

文章编号: 1671-7449(2025)02-0238-09

J. Test Measur. Technol., 2025, 39(2): 238-246.

一种GNSS接收机天线相位中心偏差的原位检测方法

张风霜, 李文一, 刘浩

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 为了实现GNSS连续观测站接收机天线相位中心偏差的原位检测, 在基线测量相对测定法的基础上, 推导了等距基线臂法, 依据该方法研发了便携式等距基线臂装置, 并进行了现场观测数据实验。实验结果表明: 3种不同型号GNSS天线的原位检测结果与其历年常规检测结果的算术平均值的差异值均小于其格拉布斯临界值; 同一型号GNSS天线的多组原位检测结果的重复性小于0.2 mm, 两种方法的10组对比检测结果无显著差异; 等距基线臂法可在不干扰GNSS基准站连续观测的前提下实现天线相位中心偏差的原位检测。

关键词: 天线相位中心偏差; 原位检测; 等距基线臂法; GNSS连续观测

中图分类号: TM937.5

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025027

引用格式: 张风霜, 李文一, 刘浩. 一种GNSS接收机天线相位中心偏差的原位检测方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 238-246.

ZHANG Fengshuang, LI Wenyi, LIU Hao. An in-situ detection method for phase center deviation of GNSS receiver antenna[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 238-246.

An In-Situ Detection Method for Phase Center Deviation of GNSS Receiver Antenna

ZHANG Fengshuang, LI Wenyi, LIU Hao

(The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

Abstract: To realize the in-situ detection of antenna phase center deviation of GNSS continuous observation station receiver, the equidistant baseline arm method is derived based on the relative method of baseline measurement. According to this new method, a portable equidistant baseline arm device is developed, and field observation data experiments are carried out. The experimental results show that the difference between the in-situ detection results of three different types of GNSS antennas and the arithmetic mean of their conventional detection results over the years is less than the Grubbs critical value. The repeatability of multiple sets of in-situ detection results of the same type of GNSS antenna is less than 0.2 mm. There is no significant difference in the results of 10 groups of contrast detection between these two methods. The equidistant baseline arm method can realize the in-situ detection of antenna phase center deviation without interfering with the continuous observation of GNSS reference stations.

Key words: antenna phase center deviation; in-situ detection; equidistant baseline arm method; continuous observation of GNSS

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 国家计量技术规范资助项目(G2022003)

作者简介: 张风霜(1980-), 女, 高级工程师, 主要从事GNSS数据处理分析和测绘导航仪器的检定和研究。E-mail: zfs915@126.com.

0 引言

GNSS 载波相位测量值是以天线相位中心为测量点获得的, 天线相位中心即微波天线的电气中心^[1], 其理论设计应与天线几何中心(天线参考点)一致。但由于机械误差和电磁特性等影响, 天线相位中心和几何中心存在一定偏差, 称为天线相位中心误差。天线相位中心误差由天线相位中心偏差(Phase Center Offset, PCO)和天线相位中心变化(Phase Center Variation, PCV)组成, PCO 为瞬时相位中心的平均值或平均相位中心, PCV 为瞬时相位中心与平均相位中心的差异。相关研究表明, GNSS 天线相位中心误差不可忽略: 平面方向, 天线相位中心误差对精密单点定位精度影响为毫米级; 高程方向, 天线相位中心误差可造成分米级影响^[2-6]。因此在 GNSS 高精度应用中, 必须考虑天线相位中心误差改正。

目前, GNSS 接收机天线相位中心误差的校正方法有三种^[5-6]。第一种为微波暗室法, 基于微波暗室中的旋转转台的平移和旋转控制待测天线接收不同入射角度的 GNSS 模拟信号, 实现对 GNSS 接收机天线绝对相位中心的标定^[7]。第二种机器人法是基于自动机械臂的室外绝对校正法, 借助机械臂可以控制天线自由旋转, 在数小时内实现全方位 GNSS 观测, 采用历元间差分的方法对接收机天线多个频点的 PCO 和 PCV 分别进行标定^[8-9], 能够获取真实信号场景下的天线绝对相位中心, 提供 1 mm 精度的天线标定成果^[10]。

第三种方法是基于短基线的室外相对校正法, 在野外利用接收到的 GNSS 卫星发播的信号, 通过测定两天线间的基线向量来测定天线相位中心偏差, 即基线测量相对测定法。该方法是我国行业标准 CH8016-95 规定所采用的方法^[11-12], 操作简单、方便, 成本低, 被广泛应用^[13-15]。

《地壳运动监测技术规程》对 GNSS 接收机的各指标测试技术方法进行了详细的规定^[16], 其中对天线相位中心偏差的检测是依据基线测量相对测定法。目前, 中国大陆构造环境监测网络用于流动观测的 GNSS 接收机按上述规程要求在每年测前、测后分别进行一次检测。但是, 对于构造环境监测网络在网运行的 280 个 GNSS 连续观测基准站, 由于观测精度高、环境要求高、设备需连续运行、不方便安装拆卸、天线不能旋转, 而采用上述方法进行天线相位中心偏差检测, 都需要拆卸设备和旋转待检天线, 会干扰 GNSS 基准站的连续观测。因此, 上述检测方法都不适用于连续观测基准站天线, 需要推导新方法进行天线相位中心偏差的原位检测。本文在基线测量相对测定法的基础上, 重新推导了新方法——等距基线臂法, 依据该新方法研发了便携式等距基线臂装置。本文将分别从方法推导、不确定度分析、数据实验等方面对该方法进行介绍。

