

无人值守GNSS方法测定射电望远镜参考点*

马小辉^{1,2†} 张志斌^{3,4‡} 孙中苗^{1,2} 阮仁桂^{1,2} 柳聪³

(1 西安测绘研究所 西安 710054)

(2 地理信息工程国家重点实验室 西安 710054)

(3 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(4 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 为解决常规射电望远镜归心测量工作耗时耗力的问题,引入GNSS (Global Navigation Satellite System)同步监测技术实现了一种针对射电望远镜参考点的无人值守监测方法.设计了针对GNSS靶标点观测数据的归算方法,包括数据匹配、数据检核以及后续精度评估等步骤,并对2018年余山25-m射电VLBI (Very Long Baseline Interferometry)望远镜的GNSS靶标点实测数据开展了数据预处理、解析与归心解算等,证明了该方法的可行性.结果表明基于该方法,采用单日内部分(5%)数据(约7600个靶标点),所测定的VLBI望远镜参考点的点位形式精度可达3 mm.总结了针对射电望远镜采用GNSS开展无人值守归心测量先行试验中的一些经验教训,明确了利用该方法测量过程中应该注意的问题,为今后更高精度射电望远镜参考点无人值守归心监测提供重要参考.

关键词 望远镜, 测量, 方法: 数据分析, 参考系

中图分类号: P171; **文献标识码:** A

1 引言

射电望远镜的无人值守归心测量从2010年以后在国际上兴起,相关学者在这方面开展过很多工作^[1-3].文献[4]曾针对射电望远镜开展了无人值守仿真解算,并基于GNSS (Global Navigation Satellite System)技术,对芬兰梅采霍维(Metsähovi) 14.5-m VLBI (Very Long Baseline Interferometry)望远镜开展了同步归心测试,结果表明,利用两台可与VLBI望远镜随动的GNSS接收天线的动态轨迹,结合梅采霍维归心算法来计算VLBI望远镜参考点坐标是可行的.梅采霍维归心算法的原理与Lösler方法相似,该方法更适用于不同类型的望远

镜而不仅是方位俯仰型望远镜.但该测试中点位残差大于1 m,通过将靶标点坐标野值剔除阈值设置到0.2 m后,参与解算的靶标散点观测量扣除了约2/3,最终参考点解算精度(与参考架推算坐标相比)在水平方向上约7-8 mm,但高程上差异超过2 cm.

文献[3]通过在翁萨拉20-m VLBI望远镜两端固定GNSS接收天线,通过多次实测,最终解算估计的VLBI与GNSS设备间本地连接矢量地心三维分量的标准差为1.5 mm、1.0 mm和2.9 mm,表明了该方法可以进行毫米级精度的本地连接矢量测定.文献[5]则通过激光跟踪仪,开发了自动连续参考点监测系统,在为期15 d的VLBI连续加密观测时段

2022-03-30收到原稿, 2022-07-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(42074006)资助

†shellmei.zhang@stu.xjtu.edu.cn

‡zbzhang@shao.ac.cn

内,对望远镜靶点开展了同步伴随监测^[6],最终测得亚毫米的本地连接矢量精度。

近年来,国内对自动化参考点监测也开展了相关研究.我们设计了类似于文献^[3]的GNSS接收天线的固定方式,并开展了持续观测实验,积累大量观测数据,本文对此观测数据给出了相关数据处理方法.并基于非限定指向模式,开展了对应观测历元下的VLBI望远镜靶标点坐标数据与望远镜指向信息匹配、靶标点位的数据平均、先验值确定、野值剔除、归心测量解算和最终结果评估等研究。

2 观测试验

中国科学院上海天文台佘山25-m射电VLBI望远镜始建于上世纪80年代末,该天线承担着中国嫦娥工程、亚太动力测地等多项VLBI深空探测以及VLBI天测与测地项目,同时也是国际VLBI天测与测地服务的基准站之一,因此对该望远镜站址(参考点)有着高精度的维护及测定需求.相关工作可见文献^[7-10].

从2017年下半年开始,通过将两台GNSS接收机对称固定于望远镜反射面板边缘处(如图1所示),对上海佘山25-m开展了以GNSS接收天线为靶标的GNSS双天线同步连续观测.两台GNSS接收机的同步观测时段为2018年4月到2018年8月,共约5个月的无人值守观测. GNSS接收天线底部装有重锤,可确保GNSS接收天线在观测时保持垂直姿态,尽可能地减少多路径效应。

3 GNSS数据预处理

采用动态PPP (Precise Point Positioning)模式定位,获得GNSS接收天线正下方0.067 m处(GNSS接收天线下方的旋转点)点位在地心系中的坐标,数据预处理过程主要分为7个步骤^[11]:

(1)输入数据.输入两台GNSS接收机观测数据、精密钟差、精密星历、地球定向参数;

(2)周跳探测.采用TurboEdit方法^[12]结合电离层残差法进行周跳探测,标记周跳发生的位置,剔除弧长较短(≤ 5 min)的观测数据;

(3)建模和线性化.计算对应每个观测量的理

论观测值和理论观测值对未知参数的偏导数.这一过程需要卫星星历和钟差数据,其中需要考虑的改正模型^[13-14]包括相对论周期性钟差改正、相对论引力延迟改正、Sagnac效应、接收机和卫星的天线相位中心改正、测站的潮汐位移改正、对流层延迟和电离层延迟改正,其中电离层延迟通过双频组合消除一阶项影响;

