

引用格式:刘娅,李孝辉,高玉平,等. 中国共视时间比对技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 60-68.

# 中国共视时间比对技术发展

刘娅<sup>1,2,3</sup>, 李孝辉<sup>1,2,3</sup>, 高玉平<sup>1,2,3</sup>, 武文俊<sup>1</sup>, 孙保琪<sup>1</sup>,  
刘音华<sup>1</sup>, 杨旭海<sup>1,2,3</sup>, 张首刚<sup>1,2,3</sup>

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;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**1980 年 5 月 Allan 等人在频控年会上首次报告了 GPS(Global Positioning System) 卫星共视时间比对的研究成果, 10 ns 量级不确定度标志着远程时间比对技术进入新阶段, 很快被国际计量局作为国际原子时计算的主要时间比对方式, 随着 GLONASS(Global Navigation Satellite System)、BeiDou、Galileo 等卫星导航系统的部署及共视时间比对技术的发展, 包括北斗共视在内的多系统融合共视时间比对不确定度降至 2 ns 以内。近年来发展的基于载波相位测量的精密共视技术, 进一步将共视比对测量不确定度提升至亚纳秒量级。随着高精度时间比对、同步需求增加, 标准共视的 16 min 观测周期难以满足比对的实时性需求, 为此国内发展了支持 1 min、5 min、10 min 乃至自定义短周期的准实时卫星共视技术, 结合原子钟控制技术, 可以实现偏差小于 5 ns 的时间传递, 为共视技术从守时实验室走向通信、电力、交通等民生领域的广泛应用提供了一种解决方案。我国共视时间比对技术经过四十余年发展, 经历了从技术引进、自主创新到国际领先的跨越。回顾了中国共视时间比对技术的发展历程, 重点阐述了关键突破、代表性成果及其应用, 并展望了未来发展前景。

**关键词:**共视时间比对; 北斗共视; 卫星共视; 载波精密共视; 准实时共视; 空间站共视

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0060-09

## Development of common-view time transfer technology in China

LIU Ya<sup>1,2,3</sup>, LI Xiao-hui<sup>1,2,3</sup>, GAO Yu-ping<sup>1,2,3</sup>, WU Wen-jun<sup>1</sup>, SUN Bao-qi<sup>1</sup>,  
LIU Yin-hua<sup>1</sup>, YANG Xu-hai<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shou-gang<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** Global Positioning System (GPS) satellite common-view (CV) time comparison technology was first presented by Allan et al. at the Annual Frequency Control Symposium in May 1980. Achieving time transfer uncertainty at the 10-nanosecond level marked the advent of high-precision remote time comparison, a technique rapidly adopted by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) as the primary method for computing International Atomic Time (TAI). With the deployment of satellite navigation systems (GLONASS, BeiDou, Galileo) and advancements in CV technology, multi-system

收稿日期: 2025-07-09; 接受日期: 2025-09-09

基金项目: 中国科学院“西部交叉团队”重点实验室专项(xbzs-zdsys-202120)

作者简介: 刘娅, 女, 博士, 研究员, 主要从事高精度时频测量与传递研究。

(including BeiDou CV) integrated CV uncertainty, has been reduced to below 2 ns. The measurement uncertainty of common-view comparison has been significantly reduced to the sub-nanosecond level through a recently developed precise common-view technique utilizing carrier-phase measurements. As demand for high-precision time comparison and synchronization grows, the conventional 16-minute observation interval proved inadequate for emerging real-time applications. To address this issue, China developed quasi-real-time CV techniques supporting 1-, 5-, 10-minute, and user-configurable intervals. Integrated with clock steering, these techniques achieved time transfer bias down to 5 ns, enabling CV's transition from timekeeping laboratories to broad applications in telecommunications, power grids, and transportation. Over four decades of development, China's CV has evolved from initial technology importation to independent innovation, ultimately achieving global leadership. This paper systematically reviews the development of China's CV, with focused elaboration on key breakthroughs, representative achievements, and their applications, while also prospecting future advancements.

**Keywords:** common-view time transfer(CV); BeiDou Navigation Satellite System(BDS) common-view; satellite common-view; carrier-phase precision common-view; quasi-real-time common-view; space station common-view

共视时间比对是为准确得到两地时差,进而服务于两地时间同步而发展起来的一种远程时间比对技术。通常是指两地或多地同时观测同一物理现象,记录物理现象发生的本地时间,交换数据后作差,得到各地相对时差的方法。

共视时间比对技术的发展主要与共视源的选取有关,早期月食、木星卫星食、流星、长短波信号等也曾作为共视源被使用,随着 GPS(Global Positioning System)的出现,Allan 等人<sup>[1]</sup>于 1980 年 5 月在频控年会上报告了 GPS 卫星共视时间比对研究成果,两站同时观测一颗 GPS 卫星,分别测得 A 站钟与卫星钟的时差、B 站钟与卫星钟时差,对两站时差数据作差,除可抵消卫星钟带来的误差外,因卫星距离地面高达约 20 000 km,卫星至两站的信号传播路径几何特性(如图 1 所示)相近,使得大部分传播时延误差(如对流层、电离层)能被显著削弱,从而实现高精度时间比对,时间比对不确定度跃升至 10 ns 量级。很快成为主流的时间比对方法,被国际计量局作为国际原子时计算的主要时间比对方式。

