

引用格式: 郭轶豪, 韦沛, 杨旭海, 等. 基于短基线干涉相时延测量的卫星无源测轨系统设计与性能分析[J]. 时间频率学报, 2025, 48(4): 317-328.

基于短基线干涉相时延测量的卫星无源测轨系统设计与性能分析

郭轶豪^{1,2,3}, 韦沛^{1,3,†}, 杨旭海^{1,3}, 吴元伟^{1,3}, 刘佳^{1,3}, 马浪明^{1,2,3}

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要: 卫星轨道的精密确定是人造卫星应用研究的基础, 现有的主流轨道测定方法各有局限性: 统一 S 波段系统 (USB)、卫星激光测距 (SLR)、以及直发式测距技术在相应的应用场景上表现优异, 但均无法满足任意卫星的轨道测定需求。基于卫星转发信号的轨道确定技术 (ODTT) 虽可用于大部分通信卫星, 但需要卫星具备透明转发器; 甚长基线干涉 (VLBI) 可观测任意下发射电信号的卫星, 但实时性较差。短基线干涉测量也是基于射电信号的干涉测量技术, 但相较于 VLBI, 一方面具备运维简单、实时性好的优势, 另一方面通过高精度的相时延观测保证系统测量性能。因此, 短基线干涉测量系统成为一种潜在在无源卫星实时高精度轨道测定的解决方案。针对地球静止轨道 (GEO) 卫星, 基于短基线干涉测量技术, 设计并建立了三天线布局的增强轨道测定系统, 开展了相关试验。试验证明, 该系统在 C 波段的观测精度可达皮秒量级, X 波段的观测精度可达亚皮秒量级, 同时具备实时、简便、稳定的优点, 特别适用于 GEO 卫星的运动状态监测、长期管理及无线电监测等应用领域。

关键词: 卫星轨道测定; 短基线干涉测量; 相时延观测; 实时轨道服务; GEO 卫星监测

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-04-0317-12

收稿日期: 2025-03-21; 接受日期: 2025-05-13; †: weipei@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12273047); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA0350305); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB1070203)

Design and performance analysis of a passive satellite orbit determination system based on short-baseline interferometric phase delay measurements

GUO Yi-hao^{1,2,3}, WEI Pei^{1,3,†}, YANG Xu-hai^{1,3}, WU Yuan-wei^{1,3},
LIU Jia^{1,3}, MA Lang-ming^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600

Abstract: Precision determination of satellite orbits is fundamental to the application and research of artificial satellites. However, existing mainstream orbit determination methods face significant limitations. The unified S-band system (USB), satellite laser ranging (SLR), and one-way ranging technology have excellent performance in accuracy and corresponding application scenarios, but they cannot meet the orbit determination needs of any satellite. Orbit determination by transfer tracking (ODTT) can be used for most communication satellites, however, it requires satellites to be equipped with transparent transponders; Very long baseline interferometry (VLBI) can observe satellites that emit radio signal, but the real-time performance is poor. As a radio signal-based interferometric technique, short-baseline interferometric presents operational advantages over VLBI, including simplified maintenance and enhanced real-time performance, while maintaining system measurement accuracy through high-precision phase delay measurement. Consequently, short-baseline interferometric systems emerge as a potential solution for real-time high-precision orbit determination of non-cooperative satellites. Targeting geostationary earth orbit (GEO) satellites, we designed and implemented an enhanced orbit determination system featuring a three-antenna configuration based on short-baseline interferometry, accompanied by comprehensive experimental validation. Experimental results demonstrate that the observation accuracy of the system in the C-band is up to the order of picoseconds, and the observation accuracy of the X-band is up to the order of sub-picoseconds and combines real-time, simplicity, and stability. It is particularly suited for applications such as monitoring the motion of GEO satellites, long-term management, and radio frequency surveillance.

Keywords: satellite orbit determination; short-baseline interferometry; phase delay observation; real-time orbit service; GEO satellite monitoring

卫星轨道的测定是开展人造卫星应用研究的必要前提。针对卫星轨道的精密确定,已经发展出了一些成熟的测定轨方法,但其应用场景均存在一定的局限性。如统一 S 波段系统(unified S-band system, USB)需要地面配合星载设备实现测距测速^[1];卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)要求卫星上配备角反射器,大大限制了可服务的卫星^[2];基于卫星转发信号的轨道确定技术(orbit determination by transfer tracking, ODTT),可以实现

通信卫星的精密轨道确定,但是要占用星上的转发器资源^[3];直发式测轨技术测定轨精度高,但仅能用于类导航卫星的轨道测定^[4]。

要实现任意下发信号卫星的轨道服务,就需要发展被动的轨道测定方法。目前主要的被动测定轨方法主要有电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)测定轨、甚长基线干涉(very long baseline interferometry, VLBI)测定轨等技术。CCD测定轨技术是一种光学手段,受天气影响因素较大,难以

开展连续服务^[5]。基于 VLBI 技术的卫星测定轨系统通过干涉技术可测量卫星的下行射电信号到达测站的时间差，进而通过多基线观测测定卫星轨道，精度可达米级^[6-7]。但是干涉测量数据量大，长基线系统需要租用专线或邮寄硬盘传输海量数据，实时性较差。

短基线干涉测量技术具有布设简单和实时性好的特点，为开展实时轨道测量提供了新的研究方向^[8]。首先，可使用高精度的相时延测量弥补基线短的不足：对于相距百米两个测站，卫星周日运动引起的时延变化仅有亚纳秒到十纳秒量级；传统干涉测量技术的测量量为群时延，群时延精度受限于系统带宽，由于卫星信号为窄带信号，采用短基线干涉测量一般只能实现纳秒级的测量精度，无法分辨卫星的运动状态，为此必须发展更高精度的测量手段。相时延测量通过解析相位时延信息，精度提高到皮秒至亚皮秒量级，解算模糊度后，可满足短基线测轨需求^[9-10]。其次，可使用连线方式简化站间时间同步；此外，短基线可在同一园区内部署，便于大容量数据回传，实时性强，建设成本低，运维和扩展能力强，便于调度管理。相较于光学 CCD 测轨，短基线干涉测量系统不受限于气象条件，可实现全天候工作。基于短基线干涉相时延测量的卫星测定轨技术在 GEO(geostationary earth orbit) 卫星实时运动状态监测、卫星长期管理、卫星无线电监测等领域有着良好应用前景。

