

引用格式：刘湘楠, 李桢, 施闯. 卫星时频系统发展综述[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 8-22.

卫星时频系统发展综述

刘湘楠^{1,2,3}, 李桢^{2,3,4}, 施闯^{2,3,4}

1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191;
2. 空地一体新航行系统技术全国重点实验室, 北京 100191;
3. 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;
4. 北京航空航天大学 空间与环境学院, 北京 100191

摘要: 近年来, 全球卫星数量呈现快速增长的趋势, 并且在导航、遥感以及通信系统中发挥着越来越重要的作用。卫星时频系统作为卫星不可或缺的核心, 对实现高精度卫星导航、先进遥感及高效通信等功能起着决定性作用, 同时也是衡量国家综合实力的指标之一。通过对当前导航、遥感、通信等卫星的时频系统发展现状的深入分析, 详细描述了时间频率源、时间维护、时间用户及时间传输通道等卫星时频系统核心要素的具体技术细节。同时, 分析了当前时频系统存在的问题与挑战, 研判了卫星时频系统的未来发展趋势。研究内容可以作为卫星时频系统研究与发展的有价值的参考, 也为相关领域的研究人员提供了相应的指导。

关键词: 卫星时频系统; 原子钟; 晶振; 时间传递

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-01-0008-15

A review of satellite time-frequency system

LIU Xiang-nan^{1,2,3}, LI Zhen^{2,3,4}, SHI Chuang^{2,3,4}

1. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. State Key Laboratory of CNS/ATM, Beihang University, Beijing 100191, China
3. Laboratory of Navigation and Communication Fusion Technology,
Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100191, China;
4. School of Space and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: In recent years, the number of satellites around the world has shown a rapid growth trend and is playing an increasingly important role in navigation, remote sensing and communication systems. The satellite time-frequency system, as an indispensable core of satellites, is essential for enabling high-precision satellite navigation, advanced remote sensing capabilities, and efficient communication. It also serves as an important indicator of a nation's technological capabilities. Based on the comprehensive analysis of the current development status of the time-frequency system of navigation, remote sensing, communication and other satellites, the specific technical details of the core elements of the satellite time-frequency system such as time-frequency source, time maintenance, time user and time transmission channel are described in detail. At the same time, the existing problems and challenges of the current time-frequency system are analyzed, and the

收稿日期: 2024-08-09; 接受日期: 2024-09-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3906503)

future development trend of the satellite time-frequency system is evaluated. The research content can be used as a valuable reference for the research and development of satellite time-frequency system, and also provide corresponding guidance for researchers in related fields.

Key words: satellite time-frequency system; atomic clock; crystal oscillator; time transfer

时间和频率是我们日常生活和工作中不可或缺的基础参量，也是测量技术中精度极高的物理量^[1-3]。时间频率系统，简称时频系统，是一个广义的概念。它涵盖了三个核心部分：守时系统、授时系统和接收系统^[4]。随着卫星技术的不断发展，时间频率已经上升到国家战略资源的高度，受到了国际社会的广泛关注^[5-7]，全世界各行各业的发展都离不开时间频率测量技术的支撑^[8-9]。因此，构建高性能的时间频率系统，提供精准、稳定的时间频率服务，已经成为国防科技应用系统中极其重要的一部

分，可以为科技进步和社会提供坚实的支撑^[10-11]。

在卫星系统中，时间频率的稳定性和可靠性是卫星在轨稳定运行、功能实现以及性能提升的基本保障^[12]。例如，全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）之所以能够做到高精度、高可靠、全天候稳定运行，是因为依赖其准确可靠的卫星时频系统^[13-16]。由此可见，卫星时间频率系统是卫星系统的关键载荷之一。其核心组成有四个部分，分别为时间频率源、时间维护、时间传输通道以及时间用户^[17-18]，其组成部分示意图如图 1 所示。

