

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311841

不同比对方式下的洲际标准时间复现性能分析*

许龙霞^{1,2}, 刘 娅^{1,2}, 陈瑞琼^{1,2}, 赵志雄^{1,2}, 孟令达^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院) 西安 710600)

摘 要:中国科学院国家授时中心研制的标准时间复现系统具备支持洲际用户对标准时间频率信号的需求。本文以位于欧洲白俄罗斯明斯克的复现终端为分析对象,分析了共视、全视不同比对方式对复现时频信号性能的影响。对于洲际范围的时间复现,复现终端与参考端共同可视卫星数变少。单一卫星导航系统可利用的共视卫星数明显减少,GPS/BDS 共视可明显增加可视卫星数量,提高共视时间比对精度,全视比对对两地共同可视卫星数没有要求。分析结果表明,单 GPS 全视比对就可以达到优于 GPS/BDS 的共视比对复现效果。受 BDS 卫星星间偏差的影响,基于单 BDS 全视比对的复现效果比 GPS 稍差,GPS/BDS 全视比对效果略有改善。复现终端运行在 GPS/BDS 共视比对融合 GPS 全视比对模式复现的时频信号的性能最优,可以满足洲际范围内 5 ns 的时间同步要求,为后续洲际大尺度范围的标准时间复现终端的运行模式提供参考。

关键词: 共视时间比对;全视时间比对;标准时间复现;GPS;BDS

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1020

Performance of intercontinental standard time transmission with different comparison methods

Xu Longxia^{1,2}, Liu Ya^{1,2}, Chen Ruiqiong^{1,2}, Zhao Zhixiong^{1,2}, Meng Lingda^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: The standard time transmission system developed by the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences is capable of meeting the requirement of standard time-frequency signals for intercontinental users. This article takes the replication terminal located in Minsk, Belarus, and Europe as the analysis object. The impact of different comparison methods of common view and all-in-view on the performance of the replicated time-frequency signals is analyzed. For intercontinental applications, the number of satellites between the replication terminal and the reference station in common view decreases dramatically. The number of satellites in common view with GPS&BDS can reach about 9, which can benefit the accuracy of common view time comparison. All-in-view comparison has no requirements for the number of satellites common-in-view between the two sides. The experimental results show that the GPS all-in-view comparison can achieve better performance than that with GPS/BDS. Due to the inherent bias between BDS satellites, the reproduction results based on BDS all-in-view comparison are slightly worse than that with GPS. The performance of the reproduced time-frequency signal is optimal when the terminal runs in the GPS&BDS common view comparison fusion GPS all-in-view comparison mode. This article can provide some suggestions on the operation mode of standard time replication terminals which are as far as an intercontinental distance from the reference.

Keywords: common view time comparison; all in view time comparison; standard time transmission; GPS; BDS

0 引 言

时间频率体系是国家的重大基础设施之一,电信、能

源和金融等支撑现代社会运行的重要设施都依赖精准的授时与时间同步技术^[1-7]。全世界 85 个守时实验室,基于 450 多台高性能原子钟共同参与保持协调世界时(coordinated universal time, UTC)^[8]。授时实现标准时间

频率信号的播发,中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, NTSC)保持的 UTC(NTSC)标准时间频率信号可以通过卫星、长短波及低频时码等多种授时手段播发,通过北斗卫星导航系统获取标准时间的精度为几十纳秒。相较于纳秒级的标准时间守时能力,卫星导航系统广播式的授时精度具有进一步提升的空间。需要高精度的标准时频信号服务,将标准时间频率信号从守时实验室“送到”用户端,满足用户纳秒级的时间应用需求,摆脱对高成本时间比对方式的依赖。

美国国家技术标准研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)较早建成了基于全球定位系统(global positioning system, GPS)共视比对的时间测量与分析服务系统^[9]。该系统连续监测用户本地时间与 UTC(NIST)的偏差,监测结果每 10 min 发送给用户一组,结合不同性能的终端为用户提供同步到 UTC(NIST)的时间频率信号,时间不确定度为 10 ns (1σ)。英国皇家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)基于卫星共视也开发了类似系统^[10],为用户提供溯源至标准时间 UTC(NPL)的时间校准服务,在用户本地复现与 UTC(NPL)同步的时间频率信号。溯源至 UTC(NPL)的不确定度为 10 ns (1σ),频率不确定度 5×10^{-14} (1σ , 1 天平均)。欧洲建设了基于 Galileo 和欧洲静地导航重叠系统(European geostationary navigation overlay system, EGNOS)的鲁棒授时与时间同步服务系统^[11],该系统可以通过电视广播、网络、光纤、通信卫星等提供时间同步服务,满足不同精度的用户对时间的需求。

