

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.002

基于北斗卫星的纳秒级全球授时系统

刘 娅^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 赵志雄¹, 樊多盛^{1,2}, 陈瑞琼¹,
许龙霞¹, 钦伟瑾¹

- (1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

摘要:北斗三号系统的基础服务可以为全球用户提供精度优于20ns的信号,更高精度的时间同步应用,需要如GNSS共视、全视、PPP或卫星双向时频传递等专用方法,成本高,并且需要专业维护,只适合小范围应用。在研究了各种高精度时间比对技术的基础上,基于国家授时中心的标准时间UTC(NTSC),提出了基于北斗卫星实时共视、实时全视和实时PPP多种技术互补融合的纳秒级全球授时方法。结合时延绝对标定与分段标定组合的设备时延标定,以及振荡器动态驯服等技术,建立了标准时间远程复现系统,由服务端和用户端两部分组成。服务端由国家授时中心维护,用户仅需要安装一台标准时间复现设备,并通过互联网或北斗短报文信道自动持续从服务端获取服务数据,即可在本地恢复出溯源至标准时间UTC(NTSC)的时间频率信号。系统可为全球用户提供与UTC(NTSC)偏差小于5ns的1PPS信号,以及万秒频率稳定度优于 5×10^{-13} 、相对频偏小于 5×10^{-14} 的10MHz信号,授时A类不确定度优于2ns。目前已经为多个行业提供服务。

关键词:授时;时间同步;北斗共视;全视;PPP;钟驾馭

中图分类号:P127.1

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2022)03-0014-09

Nanoseconds Deviation Timing Service System for Global Users Based on BDS

LIU Ya^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHAO Zhi-xiong¹, FAN Duo-sheng^{1,2},
CHEN Rui-qiong¹, XU Long-xia¹, QIN Wei-jin¹

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time & Frequency Primary Standards, CAS, Xi'an 710600, China;
3. School of Optoelectronics, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The basic service of Beidou-3 system can provide global users with signals of accuracy better than 20ns. Higher precision time synchronization applications require special methods such as GNSS Common-View (CV), All-in-View (AV), Precise Point Positioning (PPP) or Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT). It is costly and requires professional maintenance. It is only suitable for a few users. Based on the study of various high-precision time transfer technologies and the National Time Service Center's UTC (NTSC), this paper proposes a nanosecond global time service method based on the

收稿日期:2022-02-28;**修订日期:**2022-04-01

基金项目:国家自然科学基金天文联合项目(U2031125);陕西省自然科学基金项目(2018ZDXM-GY-011);国家自然科学基金面上项目(12073033);中国科学院西部青年学者项目(XAB2020YN07)

作者简介:刘娅(1982-),女,博士,研究员,主要从事时间频率测量与控制方面的研究。

通信作者:李孝辉(1974-),男,博士,研究员,主要从事时频测量与卫星导航系统方面的研究。

integration of real-time Common-View, real-time All-in-View and real-time PPP. Combined with the equipment delay calibration technology of absolute delay calibration and piecewise calibration, and the oscillator dynamic steering technology, a time UTC(NTSC) remote replicating system is established. The system includes server and users. The server is maintained by the NTSC. The user only needs to install a standard time signal replicating device on the local, and automatically and continuously obtain service data from the server through the internet or BDS short message channel, so as to generate a local time that is continuously disciplined to UTC(NTSC). The system can provide users with 1PPS signal with deviation less than 5ns from UTC (NTSC) and 10MHz signal with 10000-second frequency stability better than 5×10^{-13} and relative frequency deviation less than 5×10^{-14} , and timing uncertainty with type A better than 2ns. At present, it has provided services for many industries.

Key words: Timing service; Time synchronization; BDS Common-View; All-in-View; PPP; Clock steering

0 引言

统一的时间是确保各类活动有序的关键。随着全球化进展,对时间统一的范围和性能需求也越来越高。随着北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3)正式开通,标志着北斗卫星进入了全球服务阶段, BDS-3 的系统时间(BDT)通过 UTC(NTSC)与国际标准时间 UTC 建立联系, BDT 与协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)的偏差保持在 50ns 以内(模 1 秒)^[1]。2021 年发布的《北斗卫星导航系统建设与发展》报告表明, BDS-3 的基础服务可以为全球用户提供精度优于 20ns 的授时信号,此外还有差分增强和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)等服务,具有提供更高精度的服务能力, BDT 与 UTC 时间偏差保持在 26ns 以内^[2]。用户通过 BDS-3 实际获得的时间服务性能还与使用的接收机测量性能、设备时延标定性能及信号大气传播时延改正精度等有关,用户获得的定时信号与 BDT 或 UTC 的偏差可能达到数十甚至数百纳秒。为了更准确地传递时间信号,发展了基于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)卫星的共视、全视和 PPP 等时间频率比对方法,以及基于地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星的卫星双向时频传递(Two Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)方法和基于光纤的时频信号比对方法,这些方法的时间比对精度可以达到纳秒甚至亚纳秒量级,主要用于守时实验室或者高性能原子钟间比对。为保证时间比对结果的准确性,产生 UTC 的国际计量局(Bureau International des Poids et

