

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.04.001

卫星授时与时间传递技术进展

杨旭海^{1,2}, 李孝辉^{1,2}, 华宇^{1,2}, 荆文芳^{1,2}, 孙保琪^{1,2},
李伟超^{1,2}, 钦伟瑾^{1,2}, 武美芳¹, 王伟¹, 赵坤娟¹

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600; 2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要:近年来, 卫星导航技术发展迅速。卫星导航系统以精密时间测量技术为基础, 实现了伪距测量, 进而实现定位。同时, 卫星导航系统还提供了高精度授时功能。综述了卫星导航系统的授时和时间频率传递技术、基于通信卫星的授时技术以及双向卫星时间频率传递(TWSTFT)技术等。随着我国北斗卫星导航系统(BDS)的建成和提供服务, BDS授时应用研究正在快速发展。基于BDS/GNSS多系统的精密单点定位(PPP)时间传递技术已成为重点研究方向, 未来将会应用于国际时间比对。同时, 随着卫星通信技术尤其是低轨通信卫星技术的快速发展, 低轨通信卫星授时会成为一个有潜力的研究方向。

关键词:北斗卫星导航系统; GPS; 卫星通信; 卫星授时; 时间传递

中图分类号: P127.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)04-0001-10

Technical Progress of Satellite Time Service and Time Transfer

YANG Xu-hai^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2}, HUA Yu^{1,2}, JING Wen-fang^{1,2}, SUN Bao-qi^{1,2},
LI Wei-chao^{1,2}, QIN Wei-jin^{1,2}, WU Mei-fang¹, WANG Wei¹, ZHAO Kun-juan¹

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

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In recent years, satellite navigation technology has developed rapidly. The satellite navigation system is based on precise time measurement technology, and on this basis, pseudo-range measurement is realized, and then positioning is realized. Meanwhile, the satellite navigation system also provides high-precision time service functions. This article summarizes the timing technology and time frequency transfer technology based on satellite navigation system. The timing technology and the Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer(TWSTFT) technology based on communication satellites are reviewed. With the completion and services provision of the BeiDou Satellite Navigation System (BDS), the BDS timing applications are developing rapidly. The Precise Point Positioning(PPP) time transfer technology based on BDS/GNSS (Global Navigation Satellite System) multi-system becomes a key research direction and will be applied to international time comparison in the future. And with the rapid development of satellite communication technology, especially low-orbit communication satellites technology, low-orbit communication satellites timing may become a potential research direction.

Key words: BeiDou Satellite Navigation System (BDS); Global Positioning System (GPS); Satellite communication; Satellite time service; Time transfer

收稿日期: 2021-06-06; **修订日期:** 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12073034); 中国科学院“一带一路”团队项目(XAB2018YDYL01)

作者简介: 杨旭海(1972-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事卫星测定轨与时频传递技术方面的研究。

0 引言

卫星授时一般是指利用卫星平台通过无线电方式将标准时间广播出去,这样广大用户即可通过接收机得到标准时间。卫星授时属于广域高精度的授时方式,动态用户也可以使用,拥有非常广大的用户群体。时间传递一般是指通过测量和计算,得到位于异地的两台钟的钟差。并且,时间传递一般是对发端而言的,是指发端将时间传递给收端。本文重点讨论了站间的卫星时间传递,它属于高精度远距离的时间传递方式,目前已经广泛使用。

本文概述了卫星授时与卫星时间频率传递技术的进展,主要包括三类:第一类是基于通信卫星的授时技术,主要包括转发式授时技术和数字卫星电视授时技术;第二类是基于卫星导航系统的授时技术^[1-2],主要包括全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)标准授时技术、GNSS精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)授时技术^[3-4]、基于共视(Common View, CV)原理的卫星授时技术和基于卫星导航系统的精密授时技术;第三类是国际权度局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)用于国际时间比对的高精度时间传递技术,主要包括全球定位系统(Global Positioning System, GPS)共视时间频率传递技术和双向卫星时间频率传递(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)技术^[5-6]。其中, GPS 共视时间频率传递技术,按照发展历程进行分类,包括 GPS 单通道共视、GPS 多通道共视、GPS 全视以及 GPS PPP 时间传递技术。最后,对卫星时间频率传递和授时技术的发展趋势进行了分析和展望。需要说明的是,本文只概述了一些目前常见的技术,而这一领域的很多新技术正在快速发展之中。

1 基于通信卫星的授时技术

1.1 转发式授时

转发式授时技术是基于通信卫星来实现的,目前主要使用地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星^[7]。如图1所示,转发式授时的地面主控站配备了高性能氢原子钟,并与国家标准时间(Coordinated Universal Time, UTC/National Time Service Center, NTSC, UTC(NTSC))建立了高精度的连接。在地面站氢钟的控制下,地面主控站生成专用伪码信号和载波信号,并向 GEO 通信卫星发射,经卫星转发器转发