国内中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, China, NIM)研制了高准确度远程时间溯源系统,实现了十几个省级计量部门向 UTC(NIM)的溯源,时间偏差不超过 ± 10 ns,频率偏差优于 $\pm 1 \times 10^{-13}$ 。相应的终端与 UTC(NIM)通过 GNSS 码基共视/全视时间频率传递方法实现比对,将本地时钟远程溯源至 UTC(NIM)。该终端可用于测量时间频率传递数据,也可以用于产生同步于标准原子时秒的脉冲信号和 10 MHz 频率信号^[12]。近年来,北京航空航天大学研制了北斗高精度时间服务平台及相应的终端,该系统利用全球实时跟踪网、北斗地基增强网以及 GNSS 跟踪网等站点的观测数据,实时生成精密卫星轨道、钟差、伪距偏差、电离层及对流层等数据产品,基于精密单点时间传递技术,提供高精度时间服务。35 km 基线授时结果标准差优于 0.1 ns, 2 000 km 基线授时结果标准差优于 1 ns^[13]。此外,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院以及北京无线电计量测试研究所等也研制有类似的终端。

近年来,中国科学院国家授时中心研制开发了纳秒级的国家标准时间复现系统^[14-16],支持卫星共视/全视/

PPP 等多种比对方式,该系统可为全球用户提供同步精度优于 5 ns 的标准时间频率信号,10 MHz 信号的天稳定度优于 5×10^{-14} 。根据精度需求不同,终端内部振荡器支持氢钟、铯钟、铷钟、普通铷钟和恒温晶振多种类型。目前用户已覆盖陕西、天津和北京等几十个站点。不仅支持互联网,还支持北斗短报文通信,满足特殊地区对标准时间频率信号的需求。

中国科学院国家授时中心在欧洲白俄罗斯明斯克放置了一套标准时间复现设备,该站点距离中国科学院国家授时中心约 6 400 km,横跨亚洲和欧洲,是复现设备在洲际距离的首次应用。本文重点分析了通过 GPS 和北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)卫星进行共视、全视比对对复现时频信号性能的影响,以及采取的数据处理方法,研究复现设备在洲际距离下的最佳运行模式。

1 标准时间复现系统

本章主要介绍标准时间复现系统的组成和工作原理,给出共视和全视比对涉及的主要数据处理流程。

1.1 系统组成

标准时间复现系统组成的如图 1 所示,包括参考端、复现终端和云管理中心 3 部分。参考端位于中国科学院国家授时中心,以 UTC(NTSC)时频信号为参考,实时测量标准时间与卫星导航系统的时差。复现终端以本地时间为参考实现测量。参考端、复现终端每秒测量计算本地时间与参考的时间偏差,两者可以通过实时共视、全视和精密单点定位(precise point positioning, PPP)实现时间比对。

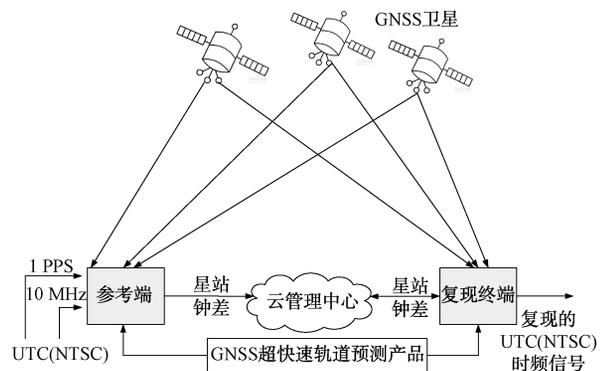


图1 标准时间复现系统的组成

Fig. 1 Composition of standard time transmission system

云管理中心由租赁的阿里云主机,云存储和云通信组成。云主机部署有云管理软件,实现对参考端和复现终端数据的存储、设备识别与认证以及参考端与复现终端之间的数据通信。参考端和复现终端采用传输控制协

议/网际协议 (transmission control protocol/internet protocol, TCP/IP) 将数据发送到云管理中心, 根据云管理软件的配置信息实现将参考端数据向复现终端的实时数据发送。

实现标准时间复现的关键是参考端与复现终端之间的实时时间比对, 下面介绍共视和全视时间比对的原理。

1.2 伪码实时时间比对

参考端和复现终端同时接收 GNSS 信号, 获得观测数据, 计算星时钟差。具体地, 根据终端位置和卫星位置, 从伪距观测值 ρ 中扣除星地几何距 r , 电离层延迟 I 采用双频电离层改正, 对流层延迟 T 采用经验模型改正。接收机时延改正值 $\Delta\tau$ 事先测量, 计数器模块实时测量接收机时间与本地时间的时差 T_{tic} , 根据式(1) 得到本地时间与卫星的钟差值 T_{REFSV} 。

$$T_{REFSV} = (\rho - r - I - T)/c + \delta t^s - T_{gd} + T_{tic} - \Delta\tau - \varepsilon_p \quad (1)$$