Mesures, BIPM)会定期组织巡回校准活动,将便携的 GNSS 时间传递接收设备搬运至各参与比对的守时实验室,校准设备时延。

为了向用户提供精准时间服务,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)开通了时间测量和分析服务系统(Time Measurement and Analysis Service, TMAS)^[3]和多源共视驯钟系统(Multi-Source Common-View Disciplined Clock, MSCVDC)^[18],支持基于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)共视,不断比对客户本地时间与美国国家标准时间 UTC(NIST)的偏差,并通过互联网每 10min 向客户报告一次新结果,时间比对的 A 类不确定度优于 2ns,合成不确定度 15ns。MSCVDC 还支持通过共视比对结果驯服铷钟或铯原子钟的方式为用户提供直接溯源至 UTC(NIST)的时间信号,其本质是在用户所在地恢复出 UTC(NIST),恢复的时间与 UTC(NIST)的偏差约 10ns,峰峰值不超过 25ns。

英国皇家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)产生和保持英国的国家标准时间,开发了一套基于 GPS 共视的授时服务系统,可以为申请的用户提供与标准时间 UTC(NPL)直接的比对服务,校准用户的时频设备,溯源至 UTC(NPL)的时间不确定度为 10ns(1σ),相对频率偏差为 5×10^{-14} (1σ , 1 天平均)^[4]。

中国计量科学研究院研制了一套基于 GNSS 共视的远程时间溯源装置(NIMDO),通过比对结果驯服铷原子钟,可产生同步于 UTC(NIM)的 1PPS 和 10MHz 信号,1PPS 相对于 UTC(NIM)的时间偏差优于 10ns(95%),10MHz 相对频率偏差优于 1×10^{-13} ,

时间偏差测量不确定度优于 $5\text{ns}^{[5-6]}$ 。

国家授时中心产生和维持着标准时间 UTC(NTSC),在北斗提供时间溯源服务基础上,以在广泛区域给用户提供更精度的授时服务为目标,开发了标准时间远程复现系统,于2014年开始提供服务^[7-10]。目前,已发展为支持基于GNSS的实时共视、全视和PPP等多种比对技术,可为全球用户提供溯源至UTC(NTSC)的时间频率信号,相对UTC(NTSC)的时间偏差小于 5ns ,频率偏差小于 5×10^{-14} ,时间偏差测量A类不确定度优于 2ns ,优于国内外同类设备。

1 广域纳秒级授时原理

授时是指把标准时间通过有线或无线传送到远距离,供时间比对、时间同步使用,与一般时间传递或比对的区别是授时发播的是标准时间。国家授时中心产生和保持我国的标准时间 UTC(NTSC),与UTC偏差常年保持在 5ns 以内(见BIPM每月发布的Circular-T)。标准时间远程复现系统以UTC(NTSC)为基准,通过实时时间比对技术和振荡器驾驭技术在用户本地恢复出与UTC(NTSC)偏差小于 5ns 的时间信号,频率万秒稳定度优于 5×10^{-13} ,10万秒稳定度优于 5×10^{-14} ,相对频偏小于 5×10^{-14} 的10MHz频率信号,时间偏差测量的A类不确定度优于 2ns 。其中,为用户提供与UTC(NTSC)偏差小于 5ns 的时间信号,是指基于比对结果对振荡器驾驭后,输出的1PPS信号边沿不能完全与UTC(NTSC)主钟1PPS对齐,残余的最大偏差小于 5ns 。为降低该残余偏差对使用的影响,同时为用户提供对应时段的残余偏差测量值,该测量值相对真值的随机起伏即比对A类不确定度,优于 2ns (24h数据的RMS)。用户使用信号的同时,辅以测量值修正后,最终可得到溯源至UTC(NTSC)的时间不确定度小于 2ns 。

标准时间远程复现系统使用基于GNSS的实时共视、全视和PPP三种远程比对技术,可根据应用场景自由切换三种比对手段,单独使用或加权融合;本地振荡器可选配晶体振荡器、普通性能铷振荡器、高性能铷振荡器和铯原子钟及被动氢原子钟等,测量数据更新频度支持1min、5min、10min和自定义等多种,满足各行业用户对时间、频率信号的需求。

