



引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20230205

Citation: SHI Chuang, ZHENG Fu, LOU Yidong, 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.DOI:10.13203/j.whugis20230205

北斗高精度时频服务理论方法与应用

施 闯¹ 郑 福¹ 楼益栋² 王玉琢³ 张爱敏³ 张首刚⁴
张 东¹ 宋 伟¹ 王 梦¹ 林元挥¹ 王浩源¹

1 北京航空航天大学卫星导航与移动通信融合技术工业和信息化部重点实验室,北京,100191

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

3 中国计量科学研究院,北京,100013

4 中国科学院国家授时中心,陕西 临潼,710600

摘要:在广域高精度时间服务(wide-area precise timing, WPT)原型系统的基础上,提出了北斗高精度时频传递理论方法,进一步扩展了北斗高精度时频服务,包括时频基准溯源、时钟实时比对、授时终端性能在线监测,相关服务对于北斗精密单点授时、实时时间比对、授时终端的可靠性具有重要意义。对北斗高精度授时终端在短基线、中长基线以及长基线链路上的授时性能进行了评估,结果表明,WPT服务系统可提供优于100 ps和 1×10^{-15} 量级的时间和频率服务。在此基础上,对北斗高精度时频服务在时频终端在线计量、低轨星座时间同步、时频测试分析3个方面展开了应用研究。

关键词:北斗;高精度时频服务;精密单点授时;时频传递

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-06-04

DOI:10.13203/j.whugis20230205

文章编号:1671-8860(2023)07-1010-09

BDS High-Precision Time and Frequency Service Theoretical Method and Application

SHI Chuang¹ ZHENG Fu¹ LOU Yidong² WANG Yuzhuo³ ZHANG Aimin³
ZHANG Shougang⁴ ZHANG Dong¹ SONG Wei¹ WANG Meng¹
LIN Yuanhui¹ WANG Haoyuan¹

1 Laboratory of Navigation and Communication Fusion Technology, Ministry of Industry and Information Technology,
Beihang University, Beijing 100191, China

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

4 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600, China

Abstract: Objectives: Under the background of the nanosecond or even sub-nanosecond requirements for timing accuracy proposed by the new generation of communication technology, precise measurement and control as well as military weapon platforms, the wide-area precise timing (WPT) system based on BeiDou satellite navigation system (BDS) is built with sub-nanosecond time service capability. Methods: Based on the WPT prototype system, we further extend the BDS high-precision time-frequency service, including time reference traceability, real-time clock comparison and online monitoring of timing terminal performance, which are of great significance for high-precision timing, real-time comparison and the reliability of timing terminals. The timing performance of BDS high-precision timing terminals in short baseline, medium-length baseline and long baseline is evaluated. Results: The results show that: (1) The accuracy of GPS timing based on WPT service system accuracy is better than 0.1 ns, while the accuracy of BDS-3 is 0.15 ns. The

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900701);国家自然科学基金(42227802)。

第一作者:施闯,博士,教授,主要从事卫星定位导航授时理论与方法研究。shichuang@buaa.edu.cn

通讯作者:郑福,博士。fzheng@buaa.edu.cn

frequency stability of timing results after traceability can reach 1×10^{-15} at ten thousand averaging. (2) The performance of real-time comparison for BRUX-SPT0 link based on WPT is better than 0.1 ns. (3) The difference between the terminal time and the system time is less than 1 ns. (4) The accuracy of real-time time synchronization for short and medium baseline is within 0.1 ns. The frequency stability can reach 1×10^{-15} level at ten thousand averaging. (5) The accuracy of real-time time synchronization using BeiDou high precision timing terminal for long baseline is better than 1 ns. **Conclusions:** The WPT service system can provide time and frequency services of better than 100 picoseconds and 1×10^{-15} magnitude. On this basis, we investigate three application research on BDS high-precision time-frequency services, online metrology of time-frequency terminals, time synchronization of low-orbit constellations and time-frequency test analysis, which are of great significance for BDS innovative applications in the time-frequency field.

Key words: BDS; precise time and frequency service; precise point timing; time and frequency transfer

时间传递是时间同步和授时的前提,高精度的时间频率传递技术对实现高精度的时间频率服务尤为重要。文献[1]提出了基于GPS伪距观测值的卫星共视(common view,CV)法时间传递^[1],开辟了卫星导航时频传递技术的新纪元。但CV法时间传递精度受基线距离的制约,通常认为其时频传递的极限距离约为6 000 km^[2]。相比于CV法,全视(all-in-view,AV)法能够将星座时间基准作为参考,实现全球范围的高精度时频传递^[3]。采用了载波相位观测值的AV法,又称为精密单点定位(precise point positioning,PPP)时频传递方法。高精度的载波相位观测值使得PPP时频传递的稳定性(天稳)相对于AV法提升了2倍^[4],相比卫星双向时间传递(two-way satellite time and frequency transfer,TWSTFT)技术提升了1.5倍。随着国际全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)服务(International GNSS service,IGS)精密产品精度与完备性的提升,PPP时频传递逐渐成为获取各守时实验室时频链路比对数据的主要技术^[5]。