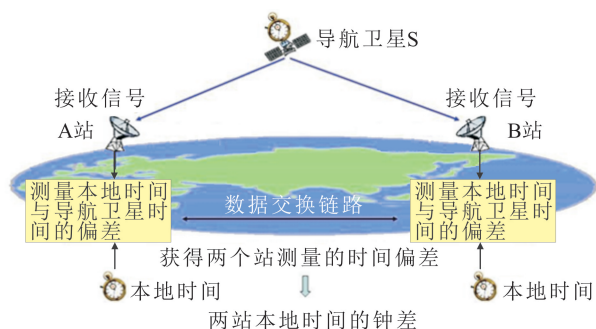


图 1 GPS 共视时间比对原理

之后又陆续发展了基于 GLONASS(Global Navigation Satellite System)、BeiDou、Galileo 等导航卫星系统的共视时间比对技术及多系统融合的共视时间比对技术,将共视时间比对不确定度提升至 2~5 ns 水平。为满足日益增长的高精度、实时性应用需求,近十年,共视比对技术的主要发展方向是适应多样化应用需求,包括多卫星导航系统融合,更短观测间隔下的测量噪声抑制,在不牺牲性能前提下更高频度的生成共视时间比对结果;以及使用更高测距分辨率的导航信号载波相位测量代替伪码测距等,其中利用载波相位观测量的精密共视(PCV)技术将时间比对 A 类不确定度提升至亚纳秒量级。

随着中国空间站梦天舱的发射,基于中国空间站的分时共视时间比对技术研究也初见成效,有望将共视时间比对不确定度提高至 100 ps 以内,率先实现百皮秒量级的共视时间比对。

我国共视时间比对技术的发展,经历了 20 世纪 80 年代引进使用 GPS 共视进行实验室间原子钟比对,21 世纪初自主研发 GPS 共视时间比对设备,2020 年发布北斗卫星共视时间传递的国家标准,到基于北斗/GNSS(Global Navigation Satellite System)近实时共视实现偏差小于 5 ns 的时间传递,支撑通信同步网从微秒量级向百纳秒甚至 10 ns 升级,还被应用于交通、电力等行业。

本文旨在系统梳理我国共视时间比对技术的发展历程,为清晰呈现发展脉络,文章主体按时间

顺序,梳理关键技术进步与标志性成果,力图展现我国在该领域的发展史。

## 1 1987 年,国内首次 GPS 共视时间比对试验在西安、北京、武汉三地开展

1980 年,Allan 和 Weiss 在频率控制年会上首次介绍了 GPS 共视(CV)技术。美国国家标准局(NBS,1988 年更名为 NIST)和美国海军天文台(USNO)在 1981 年 6 月开展了为期 15 天的共视法时间比对试验,分别测量两个机构维持的协调世界时(UTC)与 GPS 的 SV5、SV6、SV8、SV9 四颗卫星时间的偏差,实现的站间时间比对不确定度 6.5 ns,远优于当时普遍使用的罗兰共视比对和 GPS 单向授时能力。

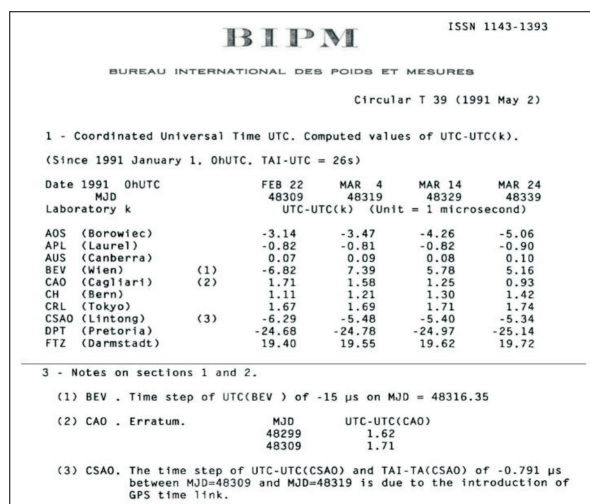
20 世纪 80 年代初,中国科学院陕西天文台(CSAO,2001 年更名为中国科学院国家授时中心,英文缩写 NTSC)在国内率先开展了 GPS 共视时间比对方法研究,并对 BIPM(Bureau International des Poids et Mesures,国际计量局)公布的东亚地区共视表内容进行了完善。

1984 年前后,中国科学院陕西天文台、西安测绘研究所、航天部无线电计量测试研究所等机构通过采购或升级设备,完成了 GPS 共视时间比对实验的前期准备。之后武昌时辰站的李忠华在团队支持下通过民航客机搬运原子钟,在西安(陕西天文台和电子部 720 所)、北京(无线电计量测试研究所)、武汉(中国科学院武汉测量与地球物理研究所武昌时辰站)先进行了原子钟钟速评估,1987 年 7 月 12 日至 18 日,在临潼、西安、北京三地进行了搬运钟和 GPS 共视时间比对的对比实验,在搬运钟测试期间,各站同时进行 GPS 共视观测,接收多颗 GPS 卫星的单频信号并测量卫星时间与本地时间的偏差,每颗星连续观测 15 min。结果表明,多星平均共视时间比对误差为 3~13 ns,与搬运钟测得的各站时间比对结果一致性为 50~100 ns,与国外报道相当,达到当时国际水平<sup>[2-3]</sup>。