其中, c 为真空中光传播的速度, T_{gd} 为卫星硬件延迟改正值, ε_p 表示含接收机伪距观测误差在内的各种剩余误差之和。

共视时间比对原理如图 2 所示, 参考端与复现终端同时接收 GNSS 卫星信号, 按式(1) 计算星时钟差。标准时间复现系统对标准 16 min 共视比对方法进行了改进, 共视时间比对方法实时性更优, 比对周期最小支持 1 min。

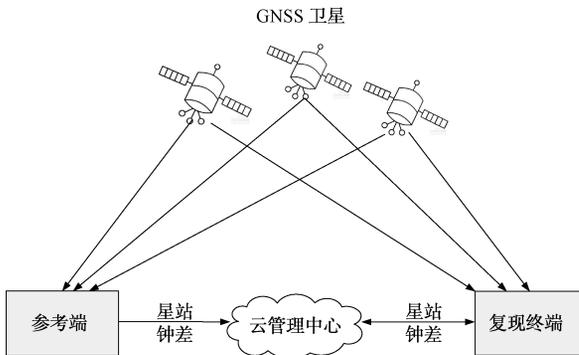


图2 标准时间复现系统中的共视时间比对

Fig.2 Common view time comparison in standard time transmission system

图3所示为标准时间复现系统的全视时间比对原理。传统的全视时间比对受限于最终精密轨道和钟差产品的滞后性, 只能满足事后应用。本文采用全球 GNSS 监测评估系统 (international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS) 等机构定期提前发布全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 超快速产品文件, 满足实时全视比对的应用需求。基于超快文件给出的 5 min 间隔的卫星位置和卫星钟差 δt^s 值^[17], 根据

式(2)与(3), 采用 10 阶拉格朗日插值方法实时获得观测时刻的卫星位置和卫星钟差值^[18]。

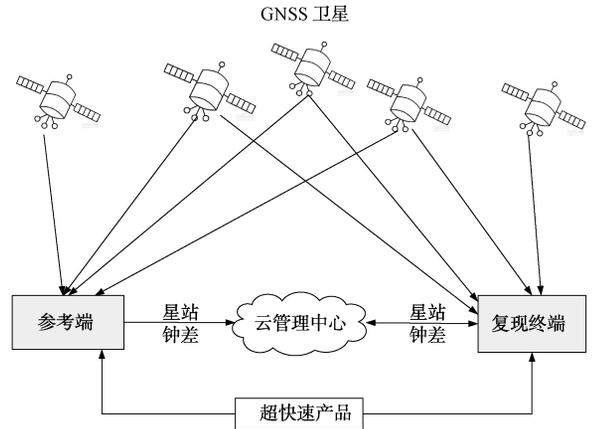


图3 标准时间复现系统中的全视时间比对

Fig.3 All-in-view time comparison in standard time transmission system

$$p_{j,j}(t) = x_j \quad (i \leq j \leq i+n) \quad (2)$$

$$p_{j,k}(t) = \frac{(t_k - t)p_{j,k-1}(t) + (t - t_j)p_{j+1,k}(t)}{t_k - t_j} \quad (i \leq j < k \leq i+n) \quad (3)$$

式中: n 为插值阶数, $x(t_i), x(t_{i+1}), x(t_{i+2}), \dots, x(t_{i+n})$ 为超快文件中 $t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots, t_{i+n}$ 历元的卫星位置分量, t 为插值历元, p 为插值结果。

参考端对观测周期内每秒的星时钟差数据拟合, 生成 1、5 和 10 min 等不同观测周期的星时钟差值^[19]。在共视比对模式下, 参考端将当前观测周期内各颗可视卫星的星时钟差发送到云管理中心; 全视模式下, 参考端按导航系统类型对各颗可视卫星的星时钟差进行综合后再发送到云管理中心^[20]。

复现终端计算当前观测周期内可视卫星的星时钟差, 同时接收来参考端相同观测周期、可视卫星的星时钟差值。匹配相同卫星, 得到当前观测周期参考端与复现终端的时差值。复现终端根据与参考端的时差值, 实时驱动调整其内部时钟^[21], 输出与参考端同步的标准时间频率信号。