依赖于IGS事后精密产品的PPP时频传递具有一定的时间滞后性,无法满足实时场景下的精密时间同步以及授时应用。近年来,实时PPP时频传递技术成为时频领域的研究热点^[6-7]。以实时PPP时频传递技术为基础,文献[8]基于武汉大学IGS分析中心提供的实时精密差分产品,建立了高精度的GPS单向授时系统,能够实现单天优于1 ns的广域高精度授时服务。文献[9]融合国际GNSS监测评估系统的实时卫星钟差产品和国家授时中心(National Time Service Center,NTSC)保持的协调世界时(coordinated universal time,UTC)的观测信息,以超短期预报的方式生成了标准时间基准下的GPS卫星钟差产品,设计了具备亚纳秒授时服务能力的国家标准

时间精密授时系统。

北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)是中国自主研制的重大时空基础设施,开通亚太地区的导航定位授时服务后,国内学者率先开展了BDS实时精密定轨^[10]、精密定位^[11-12]理论方法研究,推动了BDS高精度定位服务,在经济社会发展和时空信息服务等方面取得重要成就^[13]。在BDS精密定位理论方法的基础上,文献[14]基于国内区域的BDS测站网,实时估计北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 satellite navigation system,BDS-2)的精密钟差与轨道等时间服务产品,构建了基于BDS-2的广域高精度时间服务系统(wide-area precise timing,WPT)^[14]。通过提供实时的精密时间服务产品,WPT系统能够实现亚太地区的BDS实时亚纳秒量级时间同步服务。

2020年7月,中国全球组网的北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system,BDS-3)正式开通,将导航、定位及授时服务的范围由亚太区域拓展至全球范围^[15]。相比于BDS-2星载原子钟,BDS-3搭载的新一代氢原子钟以及铯原子钟性能显著提升^[16],为提供新一代更为泛在、更高精度的BDS时间和频率服务提供了重要的基础设施。以此为契机,WPT系统进行了进一步扩展与升级,包括参考时间溯源、UTC(k)实时比对、时频信号在线监测等功能。本文将从BDS高精度时间服务系统、BDS高精度授时终端、时频应用研究3个方面探讨WPT系统的进展与BDS高精度时频服务的应用研究。

1 BDS高精度时频服务理论方法与系统

继承WPT原型系统的设计理念^[14],本文所

提系统仍然由高精度时间产品服务平台和高精度时频终端组成,如图1所示。为进一步提升时频服务性能、拓展时频应用场景,本文所提系统在原型系统的基础上开展了系统时间基准溯源、实时时频在线比对、时频终端性能在线监测等相关研究。服务平台引入中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)维持的

UTC(NIM)作为系统时间参考,将溯源至标准时间的服务产品通过网络播发至时频同步终端,以提供实时、可溯源的高精度授时服务。另外,服务平台通过外接时频源信息的实时BDS观测数据流,并结合BDS高精度时间服务产品,实现广域时频源在线时间比对以及时频终端性能监测功能。

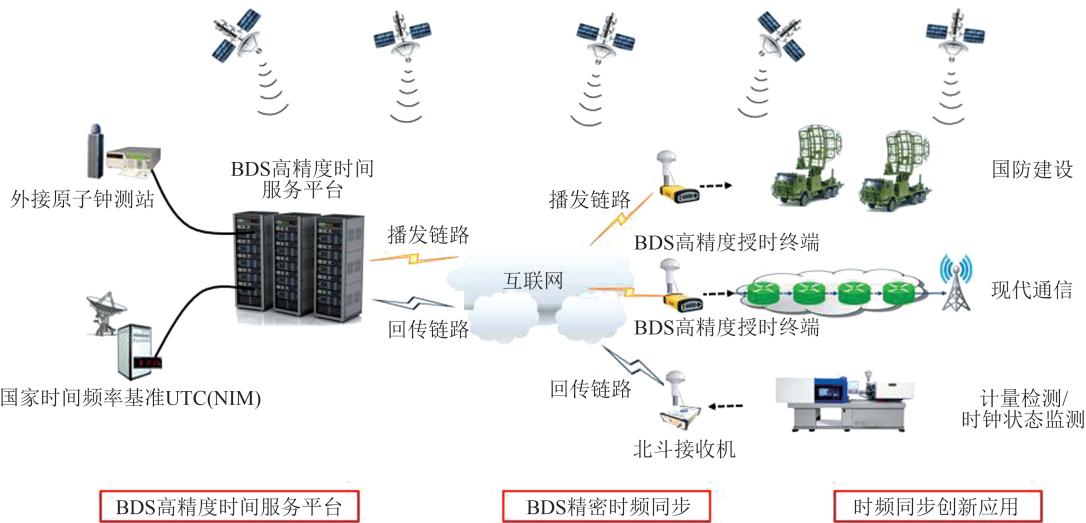


图1 WPT 系统架构图

Fig. 1 WPT System Architecture

2 BDS高精度时间服务系统

针对时频用户对单点授时服务能力、授时及时间同步的时效性、授时终端的性能监测需求,在WPT原型系统的基础上,本文研究了相关理论方法,进一步扩展BDS高精度时间服务性能,包括时间基准溯源与授时、实时时间比对、授时终端性能在线监测3个方面。

