

GPS 接收机天线相位中心偏差的三维检定研究

郭金运¹ 徐泮林¹ 曲国庆²

(1 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 山东省泰安市岱宗大街 223 号, 271019)

(2 山东理工大学建筑工程学院, 山东省淄博市张店区, 255012)

摘要: 根据 GPS 接收机天线相位中心的几何关系, 在超短基线相对定位法的基础上, 利用旋转天线, 结合精密水准测量, 给出了一种天线相位中心偏差三维检验的方法。实例表明, 该方法具有较高的精度和可靠性, 适合于在野外对 GPS 接收机天线相位中心偏差进行实际检定。

关键词: 超短基线; 天线相位中心; GPS 接收机; 偏差
中图法分类号: P228.42; P245

GPS 在测量中的应用十分广泛, 其作业速度快、精度高、布点灵活、可以全天候作业^[1-3]。但 GPS 高程精度相对于水平精度约低 2~3 倍, 主要是由于对流层改正十分困难, 但天线相位中心偏差也是一项重要因素, 尤其是混合不同形式的天线共同作业时, 可能造成测站间相对高程偏差达 cm 级, 甚至为 10cm。即使使用相同类型的天线, 也会有 0.015×10^{-6} 的尺度误差。对于水平位置的影响, 由天线相位中心偏差造成的误差也达 mm 级, 对于高精度的定位测量是不能忽视的, 如大坝形变监测、高层建筑物形变监测等。

天线相位中心是指微波天线的电气中心, 其理论设计应与天线的几何中心一致。但由于多种原因, 如天线制造水平、GPS 信号入射方向、高度角等, 天线相位中心与几何中心之间存在偏差, 该偏差就称为天线相位中心偏差^[4]。常用的检定 GPS 接收机天线相位中心偏差的方法主要有 3 种, 即旋转天线法、相对定位法和交换天线法^[4-6]。旋转天线法必须在室内进行, 用微波天线测量设备测定相位中心位置, 必须有微波暗室。因此旋转天线法所需的设备复杂、昂贵, 检定费用高、耗时多, 并且一般测绘部门没有这种设备, 不适合野外检测。相对定位法可以在野外随时进行, 但是它只能测定天线相位中心的二维水平偏差分量, 不能测定高程偏差分量。交换天线法可以进行天线相位中心垂直方向的偏差测定, 但不

能进行水平偏差分量的检定, 并且不适合于接收机主机和天线一体的 GPS 接收机。因此, 在野外可以综合利用相对定位法和交换天线法检定接收机主机与天线分体的 GPS 接收机的天线相位中心的三维偏差^[5], 但要分步进行, 而且这种方法耗时较多, 精度也不一致。

1 基本原理与方法

在进行天线相位中心偏差检定时, 在天空视野开阔、无强电磁场干扰和反射环境的地势平坦之处, 选择一超短基线, 一般取 1~10m。在基线两端点上安置 GPS 接收机, 将天线严格置平, 选择 PDOP ≤ 5 所对应的时间段进行观测。相位中心一般是指平均相位中心, 而瞬时相位中心是随时间而变化的。为了求得稳定的平均相位中心, 要求有足够长的观测时间, 一般一个时段为 1.5h。

如图 1 所示, a 、 b 分别为两个天线, O_a 、 O_b 分别为对应的几何中心。以 O_a 为原点, 子午线方向为 x 轴, z 轴指向天顶, y 轴与 x 、 z 轴构成左手系, 称为站心地平直角坐标系 O_axyz 。以 O_b 为原点, x' 、 y' 、 z' 轴分别平行于 x 、 y 、 z 轴, 建立局部坐标系 $O_bx'y'z'$ 。(δx_a , δy_a , δz_a) 和 (δx_b , δy_b , δz_b) 分别为天线指北标志与 x 轴指向一致时, 天线 a 和 b 的相位中心偏差。

设 O_a 的大地坐标为 (L_a, B_a, H_a) (取 WGS-84 椭球), WGS-84 直角坐标为 (X_a, Y_a, Z_a) 。在 WGS-84 直角坐标系下, 坐标为 (X, Y, Z) 的点在站心地平坐标系 O_axyz 下的坐标 (x, y, z) 为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_a \cos L_a & -\sin B_a \sin L_a & \cos B_a \\ -\sin L_a & \cos L_a & 0 \\ \cos B_a \cos L_a & \cos B_a \sin L_a & \sin B_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_a \\ Y - Y_a \\ Z - Z_a \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

设在 WGS-84 坐标系下的超短基线向量为 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$, 对应的站心地平坐标系下的基线向量为 (dx, dy, dz) , 那么由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_a \cos L_a & -\sin B_a \sin L_a & \cos B_a \\ -\sin L_a & \cos L_a & 0 \\ \cos B_a \cos L_a & \cos B_a \sin L_a & \sin B_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

