

引用格式：孙令阳, 韩保民, 孙保琪, 等. 精密共视时间传递 GNSS 接收机内部噪声评估研究[J]. 时间频率学报, 2025, 48(2): 79-90.

精密共视时间传递 GNSS 接收机 内部噪声评估研究

孙令阳^{1, 2, 3}, 韩保民¹, 孙保琪^{2, 3, 4†}, 张喆^{2, 3, 4}, 杨旭海^{2, 3, 4}

1. 山东理工大学, 淄博 255049;

2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

3. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 精密共视 (precise common view, PCV) 是一种新兴的 GNSS (Global Navigation Satellite System) 载波相位时间传递技术, 已在高精度地基授时系统等国家重大任务建设中得到应用。GNSS 接收机内部噪声是影响观测数据质量的关键因素。开展 GNSS 接收机内部噪声评估可以分析判断接收机噪声对 PCV 时间传递精度的影响, 为多频多系统 GNSS 观测值的优化选取提供参考。提出了一种基于共钟零基线 PCV 时间传递的噪声评估方法。分别基于该方法和传统的零基线双差法, 对 PCV 时间传递 GNSS 接收机的码伪距和载波相位观测噪声进行了评估, 结果表明: ① 大部分信号的 PCV 载波相位精度优于 0.001 m, BDS 系统的 B1C、B2a、B3I, GPS 系统的 L5, Galileo 系统的 E5、E5a、E5b 等信号 PCV 码伪距精度优于 0.05 m; ② 发现天线电缆通道的不一致性会将零基线接收机内部噪声放大约 1.8 倍; ③ 共钟零基线 PCV 方法与传统的零基线双差法的评估结果规律一致, 验证了直接利用 PCV 时间传递评估接收机内部噪声的可行性。

关键词: 时间传递; 精密共视; 零基线; 双差; 内部噪声

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-02-0079-12

Research on the assessment of internal noise in precise common view time transfer GNSS receivers

SUN Ling-yang^{1, 2, 3}, HAN Bao-min¹, SUN Bao-qi^{2, 3, 4†}, ZHANG Zhe^{2, 3, 4}, YANG Xu-hai^{2, 3, 4}

1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

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

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

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract : Precise common view (PCV) is an emerging GNSS (Global Navigation Satellite System) carrier phase time transfer technique that has been applied in the major national projects such as high-precision ground-

收稿日期: 2024-05-02; 接受日期: 2024-05-29; †: sunbaoqi@ntsc.ac.cn

基金项目: 中国科学院“西部之光-西部交叉团队”(xbzg-zdsys-202308, xbzg-zdsys-202120)

based time service systems. The internal noise of GNSS receivers is a key factor affecting the quality of observation data. Conducting an internal noise evaluation of GNSS receivers can help analyze the impact of the receiver noise on PCV time transfer accuracy and provide a reference for the optimal selection of multi-frequency and multi-system GNSS observation. A noise evaluation method based on common-clock zero-baseline PCV time transfer is proposed. Using this method and the traditional zero-baseline double-difference method, the code pseudorange and carrier phase observation noise of PCV time transfer GNSS receivers were evaluated. The results show that: ① The PCV carrier phase accuracy of most signals is better than 0.001 m, while the PCV code pseudorange accuracy of signals such as the B1C, B2a, B3I of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS), the L5 of the Global Positioning System (GPS), and the E5, E5a, E5b of the Galileo system is better than 0.05 m; ② It was found that inconsistencies in antenna cable channels can amplify the internal noise of zero-baseline receivers by approximately 1.8 times; ③ The evaluation results of the common-clock zero-baseline PCV method are consistent with those of the traditional zero-baseline double-difference method, verifying the feasibility of using PCV time transfer to evaluate receiver internal noise.

Key words: time transfer; precise common view; zero-baseline; double-difference; observed noise

精密时间是现代社会正常运转和快速发展的重要基础保障之一^[1-3]。高精度时间传递负责比对两地时钟的差异,是实现精密时间协调统一的重要手段,在精密时间的产生、播发、获取以及溯源比对中发挥着重要作用^[4]。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)具有全天时、全天候、覆盖广、精度高和成本低等突出特点,已成为当前应用最广泛的时间传递技术。早期的GNSS时间传递以码伪距共视(common view, CV)为主,随着GNSS数据处理技术的发展,以精密单点定位(precise point positioning, PPP)为代表的载波相位时间传递技术逐渐成为主流。PPP时间传递具有亚纳秒量级的精度,不受基线长度的限制,但严重依赖GNSS卫星精密轨道和钟差产品,连续稳定的实时应用仍存在一定挑战。精密共视(precise common view, PCV)是另一种载波相位时间传递技术,结合了共视法可以消除站间公共误差的优点,不依赖精密钟差产品,仅使用精密轨道产品或广播星历即可实现与PPP时间传递一致的精度,在实时应用中具有一定的优势^[5-8]。由于实施简便、对外依赖小,精密共视时间传递已应用于高精度地基授时系统等多项国家重大工程。

GNSS接收机质量对精密共视时间传递性能有关键影响。内部噪声是GNSS接收机质量的一项重要指标^[9],直接影响接收机观测数据精度进

而影响精密共视时间传递精度。因此,开展精密共视时间传递前需要对所选用的GNSS接收机内部噪声进行评估。当前接收机噪声评估方法有超短基线法和零基线法。在超短基线模式下,电离层和对流层的影响被极大程度的削弱,但仍存在多路径效应的影响。零基线法可以保留接收机噪声特性,消除绝大多数的误差,被广泛应用于接收机噪声评估。徐震宇等人^[10]采用零基线评估法对BDS-3新信号的观测噪声进行了评估,其研究表明BDS-3在B1C频点上的载波相位观测噪声优于B2a频点,而在伪距噪声上却差于B2a频点。毛刚等^[11]采用零基线双差法对国产GNSS接收机信号质量进行了评估,得出自主研发的高精度接收机产品在原始观测量性能上已达到国外同类产品水平的结论。张加同等^[12]分析了不同环境下GNSS互操作信号B1C、L1、E1和B2a、L5、E5a动态性能,在零基线噪声中B1C表现优于E1和L1,其中伪距观测值中L5频率较优,但在遮挡环境B2a优于L5;而载波相位中B1C频率表现最好。Hou等^[13]提出一种联合估计观测噪声和过程噪声的方法。Bakker等^[14]分析了零基线和短基线下GPS(Global Positioning System)和Galileo部分频点的测量精度。Ruwisch等^[15]分析了GPS、GAL(Galileo Satellite Navigation System)、GLONASS(Global Navigation Satellite System)3个系统的动态导航信号噪声。