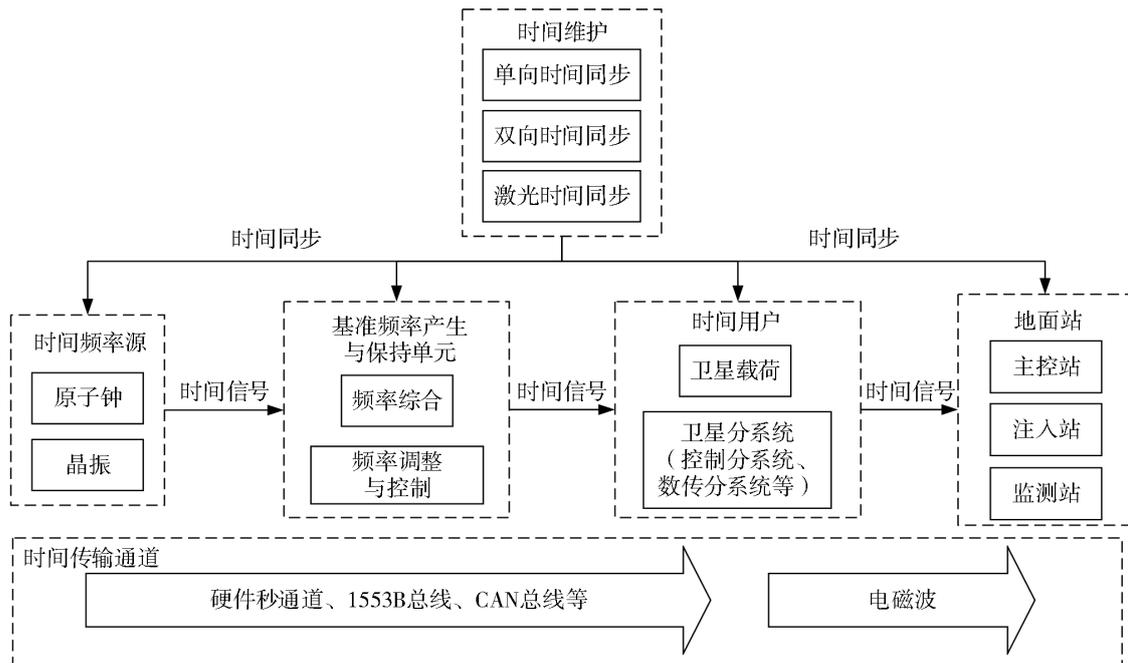


图 1 卫星时频系统的组成部分示意图

目前，有许多学者在卫星的时间频率源、时间维护等方面做了大量研究。例如，宋冰冰、陈江等^[19]介绍了几种 GNSS 光频原子钟的工作原理并与传统原子钟进行了比较；赵书红、董绍武等^[20]提出了光钟和氢钟联合计算时间尺度的算法，解决了间歇运行的光钟参与时间尺度计算的难点；王宇谱、马保印等^[21]评估了 GPS III 星载原子钟的长期性能；郭燕铭等^[22]利用 29 颗北斗三号星座卫星的星间链

路（inter-satellite link, ISL）测量值，研究北斗导航系统的时间同步性能，还提出了一种降低相对论双向精密时间同步影响的高精度校正方法^[23]。通过对现有文献的梳理发现，虽然国内外学者对于卫星时频系统的四个组成部分进行了一系列理论与应用研究，但当前缺少关于卫星时频系统整体框架的系统总结。这不利于初学者以及更多的研究者理解并研究卫星时频系统，也不利于卫星时频系统整个

在 $5 \times 10^{-14}/\text{d}$ 的水平,为 GPS 系统提供了稳定可靠的时间服务。2010 年左右,美国成功研制出了一种增强型铷原子钟,该原子钟以其卓越的性能,为 GPS 系统带来了一定的定位精度提升。特别地,这种增强型铷原子钟已成为 GPS BLOCK IIR-M 和 GPS BLOCK IIF 卫星的核心星载原子钟^[26]。我国已在北斗二号卫星上成功搭载自主研发的铷原子钟,标志着我国卫星时间频率技术领域取得了重要突破^[34]。

铯原子钟是世界公认的一级频率标准,由其复现作为秒定义的是无干扰下铯 (^{133}Cs) 原子基态超精细跃迁频率为 $9\,192.631\,77\text{ MHz}$ ^[35]。铯原子钟的优点为精度更高,更稳定;缺点是体积大、重量重、功率大等^[36]。国产铯原子钟十万秒和天稳定度均可达 10^{-14} 量级。

1977 年发射的 NTS-2 导航技术卫星搭载了两个铯原子钟,这两个铯原子钟在太空中稳定运行了 18 个月。NTS-1 和 NTS-2 的成功运行,不仅证明了原子钟在太空环境中的可靠性和稳定性,还进一步提升了时间基准的精度。由于早期的 BLOCK-I 系列卫星搭载的铷原子钟寿命较短,这促使后续 BLOCK-I 系列卫星在原有基础上增加了一台星载铯原子钟以提高系统的可靠性和冗余性^[37]。最终稳定度达到了 $10^{-13}/\text{d}$,极大地提升了 GPS 系统的时间基准精度。

1989 年至 1997 年共发射了 28 颗 GPS BLOCK-II/IIA 系列卫星,每颗卫星都搭载了 4 台原子钟,铷原子钟和铯原子钟各两台。这些原子钟的稳定性分别达到了 $2 \sim 3 \times 10^{-14}/\text{d}$ 和 $8 \times 10^{-14}/\text{d}$ 的水平,进一步提升了 GPS 系统的性能。在 BLOCK IIF 系列卫星中,不仅搭载了一台铷原子钟,还配备了 3 台铯原子钟,形成了多元化的原子钟组合^[38]。并且,其中的铷原子钟的稳定性优于 $6 \times 10^{-14}/\text{d}$ 。这一指标意味着它能够在长时间内保持极高的时间准确性,从而确保了 GPS 系统的定位精度可以达到分米级甚至更高^[39-42]。