针对上述需求，中国科学院国家授时中心建设了基于短基线连线干涉相时延测量的卫星无源测定轨系统。本文在介绍系统工作原理和误差源分析的基础上，重点针对卫星相时延的时差测量精度进行了全面研究。

1 短基线连线干涉测量相时延的基本原理

短基线连线干涉测量通过在几百米以内布设 CEI (connected element interferometry) 观测网，可实现对目标卫星下行信号的相时延观测^[11-12]。

1.1 相时延测量原理

对于单频电磁波而言，令其幅度为 A ，波数为 k ，角频率为 ω ，则初始位置为 x 电磁波的 t 时刻可表示为

$$u(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}. \quad (1)$$

则相时延就是相位差和角频率的比值，由于相位差仅能给出一个周期内的小数部分，则顾及整周模糊度 N ，相时延可表示为：

$$\varphi = 2\pi N + \varphi', \quad (2)$$

$$\tau_{\text{phase}} = (2\pi N + \varphi') / \omega = N\lambda / c + \varphi' / \omega. \quad (3)$$

因此在进行相关处理前要进行理论模型的修正，使两站信号为同一个波前，相位差小于一个周期。对于 C 波段 4 GHz 的信号而言，无模糊度要求两站修正后的残余时延小于一个波长，约合 0.25 ns。对于长基线而言，由于卫星轨道误差、大气延迟、站钟差等多方面因素，很难做到修正后的残余时延达到要求；但是对于短基线特别是百米量级的基线而言，几何时延很小，大气延迟影响有限，通过共钟可消除站钟差影响，因而可以进行相时延的测量^[13]。

1.2 误差源分析

干涉测量主要的观测量是信号源的电波到达两个测站的时间差。如不考虑设备时延和介质引起的时延变化，则这个时间差就只与信号源和测站的位置有关，称为几何时延^[14]。连线干涉测量原理如图 1 所示，测站 A、B 同时观测卫星 S，测站事先坐标已知，在地心地固系下，干涉测量的数学模型如式 (4) 所示^[15-16]。

$$c\Delta t = c\Delta t_{AB} + [(d_{AS} + c\tau_A^{\text{tro}} + c\tau_A^{\text{ion}} + c\tau_A^{\text{sys}} + c\tau_A^{\text{gra}}) - (d_{BS} + c\tau_B^{\text{tro}} + c\tau_B^{\text{ion}} + c\tau_B^{\text{sys}} + c\tau_B^{\text{gra}}) + \delta]. \quad (4)$$

式 (4) 中： c 是真空中光速； Δt 指干涉测量的时差值； Δt_{AB} 指 AB 两站的钟差，对于短基线连线干涉系统可作为常值测定； d_{AS} 、 d_{BS} 指卫星 S 分别到 A、B 站的距离值； τ_A^{tro} 、 τ_B^{tro} 指 A、B 站观测卫星 S 的对流层时延； τ_A^{ion} 、 τ_B^{ion} 指 A、B 站观测卫星 S 的电离层时延； τ_A^{gra} 、 τ_B^{gra} 指 A、B 站观测卫星 S 的引力时延； τ_A^{sys} 、 τ_B^{sys} 指 A、B 站的系统硬件时延；

δ 指其他改正, 包括天线相位中心修正、质心修正、Sagnac 效应修正等。引力时延、质心修正、相位中

心修正、Sagnac 效应修正等均可精确修正, 这里不做详细描述。其他影响较大的误差项分析如下。

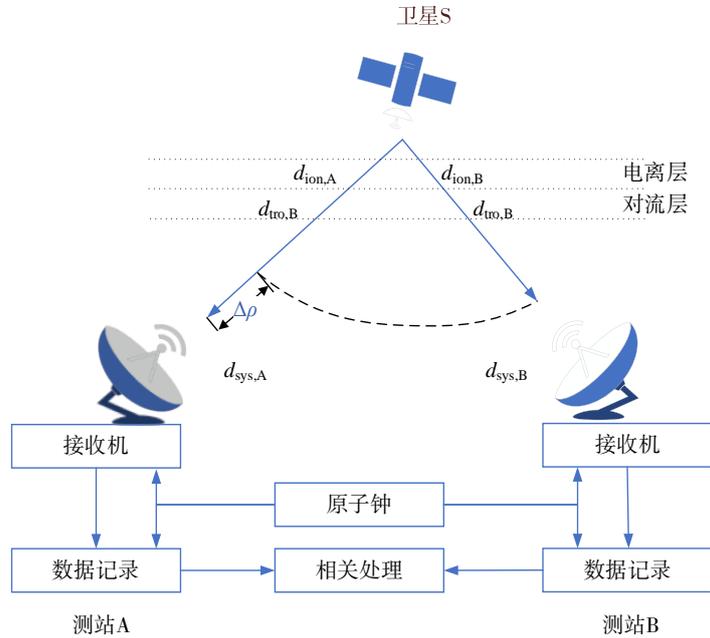


图 1 连线干涉原理示意图

1.2.1 站坐标误差

已知的精确站坐标主要受固体潮影响, 长基线场景下一般通过经验模型精确改正^[17-18]。

固体潮汐是地球表面因月球和太阳引力而引起的周期性变形, 由固体潮汐引起的地表垂直位移可达数十厘米 (通常约 30~50 cm), 水平位移约为 1~2 cm, 周期性则主要包括日周期 (如日月引力叠加导致的春潮) 和半日周期, 可以使用 IERS (国际地球自转服务) 提供的固体潮汐模型修正测站坐标。

为验证固体潮汐的影响, 本文进行了仿真计算固体潮汐修正对测站坐标的影响, 并对比在不同方

向 (东西方向和南北方向) 上的修正效果。我们选择经纬度 (108°E, 34°N) 和 400 m 的高程值作为测站 1, 并模拟了测站 2 在东西方向和南北方向上分别偏移 0~1 000 m 的情况, 通过修正后的坐标差异分析固体潮汐效应。

图 2 展示了固体潮汐对测站坐标影响的最大值随基线距离变化的情况, 随着基线距离的增加, 固体潮影响的最大值呈线性增长, 且东西向基线与南北向基线的修正值变化趋势基本一致, 仅存在微小差异。表明固体潮汐对不同方向基线的影响较为一致, 百米距离的影响值不超过 0.01 ps。