共视比对可以抵消掉卫星钟差, 部分抵消星历误差和电离层延迟误差的影响, 算法简单易实现, 不需要第三方数据支持。共视比对精度受比对两地间基线长度的限制, 基线越长, 共同可视的卫星数越少, 且共视卫星至比对两地路径中的星历误差和电离层延迟的相关性越低, 导致比对误差增大, 该比对方式制约了时间服务系统的服务范围, 不适宜为超远距离用户提供时间服务。

实时全视比对不要求参考端和复现终端具有共同可视卫星, 因此复现终端与参考端不受比对基线的限

制,可以满足系统在全球范围内提供授时服务的要求。受伪距测量误差以及超快速星历预报产品精度的限制,实时全视可以实现约 2 ns 的比对不确定度。本系统还支持基于数据流的实时 PPP 比对,可以实现亚纳秒级的比对。

1.3 不同比对方法的数据处理流程

图 4 所示为共视、全视的数据处理流程,图中上半部分为参考端的数据处理,下半部分为复现终端的数据处理。无论终端工作在共视还是全视比对模式,均需要计算观测周期内参考端与复现终端的时差比对结果,在此过程中,均涉及两个综合。一个为历元综合,即由每秒卫星星站钟差得到一个观测周期的卫星星站钟差;另一个为卫星综合,即由同一历元(或观测周期)的卫星星站钟差数据得到该历元(或观测周期)的时差综合值。

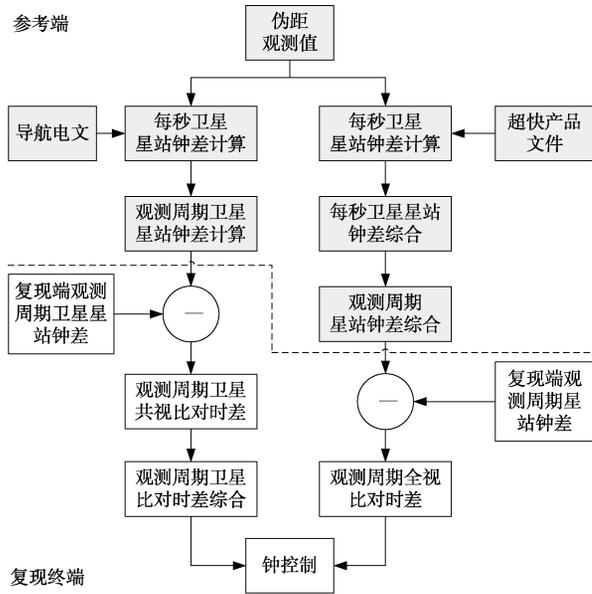


图 4 共视全视比对数据处理流程

Fig. 4 Data processing process of common view (CV) and all in view (AV)

在卫星可视初期和即将退出可视的时段,观测卫星仰角较低,多路径误差较大,伪距观测值受噪声影响明显,导致星站钟差值存在明显波动。在历元综合过程中,为降低观测噪声对比对结果的影响,一方面限制可视卫星高度角不低于设定的高度角阈值,如 10°,特别是在观测条件较差的情况下,高度角阈值适当调大,以降低多路径误差的影响;另一方面,在卫星综合时,采用抗差最小二乘估计方法^[22],按卫星高度角定权,高度角越小,在综合值中所占的权值越小^[23]。

$$\mathbf{W} = (1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2, \dots, 1/\sigma_n^2) \quad (4)$$

式中: \mathbf{W} 为卫星综合的权值向量,方差 $\sigma_i^2 = 1/\sin^2 E_i$, E_i 表示观测卫星 i 的仰角。

此外,接收机跟踪 GNSS 信号存在偶尔失锁的情况,导致伪距观测值不连续且存在较大误差,若不处理会污染时间比对数据,对终端内部时钟控制产生严重影响。为此,在历元综合时,实时监测相同卫星不同频点的伪距差是否跳变,若跳变值的大小超出阈值,不再计算该卫星的星站钟差。同时,约束一个观测周期内的有效数据占比,保障综合结果的有效性。

在数据综合过程中通过采取上述数据处理方法,降低卫星初入、即将出视时段以及信号失锁时段对时间比对结果的影响,为下一步终端内部的时钟控制提供准确、可靠的输入数据。

2 测试结果

为分析不同比对方式对洲际范围复现终端性能的影响,本文以部署在白俄罗斯明斯克的内置铷钟版复现终端为对象进行测试,该终端可接收 GPS/BDS 双系统导航信号,支持运行在共视、全视以及共视+全视 3 种比对模式。为比较不同模式下复现信号的性能,根据终端的时间校准数据统计均方根、Allan 方差和时间方差,实现对复现的时间信号和频率信号的内符合对比分析,确定终端运行的最优模式。