Roberts 等^[16]分析了零基线下动态和静态, GPS、BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 单系统和 GPS 与 BDS 系统组合的观测噪声。通过引入双差模糊度, 基于零基线单差法分析了 GPS 和 BDS 的载波相位观测值噪声^[17]。

现有研究主要面向导航定位应用场景, 大部分基于零基线双差法对接收机噪声进行分析, 个别文献使用了单差法但是仍与 PCV 时间传递模型不同, 难以反映 PCV 模式下的真实噪声水平, 分析的 GNSS 信号也不够全面。此外, 不同的 GNSS 接收机内部噪声水平可能存在较大差异。因此, 面向 PCV 时间传递实际使用场景, 提出一种基于 PCV 技术的接收机内部噪声评估方法, 并利用该方法对国家重大科技基础设施——高精度地基授时系统 4 台同型号 GNSS 多频多系统接收机 19 个信号的内部噪声进行分析。

1 基于 PCV 的接收机内部噪声评估方法

1.1 PCV 时间传递原理

接收机 i 对卫星 p 的码伪距与载波相位观测方程可以表示为:

$$P_i^p = \rho_i^p + c(dt_i + dt^p) + d_i + d^p + T_i^p + I_i^p + e_i^p, \quad (1)$$

$$L_i^p = \rho_i^p + c(dt_i + dt^p) + \delta_i + \delta^p + \lambda N_i^p + T_i^p - I_i^p + \varepsilon_i^p. \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中 P_i^p 为码伪距观测值, L_i^p 为载波相位观测值, ρ_i^p 为几何距离项, c 为真空光速, dt_i 为接收机钟差, dt^p 为卫星钟差, d_i 和 d^p 分别为码伪距观测值对应的接收机和卫星的设备时延, δ_i 和 δ^p 分别为载波相位载波对应的接收机和卫星的设备时延, λ 为波长, N_i^p 为整周模糊度, T_i^p

为对流层误差, I_i^p 为电离层误差, e_i^p 为码伪距观测噪声, ε_i^p 为载波相位观测噪声。

PCV 时间传递利用两台接收机对共同可见卫星的站间单差观测值, 接收机 i 和接收机 j 对卫星 p 的观测方程为:

$$P_{ij}^p = \rho_{ij}^p + cdt_{ij} + d_{ij} + T_{ij}^p + I_{ij}^p + e_{ij}^p, \quad (3)$$

$$L_{ij}^p = \rho_{ij}^p + cdt_{ij} + \delta_{ij} + T_{ij}^p - I_{ij}^p + \lambda N_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^p. \quad (4)$$

式 (3) 和 (4) 中, P_{ij}^p 为单差码伪距观测值, L_{ij}^p 为单差载波相位观测值, ρ_{ij}^p 为单差几何距离项, dt_{ij} 为两发接收机相对钟差, d_{ij} 为码伪距观测值对应的两台接收机之间的设备时延差, δ_{ij} 为载波相位观测值对应的两台接收机之间的设备时延差, λ 为波长, N_{ij}^p 为单差整周模糊度, T_{ij}^p 为单差对流层误差, I_{ij}^p 为单差电离层误差, e_{ij}^p 和 ε_{ij}^p 分别为单差后码伪距观测噪声与载波相位观测噪声。

从中可以看出, PCV 时间传递观测方程中消除了卫星钟差和卫星端设备时延。对于两台接收机相距较远的中长基线, 电离层延迟一般通过形成无电离层组合进行消除, 对流层延迟作为未知参数进行估计。由于设备时延与接收机钟差完全线性相关, 一般将码伪距对应的接收机相对设备时延 d_{ij} 合并到接收机相对钟差 dt_{ij} 中作为一个未知参数, 利用码伪距和载波相位观测值共同估计。载波相位模糊度参数吸收了载波相位和码伪距接收机设备时延之差。两台接收机各自外接本地时钟的秒脉冲 (pulse per second, PPS) 和频率信号, 在实时应用中, 可通过卡尔曼滤波估计得到两台接收机的相对钟差, 从而实现时间传递。

1.2 基于 PCV 的零基线噪声评估

根据《北斗卫星导航系统测量型接收机通用规范》^[18] 等标准规定, 接收机内部噪声水平推荐采用零基线方式评估。在零基线模式下, 两台 (或更多) 接收机通过功分器共用一个接收机天线, 接收机到卫星之间的几何距离、电离层延迟、对流层

延迟以及多路径效应等系统误差均相同。为了进一步消除接收机时钟不同步造成的影响,以及便于分析接收机设备时延变化,基于 PCV 的噪声评估采用共钟零基线模式开展,即形成零基线的两台接收机外接同源的 PPS 和频率信号。

共钟零基线 PCV 时间传递消除了两台接收机之间的所有公共系统误差,仅剩余设备时延、载波相位模糊度和接收机内部噪声的影响,观测方程简化为:

$$P_{ij}^p = cdt_{ij} + e_{ij}^p, \quad (5)$$

$$L_{ij}^p = cdt_{ij} + \lambda N_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^p. \quad (6)$$

式(5)和(6)中, dt_{ij} 参数本为两台接收机相对钟差与码伪距相对设备时延之和,因为共用同源的时间频率信号,此处实际仅为码伪距相对设备时延。方便起见,仍然用接收机相对钟差符号 dt_{ij} 表示。将接收机相对钟差(码伪距相对设备时延)、载波相位模糊度(载波相位和码伪距接收机设备时延之差)作为未知参数进行估计,观测值残差的离散程度即可反映接收机内部噪声水平。

1.3 零基线 PCV 噪声与零基线双差噪声的关系

传统的零基线双差法在站间单差的基础上与卫星之间形成星间单差,进一步消除了接收机钟差和接收机设备时延,接收机 p 和接收机 q 对卫星 i 和卫星 j 观测方程为:

$$P_{ij}^{pq} = e_{ij}^{pq}, \quad (7)$$

$$L_{ij}^{pq} = \lambda N_{ij}^{pq} + \varepsilon_{ij}^{pq}. \quad (8)$$

式(7)和(8)中 P_{ij}^{pq} 为双差码伪距观测值, L_{ij}^{pq} 为双差载波相位观测值, e_{ij}^{pq} 和 ε_{ij}^{pq} 分别为双差后码伪距和载波相位的观测噪声。零基线双差观测值残差的离散程度反映了接收机内部噪声水平。