(4)参数解算.进行参数估计,未知参数包括2个流动站每个历元的坐标和台站的对流层天顶延迟,其中流动站坐标和接收机钟差参数每历元解算一组,对流层天顶时延参数每2 h解算一组;

(5)残差编辑.对后验残差参数进行编辑,进一步剔除周跳和粗差并进行收敛判断.如果未达到收敛条件则迭代执行步骤(3)-(5);

(6)模糊度固定.进行双差模糊度固定^[15],利用固定的双差模糊度作为约束条件,进一步提高解算精度;

(7)按照指定格式输出解算结果。

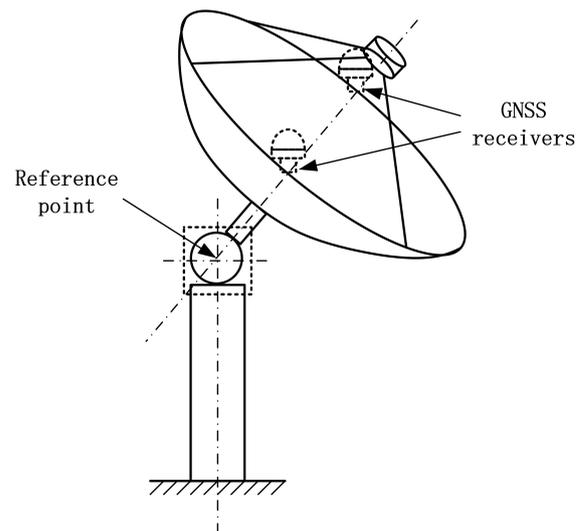


图1 两个GNSS天线的固定位置

Fig. 1 Fixed positions of two GNSS antennas

4 观测数据处理流程设计

图2是GNSS轨迹点数据精简以及最终求解参考点的数据处理流程.这里将两台GNSS接收天线(编号分别为3534和3467)分别命名为g1和g2,后续

各小节将针对图2中各流程进行详细介绍. 通过开展GNSS数据预处理, 得到各GNSS接收天线轨迹点(或称为靶标散点)在2014国际地球参考框架, 即某地心坐标系(XYZ)中的坐标后, 还需开展严格的数据精化处理流程, 可分为野值剔除、VLBI测站观测日志(log)文件匹配、VLBI望远镜指向分布的阈

值选取、VLBI望远镜参考点归心解算以及参考点坐标精度评估等几个步骤. 采用两台GNSS接收天线的原因是希望利用两台GNSS天线间的固定间距来评估观测时段内的GNSS数据质量, 从而减少因VLBI望远镜反射面板和背架反射引起的多路径效应的影响.