2.1 可视卫星数比较

图 5 所示为白俄罗斯与临潼共视 GPS、BDS 卫星数量,在 6 400 km 基线长度下,单 GPS、单 BDS 两地共视卫星数量较少,部分历元 GPS 系统共视卫星数仅有 2 颗,GPS 平均可视卫星 3.6 颗,BDS 平均可视卫星 5.4 颗,GPS/BDS 双系统平均可视卫星数达 9 颗。

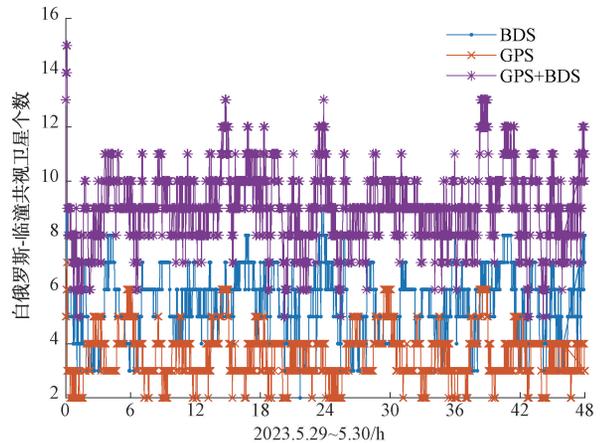


图 5 白俄罗斯与临潼共视 GPS、BDS 卫星数量

Fig. 5 GPS/BDS satellites common view between Belarus and Lintong

2.2 不同模式复现结果对比分析

复现终端支持共视、全视以及共视+全视比对模式,

此外,比对导航系统可以配置为单 GPS、单 BDS 或 GPS+BDS 双系统。分析不同导航系统以及比对模式对位于白俄罗斯的复现终端复现信号的影响。

分析不同模式下终端的时间校准数据,该数据为当前复现的 1PPS 信号与 UTC(NTSC)的实时偏差。在初始化阶段,内置铷钟大约需要 30 min~1 h 完成收敛,偏差值较大。随着复现终端内部铷钟逐渐与参考时间靠近,该偏差趋于稳定。偏差值的大小综合反映了测量比对误差和时钟控制误差。时间校准数据的变化与复现设备输出秒信号紧密相关,可以反映复现终端输出时频信号的性能。

设置复现终端运行在共视比对模式,且配置共视卫星导航系统分别为 GPS、BDS 和 GPS+BDS。图 6 为通过 GPS、BDS 和 GPS/BDS 3 种共视比对模式下的复现终端的时间校准数据,每种模式时长约为 2 天。从图 6 可以看出,单 GPS 共视比对下,由于共同可视卫星数较少,当共视卫星发生变化时,比对结果会出现偶发的跳变,可以通过限制卫星的连续可视时长及采用抗差策略计算控钟量等避免该情况的发生。从图 6 和表 1 的数据可以得出,GPS+BDS 双系统下,增加了复现终端与参考端的共视卫星数量,相比单 GPS 或单 BDS 系统,双系统共视比对复现的均方根(root mean square, RMS)值 3.4 ns 最优,单 GPS 共视略优于单 BDS 共视的结果。可见,在 6 400 km 的基线多系统共视比对仍具有一定的优势。

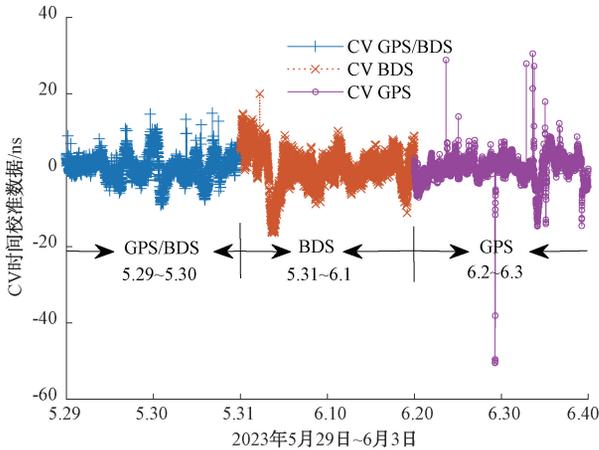


图 6 GPS、BDS 共视比对下时间校准数据

Fig. 6 GPS/BDS time calibration data under CV time comparison

设置复现终端运行在全视比对模式,且配置共视卫星导航系统分别为 GPS、BDS 和 GPS+BDS。图 7 所示为通过 GPS、BDS 和 GPS/BDS 3 种全视比对模式下的时间校准数据,每种模式时长约为 2 天。从图 7 和表 1 的数据可以得出,基于 GPS 系统的全视比对复现结果最优,RMS 值为 2.9 ns,GPS+BDS 次之。