假定观测噪声服从正态分布,根据误差传播规律,非差、单差(PCV)和双差观测噪声的理论对应关系为:

$$4\sigma_{e_i^p}^2 = 2\sigma_{e_{ij}^p}^2 = \sigma_{e_{ij}^{pq}}^2, \quad (9)$$

$$4\sigma_{\varepsilon_i^p}^2 = 2\sigma_{\varepsilon_{ij}^p}^2 = \sigma_{\varepsilon_{ij}^{pq}}^2. \quad (10)$$

式(9)和(10)中 $\sigma_{e_i^p}^2$ 为非差观测噪声 STD(standard deviation, STD), $\sigma_{\varepsilon_i^p}^2$ 为单差观测噪声 STD, $\sigma_{e_{ij}^{pq}}^2$ 为双差观测噪声 STD。

2 试验平台与处理策略

2.1 试验平台

依托国家重大科技基础设施—高精度地基授时系统资源搭建试验平台,开展基于共钟零基线的接收机内部噪声分析。试验平台组成如图1所示。选取高精度地基授时系统配备4台某型号PCV时间传递GNSS接收机,分别命名为YK01、DH01、NQ01、KL01。该型号接收机能够接收北斗二号、北斗三号、GPS、GLONASS、Galileo等GNSS系统所有公开可用的导航信号。4台接收机均外接标准时间UTC(NTSC)的1PPS和10MHz信号,通过功分器连接同一接收机天线。其中,YK01、DH01两台接收机信号通道一致,均使用长度为40cm左右的同型号馈线电缆直接连接功分器;而NQ01、KL01两台接收机信号通道一致,与功分器连接时均通过同型号转接头使用了另一型号的馈线电缆,且馈线电缆长度为2m左右。以YK01为基准接收机,形成YK01-DH01、YK01-NQ01、YK01-KL013条时间传递链路。NQ01、KL01两台接收机可以形成时间传递链路NQ01-KL01。根据接收机检测标准,零基线评估接收机内部噪声时,功分器分出的信号功率、相位应该保持一致^[18]。因此,评估接收机内部噪声时,以YK01-DH01、NQ01-KL01两条链路的结果为参考。YK01-NQ01、YK01-KL01链路仅用来对比分析接收机信号通道不一致对噪声评估的影响。

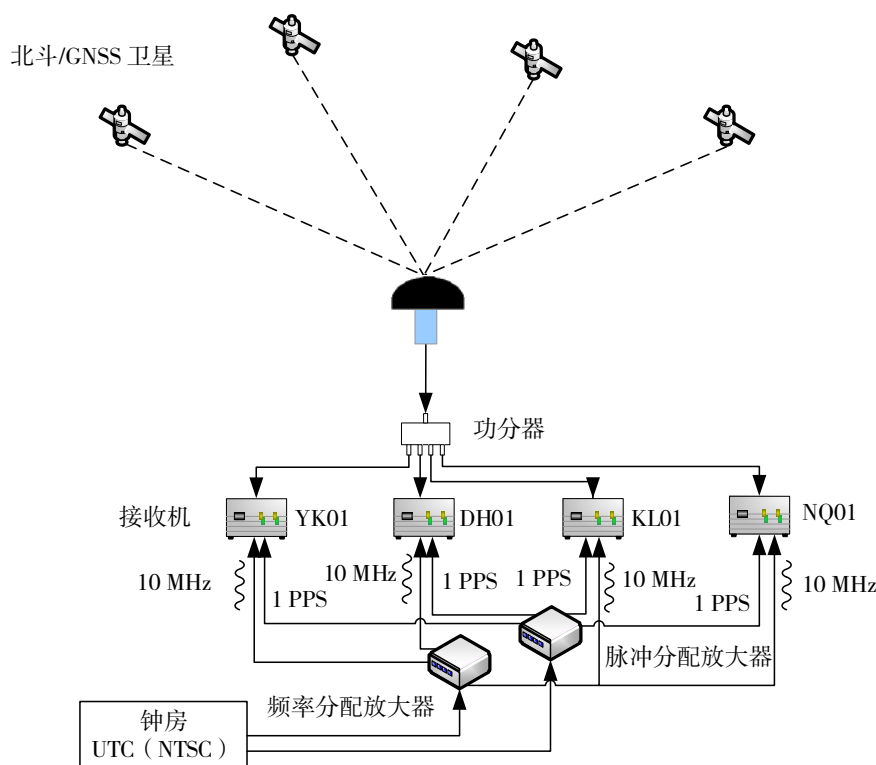


图1 共钟零基线试验平台组成

2.2 处理策略

基于试验平台，采集了4台PCV时间传递GNSS接收机自2023年8月24日（年积日236）至8月29日（年积日241）共6 d的观测数据。基于PCV时间传递技术对共钟零基线观测数据进行解算处理，以解算结果的观测值残差标准差来评估接收机内部噪声水平。同时开展零基线双差

解算，以便对比验证基于PCV方法评估接收机内部噪声的合理性。共形成YK01-DH01、NQ01-KL01、YK01-NQ01、YK01-KL01 4条时间传递链路。以单频模式，依次对每条链路的BDS系统B1I、B1C、B2I、B2a、B2b、B3I，GPS系统L1、L2、L5，Galileo系统E1、E5、E5a、E5b、E6，GLONASS系统G1、G2、G3，共计17个频点的19类码伪距和载波相位观测值进行处理。具体解算策略如表1所示。

表1 PCV&RTK 解算策略

选项	设置
观测值	单频码伪距和载波相位
天线改正	igs14.atx
参数估计	扩展卡尔曼滤波
截止高度角	10°
观测值采样间隔	30 s

3 结果分析

3.1 共钟零基线PCV噪声分析

基于YK01-DH01、NQ01-KL01、YK01-KL01、YK01-NQ01 4条共钟零基线链路连续6 d的各频

点码伪距和载波相位观测数据，分别进行PCV时间传递解算，得到反映接收机内部噪声水平的相应残差时间序列。PCV模式4条链路BDS系统码伪距残差序列

统计了4条链路共计19类观测值的码伪距与

载波相位噪声标准差 STD。该表中的数值为站间单差观测值对应的噪声 STD, 未换算到非差观测值。为了屏蔽异常值的影响, 统计时以 10 倍标准差为阈值进行了粗差剔除。方便描述起见, 下文中将 GPS 系统的 L1 信号频点中 C/A 码和 Z 跟踪码分别以 RINEX 格式的 C1C 和 C1W 表示, L2 信号频点中 C/A 码和 Z 跟踪码以 RINEX 格式的 C2C 和 C2W 表示。