1.1 实时共视原理

基于北斗卫星的实时共视比对基本原理是在国家授时中心的服务端观测卫星钟与UTC(NTSC)的偏差,将偏差数据通过网络实时广播给用户端,用户

端设备接收偏差数据,结合本地相同时段观测的卫星钟与本地参考时间偏差,计算本地参考时间与UTC(NTSC)的偏差,为控制振荡器提供测量数据。

数据处理流程:各站利用北斗定时接收机接收北斗卫星导航信号,首先测得含有卫星钟 $\delta t^{(s)}$ 和接收机时间偏差的伪距 ρ ,然后利用接收机天线坐标和广播星历预报的卫星轨道,计算卫星和接收机真距 r (含轨道预报误差),伪距与真距的差包含了卫星和接收机钟差、传播路径上的各种时延,以及卫星轨道等各种误差项,用双频伪距测量值修正电离层延迟 I ,用经验模型修正对流层时延 T ,进而计算得到含有误差的接收机时间与各颗卫星钟的钟差,最后结合事先测得的接收机时延改正参数 Δt_1 和计数器持续监测的接收机时间与本地参考时间的时差值 T_{tic} ,生成本地参考时间与各颗北斗卫星钟的钟差 $T_{\text{REFSV}}, T_{\text{REFSV}}$ 的计算如式(1)所示。

$$T_{\text{REFSV}} = T_{\text{tic}} + (\rho - r - I - T)/c + \delta t^{(s)} - \epsilon_{\rho} - \Delta t_1 \quad (1)$$

其中, c 为真空光速;引入了未知参数 ϵ_{ρ} ,表示含接收机伪距观测误差在内的各种剩余误差总和。

各用户端设备按约定的观测周期,将 T_{REFSV} 拟合生成该时段各卫星的 $T_{\text{ProREFSV}}^{\text{fit}}$,与来自服务端相同观测周期、相同卫星的 T_{REFSV} 拟合值 $T_{\text{UTCREFSV}}^{\text{fit}}$ 做差,抵消卫星钟、卫星轨道预报误差等共性误差的影响,计算各站参考时间与标准时间的偏差。服务端只需将观测数据按约定间隔拟合后生成的 $T_{\text{UTCREFSV}}^{\text{fit}}$ 广播给用户,就可以实现共视比对,数据拟合可以降低原始观测数据中随机噪声的影响,还能将实时通信数据量降低到1000字节以内,利于工程实现。

因为实时共视需要各用户端与服务端能同时观测到相同卫星,共视的卫星数量越多,越有利于降低测量随机误差;距离越近,两端观测数据的误差相关性越高,测量精度越高。结合北斗卫星在中国的几何分布和实测检验,北斗实时卫星共视最优作用距离约在3000km以内^[11],更长基线可能会牺牲测量性能,为了能在更广泛区域为用户授时,引入了基于北斗的实时全视技术。

1.2 实时全视原理

为满足与服务端更远距离(基线2000km以上)用户与标准时间UTC(NTSC)高精度比对的需求,不依赖两地有共同可视卫星的卫星全视成为更优选择。传统卫星全视依靠最终精密星历和钟差产品解算钟差,只能事后生成比对结果,因主要用于

守时实验室高性能原子钟间比对,守时原子钟频率变化量很小,滞后结果不影响应用。但面向广泛用户的高精度授时需求,需要考虑普通振荡器的应用场景,该类振荡器的特点是频率变化相对较快,获得测试结果的时效性直接影响时间服务性能。因此,本文提出了实时全视的解决方案,主要流程与实时共视相似,区别在于时间比对的中间媒介不是卫星钟,而是第三方机构提供的超快速星历预报产品中钟差的归算基准。将服务端生成的 UTC(NTSC)与归算基准的偏差通过网络广播到用户端,用户端设备接收偏差数据,结合用户端测得的本地参考时间与归算基准的偏差,就可以获得本地参考时间与 UTC(NTSC)的偏差。目前,国内外有多家机构可以提供实时全视所需超快速预报的卫星位置和钟差产品,相较其他产品,超快速预报产品的主要特点是可靠性高,轨道精度 5cm(STD),钟差精度优于 1.5ns(STD),已满足实时共视比对需求。

实时全视数据处理流程:各用户端设备利用北斗定时接收机接收北斗卫星导航信号,首先测得伪距 ρ ,然后通过第三方机构获得超快速星历预报产品,经多项式内插生成对应观测时刻的卫星位置和卫星钟差,计算卫星与接收机距离 r ,计算接收机时间与归算基准的偏差 $\delta t^{(s)}$;然后用双频观测值计算电离层延迟改正值 I ,使用经验模型改正对流层延迟 T ,并进行 Sagnac 效应、卫星天线相位中心、接收机天线相位中心和卫星发射时延改正,改正量用 Δt_{other} 表示,接收机的时延改正量为 Δt_1 ,计数器测得接收机时间与本地参考时间的时差值为 T_{tic} 。对同一历元所有可视卫星按高度角加权,生成该时刻本地参考时间与归算基准的偏差 T_{REFSV} , T_{REFSV} 的计算如式(2)所示^[12-13]。

$$T_{\text{REFSV}} = T_{\text{tic}} + (\rho - r - I - T)/c + \delta t^{(s)} - \Delta t_{\text{other}} - \epsilon_{\rho} - \Delta t_1 \quad (2)$$