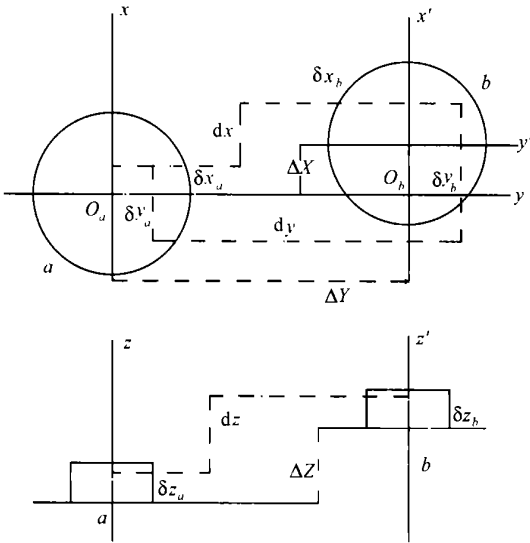


图 1 天线相位中心检测示意图

Fig.1 Sketch Map of Checking on the Antenna Phase Center

1.1 天线相位中心偏差水平分量的检定

在一条基线中, 基线水平分量和两个天线相位中心偏差水平分量共有 6 个未知参数, 因此至少需要 6 个观测量。如图 1 所示, 固定天线 a , 使

$$b_p = \begin{cases} [-1 & 0 & \cos i\theta & -\sin i\theta & 1 & 0]^T, & \text{当 } p = 2i + 1, i = 0, 1, \dots, n - 1 \\ [0 & -1 & \sin i\theta & \cos i\theta & 0 & 1]^T, & \text{当 } p = 2i, i = 0, 1, \dots, n - 1 \\ [-\cos j\theta & \sin j\theta & 1 & 0 & 1 & 0]^T, & \text{当 } p = 2n + 2j - 1, j = 1, 2, \dots, n - 1 \\ [-\sin j\theta & -\cos j\theta & 0 & 1 & 0 & 1]^T, & \text{当 } p = 2n + 2j, j = 1, 2, \dots, n - 1 \end{cases} \quad (8)$$

根据最小二乘原理, 求解方程(7), 可得:

$$\delta = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (9)$$

式中, P 为观测量的权阵, 且有:

其指北标志指向 x 轴。按等角 θ 顺时针旋转天线 b , 满足 $n = 360^\circ / \theta$ 为整数。那么, 第 i 次旋转后, 天线 b 的相位中心位置水平分量为:

$$\begin{bmatrix} \delta x_b \\ \delta y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i\theta \delta x_b - \sin i\theta \delta y_b \\ \sin i\theta \delta x_b + \cos i\theta \delta y_b \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \quad (3)$$

设第 i 次观测所得的 WGS-84 下的基线向量, 由式(2)转换为站心地平坐标系下的基线水平分量与以几何中心为准的基线向量和两天线相位中心的关系为:

$$\begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x - \delta x_a + \cos i\theta \delta x_b - \sin i\theta \delta y_b \\ \Delta y - \delta y_a + \sin i\theta \delta x_b + \cos i\theta \delta y_b \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \quad (4)$$

令天线 b 的指北标志指向 x 轴不动, 按等角 θ 顺时针旋转天线 a 。那么, 第 j 次旋转后, 天线 a 的相位中心位置水平分量为:

$$\begin{bmatrix} \delta x_a \\ \delta y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos j\theta \delta x_a - \sin j\theta \delta y_a \\ \sin j\theta \delta x_a + \cos j\theta \delta y_a \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (5)$$

设第 $n+j-1$ 次观测所得的 WGS-84 下的基线向量, 由式(2)转换为站心地平坐标系下的基线水平分量与以几何中心为准的基线向量和两天线相位中心的关系为:

$$\begin{bmatrix} dx_{n+j-1} \\ dy_{n+j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x + \delta x_b - \cos j\theta \delta x_a + \sin j\theta \delta y_a \\ \Delta y + \delta y_b - \sin j\theta \delta x_a - \cos j\theta \delta y_a \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (6)$$

因此, 总共有 $2n-1$ 次观测, 有 $4n-2$ 个方程式, 误差方程式用矩阵形式表达为:

$$V = B \delta - l \quad (7)$$

式中, $\delta = [\delta x_a, \delta y_a, \delta x_b, \delta y_b, \Delta x, \Delta y]^T$ 为未知参数向量; $l = [dx_1, dy_1, dx_2, dy_2, \dots, dx_{2n-1}, dy_{2n-1}]^T$ 为观测值向量; $V = [v_{x_1}, v_{y_1}, v_{x_2}, v_{y_2}, \dots, v_{x_{2n-1}}, v_{y_{2n-1}}]^T$ 为观测值改正数向量; $B = [b_1, b_2, \dots, b_{4n-2}]^T$ 为设计矩阵, 其中 $b_p (p = 1, 2, \dots, 4n-2)$ 为列向量,