从表 2 可以看出, 除个别异常值外, 不同类

型观测值之间噪声 STD 的相对关系在 4 条链路中表现基本一致。YK01-DH01、NQ01-KL01 两条链路由通道一致的接收机对组成, 统计得出的相同类型的观测值噪声水平数值接近。组成 YK01-KL01、YK01-NQ01 两条链路的接收机对通道不一致, 造成评估出的观测值噪声偏大。下面依次对载波相位噪声、码伪距噪声和在当前试验场景中通道不一致造成的影响进行详细分析。

表 2 基于 PCV 评估的各链路不同信号码伪距与载波相位单差观测噪声 STD

信号频点	YK01-DH01		NQ01-KL01		YK01-KL01		YK01-NQ01	
	码伪距	载波相	码伪距	载波相	码伪距	载波相	码伪距	载波相
	噪声	位噪声	噪声	位噪声	噪声	位噪声	噪声	位噪声
	STD/m	STD/m	STD/m	STD/m	STD/m	STD/m	STD/m	STD/m
BDS_B1I	0.097	0.000 4	0.084	0.000 4	0.144	0.000 5	0.146	0.000 5
BDS_B1C	0.047	0.000 3	0.047	0.000 3	0.078	0.000 4	0.078	0.000 4
BDS_B2I	0.058	0.000 4	0.052	0.000 4	0.093	0.000 5	0.094	0.000 5
BDS_B2a	0.031	0.000 5	0.031	0.000 5	0.051	0.000 6	0.052	0.000 7
BDS_B2b	0.026	0.000 4	0.023	0.000 6	0.043	0.000 5	0.044	0.000 6
BDS_B3I	0.038	0.000 5	0.035	0.000 5	0.054	0.000 6	0.056	0.000 6
Galileo_E1	0.054	0.000 4	0.053	0.000 4	0.103	0.000 8	0.092	0.000 4
Galileo_E5	0.007	0.000 4	0.005	0.000 4	0.007	0.000 5	0.007	0.000 5
Galileo_E5a	0.036	0.000 6	0.037	0.000 6	0.062	0.000 7	0.062	0.000 7
Galileo_E5b	0.031	0.000 5	0.027	0.000 4	0.052	0.000 6	0.053	0.000 6
Galileo_E6	0.058	0.000 5	0.060	0.000 5	0.090	0.000 6	0.096	0.000 6
GPS_C1C	0.100	0.000 4	0.099	0.000 4	0.172	0.000 4	0.173	0.000 4
GPS_C1W	0.101	0.000 4	0.101	0.000 4	0.174	0.000 4	0.174	0.000 4
GPS_C2C	0.104	0.000 7	0.101	0.000 7	0.160	0.000 9	0.159	0.000 8
GPS_C2W	0.065	0.000 8	0.070	0.000 8	0.075	0.000 9	0.073	0.000 7
GPS_L5	0.029	0.000 5	0.030	0.001 1	0.049	0.002 4	0.049	0.001 7
GLO_G1	0.482	0.001 3	0.235	0.001 3	0.407	0.000 9	0.374	0.000 9
GLO_G2	0.163	0.000 6	0.168	0.000 7	0.237	0.000 8	0.234	0.000 8
GLO_G3	5.232	0.205 7	0.706	0.266 9	0.693	0.027 0	0.613	0.254 6

3.1.1 单差载波相位噪声

由于 YK01-DH01、NQ01-KL01 两条链路的结

果类似, 以其中 YK01-DH01 链路为例, 详细分析各类观测值的载波相位观测噪声。图 2 为 YK01-

DH01 链路 PCV 载波相位残差序列。可以看出,大部分信号的载波相位观测噪声较小,STD 在 0.4~0.6 mm 之间。BDS 系统所有信号的载波相位观测噪声 STD 均不超过 0.5 mm, B1C 信号的噪声最小,STD 为 0.3 mm。GPS 系统 L1、L5 频点信号的载波相位观测噪声较小,分别为 0.4 mm 和 0.5 mm, L2 频点信号稍大,达到 0.7~0.8 mm。Galileo 系统的载波相位观测噪声 STD 在 0.4~0.6 mm 之间。GLONASS 系统 G1 信号载波相位观测噪声 STD 较

大,为 1.3 mm, G2 信号为 0.6 mm。

由于可见卫星过少, GLONASS G3 信号只有少部分时段存在 PCV 解算结果,并且有较多的异常情况,进而导致评估出的噪声 STD 过大。因为尚未覆盖所有的 GPS 在轨卫星,基于 GPS L5 信号的 PCV 解算也存在部分时段结果空缺的现象。年积日第 240 天 23 点之后, B2b 信号的解算结果存在较多异常,未纳入噪声评估统计。