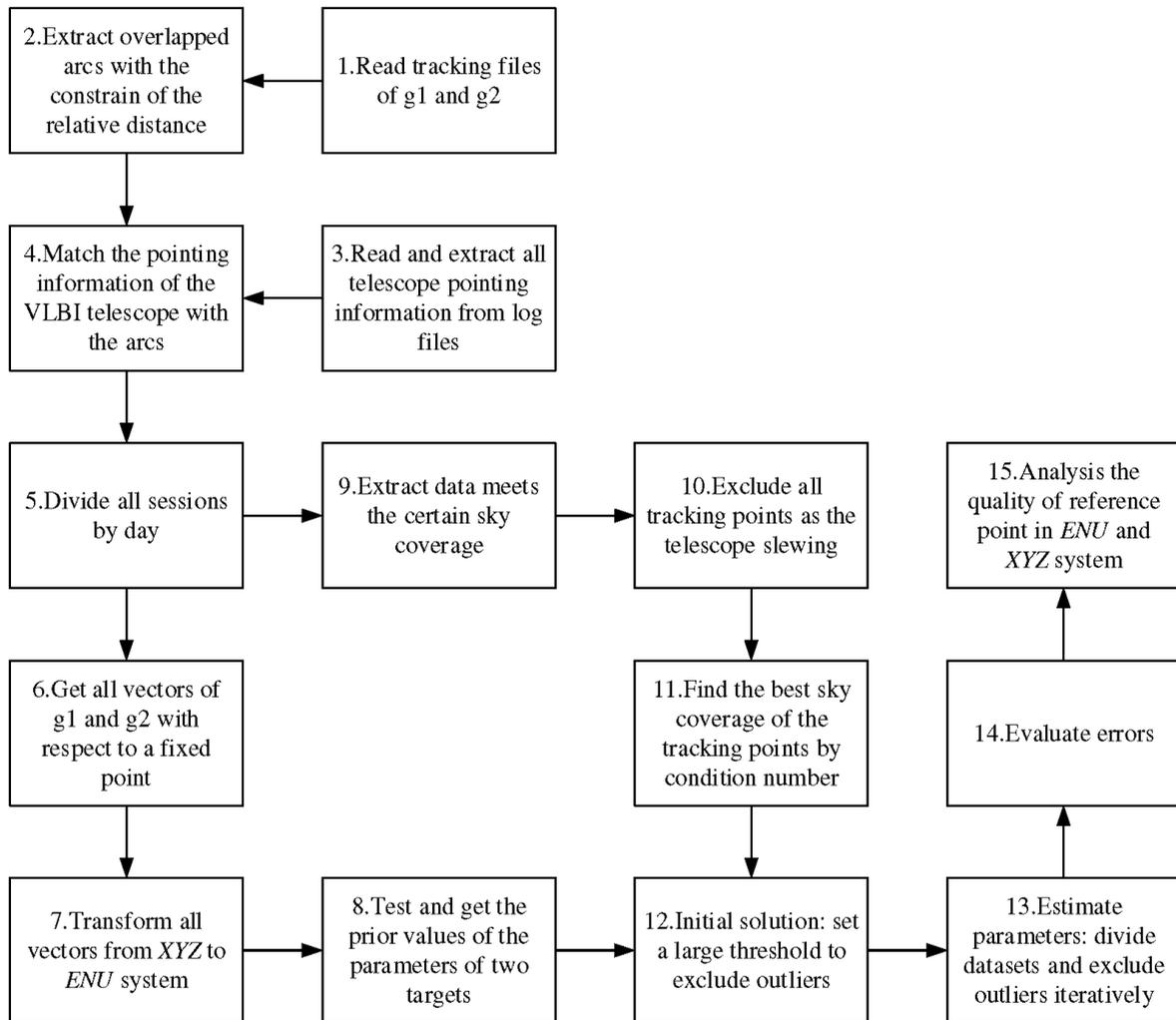


图2 观测数据处理流程

Fig. 2 The flowchart of the observational data processing

测站log文件用来记录VLBI望远镜的方位和俯仰信息. 在非限定望远镜的方位俯仰模式下, 仅利用在站心坐标系(ENU)中GNSS轨迹点坐标便可利用空间圆拟合法直接求出VLBI望远镜参考点坐

标, 但这种方法忽略了望远镜轴系误差对参考点的影响, 因此高精度的归心测量中必须包括用以对轴系误差建模的望远镜指向等信息. 故在利用GNSS轨迹点归心解算时, 还需匹配log文件中与GNSS接

收天线对应观测时刻处的VLBI望远镜的方位俯仰信息.

VLBI望远镜指向分布的阈值选取的主要目的是从所有GNSS轨迹点中找到满足GNSS天线轨迹点的最优覆盖观测量集合. 为了避免因GNSS轨迹点覆盖不均匀对参考点造成系统性偏差, 我们选择单日内VLBI望远镜在方位和俯仰上的覆盖均需大于一定阈值, 如方位覆盖大于 300° , 俯仰覆盖大于 70° 等.

以上步骤是开展高精度归心解算的前提, 即从大量的GNSS点位数据中, 提取出质量高, 分布好的数据来开展归心解算.

5 数据处理

5.1 读取g1和g2接收机轨迹坐标文件

两台GNSS天线相对VLBI天线的固定位置及VLBI望远镜在站心坐标系中的指向共同决定了GNSS轨迹点在站心坐标系中的散点集合. 本实验中, 两台GNSS接收天线分别布设于望远镜俯仰轴方向两侧, 这样可有效降低多路径效应对GNSS观测的影响. 但同时也需指出, 靠近俯仰轴的对望远镜俯仰变化并不敏感, 因此靶标观测散点呈近似圆台状分布, 图3为未扣除野点情况下的靶标点在地心坐标系下的分布, 其中g1、g2分别用红色和蓝色表示, 可看到个别显著的野值.

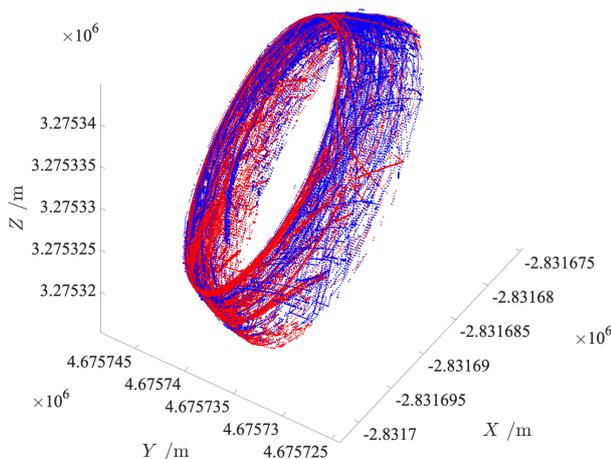


图3 两台GNSS天线的轨迹点集合

Fig. 3 A set of tracking points of the two GNSS antennas

5.2 读取有重叠观测弧段的数据

为扣除多路径效应对单台GNSS接收天线定位所产生的系统性偏移, 利用两台GNSS接收天线间距作为约束来扣除部分野值, 如图4所示, 其中横坐标0刻度位于MJD (Modified Julian Day) 58223日处. 需要注意的是, 这种方法并不能扣除两台接收天线同步同方向同量级偏移时所产生的野值.