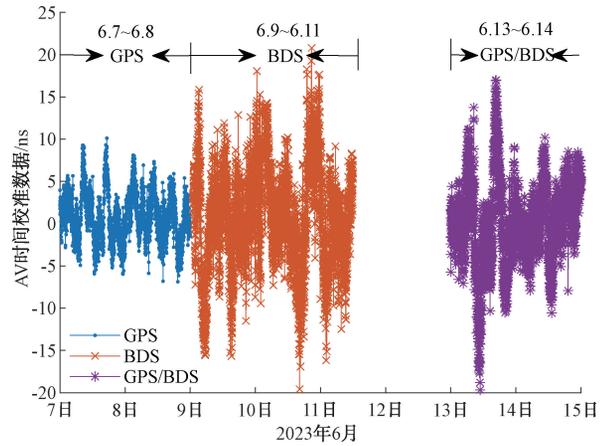


图 7 GPS、BDS 全视比对下时间校准数据

Fig. 7 GPS/BDS time calibration data under AV time comparison

表 1 GPS、BDS 全视比对下的时间校准数据统计值
Table 1 Statistics of time calibration data under GPS and BDS AV time comparisons

系统类型	比对方式			
	CV		AV	
	RMS/ns	ADEV@ 1e4s	RMS/ns	ADEV@ 1e4s
GPS	4.2	4.5×10^{-13}	2.9	4.4×10^{-13}
BDS	4.8	6.3×10^{-13}	5.9	7.9×10^{-13}
GPS/BDS	3.4	2.7×10^{-13}	4.8	7.7×10^{-13}

初步分析得出该结果的原因有几个方面,全视比对使用 iGMAS 超快产品文件获得 BDS 卫星的位置和钟差,目前该产品文件提供的 BDS C39~C46 号卫星的钟差值均为无效值,因此这些卫星对全视比对没有贡献。此外,相比 GPS 卫星,BDS 不同卫星的星站钟差之间的偏差较大,卫星星站钟差相对分散,当出现卫星初入或退出时,容易引起全视结果出现波动。而共视比对将同一观测周期内参考端与复现终端相同 BDS 卫星的星站钟差先作差、再综合,因此不受 BDS 卫星间偏差的影响。

后续,考虑选定 BDS 参考卫星,分析其余卫星相对参考卫星的偏差,在融合时先扣除该偏差,以消弱 BDS 卫星间偏差的影响。此外,在 GPS 和 BDS 全视比对结果融合时,根据两系统的观测噪声水平定权,以优化 GPS、BDS 双系统全视比对复现结果。

设置复现终端运行在 GPS+BDS 共视以及 GPS 全视比对模式,图 8 所示为约 2 天的时间校准数据。图 9 所示分别为不同比对模式下的频率稳定度曲线。根据时间校准数据统计的短期频率稳定度主要反映了时间比对与钟控制误差的影响,要反映复现终端输出时间信号的频