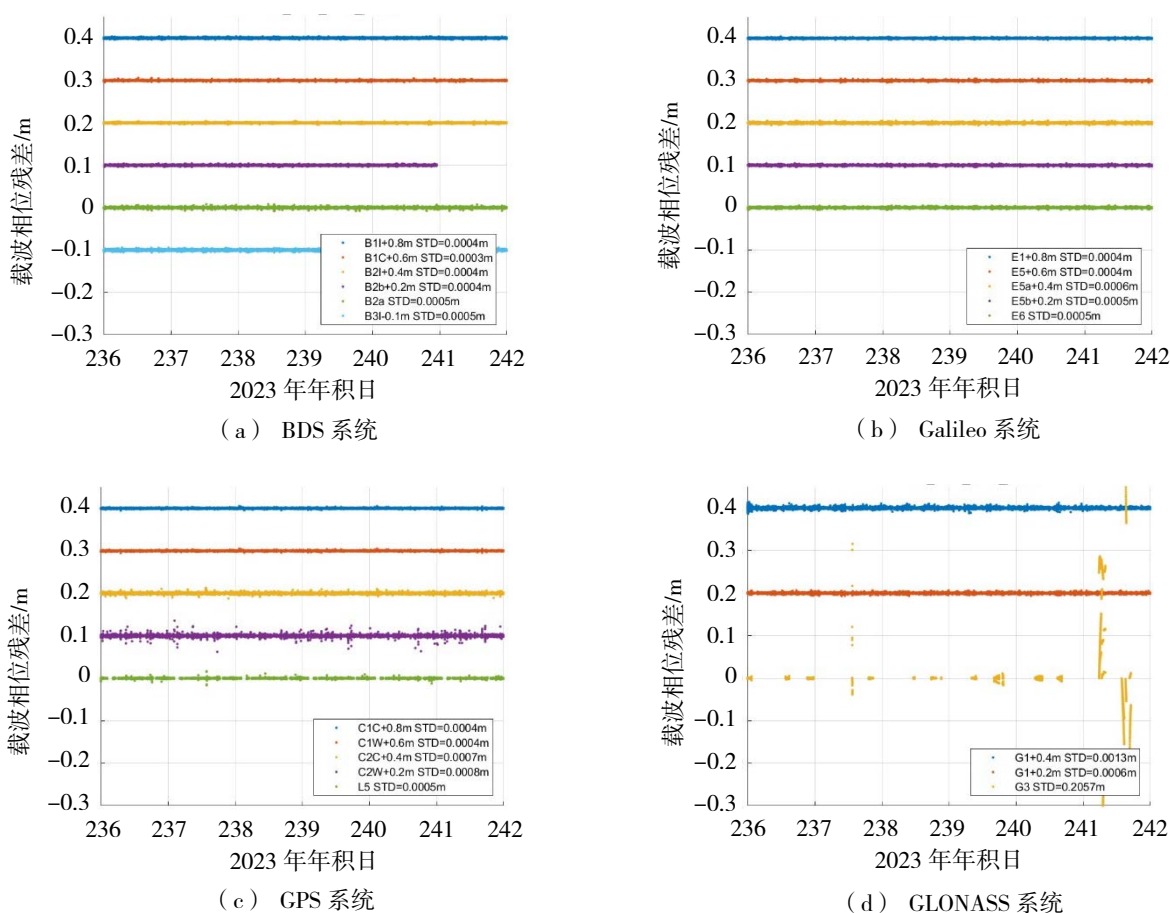


图2 YK01-DH01 链路 PCV 模式载波相位残差序列

3.1.2 单差码伪距噪声

码伪距观测噪声方面,仍然以 YK01-DH01 链路为例进行分析。图 3 和图 4 分别为该链路各频点 PCV 码伪距观测噪声 STD 直方图和残差序列。从中可以看出,大部分信号码伪距观测噪声 STD 小于 0.07 m,部分信号在 0.1 m 左右, GLONASS 系统 3 个信号噪声最大,均超过了 0.15 m。BDS 系统中 B1C、B2a、B2b 和 B3I 4 个频点的码伪距观

测噪声较小,STD 均在 0.05 m 以内; B1I 最差,STD 达 0.097 m; B2I 次之,为 0.058 m。GPS 系统中, L1 频点的 C1C、C1W 和 L2 频点的 C2C, 3 个信号的码伪距观测噪声较大,STD 均在 0.1 m 左右; L2 频点的 C2W 信号略小,为 0.069 m; L5 频点码伪距观测值最优,噪声 STD 为 0.029 m。Galileo 系统各信号码伪距观测噪声总体较小,其中 E1 和 E6 信号相对较大,噪声 STD 分别为 0.054 m 和

0.058 m; E5a 和 E5b 两个信号较小, 均优于 0.04 m; E5 信号最优, STD 不足 0.01 m, 也是所有 GNSS 系统中码伪距噪声最小的信号。

