

引用格式:杨旭海,王海雪,王伟,等. 卫星双向时间频率传递技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 69-79.

卫星双向时间频率传递技术发展

杨旭海^{1,2,3}, 王海雪^{1,3}, 王伟¹, 韦沛^{1,†}, 李伟超¹, 刘娅^{1,2,3}, 吴华兵¹,
武文俊¹, 雷辉¹, 曹芬¹, 成璇¹, 李孝辉^{1,2,3}, 董绍武¹, 胡永辉¹, 李志刚¹

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:卫星双向时间频率传递(TWSTFT)是高精度远程时间传递的主要手段,我国的卫星双向时间传递始于1979年陕西天文台组织的中法卫星双向时间频率传递试验和1984年中意卫星的双向时间同步联合试验。1993年研制了卫星双向话音通道时间同步系统,精度为1 μ s。精度达到纳秒量级的卫星双向时间频率传递链路于1998年开通,实现了陕西天文台和日本通信综合研究所之间的常规时间比对,成为国际时间比对网亚太地区的重要链路。围绕TWSTFT性能提升,我国开展了持续的研究,2012年揭示了时间传递准确度与射频载波频率的关系,得到国际关注。2014年研制了双向移动校准站,实现了0.09 ns的校准精度,国际知名守时实验室也只实现0.3 ns的校准精度。2008年建成中国科学院国家授时中心(NTSC)和德国技术物理研究院(PTB)之间的常规TWSTFT链路,比对精度达0.3 ns。2016年在国家授时中心建成基于卫星双向软件定义接收机的TWSTFT系统,有效改善了洲际TWSTFT链路周日效应的影响。在TWSTFT技术基础上,国家授时中心发明了“转发式测定轨技术”,将地球静止轨道(GEO)卫星定轨精度提升至2 m。2015年将转发式测定轨技术从GEO扩展至倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星,定轨精度优于1 m;2016年提出了基于IGSO卫星的双向卫星时间传递方法,并成功开展试验验证,时间传递准确度为0.4 ns,提高了TWSTFT的适用性。

关键词:卫星双向时间频率传递;设备时延标定;移动站技术;软件定义接收机;转发式测定轨技术;地球静止轨道(GEO)卫星;倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0069-11

Development of the technology of two-way satellite time and frequency transfer

YANG Xu-hai^{1,2,3}, WANG Hai-xue^{1,3}, WANG Wei¹, WEI Pei^{1,†}, LI Wei-chao¹,
LIU Ya^{1,2,3}, WU Hua-bing¹, WU Wen-jun¹, LEI Hui¹, CAO Fen¹, CHENG Xuan¹,
LI Xiao-hui^{1,2,3}, DONG Shao-wu¹, HU Yong-hui¹, LI Zhi-gang¹

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: Two-way satellite time transfer (TWSTFT) is a primary method for high-precision long-

收稿日期:2025-08-17;接受日期:2025-11-15;†: weipei@ntsc.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12273047);国家自然科学基金重大项目(62394352)

作者简介:杨旭海,男,博士,主要从事世界时测量、卫星测定轨与时间传递研究。

distance time transfer. In China, this technology traces its origins back to 1979, with the two-way satellite time and frequency transfer experiment organized by the Shaanxi Astronomical Observatory in collaboration with France, followed by a joint Sino-Italian two-way time synchronization experiment in 1984. In 1993, a Two-Way Satellite Voice Channel Time Synchronization System was developed, achieving an accuracy of $1\ \mu\text{s}$. A two-way satellite time and frequency transfer link with nanosecond-level accuracy was established in 1998, enabling regular time comparison between the Shaanxi Astronomical Observatory and the Communications Research Laboratory (CSAO-CRL), becoming a key link in the Asia-Pacific region of the national time comparison network. Focusing on improving TWSTFT performance, China has conducted continuous research. In 2012, it revealed the relationship between time transfer accuracy and radio frequency carrier frequency, garnering international attention. By 2014, a two-way mobile calibration station was developed, achieving a calibration accuracy of $0.09\ \text{ns}$, while internationally renowned timing laboratories could only achieve $0.3\ \text{ns}$ calibration accuracy. In 2008, a routine TWSTFT link was established between China and Germany (NTSC-PTB), achieving a comparison accuracy of $0.3\ \text{ns}$. In 2016, a TWSTFT system based on two-way satellite software-defined receivers was completed at the National Time Service Center (NTSC) of Chinese Academy of Sciences, which effectively improved the influence of the diurnal effect on intercontinental TWSTFT links. Based on the TWSTFT principle, an original idea of orbit determination called “orbit determination by transfer tracking (ODTT)” was proposed by NTSC, achieving 2-meter orbital accuracy for geostationary orbit (GEO) satellites. In 2015, this technology was extended from GEO satellites to inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellites, improving orbit accuracy to better than 1 meter. In 2016, a two-way satellite time transfer method based on IGSO satellites was proposed, and experimental verification was successfully carried out. The accuracy of time transfer reaches $0.4\ \text{ns}$, which improves the applicability of TWSTFT.

Keywords: two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT); equipment delay calibration; mobile station technology; software-defined receiver (SDR); orbit determination by transfer tracking (ODTT); geostationary orbit (GEO) satellite; inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellite

卫星双向时间频率传递 (two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT) 是一种通过通信卫星双向传输时间信号, 实现远距离高精度时间频率传递的方法。其基本原理是利用信号传输路径的对称性抵消公共误差, 提高时间传递准确度。利用伪码/载波相位测量可实现亚纳秒级时间传递精度。其核心竞争力在于: 路径对称的误差抵消机制、实时高精度以及较强的抗干扰能力^[1]。

TWSTFT 技术起源于 20 世纪 60 年代, 首次的 TWSTFT 试验于 1962 年由美国海军天文台 (USNO) 和英国皇家物理实验室 (NPL) 通过 Telstar 卫星完成, 验证了该技术的可行性, 其精度达到 $0.1\sim 20\ \text{ms}$ 。这个精度在当时并没有吸引力, 但为后续发展奠定了基础。

随着扩频和伪随机码技术的应用, 卫星双向时间比对精度进入 $100\ \text{ns}$, 逐渐得到关注。1999 年起 TWSTFT 技术用于国际原子时 (International