率稳定度至少统计万秒或一天的稳定度。图 10 为不同比对模式下的时间传递稳定度曲线。

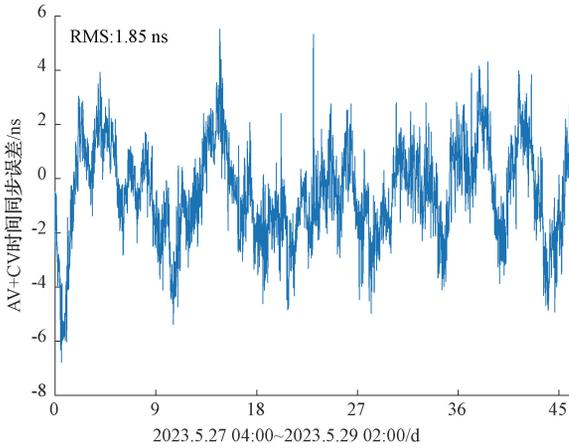


图 8 GPS、BDS 共视+全视比对下时间校准数据

Fig. 8 GPS/BDS data under CV and AV time comparison

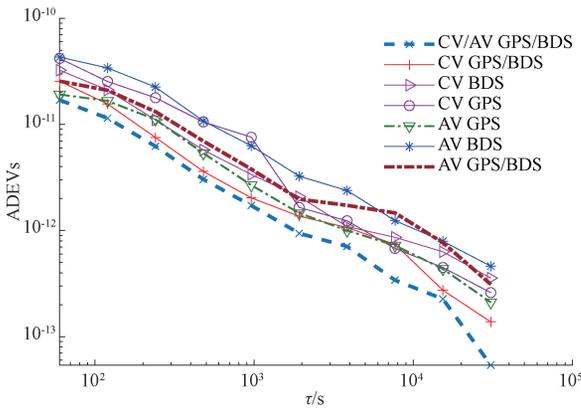


图 9 不同比对模式下频率稳定度

Fig. 9 Frequency stabilities in different comparison modes

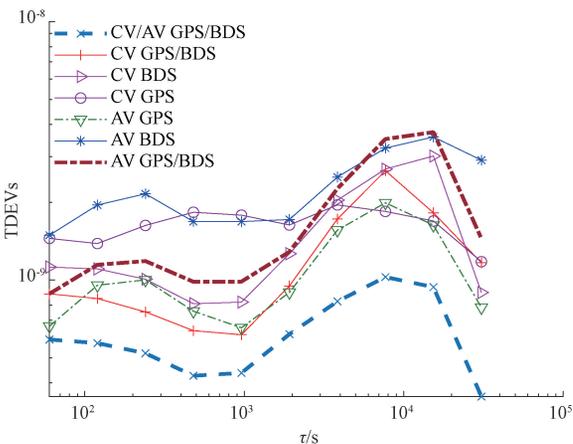


图 10 不同比对模式下时间传递稳定度

Fig. 10 Time deviation in different comparison modes

从表 1 和 2,图 8~10 可以看出,当复现终端运行在 GPS+BDS 共视以及 GPS 全视比对模式时,时间校准数据 RMS 值最小为 1.85 ns,万秒频率稳定度为 2.3×10^{-13} ,时间传递万秒稳定度 1.3 ns,复现信号的性能最优。

表 2 GPS、BDS 全视比对下的时间方差统计值
Table 2 TDEVs of time calibration data under GPS and BDS AV time comparisons

系统类型	比对方式	
	CV	AV
	TDEV@ 1e4s	TDEV@ 1e4s
GPS	2.3 ns	2.2 ns
BDS	4.1 ns	4.6 ns
GPS/BDS	2.5 ns	5.1 ns

3 结 论

本文针对航天测控网地面站之间、VLBI 联合测量地球定向参数等大尺度范围的时间同步需求,将卫星导航系统作为媒介,提供了一种低成本的获取国家标准时间的途径。

分析结论表明,采用共视比对模式时,复现终端与参考端共同可视卫星数越多,越有利于提高时间比对精度,即 GPS+BDS 双系统共视比对配送结果优于单一 GPS 或 BDS 系统的实现效果。对于全视比对来说,由于 BDS 卫星间偏差存在较大差异,且部分卫星钟差不可用,导致 BDS 全视比对的复现效果比 GPS 略差。后续需进一步考虑改正 BDS 星间偏差较大的问题。当复现终端处于双系统共视加 GPS 全视比对模式时,实现的配送效果最佳,6 400 km 配送频率信号的频率稳定度为 2.3×10^{-13} /10 000 s,配送时间信号的 RMS 优于 2 ns,时间传递万秒稳定度 1.3 ns,可以满足洲际尺度范围内 5 ns 的时间同步要求。

参考文献

- [1] BANERJEE P. Timing in GNSS-its importance and challenges [C]. 2015 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, India, 2015:1-2.
- [2] EUSPA. Report on time & synchronisation user needs and requirements V3.0 [R]. 2021.
- [3] TU Technical Report TP-GSTR-GNSS-Considerations on the use of GNSS as a primary time reference in telecommunications [R]. 2020.
- [4] EUSPA. Report on infrastructure user needs and