2.1 时间基准溯源与授时

实现高精度授时需要将时间服务系统的时间参考溯源至相应的时间基准,在此基础上,通过高精度时间传递技术可以实现精确授时。WPT系统基于地面BDS跟踪站网的观测数据,实时估计地面原子钟以及星载原子钟的状态,并选取外接UTC(k)的测站钟作为参考钟,实现WPT广域时间基准的溯源。本文所提系统处理卫星钟以及测站钟的原始观测方程可表示为^[17]:

$$\begin{cases} v_{P,r}^s(i) = \delta t_r(i) - \delta t^s(i) + m_r^s(i) \cdot D_{\text{trop},r}(i) + \\ \epsilon_{P,r}^s(i) \\ v_{L,r}^s(i) = \delta t_r(i) - \delta t^s(i) + m_r^s(i) \cdot D_{\text{trop},r}(i) + \\ N_r^s \cdot \lambda + \epsilon_{L,r}^s(i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, δt_r 表示接收机钟差; δt^s 表示卫星钟差; m_r^s 表示卫星 s 在测站 r 上的投影函数; $D_{\text{trop},r}$ 表示测站 r

的天顶对流层延迟; λ 表示载波波长; N_r^s 表示整周模糊度; i 表征当前时刻的计算历元; $v_{P,r}^s$ 和 $v_{L,r}^s$ 分别表示伪距和载波相位无电离层组合观测值的验前残差; $\epsilon_{P,r}^s$ 和 $\epsilon_{L,r}^s$ 分别表示伪距和载波相位无电离层组合观测值的噪声。

由于式(1)中的接收机钟与卫星钟参数难以分离,仅能获取卫星钟以及测站钟间的相对钟差^[18]。为获取标准时间基准下的卫星钟与接收机钟参数,本文所提系统选取外接UTC(k)的测站钟为参考钟,即:

$$\delta t_{\text{UTC}(k)}(i) = 0 \quad (2)$$

为验证该方法在时间基准溯源及授时服务方面的有效性,首先将系统时间基准溯源至德国技术物理研究所(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)维持的UTC(PTB),即认为PTB测站的接收机钟差为零。将处理过的时间产品用于GNSS单站授时,在2022年年积日第244—253天,期间分别采用SPT0、ROAG、USN7测站数据对处理前后的基准进行分析,溯源后测站的精密授时测试结果如图2所示。可以看出WPT系统提供的GPS与Galileo授时服务精度相当,优于0.1 ns,BDS-3授时服务精度则为0.15 ns。

此外,采用哈达玛方差对处理前后的基准进

行稳定性分析,结果如图 3 所示。GPS 以及伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)服务产品时间基准的稳定性提升了至少一个数量级;而 BDS-3 产品时间基准的稳定性提升将近两个数量级,基本与 GPS 和 Galileo 的时间基准稳定性达到同一水平。因此,通过基准溯源方法建立的时间基准的万秒稳能够达到 1×10^{-15} 量级。

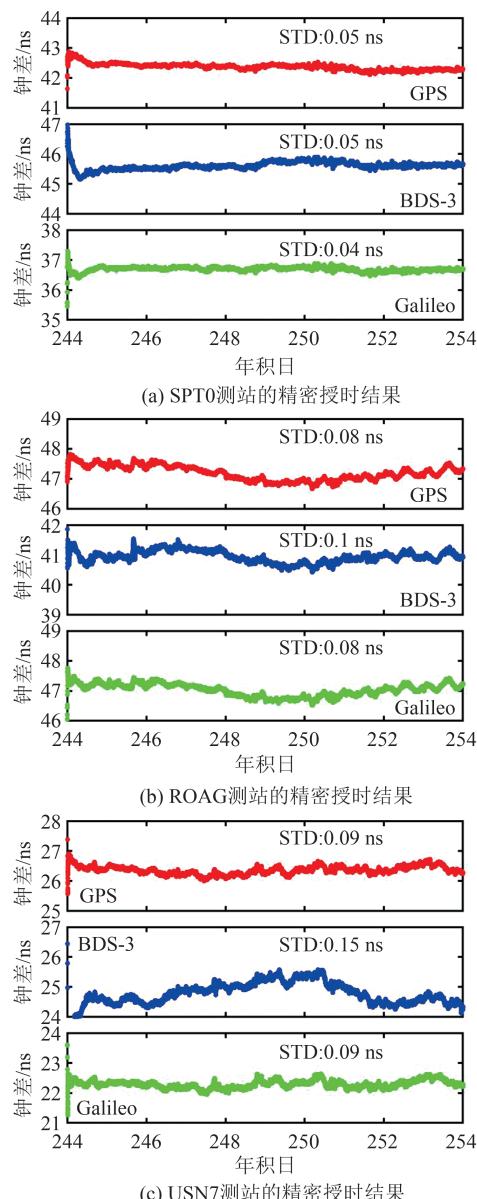


图 2 基准溯源后的精密授时结果

Fig. 2 Precise Timing Results After Traceability

在上述实验中,本文将时间基准溯源至 UTC(PTB),而在 WPT 服务系统运行过程中,为了能够实时、可靠地获取附有时频基准信息的 BDS 观测信息,在提供 BDS 高精度时频服务的过程中,将时间基准溯源至国家时间频率基准 UTC(NIM)。