Atomic Time, TAI) 产生, 2003 年成为协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 计算的主要时间传递技术^[2-6]。当前, 全球超 20 个守时实验室依托 TWSTFT 网络支撑 TAI 计算, 精度达 $0.5\ \text{ns}$ 。时间比对精度的提高, 核心驱动为信号体制革新、误差协同抑制及全球化协作网络构建^[7-8]。

中国科学院国家授时中心 (NTSC) 作为我国时间频率领域的核心研究机构, 基于多年 TWSTFT 技术研究积累提出了转发式卫星测定轨方法 (orbit determination by transfer tracking, ODTT)。该方法与技术是在双向卫星时间频率传递技术的基础上, 建立的一种全新的卫星测定轨方法。利用地面站的原子钟生成时间信号, 经不同伪码调制后, 以相同载频发射至同一卫星的转发器; 卫星将信号转发回地面站, 通过测定信号往返的路径时延来计算出地面站到卫星之间的距离, 从而实现轨道测定。

1 1979 年,中国的首次 TWSTFT 试验

在 1979 年 6 月 18 日至 27 日,中国科学院陕西天文台(2001 年更名为中国科学院国家授时中心)发起,利用法国和德国联合研制的“交响乐”通讯卫星,开展了中国首次国际间卫星双向时间传递试验研究。中国科学院陕西天文台,在法国普勒默-博杜地面站和上海虹桥卫星地面站(由上海天文台管理)之间,通过卫星双向发射标准时间信号,并测量本站钟秒信号与接收到的秒信号的时差,双方交换数据以后,得到两个地面站的时差。在中国,利用搬运钟和接收罗兰授时信号的方式,比对虹桥地面站时间与陕西天文台和上海天文台的时间差。法国通过无源电视同步和搬运钟比对两种方式获得普勒默-博杜地面站与巴黎天文台的时间差。中法之间交换数据后获得陕西天文台与巴黎天文台的时间差。经过与国际权度局(BIPM)的数据对比,确定中法之间时间比对的准确度优于 100 ns,精度优于 8 ns(1 σ)^[9]。

2 1984 年,中意开展卫星双向时间同步联合试验

1984 年 5 月 23 日至 6 月 11 日,利用 1983 年已东移至印度洋上空的 Sirio-1 通讯卫星,开展了卫星双向时间传递试验。此次试验采用德国的伪距测量系统(Mitrex)^[10-11]。

中方卫星地面站是天线直径为 3 m 的移动地面站,设在北京白石桥附近,离北京天文台(现名:国家天文台)沙河钟房约 17 km。意方卫星地面站设在米兰,天线直径 16 m,离意方国家电子研究所(IEN)钟房约 300 km。卫星信道是数字通讯系统,上行频率 17 GHz,下行频率是 14 GHz;另有一个话路供试验期间互相了解情况,互报若干数据以便了解试验的可靠性。中方每整秒时向意方发射秒信号,延迟 0.5 s 后,意方向中方发射秒信号,这种双向方法只使用一个卫星转发器。

我国参加试验的有陕西天文台(CSAO)、北京天文台(BAO)、上海天文台(SO)和武汉时辰站(WTO)等台站。意大利方面参加的有 IEN、国家研究所属国家空间计划局(CNR/PSN)和空间通讯公司(TE/ESPAZID)。本次时间比对的精度约为 28 ns(1 σ),准确度约为 76 ns^[12]。

3 1993 年,研制出卫星双向话音通道高精密时间同步系统

利用通信卫星进行卫星双向时间比对是守时实验室之间国际时频比对的重要方法之一。若使用 Mitrex 伪随机码终端,则同步精度可提高到 1 ns,同步准确度一般可做到 50~100 ns。这种比对方法需占用两个卫星转发器,在我国通信卫星数目少,转发器不多的情况下,在国内采用这种方法进行时间比对难度极大。

当时国内建立了一批 CVSD/PSK/SCPC(连续可变斜率增量调制/相移键控/单路单载波)体制的中小型卫星地面站,一般包括几路数字话音和几路低速数据通道。陕西天文台提出利用话音通道传送精密时间信号的方法,通过分析中小型卫星地面站的设备组成和工作原理,发现 CVSD 引入的误差较大,进而制定了从 PSK 调制器输入和从 PSK 解调器输出的接口方案。

研究中发现相位模糊问题,因为通话时人耳分辨不出相位变化,用于通信的 PSK 解调器不解相位模糊,但相位模糊会影响时间传递性能。陕西天文台的研究人员设计了一种相位自适应电路,自动识别并随时跟踪数据流的相位变化,从而解决了相位模糊问题,使话音通道传送精密时间信号成为可能。

同时研制了有关设备,组成了完整的卫星时间同步系统。该系统占用 SCPC 数字卫星通信地面站的一个话音通道,其带宽仅有 45 kHz,由 1 个主站和 1~62 个副站组成。所有的系统同步过程都由主站控制,自动完成。该系统采用扫描原理,以对话方式实现一点对多点的时间同步。系统占用频带窄,可节约卫星资源,具备实时性强、自动化程度高、支持自动多点同步、测量精度高的特点。图 1 展示了卫星双向话音通道高精密时间同步系统设备。该系统于 1992 年 7 月通过鉴定,于 1993 年 5 月正式投入使用,时间同步准确度大多数情况下优于 1 μ s,由于话音通道时延不一致,个别话音通道准确度会大于 1 μ s,但优于 2 μ s。



图 1 卫星双向话音通道高精密时间同步系统设备

4 1998 年,中日 TWSTFT 链路开通,精度达纳秒级

随着卫星通信技术的发展,设备日益成熟,在国际原子时计算中引入卫星双向时间传递数据成为可能。国际权度局建议进行全球性的卫星双向时间传递网的建设,把欧、亚、美三大洲主要的守时实验室的时间进行连接,改善和提高国际原子时的性能,也使各参加者能迅速校准本地的频率标准^[13]。

中日卫星双向时间传递系统,是这个全球合作计划中重要的一环。先由日本、中国、澳大利亚三国合作实现亚太区域的时间比对链接,中国进一步承担亚洲与欧洲的链接。同时,澳大利亚完成亚太地区与北美的链接,再加上已建立的欧美链接,最终完成全球的双向法卫星时间比对系统。中国科学院陕西天文台(CSAO)与日本通信综合研究所(CRL)在1998年初开始建设,10月31日建成,时间比对精度0.2~0.3 ns,时间比对准确度1~2 ns,校频精度 $2 \times 10^{-15} \sim 4 \times 10^{-14}$ 。基于这套系统,开始了CSAO与CRL的常规比对,以及对卫星双向时间比对的数据处理方法、误差校准方法的研究。