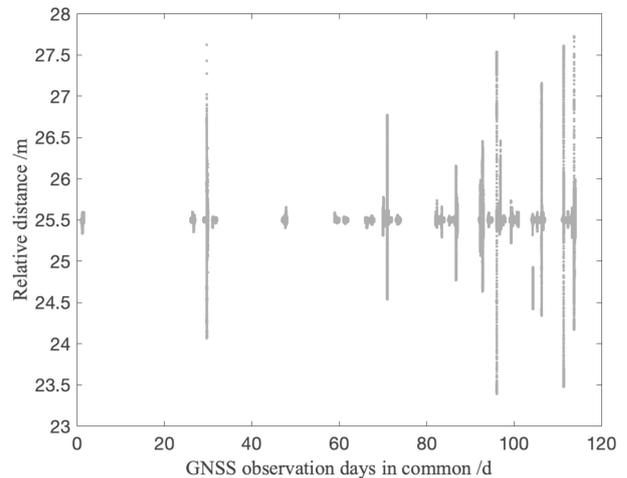


图4 两台GNSS天线间距的观测统计

Fig. 4 Statistics of the distances between two GNSS antennas

5.3 参考点的坐标转换

所有GNSS轨迹点均集中在二十几米见方的较小区域, 从地心尺度来看, 近似集中于一点, 如直接对这些观测量开展归心解算, 法方程矩阵必然出现奇异性. 因此需先将GNSS轨迹点统一扣除某值以改善法方程矩阵. 具体步骤为: 先固定参考点或其附近的某点, 计算所有其他轨迹点相对该点的矢量差, 进而再结合该固定点的经纬度和高程, 将所有矢量差转换到站心坐标系, 从而得到站心系中所有轨迹点相对这一固定点的矢量. 当通过归心算法解算出参考点相对这一固定点在站心系中的矢量后, 再将此矢量转换回地心系, 结合固定点在地心系中的坐标, 即可得到参考点在地心系中的坐标.

5.4 归心解算配置

归心解算平差算法参见文献[16]. 具体归心解算配置为: 针对每一批GNSS轨迹点集合, 计算1组

待估参数, 包括3个参考点在站心系中的分量坐标值、1个轴线偏差参数、2个方位轴倾角、1个俯仰轴倾角、1个起始方位角(用来描述VLBI望远镜指向的 N 方向和真北方向之间的差异)和6个GNSS天线位置参数. 其中6个GNSS天线位置参数用来描述固定在望远镜反射面板上的两台GNSS接收天线相对于VLBI望远镜参考点位置, 包括GNSS接收天线在望远镜俯仰轴上的投影距离 a 、在望远镜指向方向的投影距离 b 、GNSS接收天线固定位置相对望远镜指向方向的二面角 O_E , 每台GNSS接收天线对应3个参数. 由于GNSS单点秒级定位精度在厘米级, 该量级已大于该VLBI望远镜热膨胀所引起的形变误差, 因此这里不对 a 、 b 、 O_E 按时间分段, 可将其视为全局参数一并解算.

5.5 数据质量检核

由图4可知, 通过开展定位解算, 所解两台GNSS接收天线间距呈对称分布. 所有间距的统计如图5所示, 间距均值为25.5006 m, 符合正态分布特点, 利用T检验的方法对此数据开展检验表明, 并不拒绝均值为25.5006 m的假设. T检验主要用来比较两个平均数的差异是否显著. 通过进一步统计可以看到, 有96.8%的间距值落入25.4–25.6 m (20 cm)的区间中, 有88.1%的点落入25.48–25.52 m (4 cm)的范围中. 考虑到GNSS单点单秒观测精度(2–3 cm), 这里将GNSS间距约束值范围定为4 cm. 由于归心解算模型中必须含有方位俯仰信息, 因此还需结合VLBI测站提供的log文件开展对应GNSS观测时刻下的VLBI天线方位俯仰信息匹配. 具体为: 首先合并所有观测期间25-m台站的所有log文件, 该步骤比较耗时, log文件内容格式并不统一, 这可能跟望远镜不定时地重新加载观测纲要有关, 可采用分段保存变量的方法, 提高文件读取效率. 然后合并所有GNSS点位坐标文件, 最后求取两者时间上的交集, 确定出靶标观测量全集, 表1中给出了各数据在不同检核步骤下有效数据的占比情况, 比例值为后一步骤相对前一步骤的有效数据比例.

5.6 先验值确定

由上一小节可知, 归心测量模型中所用到的先

验值共包括: 参考点点位在站心坐标系中分量、轴线偏差参数、方位轴倾角、俯仰轴倾角、起始方位角以及描述靶标相对参考点点位的位置参数 a 、 b 、 O_E . 对此采用3种方法来确定上述参数先验值, 3种方法分别为文献调研、球面拟合以及初值测试法.

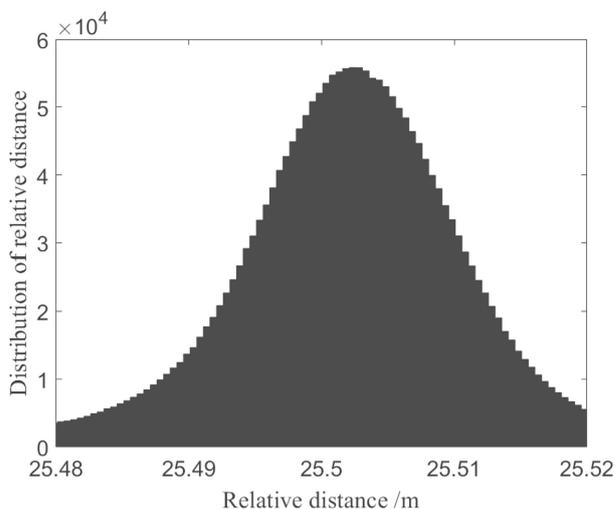


图5 靶标间距分布及统计

Fig. 5 Distribution and statistics of the distance of targets

表1 间距约束条件下各有效数据占比

Table 1 Proportion of validation data under the distance constraint

Items	Rate
Data efficiency 1 of g1	85.6%
Data efficiency 1 of g2	99.6%
Rate of valid data	90.0%
Overlapped data in the range of [25.48–25.52] m	88.6%

