x]}{n} = \frac{e^2}{n} [\cos^2 \beta] \\ m_{\Delta y}^2 &= \frac{[\Delta y \Delta y]}{n} = \frac{e^2}{n} [\sin^2 \beta] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $n = \frac{2\pi}{d\beta}$,代入上式并求积分可得

$$m_{\Delta x}^2 = \frac{e^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \beta d\beta = \frac{e^2}{2} \therefore m_{\Delta x} = \frac{e}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

收稿日期:2004-08-23

基金项目:江苏省教育厅自然科学基金资助项目(00KJB420001)

作者简介:周立(1959-),男,江苏宜兴人,教授,硕士,主要从事 GIS、RS、GPS 应用研究。

同理可得

$$m_{\Delta y}^2 = \frac{e^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \beta d\beta = \frac{e^2}{2} \therefore m_{\Delta y} = \frac{e}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

即,单杆倾斜影响平面中误差

$$m_{\Delta P} = e \quad (5)$$

姿态角 θ 即坡度引起的高程误差

$$\Delta h = h_1 + h_2 = h(\sec \theta - 1) + h_2 \quad (6)$$

当 h 取 $< 2\text{ m}$, $\theta \leq 5^\circ$ 时,姿态角即坡度引起的平面误差 $m_{\Delta P}$ 见表 1。

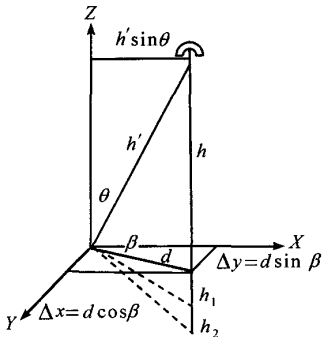


图 2 流动站单杆产生倾斜

表 1 姿态角引起的平面误差 $m_{\Delta P}$ m

h_0	θ		
	1°	3°	5°
1	0.017	0.052	0.087
1.5	0.026	0.078	0.130
2	0.035	0.105	0.174

分析表 1 可看出:姿态角即坡度引起的平面误差随姿态角和天线高度的增大而迅速增加。实际 RTK 作业时,应尽量在待定点上以静态或准动态方式置平对中和确定控制天线高度在 1.5 m 以下。那么这项误差可望控制在 $\pm 5\text{ cm}$ 左右。

一般来自地面本身的不规则起伏应在 3 cm 以内,当 h 取 $< 2\text{ m}$, $\theta \leq 5^\circ$, $h_2 = 0.030\text{ m}$ 时,姿态角即坡度引起的高程误差 Δh 见表 2。

表 2 姿态角引起的高程误差 Δh m

h_0	α		
	1°	3°	5°
1	0.030	0.031	0.034
1.5	0.030	0.032	0.036
2	0.030	0.033	0.038

分析表 2 可看出:姿态角即坡度引起的高程误差 Δh 主要受来自地面本身的不规则起伏变化影

响。实际 RTK 作业时,应尽量在待定点上以静态或准动态方式置平对中和确定控制天线高度在 1.5 m 以下。那么这项误差可望控制在 $\pm 3\text{ cm}$ 以内。

2. 坐标系转换误差

全国天文大地网整体平差后,我国形成了 4 类参心坐标系:① 1980 西安坐标系;② 1954 年北京坐标系;③ 新 1954 年北京坐标系;④ 城市和地区(如大的矿区),为了本身的特殊需要,分别建立了独立坐标系。

由于 GPS 全球卫星定位系统采用 WGS-84 地心坐标系,因此, GPS 定位成果需要转换至以上参心坐标系。GPS 地心坐标系和与参心坐标系之间的转换方法国内外很多专家对此作了大量的研究,提出了多种转换模型。在我国常用的有 3 种:① Bursa-Wolf 模型(简称 B 模型),② Molodensky 模型(简称 M 模型);③ 武汉测绘科技大学模型(简称 W 模型)。在这 3 种模型中,以 Bursa-Wolf 模型最直观,用得十分广泛。但不管使用哪种模型都必须将两系统的大地坐标换算为相应的空间直角坐标后才能计算转换参数,这就涉及到大地高是否精确的问题。