国际权度局也逐步开展了将卫星双向时间频率传递的比对数据纳入国际原子时计算的工作。国家授时中心(NTSC)先后在2006年和2007年与荷兰国家计量院(VSL)、法国巴黎天文台(OP)建立了链接,取得了很好的比对结果^[14]。至此,国际原子时合作的时间比对网中有9条卫星双向时间传递链路,如图2^[15]所示。

国家授时中心成为中国第一个开通卫星双向时间传递系统的单位,加上卫星共视时间比对,用两种方式参加国际原子时合作。如此我国对国际原子时作出了更大贡献,提高了我国在国际时频领域的地位。

2001年,国家授时中心主办了国际卫星双向时间传递工作会议。同年,国家授时中心发表论文“卫星双向时间比对原理及比对误差估算”,论述了卫星双向时间比对原理和比对系统中的各项系统误差^[16-17];次年发表论文“双通道终端进行卫星双向法时间比对的归算方法”^[18];2006年在《宇航计测技术》发表论文“卫星双向时间与频率传递温度效应”,分析了环境温度对双向时间传递精度的影响^[19]。

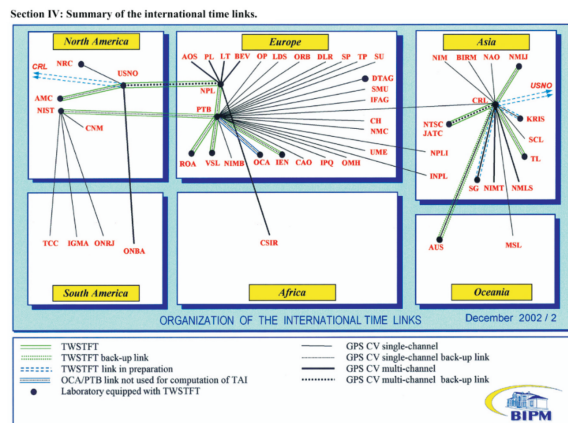


图2 国际原子时合作的时间比对网中有9条卫星双向时间传递链路

5 2014 年,研制的双向移动校准站通过验收,实现了0.09 ns的校准精度

目前,基于卫星双向时间传递实现站间同步精度约为1 ns,而当前测距码能实现优于0.1 ns的测试不确定度,同步精度提高的主要限制原因是地面站设备时延的不确定性。设备时延的校准程度很大程度上决定了站间时间同步比对的准确度^[19]。目前国际上通用的是单移动校准站的设备时延校准方法,基本原理是利用一套和被测站相同的可搬移地面站,分别与被校准站零基线测试,标定设备时延,目前欧洲国家实现设备时延标定的不确定度为0.7~3.5 ns^[20]。

在某重大专项关键技术攻关项目的支持下,国家授时中心提出了基于双移动校准站的系统误差校准方法^[21],以两地的时间信号作为被测对象,直接测试两地钟差,并利用双向移动校准站的可搬移特性,对测试系统自身系统误差进行精确标定,改正站间时间同步误差测试结果,用来评估被测系统的站间时间同步性能,或是校准被测系统的系统误差。由于双向移动校准站的测试与被测系统没有直接关系,不受其工作模式、频段和信号体制等的限制,被测对象可以是基于任意工作模式的站间时间同步测试系统,大大增强了应用范围。

双向移动校准站的设计重点是便携、拆卸拼装快捷、对星方便,且拆卸重装后需保持设备时延稳定,变化不超过0.1 ns。最终实现的时间传递精度优于0.45 ns。

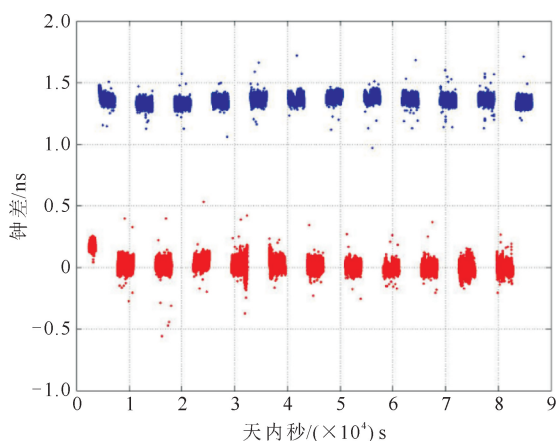
零基线测试结果与计数器测试结果比较,一天的标准差为0.09 ns,优于国际知名实验室零基线校

准结果 $0.3 \sim 1.4$ ns。为进一步推动该技术的规范化操作,国家授时中心结合卫星双向时频比对新技术发展和军事需求,起草了国家军用标准《可搬移卫星双向时频比对和设备校准规程》。主要制定内容如下:① 制定可搬移卫星双向比对站和固定卫星双向时间比对站实施时频比对的操作规程,包括测试环境准备、设备操作、数据处理等通用规程;② 制定设备时延的测试准备条件、测试操作规程和数据处理规程,规范设备时延测试和数据处理操作^[22]。

6 2012 年,国家授时中心揭示时间传递准确度与射频载波频率关系

ITU-R 250/7A 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。

国家授时中心开展了相关试验。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,由于这两套系统使用同一个时钟观测同一颗卫星,两个地面站天线相距只有几米。如果比对结果和射频载波频率有关系,通过该试验即可将其反映出来。每小时在 6 366 MHz 和 6 047 MHz 间更换一次射频频率,试验结果表明:使用不同频率进行时间比对,会带来约 1.5 ns 的系统差^[23],如图 3 所示。



注:每小时在 6 366 MHz 和 6 047 MHz 间更换一次射频频率,蓝色对应 6 366 MHz,红色对应 6 047 MHz

图 3 UTC 时间 20120111T00:00:00/20120112T00:00:00 射频载波频率对 TWSTFT 影响的试验结果

2012 年 9 月 24 日至 28 日,在国际电信联盟无线电通信局(ITU-R)的 WP7 工作组会议,国家授时中心向本次会议提交了《THE STUDY OF THE