其中, c 为真空光速;引入未知参数 ϵ_{ρ} , 表示含接收机伪距观测误差在内的各种残余误差总和。

服务端和各用户端设备按约定的观测周期,分别拟合 T_{REFSV} ,生成代表该时段的偏差 T_{UTCREFSV} 和 T_{ProREFSV} 。与实时共视时服务端广播的观测数据相比,服务端在全视比对时,每个观测周期仅需广播一条 T_{UTCREFSV} 数据,进一步简化了通信数据量。各用户端设备接收来自服务端的 T_{UTCREFSV} 数据,处理方式与共视完全相同,得到本地时间与 UTC(NTSC)的偏差。

根据上述流程可知,只要用户端设备可以观测到

北斗卫星,并能获得对应卫星的超快速星历产品,就可以直接与 UTC(NTSC)比对,用户与服务端间没有距离限制,服务性能主要与星历产品、接收机性能有关。

受伪距测量误差以及超快速星历预报产品精度限制,实时全视的比对不确定度优于 2ns,更高精度的比对需要寻求更高分辨率的测量方法,例如 PPP。

1.3 实时 PPP 原理

实时 PPP 是在卫星共视和全视保障了基本应用需求的基础上,随着北斗卫星的第三方星历产品逐渐成熟,为满足更高精度授时需求发展而来的。实时 PPP 与实时全视的基本思路完全相同,主要区别在于使用测距码与载波相位测量数据结合,代替了仅使用码伪距测量值,使用实时卫星轨道和钟差产品代替超快速预报产品。

采用双频无电离层组合进行 PPP 解算,基于载波相位的 T_{REFSV} 计算方程用式(3)表示。

$$T_{\text{REFSV}} = T_{\text{tic}} + (\rho - r - I - T)/c - \lambda N_r^s + \delta t^{(s)} - \Delta t_{\text{other}} - \epsilon_{\rho} - \Delta t_1 \quad (3)$$

其中, λ 表示无电离层组合波长; N_r^s 表示载波相位模糊度。获得本地参考时间与精密卫星钟差产品系统时间的偏差,按观测周期拟合后生成 T_{ProREFSV} ,再接收服务端广播的对应观测周期的 T_{UTCREFSV} ,生成本地参考时间与标准时间的偏差^[14-17]。基于实时星历产品,目前实时 PPP 可以实现优于 1ns 不确定度的比对。

1.4 振荡器控制原理

通过实时共视/全视/PPP 可以得到各用户端本地时间与标准时间 UTC(NTSC)的偏差,要实现本地时间与 UTC(NTSC)同步,还需要对本地振荡器进行驾驭。为能产生更稳定、准确的时间频率信号,对振荡器驾驭需遵循两项基本原则:一是使本地时间与 UTC(NTSC)偏差尽可能小;二是使频率长期稳定度最优的同时,尽可能少恶化短期稳定度。结合需求分析,对振荡器的时间变化特性建模预报,比事后调整更利于目标实现。典型的振荡器随时间变化模型如式(4)所示。

$$x_i = a + bt_i + \frac{1}{2}ct_i^2 + \epsilon \quad (4)$$

其中, a 表示与参考信号的初始时差; b 表示与参考信号的频率差; c 表示振荡器的频漂; ϵ 表示瞬时随机变化量。利用持续比对获得的历史时差数据,结合对各类振荡器的先验经验,确定对式(4)中

各项参数的拟合方法,目前拟合工具较多且较为成熟,各有适用场景,在此不再赘述。需要特别注意拟合数据的长度选择,以及根据拟合结果结合对时间偏差的预期以及振荡器类型综合考虑制定对振荡器的驾驭策略,较为典型的方案是将驾驭按阶段细分,采用不同驾驭策略,精准实施。

2 标准时间远程复现系统

为验证基于北斗卫星实时共视、全视和 PPP 向全球用户传递标准时间 UTC(NTSC)的能力,国家授时中心建立了一套标准时间远程复现系统。基于云架构,设计扁平化的授时模式,任意节点可直接溯源

至 UTC(NTSC),获得本地时间与标准时间 UTC(NTSC)的偏差。溯源技术支持单选实时共视、全视和 PPP,或各比对结果融合;观测周期支持 1min、5min、10min 和自定义等多种间隔,满足各种振荡器与 UTC(NTSC)同步需求。

2.1 系统设计

标准时间远程复现系统组成结构如图 1 所示,由标准时间产生系统、远程时间比对基准设备和标准时间复现设备三类设备组成,其中标准时间产生系统为授时系统提供时间基准。本系统的时间基准是我国的标准时间 UTC(NTSC),与 UTC 的偏差常年保持在 5ns 内。