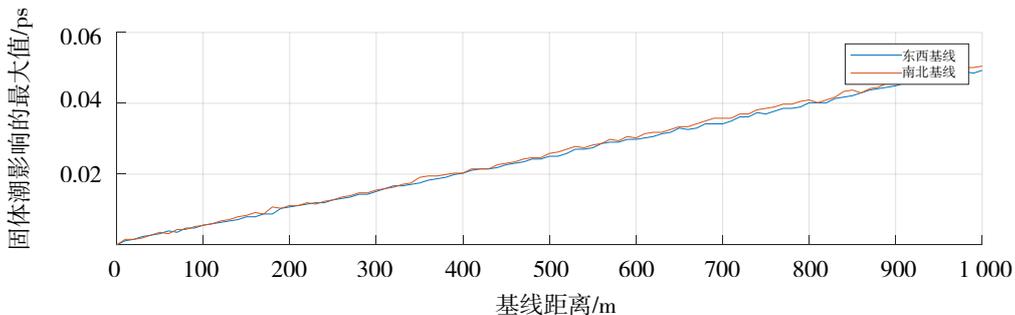
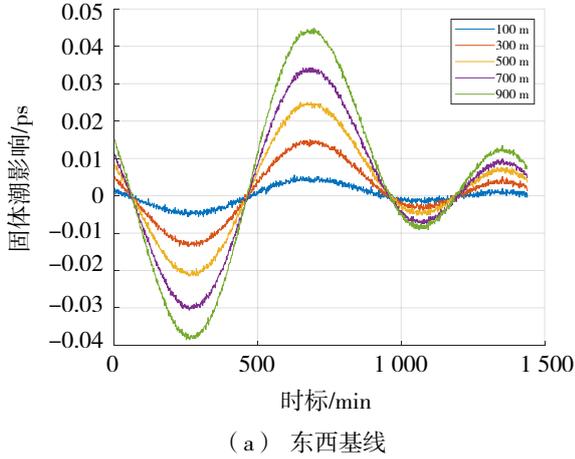


图 2 基站距离与固体潮影响的关系

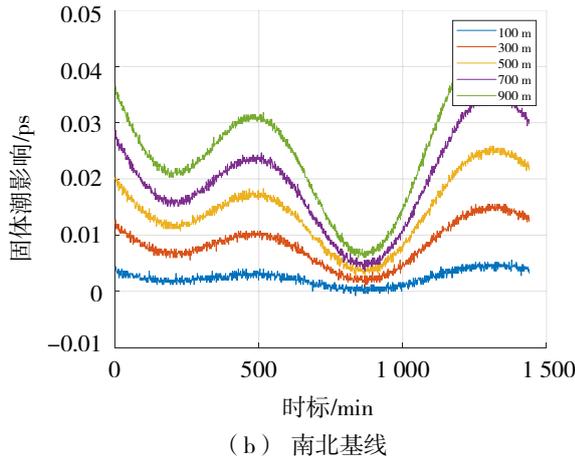
一天内不同基线长度下 (100、300、500、700 和 900 m) 固体潮对测站影响的时间序列变化如图

3 所示, 曲线显示出明显的周期性波动特征, 波动幅度随基线长度的增加而增大, 短基线 (如 100 m)

的影响幅度较小，而稍长基线（如 900 m）的波动幅度显著增大。总体来看，一天内百米距离基线的固体潮影响值不超过 0.01 ps，因此在基线较短时可忽略固体潮影响。



(a) 东西基线



(b) 南北基线

图 3 各基线长度的天内固体潮影响

1.2.2 对流层时延

测站至卫星的视线方向上的对流层时延与卫星高度角有关^[19]，长基线场景下对流层时延可通过模型修正，如 GMF 模型：

$$\Delta d_{\text{trop}} = \Delta d_{\text{Zdry}} \times M_{\text{dry}}(E_S) + \Delta d_{\text{Zwet}} \times M_{\text{wet}}(E_S) \quad (5)$$

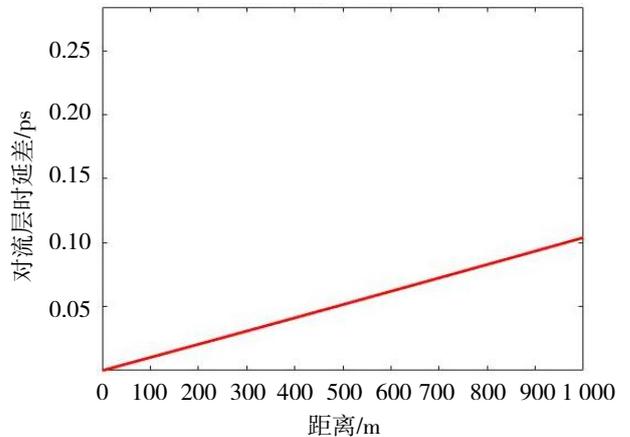
式 (5) 中： Δd_{trop} 为对流层总延迟， E_S 为卫星高度角， Δd_{Zdry} 表示干燥大气引起的对流层偏差中的干分量； Δd_{Zwet} 表示水汽分子的偶极距所引起的对流层偏差的湿分量；映射函数如式 (6)，也相应地分为干、湿映射函数，记作 $M_{\text{dry}}(E_S)$ 和 $M_{\text{wet}}(E_S)$ 。

$$M(E_S) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin E_S + \frac{a}{\sin E_S + \frac{b}{\sin E_S + c}}} \quad (6)$$

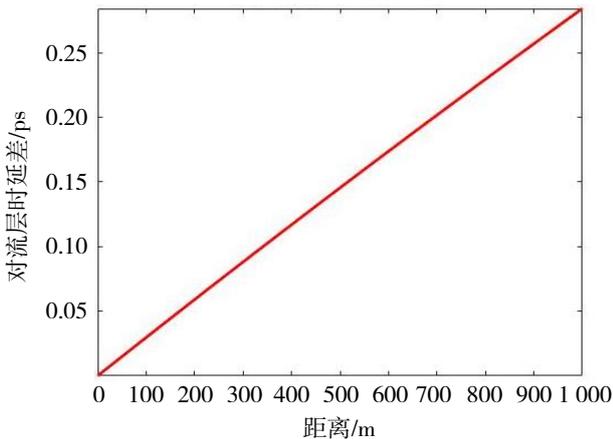
式 (6) 中 $M(E_S)$ 指 $M_{\text{dry}}(E_S)$ 或 $M_{\text{wet}}(E_S)$ ， a 、 b 、 c 是远小于 1 的常数，且分为干气部分和湿气部分，分别对应于干分量投影函数和湿分量投影函数。