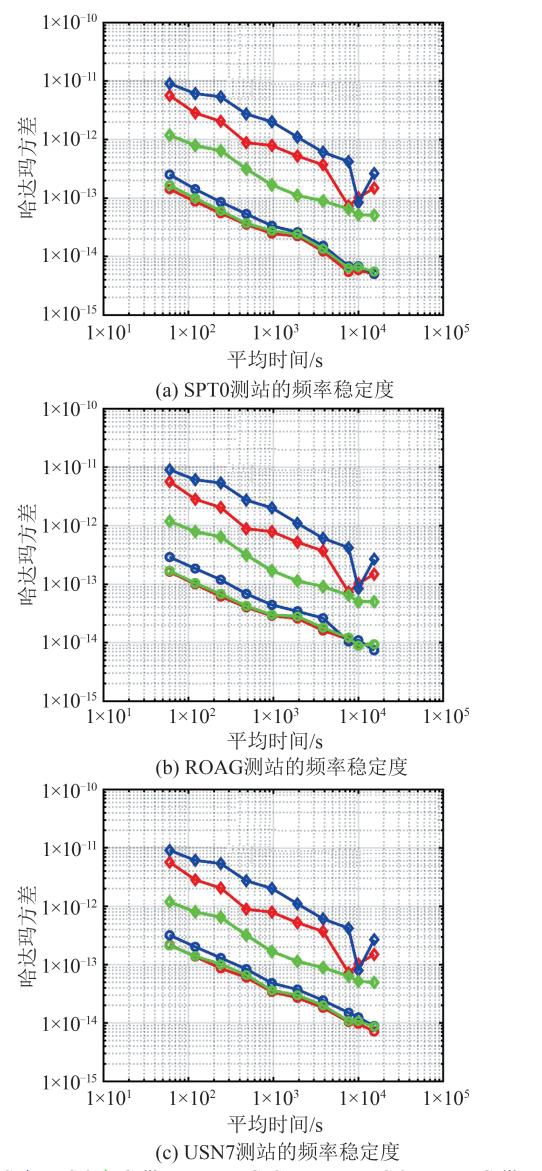


Fig. 3 Frequency Stability of Timing Results at SPT0, ROAG, USN7 Stations

2.2 实时时间比对

高精度时间比对技术是实现精密时间同步的前提,其时效性决定了是否适用于更广泛的工程应用场景。此外,实时的时间比对技术对于各守时实验室维持的 UTC(k)监测也具有重要意义^[19]。因此,基于 PPP 的实时时间比对技术成为近年来卫星导航时频领域的研究热点。基于无线电离层组合观测值的非差观测方程可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{IF} = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + m_r^s \cdot D_{trop,r} + \varepsilon_{P,r}^s \\ L_{IF} = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + m_r^s \cdot D_{trop,r} + \lambda \cdot N_r^s + \varepsilon_{L,r}^s \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, P_{IF} 和 L_{IF} 分别表示伪距以及相位的无线电

层组合观测值; ρ 表示星地距; c 表示光速。式(3)估计的接收机钟差表征着本地接收机钟与卫星钟产品时间基准的差异,若采用 WPT 系统提供的精密差分产品处理时,测站钟差可以表示为:

$$\delta t_r = T_r - T_{\text{WPT}} \quad (4)$$

式中, T_r 表示测站钟的本地时间; T_{WPT} 表示 WPT 产品的时间基准。显然,通过不同测站的接收机钟差单差结果可以获取测站间的时间比对结果,即:

$$\begin{aligned} \delta t_A - \delta t_B &= (T_A - T_{\text{WPT}}) - (T_B - T_{\text{WPT}}) = \\ &= T_A - T_B \end{aligned} \quad (5)$$

本文所提系统根据 IGS 提供的 BRUX 测站与 SPT0 测站的实时数据,采用实时精密差分产品获取的在 2022 年年积日第 107—141 天期间的实时链路比对结果如图 4 所示,其中,UTC (ORB) 为比利时皇家天文台(Observatoire Royal de Belgique, ORB) 维持的时间基准, UTC(SP) 为瑞典国家技术研究中心维持的时间基准, PPT 表示精密单点授时(precise point timing)。从图 4 中可以看出,WPT 系统提供的 BRUX-SPT0 链路的实时时间比对精度优于 0.1 ns, 在事后验证中发现其与国际计量局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM) 发布 T 公报的 UTC(ORB)-UTC(SP) 趋势较为一致。图 5 为 WPT 系统实时时间比对结果与 T 公报 UTC(k) 比对结果的一致性分析,研究表明 WPT 系统提供的实时时间比对结果与 BIPM 公布的 T 公报的一致性在 0.2 ns 以内。还可以看出,UTC(ORB) 与 UTC(SP) 的差异在一个月内变化可达 4 ns 左右,其精度远低于 WPT 实时时间比对精度。因此,高精度的时间比对技术对于全球守时实验室对 UTC(k) 的维持也具有重要意义。

