

GNSS 天线相位中心偏差检测方法

牟卫华^{1,2}, 张国柱^{1,2}, 黎辉辉¹, 欧 钢^{1,2}

(1 国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2 北斗卫星导航产品 2301 质量检测中心, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对于高精度测量, 天线相位中心的偏差影响不能忽视, 测绘型天线在使用之前需要进行检定, 确保不超过误差容限. 通过对天线相位中心偏差标定过程分析, 建立了一种新的观测模型, 处理相对定位的基线解算数据, 基于最小二乘准则估计旋转中心和相位中心偏差. 该方法不需要约束天线的旋转角度和观测数据个数, 提高了天线相位中心偏差标定的精度. 通过对 GNSS-750 型测绘天线实际测试结果表明, 天线相位中心水平偏移标定精度优于 0.05 mm.

关键词: 天线相位中心; 相位中心偏差; 超短基线; 检测

中图分类号: TN965.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)11-0162-04

The Determination of GNSS Antenna Phase Center Offsets

MOU Wei-hua^{1,2}, ZHANG Guo-zhu^{1,2}, LI Hui-hui¹, OU Gang^{1,2}

(1 College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2 Testing Center of the 2301 Beidou Satellite Navigation Product Quality, Changsha 410073, China)

Abstract: The GNSS antenna phase center offsets affects the result of navigation positioning, so it can't be ignored for high-precision measurement. It is essential for GNSS antenna to measure the phase center offsets before high-precision satellite navigation surveying. With the analysis of antenna phase center offsets calibration process, a new observation model is established, which estimate the center of rotation and the phase center offsets by processing the baseline data based on least square criterion. This model does not constrain the rotation angel of the antenna and the number of the observed data, which improved the measure accuracy. The test results of GNSS-750 indicate that the proposed method can measure the antenna phase center offset with the measuring accuracy less than 0.05mm.

Key words: antenna phase center; pPhase center offsets; mini baselines; Determination

1 引言

天线相位中心是指天线的电气中心, 通过卫星导航高精度测量得到的观测量即是以天线相位中心为基准, 在定位测量中对中、量天线高时则以天线参考点为基准. 由于多种原因, 天线相位中心与天线参考点之间存在偏差, 该偏差称为天线相位中心偏差 (Phase Center Offsets, PCO)^[1]. PCO 的性能指标直接关系到高精度测量精度的大小, 因此该指标是测量型接收机检定的重要环节, 相关学者与研究机

构也对其进行了深入的研究^[2], 如何提高其测量准确度, 是迫切需要解决的问题^[3].

常用的天线相位中心偏差检定方法有旋转天线法^[4, 5]、相对定位法和交换天线法^[6]. 旋转天线法是在微波暗室中采用专用微波测量设备, 测定所需设备复杂、昂贵, 建设成本高^[7]. 相对定位法通过测定天线不同方向两天线间的基线向量来测定天线相位中心偏差, 该方法操作简单、方便, 成本低, 该方法是监督检验检疫总局发布的 JJF1118-2004 和行业标准 CH8016-95 规定采用的方法, 目前被广泛采

用^[8,9],相对测定法只能测定天线相位中心的水平偏差,交换天线法可以进行天线相位中心垂直偏差的测定^[10]。王建宇等人分析了天线相位中心偏差与基线夹角对测试结果的影响^[11];接收机天线一般不会配备水平度盘,旋转天线存在角度不准确的问题,为了控制旋转角度的准确性,魏锦德等人提出利用基座上的3个脚螺旋控制旋转角度 0° , 120° , 240° ^[12];王铁生等人分析了旋转角度误差对天线相位中心水平偏差的影响,提出了利用均值法进行偏差检测及校准的方法^[13]。

本文通过对相对定位检测过程分析建立了一种新的观测模型,基于最小二乘准则推导了旋转中心和相位中心偏差估计算法。在超短基线场上进行实验,采用 RTKLIB 软件解算基线向量,对基线解算的结果进行处理,估计出天线相位中心偏差。