当基线较短时，两站观测卫星的路径基本一致，卫星高度角十分接近，使得两站观测卫星的对流层时延有很大的空间相关性，因而消除了绝大部分影响。如令基线长度为 100 m，则在高度角大于 10° 时投影函数的差异小于 0.001。

为验证对流层的影响，本文基于大气的气象数据，通过 Saastamoinen 模型进行了对流层时延的仿真估算试验。试验包含两个测站和一颗卫星。以国家授时中心西安站（约 107°E）为测站 1，北斗 C03 星（星下点经度 110.5°E）为观测卫星 S。测站 2 位于测站 1 正东方，测站 3 位于测站 1 正南方。对于不同的基线距离，不同基线观测卫星 S 的对流层时延差如图 4 所示。由于卫星 S 经度与西安经度接近，因此东西基线不同基线长度的测站俯仰角变化不大，但是南北基线不同基线长度的测站俯仰角变化较为明显。经仿真计算，东西基线百米以内的对流层时延差约为 0.01 ps，1 km 达到了约 0.1 ps，可忽略不计；南北基线 1 km 以内的对流层时延差不超过 0.3 ps，在基线较长时应考虑对流层试验影响。



(a) 东西基线长度与对流层时延差



(b) 南北基线长度与对流层时延差

图 4 基站距离与对流层时延的关系

因此,在短基线系统中可以认为对流层时延的影响与基线距离高度相关,绝大部分误差可以通过站间差分自然抵消。本文所涉测轨系统基线长度不超过百米,无需额外考虑对流层时延。

1.2.3 电离层时延

与对流层类似,短基线情况下的站间差分能消除大部分电离层影响。电离层延迟计算方法如下:

$$\Delta d_{\text{ion}} = \frac{40.3}{(f)^2} \cdot E_s, \quad (7)$$

$$E_s = M(z) \cdot E_v, \quad (8)$$

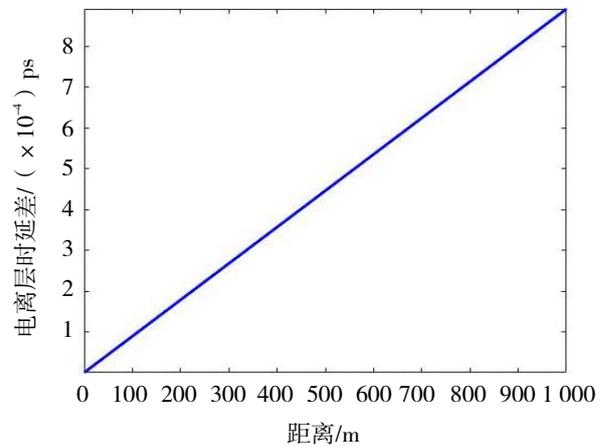
$$M(z) = \frac{1}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H} \cdot \cos(a(90^\circ - z))\right)\right)}. \quad (9)$$

式(7)~(9)中, f 为观测频点, E_s 指倾斜电子浓度, E_v 指垂直电子浓度, M 为投影函数, z 为卫星高度角, R 为地球半径, H 为电离层高度, a 为常数 0.978 2。

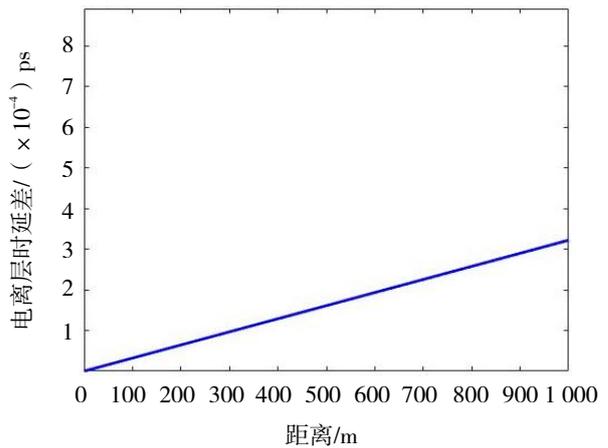
与对流层类似,短基线情况下可通过站间差分消除部分电离层影响。100 m 基线下电离层的映射函数差异小于 1×10^{-4} 。L波段电离层影响为 5~150 m,通信卫星的工作频段较高,如 C 波段(4 GHz)影响约为 L 波段的 1/10,站间差分将进一步削弱电离层影响^[20]。

为验证电离层的影响,本文通过从电离层模型中提取 TEC (total electron content) 数据,再结合 GNSS 信号频率开展了相同条件下的电离层时延的仿真估算试验。对于不同的基线距离,不同基线观测卫星 S 的电离层时延差如图 5 所示。经仿真计算,

东西基线 1 km 以内的电离层时延差不超过 0.000 9 ps,南北基线 1 km 以内的电离层时延差不超过 0.000 3 ps,可忽略不计。



(a) 东西基线长度与电离层时延差



(b) 南北基线长度与电离层时延差

图 5 基站距离与电离层时延的关系

因此,在短基线系统中可以认为在 C 波段电离层总时延影响为飞秒级,远低于测量系统的噪声或其他误差来源。差分法已经足够消除电离层对干涉测量的影响。本文所涉测轨系统基线长度不超过百米,不需要额外考虑电离层时延的修正。

1.2.4 设备时延

设备时延与系统硬件有关,其时延值会随温度变化^[21]。常规观测中通过已知精密轨道的参考卫星观测来对观测仪器、硬件环境带来的硬件时延等系统误差进行标校。在观测周期内,交替进行目标卫星和参考卫星的观测,获取两颗卫星的数据后,使用参考星的精确数据来修正目标卫星的观测数据,通过比较实际测量的信号传播时延与理论计算的