结合资料调研可知, 利用VLBI方法测定的佘山站轴线偏差在 -0.1 mm左右(望远镜为方位俯仰型), 因此所有轴系参数均可预设为0, 并作为望远镜轴系参数的先验值.

球面拟合法(spherical fitting, SF)是最为方便的参考点点位测定方法, 对两台GNSS天线的轨迹散点集分别开展拟合, 确定出望远镜参考点在本

坐标系中的点位坐标, 计算过程如下所述:

首先, 可以设想若望远镜轴线偏差为0, 则GNSS接收天线所形成的轨迹点可以由球面来拟合. 为了得到球心坐标, 可将球面方程由

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2, \quad (1)$$

展开为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 - Ax - By - Cz + D = 0, \\ A = 2x_0, B = 2y_0, C = 2z_0, \\ D = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - R^2, \end{cases} \quad (2)$$

其中, x_0 、 y_0 和 z_0 为望远镜参考点三维坐标, 而 x 、 y 和 z 为GNSS轨迹点坐标, R 为球半径. (2)式可以展开为矩阵形式:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{l}}, \quad (3)$$

其中, x_n 、 y_n 和 z_n 分别表示第 n 个GNSS天线轨迹点位的坐标. 可得, 矢量 \mathbf{x} 的待估参数 $\hat{\mathbf{x}}$ 表达式为

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}. \quad (4)$$

此处, 将权阵 \mathbf{P} 定义为对角阵, 其元素均由靶标观测点的测定精度表示, σ_{x_n} 、 σ_{y_n} 和 σ_{z_n} 分别是本地系中轨迹点 x_n 、 y_n 和 z_n 分量的测定精度, \mathbf{P} 表示如下:

$$\mathbf{P} =$$

$$\begin{bmatrix} 1/(\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{z_1}^2) & & & \\ & \ddots & & \\ & & & 1/(\sigma_{x_n}^2 + \sigma_{y_n}^2 + \sigma_{z_n}^2) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

球心点位 \mathbf{c} , 即参考点坐标可表示为:

$$\mathbf{c} = [x_0 \quad y_0 \quad z_0] = \frac{1}{2} [A \quad B \quad C], \quad (6)$$

其中, \mathbf{c} 的各分量的形式误差, σ_{x_0} 、 σ_{y_0} 与 σ_{z_0} 可由误差传播定律推得. 为了合理确定参考点的不确定度, Lösler等人提出一种方法^[6, 17], 该方法基于的假设是参考点应该与其他靶点观测量等权. 即通过计算一个比例因子来放缩参考点的形式误差. 由此, 参考点的每个精度分量将乘以一个比例因子, 表达式如下:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= [\mu_{\sigma_{x_0}} \quad \mu_{\sigma_{y_0}} \quad \mu_{\sigma_{z_0}}] \\ &= \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_{x_0}} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{y_i}}{\sigma_{y_0}} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z_i}}{\sigma_{z_0}} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

球面拟合法可确定出较高形式精度的参考点坐标. 然而利用该方法所测参考点坐标中所存在系统差远大于该形式精度, 具体为: (1)该模型未对望远镜开展结构建模, 不能分辨出望远镜的轴线倾斜与轴线偏差等信息; (2)该模型的输入数据是5个月的靶标散点, 该段时间内的参考点点位可能存在时变. 利用球面拟合法所解算的两个靶标各自所解参考点的坐标如表2所示, 可知尽管其各自所测定参考点坐标分量的形式精度很高, 但两台接收机所解参考点的一致性约5 cm. 该值尽管不准确, 却可以作为参考点分量先验值开展后续计算.

表 2 球面拟合法求得的参考点相对某固定点的坐标

Table 2 Coordinates of the reference point obtained by spherical fitting method w.r.t. a fixed point

GNSS antenna	U/m	E/m	N/m
g1	-8.3809 ± 0.0007	-12.7425 ± 0.0001	-0.3331 ± 0.0002
g2	-8.4355 ± 0.0010	-12.7241 ± 0.0002	-0.3395 ± 0.0002

利用测试法来确定靶标相对参考点的固定位置参数 a 、 b 和 O_E 的值, 首先选取VLBI望远镜置顶(俯仰为 88°)时的靶标, 结合VLBI望远镜此时的方位信息, 画出并打印GNSS接收天线在站心坐标系中的俯视图和侧视图, 在打印纸上可直接量取 a 、 b 和 O_E 间的比例, 再乘以画图比例, 便可确定出3者的初值. 为得到更为精确的先验值, 也可以设置这3个参数变化区间, 通过开展穷举法逐一进行闭合差计算, 即通过初值所计算的理论GNSS靶标点位和实测GNSS靶标点位之间的差异, 来确定最佳的先验值.