2 天线相位中心偏差标定模型

2.1 PCO 水平偏差估计数学模型

选择以参考天线相位中心为坐标原点的站心坐标系,在相对定位法中,解算待测天线平均相位中心与参考天线相位中心的基线向量,得到的基线向量端点分布在以待测天线几何旋转中心为圆心、PCO 水平分量 r 为半径的圆上,如图 1 所示。由于观测受到接收机内部噪声的影响,基线向量端点为平稳随机变量,随机分布在圆附近。基于最小二乘准则,利用基线向量端点观测值,估计出旋转中心和 PCO 水平分量。

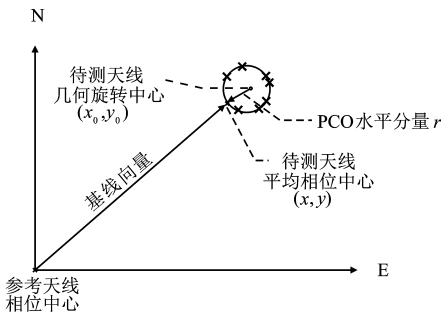


图 1 PCO 水平偏差测量模型

假设待测天线几何旋转中心坐标 (x_0, y_0) 、PCO 水平分量 r 为待求参数,待测天线平均相位中心坐标为 (x, y) , 则有关系方程: $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$, 可以展开为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + a \cdot x + b \cdot y + c = 0 \\ a = -2x_0 \\ b = -2y_0 \\ c = x_0^2 + y_0^2 - r^2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1) 可求得

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{a}{2} \\ y_0 = -\frac{b}{2} \\ r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - c} \end{cases} \quad (2)$$

令 $f = x^2 + y^2 + a \cdot x + b \cdot y + c$, 对于观测数据 (x_i, y_i) , f_i 等于误差, 基于最小二乘准则, 求函数极值

$$F = \min_{(a,b,c)} \sum_i f_i^2 \quad (3)$$

该极值问题的解等价于以下方程的解

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_i f_i \cdot x_i = 2 \sum_i (x_i^2 + y_i^2 + a \cdot x_i + b \cdot y_i + c) \cdot x_i = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_i f_i \cdot y_i = 2 \sum_i (x_i^2 + y_i^2 + a \cdot x_i + b \cdot y_i + c) \cdot y_i = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial c} = 2 \sum_i f_i = 2 \sum_i (x_i^2 + y_i^2 + a \cdot x_i + b \cdot y_i + c) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

展开整理可得

$$\begin{cases} (\sum_i x_i^2) a + (\sum_i x_i y_i) b + (\sum_i x_i) c = - \sum_i (x_i^3 + x_i y_i^2) \\ (\sum_i x_i y_i) a + (\sum_i y_i^2) b + (\sum_i y_i) c = - \sum_i (x_i^2 y_i + y_i^3) \\ (\sum_i x_i) a + (\sum_i y_i) b + n \cdot c = - \sum_i (x_i^2 + y_i^2) \end{cases} \quad (5)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i \\ \sum_i x_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i \\ \sum_i x_i & \sum_i y_i & n \end{bmatrix} \\ \mathbf{z} = \begin{bmatrix} - \sum_i (x_i^3 + x_i y_i^2) \\ - \sum_i (x_i^2 y_i + y_i^3) \\ - \sum_i (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{z} \end{cases} \quad (6)$$

该算法对输入观测数据的旋转角度无约束要求, 消除了旋转角度误差对检测结果的影响, 观测数据点的个数最小 3 个, 最多不限, 增加观测数据利于提高检定精度, 检定过程易操作。

2.2 检定步骤

根据上述算法, 基于最小二乘准则进行 PCO 偏

差估计的检定步骤如下：

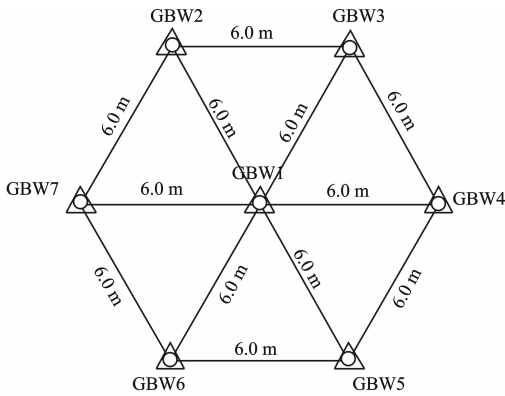
- (1)将参考天线与待测天线分别安装在超短基线场的两个观测墩上对中、调平、指北；
- (2)固定参考天线，旋转待测天线取得多组观测数据，组数大于等于 3 组；
- (3)利用基线解算软件解算基线向量，计算每个时间基线向量的期望；
- (4)利用解算出的每个时段基线向量期望值，代入式(6)基于最小二乘准则估计 PCO 水平偏差大小。