时延差异，估计系统引起的硬件时延。

标校过程中，由于目标卫星和参考卫星位于相对较近的位置，从地面接收站到两颗卫星的信号传播路径较为相似，信号经过的对流层和电离层厚度几乎相同，即电离层和对流层的影响可以认为是相同的，从而简化了修正过程。

$$\Delta t_{\text{sys}} = t_{\text{meas}} - t_{\text{theo}} \quad (10)$$

式 (10) 中， Δt_{sys} 为系统时延， t_{meas} 为实际测量的信号总传播时延， t_{theo} 为理论计算的传播时延。

目前可提供精密轨道的 GEO 卫星主要为北斗的 GEO 卫星，轨道精度可达米级。中国科学院国家授时中心的转发测定轨技术已为若干通信 GEO 卫星提供米级轨道，这些通信卫星也可作为标校卫星。

综上所述，在百米级基线的亚皮秒级时延测量中，固体潮和对流层时延差均小于 0.01 ps，电离层时延差仅为飞秒级，设备时延可通过参考星标校实现米级修正。短基线系统适用于对实时性、经济性和部署灵活性要求较高的应用场景，展现了良好的工程实用价值。

2 技术方案

2.1 总体方案

如图 6 所示，本系统主要包括天线系统、信道系统、采集系统、时频系统、网络系统和计算系统。此外，采集系统通过高速光纤网络和计算系统相连；计算系统可完成相关处理和轨道确定等功能；所有设备通过时频系统接入同一原子钟信号。

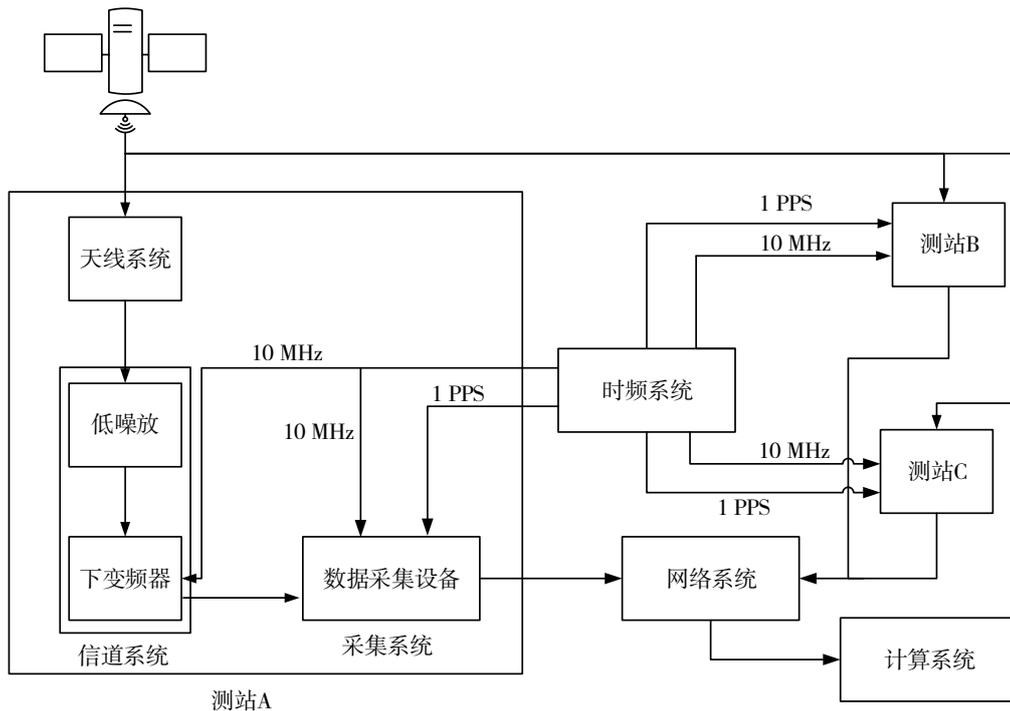


图 6 基本架构图

本系统天线系统方面，为 3.7 m、5 m 口径抛物面天线；时频系统方面，各面天线均接入以中国科学院国家授时中心西安场区的时频信号，该信号已溯源至我国标准时间 UTC (NTSC)；计算系统方面，

采用国家授时中心 VLBI 计算中心相关软硬件。

由于干涉测量的是卫星辐射信号到同一基线两站的距离差，为识别卫星不同方向的运动状态，本系统按照最小配置，使用三面天线组成，布局如

图 7 所示。

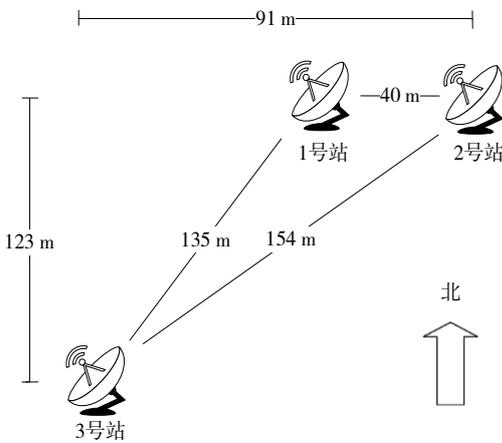


图 7 系统布局图

2.2 设备组成

本系统包含两面 3.7 m 天线和一面 5 m 天线，工作频段为 C、X 双频段，极化方式为双圆极化。

本系统天线采用修正型环焦天线，如图 8 所示。馈源网络如所图 9 示，通过 C/X 频段分波器将 C 和 X 频段分成 2 个通道，X 频段通过极化器实现圆极化，C 频段通过 $\pm 45^\circ$ 移相器实现圆极化。射频信号接收后经下变频器变频至 70 MHz 中频，工作带宽为 36 MHz。