5.7 精化分类

精化分类包括了数据精化与数据分类, 数据精化目的是剔除射电望远镜转动期间的GNSS轨迹点观测量. 佘山25-m望远镜方位俯仰转速分别为 $1^\circ/\text{s}$ 和 $0.5^\circ/\text{s}$, 结合两台GNSS天线的先验位置, 可知VLBI望远镜切换指向时对GNSS靶标点位的影响至少要大于 0.14 m , 这个量级已远大于GNSS天线的单点定位精度, 即VLBI望远镜切换指向期间GNSS轨迹点所观测的数据需全部剔除; 而当VLBI望远镜跟踪目标时, 考虑其指向精度 0.005° ^[18-20]和跟踪精度 0.1° , 则当VLBI望远镜跟踪射电源等目标开展观测时, 对固定于其反射背架处的GNSS影响量级最大在厘米级, 该量级与GNSS靶标单点定位精度相当, 因此可保留该部分数据. 此外, 无人值守的两台GNSS接收机每秒都会输出两组坐标点, 如采用单日数据, 仅针对单台GNSS接收机来说, 会产生43200个靶标散点, 考虑三维坐标, 共129600个观测量, 这样仅生成的权阵就包括 1.7×10^{10} 个量, 这显然不利于计算. 因此我们考虑对单日的观测数据开展分类, 同时在参数解算时利用空白矩阵来尽量减少计算机内存资源的消耗, 这样不仅可提高解算速率, 也可开展多组集合归心结果间的一致性符合. 为避免按时段分组时, 某个时段下望远镜指向集中于某处而导致靶标轨迹点覆盖较差, 此处所采用间隔分组的方法, 如分为5组数据, 第1组数据是针对原半日的数据集合中的采样规律是1、6、11、 \dots , 第2组数据是针对原半日的数据集合中的采样规律是2、7、12、 \dots , 依此类

推.

5.8 靶标轨迹点野值剔除

通过上文所述的质量检核方法可剔除一部分野值. 但上述方法并不适用于 g_1 、 g_2 同时产生偏移的情况(这需要两台以上的GNSS接收机来检核), 且GNSS接收机在天线移动时所做的秒级单点定位精度并不会太高. 这样, 在分析数据时, 需找到合理阈值扣除粗差, 以提高参数解算精度. 本文中, 如GNSS轨迹点序列拟后残差中存在大于3倍中误差的, 即认定其为野值, 并开展迭代解算与剔除, 直至无野值被检测出为止.

6 结果与分析

非限定VLBI望远镜指向开展归心测量的方式实质上是把归心测量的复杂度转移到了望远镜参考点的观测模型和数据处理方法上, 即需要在统一的坐标系中建立GNSS接收机轨迹点与望远镜参考点、望远镜指向和轴系误差之间的关系. 仿真结果表明, GNSS接收机的数量、分布、望远镜定向、测量误差等因素都会影响参数估计的精度^[21].

由于射电VLBI望远镜的本地归心测量工作具有一定时效性, 即只能采用一段时间内的观测靶标轨迹点来求取对应历元下的参考点坐标, 该时段越短, 越能代表当前的VLBI望远镜参考点的精确位置. 传统本地光学归心测量, 一般需开展近一周的本地靶标点测量才能得到满足一定覆盖和点位精度的靶标点集合, 这是开展高精度归心解算的必要前提. 但基于无人值守GNSS观测技术, 理论上的单日靶标观测量数目可多达17万个, 尽管单点精度较低, 但这并不影响我们利用高精度归心算法获得大量数据统计意义下的精确的参考点坐标.

本文分析了望远镜满足一定方位俯仰覆盖条件(如方位 300° 、俯仰 70°)下各日GNSS靶标的覆盖状态, 如图6所示. 并用条件数(condition number)计算了靶标覆盖均匀度, 条件数的物理意义为: 从所有靶点矢量组成的三维空间中找出3个正交矢量, 且这3个正交矢量满足所有靶点矢量在其上的投影和最大, 而条件数的值即为最大投影分量之和与最小投影分量之和的比值, 如散点分布足够均

匀, 理论上该比值为1. 最终选取MJD为58219, 即2018年4月11日单日数据作为最优覆盖数据. 考虑到单天数据量较大, 将其分为20份并逐一开展归心解算及误差评定. 结果如图7中圆圈及其误差棒所示, 20组数据集在站心系中分量的平均 1σ 形式精度分别为1.6 mm、1.7 mm和2.0 mm, 对应

参考点在地心系中分量的精度分别为1.6 mm、0.6 mm和2.5 mm. 该精度与文献[3]的归心结果精度相当. 进一步求取20组归心结果的加权平均值及其中误差, 如图7中灰线包含阴影所表示, 参考点点位在站心系中分量的加权中误差分别为0.3 mm、0.4 mm和0.4 mm.