## 2 1991 年,我国共视时间比对数据被 BIPM 采用,支持 TAI 计算

针对国家标准时间的国际高精度比对需求,在前期 GPS 共视比对研究基础上,陕西天文台完成了一系列实验研究工作,包括研究国产 GPS9301 SD 型定时接收机的性能和精度影响因素和共视数据

处理方法,编制共视数据处理软件以及应用国际共视表 No. 17(含区域内共视)例行生成共视时间比对数据,并报送 BIPM。从 1991 年 2 月 22 日起,BIPM 在 TAI(国际原子时)计算中正式采用陕西天文台的 GPS 共视比对结果,标志着我国的国家标准时间 UTC(CSAO)具备了通过高精度手段(GPS CV)参与 TAI 合作的能力,显著提升了其与国际标准时间的同步水平。图 2 为刊登中国科学院陕西天文台(CSAO)共视比对数据的时间公报。随后,中国计量科学研究院(NIM)、北京无线电计量测试研究所(BIRM)也开始了 GPS 共视时间比对技术的研究,并相继加入 TAI 的比对<sup>[4-5]</sup>。



**BIPM** ISSN 1143-1393  
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
Circular T 39 (1991 May 2)

1 - Coordinated Universal Time UTC. Computed values of UTC-UTC(k).  
(Since 1991 January 1, 0hUTC, TAI-UTC = 26s)

| Date 1991          | 0hUTC                             | FEB 22 | MAR 4  | MAR 14 | MAR 24 |
|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| MJD                | 48309                             | 48319  | 48329  | 48339  |        |
| Laboratory k       | UTC-UTC(k) (Unit = 1 microsecond) |        |        |        |        |
| AOS (Borowiec)     | -3.14                             | -3.47  | -4.26  | -5.06  |        |
| APL (Laurel)       | -0.82                             | -0.81  | -0.82  | -0.90  |        |
| AUS (Canberra)     | 0.07                              | 0.09   | 0.08   | 0.10   |        |
| BEV (Wien) (1)     | -6.82                             | 7.39   | 5.78   | 5.16   |        |
| CAO (Cagliari) (2) | 1.71                              | 1.58   | 1.25   | 0.93   |        |
| CH (Bern)          | 1.11                              | 1.21   | 1.30   | 1.42   |        |
| CRL (Tokyo)        | 1.67                              | 1.69   | 1.71   | 1.74   |        |
| CSAO (Lintong) (3) | -6.29                             | -5.48  | -5.40  | -5.34  |        |
| DPT (Pretoria)     | -24.68                            | -24.78 | -24.97 | -25.14 |        |
| FTZ (Darmstadt)    | 19.40                             | 19.55  | 19.62  | 19.72  |        |

3 - Notes on sections 1 and 2.

(1) BEV. Time step of UTC(BEV) of -15  $\mu$ s on MJD = 48316.35

(2) CAO. Erratum.

| MJD   | UTC-UTC(CAO) |
|-------|--------------|
| 48299 | 1.62         |
| 48309 | 1.71         |

(3) CSAO. The time step of UTC-UTC(CSAO) and TAI-TA(CSAO) of -0.791  $\mu$ s between MJD=48309 and MJD=48319 is due to the introduction of GPS time link.

注:CSAO(Lintong)代表位于临潼的陕西天文台的英文缩写

图 2 刊登中国共视比对数据的时间公报

## 3 2005 年,我国第一台工程化双频多系统共视接收机研制完成,助力国产共视走向服务

2002 年,国家自然科学基金委部署了我国首个共视时间比对技术研究项目“多通道时间传递系统的研究”,中国科学院国家授时中心开启了国产共视设备的研究工作,利用 Motorola 的 VP ONCore 型 GPS 接收机,研制了一套 GPS 单频多通道共视时间传递系统,采用标准的 16 min 周期(其中前 2 min 准备,13 min 观测,后 1 min 为处理时间),零基线共视时间比对均方根不大于 5 ns<sup>[6-7]</sup>。2004 年,该系统加入国际时间比对,向 BIPM 报送时间比对数据。2006 年,中国计量科学研究院利用同款 GPS 接收机也实现了单频多通道共视接收机的研制<sup>[8-9]</sup>,运行 3 年后比对数据报送 BIPM。

电离层附加时延是电磁波穿越电离层时,因电

子密度影响导致传播速度和路径发生变化,其值主要取决于电离层总电子含量和信号频率。单频共视使用导航电文中的电离层模型参数改正电离层附加时延,改正精度约为 10 ns,是共视时间比对的主要误差项。利用两个频率下行信号组合测量电离层附加时延,可以将共视时间比对不确定度降低至 3 ns,显著改善共视比对不确定度<sup>[10]</sup>。2003 年,国家授时中心团队结合我国综合原子时系统建设及改善共视比对不确定度需要,开始了双频共视接收机的研制,2005 年,研制的双频多系统共视接收机通过了成果鉴定(实物如图 3 所示),比对不确定度 3 ns,后被陆续部署于构成我国综合原子时系统的 7 个台站<sup>[11-12]</sup>。