RELATIONSHIP BETWEEN RF CARRIER FREQUENCY AND TWSTFT ACCURACY》信息性文稿(7A/10-E),该文稿主要针对 ITU-R WP 7A ITU-R 250/7 课题“卫星双向授时与频率传递(TWSTFT)的应用和改进”提出的问题,进行了验证卫星双向时间与频率传递准确度与射频载波频率关系的试验^[24]。

7 2009 年,NTSC-PTB 的 TWSTFT 数据纳入国际原子时归算,并开展 TW 设备时延校准

为了提高卫星双向时间比对的利用效率,增加国际时间比对的可靠性。2006 年,在升级中日 TWSTFT 系统并实现自动化运行的同时,增加了多通道比对设备,具备了和亚欧地区多个守时实验室链接的条件^[25]。

德国技术物理研究院(The Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)是国际原子时 TAI 系统全球卫星双向时间比对的主节点^[26]。2008 年 6 月,进行了 IS(Intelsat)卫星公司所要求的上行测试,并与 PTB 进行了链路调整,实现了 NTSC/PTB 的 TWSTFT 链接,开始了每小时 20 min 的常规时间比对并积累数据,比对精度 0.3 ns,和其他国际双向链路比对精度相当,这使得 NTSC 的双向工作又前进了一步。图 4 为用于卫星双向时间传递的天线和机房。2009 年 5 月起,中德卫星双向数据正式用于国际原子时 TAI 归算^[27]。

2016 年 7 月下旬,国际权度局组织对 UTC(NTSC)卫星双向系统和 GPS PPP(Global Positioning System precise point positioning)链路进行测量校准,校准后 NTSC-PTB 链路的 B 类不确定度由 20 ns 降为 1.5 ns,提高了国家授时中心的国际时间比对精度。

国际上研究的热点问题之一就是如何进行设备时延的校准。2015 年,王茂磊等人^[28]在《宇航计测技术》发表文章“一种基于移动参考站的卫星双向时间频率传递系统时延校准方法”,介绍了单移动站的校准方法。2016 年,许龙霞、陈婧亚等人^[29]在《仪器仪表学报》发表文章“一种卫星双向时频传递设备时延差的标定方法”给出了一种利用随着 iGMAS(international Global Navigation Satellite System Monitoring and Assessment System)发布的精密星历、钟差和电离层产品,利用卫星导航系

统的定时接收机同址观测,校准双向系统差的方法,校准精度优于 1 ns。



图 4 用于卫星双向时间传递的天线和机房

8 2016 年,卫星双向软件定义接收机在 NTSC 建成

TWSTFT 是 UTC 产生过程中的重要时间比对技术手段,其精度可达 0.5 ns。目前,全球大约有 20 多个时间保持水平最高的守时实验室利用卫星时间和测距设备(SATRE)进行连续的实验室间远距离卫星双向时间比对工作,然而 SATRE TWSTFT 的性能主要受到了周日效应的影响,其在某些链路上变化幅度甚至可达 2 ns。2016 年 1 月,国际权度局和国际时频咨询委员会(CCTF)卫星双向工作组(WGTWSTFT)共同发起了基于软件接收机(SDR)的国际卫星双向时间比对试验研究^[30],2016 年 2 月 NTSC 加入了该试验小组。

2016 年 7 月 19 日至 7 月 29 日,台湾 TL 的黄毅军博士和林信严博士与国家授时中心工作人员一同安装了卫星双向软件接收机,并成功获得了基于软件定义接收机的国际卫星双向时间比对结果。该链路是第一条欧亚间基于 SDR 的 TWSTFT 链路。以 SATRE TWSTFT 和 GPS PPP 或 IPPP 技术为参考,对 SDR TWSTFT 进行了分析评估,结果表明:SDR TWSTFT 在洲内的多数链路上对 SATRE TWSTFT 的周日效应的平均增益因子为 2~3,而在洲际的长基线链路上改善了 30%~40%。从 2017 年 10 月开始,SDR 卫星双向成为了 UTC 时间比对链路的备份链路^[31]。通过对基于软件接收机的卫星双向时间比对进行测试与标定,结果表明:该时间比对方式的频率相对稳定度和时间稳定度分别可以达到 $1 \times 10^{-15}/\text{d}$ 和 1 ns,其链路总不确定度优于 1.6 ns。最后将该链路基于硬件调制解调器的卫星双向时间比对进行比较验证,二者结果互为一致^[32]。2019 年,王威雄等在《仪器仪表学报》发表文章“基于软件接收机和间接链路的卫星双向时间比对性能分析”给出了软件接收机的性能分析^[33]。研究表明,SDR 对亚欧链路的周日效应平

均改善程度为 40%左右。

9 发明了转发式测定轨技术,对 GEO 通信卫星的定轨精度达到 2 m

从 2003 年开始,中国科学院开始部署研制中国区域定位系统(CAPS)^[34-37],要利用 GEO 通信卫星作为导航星座,实现用户的定位授时。该系统面临的重要问题,是如何实现 GEO 卫星高精度测定轨。当时可选的技术手段包括激光测定轨,但激光受天气影响太大,不能连续测量,不符合连续定轨要求^[38]。连续性比较好的是 S 波段统一测控技术(USB),国际上最好的定轨精度是百米量级,无法满足卫星导航的需求。

李志刚和杨旭海等^[39]在 TWSTFT 基础上进行改进,发明了转发式测定轨技术^[39],2005 年开展了试验验证。杨旭海带领团队研制了转发式测定轨系统,于 2017 年基本建成,系统包括盱眙、长春、西安、昆明、喀什和三亚共 6 个测轨站与位于西安的数据处理中心^[40]。系统对 GEO 通信卫星定轨精度达到 2 m。

转发式测定轨技术含多种测量,主用模式为“自发自收”模式^[17]。自发自收模式类似于多站激光测距,如图 5 所示。主要特点是 A 站向卫星发射测距信号,经卫星转发后由 A 站接收;其他各站工作方式类似。自发自收模式的主要优点,是测轨站对站间时间同步的精度要求不高,时间同步主要影响卫星的观测量的时标。