大地高是正常高与高程异常之和,但由于我国第一代大地水准面精度较差,而大地点上的高程异常又是通过内插得到,其误差在 $\pm 3 \sim \pm 6\text{ m}$ 之间。假设正常高没有误差,大地高的精度也在 $\pm 3 \sim \pm 6\text{ m}$ 之间。大地高误差对转换参数的 3 个平移参数的影响,可以按下列公式近似估算:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = dH \begin{bmatrix} \cos B \cos L \\ \cos B \sin L \\ \sin B \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, dx, dy, dz 表示平移参数误差; dH 表示大地高的误差; B, L 表示大地纬度和经度。

假设 $B = 40^\circ$, $L = 110^\circ$ 时,其大地高对平移参数的影响见表 3。

表 3 大地高对平移参数的影响 m

dH	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
dx	-0.18	-0.26	-0.52	-0.79	-1.05	-1.33
dy	0.40	0.72	1.44	2.16	2.88	3.66
dz	0.32	0.64	1.29	1.93	2.57	3.21

同样大地高不精确对地面网尺度因子也会引起较大的误差,以上因大地高不准确而引起的 2 种误差对转换后的坐标将会产生系统性的影响。因此,提高大地高(也可以说是高程异常)的精度,对于上

述模型的应用具有重要意义。

3. 大地水准面差距内插误差

利用 GPS 求得的是地面点在 WGS-84 坐标系中的大地高,而目前我国的实用高程系统采用的是正常高,要想使 GPS 的 WGS-84 高程在城市建设中得到应用,必须实现 GPS 大地高向城市高程系统的转换。

众所周知,WGS-84 坐标系中的大地高和城市高程应用系统的正常高之间存在以下关系

$$H_P = H_W - \xi \tag{8}$$

式中, H_P 为正常高; H_W 为大地高; ξ 为高程异常。

上述关系是一个近似式。严格地讲,应顾及地球椭球面法线与铅垂线方向的差异(即垂线偏差)的影响。但该差异一般不大于 $1'$,由它所引入的高程误差不大于 0.1 mm ,完全可以忽略不计。由式(8),只要求出 GPS 点上的高程异常值,就可利用上述关系将 GPS 大地高转换成正常高。因此,高程异常的确定成为 GPS 高程转换的关键。

纵观高程异常的确定方法,可以分为重力法和几何解析法 2 类。① 重力法的出发点是利用计算点附近的地面重力测量资料求解大地水准面的非线性变化部分,应用中通常需结合地形数字模型和地球重力场模型数据,以反映地形起伏的影响和大地水准面的长、短波特性。② 几何解析法是用一个一次或高次的解析多项式拟合出测区的似大地水准面,进而内插出 GPS 点 P 的高程异常值。

目前,我国城市现有勘测部门都未开展城市重力测量,无法获得必要的重力数据,因此,在城市 GPS 高程转换中主要研究采用几何解析法推求大地水准面高的方法。RTK 数据采集系统就是采用某种数学方法拟合的似大地水准面模型,实现实时 GPS 大地高向城市高程系统的转换,通常作业时只需要分别在基准站和流动站置入精确的城市 3 维坐标实施实时转换。

几种常用的 GPS 高程拟合方法有:① 解析多项式法;② 多面函数法;③ 加权均值法;④ 非参数回归法和高程异常变化梯度法;⑤ 固定边界 N 次样条插值法;⑥ 线性移动拟合法。在考察分析整个前面所给的各种高程异常拟合公式的基础上,我们认为 RTK 高程转换主要有如下 4 类误差影响:

1. 裁断误差影响 M_J 。计算式中忽略多项式的高次项,构成多项式裁断误差。例如:解析多项式法中空间曲面拟合多项式的模型化一般只取至 3 次方项,即前 9 项,多项式 4 次以上高次项被忽略。