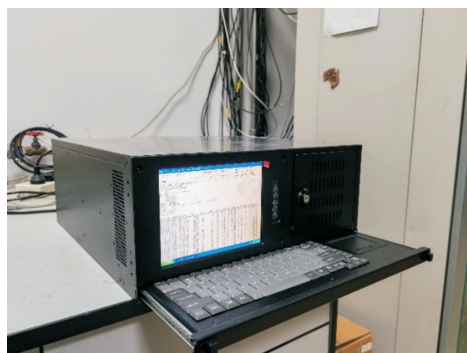


图 3 中国第一双频多系统共视接收机  
2005 年通过成果鉴定

后续为便于服务国内各地原子钟的远程校准,国家授时中心于 2009 年开始研制基于双频多系统共视时间比对的 GNSS 精密时间服务系统,2010 年建成并试运行,2011 年正式上线服务<sup>[13]</sup>。该系统在临潼以国家标准时间 UTC(NTSC)为参考建立共视主站,根据国际通行的 16 min 共视表,利用 GPS、GLONASS 卫星进行单频、双频观测,结合现代通信网络 and 数据处理技术获得用户端共视接收机测量数据并生成用户钟与 UTC(NTSC)的时差,发送给各用户。该系统可为用户提供一种以纳秒级不确定度溯源至 UTC(NTSC)的服务<sup>[14-15]</sup>。其后,中国计量科学研究院报道了 2016 年投入服务的远程时间溯源系统,以及配套使用的高精密时间频率标准装置(NIMDO)的研制工作。该系统以 16 min 的标准共视表为基础,接收 GPS、GLONASS、BeiDou 的卫星信号,利用伪随机码测量 UTC(NIM)与卫星的时差,生成共视数据文件通过网络发布。用户利用远程时间溯源装置结合网站公布的观测资料,实现与 UTC(NIM)的时间比对<sup>[16-20]</sup>。

#### 4 2016 年,我国建成基于近实时共视的标准时间复现系统,解决了 5 G 移动通信等多领域高精度同步难题

传统共视时间比对 16 min 一个共视周期,对于守时实验室高稳定的原子钟,16 min 的相位变化远小于共视时间比对误差,影响可以忽略,但若用于以铷原子钟甚至晶振为参考的时间比对,16 min 共视周期内仅由频率源频率变化导致的相位差就可能达到数十纳秒,16 min 生成一个比对结果难以代表频率源间当前时间差。

2011 年,国家授时中心负责的国家自然科学基金重点项目“基于共视原理的卫星授时新方法研究”启动,开始了共视时间比对方法实时性的改进研究。该项目提出了一种基于共视原理的单向授时方法,如图 4 所示,共视主站以 UTC(NTSC)为参考,监测 GNSS 系统各星时间与 UTC(NTSC)的时差,为便于用户站使用该差值,还对单星偏差进行了预处理和建模,生成各颗卫星的授时偏差模型参数,最后通过通信卫星或互联网播发给用户站。用户站观测 GNSS 卫星,测得本地参考时间与各卫星时间的偏差,结合共视主站播发的授时偏差模型参数,生成当前时刻对应卫星的偏差改正量,实现共视授时,该方法将卫星导航系统单向授时 A 类不确定度由 20 ns 提高到 3~5 ns<sup>[20-22]</sup>。

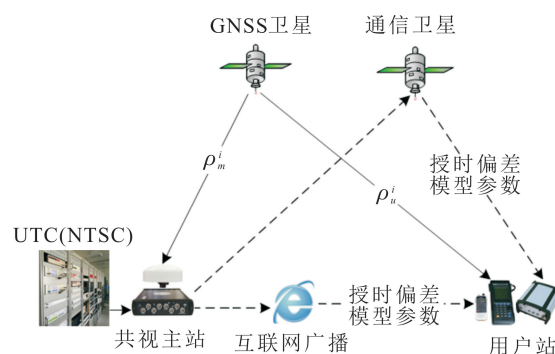


图 4 共视实时授时方法原理图

2012 年,为满足时间溯源的高连续性需求,该团队进一步提出了不受传统共视时刻表限制的连续共视时间比对方法,解决了短周期快速校准等技术问题,将共视周期从 16 min 缩短至 10 min 和 5 min<sup>[23-24]</sup>,至 2018 年,已能在不损失比对不确定度前提下适应 1 min 的共视周期<sup>[25]</sup>,即每一分钟就可以完成一次时间比对,实现了近实时共视时间比对。更短的共视周期增加了共视比对噪声的抑制难度,但优点是可以在标准时间复现、高精度时间

同步等应用中显著降低对振荡器及其工作环境的要求,为共视时间比对技术从守时实验室走向更广阔应用奠定基础。

基于上述研究成果,2016 年国家授时中心建成了标准时间远程复现系统<sup>[26]</sup>,工作原理是在国家标准时间 UTC(NTSC)产生地建设共视比对主站,持续测量 UTC(NTSC)与各卫星时间的偏差,并把偏差即时发给用户站。同时,部署在用户站的共视比对从站(备注:系统中称其为标准时间复现设备,意为可以将标准时间在本地高精度恢复出来)也在实时测量卫星时间与用户本地参考时间的偏差<sup>[27]</sup>。从站还需能实时计算主站和用户站各自生成的偏差之差,从而得到用户本地参考时间与 UTC(NTSC)的偏差,用于支持校准本地参考时间,使其与 UTC(NTSC)的偏差接近零值,即实现标准时间复现。该方法可以适配包括氢、铯等守时型原子钟,也能适应铷原子钟,甚至高稳晶振作为本地参考频率源。从共视比对到频率校准、时间校准同步等全流程均为自动运行,无需用户参与操作。