后,向用户广播。静态用户接收机(站坐标已知)在本地进行伪距测量,在得到卫星轨道和虚拟星载钟信息后,解算出用户时间,从而实现国家标准时间的授时。

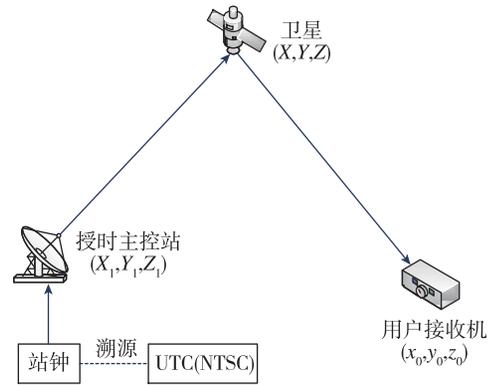


图1 转发式授时基本原理

Fig. 1 Principle of time service by transfer tracking

下面针对图1,进一步描述了转发式授时的基本原理,即采用伪码广播方式的转发式授时。授时主控站的站钟溯源到 UTC(NTSC),在扣除主控站到卫星的上行路径时延后,即可得到虚拟星载钟。对于用户接收机而言,与 GPS 的单星授时方式类似,即

$$\rho = \sqrt{(X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2 + (Z - z_0)^2} + \Delta t \quad (1)$$

其中, ρ 为伪距观测量; (X, Y, Z) 为卫星位置坐标; (x_0, y_0, z_0) 为用户接收机天线坐标^[8]。在静态授时情况下,卫星坐标和用户接收机天线坐标均已知,因此可以解算得出用户钟与虚拟星载钟的钟差 Δt , 进一步归算到用户钟与国家标准时间 UTC(NTSC)的钟差,从而实现转发式授时。

在转发式授时技术体系中,发明了转发式测定轨技术^[9-11],解决了 GEO 通信卫星的精密测定轨问题;提出了虚拟星载钟方法,解决了通信卫星上没有原子钟的难题;提出了地面产生导航信号的码和载波精密控制方法,使无星载钟的通信卫星时频性能优于 10^{-14} 量级。主要基于上述三种方法,实现了基于伪距测量的转发式授时技术,进而,基于 GEO 通信卫星和载波相位数据,通过高精度伪码辅助,解决了载波相位模糊度固定问题^[12],实现了基于 GEO 通信卫星的精密授时技术。

试验结果表明:实现的广播式授时精度伪码优于 8ns,载波相位优于 2ns;实现的远距离转发式共视授时精度为 2~3ns。

转发式授时技术的特色与优势如下:

1) 只需要租用通信卫星的透明转发器,即可实现精密授时,并具有通信授时一体化的优点;

2) 采用 C 波段测距,电离层影响可降低到 L 波段的近 1/10;

3) 时频基准设备放置在地面,便于和标准时间高精度连接,维护升级更为方便;

4) 导航信号在地面产生,具有更强的灵活性、可配置性和可重构能力。

1.2 数字卫星电视授时技术

卫星电视授时技术是利用卫星电视信号进行标准时间发播的授时技术。我国在早期曾发明模拟电视授时技术,并投入应用。随着卫星电视从模拟向数字体制的转变,近年来,国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)发明了数字卫星电视授时技术。该技术在上行站端,利用标准时间对节目时钟参考(Program Clock Reference, PCR)计数器进行时间标记,在用户端记录该 PCR 的本地时间,同时接收电文中的卫星星历来计算整个链路的传输时延。试验结果表明:该技术的单向授时精度优于 100ns,如果再附加广域差分技术,授时精度可优于 20ns^[13]。

数字卫星电视授时技术的基本原理是利用电视信号中的 PCR 字段作为信号传播时延测量的参考信号,即在数字卫星电视上行站和用户接收机端同时记录每个 PCR 出现的精确时刻,相同 PCR 对应的时刻值之差就是电视信号从上行站到电视卫星再到接收机的伪距。借助于测定轨手段得到了卫星轨道,并且已知上行站位置和用户接收机位置,可以计算出信号从上行站到卫星再到用户接收机的传播时延。扣除该传播时延后,可以得到用户接收机与上行站时钟的钟差,而上行站时钟可以高精度溯源到国家标准时间,从而实现国家标准时间的授时。

2 卫星导航系统的授时技术

2.1 GNSS 标准授时

GPS 的两大主要功能:标准定位(Standard Point Positioning, SPP)和授时。这里的标准定位和授时,是指基于伪距测量并使用广播电文(含广播星历、广播星钟等)^[14-15]来实现的定位和授时^[16-17]。用户接收机同时接收 4 颗以上 GPS 卫星信号,可实现对接收机的定位,并解算出用户接收机钟与 GPS 系统时间(GPS Time, GPST)的差(即实现授时)。对于静态授时用户(用户接收机的天线固定不动),可以事先输入

高精度的接收机天线坐标,这样接收机只要收到 1 颗以上卫星信号,就可以得到用户接收机钟与 GPST 的钟差。该方法也称为单向法时间传递,时间传递准确度约在几十纳秒量级。

北斗卫星导航系统(BeiDou Satellite Navigation System, BDS)同样具备标准的定位和授时功能,并且充分发挥了后发优势,在星座组成(是 GEO/倾斜地球同步轨道(Inclined GeoSynchronous Orbit, IGSO)/中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)混合星座)、星载原子钟和星间链路等方面有很多技术创新^[18-22]。