GLONASS 系统中 G1 信号码伪距观测噪声较大,

STD 达到 0.482 m; G2 信号相对较好, 为 0.163 m。

与载波相位类似, G3 信号码伪距由于可见卫星过少, PCV 解算异常。

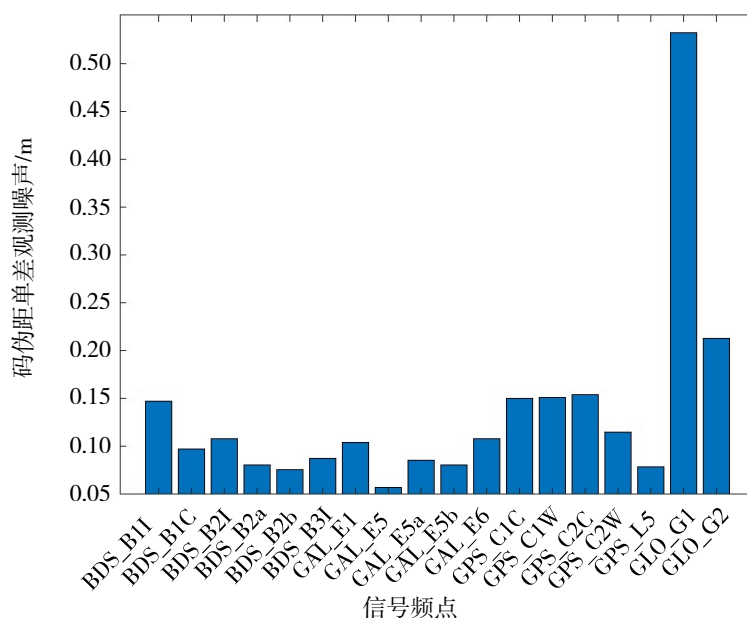


图 3 YK01-DH01 链路 PCV 模式码伪距单差观测噪声 STD

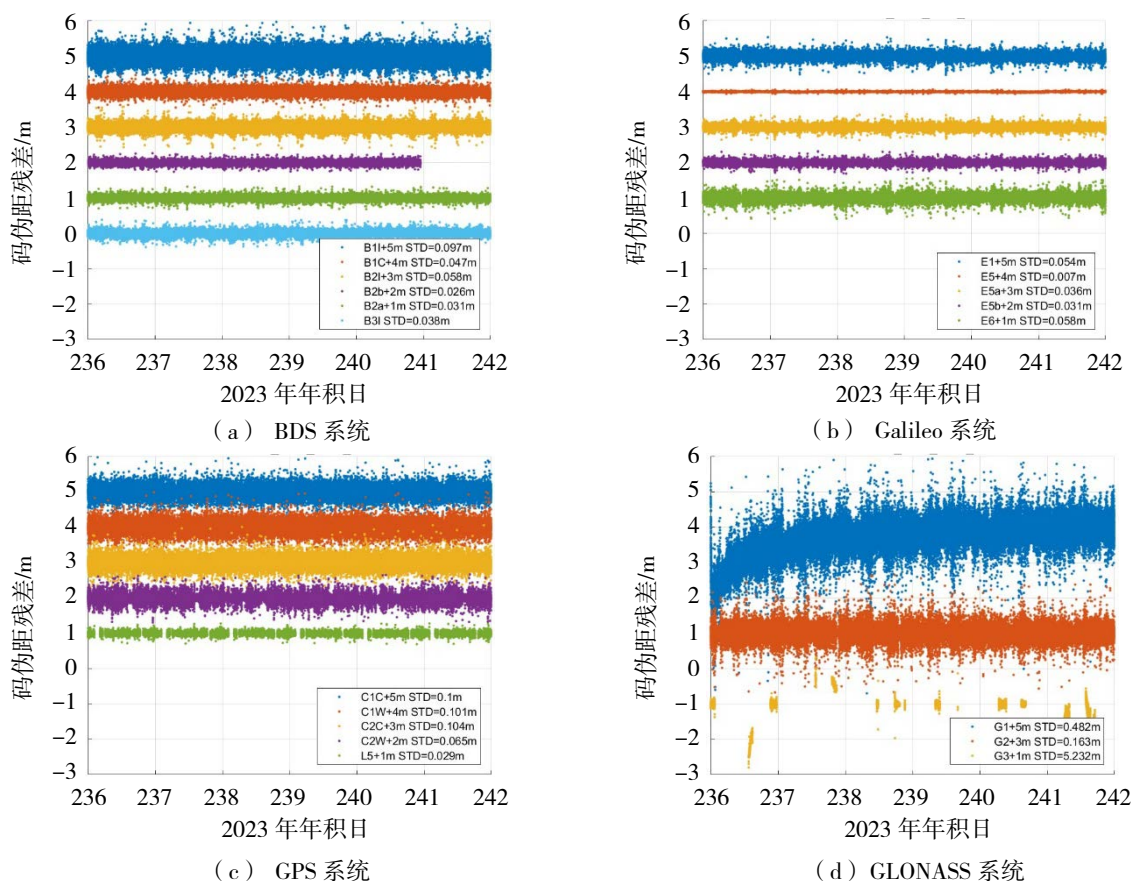


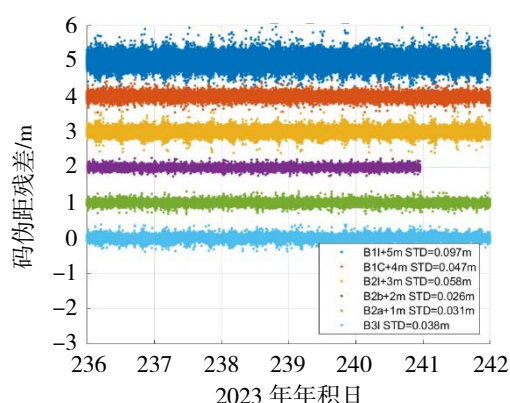
图 4 YK01-DH01 链路 PCV 模式码伪距残差序列

3.1.3 通道不一致对噪声评估的影响

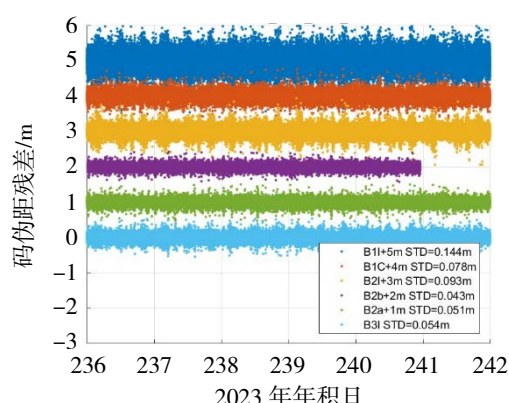
噪声评估结果在 4 条链路之间存在明显的分组现象。限于篇幅,图 5 仅给出了 4 条链路 BDS 系统 6 个信号的码伪距残差序列。结合图 5 和表 2 可以看出,与 YK01-DH01、NQ01-KL01 两条链路相比,YK01-NQ01、YK01-KL01 两条链路评估得到的噪声 STD 显著偏大。例如,B1I 频点 YK01-DH01 与 NQ01-KL01 两条链路的码伪距观测噪声 STD 分别为 0.097 m 和 0.084 m,而 YK01-NQ01、

YK01-KL01 分别为 0.144 m 和 0.146 m。

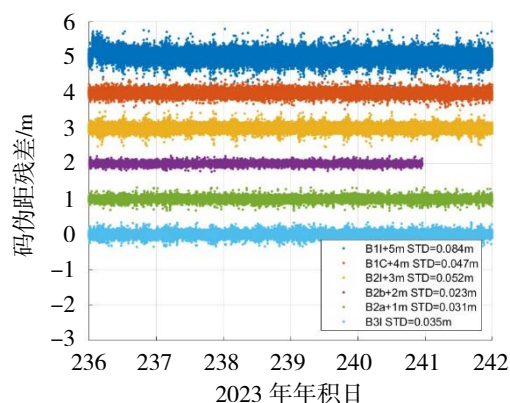
直接原因在于试验中从功分器到接收机 YK01 的信号通道,与到接收机 NQ01、KL01 的信号通道不一致。后者使用的电缆型号不一样,长度增加了约 1.6 m,而且在功分器和接收机端使用了信号转接头。总体来看,在文中的试验场景中接收机信号通道的这种差异,对码伪距噪声的放大倍数在 1.6~1.8 之间,载波相位噪声的放大倍数在 1.2 左右。



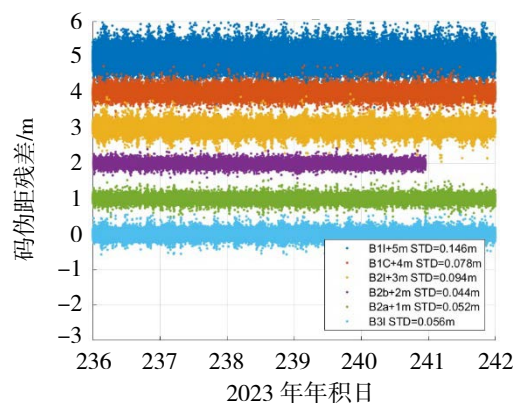
(a) YK01-DH01 链路



(b) YK01-KL01 链路



(c) NQ01-KL01 链路



(d) YK01-NQ01 链路

注：左为通道一致的链路，右为通道不一致的链路

图 5 PCV 模式 4 条链路 BDS 系统码伪距残差序列

3.2 共钟零基线双差噪声分析

零基线双差是评估观测值接收机内部噪声的经典方法,利用同一批试验数据开展基于零基线双差的噪声评估,可以对 PCV 评估结果进行符合验证。表 3 给出了 4 条链路 19 类观测值的双差码