标准时间远程复现系统(组成如图 5 所示),主站由多个基准站实现,生成的偏差数据通过云平台实时广播给用户站,多个基准站的冗余配置是为了降低设备故障、受干扰等导致的服务中断风险,部署于用户站的标准时间复现设备,2018 年报道可为我国境内用户提供与标准时间偏差小于 5 ns 的时间信号,复现时间偏差测量的 A 类不确定度不大于 2 ns<sup>[28]</sup>,优于美国 NIST 2021 年报道的 10 ns 水平<sup>[29]</sup>,以及国内类似系统<sup>[30]</sup>。为研究所、部队和企业等机构提供可靠服务,能满足我国全境纳秒级时间同步需求。

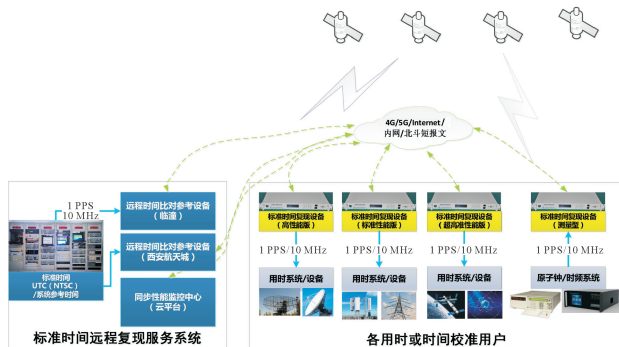


图 5 标准时间远程复现系统组成

2017 年,随着 5G 通信技术高速发展,对基站时间同步提出了更高要求,现网使用的卫星单向授时技术难以满足。但标准的卫星共视时间比对设备在成本、环境适应性、部署便利性等方面又限制了

其在通信领域大面积应用的可能性。受中兴通讯(ZTE)委托,国家授时中心开展了“UTC(NTSC)远程时间复现关键技术研究”,提出了基于单/双频多系统近实时共视的标准时间远程复现方法,每分钟生成并实时传递共视时间比对结果,在满足成本、功耗、体积等应用约束前提下,研制了适配基线 500 km 以内和以上的多款标准时间复现单机,并面向通信同步网设计了分级时间传递方案<sup>[31]</sup>,可为 5G 基站提供全网与标准时间 UTC(NTSC)偏差小于 5 ns 的时间源。2017 年该项目成果通过了中国移动组织的现网测试。2017 年 12 月 1 日中兴通讯以“中兴通讯联合国家授时中心率先完成超高精度时间源测试助力 5G 万物互联”为题公开发布了该消息(见图 6)。这是我国率先发展的近实时共视应用技术,实现共视技术从守时实验室到民生应用的跨越。2024 年 7 月,中移动牵头、国家授时中心等国内通信行业企业参与的通信行业标准《卫星共视同步系统技术要求》YD/T 4769—2024 正式发布。



图 6 中兴通讯官网发布共视 5G 应用消息

## 5 2017 年,北斗共视首次应用于 7 000 km 国际时间比对

BIPM 利用全球 80 多个守时实验室的原子钟通过国际时间比对产生协调世界时, GPS CV 是使用最多的比对方式。为打破 GPS 主导地位,北斗卫星导航系统建设期间,国内多个团队开展了北斗共视时间比对方法的研究。2017 年 7 月,国家授时中心研究人员<sup>[32]</sup>率先报道了利用北斗开展 UTC(NTSC)与瑞典国家技术研究中心的 UTC(SP)国际共视时间比对的结果,基线超 7 000 km 的亚欧北斗共视,比对不确定度为 2.03 ns。图 7 为比对测试工作留念。在北斗星座还不完善情况下(当时欧洲只能观测到 4 颗北斗卫星),与 GPS 共视时间比对相当。该实验为 BIPM 将北斗共视时间比对纳入国际标准时间比对网提供了实测数据。同年 8 月,中国计量科学研究院也公布了与巴黎天文台的北斗共视时间比对结果,进一步验证了北斗共视时间比对的国际比对能力。



图 7 国家授时中心团队进行北斗国际时间比对测试 (2017 年)

2020 年 6 月,在国际时间频率咨询委员会工作组会议上,国家授时中心报告了北斗 B1C&B2a 频点组合优于 B1I&B3I,给出北斗共视的频率优化组合方式,被工作组采纳向各国守时实验室推荐。

为规范北斗共视时间比对的技术发展,包括明确共视时间传递设备的性能约束、观测操作、数据处理方法等,促进跨区域比对结果互认、互通,国家授时中心、中国卫星导航工程中心等 5 家单位联合编制了《北斗卫星共视时间传递技术要求》(GB/T 39411—2020)(见图 8),2020 年 11 月 19 日该标准正式发布。