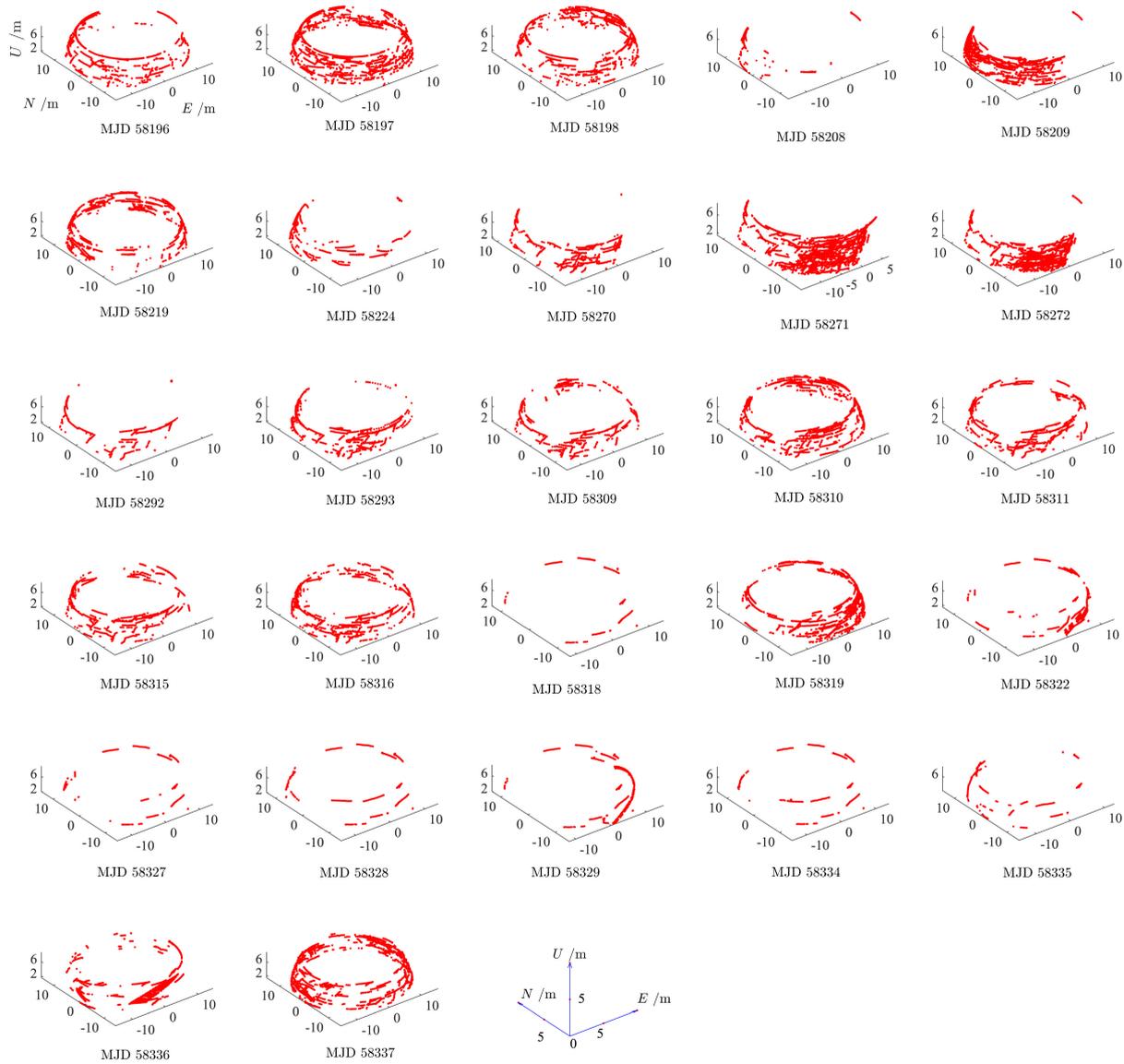


图 6 满足单日内方位 300° 、俯仰 70° 指向变化的靶标散点数据集

Fig. 6 The target scatter sets meet the sky coverage of 300° and 70° ranges in azimuth and elevation in a single day, respectively

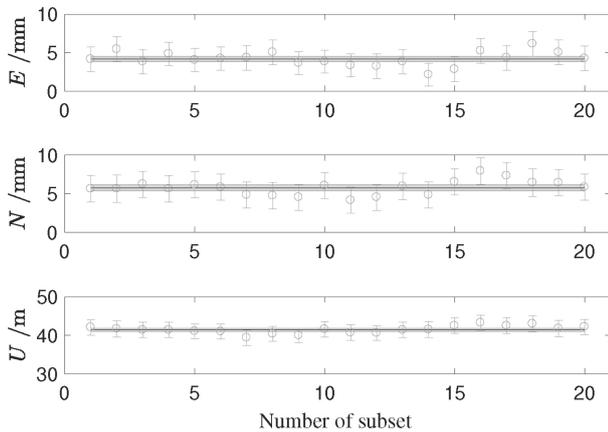


图7 站心系中20组靶标散点数据所解参考点一致性

Fig. 7 Reference point consistency based on 20 sets of target scatter points in the *ENU* system

通过迭代方法扣除野值后,对解算模型引入了重定权,该方法解算结果表明,针对20个子集,GNSS靶标轨迹单点分量的位置精度应在21.8–22.0 mm,这与每秒GNSS接收天线的定位能力(25 mm)是匹配的,也表明本文结果是可信的。