- requirements[R]. Technical Report V1.0. EUSPA EU Agency for the Space Programme; Prague, Czech Republic, 2022.
- [5] MAHMOOD A, ASHRAF M I, GIDLUND M, et al. Time synchronization in 5G wireless edge: Requirements and solutions for critical-MTC[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(12):45-51.
- [6] KHONDOKAR F H, CHARLES W, YANMING F, et al. Time synchronization in vehicular ad-hoc networks: A survey on theory and practice [J]. Vehicular Communications, 2018, 14: 39-51.
- [7] HOUSE W. Critical infrastructure security and resilience[M]. Washington: White House, 2013.
- [8] PATRIZIA T. Coordinated universal time: An overview[J]. ITU News, 2023(2):15-18.
- [9] LOMBARDI M A, NOVICK A N. The NIST time measurement and analysis service[J]. NCSLI Measure, 2006, 1(4):50-59.
- [10] DAVIS J A, STEVENS M, WHIBBERLEY P B, et al. Commissioning and validation of a GPS common-view time transfer service at NPL [C]. Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003.
- [11] ZELLE H, VEERMAN H, KIRKKO-JAANKOLA M, et al. European global navigation satellite system robust timing & synchronization service[J]. Proc. 2017 EFTF-IFCS, 2017.
- [12] 梁坤, 方维, 顾杨义, 等. 远程时间传递与溯源方法, 装置及体系[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(4):3-13.
LIANG K, FANG W, GU Y Y, et al. Remote time transfer and traceability method, device and system[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(4):3-13.
- [13] 施闯, 郑福, 楼益栋, 等. 北斗高精度时频服务理论方法与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7):1010-1018.
SHI CH, ZHENG F, LOU Y D, et al. BDS high-precision time and frequency service theoretical method and application [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7):1010-1018.
- [14] 刘娅, 李孝辉, 赵志雄, 等. 基于北斗卫星的纳秒级全球授时系统[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3):14-22.
LIU Y, LI X H, ZHAO ZH X, et al. Nanoseconds deviation timing service system for global users based on BDS[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(3):14-22.
- [15] 刘娅, 陈瑞琼, 赵志雄, 等. UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究及工程实现[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3):178-192.
LIU Y, CHEN R Q, ZHAO ZH X, et al. Research on high precision method for remotely reproducing UTC (NTSC) and its realization [J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3):178-192.
- [16] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 一种基于高精度国家标准时间远程复现方法 [J]. 武汉大学学报, 2018, 43(2):188-192.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. A method of national standard time high precision remote reproduction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(2):188-192.
- [17] 武美芳, 董孝松. 基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统设计与实现[J]. 时间频率学报, 2022, 45(4):262-269.
WU M F, DONG X S. Design and implementation of sub-nanosecond real-time time service system based on iGMAS [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(4):262-269.
- [18] 许龙霞, 樊多盛, 刘娅, 等. GNSS 超快速产品在全球标准时间复现中的应用 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1):134-140.
XU L X, FAN D SH, LIU Y, et al. Application of GNSS ultra-rapid products in standard time reproduction [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(1):134-140.
- [19] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4):757-763.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. Study on remote time comparison based on improved satellite common-view method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4):757-763.
- [20] 许龙霞, 樊多盛, 刘娅, 等. 全视比对在标准时间复现中的应用[J]. 时间频率学报, 2022, 45(3):202-210.
XU L X, FAN D SH, LIU Y, et al. Application of all-in-view time comparison for standard time reproduction [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(3):202-210.
- [21] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉, 等. 基于卫星共视的钟驾驭方法研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4):300-306.
FAN D SH, LIU Y, LI X H, et al. Research on clock steering method based on satellite common view [J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(4):300-306.

- [22] 杨元喜,吴富梅. 临界值可变的抗差估计等价权函数[J]. 测绘科学技术学报,2006,23(5):317-324.
YANG Y X, WU F M. Modified equivalent weight function with variable criterion for robust estimation[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006,23(5):317-324.
- [23] 高为广,苗维凯,陈谷仓,等. 北斗系统 GEO/IGSO/MEO 卫星观测信息随机特性评估与分析[J]. 测绘学报,2020,49(12):1511-1522.
GAO W G, MIAO W K, CHEN G C, et al. Evaluation and analysis of stochastic modeling of BeiDou GEO/IGSO/MEO satellite observation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(12): 1511-1522.

作者简介



许龙霞(通信作者),2005年于长安大学获得学士学位,2008年于长安大学获得硕士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院国家授时中心研究员,主要研究方向为卫星授时与时间传递技术。

E-mail:xulongxia@ntsc.ac.cn。

Xu Longxia (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Chang'An University in 2005, M. Sc. degree from Chang'An University in 2008, and graduated as a doctor from University of Chinese Academy of Sciences in 2013, respectively. Now she is a researcher in National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include satellite timing service and high-precision time transfer technologies.



刘娅,2004年于贵州大学获得学士学位,2007年于中国科学院大学获得硕士学位,2010年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院国家授时中心研究员,主要研究方向为精密时间频率测量与时间传递技术。

E-mail:liuya@ntsc.ac.cn

Liu Ya received her B. Sc. degree from Guizhou University in 2004, M. Sc. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2007, and graduated as a doctor from University of Chinese Academy of Sciences in 2010, respectively. Now she is a researcher in National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include precision time and frequency measurement and high-precision time transfer technologies.



陈瑞琼,2011年于郑州轻工业大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院国家授时中心副研究员,主要研究方向为高精度时间频率传递方法。

E-mail:crq@ntsc.ac.cn

Chen Ruiqiong received her B. Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2011 and graduated as a doctor from University of Chinese Academy of Sciences in 2016, respectively. Now she is an associate researcher in National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests are precision time and frequency transfer technologies.