2.2 GNSS PPP 授时

GNSS PPP 主要使用载波相位和伪距观测数据,并结合国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)组织提供的高精度轨道和星钟差等产品来实现 PPP 方式的定位和授时^[23]。对于静态的精密授时用户,可事先输入接收机天线坐标,可以更好地开展 PPP 授时。

国际 GNSS 监测评估系统(international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS)是我国倡议并主导研制的一套系统,它借鉴了 IGS 的一些成功经验,并提供更为广泛的科学产品服务以及监测评估功能。iGMAS 在全球建设约 30 个核心跟踪站,基本均匀分布。iGMAS 在 2020 年底已经建成。随着北斗三号的全面建成并提供服务,在 iGMAS 支持下,利用 BDS 开展 PPP 授时研究与应用也在快速发展^[24]。

PPP 技术是近些年的研究热点,在模糊度固定和精度提高等方面涌现出很多研究成果^[25-28]。通过站钟模型的约束,可以有效改善定位的高程精度^[29],也可以提高 PPP 授时精度^[30]。

2.3 基于共视原理的卫星授时

国家授时中心李孝辉研究员等提出了基于共视原理的卫星授时方法^[31],将共视原理应用于卫星授时,将授时精度由普通单向授时的 20ns 提高到 3~5ns。

以国家授时中心产生的国家标准时间为基准^[32],监测 GNSS 广播的时间与我国标准时间的时差并实时广播,用户利用卫星导航系统的单向授时测量本地时间与 GNSS 广播时间的偏差,基于国家授时中心的监测数据,就可以获得本地时间与国家标准时间的偏差。这个过程通过单向授时和数据改正实现了与国家标准时间的共视,进而实现了基于共视原理的单向授时,授时精度与共视时间比对相同。

为解决授时误差随用户远离主站而增加的难题,提出了基于码相位的大范围虚拟共视基准站方法,可以在整个覆盖区域内实现高精度授时,能实现近零基线的比对,将 GNSS 的授时精度提高到 3~5ns, 100km 内用户之间的相对时间同步精度为 1ns。为实现系统的独立性,使用广播链路和测距源融合共用方法,最终实现的授时方法不但可以提高 GNSS 的授时精度,还可以脱离 GNSS 实现独立高精度授时。

该方法不但能提高授时精度,也能提高用户的定位精度,满足我国对高精度卫星授时的急需,并且多系统联合使用还可以增强授时系统的鲁棒性和可靠性。该方法具有几个特征:1)将共视方法和虚拟基准站方法进行改进,可以应用于卫星授时,提高授时精度;2)利用 GNSS 为媒介,进行我国标准时间的广播;3)授时系统可以脱离 GNSS,独立提供高精度授时功能。

这种授时新方法具有重要的意义,首先该方法比目前 GPS 卫星单向授时的精度提高 4 倍,满足高端用户的需要;其次是以 GPS、GLONASS 和 BDS 为媒介进行我国标准时间的广播,解决了我国对高精度卫星授时的急需;第三是使用多个卫星导航系统的信号,并且具备独立运行能力,在其中一个系统异常时

可以使用其他系统,提高了授时系统的可靠性。

2.4 基于卫星导航系统的精密授时

国家授时中心杨旭海、孙保琪和武美芳提出了基于卫星导航系统的精密授时(Precise Time Service, PTS)方法。该方法依托 BDS,以 iGMAS 作为平台,将位于国家授时中心的 iGMAS 跟踪站和国家授时中心保持的标准时间 UTC(NTSC)连接,并以其为参考钟,测量并归算所有星钟相对于 UTC(NTSC)的实时星钟差^[33-36],连同超快速轨道一起作为实时精密信息,通过卫星或网络播发给用户接收机。用户端采用实时 PPP 方式解算出用户站钟相对于 UTC(NTSC)的钟差,从而实现标准时间的精密授时^[36]。对于静态授时情况,可以事先精确测定站坐标,作为强约束条件,这样可以只解算站钟差,从而提高授时精度。

基于卫星导航系统的 PTS 静态授时具有重要意义和应用前景。如图 2 所示,该技术基于 iGMAS 平台归算以 UTC(NTSC)为参考的 BDS 实时星钟差产品,用户通过实时 PPP 时间传递方法实现精密授时,得到用户与标准时间 UTC(NTSC)的钟差,静态授时精度为亚纳秒量级(也可以进行动态授时,目前正在试验研究当中)^[36]。