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_{4n-2} \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } P_k =$$

$$\begin{cases} 0, & \text{当 } t < 0.5 \\ \frac{t}{1.5}, & \text{其他} \end{cases}; t \text{ 为观测时段长度 (h)}.$$

单位权中误差为:

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{V^T P V}{4n - 8}} \quad (10)$$

未知参数 δ 的协因数矩阵为:

$$Q_{\delta\delta} = (B^T P B)^{-1} \quad (11)$$

在野外进行 GPS 接收机天线相位中心偏差水平分量检验时, 有两种情况是常用的, 即 $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 。在实际作业时, 这两种情况容易掌握和操作, 同时也有足够的多余观测。

1) $\theta=90^\circ$ 的情形。

当天线 a 由 $a_1(\delta x_a, \delta y_a)$ 位置顺时针旋转 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 后, 转到 $a_2(-\delta y_a, \delta x_a), a_3(-\delta x_a, -\delta y_a), a_4(\delta y_a, -\delta x_a)$ 。同样, 天线 b 由 $b_1(\delta x_b, \delta y_b)$ 位置顺时针旋转 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 后, 转到 $b_2(-\delta y_b, \delta x_b), b_3(-\delta x_b, -\delta y_b), b_4(\delta y_b, -\delta x_b)$ 。因此, 共观测 7 个时段, 得到 14 个误差方程式。

2) $\theta=45^\circ$ 的情形。

这时, 天线每次旋转的角度为 45° , 共观测 15 个时段, 30 个误差方程式。与 $\theta=90^\circ$ 的情况相比, 需要两倍以上观测时间, 平差计算也较复杂, 但结果精度高, 可靠性好。

1.2 天线相位中心偏差垂直分量的检定

如图 1 所示, 在理论上:

$$\hat{z}_b - \hat{z}_a = dz - \Delta z \quad (12)$$

在进行天线相位中心偏差水平分量检验时, 共得到 $2n - 1$ 个 WGS-84 下的基线 ΔZ 分量, 经式(2)转换为站心地平坐标系中的垂直分量 dz 。

表 1 GPS 接收机天线相位中心偏差三维检测结果/mm

Tab. 1 The Three-Dimensional Checking Results of Antenna Phase Center Bias of GPS Receiver

δx_a	δy_a	δx_b	δy_b	$\overline{\Delta z}$	备注
1.32±0.27	1.60±0.27	1.25±0.27	1.54±0.27	2.26±0.87	两台 Zeiss RD24 接收机
-2.42±0.31	-1.54±0.31	-2.29±0.31	-1.40±0.31	2.83±0.94	两台 Zeiss RS12 接收机
1.40±0.49	1.92±0.49	-2.08±0.49	-1.37±0.49	4.36±1.13	a 为 Zeiss RD24, b 为 Zeiss RS12

从表 1 中可以看出, 相同型号同批次出厂的 GPS 接收机天线相位中心偏差水平分量是基本一致的, 垂直分量之差也为亚 mm 级; 不同型号的接收机天线就有一定的差别, 特别是其相位中心偏差水平分量的方位差别较大, 垂直分量之差为 mm 级。因此, 在一般工程测量中, 天线相位中心偏差的影响可以忽略。但对于精密工程测量和高精度定位测量, 就必须考虑天线相位中心偏差的影响。另外, 在 GPS 水准测量中, 也应考虑天线相位中心偏差的影响, 以提高测量精度。

在式(12)中, 如果精确知道 Δz , 那么就可求得两天线相位中心偏差垂直分量之差。因此, 在检定相位中心偏差水平分量的同时, 采用精密水准测量测定两天线抑径板之间的高差 Δz 。采用 Zeiss Ni004, Koni 007, Wild N3 或国产的 S_1 精密水准仪, 按一、二等水准要求施测, 这样共进行了 $2n - 1$ 次测定, 第 i 次结果为:

$$\Delta \hat{z}_i = dz_i - \Delta z_i \quad (13)$$

取其平均值作为最终结果:

$$\overline{\Delta \hat{z}} = \frac{1}{2n - 1} \sum_{i=1}^{2n-1} \Delta \hat{z}_i = \frac{1}{2n - 1} \sum_{i=1}^{2n-1} (dz_i - \Delta z_i) \quad (14)$$

那么, 两天线相位中心偏差垂直分量之差的检定中误差为:

$$m_{\Delta \hat{z}} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{2n - 2}} \quad (15)$$