伪距与载波相位噪声 STD。从表 3 可以看出,与 PCV 评估结果类似,零基线双差评估得到的各类观测值噪声 STD 之间的相对关系在 4 条链路中表现基本一致,接收机通道不一致的两条链路噪声 STD 明显偏大,码伪距和载波相位噪声的放大倍数同样分别在 1.6~1.8 和 1.2 左右。

表 3 零基线双差法各基线不同频点码伪距与载波相位双差观测噪声

频点	YK01-DH01		NQ01-KL01		YK01-KL01		YK01-NQ01	
	码伪距	载波相	码伪距	载波相	码伪距	载波相	码伪距	载波相
	噪声 STD/m	位噪声 STD/m	噪声 STD/m	位噪声 STD/m	噪声 STD/m	位噪声 STD/m	噪声 STD/m	位噪声 STD/m
BDS_B1I	0.116	0.000 5	0.082	0.000 4	0.165	0.000 5	0.168	0.000 5
BDS_B1C	0.053	0.000 4	0.054	0.000 4	0.088	0.000 5	0.089	0.000 5
BDS_B2I	0.071	0.000 5	0.063	0.000 5	0.113	0.000 6	0.114	0.000 6
BDS_B2a	0.036	0.000 6	0.036	0.000 6	0.059	0.000 7	0.060	0.000 8
BDS_B2b	0.030	0.000 5	0.027	0.000 6	0.050	0.000 5	0.051	0.000 7
BDS_B3I	0.039	0.000 6	0.041	0.000 6	0.064	0.000 7	0.067	0.000 7
Galileo_E1	0.061	0.000 5	0.062	0.000 5	0.105	0.000 5	0.105	0.000 5
Galileo_E5	0.007	0.000 5	0.007	0.000 5	0.008	0.000 6	0.008	0.000 6
Galileo_E5a	0.042	0.000 7	0.043	0.000 7	0.072	0.000 8	0.073	0.000 8
Galileo_E5b	0.036	0.000 6	0.032	0.000 5	0.061	0.000 7	0.061	0.000 7
Galileo_E6	0.066	0.000 6	0.069	0.000 6	0.105	0.000 7	0.112	0.000 7
GPS_C1C	0.113	0.000 4	0.113	0.000 4	0.195	0.000 5	0.196	0.000 5
GPS_C1W	0.114	0.000 4	0.115	0.000 4	0.196	0.000 5	0.196	0.000 5
GPS_C2C	0.121	0.000 8	0.118	0.000 8	0.185	0.001 0	0.184	0.001 0
GPS_C2W	0.069	0.000 9	0.070	0.002 2	0.082	0.001 0	0.080	0.000 8
GPS_L5	0.035	0.000 6	0.035	0.000 9	0.058	0.001 3	0.058	0.000 9
GLO_G1	0.401	0.000 8	0.292	0.001 4	0.509	0.001 1	0.452	0.001 1
GLO_G2	0.198	0.000 8	0.204	0.000 8	0.288	0.001 0	0.286	0.001 0
GLO_G3	0.101	0.251 4	0.182	0.395 7	0.082	0.035 5	0.180	0.363 1

图 6 给出了 YK01-DH01 链路 PCV 和双差两种模式下码伪距噪声 STD 的直观对比。由图 6 可知, 基于 PCV 和双差两种模式评估得到的各类观测值噪声水平的优劣规律基本一致。从而说明基于 PCV 时间传递技术评估接收机内部噪声是可行。

理论上双差噪声 STD 应该为单差噪声 STD 的 $\sqrt{2}$ 倍, 但是对比双差和 PCV 的噪声评估结果, 发现两者之间的比例关系并非严格符合理论推定, 而是在 1~1.2 倍之间 (图 7)。若按照误差传播率将两者的观测噪声 STD 归算为非差观测噪声, 则 PCV 模式归算出的观测噪声略大。

共钟零基线 PCV 解算消除了接收机钟差的影响, 但是仍然包含接收机相对设备时延, 将其作为与接收机钟差类似的白噪声未知参数逐历元进行估计。由于每颗卫星对应的接收机相对设备时延并不完全一致, PCV 解算中的接收机相对设备时延参数只吸收了其中的公共部分, 差异部分被码伪距残差吸收。从而导致 PCV 模式评估出的噪声 STD 比理论值略大。而零基线双差完全消除了接收机设备时延的影响。这一事实也从另一方面说明了基于 PCV 技术本身对 PCV 时间传递接收机内部噪声进行评估的必要性。