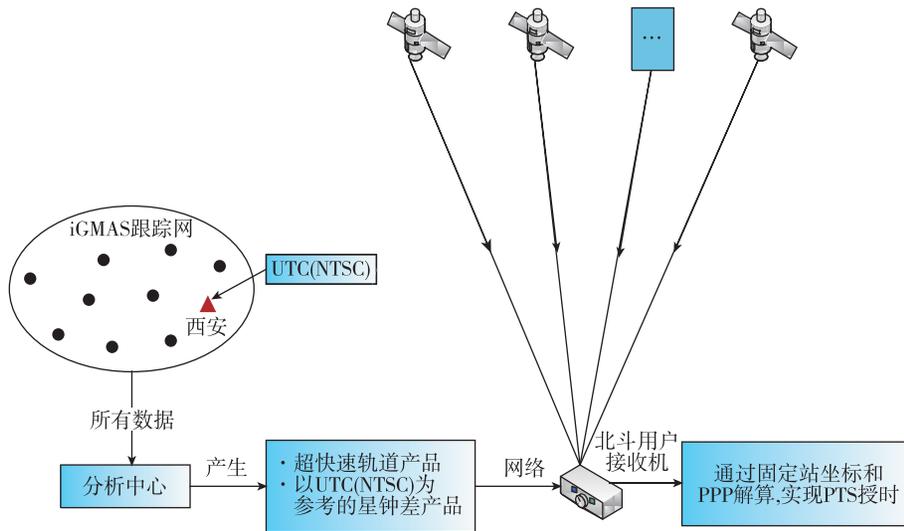


图 2 PTS 授时原理

Fig. 2 Principle of precise time service(PTS)

3 BIPM 体系的时间频率传递技术

3.1 GNSS 共视时间频率传递技术发展

GNSS 共视时间频率传递技术主要经历了 GPS 单通道共视、GPS 多通道共视、GPS 全视和 GPS

PPP 时间传递等发展阶段^[37]。

1) GPS 单通道共视

在 1980 年国际频率控制年会上,Allan 提出了 GPS 共视(GPS CV)时间传递方法^[38]。GPS CV 早期使用的是单通道共视方式。与单向法时间传递(即单向授时)不同的是,GPS CV 是使用两站来同

时观测同一颗卫星,将两站各自的单向时间传递结果互差后,便可得到两站之间的钟差。该方法的优点是两站观测同一颗卫星,可以抵消公共的卫星钟差,也可以部分抵消掉卫星的星历误差和传播过程中的电离层误差,提高了该方法的时间传递精度。该方法自提出之后,很快成为国家级时频实验室高精度时间传递的主要技术手段。从 20 世纪 90 年代中期开始,BIPM 用 GPS CV 处理全世界约 50 个时间实验室的观测资料,以归算国际原子时(International Atomic Time,TAI)。但该方法也有自己的局限性,在开展两站之间的共视比对时,要求两站必须同时对卫星可视;另外,当两站距离增加时,两站电离层相关性降低,会影响 GPS CV 时间传递精度。

顾名思义,GPS CV 时间传递是指两站同时观测同一颗 GPS 卫星,实现两站之间的时间传递。假设 2 个共视接收机分别安装在观测站 A 和 B,两站的坐标需要精确测定,共视接收机的设备时延也需要精确测量。传统的 GPS CV 时间传递使用的是伪码观测数据和 GPS 广播星历,在 1000km 基线内,站间时间传递准确度一般可达 $2\sim 3\text{ns}$;在 1000~2000km 基线上,一般可达 $3\sim 5\text{ns}$ 。

2)GPS 多通道共视

在 GPS 单通道共视方法的基础上,发展了 GPS 多通道共视,主要采用了 GPS 多通道接收机,每个站可收到天空所有卫星。为了站间能够共视,BIPM 推荐了共视比对表,便于大家观测。多通道共视的优势主要在于增加了冗余观测,通过最小二乘原理求解超定方程,提高了站间时间传递精度。

3)GPS 全视

2004 年,Petit 和江志恒提出了 GPS 全视(All in View,AV)时间传递技术^[39],该方法不再使用卫星时间作为公共参考,而使用 GPST(或 IGST)作为公共参考,2 个观测站都计算本地时间与 GPST(或 IGST)的时差,并交换数据作差得到两站之间的钟差,结果不受两站间距离的限制,不需要同时观测同一颗 GPS 卫星。2006 年,GPS AV 被正式用于 BIPM 的 TAI 计算。

4)GPS PPP 时间传递

无论是 GPS CV 还是 GPS AV,观测量都是伪距观测值,这也从根本上限制了其精度。GPS PPP 技术基于载波相位观测数据,使用 IGS 等提供的精密轨道和星钟等产品,实现精密定位和授时。随着 PPP

技术的不断发展和完善,学者们开始研究将 PPP 应用于时间传递,并取得了很多研究成果。1998 年 3 月,IGS 和 BIPM 为了推动 GPS PPP 时间传递技术研究,组织了专门的试验攻关。随着 IGS 产品精度的不断提高,进一步推动了 GPS PPP 时间传递技术的发展。

BIPM 使用 PPP 时间传递进行国际时间比对并归算 UTC 和 TAI,其基本过程是,事先准确测定各守时实验室接收机天线的位置(静态应用)作为先验信息,解算站钟差,其具体含义是站钟 $UTC(k)$ 相对于 IGST(IGS Time Scale,IGS 自己推出的一个时间尺度,比 GPST 的性能更好,作为 IGS 产品的参考^[40])的偏差。在此基础上,BIPM 进一步归算出各守时实验室的 $UTC(k)$ 和德国技术物理研究所(Physikalisch Technische Bundesanstalt,PTB)保持的 UTC(PTB)之间的钟差,最后再归算 UTC 和 TAI(UTC 和 TAI 都是事后产品)。BIPM 目前 PPP 时间传递(事后处理模式)的稳定度优于 0.3ns 。