式中, $v_i = \Delta \hat{z}_i - \overline{\Delta \hat{z}}$ 。

2 实例分析

笔者分别对两台 Zeiss RD24、两台 RS12 以及一台 RD24 和一台 RS12 GPS 接收机进行了三组天线相位中心偏差检测。采用的超短基线长约 5m, 基线近东西方向布置。相位中心偏差水平分量检定时, 采用旋转角 $\theta=90^\circ$, 每个时段长度为 1.5h。采用 S_1 水准仪进行精密水准测量, 仪器高采用小钢尺测前和测后各丈量 5 次, 互差不超过 2mm, 取其平均值作为最终结果。三组检测结果见表 1 和图 2。

3 结 语

本文利用 GPS 接收机天线相位中心的几何关系, 在相对定位法的基础上, 给出了一种天线相位中心偏差三维检定的方法。经实例验证, 该方法具有较高的可靠性和精度, 适合野外对 GPS 接收机天线相位中心偏差的检验。同时, 实例还表明, 相同型号的接收机天线相位中心偏差基本一致, 垂直偏差分量之差达 mm 级, 不同型号的接收

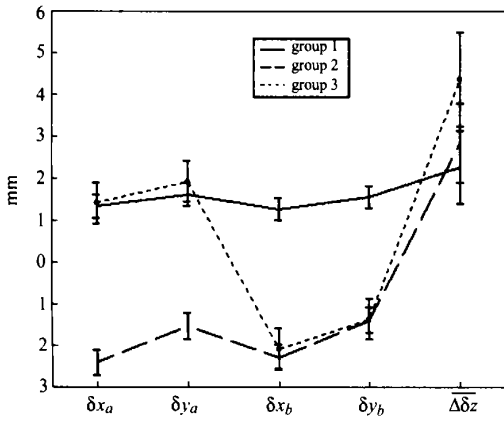


图 2 检验结果和误差

Fig. 2 Checking Results on Zeiss GPS Receiver Antennas and Their Errors

机天线相位中心偏差相差较大。

致谢: 感谢中国测绘科学研究院胡建国研究员、山东科技大学靳奉祥教授和崔先国教授、澳大利亚测绘局贾明海博士的指导和帮助。

参 考 文 献

1 刘大杰, 施一民, 过静. 全球定位系统(GPS)的原理

与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1996

2 周忠谟, 易杰军, 周 琪. GPS 卫星测量原理与应用 (第二版). 北京: 测绘出版社, 1999

3 李毓麟. 高精度静态 GPS 定位技术研究论文集. 北京: 测绘出版社, 1996

4 国家测绘局. 全球定位系统(GPS)测量型接收机检定规程(CH8016-95). 北京: 测绘出版社, 1995

5 蔡宏翔. GPS 接收机天线相位中心三维位置偏差野外测定方法. 测绘技术装备, 2000, 2(3): 23~25

6 陈逸群, 刘大杰. GPS 接收机天线相位中心偏差的一种检定与计算方法. 测绘通报, 2000(12): 15~16

7 郭金运, 徐泮林, 王同孝, 等. 矿区 GPS 测量控制网实践. 勘察科学技术, 2000(3): 52~55

8 熊 介. 椭圆大地测量学. 北京: 解放军出版社, 1988

9 Tao H X, Gong X J, Guo J Y. A Fitting Method of Pseudopolynomial for Solving Nonlinear Parametrical Adjustment. AVN, 2001 (5): 191~195

第一作者简介: 郭金运, 副教授, 博士生. 主要从事卫星大地测量等方面的研究和教学工作. 已出版著作(教材)3 部, 在国内外公开发表专业论文 50 多篇.
E-mail: jinyunguo1@sohu.com

A Three-Dimensional Method for Checking the Antenna Phase Center Bias of GPS Receiver

GUO Jinyun¹ XU Panlin¹ QU Guojing²

(1 Institute of Geo-science and Technology, Shandong University of Science and Technology, 223 Daizong Street, Taian, China 271019)

(2 Architectural Engineering College, Shandong University of Poly-technology, Zhangdian District, Zibo, Shandong, China 255012)

Abstract: On the basis of the relative positioning method and the revolving method, by using the precise leveling, a new method is put forward for examining the antenna phase center three-dimensional bias of GPS receiver with the geometric relation of the antenna phase centers and the mini baseline. The examples and results show that the antenna phase center bias of the same type of GPS receivers is close to the homology, and the difference in vertical heft is up to millimeters. Those of the different type receiver antennas have much more differences.

Key words: mini baseline; antenna phase center; GPS receiver; bias

About the first author: GUO Jinyun associate professor, Ph. D candidate. His research interests include the satellite geodesy and the satellite gravimetry. He has published three books (for teaching) and more than 50 papers.

E-mail: jinyunguo1@sohu.com

(责任编辑: 平子)