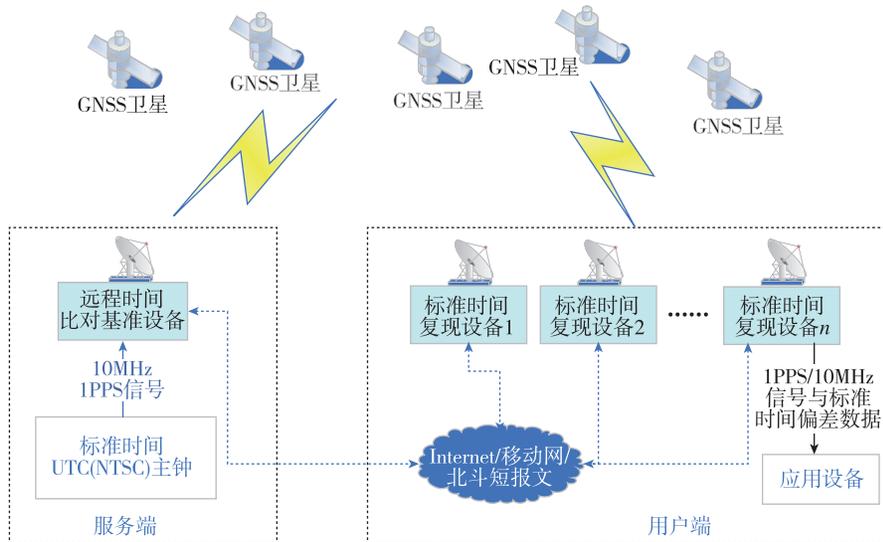


图 1 标准时间远程复现系统组成图

Fig. 1 Composition of UTC(NTSC) remote replicating system

远程时间比对基准设备是服务端的核心设备,用于按约定的各种观测周期、比对技术,持续产生观测数据 $T_{UTCREFSV}$ 和 $T_{PTOREFSV}$,广播给用户设备。远程时间比对基准设备是系统运行的核心,为提高可靠性,采用异地冗余互备方案,由分布多地的多台设备共同组成,通过专用光纤同步网络确保各地参考时间统一至 UTC(NTSC)主钟。

标准时间复现设备属于用户端设备,通过北斗卫星的实时共视/全视/PPP 等比对技术,持续获得本地参考时间与 UTC(NTSC)的偏差,进而驾驭本地振荡器,产生与 UTC(NTSC)同步的本地参考信号。目前,标准时间复现设备支持驯服的振荡器类型包括晶振、铷钟、铯原子钟和氢原子钟等。用户安装一台标准时间复现设备,即可获得与 UTC(NTSC)同步的 1PPS 时间信号和 10MHz 频率信号,以及当前

时间信号与 UTC(NTSC)的偏差信息和当前时刻的时码。

为满足不同用户安装需求,设计了通过互联网、北斗短报文等多种渠道广播服务端的观测数据,其中对通过互联网传输的观测数据进行了授权和加密两层防护处理,而北斗短报文模式下仅北斗授权用户才能获得,安全性更高。

标准时间远程复现系统还支持为授权用户提供数据分析和管理服务,满足个性用户对标准时间的需求。

2.2 时延标校

作为授时系统,还需要特别关注所传递时间被用户获得的准确性,即最终用户获得时间的误差。授时误差可以分为随机误差和系统误差,其中随机

误差与使用的时间比对方法、环境变化、器件等相关,一旦授时方案确定后,难以改变;系统误差具有重复性、单向性、可测性等特征,是影响授时误差的主要因素,来源主要是设备时延、电缆时延、转接器等信号在各环节传输引入的时延,在一定周期内重复可测,对系统误差的精确标校能力,影响了标准时间远程复现系统最终为用户提供授时服务的能力。

由于用户场所条件差异大,需要根据安装条件配置不同的馈线型号、长度,甚至还可能需要加入功分等器件,增加了时延的不确定性。为此,设计了时延的分段标校方案。将时延相对固定的用户端设备主机和天线进行组合标校,单独标校时延不固定的馈线,其中主机与天线的组合时延绝对标校原理如图 2 所示。

被校准的标准时间复现设备与远程时间比对基准设备并址短基线安装,独立天线,预先标定馈线时延,待设备运行稳定后,使用时间间隔计数器持续测试复现设备输出 1PPS 与 UTC(NTSC)主钟信号的时差,不少于 24h。测试结果扣除测试电缆和馈线时延后,与对应测试时段标准时间复现设备输出的本地参考时间与 UTC(NTSC)偏差做差,统计差值的均值即为设备的固定时延。