1 等距基线臂法推导

1.1 基线测量相对测定法

图 1 为基线测量相对测定法进行 GNSS 天线相位中心偏差检测的示意图。

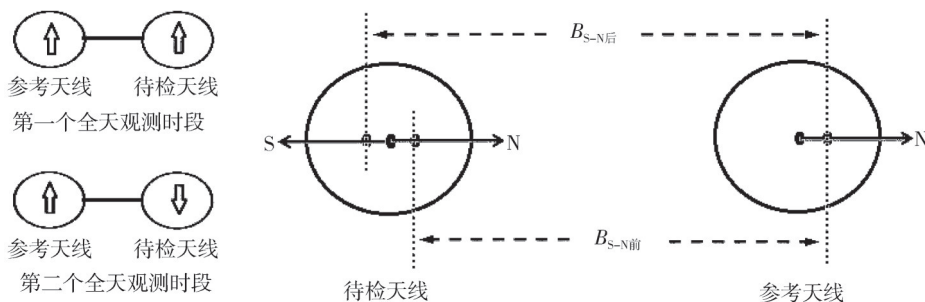


图 1 基线测量相对测定法进行 GNSS 天线相位中心偏差检测示意图

Fig. 1 The schematic diagram of GNSS antenna phase center deviation detection by relative method of baseline measurement

假设待检天线旋转 180°前测得的与参考天线之间的短基线 S-N 分量为 $B_{S-N前}$, 待检天线旋转 180°后测得的与参考天线之间的短基线 S-N 分量为 $B_{S-N后}$, 则待检天线的相位中心偏差的南北分量为

$$D_{S-N} = \frac{B_{S-N前} - B_{S-N后}}{2} \quad (1)$$

同样, 待检天线旋转 180°前测得的与参考天线之间的短基线 E-W 分量为 $B_{E-W前}$, 待检天线旋转 180°后测得的与参考天线之间的短基线 E-W 分量为 $B_{E-W后}$, 则待检天线的相位中心偏差的东西分量为

$$D_{E-W} = \frac{B_{E-W前} - B_{E-W后}}{2} \quad (2)$$

按基线测量相对测定法进行GNSS天线相位中心偏差检测,需要将待检GNSS设备搬运至GNSS长度基线检定场并在观测过程中旋转待检天线。

1.2 等距基线臂法

为使GNSS连续观测基准站实现天线相位中心偏差的原位检测,新方法需要解决关键的两个难题:第一,GNSS连续观测仪器不能拆卸搬运至长度基线检定场,因此需要借助便携式装置提供

超短基线检定场的检测条件;第二,GNSS连续观测仪器天线(待检天线)不能旋转,以免干扰其正常观测,因此考虑增加1台参考天线,即相对于基线测量相对测定法,新方法的参考天线数量由1台增加为2台,在观测过程中,待检的连续观测基准站天线始终保持不变,而通过同时旋转2台参考天线达到待检天线相位中心偏差原位检测的目标。图2为等距基线臂法进行GNSS接收机天线相位中心偏差原位检测的观测及计算过程示意简图。