图 8 北斗卫星共视时间传递技术要求(GB/T 39411—2020)

## 6 2021 年,基于载波相位测量的精密共视技术形成,将共视比对不确定度从纳秒提升至亚纳秒量级

基于精密单点定位(PPP)的时间传递技术因比对不确定度高于卫星共视约 1 个量级,自诞生以来就受到广大科研工作者的欢迎,经过大量研究,目前已经实现应用。但作为时间服务技术,仍存在一些局限性,比如通常依赖卫星精密钟差、轨道产品。

为改善上述问题,在北斗共视时间比对基础上,结合 PPP 时间传递特点,国家授时中心在 2016 年 IGS Workshop 会议上,提出了一种基于 GEO (geosynchronous orbit) 卫星的精密共视方法 (precise common-view, PCV),2021 年,在全国时间频率学术年会上进一步介绍了 PCV 的共视卫星从 GEO 拓展到北斗/GNSS 全星座的研究进展。PCV 工作原理是基于码伪距和载波相位观测值,利用精密卫星轨道产品,在国家标准时间产生地的参考站与用户站之间形成站间单差,解算用户时间与 UTC (NTSC)之间的偏差。如图 9 所示,PCV 服务端部署以 UTC(NTSC)为参考的基准站,实时生成基于码伪距和载波相位的观测值,与国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)生成的北斗/GNSS 卫星精密轨道产品一起向用户端发送,用户端收到上述信息后,结合用户端生成的码伪距和载波相位观测值,进行 PCV 处理,从而生成用户本地时间与 UTC(NTSC)的偏差<sup>[33-38]</sup>。



图 9 国家授时中心精密共视时间传递原理

PCV 能不受卫星钟差产品精度和基准连续性的影响,削弱卫星轨道误差的影响,简化载波相位模糊度固定的信息量,可以实现误差的均方根优于 0.5 ns 的时间比对。在西安—临潼 30 km 基线时,以光纤时间频率传递结果为真值,误差的均方根为 0.13 ns;西安—长春 2 000 km 基线下,以卫星双向时间频率传递结果为真值,误差的均方根为 0.44 ns<sup>[39]</sup>。

PCV 方法的核心原理与算法已趋于成熟,目前正处于工程化实现和应用推广阶段,有望为亚纳秒级高精度时间传递提供新的解决方案。

## 7 2023 年,基于空间站共视的地面站完成安装,开启了 10 ps 量级共视时间比对探索新征程

我国的空间站部署了目前空间运行精度最高

的原子钟组和激光、微波时频传递载荷,具有超高精度信号下发能力,时延测量分辨率达皮秒量级,具备作为新共视源的基本条件。但按照传统方式进行空间站共视时间比对,精度只有纳秒量级,不能发挥空间站装备的性能。

空间站共视的最大挑战是空间站的低轨特性,轨道误差的放大效应限制了共视比对的精度,并且共视比对基线短,应用范围受限。欧洲 ACES 项目现阶段没有把国际空间站共视时间比对作为主要时间传递手段。

2017 年,国家授时中心受中国载人航天工程办公室委托,开展“高精度共视时间比对实验”研究,在空地几何位置关系与轨道误差特性研究基础上,结合高性能原子钟建模技术,提出分时共视时间比对方法,能将空间站共视时间比对覆盖面积扩大 3 倍以上。分时共视的两个地面站不需要同时获得空间站观测量,如图 10 所示,地面站 A 在  $t_1$  时刻观测,地面站 B 在  $t_2$  时刻观测,但两站观测时刻对应空间站的位置关系需满足轨道误差抵消的前提条件,即站 A 在  $t_1$  时刻测得与空间站钟差  $\Delta T_{AS}(t_1)$  和站 B 在  $t_2$  时刻测得与空间站钟差

$\Delta T_{BS}(t_2)$  中的空间站轨道误差分量相当,通过对  $\Delta T_{AS}(t_1)$  建模外推得到  $t_2$  时刻 A 站与空间站的钟差  $\Delta T_{AS}(t_2)$ ,然后对两站钟差进行差分运算,即得到两站钟差<sup>[40-42]</sup>。

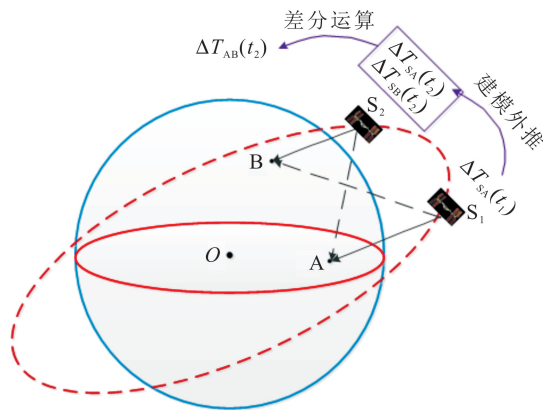


图 10 分时共视时间比对方法示意图

图 11 仿真了多地空间站分时共视比对情况,结果显示可以将共视时间比对的不确定度提高到 10 ps 量级,比对准确度达 50 ps,表明其预期性能有望超过目前公开文献报道的共视时间比对最高水平<sup>[43]</sup>。