GNSS 接收天线至标准时间复现设备主机的馈线时延,与安装环境条件密切相关,按需配置,一般在百纳秒至数百纳秒之间。电缆时延的测试方法

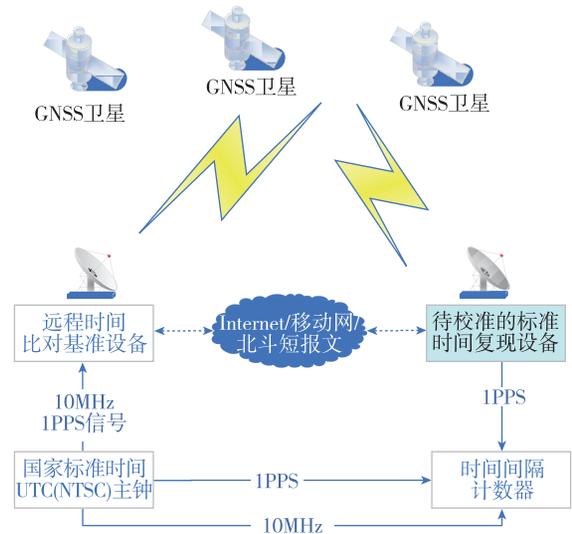


图 2 设备时延校准原理图

Fig. 2 Schematic diagram of equipment time delay calibration

较为通用,标定不确定度与所使用的仪器性能相关,一般情况下远优于 100ps。

3 试验结果与性能分析

为了检验系统的授时性能,以及对比实时共视、全视和 PPP 的性能差异,采用多系统双频定时接收模块结合铷振荡器,组成标准时间复现设备,分别在零基线和千公里基线条件下,对标准时间复现设备的授时性能进行测试,每一组测试持续不少于 24h。测试原理如图 3 所示。零基线条件下,用

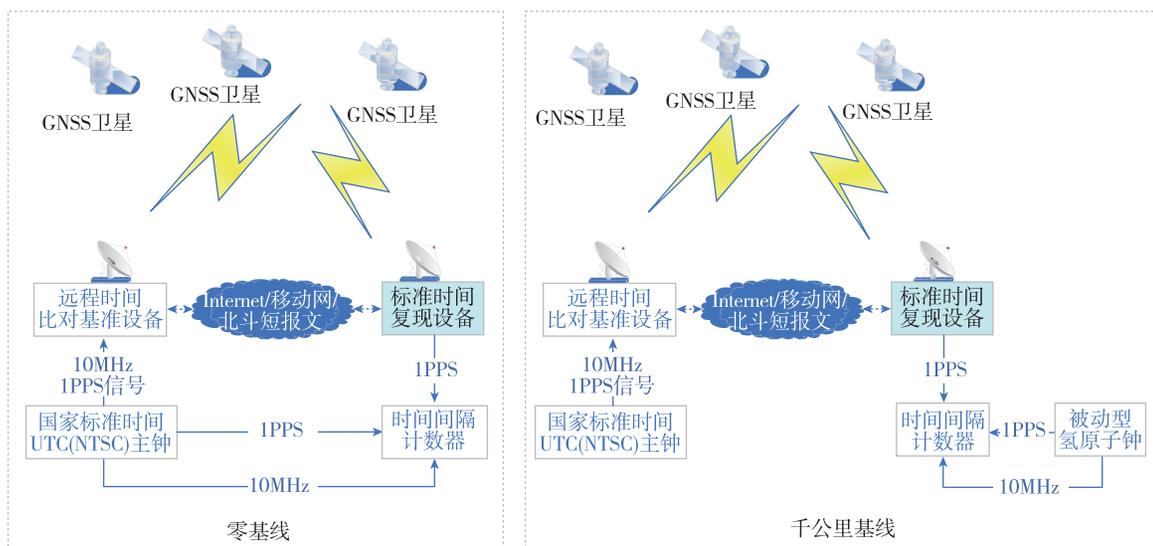


图 3 授时性能测试原理

Fig. 3 Principle for the test of timing service performance

时间间隔计数器直接测量复现设备输出 1PPS 与 UTC(NTSC)主钟信号的偏差;千公里基线时,以 UTC(NTSC)为参考,采用事后 PPP 比对技术校准当地的一台氢原子钟的 1PPS 和 10MHz 信号的偏差,用作测试参考,校准后氢原子钟的频率偏差小于 5×10^{-15} ,频率稳定度优于 $4 \times 10^{-15}/d$,优于被测标准时间复现设备时频信号的预期能力。