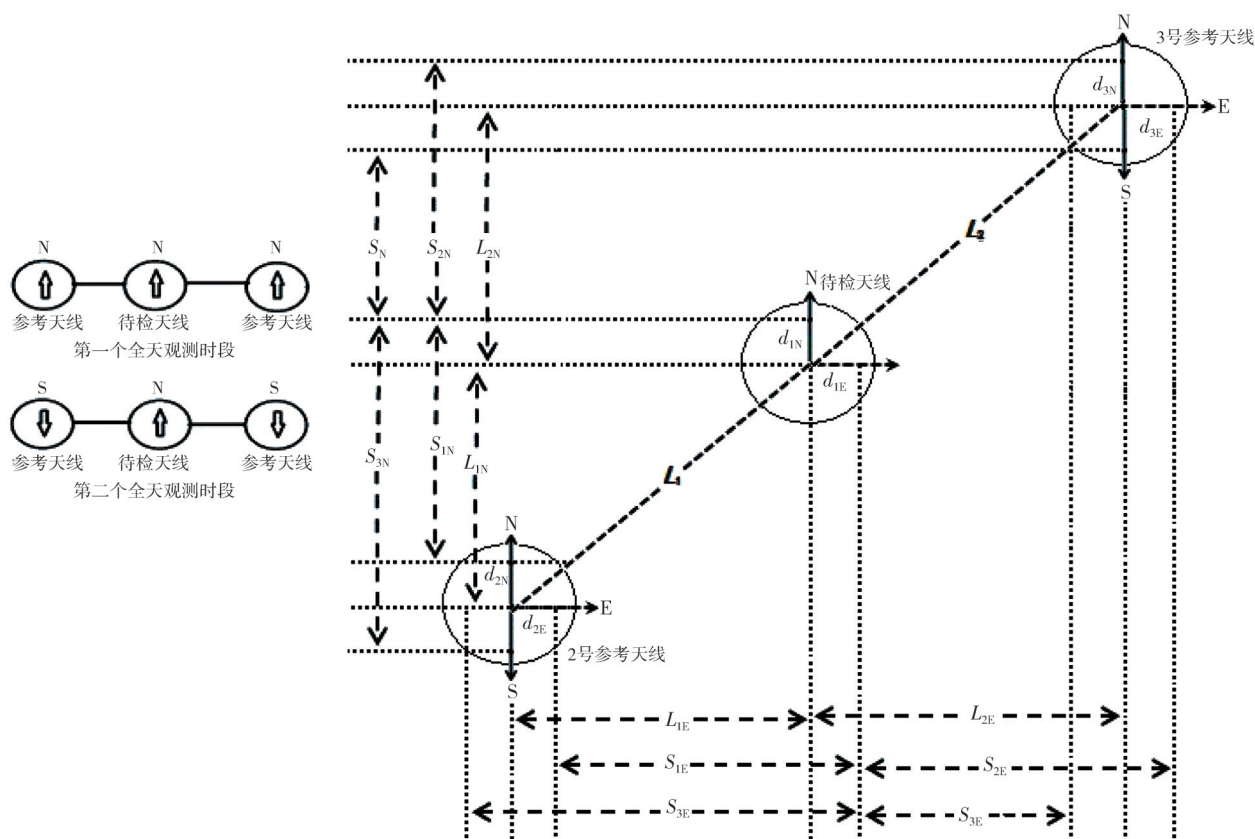


图2 等距基线臂法进行GNSS天线相位中心偏差检测示意图

Fig. 2 The schematic diagram of GNSS antenna phase center deviation detection by equidistant baseline arm method

依据等距基线臂法进行GNSS连续观测接收机天线相位中心偏差的原位检测时,在第1个全天观测时段,待检天线和2台参考天线的定向标志都指向正北,安装完成后观测1个完整的全天时段;第2天,保持待检天线始终指向正北,将2台参考天线均水平旋转 180° ,此时2台参考天线的定向标志均指向正南,再观测1个完整的全天时段。

如图2所示,假设 L_1, L_2 为等距基线臂装置两端的参考天线几何中心至中间被测天线几何中心的臂长, $L_{1E}, L_{1N}, L_{2E}, L_{2N}$ 分别为其水平分量; d_{1N}, d_{2N}, d_{3N} 分别为待检天线、2号参考天线和3号

参考天线相位中心水平偏差的S-N分量; d_{1E}, d_{2E}, d_{3E} 分别为待检天线、2号参考天线和3号参考天线相位中心水平偏差的E-W分量; S_{1N}, S_{1E} 分别为第1个全天观测时段2号参考天线与待检天线之间的短基线矢量的S-N、E-W分量; S_{2N}, S_{2E} 分别为第1个全天观测时段3号参考天线与待检天线之间的短基线矢量的S-N、E-W分量; S_{3N}, S_{3E} 分别为第2个全天观测时段2号参考天线与待检天线之间的短基线矢量的S-N、E-W分量; S_{4N}, S_{4E} 分别为第2个全天观测时段3号参考天线与待检天线之间的短基线矢量的S-N、E-W分量,则

$$\begin{aligned} S_{1N} &= L_{1N} + d_{1N} - d_{2N}, S_{2N} = L_{2N} - d_{1N} + d_{3N}, \\ S_{3N} &= L_{1N} + d_{1N} + d_{2N}, S_{4N} = L_{2N} - d_{1N} - d_{3N}, \\ S_{1E} &= L_{1E} + d_{1E} - d_{2E}, S_{2E} = L_{2E} - d_{1E} + d_{3E}, \\ S_{3E} &= L_{1E} + d_{1E} + d_{2E}, S_{4E} = L_{2E} - d_{1E} - d_{3E}. \end{aligned} \quad (3)$$

设基线臂两端长度差异量值 $\Delta L = L_1 - L_2$, $\Delta L_N = L_{1N} - L_{2N}$, $\Delta L_E = L_{1E} - L_{2E}$, 则待检天线的相位中心水平偏差可依据式(4)计算得到。等距基线臂两端长度差异量值 ΔL 主要受装置生产加工工艺精度和装配方式及装配过程的影响。实际检验计算中,若 ΔL 小于 0.1 mm, 则根据式(4), 该差异量对待检天线相位中心水平偏差分量 d_{1N} 和 d_{1E} 的影响量值小于 0.05 mm, 相对于 GNSS 天线相位中心水平偏差的限差量值 1 mm, 在 95% 的置信区间内, 该差异量可忽略, 则待检天线的相位中心水平偏差可依据式(5)计算得到。

若 ΔL 大于 0.1 mm, 则等距基线臂两端长度差异量值对天线相位中心水平偏差检测的计算结果的影响不可忽略, 此时 ΔL 为影响待检 GNSS 天线相位中心水平偏差检测结果的主要系统误差。若 ΔL 可通过测量给出准确值, 则可在式(4)计算中直接加以改正; 若不方便测量, 理论上可以通过交换法, 即保持参考天线和待检天线的相对位置不变, 仅通过交换安装基线臂, 再重新观测 48 h, 使两次测量中因基线臂长差异导致的误差对测量结果的作用相反, 从而消除该系统误差, 可依据式(6)计算得出待检天线的相位中心水平偏差。