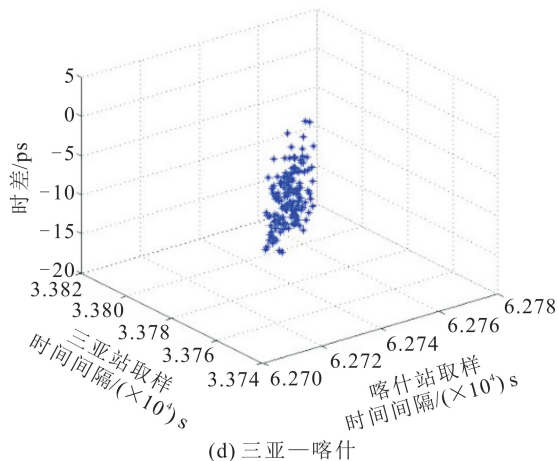
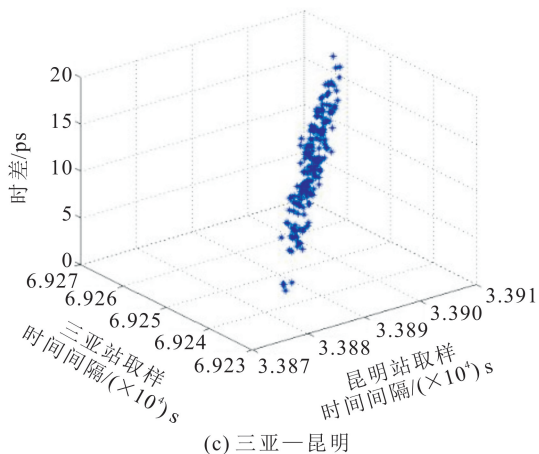
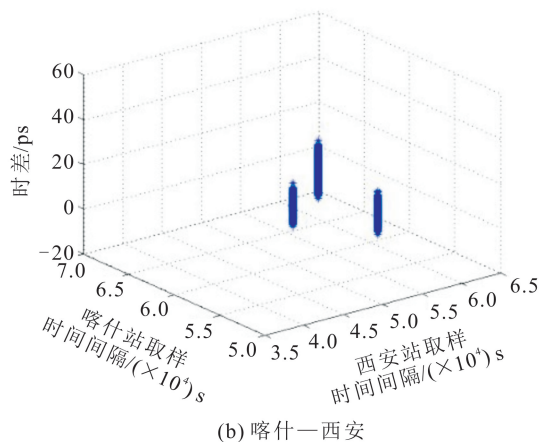
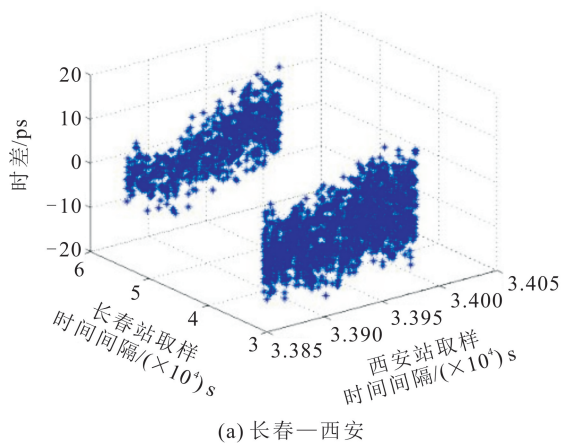


图 11 空间站共视时间比对仿真结果图

2021 年,空间站时频实验系统的地面测试系统工程建设启动,2023 年完成相关设备部署,西安、北京和上海 3 个地面站具备支持开展空间站共视时间比对实验条件,目前仍在系统调试中。

## 8 结语

回顾我国卫星共视时间比对技术四十余年的发展历程,是一部从技术引进消化吸收,到自主创新局部领先的奋斗史。从最初引进 GPS 共视技术用于实验室间比对,到成功研制双频多系统共视接收机并建立 GNSS 精密时间服务系统;从实现北斗系统高精度国际时间比对,到率先发展近实时共视时间比对及应用技术,支撑 5G 通信等国家重大需求;从提出并验证精密共视新方法将时间比对 A 类不确定度提升至亚纳秒量级,到开创性地探索基于空间站的分时共视时间比对技术瞄准 10 ps 量级目标,中国科研工作者在共视时间比对领域完成了一系列标志性的跨越。

这一系列成就的取得,得益于国家对时间频率科技的高度重视和持续投入,凝聚了几代科研人员的不懈努力和集体智慧。北斗卫星导航系统的建成与发展,也为自主可控的高精度时间传递提供了核心支撑。

面向未来,随着北斗系统性能的持续提升、精密共视技术的工程化应用、空间站分时共视实验的深入开展,以及量子精密测量等前沿技术的融合,我国有望在超高精度、高可靠、广域覆盖的时间频率传递领域取得更大突破。这将不仅为下一代通信、智能电网、精准导航、深空探测等国家重大战略需求提供更坚实的时间服务基础,也必将进一步提升我国在国际时间频率领域的科技竞争力和话语权。