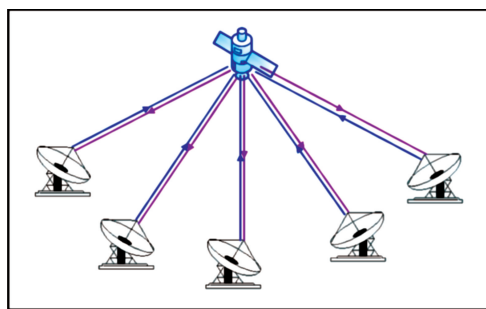


图 5 转发式测定轨的“自发自收”测轨模式

建立了自发自收模式下的测量模型^[41],在此基础上建立了 GEO 卫星的摄动力模型,实现了 GEO 卫星的动力学统计定轨。基于国内转发测轨观测数据,实现 GEO 通信卫星定轨,定轨精度优于 2 m^[17],达到国际领先水平。

表 1 和图 6 是 2017 年 5 月转发式测定轨系统定轨结果。

表 1 转发式测定轨系统对 GEO 卫星测定轨的重叠弧段轨道精度

重叠弧段	径向误差(R)/m	迹向误差(T)/m	法向误差(N)/m	三维综合误差(P)/m
0502.5—0503.5	0.198	0.635	0.591	0.890
0503.0—0504.0	0.254	0.529	0.563	0.814
0503.5—0504.5	0.213	0.475	1.035	1.159
0504.0—0505.0	0.342	1.489	0.935	1.791
0504.5—0505.5	0.331	1.010	0.727	1.288
0505.0—0506.0	0.424	0.960	1.103	1.523
0505.5—0506.5	0.272	1.431	0.725	1.627
0506.0—0507.0	0.316	0.667	0.666	0.994
0506.5—0507.5	0.247	0.538	0.398	0.713
0507.0—0508.0	0.175	0.669	0.276	0.745

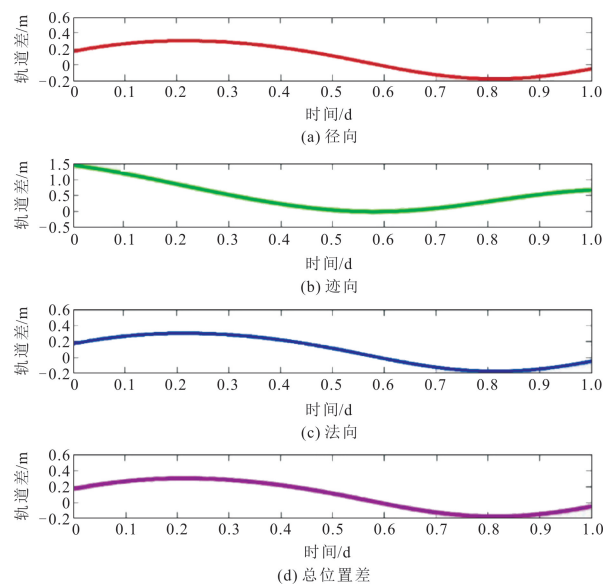


图 6 UTC 时间 20170502T12:00:00/20170503T12:00:00 的重叠弧段轨道差

转发式测定轨技术应用主要包括以下两方面。

① 为国家无委建成了转发式测定轨系统,有效支持了国家无线电监测中心对卫星干扰源定位^[42]。该系统在国内布置 4 个测轨站,测轨残差 O—C(观测值减去计算值)的 RMS(root mean square)优于 20 cm,采用重叠弧段方法评定卫星轨道轨道差的 RMS 优于 5 m。

② 多次为中国卫通等完成 GEO 卫星精密测定轨任务。尤其是 2018 年 5 月当亚太地区一颗卫星突发严重故障,需亚太 6C 卫星紧急漂星予以替换。国家授时中心使用转发式测定轨系统对亚太 6C 卫星进行了快速测定轨,有效保障漂星任务完成。

长期研究和应用表明,转发式测定轨技术的主要特色和优势在于:① 测距而不是测伪距,便于实

现精密定轨;② 以精密时间测量为基础,测距精度高(2 cm),并不受气象条件制约;③ 使用微波频段和扩频技术,易于远距离测轨;④ 星上的透明转发器载荷成熟且易于小型化。根据目前的试验结果来看,转发式测定轨技术对 GEO 卫星的精密测定轨精度预期可以实现分米级或更好。从未来应用来看,转发式测定轨技术适用于各类航天器的精密测定轨,尤其对高轨卫星测定轨有明显优势,并可用于开展相关科学研究^[43-44]。

同时实现了基于一发多收模式的地球同步轨道卫星精密测定轨,一发多收测轨模式是转发式测定轨技术中的一种观测模式。测轨站主站向卫星发射一个伪码扩频信号,经卫星转发器转发,传向主站和副站,形成主站的自发自收和副站的主发副收的测轨模式。并依托国家授时中心的西安站、长春站和喀什站开展了 C 波段一发多收观测测定轨试验^[45]。

10 建立了 IGSO 卫星转发式测定轨技术,提出了 IGSO 卫星 TWSTFT 方法

10.1 2015 年,转发式卫星测定轨系统对 IGSO 卫星定轨精度优于 1 m

转发式卫星导航试验系统,研制发射了 IGSO (inclined geosynchronous orbit) 卫星(I1-S),用于改善用户定位的几何因子^[44]。因此对 IGSO 卫星提出了精密测定轨需求。需要将转发式测定轨技术,从 GEO 卫星拓展到 IGSO 卫星。

国家授时中心在 GEO 卫星的转发式测定轨技术基础上,解决了大 Doppler 情况下的接收机跟踪

测量问题^[46],建立了 IGSO 卫星摄动力模型和定轨策略,研制建成了一套专用的 IGSO 卫星转发式测定轨系统,成功实现了 IGSO 卫星的高精度转发式测定轨。

2015 年 8 月,转发式测定轨系统对轨道倾角为 55°的 I1-S 卫星进行自发自收观测及定轨试验。该卫星过赤道上空时的星下点经度为 95°E,试验选取长春、西安、昆明、喀什和三亚等 5 个观测站对 I1-S 卫星进行跟踪观测。测定轨结果表明:I1-S 卫星的定轨残差(RMS)在分米量级,重叠弧段轨道差(RMS)优于 1 m。图 7 给出 UTC 时间 2015 年 8 月 15 日 12 时至 8 月 16 日 12 时的 I1-S 卫星重叠弧段轨道差。