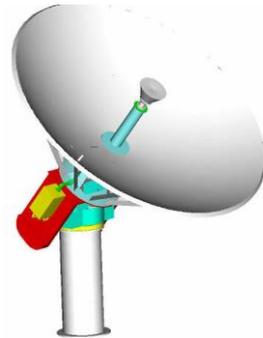


图 8 修正型环焦天线示意图

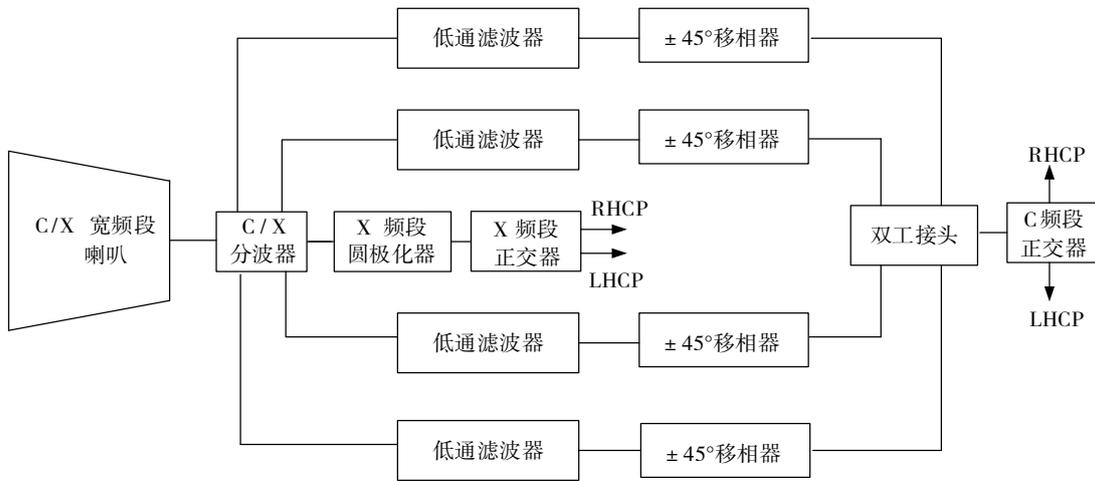


图 9 馈源网络

中频信号接入数据采集设备，本系统使用的数据采集设备为 CDAS2，工作带宽为 512 MHz，可覆盖本系统需求；输出数据格式为 Mark5B，与现有的国家授时中心 VLBI 计算中心格式一致。因此该系统可直接使用国家授时中心 VLBI 计算中心进行数据处理。

3 观测试验及精度分析

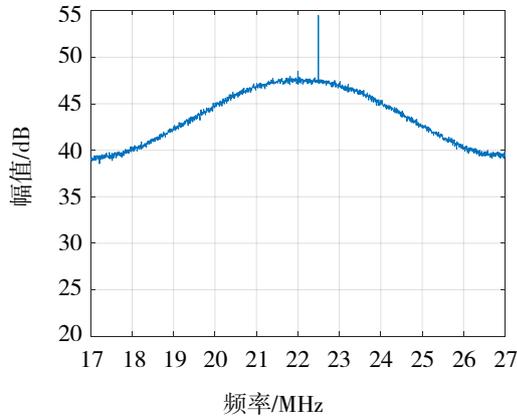
观测目标为某颗具有精密轨道产品的 GEO 卫

星。选定的中心频点为 C 频段，信号带宽设置为约 10 MHz，极化方式为右旋，能够保证信号的频谱特性在系统中的高效采样与解析。观测时间从 2024 年 10 月 12 日，持续至 10 月 22 日，总计 11 d。采取间歇观测模式，每隔 10 min 采集 10 s 数据。这种方式兼顾了系统资源的利用效率与观测目标的特性，确保在数据量和时间覆盖范围之间取得平衡，同时有效降低了长时间连续观测对设备

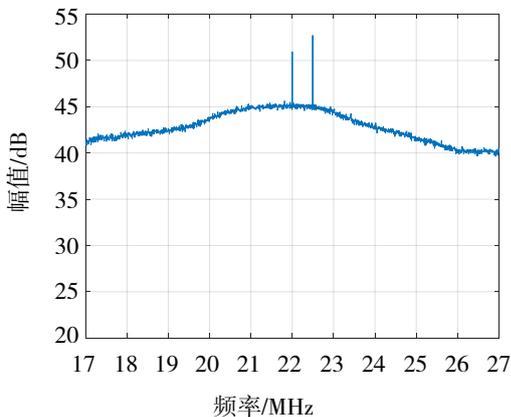
的压力。

三条基线的相关处理结果（图 10）表明，系统在整个观测周期内均获得了质量优良的互相关谱。互相关谱信号具有明显的峰值，表明系统硬件性能与软件处理链路可靠。

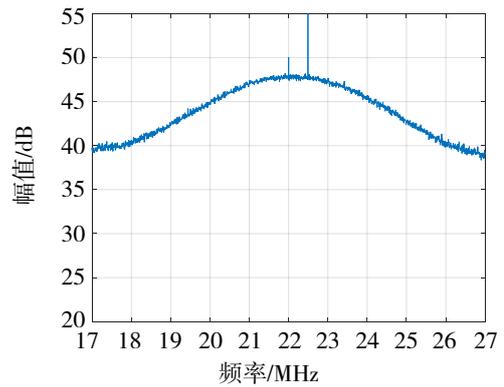
该卫星在三基线上得到的相位数据残差如图 11 所示，参考相位是通过 GFZ（Geo Forschungs Zentrum）提供的精密星历计算得到的理论相位值。可以看出，11 d 的相时延残差有显著的天周期的波动特性，且峰峰值基本上均在 100 ps 以内，目前猜测可能是卫星运动引入的多普勒频偏，未来将开展进一步分析。其中 1-3、2-3 基线在后三天出现了明显的偏移，但 1-2 基线没有明显变化，且卫星健康信息未发现机动，表明可能是 3 号站的测量设备出现问题，从而影响了与之相关的 1-3、2-3 基线结果，未来将开展设备时延的标定，排除设备时延影响。