2015 年开始,BIPM 发展了可固定模糊度的 PPP 时间传递技术,即 IPPP 时间传递技术^[41],与 PPP 时间传递相比精度明显改进。其实现途径之一就是通过网络解来解算星上的硬件时延,通过星间单差消掉地面接收机的硬件时延,从而恢复了模糊度的整周特性,在此基础上可以固定模糊度。

在 PPP 时间传递当中,接收机硬件延迟标定精度直接影响时间传递的准确度。接收机硬件延迟标定方法主要包括:绝对标定方法和相对标定方法^[42]。其中,相对标定方法使用的更多一些,它测量的是两站接收机硬件延迟的差。在国际时间比对当中,一般使用一台标校接收机到各守时实验室进行巡回标定。

我国北斗三号在 2020 年底已经全面建成并提供全球服务,iGMAS 已经可以提供精密轨道和钟差等精密产品。在 iGMAS 数据产品的支持下,利用我国 BDS 开展 PPP 和 PPP 时间传递,条件已经成熟,这方面技术研究发展迅速。

3.2 TWSTFT 技术进展

1)国际卫星双向时间比对

通过 GEO 卫星的 TWSTFT 和 GPS CV 是目前 BIPM 进行国际时间比对所采用的两种主要方法^[43]。其中,TWSTFT 方法由于信号传递路径对称,链路上所有传播路径的时延几乎都可以抵消,因而时间传递精度高。目前,TWSTFT 准确度可

达 500~750ps, 稳定度可达 200ps^[44]。

基于 GEO 卫星的 TWSTFT 原理如图 3 所示。

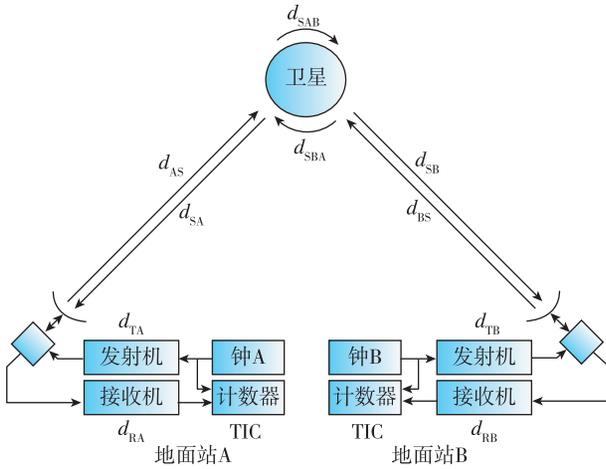


图 3 TWSTFT 原理图

Fig. 3 Schematic of TWSTFT

TWSTFT 的计算方法如下

$$\text{TIC}(A) = A - B + d_{TB} + d_{BS} + d_{SBA} + d_{SA} + d_{RA} + S_B \quad (2)$$

$$\text{TIC}(B) = B - A + d_{TA} + d_{AS} + d_{SAB} + d_{SB} + d_{RB} + S_A \quad (3)$$

这里 TIC(A) 和 TIC(B) 是时间间隔计数器的读数; A 和 B 是两站各自的钟面时间; d_{xx} 是各自的传播时延; S_A 和 S_B 是 Sagnac 效应改正。

式(2)和式(3)再移项得到两站钟差表达式如表 1 所示。

表 1 TWSTFT 站间钟差表达式

Tab. 1 Formular for between-station clock differences in TWSTFT

$A - B = [\text{TIC}(A) - \text{TIC}(B)] / 2$	计数器读数
$+ (d_{TA} - d_{RA}) / 2 - (d_{TB} - d_{RB}) / 2$	地面站设备时延部分
$+ (d_{AS} - d_{SA}) / 2 - (d_{BS} - d_{SB}) / 2$	空间传播时延
$+ (d_{SAB} - d_{SBA}) / 2$	卫星时延
$- 2\omega Ar / 2$	Sagnac 效应 ($- 2\omega Ar / 2$ 相当于 $- S_B$ 或 $+ S_A$)

在表 1 右列, 第一行表示计数器读数的计算。第二行表示地面站设备时延的计算, 可通过事先测量得到。第三行表示空间传播时延的计算。空间传播时延包括 3 个部分: 几何路径时延、电离层时延和对流层时延。对流层时延可以完全抵消, 电离层时延在使用 Ku 波段时基本上可以抵消, 在使用频率较低的波段时需要考虑。第四行表示卫星端时

延的计算, 可以完全抵消。第五行表示 Sagnac 效应的计算, 可通过公式准确计算。

1999 年开始, TWSTFT 方法被用于 TAI 和 UTC 的计算。美国、欧洲和亚洲均已组建了卫星双向比对网。亚太网由中国科学院国家授时中心和日本国家信息通信技术研究所(National Institute of Information and Communication Technology, NICT)等组成。

在中国科学院和科技部支持下, 国家授时中心在国内最早建立了双向卫星时间比对系统, 参加国际卫星双向比对, 并开展相关技术研究^[45]。国家授时中心从 1998 年起和日本的通信综合研究所(现更名为“国家信息通信技术研究所”)开始建立卫星双向时间频率传递链路, 2001 年开始观测数据正式加入 TAI 和 UTC 计算, 成为国际高精度时间比对链接的重要一环。目前, 国家授时中心已经与欧洲的 PTB 和荷兰计量研究所(VSL)建立了 TWSTFT 链接, 成为亚洲重要的国际 TWSTFT 站点。