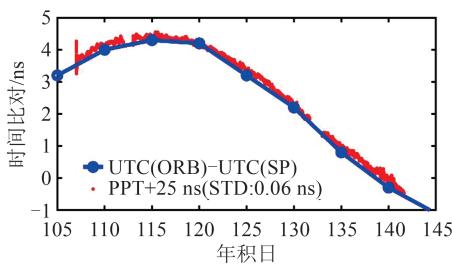


图 4 BRUX 与 SPT0 的时间比对结果

Fig. 4 Time Comparison Results Between BRUX and SPT0 Stations

2.3 授时终端性能在线监测

时频终端接收 WPT 系统播发的时间服务产品,实时获取本地时间与 WPT 时间基准的差异,

并通过调控算法实现与 WPT 时间基准的实时时同步,进而提供广域范围内的精密授时服务。为了保证时频终端授时结果的可靠性,服务平台通过传输控制协议/网际协议获取终端的实时观测值,并接入实时时间产品通过 PPP 计算对时频终端的本地时间信息进行监测。图 6 展示了位于中国福建 BJFZ 测站时频终端在 2023 年年积日第 142—144 天期间与系统时间基准的差异。由图 6 可知, GPS 与 BDS-3 的监测结果的标准差 (standard deviation, STD) 分别为 0.22 ns 和 0.24 ns, 说明授时终端时间与系统时间的差异变化量在 1 ns 以内。因此,WPT 系统可以通过 GPS 与 BDS 提供亚纳秒量级的授时服务。

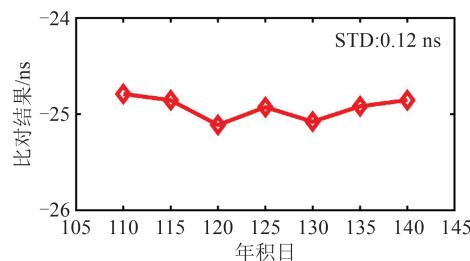
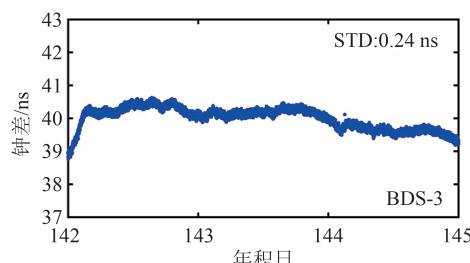
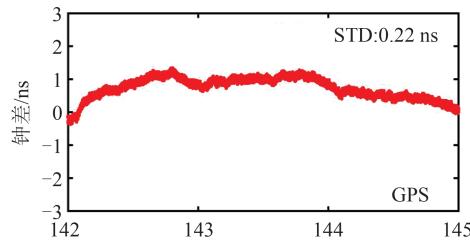


图 5 WPT 系统实时时间比对与 T 公报事后产品的
一致性分析

Fig. 5 Consistency Analysis Between Real-Time Time Comparison Results Based on WPT and UTC(k) Comparison Results Published by Circular T



(a) BDS-3 在线监测结果



(b) GPS 在线监测结果

图 6 BJFZ 测站时频终端的 BDS-3 与 GPS 在线监测结果

Fig. 6 Real-Time Monitoring Results Online of BDS-3 and GPS for Time-Frequency Terminal at BJFZ Station

3 BDS 高精度授时终端性能

为验证 BDS 高精度授时终端的性能,本文选

用了标准时间 UTC(NIM)、UTC(NTSC)以及不同长度的光纤链路作为参考,分别进行了短基线、中长基线以及长基线的时间同步实验。

3.1 短基线授时性能

本文对两台 BDS 高精度授时终端进行了短基线比对测试,测试时间为 2023-04-26—2023-05-16,简化儒略日(modified Julian day, MJD)60 060—60 080 共 20 d,时间参考站接收机外接国家原子时标计量基准 UTC(NIM),实验利用时间间隔计数器测量两台接收机输出的秒脉冲间隔,比对结果如图 7 所示,可以看出两台接收机之间的秒脉冲输出一致性较好,其秒脉冲间隔的 STD 为 0.069 ns。

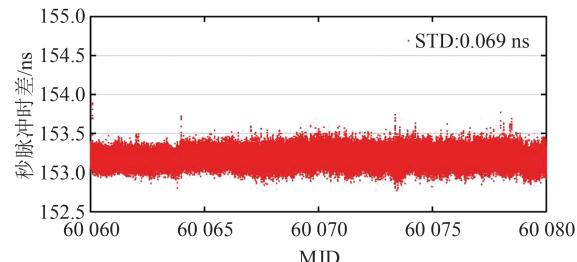


图 7 短基线实时时间比对结果

Fig. 7 Real-Time Short Baseline Time Comparison Results

从图 8 可以看出,短基线实时时间比对链路在 100 s 内的时间稳定度在 0.05 ns 以内,对于长期稳定度而言,时间稳定度在 0.02 ns 量级。对于频率稳定度而言,短基线实时时间比对链路秒稳为 7×10^{-11} ,100 s 的频率稳定度为 1×10^{-13} 量级,1 000 s 的频率稳定度为 1×10^{-14} 量级,10 000 s 的频率稳定度为 1×10^{-15} 量级,长期频率稳定度可达 1×10^{-17} 量级。

3.2 中长基线授时性能

为了进一步验证 BDS 高精度授时终端的中长基线授时性能,在 NIM 昌平园区与和平里园区进行 35.2 km 的基线测试。测试时间为 2022-09-23—2022-09-25(年积日第 266—268 天)共 3 d。两园区通过专用光纤链路进行光纤时频传递。本文以光纤时频传递结果作为参考,对 BDS 高精度授时终端的中长基线的授时性能进行分析评估。

以两园区放置的 BDS 高精度授时终端输出的秒脉冲信号作为输入连接到频率计数器 SR620,SR620 以 NIM 昌平园区的国家原子时标计量基准 UTC(NIM)输出的秒脉冲作为参考触发信号,对 BDS 高精度授时终端 A 的秒脉冲信号