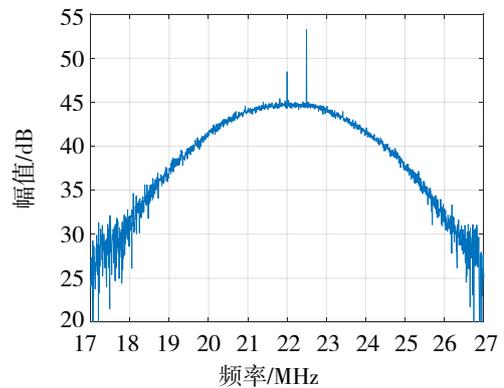
(a) 1 号站自相关谱



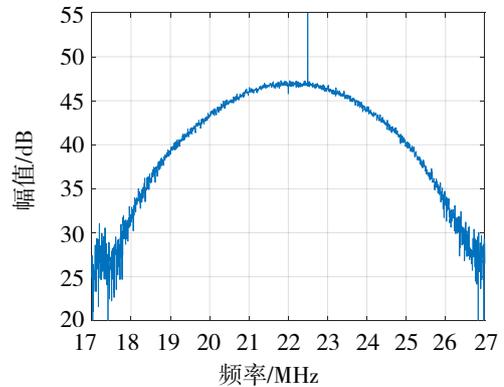
(b) 2 号站自相关谱



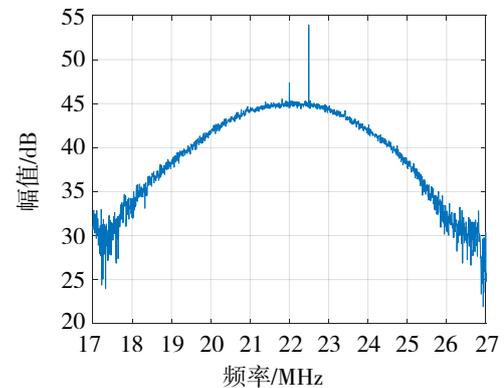
(c) 3 号站自相关谱



(d) 1 号站-2 号站互相关谱



(e) 1 号站-3 号站互相关谱



(f) 2 号站-3 号站互相关谱

图 10 三基线相关处理结果

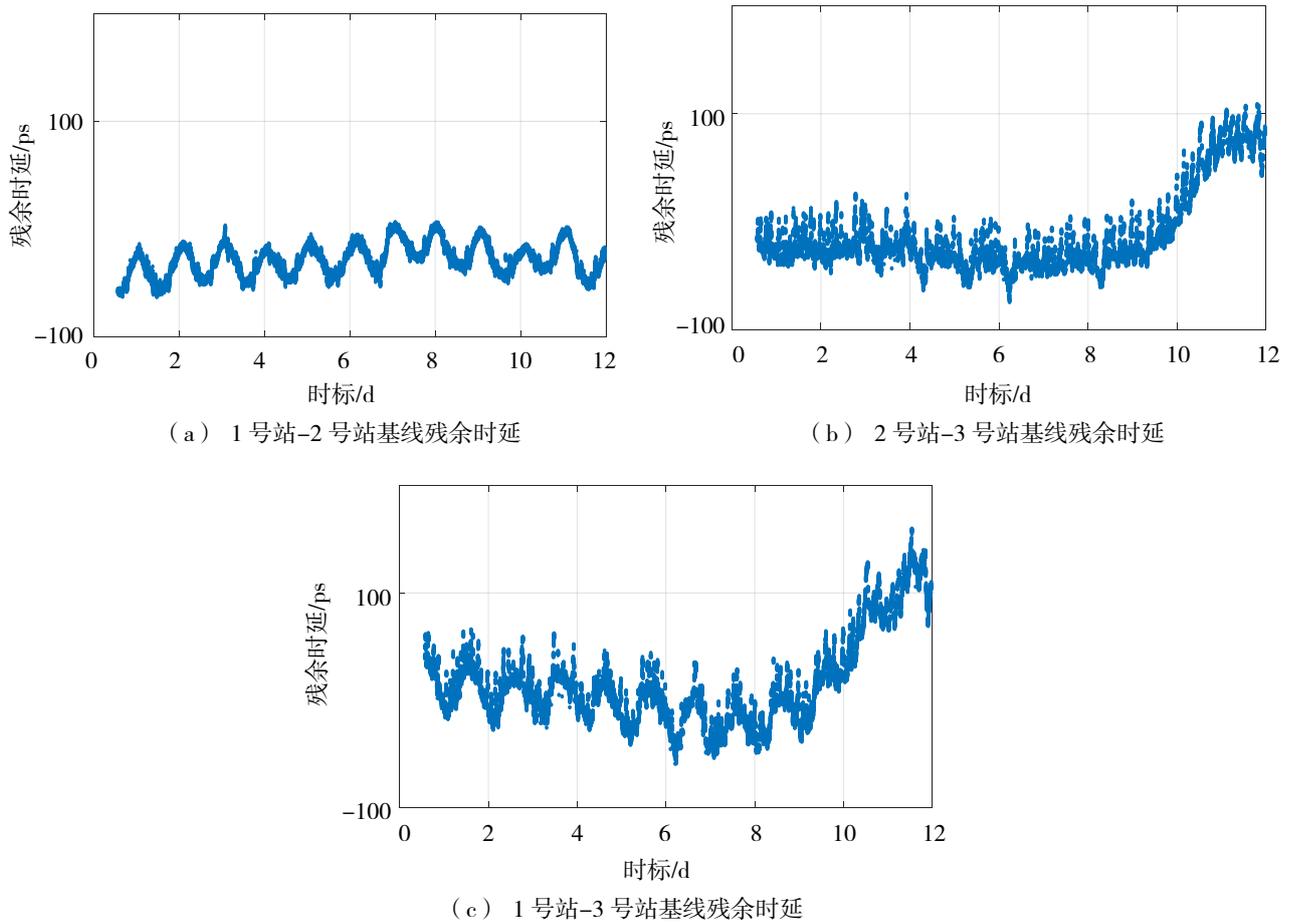
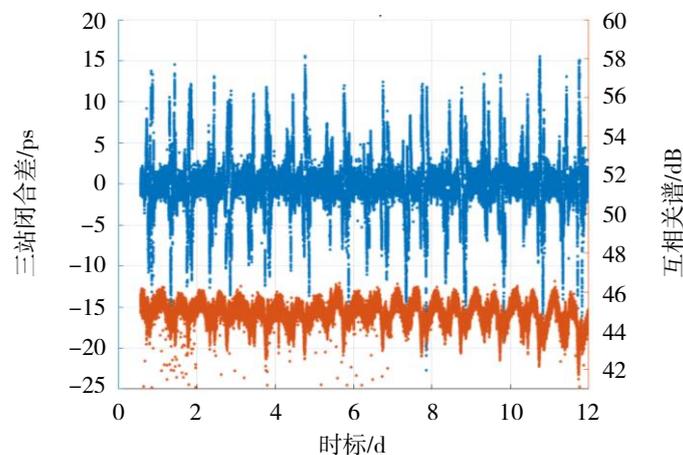