3 算法验证与结果分析

3.1 实验方案设计

为了判别检定算法的有效性，参考天线与待测天线选用高精度 Novatel GNSS-750 扼流圈天线进行检验。

测试场地为北斗卫星导航产品 2301 质量检测中心的超短基线场，超短基线场为正六边形，边长 6 m，任取其中两个观测墩，将参考天线布设在 GBW5，待测天线布设在 GBW1，布设位置见图 2。



(a)

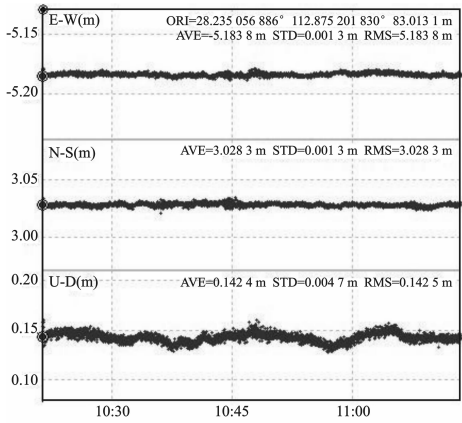


(b)

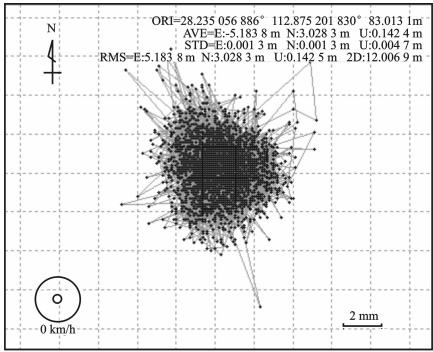
图 2 超短基线场与试验点位布设图

3.2 基线解算

基线解算软件采用 RTKLIB，图 3 所示为是解算一个时段的基线向量结果^[14-15]：



(a)基线向量解算结果E/N/U分量



(b)基线向量端点水平分布

图 3 超短基线解算结果

从一个观测时段解算出的基线向量结果可以看出，受接收机内部噪声水平等各误差因素的影响，基线向量解算东向和北向的标准差为 1.3 mm，天向标准差为 4.7 mm，基线解算的结果表现为平稳随机过程。取每个时段基线解算结果的期望值作为下一步 PCO 偏差估计的输入。

3.3 最小二乘 PCO 水平偏差估计

利用基线解算软件求出所有观测时段的基线向量如表 1 所示。

表 1 超短基线计算值

序号	E/m	N/m	B/m
1	-5.183 8	3.028 3	6.005
2	-5.183 6	3.026 8	6.004
3	-5.184 4	3.026 2	6.004
4	-5.185 6	3.027 5	6.006

从解算的基线数据可以看出，由于天线相位中心水平偏差的存在，天线水平方向的旋转导致基线

的长度发生变化,最大变化为 2 mm.

利用最小二乘相位中心偏差估计算法对 4 组观测数据进行处理,算出旋转中心位置位于 (−5.184 5,3.027 4),相位中心水平偏差 1.1 mm,如图 4 所示,通过对估计算法的残差计算,对相位中心水平偏差的估计精度优于 0.05 mm.