式(6)中: S'_{1N} 、 S'_{1E} 、 S'_{2N} 、 S'_{2E} 及 S'_{3N} 、 S'_{3E} 、 S'_{4N} 、 S'_{4E} 分别为交换安装基线臂后再重新观测 48 h 的第 1 个全天观测时段及第 2 个全天观测时段 2 号参考天线和 3 号参考天线分别与待检天线之间的短基线矢量的 S-N、E-W 分量。需要注意的是, 再重新观测 48 h, 观测时段进一步延长, 新增 8 个短基线矢量观测分量, 将会引入更多的观测误差, 且重新观测会消耗较多的时间和人力成本, 交换安装基线臂过程中也会新增安装误差, 在实际观测中并不可行, 所以便携式装置应满足两端参考天线几何中心至中间被测天线几何中心的臂长差异值可测且误差不超过 0.1 mm 的要求, 则可在数据处理中依据式(4)对臂长差异值直接进行改正。

$$\begin{aligned} d_{1N} &= \frac{(S_{1N} + S_{3N}) - (S_{2N} + S_{4N}) - 2\Delta L_N}{4}, \\ d_{1E} &= \frac{(S_{1E} + S_{3E}) - (S_{2E} + S_{4E}) - 2\Delta L_E}{4}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} d_{1N} &= \frac{(S_{1N} + S_{3N}) - (S_{2N} + S_{4N})}{4}, \\ d_{1E} &= \frac{(S_{1E} + S_{3E}) - (S_{2E} + S_{4E})}{4}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} d_{1N} &= \frac{(S_{1N} + S_{3N}) - (S_{2N} + S_{4N}) + (S'_{1N} + S'_{3N}) - (S'_{2N} + S'_{4N})}{8}, \\ d_{1E} &= \frac{(S_{1E} + S_{3E}) - (S_{2E} + S_{4E}) + (S'_{1E} + S'_{3E}) - (S'_{2E} + S'_{4E})}{8}. \end{aligned} \quad (6)$$

对于一个合格的天线, 要求各被检天线相位中心水平分量构成的径向长度(即 $((d_{1N})^2 + (d_{1E})^2)^{1/2}$) 不超过 2 mm, 同时要求 d_{1N} 、 d_{1E} 与制造商提供的天线相位中心偏差模型改正值之差的径向长度(即 $((d_{1N} - D_{sn})^2 + (d_{1E} - D_{ew})^2)^{1/2}$, D_{sn} 为制造商提供的天线相位中心偏差的南北分量, D_{ew} 为制造商提供的天线相位中心偏差的东西分量)不得超过 1 mm。

2 便携式装置

2.1 装置简介

依据上述等距基线臂法的推导过程, 便携式装置应满足: 1) 两端参考天线几何中心与中间被测天线几何中心在一条直线上; 2) 两端参考天线几何中心至中间被测天线几何中心的臂长差异值可测且误差不超过 0.1 mm。因此, 如何在不影响 GNSS 连续观测基准站正常观测的前提下实现装置的精确定位安装是关键。

鉴于电涡流传感器具有非接触测量的优势, 本文利用电涡流传感器研发了便携式等距基线臂装置(见图 3)用于 GNSS 接收机天线相位中心偏差的原位检测。电涡流传感器利用电涡流效应原理, 能静态和动态地非接触、高线性度($<1\%$)、高灵敏度(20~100 mV/ μm)、低噪声(36 μV)地测量被测金属导体(GNSS 天线金属连接杆)与探头端面的相对位置。

如图 3 所示, 便携式等距基线臂装置设计了 N、S、E 三分量探头, 均采用电涡流传感器进行非接触测量, 数字化实时显示装置与中间被测天线几何中心的相对位置, 可以在不接触 GNSS 基准站天线连接杆的条件下, 实现便携式装置的精确定位安装, 定位安装精度在 0.1 mm 以内, 安装完成后, 两端参考天线几何中心至中间被测天线几何中心的臂长差异值误差不超过 0.1 mm。

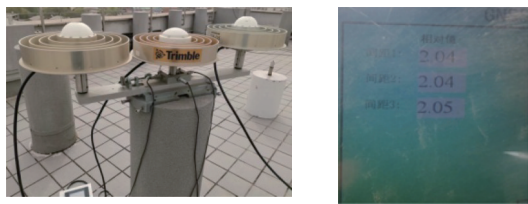


图3 便携式等距基线臂装置样机

Fig. 3 Prototype of portable equidistant baseline arm device

2.2 测量不确定度分析

GNSS天线相位中心水平偏差分别以偏差向量在北、东两个方向上的投影表示,本文仅对北方向的测量不确定度进行评定,东方向与其相同。依据等距基线臂法,借助便携式等距基线臂装置,原位检测GNSS天线相位中心水平偏差,考虑不确定度的来源主要为GNSS观测误差、装置定位安装误差、装置臂长差异值误差和天线对中误差。

2.2.1 GNSS观测误差

相对于常规检测,等距基线臂法原位检测2台参考天线,根据式(1),为计算得到 d_{1N} ,需进行连续2个全天观测时段的观测得到 S_{1N} 、 S_{2N} 、 S_{3N} 、 S_{4N} 。假设由上述4个观测量的观测误差引入的标准不确定度分量分别为 u_{1N} 、 u_{2N} 、 u_{3N} 、 u_{4N} ,由于连续2个全天观测时段的观测环境干扰因素基本保持一致,因此只考虑GNSS接收机分辨率所

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{4}u_{1N}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}u_{3N}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}u_{2N}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}u_{4N}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_3\right)^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{4 \times \left(\frac{1}{4}u_1\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_3\right)^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \times 0.29^2 + \frac{1}{4} \times 0.06^2 + 0.06^2 + 0.06^2} = 0.17 \text{ mm}。 \quad (11)$$

取包含因子 $k=2$,则扩展不确定度为 $U=k \times u_c=0.34 \text{ mm}$ 。由上述不确定度分析过程可知,GNSS观测误差引入的标准不确定度分量约占合成标准不确定度的70%;天线和装置定位安装相关误差引入的标准不确定度分量约占合成标准不确定度的30%;GNSS观测误差为主要的标准不确定度来源。在上述测量不确定度分析中,假定连续2个全天观测时段的观测环境干扰因素保持一致,且只考虑了GNSS接收机分辨率所引入的误差,而实际GNSS测量过程持续受到站星间各种测量误差的影响,因此,实际检测中GNSS观测误差引入的标准不确定度分量可能偏大。