ITU-R 250/7 课题(卫星双向授时与频率传递(TWSTFT)的应用和改进), 希望国际同行对 TWSTFT 时间传递准确度与射频载波频率的关系开展试验研究^[46]。国家授时中心李伟超研究员等设计了以下试验研究方法: 采用 2 套 TWSTFT 系统, 每小时改变一次射频载波频率进行双向比对, 由于这 2 套系统使用同一个时钟观测同一颗卫星, 2 个地面站天线相距只有几米^[47-48]。如果比对结果和射频载波频率有关系, 通过这个试验将能够反映出来。

图 4 中, 上面为 6.3GHz 的钟差, 下面为 6.0GHz 的钟差。每小时在 6.3GHz 和 6.0GHz 间更换一次射频频率。在本试验中, 使用不同频率进行双向比对会带来约 1.5ns 的系统差。

2) IGSO 卫星双向时间比对

与 GEO 卫星不同, 使用 IGSO 卫星进行 TWSTFT 时, 由于卫星运动使得信号上下行几何路径不对称(图 5), 将会影响 TWSTFT 的准确度。具体来讲, 由于两站时钟并未物理同步, 且两站到达卫星的距离不同, 因此两站信号到达卫星的时刻不同。在此时间间隔内, 卫星会发生运动, 引起路径不对称。

针对上述问题, 王伟和杨旭海等提出了以下两种解决方法^[49]: 1) 通过精密定轨, 使用精密轨道修正信号路径不对称误差; 2) 在常规 TWSTFT 的基础上, 两地面站分别增加自发自收通道, 实现测距

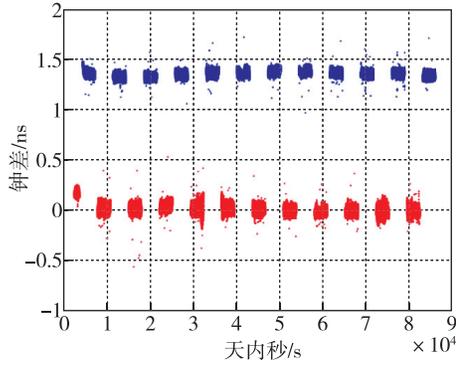


图 4 两站观测同一颗卫星,在不同射频载波频率下的 TWSTFT 时间传递结果

Fig. 4 TWSTFT timing results of the same satellite observed by two stations at different frequencies

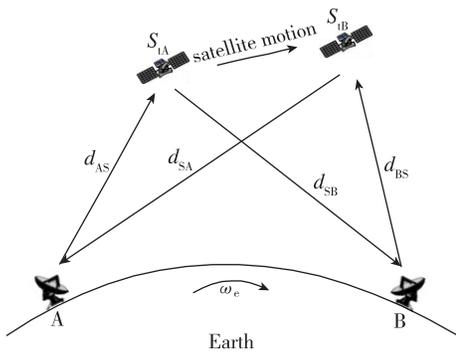


图 5 卫星运动引起 TWSTFT 几何路径不对称
Fig. 5 Geometric path asymmetry of TWSTFT caused by satellite motion

和测速功能,用于改正由卫星运动引起的误差。进而建立了基于 IGSO 卫星的 TWSTFT 方法。

理论分析和试验结果表明:通过上述方式修正后,采用 IGSO 卫星也可实现亚纳秒量级的卫星双向时间传递,拓展了 TWSTFT 方法的应用范围及覆盖区域。该方法可进一步拓展到其他快速运动的卫星,例如中低轨卫星。

4 卫星授时与时间传递技术发展分析

1) 卫星精密测定轨技术发展是卫星时间传递和授时技术发展的前提条件。

在卫星授时和基于共视思想的时间传递当中,需要使用精密卫星轨道作为支撑。在使用 GEO 卫星的双向卫星时间传递当中,由于采用了双向对消,不需要高精度轨道。但在基于 IGSO 卫星的双向时间传递当中,仍需要使用轨道进行改正。因此,一般来讲,卫星精密测定轨技术发展是卫星时

间传递和授时技术发展的前提条件。

2) BDS 建成后, BDS 授时应用研究已成为重要的发展方向。

随着我国 BDS 的建成和提供服务, BDS 授时及其应用技术研究进入了快速发展阶段。 BDS 授时应用、 BDS/GNSS 授时应用、 BDS/5G 联合授时应用、 BDS 授时与地基授时的融合发展, 以及 BDS 卫星授时的安全可靠研究等, 都是重要的研究发展方向^[50]。

3) 北斗 PPP 时间传递技术的研究和应用将成为重要方向, GPS/BDS 等多系统 PPP 时间传递技术研究已成为重要研究方向, 未来将应用于国际时间比对。

在 BIPM 国际时间比对中, 目前主要使用 GPS PPP 时间传递。随着 iGMAS/GNSS 多系统试验跟踪网(Multi-GNSS Experiment, MGEX)的发展, 提供了精密的北斗轨道和星钟产品, 为该领域的科学研究奠定了基础。在此基础上, BDS PPP 时间传递会快速发展。随着 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 等卫星导航系统的发展, GPS/BDS 等多系统 PPP 时间传递技术已经成为非常重要的研究方向, 未来将应用于国际时间比对。