标准时间复现设备的输出时间与 UTC(NTSC)的偏差如图 4~图 6 所示,偏差数据的统计特征在表 1 列出。

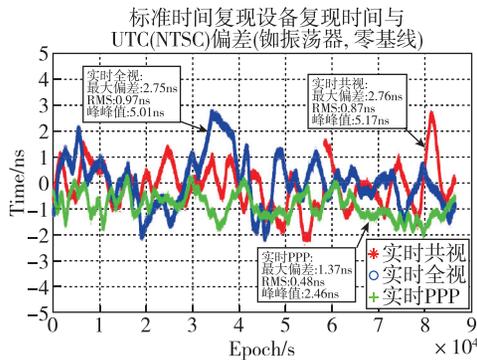


图 4 零基线授时偏差

Fig. 4 Deviation of timing service at zero baseline

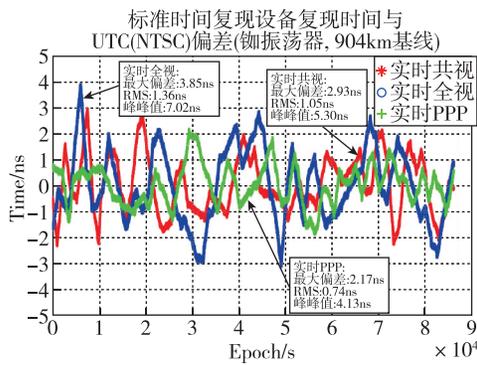


图 5 基线 904km 授时偏差

Fig. 5 Deviation of timing service at 904km baseline

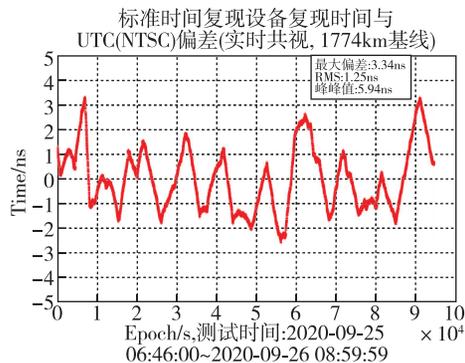


图 6 基线 1774km 实时共视比对时,授时偏差

Fig. 6 Deviation of timing service at 1774km baseline based on real-time CV

表 1 标准时间复现性能测试结果汇总表

Tab. 1 Test results summary of UTC(NTSC)

| remote replicating performance | | | |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 比对技术 | 实时共视 | 实时全视 | 实时 PPP |
| 零基线最大授时偏差 | 2.76ns | 2.75s | 1.37ns |
| 千公里基线最大授时偏差 | 3.34ns | 3.85ns | 2.17ns |
| 零基线 RMS | 0.87ns | 0.97ns | 0.48ns |
| 千公里基线 RMS | 1.25ns | 1.36ns | 0.74ns |
| 零基线时间稳定度 TDEV(1s< τ <10000s) | <0.29ns | <0.87ns | <0.19ns |
| 千公里基线时间稳定度 TDEV(1s< τ <10000s) | <0.77ns | <0.99ns | <0.54ns |
| 零基线频率稳定度/1000s | 5.80×10^{-13} | 6.16×10^{-13} | 4.79×10^{-13} |
| 千公里基线频率稳定度/1000s | 6.92×10^{-13} | 6.37×10^{-13} | 5.61×10^{-13} |
| 零基线频率稳定度/10000s | 1.32×10^{-13} | 2.20×10^{-13} | 6.86×10^{-14} |
| 千公里基线频率偏差/d | 3.13×10^{-14} | 2.78×10^{-14} | 1.04×10^{-14} |
| 千公里基线频率稳定度/10000s | 1.98×10^{-13} | 2.39×10^{-13} | 1.50×10^{-13} |
| 零基线测量不确定度(RMS) | 0.66ns | 0.77ns | 0.20ns |
| 千公里基线测量不确定度(RMS) | 0.76ns | 0.81ns | 0.32ns |

观察图 4~图 6 曲线发现,部分时段的时间偏差存在显著的单向漂移特性,为进一步分析其原因,为铷振荡模块单独增加了保温层,发现曲线改善明显,并证实主要与铷振荡器的温度特性有关。测试时,设备处于室温环境,实验室温度约有 10°C 变化,引起铷振荡器频率随机漂移。因此,对于具备温控条件的用户,将设备放置在恒温环境(温度变化小于 2°C),会显著改善输出信号的频率稳定性。

实测千公里基线条件下,实时 PPP 测量值的均方根(RMS)优于 0.35ns ,较共视和全视的 0.8ns ,测量结果随机起伏更小,有利于振荡器准确建模和预报,因此实时 PPP 比实时复现信号的频率长期稳定度和时间同步精度均表现更优。

此外,还可以得出以下结论:

1)基线千公里内,实时共视比对不确定度差异较小,均优于 1ns ,主要得益于我国境内北斗可视卫星较多,基本在 8 颗以上,保障了不依赖第三方产品

的北斗卫星实时共视,可支持我国国境范围内为用户提供与标准时间偏差不超过 5ns、RMS 小于 1ns 的时间信号,10MHz 频率信号的稳定度优于 $5 \times 10^{-13}/10000\text{s}$ 、相对频偏小于 5×10^{-14} ;

2) 受大环境影响,近两年不能在更远基线条件下开展基于北斗卫星实时全视的试验,仅对比了零基线和千公里基线的性能,结果显示,两种条件下测量结果 24h 的 RMS 值相当,分别为 0.77ns 和 0.81ns,可见卫星全视的比对结果与基线长度相关度较低,可以满足更远距离的比对需求;

3) 基于实时 PPP 比对技术,在零基线和千公里基线时,分别获得了 0.2ns 和 0.32ns 的比对 A 类不确定度,复现信号与 UTC(NTSC)最大偏差控制在 3ns 以内,零基线的万秒频率稳定度进入了 10^{-14} 量级,为将来进一步优化性能奠定了基础;