图 11 三条基线的残余时延观测结果

C波段的三基线闭合差如图 12 所示,本系统的三站可组成三条基线,三条基线的相时延之和理论值为 0。因此相时延闭合差可作为系统性能的核心评价指标:闭合差越小,系统误差控制能力越强、观测精度越高。整体上,闭合差的均方根 (1σ) 为 3.4 ps;若通过箱线图法排除了异常值的部分,

系统的精度可以提升至 1.6 ps。表明 C 波段的观测精度可达皮秒量级。

值得说明的是,图 12 中有较为频繁的噪声增大部分,且对应了互相关谱幅值的显著下降部分,表明这可能是接收的信号强度出现了降低;但是该信号的减弱尚不影响信号的相关性。



注:蓝色为三站闭合差,红色为互功率谱幅值

图 12 三基线闭合时延差 (RMS = 3.4 ps)

X波段的频率比C波段高,其理论闭合差应比C波段的波动范围小得多,因此开展X波段观测试验:观测目标为韩国气象卫星GEO-KOMPSAT 2A,星下点经度为128.2°E。观测中心频点为8 070 MHz,信号带宽约为15 MHz,极化方式为右旋。观测时

间为1 d(2023年11月9日5时至10日5时),观测模式为每小时观测半小时,观测期间每10 min采集10 s钟数据。

闭合差结果如图13所示,其均方根(1σ)为0.18 ps,说明X波段的观测精度可达亚皮秒量级。

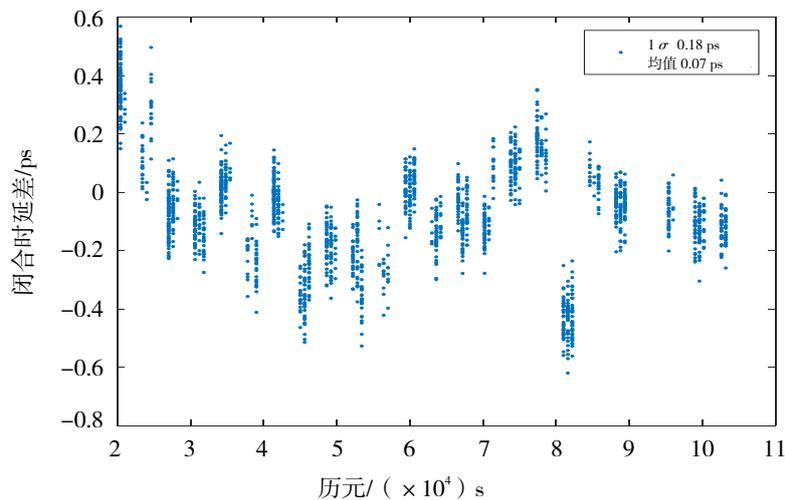


图13 三基线闭合时延差

4 结语

基于短基线干涉相时延测量的卫星无源测定轨系统,充分利用了短基线干涉技术的独特优势,能够提高测量精度、简化运维、提升实时性。与传统的长基线干涉测量系统相比,短基线系统由于基站之间距离较短,避免了大气延迟和固体潮影响的差异,且通过共用原子频标消除了站间时间同步问题,进一步提升了系统的测量精度和实时性。系统采用相时延测量技术,弥补了短基线带来的分辨率不足问题,达到了亚皮秒量级的精度。试验结果表明,C波段三基线闭合差的均方根值为3.4 ps,X波段三基线闭合差的均方根值为0.18 ps。系统在卫星的运动状态监测、GEO卫星机动监测方面具备明显优势。

参考文献:

[1] 许建忠,王祖林,郭旭静,等.统一S波段卫星测控系统的仿真实现[J].航天控制,2009(5):65-69.

- [2] 李荣旺.基于激光测距的人造卫星精密定轨研究[D].西安:中国科学院大学/中国科学院国家授时中心,2025.
- [3] 雷辉.基于转发式的导航卫星精密定轨研究[D].西安:中国科学院大学/中国科学院国家授时中心,2013.
- [4] 马浪明.基于直发式与转发式测距的卫星钟差确定方法[D].西安:中国科学院大学/中国科学院国家授时中心,2012.
- [5] 陈艳玲,黄勇,胡小工,等.CCD测角与激光测距技术综合测定空间目标的轨道[J].自然地理学和测绘学,2014(1):112-121.
- [6] 韦沛.GEO卫星无源测定轨关键技术研究[D].西安:中国科学院大学/中国科学院国家授时中心,2020.
- [7] 杜兰.GEO卫星精密定轨技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2006.
- [8] 李晓杰.CEI在精密定轨中的应用研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2009.
- [9] 黄磊,刘友永,陈少伍,等.适用于CEI的GEO卫星相时延解算方法及试验[J].宇航学报,2020,41(12):1579-1587.

- [10] 陈少伍, 王静温, 黄磊, 等. 北斗 GEO 卫星 CEI 相时延解算方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(6): 123-130.
- [11] 赵强, 侯孝民, 高亢, 等. 采用天线组阵辅助的连线干涉测量载波相位解模糊[J]. 电讯技术, 2018, 58(9): 1016-1021.
- [12] 李晔, 石金晶. 约束双差整周模糊度的 GNSS 单差载波相位时间比对方法[J]. 全球定位系统, 2024, 49(6): 121-126.
- [13] 郭鹏嵩. 卫星干涉测量的数采设备设计与实现[D]. 西安: 中国科学院大学/中国科学院国家授时中心, 2023.
- [14] 魏梓轩. 干涉测量设备与数据处理联动研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- [15] CHEN L, TANG G, FAN F, et al. China's CE-2 lunar satellite experiment based on short baseline interferometry [C] // International Astronautical Congress, 2011.
- [16] SANTAMARÍA G A. Very short baseline interferometry: assessment of the relative stability of the GPS stations at the Yebes Observatory (Spain)[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2013, 57(2): 233-252.
- [17] 钱志瀚. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用 [C] // 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会, 上海: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2010: 7.
- [18] 曹景敏, 万群, 欧阳鑫信, 等. 观测站有位置误差的多维标度时频差定位算法[J]. 信号处理, 2017, 33(1): 19.
- [19] 赵铁刚. 基于 GNSS 信号的对流层建模与延迟误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [20] 韩理想. GNSS 高阶电离层延迟改正算法和影响研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [21] 郭鹏嵩, 韦沛, 马浪明, 等. 干涉测量数据采集设备时延的温度效应[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 54-61.