3 现场数据实验

3.1 实验过程

采用等距基线臂法和便携式等距基线臂装置

引入的误差,GNSS接收机分辨率 δ_x 为1 mm,故由分辨率引入的标准不确定分量为 $u_1=0.29\delta_x=0.29 \text{ mm}$,由此,

$$u_{1N}=u_{2N}=u_{3N}=u_{4N}=u_1=0.29 \text{ mm}。 \quad (7)$$

2.2.2 装置定位安装误差

便携式装置采用电涡流传感器进行精确定位安装,定位安装精度在0.1 mm以内,其安装误差可控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 范围内,按对称区间均匀分布,故由便携装置定位安装误差引入的标准不确定分量为

$$u_2=0.1/\sqrt{3}=0.06 \text{ mm}。 \quad (8)$$

2.2.3 装置臂长差异值误差

便携式等距基线臂装置两端参考天线几何中心至中间被测天线几何中心的臂长差异值误差不超过0.1 mm,按对称区间均匀分布,故由臂长差异值误差引入的标准不确定分量为

$$u_3=0.1/\sqrt{3}=0.06 \text{ mm}。 \quad (9)$$

2.2.4 天线安置对中误差

GNSS接收机天线安置采用强制归心孔,其安置对中误差可控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 范围内,对中误差按对称区间均匀分布,故由天线对中误差引入的标准不确定分量为

$$u_4=0.1/\sqrt{3}=0.06 \text{ mm}。 \quad (10)$$

2.2.5 合成标准不确定度

样机进行现场观测数据实验。本次数据实验在GNSS长度基线场进行。基线场周围无大的遮挡物,观测条件良好,满足GNSS仪器检测要求。选取中国大陆构造环境监测网络的4种不同型号GNSS接收机各1台,4台待检GNSS接收机与天线的配置情况见表1,天线相位中心改正参数见表2(天线绝对相位中心改正模型取自ITRF2014框架igs14_1977_plus.atx文件)。

视待检GNSS接收机天线为连续观测基准站仪器设备,不能干扰影响其正常的连续观测,借助便携式装置样机,初步设计等距基线臂法进行GNSS天线相位中心偏差原位检测的观测方案如下:

1) 选取1台作为待检基准站并安置在具有强制归心装置的观测墩上,整平,待检天线定向标志指向正北,在待检基准站上安装便携式等距基线臂装置,安装时注意保持中间待检基准站天线

指向正北不动;

2) 在等距基线臂装置两端安装 2 台参考天线, 参考天线本身的相位中心偏差可以是未知的, 两端的参考天线定向标志都指向正北, 安装完成后观测 1 个完整的全天时段, 观测时间大于 23.5 h(观测时段在 UTC 00:00—UTC 24:00, 采样率设置为 30 s);

3) 保持中间的待检天线始终指向正北不动,

将两端的参考天线均水平旋转 180°(即此时两端参考天线的定向标志均指向正南), 再观测 1 个完整的全天时段;

4) 然后, 通过处理 2 个全天时段 L1 和 L2 的载波相位观测值, 分别求出参考天线旋转 180°前后与待检天线之间的短基线矢量(GAMIT 计算基线矢量时参考天线与待检天线均不加相位中心偏差模型改正)。

表 1 待检 GNSS 接收机与天线的配置情况表

Tab. 1 Configuration of GNSS receiver and antenna

序号	仪器类型	仪器编号	天线类型	天线编号	接收机固件版本号
1	TPS NET-G3A	618-00214	TPSCR.G3	383-1164	4.7 Nov, 23, 2017 p6
2	TRIMBLE NETR8	5349K48368	TRM59800.00	5406354929	4.85
3	TPS NET-G5	1294-10347	TPSCR.G5	762-11077	5.2.2 Dec, 06, 2018
4	TRIMBLE NETR9	5742R1279	TRM159900.00	5744338086	5.30

表 2 天线绝对相位中心改正参数

Tab. 2 Antenna absolute phase center correction parameters

天线型号	天线绝对相位中心改正参数/mm						模型日期
	L_{1N}	L_{1E}	L_{1U}	L_{2N}	L_{2E}	L_{2U}	
TPSCR.G3 NONE	-0.17	0.30	88.41	0.28	-0.04	119.40	2013-04-03
TRM59800.00 NONE	1.04	0.70	89.51	0.12	0.00	117.13	2017-01-29
TPSCR.G5 NONE	0.14	0.58	94.94	-0.02	0.43	117.94	2016-01-20
TRM159900.00 NONE	0.61	0.08	114.07	0.25	0.52	123.95	2017-11-04

按照上述步骤和方法, 分别用等距基线臂装置检测其余型号的待检天线。同样的方法分别处理 L1 和 L2, 数据处理使用 GAMIT 软件。利用 GAMIT 软件计算得到各个短基线矢量, 进而依据式(4)计算得到各型号待检天线的相位中心水平偏差 S-N 分量 d_{1N} 和 E-W 分量 d_{1E} 。