4) 利用低轨通信卫星开展授时研究是一个很有意义的探索。

一种新的通信技术可能会萌生一种新的授时技术, 且随着卫星通信技术尤其是低轨通信卫星的快速发展, 探索如何利用低轨通信卫星授时是一项很有意义的研究工作。

参考文献

- [1] 杨俊, 单庆晓. 卫星授时原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Yang Jun, Shan Qingxiao. Satellite timing principle and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013(in Chinese).
- [2] 周善石, 胡小工, 刘利, 等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展[J]. 天文学报, 2019, 60(4): 59-68.
Zhou Shanshi, Hu Xiaogong, Liu Li, et al. Status of satellite orbit determination and time synchronization technology for global navigation[J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(4): 59-68(in Chinese).
- [3] Basile F, Moore T, Hill C, et al. Two are better than one: multi-frequency precise point positioning using GPS and Galileo[J]. GPS World, 2018, 28(10):

- 27-37.
- [4] Ge Y L, Dai P P, Qin W J, et al. Performance of multi-GNSS precise point positioning time and frequency transfer with clock modeling [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 347.
- [5] 李志刚, 李焕信, 张虹. 卫星双向法时间比对的归算 [J]. *天文学报*, 2002, 43(4): 422-431.
Li Zhigang, Li Huanxin, Zhang Hong. Reduction for the two-way satellite time and frequency transfer [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2002, 43(4): 422-431 (in Chinese).
- [6] 江志恒. GPS 全视法时间传递回顾与展望 [J]. *宇航计测技术*, 2007(S1): 53-71.
Jiang Zhiheng. Review and perspective of GPS all in view time transfer [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007(S1): 53-71 (in Chinese).
- [7] 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 基于通信卫星的定位系统原理 [J]. *中国科学(G 辑: 物理学力学天文学)*, 2008, 38(12): 1615-1633.
Ai Guoxiang, Shi Huli, Wu Haitao, et al. Principle of positioning system based on communication satellite [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2008, 38(12): 1615-1633 (in Chinese).
- [8] Han C H, Yang Y X, Cai Z W. BeiDou navigation satellite system and its time scales [J]. *Metrologia*, 2011, 48(4): S213-S218.
- [9] 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法 [J]. *中国科学(G 辑: 物理学力学天文学)*, 2008, 38(12): 1711-1722.
Li Zhigang, Yang Xuhai, Shi Huli, et al. A new method for orbit determination of transfer mode satellite [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2008, 38(12): 1711-1722 (in Chinese).
- [10] Harmegnies A, Defraigne P, Petit G. Combining GPS and GLONASS in all-in-view for time transfer [J]. *Metrologia*, 2013, 50(3): 277-287.
- [11] 杨旭海, 丁硕, 雷辉, 等. 转发式测定轨技术及其研究进展 [J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 216-224.
Yang Xuhai, Ding Shuo, Lei Hui, et al. Research progress of the technology of orbit observation and determination via transfer (OODT) [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2016, 39(3): 216-224 (in Chinese).
- [12] Feng Y M, Rizos C. Network-based geometry-free three carrier ambiguity resolution and phase bias calibration [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 43-56.
- [13] 华宇, 郭伟, 燕保荣, 等. 我国授时服务体系发展现状分析 [J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 193-201.
Hua Yu, Guo Wei, Yan Baorong, et al. Developing status of national time service architecture [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2016, 39(3): 193-201 (in Chinese).
- [14] Yao J. Continuous GPS carrier-phase time transfer [D]. University of Colorado Boulder, 2014.
- [15] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型 [M]. 北京: 测绘出版社, 1998.
Wei Ziqing, Ge Maorong. Mathematical model of GPS relative positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1998 (in Chinese).
- [16] 施闯, 楼益栋, 宋伟伟, 等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(11): 1271-1274.
Shi Chuang, Lou Yidong, Song Weiwei, et al. A wide area real-time differential GPS prototype system and the initial results [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1271-1274 (in Chinese).
- [17] 陈俊平, 周建华, 严宇, 等. GNSS 数据处理时空参数的相关性 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(11): 1649-1657.
Chen Junping, Zhou Jianhua, Yan Yu, et al. Correlation of spatial and temporal parameters in GNSS data analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1649-1657 (in Chinese).
- [18] Yang Y X. Introduction to BDS-3 [C] // Proceedings of IGS Workshop in Wuhan, 2018.
- [19] 吴海涛, 李变, 武建锋, 等. 北斗授时技术及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Wu Haitao, Li Bian, Wu Jianfeng, et al. BDS timing technology and its application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016 (in Chinese).
- [20] Defraigne P, Petit G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS time transfer [J]. *Metrologia*, 2015, 52(6): G1.
- [21] Yang C F. BeiDou builds, diversifies, expands [J]. *GPS World*, 2017, 28(12): 16-18.
- [22] Lu J, Guo X, Su C G. Global capabilities of BeiDou navigation satellite system [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(2): S19-S29.
- [23] Ge Y L, Ding S, Dai P P, et al. The method of BDS PPP time transfer considering clock modeling [C] // Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC-2020), 2020: 520-535.
- [24] Jiao W H, Ding Q, Li J W, et al. Monitoring and assessment of GNSS open services [J]. *Journal of Navi-*