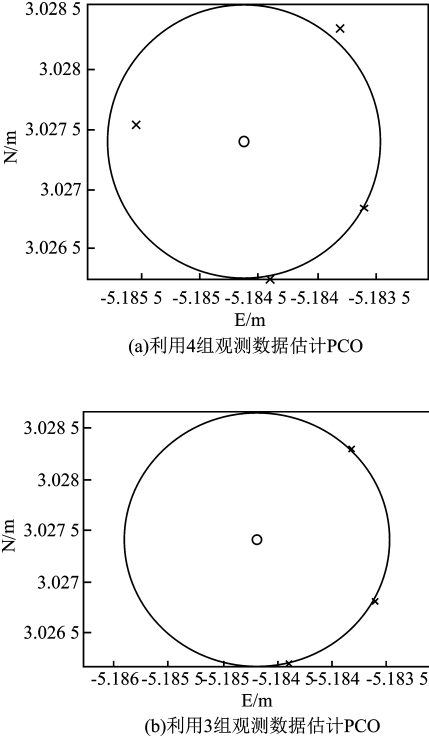


图 4 旋转中心与相位中心偏差估计结果

利用该算法对观测数据中的前 3 组观测数据进行了处理,算出的旋转中心位于 (−5.184 7,3.027 4),水平相位中心偏差 1.3 mm.可以看出该算法对 3 组观测数据进行处理也是有效的.4 组观测数据的计算值与 3 组观测数据的计算值稍有不同,其原因是由于利用了数据的冗余性减小了各种随机误差的影响,进一步提高了测量精度.

4 结束语

基于最小二乘准则对旋转中心和 PCO 水平偏差进行估计的算法对数据观测点数目没有限制可以灵活定义,最少 3 个观测点数据即可,支持 8 方向及更多方向测试,通过增加测试数据冗余性,进一步提高了测试结果的精度,经过测试,相位中心水平偏移标定精度优于 0.05mm,可应用该方法对高精度测量型天线进行检定.

该方法不需要对旋转角度提约束要求,检测过程中不必进行方向精确对准,消除了方向旋转不准

确对 PCO 偏差检定精度的影响,操作简单易行.

参考文献:

[1] 刘慧娟,党亚民,王潜心. GPS 天线相位中心改正及其影响分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(2): 29-33.

[2] 马德强. GNSS 接收机天线相位中心误差改正方法研究[D]. 西安:长安大学, 2014.

[3] 董建明,魏亮,易卿武. 卫星导航测量型天线的相位中心标定[J]. 无线电工程, 2014, 44(6): 47-50.

[4] 裴超. GNSS 接收机时频校准技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.

[5] 乐四海,王强,张向征. 基于高精度定位天线相位中心偏差的分析[J]. 无线电工程, 2010, 40(5): 30-32.

[6] 张则宇,刘智超,庞飞,等. 三种 GPS 天线相位中心偏差校准方法比较[J]. 计量、测试与校准, 2013, 33(4): 55-58.

[7] 刘智超,张则宇,庞飞,等. GNSS 天线相位中心偏差检定新方法[J]. 计测技术, 2013, 33(S2): 8-11.

[8] 刘俊清,丁广,张晨侠,等. GPS 接收机噪声及天线相位中心偏差检测技术应用[J]. 防灾减灾学报, 2012, 28(3): 77-81.

[9] 黄功文,王小瑞,党引群,等. GNSS 接收机天线相位中心改正对高精度定位影响[J]. 全球定位系统, 2014, 39(2): 49-53.

[10] 李晓波,王小亚,任金卫. GNSS 天线相位中心偏差与变化精确标定方法研究[J]. 天文学进展, 2012, 30(4): 501-517.

[11] 王建宇,初照,郑加柱. GPS 天线相位中心检定方法的研究[J]. 森林工程, 2013, 29(4): 79-82.

[12] 魏锦德,黄张裕,海美,等. GPS 天线相位中心误差的检测与改正[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(6): 410-413.

[13] 王铁生,樊慧娟,赵东保. GPS 天线相位中心水平方向偏差的检测与校正[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(6): 73-76.

[14] 张建龙,徐爱功,张兆南,等. RTKLIB 软件静态精密单点定位精度测试与分析[J]. 全球定位系统, 2014, 39(1): 37-41.

[15] Tokyo university of marine sciece and technolog. Rtklib ver2. 4. 2 Manual[EB/OL]. [2016-03-16](2013-04-29). <http://www.rtklib.com>.

作者简介:

牟卫华 男,(1979-),博士研究生,副研究员.研究方向为卫星导航模拟仿真、测试评估.
E-mail:drmmou@163.com