从数据利用率来看,理论上单日2个GNSS靶标可生成共172800个靶标轨迹点,考虑因GNSS数据解算配置、双接收机数据未匹配、GNSS数据与纲要数据未匹配等原因扣除的数据以及扣除望远镜因切换指向所产生的点位数据,即开展归心解算前的轨迹点数目共剩有66750个,而经迭代方法扣除野值后用于归心解算的观测量数目共50386个,即归心解算对输入靶标散点数据的利用率达到了75%,而总体数据利用率达到了30%。

7 结论

通过对与VLBI望远镜随动的GNSS接收天线数据进行深入分析,利用GNSS接收机开展无人值守参考点监测应注意以下两个问题:

(1)为获得更为均匀的靶标散点覆盖,需综合考虑靶标(GNSS接收机)相对望远镜的固定位置、GNSS天线遮挡情况、望远镜结构、望远镜形变等因素,并开展覆盖度仿真,在最大程度抑制GNSS多路径效应的前提下,获得较优的靶标覆盖以获得高精度的参考点点位坐标。本工作中由于两个

GNSS接收天线均架设于俯仰轴方向的天线背架两端,距离望远镜俯仰轴较近,该接收机对望远镜俯仰变化以及对 O_E 并不敏感,故而形成了类似于球冠状的散点分布;

(2)由于GNSS秒级定位精度在厘米级,尽管可以得到统计学意义上的3 mm精度的参考点坐标,但由于缺少毫米精度的靶标观测量,同时从GNSS轨迹点的归心拟后残差中也可以看出,GNSS技术中在信号链路上还存在的系统差,这并不利于对参考点点位开展多技术验证,后期还需采用限定望远镜指向模式,如在每次VLBI望远镜指向开展10 min至1 h的GNSS持续监测,并结合本地光学测量对GNSS天线开展系统差标定等工作。

基于无人值守动态GNSS靶标的射电望远镜参考点的监测系统的研发,实现了3 mm形式精度的参考点精度,为后续基于GNSS方法获取高精度、高可靠度、高时空分辨射电望远镜参考点坐标提供了宝贵经验,这对本地连接矢量及多技术参考框架的构建具有重要意义。

致谢 感谢审稿老师提出的宝贵意见。感谢李金岭研究员对参考点解算方法的有益指导。

参考文献

- [1] 李金岭,张津维,郭丽. 测绘科学, 2014, 39: 10
- [2] 张津维,李金岭. 天文学进展, 2013, 31: 241
- [3] Ning T, Haas R, Elgered G. JGeod, 2015, 89: 711
- [4] Kallio U, Poutanen M. Proceedings of the 2010 IVS General Meeting. Hobart, 2010: 360
- [5] Lösler M, Haas R, Eschelbach C. JGeod, 2013, 87: 791
- [6] Lösler M, Haas R, Eschelbach C. JGeod, 2016, 90: 467
- [7] 李金岭,乔书波,刘鹏,等. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35: 1387
- [8] 马下平,沈云中,王解先,等. 测绘学报, 2014, 43: 257
- [9] 李金岭,乔书波,刘鹏. 测绘科学, 2010, 35: 69
- [10] 刘鹏,程宗颐,李金岭. 中国科学院上海天文台年刊, 2010, 31: 28
- [11] 阮仁桂. 高精度GNSS网数据处理关键技术研究. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018: 17-18
- [12] Blewitt G. GeoRL, 1990, 17: 199
- [13] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. ManGe, 1993, 18: 91
- [14] Kouba J. GPS Solutions, 2009, 13: 1
- [15] 阮仁桂. 测绘科学, 2015, 44: 128

- [16] 马小辉, 张丽萍, 张志斌, 等. 测绘科学与工程, 2020, 40: 11
- [17] Lösler M. JAGeo, 2008, 2: 233
- [18] 马小辉, 张志斌, 孙中苗, 等. 天文学报, 2021, 62: 2
- [19] 应晓科, 姜铮, 刘伟, 等. 天文学报, 2021, 62: 69
- [20] Ying X K, Lou Z, Liu W, et al. ChA&A, 2022, 46: 105
- [21] 董光亮, 徐得珍, 樊敏, 等. 飞行器测控学报, 2016, 34: 249

Determining the Reference Point of the Radio Telescope in an Unattended GNSS Monitoring Method

MA Xiao-hui^{1,2} ZHANG Zhi-bin^{3,4} SUN Zhong-miao^{1,2} RUAN Ren-gui^{1,2} LIU Cong³

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054)

(2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054)

(3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

(4 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT In order to solve the time-consuming and labor-consuming problem in the traditional radio telescope site surveying task, Global Navigation Satellite System (GNSS) surveying technology is introduced to realize an unattended reference point (RP) monitoring method at a radio telescope. We design the algorithm of the reduction of the GNSS observations, including data matching, data verification, subsequent precision evaluation and so on. The GNSS target positions and other real-surveyed data of Sheshan 25-m VLBI (Very Long Baseline Interferometry) radio telescope collected in 2018 are used to perform data preprocessing, solution and RP determination and so on, which proves the feasibility of the method. The result shows the formal precision of the determined RP can reach up to 3 mm based on the subset of the observations (5%, 7600 GNSS tracking points) in a single day. In addition, some experiences and lessons in the pilot test of the unattended surveying at a VLBI station are summarized, and the problems that should be paid attention to in the process of using this method are clarified, which provides an important reference for high-precision site surveying in the future.

Key words telescope, surveys, methods: data analysis, reference systems