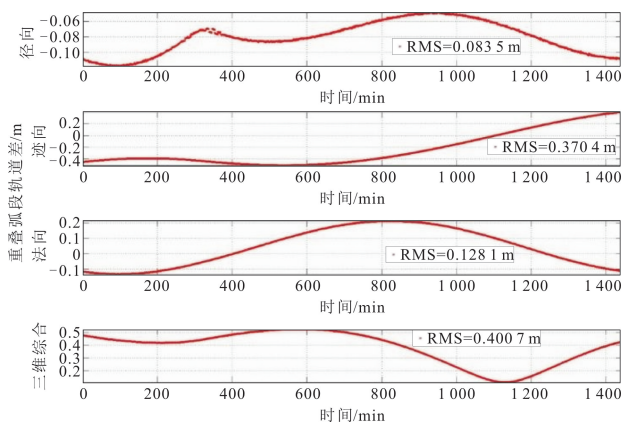


图 7 UTC 时间 20150815T12:00:00/20150816T12:00:00 的 I1-S 卫星重叠弧段轨道差

10.2 提出了基于 IGSO 卫星的 TWSTFT 方法,并于 2016 年开展了基于 IGSO 卫星的 TWSTFT 试验,精度优于 0.4 ns

通常 TWSTFT 主要使用 GEO 卫星作为信号中继^[47-48],由于 GEO 卫星与地面站相对静止的特点,使得信号传播过程中的上、下行路径近似对称,两站观测数据互差后,可抵消掉大部分的路径误差。随着区域卫星导航系统的发展,IGSO 卫星被广泛地应用。IGSO 卫星是重要卫星资源,有效地利用这类卫星开展 TWSTFT 是一种重要的拓展^[49]。

与使用 GEO 卫星不同,使用 IGSO 卫星开展 TWSTFT,由于卫星相对于地面站的相对运动速度较大,即卫星相对于地面站的位置变化较大,使得基于 IGSO 卫星开展 TWSTFT 时信号传递的上、下行路径不再对称,这将会影响到 TWSTFT 的准确度。ITU-R 的时间频率系列建议书给出的供各时间实验室使用的 TWSTFT 数据处理方法,是在

地心地固系下,以 GEO 卫星作为信号中继,给出了部分误差项的修正方法,但对于几何路径不对称误差,并未给出计算方法。同样的,对基于 IGSO 卫星的 TWSTFT 当时国际上也未提出明确的数据处理指导。

杨旭海等提出了基于 IGSO 卫星的 TWSTFT 方法,解决了卫星运动带来的几何路径不对称问题,并于 2016 年成功开展了基于 IGSO 卫星的高精度 TWSTFT 试验。在试验当中,两地面站各自增加一条自发自收通道,实现测距和测速功能,消除 TWSTFT 因卫星运动引起的影响。依托国家授时中心的 TWSTFT 网,分别使用 IGSO 卫星(I1-S)与 GEO 卫星(CHINASAT 12)进行 TWSTFT 试验,结果如图 8 至图 10 所示,这表明,使用 IGSO 卫星开展 TWSTFT 时各残值效应项造成的影响均比使用 GEO 卫星时要高出数个量级,在最终的结果计算时不可忽略。在误差项修正后,基于 IGSO 卫星的双向结果与基于 GEO 卫星的双向结果一致性良好,吻合度优于 0.4 ns,在 TWSTFT 的测量不确定度范围之内。这表明:在有效修正卫星运动带来的影响之后,使用 IGSO 卫星也可以开展高精度 TWSTFT;该方法也适用于赤道上空的其他种类卫星,增加了 TWSTFT 的普适性。