进行间隔测量。对于和平里园区,SR620 以 UTC(NIM)通过光纤时频传递获取的秒脉冲作为参考触发信号,对 BDS 高精度授时终端 B 的秒脉冲信号进行间隔测量。测试系统分布示意图如图 9 所示。

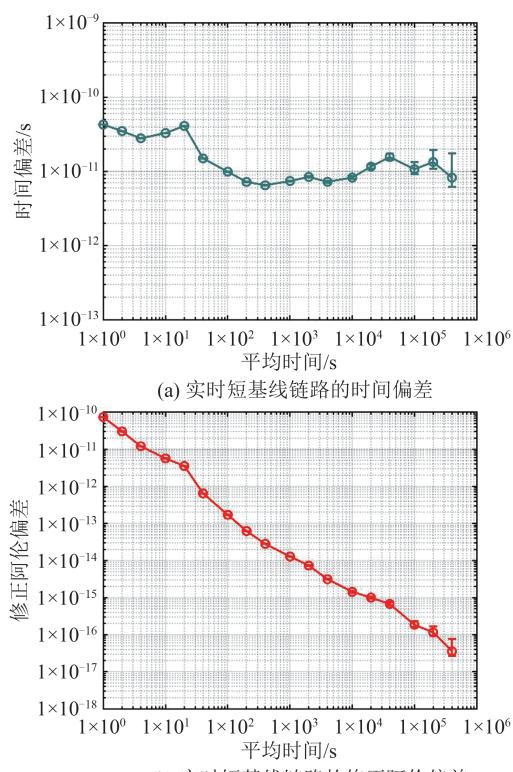


图 8 实时短基线链路的时频稳定度分析

Fig. 8 Time-Frequency Stability Analysis of Real-Time Short Baseline Link



图 9 中长基线测试系统分布示意图

Fig. 9 Distribution Diagram of Medium and Long Baseline Test

时间比对结果如图10(a)所示,两台终端之间的秒脉冲时差与光纤时间传递的一致性较好,其秒脉冲间隔的STD为0.074 ns。由图10(b)可以看出,对于频率稳定度而言,中长基线实时时间比对链路1 s频率稳定度为 8×10^{-11} ,100 s的频率稳定度为 2×10^{-13} 量级,1 000 s的频率稳定度为 2×10^{-14} 量级,10 000 s的频率稳定度为 3×10^{-15} 量级。

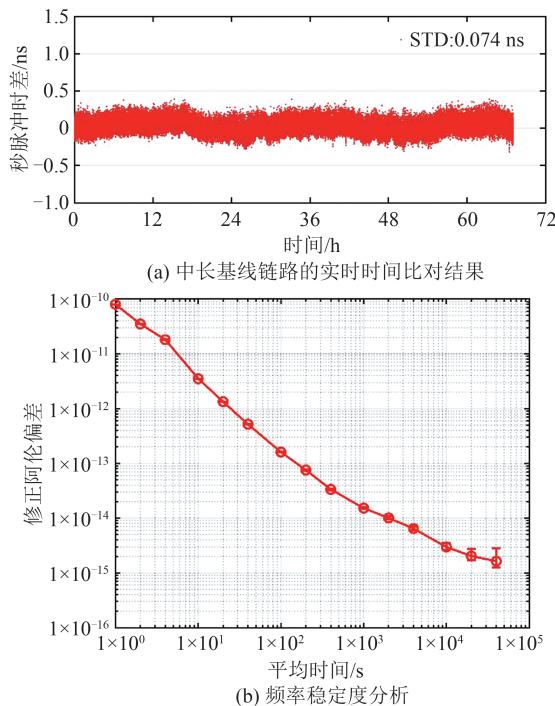


图10 实时中长基线链路的时间比对和频率稳定度结果

Fig. 10 Time Comparison Results and Frequency Stability for Real-Time Medium and Long Baseline Link

3.3 长基线授时性能

为了进一步验证BDS高精度授时终端的长基线授时性能,基线链路选择NIM北京昌平园区-临潼NTSC钟房,直线距离895 km,采集时段为2021-06-09—2021-06-10(年积日第160—161天),利用时间间隔计数器SR620对接收机输出的秒脉冲与参考铯钟秒脉冲进行比对,并按1 Hz的速率存储结果。BIPM发布的T公报为国家机构维护的本地实现UTC(k)提供了对快速UTC(rapid UTC, UTCr)的可追溯性,T公报为大约80个定期向BIPM提供时钟和时钟比较数据的机构提供了每天的差异值,考虑到两地参考时间源溯源到国际标准时间——UTCr,本文以T公报公布的UTC(NIM)和UTC(NTSC)作为参考,得到两地时间同步结果如图11所示。

基线链路选择NIM深圳园区-北京邮电大学昌平校区,直线距离1 996 km,测试场景如图12

所示。集时段为UTC 2021-09-15T00:00:00—06:30:00。利用时间间隔计数器SR620对接收机输出的秒脉冲与参考铯钟秒脉冲进行比对,并通过光纤回环输出时间比对结果,两地时间同步结果如图13所示。