4) 结合北斗卫星星座特点和已有试验基础,基线 2000km 以内,采用卫星实时共视,能实现优于 2ns 的比对 A 类不确定度。试验也证明,基于北斗卫星在基线 7000km 以上的欧亚比对中,依然有可共视卫星,支持开展比对,但因可用数据大幅减少而影响性能;实时全视技术因使用预报的星历与钟差,在千公里以内的短基线距离时,较共视技术的比对精度优势并不明显,更远如 3000km 以上时,优势才能充分显现;实时全视和 PPP 的比对性能与基线长度的相关性远不及实时共视技术,比对精度更高、覆盖范围更广,但依赖卫星的轨道和钟差产品,特别是当数据产品因可用性变化需要进行产品切换时,可能会引入新的不确定因素,从而影响性能,需要进一步研究优化方案。

综合对比三种实时远程比对技术,实时 PPP 比其他两种技术可以得到更准确的比对结果,随着实时星历钟差产品性能的进一步提升,未来还有进一步优化的空间,但是对第三方产品依赖也最高;得益于北斗卫星在中国区域的高密度覆盖,实时共视应用自由度最高,在中国区域内比对性能与卫星全视基本相当;实时全视为实时共视的有力补充,可以为一带一路沿线、海外用户等更大范围的授时应用,提供与国内性能相当的授时服务,多种比对技术的互补、融合,可以为用户提供更可靠的授时服务。

4 结论

基于我国的标准时间 UTC(NTSC)和覆盖全球的北斗卫星条件,国家授时中心团队开发了一套

兼容实时共视、全视和 PPP 三种比对技术的标准时间远程复现系统,可以为全球用户提供授时服务,授时最大偏差小于 5ns,取样间隔 10000s 以内的时间稳定度优于 1ns,频率万秒稳定度优于 5×10^{-13} ,相对 UTC(NTSC)的频偏小于 5×10^{-14} ,是北斗授时的有力补充,目前正在多个行业得到应用。

参考文献

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件[S]. 2020.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document[S]. 2020(in Chinese).
- [2] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统建设与发展报告[R/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>,2021-05-26.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system construction and development report[R/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2021-05-26 (in Chinese).
- [3] <https://www.nist.gov/programs-projects/time-measurement-and-analysis-service-tmas>.
- [4] <https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/gps-common-view>.
- [5] <https://www.nmdc.ac.cn/ffzz/133516.jhtml>.
- [6] 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 Kun, Fang Wei, Gu Yangyi, et al. Remote time transfer and traceability method, device and system[J]. Remote Time Transfer and Traceability Method, Device and System,2021,65(4):3-13(in Chinese).
- [7] 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 Ruiqiong,Liu Ya, Li Xiaohui. Study on remote time comparison based on improved satellite common-view method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016, 37(4): 757-763(in Chinese).
- [8] 刘娅,陈瑞琼,赵志雄,等. 基于卫星共视的标准时间远程高精度复现方法研究[J]. 时间频率学报,2018,41(3):194-199.
Liu Ya, Chen Ruiqiong, Zhao Zhixiong, et al. A method for remote reproduction of standard time based on GNSS common-view technology[J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(3): 194-199 (in Chinese).
- [9] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 基于不同共视周期的标准时

- 间远程复现分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 33-39.
- Chen Ruiqiong, Liu Ya, Li Xiaohui. Analysis of national time remote reappearance based on different common view periods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 33-39(in Chinese).
- [10] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 一种高精度的国家标准时间远程复现方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43(2): 188-193.
- Chen Ruiqiong, Liu Ya, Li Xiaohui. A method of national standard time high precision remote reproduction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(2): 188-193(in Chinese).
- [11] 刘娅, 樊多盛, 陈瑞琼, 等. 一种基于单频授时接收机的纳秒级时间同步方法研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(4): 57-63.
- Liu Ya, Fan Duosheng, Chen Ruiqiong, et al. Research on a time synchronization method of the order of nanosecond based on single frequency timing receiver[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(4): 57-63 (in Chinese).
- [12] 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 Longxia, Fan Duosheng, Liu Ya, et al. Application of GNSS ultra-rapid products in standard time reproduction[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(1): 134-140(in Chinese).
- [13] Du P, Xu L, Liu Y, et al. A method of remote nanosecond time reproduction[C]//Proceedings of 2020 China Satellite Navigation Conference (CSNC), Volume II. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore, 2020.
- [14] Basile F, Moore T, Hill C, et al. Two are better than one: multi-frequency precise point position using GPS and Galileo [J]. GPS World, 2018, 28(10): 27-37.
- [15] Ge Y, Dai P, Qin W, et al. Performance of multi-GNSS precise point positioning time and frequency transfer with clock modeling[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 347.
- [16] Qin W, Ge Y, Zhang Z, et al. Enhancing BDS-3 precise time transfer with DCB modelling[J]. Measurement, 2021, 174: 108641.
- [17] Qin W, Ge Y, Zhang Z, et al. Accounting BDS3 - BDS2 inter-system biases for precise time transfer[J]. Measurement, 2020, 156: 107566.
- [18] Lombardi M. Multi-source common-view disciplined clock: a fail-safe clock for critical infrastructure systems[J/OL]. NIST Journal of Research, <https://doi.org/10.6028/jres.126.041>.

(编辑: 孟彬)