选取目前中国大陆构造环境监测网络连续观测基准站常用主机型号 Trimble NetR9 和天线型号 TRM159900.00, 采用上述原位检测方法和《地壳运动监测技术规程》的常规方法分别进行 10 组连续 48 h 对比观测, 计算得到同一型号天线两种不同方法的多组相位中心偏差的检测结果, 分析两种方法多组对比检测结果的数值差异和重复性。

3.2 实验结果分析

表 3 为按照上述观测方案进行原位检测得到的 GNSS 天线相位中心偏差的数据处理结果(L1、L2 载波相位)。由表 3 可得 3 种不同型号 GNSS 天线原位检测的 L1、L2 载波相位中心偏差改正前径向长度均小于 2 mm, 改正后径向长度均小于 1 mm, 说明采用等距基线臂法原位检测得到的 3 种不同型号 GNSS 天线相位中心偏差均为合格, 与依据常规方法检测得到的同一天线相位中心偏

差的结论是一致的, 检测结论符合预期。

表 3 给出了本次数据实验的 3 台待检仪器依据常规方法在每年测前、测后分别进行一次仪器检测得到的天线相位中心偏差结果。由于 2017 年之前(含 2017 年)采用的天线绝对相位中心改正参数不同于 2018 年之后的(含 2018 年), 因此表 3 只给出了近 5 年, 即 2018 年—2022 年的统计结果。基于上述 5 年的常规检测结果和本次数据实验的原位检测结果, 计算得到 3 种不同型号 GNSS 天线的 L1、L2 载波相位中心偏差改正前、改正后的历年径向长度的算术平均值与实验标准偏差。由表 3 可知, 3 种不同型号 GNSS 天线的 L1、L2 载波相位中心偏差改正前、改正后历年径向长度的实验标准偏差均不超过 0.2 mm, 说明各型号天线相位中心偏差检测结果的复现性较好。

根据格拉布斯准则, 在一组重复观测值 x_1, x_2, \dots, x_n 中, \bar{x} 为其算数平均值, 对可疑观测值 x_d , 在给定的包含概率为 $p=0.99$ 或 $p=0.95$, 即显著性水平为 $\alpha=0.01$ 或 0.05 时, 如果满足 $|x_d - \bar{x}| \geq s \times G(\alpha, n)$, 可以判定 x_d 为异常值, 否则, x_d 为可信值, 即正常观测值。其中, s 为该组重复观测值的实验标准偏差, 依据贝塞尔公式法由式(12)计算得出;

$G(\alpha, n)$ 为与显著性水平 α 和重复观测次数 n 有关的格拉布斯系数,可查格拉布斯准则的 $G(\alpha, n)$ 表^[17]得到。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (12)$$

取包含概率为 $p=0.99$,查表得格拉布斯系

数,分别计算得到各型号天线L1、L2载波相位中心偏差的格拉布斯临界值 $s \times G(\alpha, n)$ 。根据格拉布斯准则对原位检测结果 x_d 进行分析,由表3可知,原位检测得到的各GNSS天线径向长度与其历年算术平均值 \bar{x} 的差异值 $|x_d - \bar{x}|$ 较小,均小于其格拉布斯临界值,原位检测结果可信。

表3 2018~2022年3种型号GNSS天线相位中心偏差检测结果统计表

Tab. 3 Statistical table of phase center deviation detection results of three types of GNSS antennas from 2018 to 2022

观测时段	径向长度/mm											
	改正前		改正后		改正前		改正后		改正前		改正后	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
2018年测前	0.76	0.54	0.56	0.38	0.28	0.61	0.38	0.49	1.59	0.65	0.41	0.53
2018年测后	0.93	0.40	0.59	0.52	/	/	/	/	1.58	0.30	0.50	0.18
2019年测前	0.95	0.45	0.61	0.56	0.29	0.64	0.74	0.43	1.37	0.35	0.12	0.23
2019年测后	0.90	0.36	0.57	0.43	0.25	0.38	0.64	0.43	1.43	0.50	0.21	0.38
2020年测前	0.72	0.30	0.38	0.41	0.16	0.43	0.53	0.38	1.72	0.85	0.64	0.80
2020年测后	0.97	0.00	0.63	0.28	0.20	0.65	0.40	0.61	1.45	0.54	0.26	0.43
2021年测前	1.01	0.46	0.67	0.52	0.18	0.79	0.48	0.63	1.52	0.43	0.37	0.32
2021年测后	0.93	0.54	0.59	0.49	/	/	/	/	1.41	0.51	0.43	0.41
2022年测前	0.80	0.35	0.53	0.48	0.36	0.89	0.52	0.59	1.51	0.27	0.72	0.16
原位检测结果/mm	0.85	0.70	0.66	0.46	0.29	0.30	0.68	0.56	1.06	0.67	0.35	0.62
算数平均值/mm	0.88	0.41	0.58	0.45	0.25	0.59	0.55	0.52	1.46	0.51	0.40	0.41
实验标准偏差/mm	0.10	0.19	0.08	0.08	0.07	0.20	0.13	0.10	0.18	0.18	0.19	0.20
格拉布斯临界值/mm	0.23	0.45	0.20	0.20	0.15	0.45	0.29	0.21	0.42	0.44	0.45	0.49
差异值/mm	0.03	0.29	0.08	0.01	0.04	0.29	0.13	0.05	0.40	0.16	0.05	0.21