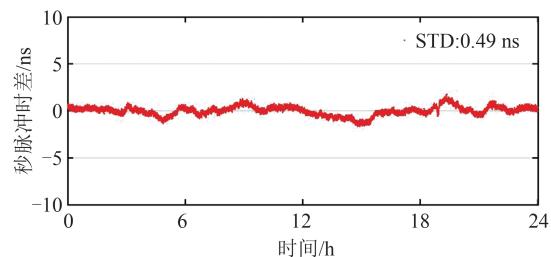


图11 北京-临潼时间同步精度测试结果

Fig. 11 Beijing-Lintong Time Synchronization Results



图12 深圳-北京时间同步精度测试场景图

Fig. 12 Shenzhen-Beijing Time Synchronization Test Scene Diagram

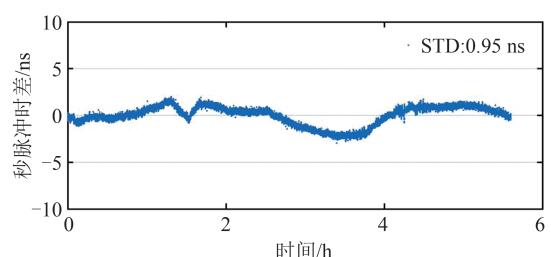


图13 深圳-北京时间同步精度测试结果

Fig. 13 Shenzhen-Beijing Time Synchronization Results

对于两组长基线的结果,可以看到北京-临潼时间链路的时间同步STD为0.49 ns,深圳-北京时间链路的时间同步STD为0.95 ns。BDS高精度授时终端的长基线时间同步性能均优于1 ns。

4 BDS高精度时频应用研究

上述BDS高精度时间服务系统与BDS高精

度授时终端的性能分析表明,WPT 系统具备实现亚纳秒乃至优于 100 ps 、 1×10^{-15} 量级的 BDS 高精度时频服务。在此基础上,本文将进一步开展 WPT 系统在精密计量、新一代移动通信以及时频测试分析的应用研究。

4.1 授时终端在线计量

面向国家重大工程、重点领域对时间精准计量的迫切需求,针对时间频率量值的精准远程传递难题,WPT 系统研发了基于 BDS 的高精度在线时间计量功能。相比于传统计量手段,此系统发挥了 BDS 低成本、高精度、全天候的优势,能够实现亚纳秒量级的实时在线计量。BDS 高精度在线时间计量系统的工作原理可描述为:

- 1) 分别将外接 UTC(NIM) 和待计量设备时频信息的 BDS 实时观测数据流通过传输控制协议/网际协议回传至时间服务平台,形成附加目标时间信息的 BDS 观测数据流。
- 2) 计量系统采用服务平台播发的状态域改正数,分别估计出 UTC(NIM) 与待计量设备时间相对于 WPT 时间基准的偏差,进而获取待计量时间设备相对于 UTC(NIM) 的差异。
- 3) 根据先验的硬件延迟信息,对时差信息的系统差进行处理,生成最终的时频计量结果。

4.2 低轨星座时间同步

相比于中高轨 GNSS 卫星,低轨卫星首先具备信号质量优、抗干扰能力强等优点,再凭借其几何构型变化快以及区域无缝全覆盖的独特优势,具备联合 BDS 提供覆盖更广、精度更高、更加稳健的时空服务潜力,有望成为下一代卫星导航系统发展的新增量^[20]。实现低轨星座应用的关键是实现低轨卫星的时间同步,对于庞大的低轨星座而言,实现低轨卫星高精度时间同步是赋予低轨卫星系统导航能力的必要条件^[21]。受限于低轨卫星体积、功耗、成本等因素,低轨卫星普遍以部署高稳晶振作为低轨卫星时频基准构建的基础,通过接收伪距观测值的方式实现数十纳秒量级的时间同步,无法满足当前低轨导航增强对高精度时间同步的需求^[22]。因此,本文研制的 BDS 低成本高精度授时终端对于低轨卫星的规模化应用具有重要意义。假设此系统的时间服务产品能够通过卫星链路进行播发或者通过地面注入站上行注入,搭载在低轨卫星上的 BDS 高精度授时终端可以驯服低成本晶振实现低轨星座的实时亚纳秒级时间同步,有望显著降低低轨星座建设和后期运行维护的成本。

4.3 时频测试分析

时频信号精确测量是实现高精度时间同步、对比检测和校准时频的基本要求,高精度时频计量与检测是时频领域的支撑技术。随着新一代信息通信、分布式数据中心、工业互联网等快速发展,国际时频测试分析仪器的发展趋势向统一的 UTC 时间溯源方向发展,向更高精度、更稳定的性能指标发展,向多功能、低成本方向发展。本文设计的 BDS 高精度时频系统 WPT 通过实时溯源 UTC(k),生成时频测试分析过程中所需的高精度时频参考信号,与被测信号进行对比测试,并对时频比测结果进行处理分析。相比于传统检测仪器,基于此系统的时频测试分析仪无需参考时频源便能获取待检测信号与标准时频信息 UTC(k)的差异,具有低成本、机动性强、便携等优势,可满足通信、时频计量等不同行业的时频信号测试与分析需求。