## 参考文献:

- [1] ALLAN D W, WEISS M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C]//34th Annual Frequency Control Symposium, Washington DC: Electronic Industries Association, 1980: 334-346.
- [2] 施正范. GPS 共视法时间同步的飞行搬钟法验证[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1988(Z1): 65-68.
- [3] 李宗扬, 施正范. 中国首次 GPS 共视法时间传递与同步试验[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1988(Z1): 42-51.
- [4] 吴贵臣, 和翠英, 董绍武. GPS 共视法时间比对在陕西天文台的建立[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1993, 16(1-2): 12-16.
- [5] 王正明. 关于 GPS 测时精度与共视问题[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1998, 21(2): 17-22.
- [6] 杨旭海. GPS 共视时间频率传递应用研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2003.
- [7] 高玉平, 漆溢, 王正明. 多通道单频 GPS 时间传递接收机 NTSC GPS-1 的性能分析[J]. 时间频率学报, 2003, 26(2): 136-143.
- [8] 张越, 高小珣, 高源, 等. 多通道 GPS 共视法时频传递接收机的研制[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(5): 35-39.
- [9] 高小珣, 高源, 张越, 等. GPS 共视法远距离时间频率传递技术研究[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 80-83.
- [10] 李变. GPS 共视中电离层时延计算方法比较研究[J]. 时间频率学报, 2009, 32(1): 56-62.
- [11] 高玉平, 王正明, 漆溢. GPS 共视比对技术在综合原子时中的应用[J]. 时间频率学报, 2004, 27(2): 81-86.
- [12] 高玉平, 漆溢, 王正明. 用于 JATC 远程时间比对的双频 GPS 接收机[J]. 时间频率学报, 2006, 29(1): 6-12.
- [13] 王平利, 程华军, 林思佳, 等. 基于 GNSS CV 的精密时间服务系统的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2012, 35(3): 137-142.
- [14] 林思佳, 王玉林, 王平利, 等. GNSS CV 精密时间服务系统的可靠性改进[J]. 时间频率学报, 2013, 36(2): 84-91.
- [15] 朱张林, 高玉平, 王平利, 等. 基于网络的 GNSS 共视时间比对数据传输系统的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 13-20.
- [16] 左飞. 新型的远程时间频率校准系统[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [17] 梁坤, 郝爽雨. NIMDO 远程时间溯源装置—构建精准时间溯源传递体系[J]. 科技纵横, 2019(7): 78-79.
- [18] 龙波, 王菊凤, 黄徐瑞晗, 等. 基于 NIMDO 及光纤传递的高精度时间同步系统研究[J]. 计量学报, 2019, 40(5): 904-909.
- [19] 班亚, 袁静, 罗浩. 基于 NIMDO 的精密时间频率溯源系统[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(7): 21-24+76.
- [20] 丁超, 范军华, 郁黎, 等. 基于 NIMDO 时间频率计量标准的构建[J]. 计量科学与技术, 2021(7): 3-8.
- [21] XU L X, LI X H, XUE Y R, et al. Study of a new one-way timing method[J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2012(12): 2476-2481.
- [22] XU L X, LI X H, XUE Y R. A new timing method based on common-view[C]//International Frequency Control Symposium, Baltimore: IEEE, 2012.
- [23] 王翔, 李孝辉, 刘娅, 等. 远程时间校准系统中心站处理软件设计[C]//第三届中国卫星导航学术年会, 广州:

- 中国卫星导航学术年会组委会, 2012.
- [24] HE T, ZHANG H J, LI X H, et al. Realization and performance analysis of time and frequency remote calibration system[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 245: 445-456.
- [25] 陈瑞琼, 刘娅, 杨莹, 等. 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.
- [26] 刘娅. 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.
- [27] 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): 7.
- [28] 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.
- [29] SHERMAN J A, ARISSIAN L, BROWN R C, et al. A resilient architecture for the realization and distribution of coordinated universal time to critical infrastructure systems in the United States[EB/OL]. (2021-09-01) [2025-7-02]. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN2187>.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] GUANG W, DONG S W, WU W J, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 175-187.
- [33] WEI P, YANG C Z, YANG X H, et al. Common-view time transfer using geostationary satellite[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2020, 67(9): 1938-1945.
- [34] 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.
- [35] 董孝松, 孙保琪, 杨海彦, 等. GNSS实时动态授时精度分析[J]. *中国空间科学技术*, 2021, 41(6): 34-41.
- [36] 韩晓红, 孙保琪, 张喆, 等. 基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递[J]. *导航定位与授时*, 2023, 10(4): 103-111.
- [37] 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.
- [38] ZHOU H Y, SUN B Q, SUN L Y, et al. Accuracy analysis of BeiDou-3/GPS real-time precise common view time transfer based on carrier-phase[C]//China Satellite Navigation Conference Proceedings, Berlin, Heidelberg: Springer, 2024, 1094: 432-444.
- [39] 丁硕. 基于北斗 GEO 卫星的精密共视时间频率传递方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
- [40] 刘音华, 李孝辉. 超高精度空间站共视时间比对新方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(19): 190601(1-11).
- [41] 刘音华, 李孝辉. 轨道误差对空间站高精度时间比对的影响分析及修正方法[J]. *宇航学报*, 2019, 40(3): 345-351.
- [42] 刘音华. 空间站和罗兰共视时间比对方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [43] 刘音华, 陈瑞琼, 刘娅, 等. 空间站和 GNSS 共视的差别及精度对比分析[J]. *宇航学报*, 2022, 43(10): 1389-1398.