注: /表示该观测时段该天线未进行检测。

表4为等距基线臂法原位检测和《地壳运动监测技术规程》常规方法计算得到的同一型号(主机Trimble NetR9/天线TRM159900.00)天线相位中心偏差的10组对比检测结果及其重复性。由表4可知,原位检测得到的10组L1、L2载波相位中心偏差改正后径向长度与常规方法的对应结果在量值上基本相当,两种方法的10组检测结果重复性均小于0.2 mm。采用独立样本T检验法对两组数据的差异性进行统计分析,可知两组数据无显著差异,说明两种方法的检测结果基本一致,多组对比检测结果的一致性表明原位检测结果是稳定可靠的。

表4中原位检测和常规检测的观测年积日不同,并不是在相同时段内进行的对比实验,且整体观测时间跨度较大。但原位检测和常规检测本质上都是基线测量相对测定法,不同的观测时段受GNSS测量误差的影响,检测结果必然存在一定的差异。因此,表4中两种方法检测结果的对比主要应关注两种方法检测结果量值的分布范围和重复性,而不是两种方法在不同时段检测结果的绝对差异值。两种

方法都属于短基线室外相对标定方法,多路径效应是其最主要的GNSS测量误差源,会使接收到的信号存在相位偏移,多路径效应与频率有关,导致相位中心偏差甚至信号失锁,虽不是随机误差,但不能采用模型彻底抑制。选择理想的观测环境是抑制多路径效应最有效的方式,天线附近的道路、树木、建筑物、池塘、沙滩、山坡等都能构成较强反射,而灌木和草地及粗糙的地面能较好吸收信号能量,适合GNSS观测。

表3、表4的数据实验结果显示,基于等距基线臂的原位检测方法能够对GNSS天线水平相位中心偏差进行精确的矢量化描述,检测结果可用于判断天线合格与否。与传统短基线室外相对标定方法一样,受观测环境的影响,GNSS天线相位中心偏差的检测结果具有一定的不确定性。作为检测方法而非对GNSS天线相位中心偏差的绝对修正,新方法等距基线臂法原位检测结果可靠且重复性较好,可在不干扰GNSS基准站连续观测的前提下经济、便捷地实现天线相位中心偏差的原位检测。

表 4 TRM159900.00 型号的 10 组原位检测和常规检测天线相位中心偏差结果对照表

Tab. 4 Comparison table of 10 groups of antenna phase center deviation results between in-situ detection and conventional detection of TRM159900.00 model

载波	原位检测					常规检测				
	年积日	$\Delta N/mm$	$\Delta E/mm$	改正前/mm	改正后/mm	年积日	$\Delta N/mm$	$\Delta E/mm$	改正前/mm	改正后/mm
L1	91-93	-0.03	-0.01	0.03	0.64	109-110	0.46	-0.32	0.56	0.43
	95-96	0.03	0.00	0.03	0.59	112-113	0.08	-0.25	0.26	0.62
	99-100	-0.01	0.19	0.19	0.63	114-115	0.40	-0.33	0.51	0.46
	101-102	0.13	0.08	0.15	0.48	109-110	0.23	-0.28	0.36	0.52
	103-104	0.01	0.17	0.17	0.60	112-113	0.14	-0.25	0.28	0.58
	130-131	0.03	0.00	0.03	0.59	114-115	0.32	-0.24	0.40	0.44
	134-135	0.05	-0.05	0.07	0.57	144-145	0.25	-0.30	0.39	0.52
	136-137	0.28	0.05	0.28	0.34	148-149	0.30	-0.30	0.42	0.49
	138-139	0.13	0.00	0.13	0.49	144-145	0.10	-0.25	0.27	0.61
	144-143	0.18	0.08	0.19	0.44	148-149	0.25	-0.35	0.43	0.56
重复性/mm	0.09	0.08	0.08	0.09	重复性/mm	0.12	0.04	0.10	0.06	
L2	91-93	0.88	0.09	0.88	0.76	109-110	0.13	0.32	0.34	0.24
	95-96	0.58	0.14	0.59	0.50	112-113	-0.33	0.24	0.40	0.64
	99-100	0.72	0.11	0.73	0.63	114-115	-0.16	0.04	0.16	0.63
	101-102	0.64	0.19	0.67	0.51	109-110	-0.01	0.34	0.34	0.32
	103-104	0.50	0.29	0.57	0.34	112-113	-0.21	0.25	0.32	0.54
	130-131	1.00	0.33	1.05	0.77	114-115	-0.15	0.01	0.15	0.65
	134-135	0.73	0.25	0.77	0.55	144-145	-0.35	0.10	0.36	0.73
	136-137	0.63	0.23	0.66	0.48	148-149	0.05	0.20	0.21	0.38
	138-139	0.45	0.28	0.53	0.32	144-145	-0.40	0.20	0.45	0.72
	144-143	0.45	0.18	0.48	0.40	148-149	-0.10	0.15	0.18	0.51
重复性/mm	0.18	0.08	0.17	0.15	重复性/mm	0.17	0.11	0.10	0.17	

4 结束语

1) GNSS 测量持续受到站星间各种测量误差的影响,如卫星星历误差、接收机和卫星钟误差、电离层延迟改正、对流层延迟改正、多路径效应等,对于站间-历元间双差观测值,大部分误差被差分消除或得到较好削弱,但由于基线两端的多路径效应不具有相关性,无法通过差分技术消除,从而使多路径效应误差成为 GNSS 短基线差分测量的一个最主要的误差来源。等距基线臂法基于短基线测量相对测定法原理,利用等距基线臂法进行 GNSS 天线相位中心偏差的原位检测,需重点关注并尽量采取有效措施减小多路径效应误差对检测结果的影响。