- gation, 2011, 64(S1): S19-S29.
- [25] 张小红, 蔡诗响, 李星星, 等. 利用 GPS 精密单点定位进行时间传递精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 274-278.
Zhang Xiaohong, Cai Shixiang, Li Xingxing, et al. Accuracy analysis of time and frequency transfer based on precise point positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(3): 274-278(in Chinese).
- [26] Laurichesse D. Carrier-phase ambiguity resolution, handling the biases for improved triple-frequency PPP convergence[J]. GPS World, 2015: 42-49.
- [27] 李星星. GNSS 精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
Li Xingxing. Rapid ambiguity resolution in GNSS precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(in Chinese).
- [28] 秘金钟. GNSS 完备性监测理论与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
Bi Jinzhong. Theory and application of GNSS completeness monitoring [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2012(in Chinese).
- [29] Wang K, Rothacher M. Stochastic modeling of high-stability ground clocks in GPS analysis[J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(5): 427-437.
- [30] 于合理, 郝金明, 刘伟平, 等. 附加原子钟物理模型的 PPP 时间传递算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(11): 1285-1292.
Yu Heli, Hao Jinming, Liu Weiping, et al. A time transfer algorithm of precise point positioning with additional atomic clock physical model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(11): 1285-1292(in Chinese).
- [31] 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.
Xu Longxia. A new common-view based timing method [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2012(in Chinese).
- [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] 黄观文, 王浩浩, 谢威, 等. GNSS 实时卫星钟差估计技术进展[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 1-9.
Huang Guanwen, Wang Haohao, Xie Wei, et al. Technical progress of GNSS real-time satellite clock offset estimation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5): 1-9(in Chinese).
- [34] Yang X H, Ding S, Cheng X, et al. Application of TW-STFT: the technology of satellite Orbit Determination by Two-way Tracking (ODTT)[C]//Proceedings of 2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics(IFCS-ISAF). IEEE, 2020.
- [35] Qin W J, Ge Y L, Zhang Z, et al. Enhancing BDS-3 precise time transfer with DCB modeling[J]. Measurement, 2021, 174: 108641.
- [36] 武美芳. 基于 iGMAS 的精密授时方法关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
Wu Meifang. Research on key technologies of precise time service based on iGMAS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017(in Chinese).
- [37] Judah L. A review of time and frequency transfer methods[J]. Metrologia, 2008, 45(6): S162-S174.
- [38] Allan D W, Weiss M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C]//Proceedings of International Frequency Control Symposium. IEEE, 1980: 334-336.
- [39] Petit G, Jiang Z. GPS all in view time transfer for TAI computation[J]. Metrologia, 2008, 45(1): 35.
- [40] Senior K, Ray J. Results from the new IGS time scale algorithm[C]//Proceedings of AGU Fall Meeting, 2009.
- [41] Petit G, Kanj A, Loyer S, et al. 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution [J]. Metrologia, 2015, 52(2): 301-309.
- [42] 梁坤, 张爱敏, 高小珣. 时间频率传递 GPS 接收机内延迟差分校准技术研究[J]. 计量学报, 2012, 33(1): 77-80.
Liang Kun, Zhang Aimin, Gao Xiaoxun. Study on the differential calibration techniques for the internal time delays of the GPS receivers for time and frequency transfer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(1): 77-80(in Chinese).
- [43] Jiang Z H, Petit G. Combination of TWSTFT and GNSS for accurate UTC time transfer[J]. Metrologia, 2009, 46(3): 305.
- [44] 张升康, 杨文哲, 王学运, 等. 卫星双向时间频率传递研究进展[J/OL]. [2021-06-03]. 导航定位与授时, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1226.V.20210420.0952.002.html>.
- [45] 荆文芳, 卢晓春, 刘枫, 等. 卫星双向载波相位时间

- 频率传递及其误差分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(11): 1118-1126.
- Jing Wenfang, Lu Xiaochun, Liu Feng, et al. Two-way satellite carrier-phase time and frequency transfer and its error analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(11): 1118-1126(in Chinese).
- [46] The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes [S]. Recommendation ITU-R TF. 1153-3(03/2010).
- [47] Ding S, Wang W, Yang X H, et al. Performance evaluation on C-band TWSTFT network of national time service center[S]. The IEEE IFCS-ISAF, 2020.
- [48] 黄承强, 杨旭海, 陈亮. 卫星双向时间比对的设备时延标定方法[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 273-279.
- Huang Chengqiang, Yang Xuhai, Chen Liang. A calibration method of equipment time delay based on two-way satellite time comparison [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2015, 34(3): 273-279(in Chinese).
- [49] Wang W, Yang X H, Ding S, et al. An improved protocol for performing two-way satellite time and frequency transfer using a satellite in an inclined geosynchronous orbit [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2018, 65(8): 1475-1486.
- [50] 杨元喜, 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 4(5): 505-510.
- Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 4(5): 505-510(in Chinese).

(编辑:孟彬)