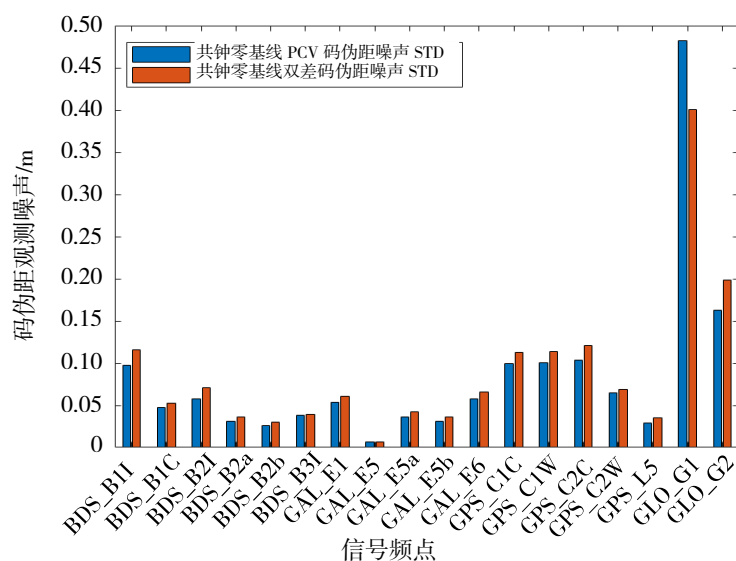


图6 YK01-DH01 链路 PCV 与双差码伪距观测噪声 STD 对比

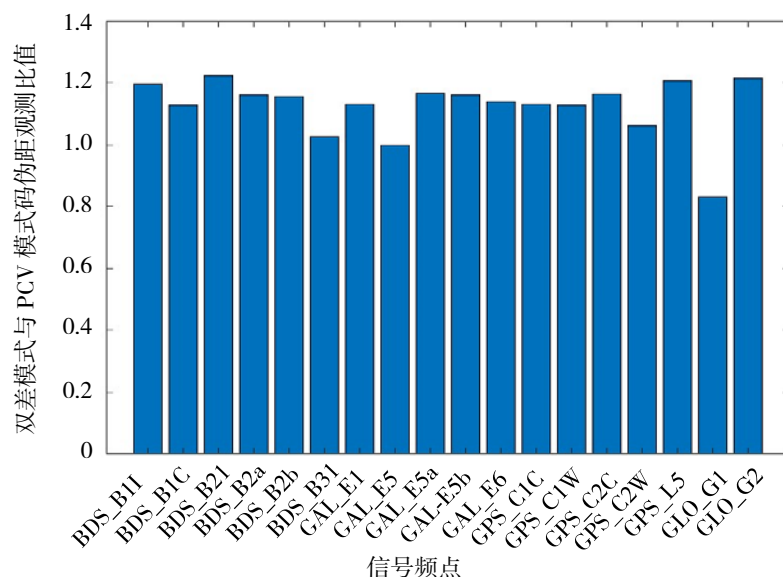


图7 YK01-DH01 链路双差模式与 PCV 模式码伪距噪声 STD 比值

4 结语

为了准确评估 GNSS 接收机内部噪声对 PCV 时间传递的影响,提出了一种基于 PCV 技术本身的噪声评估方法。基于高精度地基授时系统 4 台同型号 PCV 时间传递 GNSS 接收机,搭建共钟零基线试验平台。利用连续 6 d 的观测数据,对参试 GNSS 接收机 19 类观测值的内部噪声水平进行了评估。主要结论包括:

① 基于 PCV 评估得出的多频多系统观测值噪声变化规律,与经典的零基线双差法结果一致。

证明了基于 PCV 进行接收机内部噪声评估的可行性。由于每颗卫星对应的接收机相对设备时延不完全一致,与零基线双差法结果相比,PCV 评估的观测值噪声 STD 比理论值偏大。凸显了基于 PCV 技术本身对 PCV 时间传递 GNSS 接收机进行内部噪声评估的必要性。

② 基于 PCV 评估的结果表明,高精度地基授时系统 PCV 时间传递 GNSS 接收机的 19 类观测值中: BDS 系统 B1C、B2a、B2b、B3I 频点, Galileo 系统 E5、E5a、E5b 频点,以及 GPS 系统 L5 频点的码伪距观测噪声较小,STD 均在 0.05 m

以内;所有频点中 Galileo 系统 E5 频点码伪距观测噪声最优,STD 小于 0.01 m;GLONASS G1、G2 信号码伪距观测噪声较大,STD 超过 0.15 m;除个别信号在 1 mm 左右外,大部分信号的载波相位噪声 STD 均优于 1 mm。由于可见卫星过少,GLONASS G3 信号 PCV 解算结果存在严重异常。

③ 形成零基线的接收机对之间信号通道不一致会影响噪声评估结果。就文中试验场景而言,通道不一致可造成码伪距噪声 STD 放大约 1.6~1.8 倍,载波相位噪声 STD 放大约 1.2 倍。所以在零基线观测噪声评估的时候应确保接收机之间信号通道一致。

致谢

感谢国家科技基础条件平台-国家空间科学数据中心(<http://www.nssdc.ac.cn>)和国家授时中心 igmas 分析中心平台(<http://www.igmas.org>)提供数据资源。感谢中国科学院“西部之光”基金会。

参考文献:

- [1] 孙保琪, 韩蕊, 刘嘉伟, 等. 基于北斗三号的多区域实时动态授时服务系统[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 45-52.
- [2] 刘嘉伟, 孙保琪, 韩蕊, 等. GNSS 多系统 RTK 授时性能分析[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 49-58.
- [3] 刘岸杰, 王庆, 张东磊, 等. 北斗实时卫星共视时间传递技术及其性能评估[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(6): 98-105.
- [4] 施敏琳, 张向波, 赵当丽, 等. 基于 GNSS 载波相位的守时系统远程性能评估方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(3): 251-256.
- [5] 周红源. 基于 iGMAS 的 GNSS 长基线实时精密定位与时间传递精度分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [6] KONG Y, YANG X, CHANG H, et al. Method of precise common-view frequency transfer based on BeiDou GEO satellite[C]//2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), IEEE, 2014: 1-4.
- [7] ZHANG J, GAO J, YU B, et al. Research on remote GPS common-view precise time transfer based on different ionosphere disturbances[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2290.
- [8] TU R, ZHANG P, ZHANG R, et al. Modeling and performance analysis of precise time transfer based on BDS triple-frequency un-combined observations[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93: 837-847.
- [9] 笪腾飞, 范桂峰, 崔晓伟, 等. GNSS 接收机原始观测量精度测量方法研究[C]// 第九届中国卫星导航学术年会论文集——S08 测试评估技术. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心: 清华大学电子工程系, 2018: 6.
- [10] 徐震宇, 蔡昌盛, 崔先强, 等. BDS-3 新信号 B1C/B2a 动态零基线观测噪声评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(4): 364-368+386.
- [11] 毛刚, 莫钧. 高精度 BD2/GPS 兼容接收机性能测试与分析[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集(下). 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2010: 10.
- [12] 张家同, 崔先强, 朱永兴, 等. 不同环境下 GNSS 互操作信号动态性能分析[J]. 导航定位学报, 2023, 11(5): 65-75+91.
- [13] HOU P, ZHA J, LIU T, et al. LS-VCE applied to stochastic modeling of GNSS observation noise and process noise[J]. Remote Sensing, 2022, 14(2): 258.
- [14] BAKKER P F D, TIBERIUS C C J M, MAREL H V D, et al. Short and zero baseline analysis of GPS L1 C/A, L5Q, GIOVE E1B, and E5aQ signals[J]. GPS Solutions, 2012, 16: 53-64.
- [15] RUWISCH F, JAIN A, SCHÖN S. Characterization of GNSS carrier phase data on a moving zero-baseline in urban and aerial navigation[J]. Sensors, 2020, 20(14): 4046.
- [16] ROBERTS G W, TANG X, He X. Accuracy analysis of GPS/BDS relative positioning using zero-baseline measurements[J]. The Journal of Global Positioning Systems, 2018(16): 1-8.
- [17] 高晓, 戴吾蛟, 李施佳. 高精度 GPS/BDS 兼容接收机内部噪声检测方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 795-799.
- [18] GB/T 39399-2020. 北斗卫星导航系统测量型接收机通用规范[S].