2) GNSS 基准站设备需连续不间断运行,与现有的天线相位中心绝对标定方法不同,基于等距基线臂的原位检测方法不会影响 GNSS 基准站的正常连续观测,且能够对 GNSS 天线相位中心水平偏差进行精确的矢量化描述。通过现场观测数据实验,与不同型号天线多年常规方法累积的检测结果的比较,以及同一型号天线两种方法多组重复检测结果的对比分析,验证了新方法等距基线臂法进行 GNSS 天线相位中心偏差的原位检测是可行的,检测结果稳定可靠。等距基线臂法

原位检测计算得到的天线相位中心偏差可以作为 GNSS 天线性能指标的一个考核量。

3) GNSS 天线相位中心偏差的等距基线臂法原位检测的关键在于利用电涡流传感器进行精确的定位安装,通过现场数据观测实验发现,便携式装置使用的电涡流传感器的精度和稳定性还有改进提升的空间,装置本身的便携性还需优化,而且装置现有的固定安装方式可能并不能适配部分观测墩外安装了保护罩的连续观测站,需通过进一步的改进以适应大多数的 GNSS 基准站的安装使用。

4) 本文研究表明,等距基线臂法可在不干扰 GNSS 基准站连续观测的前提下实现 GNSS 天线相位中心偏差的原位检测,该方法可满足日益增长的 GNSS 连续观测站接收机天线的原位检测需求,有效解决 GNSS 连续观测站接收机天线原位检测业务开展面临的缺技术、缺装置、缺方法的困境,为 GNSS 基准站连续观测仪器的量值溯源性和长期运行稳定性提供保障。

参考文献:

[1] 曹可劲,马恒超,朱银兵,等. GNSS 自适应天线阵的相位中心误差研究[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(4): 32-36.

- CAO Kejin, MA Hengchao, ZHU Yinbing, et al. Study on phase center error of GNSS adaptive antenna array[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(4): 32-36. (in Chinese)
- [2] 谷世铭, 党亚民, 王虎, 等. 北斗天线相位中心偏差改正对精密单点定位的影响[J]. 测绘通报, 2020(1): 66-70.
- GU Shiming, DANG Yamin, WANG Hu, et al. The effect of Beidou antenna phase center offsets and variations correction on precise single point positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(1): 66-70. (in Chinese)
- [3] 傅彦博, 赵龙平, 孙付平, 等. 天线相位中心偏差对 GPS 周年性系统误差的影响分析[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 240-244.
- FU Yanbo, ZHAO Longping, SUN Fuping, et al. Analysis of effect of antenna phase center deviation on GPS annual systematic errors[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018, 35(3): 240-244. (in Chinese)
- [4] 刘洋洋, 许长辉, 庞辉, 等. 接收机天线相位中心改正对 IGS/IGMAS 站的影响[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 21-26.
- LIU Yangyang, XU Changhui, PANG Hui, et al. Analysis of influence of phase correction of receiver antenna on IGS/IGMAS station[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(5): 21-26. (in Chinese)
- [5] 刘伟平, 郝金明, 邓科. 导航卫星天线相位中心误差标定方法研究现状及发展趋势[J]. 测绘通报, 2018(3): 1-8.
- LIU Weiping, HAO Jinming, DENG Ke. Development status and tendency of navigation satellite antenna phase center correction calibration[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(3): 1-8. (in Chinese)
- [6] 王嘉琛. GNSS 接收机天线相位中心标定算法研究及软件研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [7] 李鹏图, 俞江. 微波暗室 GNSS 接收机天线绝对相位中心高精度标定的方法: CN110658537A[P]. 2020-01-07.
- [8] 王嘉琛, 刘根友, 郭爱智, 等. BDS 接收机天线相位中心标定[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 312-321.
- WANG Jiachen, LIU Genyou, GUO Aizhi, et al. BDS receiver antenna phase center calibration [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 312-321. (in Chinese)
- [9] 王嘉琛, 刘根友, 郭爱智, 等. 相对定位双差模型中的天线相位缠绕误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 38-45.
- WANG Jiachen, LIU Genyou, GUO Aizhi, et al. Antenna phase wind-up error analysis of GNSS relative positioning double-difference model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 38-45. (in Chinese)
- [10] 胡志刚, 周仁宇, 赵齐乐. 基于双差相位观测值的室外天线绝对标定方法及系统: CN113899957A[P]. 2022-01-07.
- [11] 全球定位系统(GPS)测量型接收机检定规程: CH8016-1995[S]. 北京: 国家测绘局, 1995.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 全球定位系统(GPS)接收机(测地型和导航型)校准规范: JJF 1118—2004[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
- [13] 赵立军, 李文一, 韩勇, 等. 用于 GPS 天线相位中心检测的时间同步自动旋转装置[J]. 电子器件, 2021, 44(1): 35-38.
- ZHAO Lijun, LI Wenyi, HAN Yong, et al. Time synchronous automatic rotating device for GPS antenna phase center calibration[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(1): 35-38. (in Chinese)
- [14] 李冀, 洪卫, 刘正华, 等. 一种提高 GNSS 天线相位中心偏差检测精度的方法: CN115220069A[P]. 2022-10-21.
- [15] 李晶晶, 李建双, 缪东晶, 等. GNSS 接收机天线相位中心偏差测量组件、系统与方法: CN114167455A[P]. 2022-03-11.
- [16] 地壳运动监测工程研究中心. 地壳运动监测技术规范[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [17] 中国计量测试学会. 一级注册计量师基础知识及专业实务[M]. 北京: 中国质检出版社, 2018.