2. 计算误差影响 M_C 。高程异常变化梯度法
万方数据

在计算中以概率密度估计为引数;线性移动拟合法和解析多项式法等按最小二乘法求解,一般计算机迭代计算结果都是某一终止条件下的计算值。因此构成计算误差。

3. 拟合函数的代表性误差影响 M_D 。多面函数法中的核函数和加权均值法中的权函数的构建直接关系到拟合函数的代表性,介于高程异常复杂的变化趋势,构建函数时往往仅考虑影响拟大地水准面的主要相关因素,不可避免地存在拟合函数的代表性误差。

4. 拟合 RTK 待定点的平面位置误差影响 M_P 。RTK 数据采集系统实时转换高程系统时,采用的上述各种数学方法拟合的似大地水准面模型,其高程异常都是 RTK 内插点位置的函数。所以,RTK 作业时需要在基准站和流动站置入精确的城市 3 维坐标,故 RTK 定位确定的国家或城市坐标系统中的平面位置的精度直接影响内插高程异常的精度,也就是实现实时 GPS 大地高向城市高程系统的转换的精度。

通常在考虑实施高程系统转换的总误差时,认为这 4 类误差影响是独立的。总的误差记为

$$M_\xi = \pm \sqrt{M_J^2 + M_C^2 + M_D^2 + M_P^2} \tag{9}$$

文献[1]是对我国某一近海平原地区的实测资料进行的实验研究,实验测区共有 GPS 点 23 个,其中水准重合点 9 个。为考察高程转换的精度,选取其中的 6 个参与拟合,其他 3 个作为水准检核点,通过比较检核点上的拟合高程与已知高程的差异,分析高程转换的精度如表 4 所示。

表 4 高程转换精度

拟合方法	重合点的拟合残差/cm			拟合残差 均值/m
	检核点 1	检核点 2	检核点 3	
多项式拟合	0.78	-0.30	-0.92	-0.14
多面函数拟合	0.0	-0.53	-0.24	-0.26
加权均值拟合	1.04	0.47	0.89	0.80
非参数回归拟合	0.43	0.47	0.37	0.42
高程异常变化 梯度拟合	-1.63	-0.36	-0.95	-0.98

根据表 4 的结果可以看出,采用的拟合方法不同,得到的拟合结果也有所差异,多项式拟合和多面函数拟合法获得了较好的拟合效果,对于实验测区而言,绝大多数拟合方法都能达到或优于厘米级的精度,这一结论对于高程异常变化比较平缓的地区

(下转第 50 页)

- [M]. London: Taylor and Francis, 2001.
- [2] PHILLIPS P. A Prologue to the Geography of Crime [Z]. New York: the Association of American Geographers, 1972. 86-91.
- [3] RENO J, MARCUS D, ROBINSON L, *et al.* Mapping Crime: Principle and Practice[R]. Washington, DC: U. S. Department of Justice Office of Justice Programs, National Institute of Justice, 1999.
- [4] SHAW C, MCKAY H. Juvenile Delinquency and Urban Areas[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1942.
- [5] PAULY G, MCEWEN J, FINCH S. Computer Mapping—A New Technique in Crime Analysis[M]. New York: Thompson Book Company, 1967.
- [6] GROFF E, LA VIGNE N. The Use of Geographic Information Systems (GIS) for State and Local Crime Analysis [C]. Ottawa, Canada: Statistical Commission and Economic Commission for Europe, 1998.
- [7] MAMALIAN C, LA VIGNE N. The Use of Computerized Crime Mapping by Law Enforcement: Survey Results[R]. Washington, DC: U. S. Department of Justice, National Institute of Justice, 1999.
- [8] GRIFFIN J. Distance Learning: Crime Mapping[EB/OL]. <http://www.american.edu/TED/etown/distance/crimemap.htm>, 2000-10-10.
- [9] JEFFERIS E. A Multi-Method Exploration of Crime Hot Spots: A Summary of Findings[R]. Washington, DC: U.S. Department of Justice, National Institute of Justice, CMRC, 1999.
- [10] CANTER P. Baltimore County's Auto-Dialer System [A]. Proc. of Police Executive Research Forum, 1998 [C]. Washington, DC: [s.l.], 1998. 81-92.
- [11] BARR R, PEASE K. Crime Placement, Displacement and Deflection [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1990.
- [12] COOPER A, SCHMITZ P. Some Examples of Tactical Crime Mapping in South Africa [Z]. Belo Horizonte, Brazil: the Federal University of Minas Gerais and the Vera Institute of Justice, 2002.
- [13] LODHA S, VERMA A. Animations of Crime Maps Using Virtual Reality Modeling Language[J]. Western Criminology Review, 1999, 1(2): 7-12.
- [14] POLICE FOUNDATION. Advanced Problem Analysis, Crime Analysis, and Crime Mapping Training[J]. Crime Mapping News, 2003, 5(4): 4-8.
- [15] WEISBURD D, MCEWEN J. Crime Mapping and Crime Prevention [M]. New York: Criminal Justice Press, 1997.