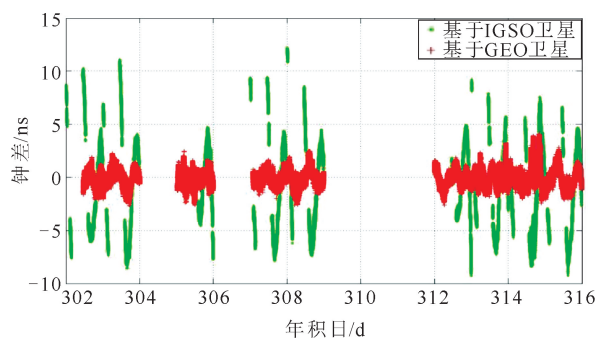


图 8 UTC 时间 2016 年 10 月 28 日至 11 月 10 日 西安—三亚链路基于两类卫星误差项修正前的双向比对结果

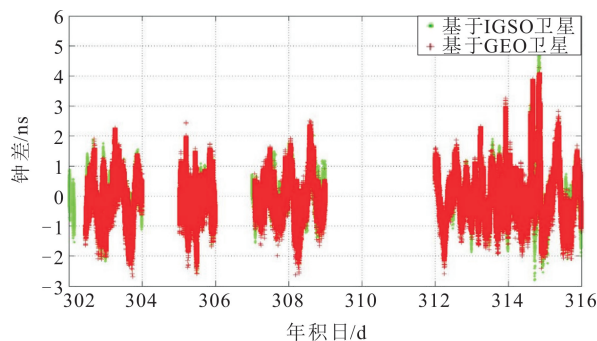


图 9 UTC 时间 2016 年 10 月 28 日至 11 月 10 日 西安—三亚链路基于两类卫星误差项修正后的双向比对结果

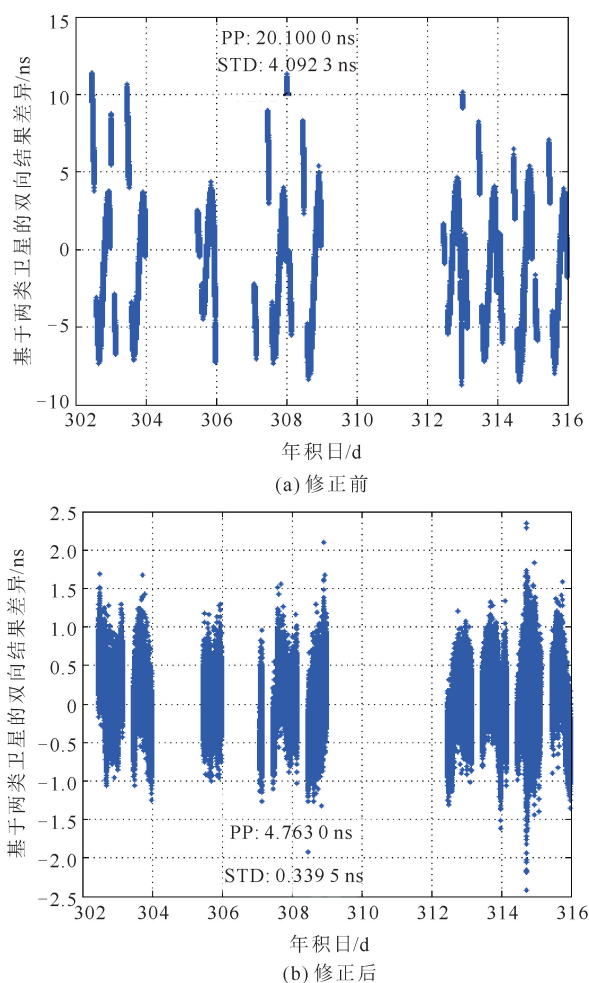


图 10 UTC 时间 2016 年 10 月 28 日至 11 月 10 日
西安—三亚链路基于两类卫星的双向比对结果之差

11 结语

TWSTFT 技术的原理最早于 1962 年得到验证,此阶段确立了 TWSTFT 的基本工作范式。早期实验依赖于大型地面站和通信卫星,设备庞大且价格昂贵,限制了其广泛应用。进入 90 年代,随着对高精度时间比对需求的增长,TWSTFT 技术走向成熟和国际化。BIPM 为改善全球时间同步,在 90 年代后期推荐并组织了“全球双向卫星时间频率传递”计划。这是一个里程碑事件,标志着 TWSTFT 从双边实验走向全球协作。1999 年,BIPM 开始常规发布 TWSTFT 月报,PTB 和 TUG 的 TWSTFT 数据正式用于 TAI 的计算,TWSTFT 正式成为支撑国际标准时间生成的关键技术之一。ITU 也推荐 TWSTFT 用于 UTC 计算。此时期明确了 TWSTFT 的精度(0.3~0.5 ns)和准确度(1 ns)。数据处理开始遵循时间频率咨询委员会(CCTF)发布的软件标准化指南,以提高结果的一致性和可靠性。更多国家计量

机构(如日本情报通信研究机构 NICT、法国 OP、荷兰 VSL 等)建立了 TWSTFT 地面站。使用了甚小口径天线终端(VSAT),地面站设备向小型化发展。专用的调制解调器(如德国的 SATRE MODEM)得到应用,通常采用伪随机码(PRN)扩频和 BPSK 调制(码速率多为 2.5 Mcps/s),使用 X 或 Ku 波段。随着 TWSTFT 广泛用于 TAI 归算,对其精度和稳定性的要求越来越高,研究重点逐渐转向了对各类系统误差的深入分析和抑制。

TWSTFT 技术的发展脉络,是从原理验证到全球标准化应用,再到深度优化创新的过程,其发展趋势涵盖技术、设备以及数据处理层面。其中,技术层面的发展趋势包括追求更高精度与稳定性的系统性能,探索新型调制方式与信号处理技术、与其他时间传递技术(GNSS 等)深度融合互补以及 SDR 的应用等,通过新体制信号、多链路备份和深空扩展不断突破极限;设备层面的发展趋势包括地面设备向小型化、集成化、标准化发展、空间段(卫星)资源的多样化与性能优化以及时延校准与监测的自动化与实时化等,追求更小、更智能、更标准、更经济;数据处理层面的发展趋势包括数据处理实时化能力增强、智能算法与多链路数据融合深度应用、高精度误差建模与修正等,趋向实时化、智能化、融合化,并不断深化对误差的理解和修正。

TWSTFT 技术经过 60 余年的发展,已成为高精度时间频率传递的核心手段之一。国家授时中心作为我国时间频率领域的核心研究机构,在 TWSTFT 技术的发展中发挥了关键作用^[50],其贡献主要体现在国际链路建设与精度突破、转发式测定轨技术创新与优化、标准参与及应用拓展等方面,不仅将 TWSTFT 精度推进至亚纳秒级,更使我国从“国际原子时数据使用者”转变为“核心贡献者”,并支撑了科学研究和工业应用的需求。如 2006 年完成的“临潼—蒲城微波时间传输系统改造项目”,通过 TWSTFT 技术,稳定性和可靠性大幅度提高,实现了时间比对偏差优于 ± 10 ns,日稳达到 1×10^{-14} 量级;除此,航天科工集团二院 203 所设计了用于卫星双向时间传递系统的调制器^[51-53],并对调制解调器的跟踪环路和可变时延校准的问题进行了研究,不仅推动了国产 TWSTFT 调制解调器技术写入国家标准,更奠定了我国高精度时频传递设备的自主可控。未来,随着国家对时间频率基准战略地位的重视和新基建的推进,融合量子通信等前沿技术,

TWSTFT 技术有望在更多领域发挥关键支撑作用,为科技创新和产业升级提供精准的时间标尺。

参考文献:

- [1] 李志刚,杨旭海,吴风雷,等. 时间与卫星测距[M]. 北京:科学出版社,2022.
- [2] JIANG Z. Towards a TWSTFT network time transfer [J]. Metrologia,2008,45(6):S6-S11.
- [3] JIANG Z, PETIT G. Combination of TWSTFT and GNSS for accurate UTC time transfer[J]. Metrologia, 2009,46(3):305-314.
- [4] JIANG Z, WANG Y, LIU H, et al. The 2015 TWSTFT calibration for UTC and related time links[C]//2016 European Frequency and Time Forum, York: IEEE, 2016.
- [5] ZHANG V, PARKER T, ZHANG S. A study on reducing the diurnal in the Europe-to-Europe TWSTFT links [C]//2016 European Frequency and Time Forum, Piscataway: IEEE, 2016.
- [6] HUANG Y J, TSAO H W, LIN H T, et al. Multiple access interference suppression for TWSTFT applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017,66(6):1337-1342.
- [7] JIANG Z, LEWANDOWSKI W, PISANI M, et al. Improving two-way satellite time and frequency transfer with redundant links for UTC generation[J]. Metrologia, 2019,56(2):1-18.
- [8] JIANG Z, LEWANDOWSKI W, PISANI M, et al. A TWSTFT calibration guideline and the use of a GPS calibrator for UTC TWSTFT link calibrations[C]//Proceedings of the 2016 Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Monterey: Institute of Navigation (ION), 2016:231-242.
- [9] 苗永瑞,宋金安,郑恒秋,等. 陕西天文台时钟的国际比对试验[J]. 陕西天文台台刊,1981(1):3-18.
- [10] BAUCH A, BREAKIRON L, MATSAKIS D, et al. On the accuracy of two-way satellite time and frequency transfer: A study of triplet closures[C]//2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Broomfield: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2008.
- [11] ITU Radiocommunication Sector. The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes[S/OL]. Recommendation ITU-R TF. 1153-4. Geneva: International Telecommunication Union(2015-08-25)[2025-08-05]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.1153-4-201508-I/en>, 2015-08-25.
- [12] 罗定昌,宋金安,庄奇祥,等. 在中意卫星时钟同步试验期间国内诸台站主钟之间的比对结果[J]. 时间频率学报,1985,8(1):57-64.
- [13] JIANG Z H, KONATÉ H, LEWANDOWSKI W. Review and preview of two-way time transfer for UTC generation[C]//2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague: IEEE, 2013.
- [14] KIRCHNER D. Two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT): principle, implementation, and current performance[M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [15] BIPM Time Saction. Annaual Repors of the BIPM Time Saction: Vol. 5, 2022[R]. Sevres: Bereau International des Poids et Measures, 2003.
- [16] 孙宏伟,李焕信. 卫星双向时间比对原理及比对误差估算[J]. 宇航计测技术, 2001,21(2):55-58.
- [17] 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.
- [18] 李志刚,李焕信,张虹. 双通道终端进行卫星双向法时间比对的归算方法[J]. 陕西天文台台刊, 2002,25(2):81-89.
- [19] 张虹,李焕信,李志刚. 双向卫星时间与频率传递温度效应[J]. 宇航计测技术, 2006,26(1):24-28.
- [20] 史琛,刘娅,王国永,等. 基于双移动校准站的远距离卫星双向时间比对精度分析[J]. 时间频率学报, 2016,39(2):87-94.
- [21] 王国永. 基于双移动站的卫星双向时间传递系统误差校准方法研究[D]. 西安:中国科学院国家授时中心, 2015.
- [22] 刘娅. 可搬移卫星双向时频比对和设备校准规程[S]. 西安:中国科学院国家授时中心, 2023.
- [23] 杨旭海,李孝辉,华宇,等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021,8(4):1-10.
- [24] 李伟超,陈亮. 国家授时中心派员参加国际电信联盟工作组会议(120928)[EB/OL]. (2012-09-28)[2025-08-12]. https://lssf.cas.cn/xwzx/jlpx/201210/t20121017_5052873.html.
- [25] YANG X H, LI Z G, FENG C G, et al. Methods of rapid orbit forecasting after maneuvers for geostationary satellites[J]. Science in China, 2009,52(2):333-338.
- [26] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京:解放军出版社, 1990.
- [27] CHENG X, LI Z G, YANG X H, et al. Chinese Area Positioning System with Wide Area Augmentation[J]. Journal of Navigation, 2012,65(2):339-349.
- [28] 王茂磊,肖胜红,张达,等. 一种基于移动参考站的卫星

- 双向时间频率传递系统时延校准方法[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 1-4.
- [29] 许龙霞, 陈婧亚, 李丹丹. 一种卫星双向时频传递设备时延差的标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1-7.
- [30] LEI H, LI Z G, YANG X H, et al. Geostationary orbit determination using SATRE[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(5): 923-932.
- [31] 江志恒, 武文俊. 软件接收机 UTC 卫星双向时间传递[J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 196-205.
- [32] 武文俊, 姜萌, 王翔, 等. 基于软件接收机的卫星双向时间频率传递[J]. 时间频率学报, 2020, 43(2): 94-100.
- [33] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 基于软件接收机和间接链路的卫星双向时间比对性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 211-218.
- [34] AI G X, SHI H L, WU H T, et al. Positioning system based satellite communication and Chinese Area Positioning System(CAPS)[J]. *Chinese Journal of Astronomy Astrophysics*, 2008, 8(6): 611-635.
- [35] 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.
- [36] 李孝辉, 吴海涛, 边玉敬, 等. 内含伪距差分功能的虚拟卫星原子钟[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1723-1730.
- [37] 卢晓春, 吴海涛, 边玉敬, 等. 中国区域定位系统信号体制[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1634-1647.
- [38] 杨旭海, 李志刚, 冯初刚, 等. GEO 卫星机动后的星历快速恢复方法[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1759-1765.
- [39] 李志刚, 杨旭海, 冯初刚, 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.
- [40] YANG X H, MA L M. The method of time synchronization based on the combination of COMPASS GEO pseudo-range and two-way data[C] // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (FCS), San Francisco: IEEE, 2011.
- [41] CAO F, YANG X H, LI Z G, et al. Orbit determination and prediction of GEO satellite of BeiDou during repositioning maneuver[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(9): 1828-1837.
- [42] 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.
- [43] 李志刚, 乔荣川, 冯初刚. 卫星双向法与卫星测距[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(3): 1-6.
- [44] 李志刚, 杨旭海, 冯初刚, 等. 转发器式卫星定轨[J]. 科学研究月报, 2007(26): 84-86.
- [45] 刘凯, 杨旭海, 陈亮, 等. 基于转发式一发多收模式的 GEO 卫星定轨研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 357-366.
- [46] NAN K, CAO F, GONG J J, et al. The Short-arc precise orbit determination of GEO satellites using vlbi and transfer ranging [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1572.
- [47] YANG X H, LI Z G, HUA A H. Analysis of two way satellite time and frequency transfer with C band[C] // 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva: IEEE, 2007.
- [48] LIN H T, HUANG Y J. Recent development and utilization of two-way satellite time and frequency transfer [J]. *MAPAN*, 2012, 27(1): 13-22.
- [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 geo-synchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(8): 1475-1486.
- [50] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [51] 王学运, 张升康. 用于卫星双向时间传递系统的调制器设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(3): 400-403.
- [52] 王学运, 王海峰, 张升康, 等. 卫星双向时间传递调制解调器跟踪环路设计[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(1): 18-23.
- [53] 王学运, 张升康, 王海峰, 等. 一种卫星双向时间比对调制解调器时延变化自校准方法[P]. 中国: CN109005020B, 2025-08-21.