5 结语

面向现代通信等新型基础设施建设及新型雷达等对超高精度时间频率的需求,本文在 WPT 系统的基础上,在时间基准溯源与高精度授时、实时时间比对、授时终端性能在线监测等方面进行了研究,并基于中国守时实验室、NIM、中国科学院 NTSC 保持的 UTC(k)信息以及光纤链路对 BDS 高精度授时终端的授时性能进行了测试。结果表明,该系统将 BDS 的授时服务精度提高了两个数量级,可提供优于 100 ps 和 1×10^{-15} 量级的时间和频率服务。在此基础上,本文开展了 BDS 高精度时频服务在 BDS 授时终端在线计量、低轨星座时间同步以及多功能、高性能时频测试分析 3 个方面进行了研究探索。在 WPT 系统的基础上,有望进一步开拓 BDS 在时频领域的创新应用。

参 考 文 献

- [1] Allan D, Weiss M. Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite [C]//The 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA, 1980.
- [2] Lee S W, Schutz B E, Lee C B, et al. A Study on the Common-View and All-in-View GPS Time Transfer Using Carrier-Phase Measurements [J]. *Metrologia*, 2008, 45(2): 156-167.
- [3] Petit G, Jiang Z. GPS all in View Time Transfer for TAI Computation [J]. *Metrologia*, 2008, 45

- (1): 35-45.
- [4] Costa R, Orgiazzi D, Pettiti V, et al. Performance Comparison and Stability Characteristics of Timing and Geodetic GPS Receivers at IEN[C]// Frequency and Time Forum, Guildford, UK, 2004.
- [5] Petit G, Arias E. Use of IGS Products in TAI Applications [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 327-334.
- [6] Wang S, Zhao X, Ge Y, et al. Investigation of Real-Time Carrier Phase Time Transfer Using Current Multi-constellations [J]. *Measurement*, 2020, 166 (497): 108237.
- [7] Ge Y, Ding S, Dai P, et al. Modeling and Assessment of Real-Time Precise Point Positioning Timing with Multi-GNSS Observations [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(6): 065016.
- [8] Guo W, Song W, Niu X, et al. Foundation and Performance Evaluation of Real-Time GNSS High-Precision One-Way Timing System [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1):23-34.
- [9] Wu Meifang, Sun Baoqi, Yang Xuhai, et al. National Time Standard Precise Time Service System Based on iGMAS [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(5):111-117. (武美芳, 孙保琪, 杨旭海, 等. 基于 iGMAS 的国家标准时间精密授时系统[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(5):111-117.)
- [10] Shi C, Zhao Q, Li M, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites with Precise Positioning [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1059-1086.
- [11] Shi C, Zhao Q, Hu Z, et al. Precise Relative Positioning Using Real Tracking Data from COMPASS GEO and IGSO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1):103-119.
- [12] Zou Xuan, Li Zongnan, Chen Liang, et al. Modeling BeiDou IGSO and MEO Satellites Code Pseudorange Variations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1661-1666. (邹璇, 李宗楠, 陈亮, 等. 北斗 IGSO/MEO 卫星伪距码偏差精化建模方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(11):1661-1666.)
- [13] Cai Yi, Shi Chuang, Ouyang Xingyu. BDS Ground Augmentation System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020. (蔡毅, 施闯, 欧阳星宇. 北斗地基增强系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.)
- [14] Shi Chuang, Zhang Dong, Song Wei, et al. BeiDou Wide-Area Precise Timing Prototype System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49 (3):269-277. (施闯, 张东, 宋伟, 等. 北斗广域高精度时间服务原型系统[J]. 测绘学报, 2020, 49 (3):269-277.)
- [15] Cai Hongliang, Meng Yinan, Geng Changjiang, et al. BDS-3 Performance Assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4):427-435. (蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时, 星基增强, 精密单点定位, 短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报, 2021, 50(4):427-435.)
- [16] Chen J, Zhao X, Hu H, et al. Comparison and Assessment of Long-Term Performance of BDS-2/BDS-3 Satellite Atomic Clocks [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11): 115021.
- [17] Zhao Qile, Dai Zhiqiang, Wang Guangxing, et al. Real-Time Precise BDS Clock Estimation with the Undifferenced Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 686-691. (赵齐乐, 戴志强, 王广兴, 等. 利用非差观测量估计北斗卫星实时精密钟差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(5):686-691.)
- [18] Yang X, Gu S, Gong X, et al. Regional BDS Satellite Clock Estimation with Triple-Frequency Ambiguity Resolution Based on Undifferenced Observation [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2):33-44.
- [19] Defraigne P, Aerts W, Pottiaux E. Monitoring of UTC(k)'s Using PPP and IGS Real-Time Products [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1):165-172.
- [20] Tian Run, Cui Zhiying, Zhang Shuangna, et al. Overview of Navigation Augmentation Technology Based on LEO [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(1):66-81. (田润, 崔志颖, 张爽娜, 等. 基于低轨通信星座的导航增强技术发展概述[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(1):66-81.)
- [21] Wang W, Zhang W, Peng J, et al. Real-Time and High Precision Time Synchronization Method of LEO Satellite Based on RT-PPP[J]. *GNSS World of China*, 2021, 46(5):26-32. (王伟, 臧文驰, 彭竟, 等. 基于 RT-PPP 的低轨卫星实时高精度时间同步方法[J]. 全球定位系统, 2021, 46(5): 26-32.)
- [22] Xie Gang. Principles of GPS and Receiver Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.)