(上接第 33 页)

都是成立的,对于地形起伏较大的高山地区,精度可能有所差异。如果 RTK 作业前能合理选择拟合方法估算高程异常参数,对于直径不超过 10 km 的作业测区,且有 3~5 个高程已知点,则内插精度可望在 $\pm(1\sim3)$ cm(平原), $\pm(3\sim5)$ cm(丘陵)以内。

三、对 策

1. 应确定控制天线高度在 1.5 m 以下,在待定点上以静态或准动态方式置平对中。并尽量保证流动站单杆竖直。

2. 试验建立局域系统性的误差修正模型,并尽量提高大地高精度。

3. RTK 作业前能合理选择拟合方法估算高程异常参数。

4. 对于直径不超过 10 km 的作业测区,尽量选择 5 个高程已知点,提高内插整体精度。

展望未来:美国 GPS 系统将逐步实现现代化;

俄罗斯 GLONASS 系统将完成组网任务,投入生产;欧洲 Galileo 系统即将建设。全球卫星定位与导航前程似锦。

参考文献:

- [1] 乔迎主,辛久志. GPS 高程拟合的几种常用方法[J]. 东北测绘, 1999, (2): 22-27.
- [2] 刘基余,李征航,等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京:测绘出版社, 1999.
- [3] 徐绍铨,张华海,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1998.
- [4] 谢世杰,奚有根. RTK 特点与误差分析[J]. 测绘工程, 2002, 11(2): 34-38.
- [5] 周立. GPS 网约束平差基准可用性指标研究[J]. 测绘通报, 1997, (8).
- [6] GAO Y, MCLELLAN J F, SCHLEPPE J B. Integrating GPS with Barometry for High-Precision Real-Time Kinematic Seismic Survey[J]. Surveying and Land Information Systems, 1998, 58(2): 115-119.

作者: [周立, ZHOU Li](#)
作者单位: [淮海工学院, 空间信息科学系, 江苏, 连云港, 222001](#)
刊名: [测绘通报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [BULLETIN OF SURVEYING AND MAPPING](#)
年, 卷(期): 2006(6)
被引用次数: 12次

参考文献(6条)

1. 乔迎主, 辛久志 [GPS高程拟合的几种常用方法](#) 1999(02)
2. 刘基余, 李征航 [全球定位系统原理及其应用](#) 1999
3. 徐绍铨, 张华海 [GPS测量原理及应用](#) 1998
4. 谢世杰, 奚有根 [RTK特点与误差分析](#)[期刊论文]-[测绘工程](#) 2002(02)
5. 周立 [GPS网约束平差基准可用性指标研究](#) 1997(08)
6. GAO Y, MCLELLAN J F, SCHLEPPE J B [Integating GPS with Barometry for High-Precision Real-Time Kinematic Seismic Survey](#) 1998(02)

本文读者也读过(10条)

1. 谢世杰, 奚有根 [RTK的特点与误差分析](#)[期刊论文]-[测绘工程](#)2002, 11(2)
2. 赵立丽, ZHAO Lili [GPS RTK假设站与已知点设站精度比较](#)[期刊论文]-[辽宁工程技术大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 29(z1)
3. 宫国伟, Gong Guowei [提高RTK测量工作的技术关键](#)[期刊论文]-[价值工程](#)2010, 29(6)
4. 吴晓红, WU Xiao-hong [GPS RTK技术在矿区测量工作中的应用](#)[期刊论文]-[煤炭技术](#)2010, 29(4)
5. 陈咬根, 许国安, 朱旭红, CHEN Yao-gen, XU Guo-an, ZHU Xu-hong [一种基于GPS-RTK的超快速静态控制测量新方法](#)[期刊论文]-[测绘工程](#)2009, 18(6)
6. 张振军, 谢中华, 冯传勇, ZHANG Zhen-jun, XIE Zhong-hua, FENG Chuan-yong [RTK测量精度评定方法研究](#)[期刊论文]-[测绘通报](#)2007(1)
7. 杨文府, 崔玉柱, YANG Wen-fu, CUI Yu-zhu [GPS-RTK的技术方法探讨与对策](#)[期刊论文]-[测绘工程](#)2008, 17(4)
8. 王荣宝, WANG Rong-bao [建立省域C级GPS控制网与大地水准面精化](#)[期刊论文]-[测绘科学](#)2004, 29(z1)
9. 杨凤云, 马洪滨, 徐茂林 [超大城市供水管网测量中GPS技术的应用](#)[期刊论文]-[测绘通报](#)2002(11)
10. 臧德彦, 周世健 [变形监测网的质量测度](#)[期刊论文]-[测绘工程](#)2002, 11(2)

引证文献(12条)

1. 周红兵, 杨彦飞, 蔡墟 [GPS-RTK在公路测量中的应用及影响因素分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2008(27)
2. 韦振华, 尤莉 [GPS RTK技术在榆林市加密控制测量中的应用](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2007(30)
3. 孙斌, 畅毅, 石矿林, 刘洪喜, 高怀才 [快速确定复杂山地三维激发点桩号的方法及其应用探讨](#)[期刊论文]-[物探装备](#) 2013(4)
4. 孙斌, 畅毅, 石矿林, 范有红 [影响RTK作业质量的因素及其应对措施](#)[期刊论文]-[物探装备](#) 2011(3)
5. 董春来, 史建青, 郭淑艳 [实时动态差分法测量精度模型及实验研究](#)[期刊论文]-[全球定位系统](#) 2011(4)
6. 汪永红 [GPS-RTK技术在兰新铁路勘测定界中的应用](#)[期刊论文]-[科学之友](#) 2011(24)
7. 傅强, 叶东祥 [浅谈GPS-RTK在公路测量中的应用](#)[期刊论文]-[交通科技](#) 2010(4)
8. 杨铁利, 许惠平, 付志强 [GPS RTK在高速公路定线测量中的不确定性研究](#)[期刊论文]-[内蒙古师范大学学报\(自然](#)

科学汉文版) 2007(2)

9. 周理含 最小二乘支持向量机在GPS高程转换中的应用[期刊论文]-工程地球物理学报 2010(2)
10. 侯至群 昆明市连续运行GPS参考站系统(KMCORS)在城市测绘中的应用研究[期刊论文]-科技创新导报 2008(28)
11. 畅毅. 张建恩. 祁钰 影响GPS RTK作业质量的因素分析[期刊论文]-测绘技术装备 2007(2)
12. 侯至群. 丁仁军 KMCORS系统一些应用问题的探讨[期刊论文]-城市勘测 2007(6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_chtb200606010.aspx