1982 年 10 月 12 日,全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)发射了第一颗导航卫星。由于当时技术水平不高,卫星寿命仅为 3 年左右。后来,在俄罗斯经济逐渐恶化的情况下,由于星座维护成本过高,整个系统基本上不能提供可靠服务。GLONASS 系统于 1982 年至 1985 年发射了 11 颗 Block I 卫星,这些卫星搭载了铷原

子钟。1985 年 12 月发射的 Block IIA 卫星搭载了铯原子钟。1987 年和 1988 年发射的 12 颗 Block IIB 卫星配有铯原子钟。2003 年发射了 12 颗现代化卫星,每颗卫星上搭载了 3 个新型铯原子钟^[43]。随着“拯救 GLONASS 的补星计划”的加快实施,俄罗斯已于 2011 年 10 月恢复了 GLONASS 的全球组网。截止到目前,GLONASS 系统已拥有 24 颗正常运作的卫星。3 颗备用,1 颗测试中,在轨的 28 颗卫星的星载原子钟全部使用铯钟。铯钟寿命为 7 年,平均千秒稳为 3.5×10^{-13} ,万秒稳为 1.01×10^{-13} ,日稳维持在 1×10^{-13} 以内^[44-46]。

氢原子钟是利用氢原子的基态超精细磁子能级 $\{F=1, m_f=0\}$ 和 $\{F=0, m_f=0\}$ 之间的磁偶极跃迁来产生基准频率^[47]。氢原子钟分为主动型和被动型两种:主动型是指晶体振荡器被锁相于氢原子的自然振荡;被动型是指晶体振荡器产生的频率锁定于原子的振荡频率。主动型氢原子钟的优点为质量较小、谱纯度高、准确度高,有极好的短期稳定性和长期稳定性;被动性氢原子钟的优点为稳定性和准确度较好,且氢原子钟的连续工作寿命长^[48]。目前,国产氢原子钟十万秒和天稳定度均可达 10^{-15} 量级。在天稳以内的短期稳定性指标上,氢钟比铯钟好一个量级,但天稳以上二者指标差距不大^[49-50]。

至 2020 年 7 月,北斗导航系统实现全球服务的全面覆盖,并且开创性地构建了一套以新型铷原子钟与被动型氢原子钟组合的时间频率系统^[51]。这一全新配置不仅提升了北斗卫星系统时间频率体系的整体性能,还为全球范围内用户提供了更高精度和更可靠的时间服务。

北斗三号卫星采用了新型的高精度铷原子钟和氢原子钟,与北斗二号卫星相比,这些新型原子钟的性能有较大提升^[52]。同时,北斗三号卫星还进行了国产星载铯原子钟的搭载和性能测试^[53]。在北斗三号卫星系统中,不同轨道高度的卫星采用了不同的原子钟配置。其中,地球静止轨道卫星的星载原子钟为两台氢原子钟和两台铷原子钟。中地球轨道卫星的星载原子钟有两种不同的配置,一种为 4 台铷原子钟;另一种为 3 台铷原子钟和一台氢原子钟^[54-55]。北斗三号卫星星载原子钟的平均万秒稳定度均保持在 10^{-14} 量级,并且北斗三号卫星搭载的铷

原子钟相较于北斗二号卫星的铷原子钟,其稳定度提高了 65%~74%。这一显著的性能提升为北斗系统提供了更加可靠和精确的时间参考信号^[56-57]。

目前, Galileo 在轨运行的卫星总数达到了 30 颗。其中包括 26 颗具备全面运行能力的卫星和 4 颗用于在轨验证的卫星。在 Galileo 卫星星载原子钟的配置中,除了特定几颗伪随机噪声(pseudo random noise, PRN)号为 E11、E20 和 E22 的卫星搭载了铷原子钟,其他卫星的星载原子钟都是被动型氢原子钟^[58-59]。被动型氢原子钟具有极高的稳定度,可以达到大约 $2 \times 10^{-14}/\text{d}$ 。采用氢原子钟作为时间频率源不仅提升了 Galileo 系统的时间精度,也为系统的导航定位服务提供了更为可靠和准确的时间参考^[60]。

总体而言, GNSS 卫星采用原子钟作为其核心时间频率源,是因为导航服务本质上是对时间频率的精确测量。由于光速极高,即使是微小的时间差异也会引起显著的位置偏差。例如,仅仅 1 ns 的时间差就足以造成大约 0.3 m 的定位误差。因此,时间测量的精确度成为实现高精度定位的关键要素。

原子钟相比于晶体振荡器,在长期稳定性和准确性方面表现出色,确保了导航系统能够持续、可靠地运行。除了提供定位服务外,导航卫星还能提供高精度的时间同步服务。利用原子钟的高精度特性,卫星能够向地面用户和其他系统广播准确的时间信号,这对于保证金融交易的及时性、通信网络的同步性以及科学研究的精确性等方面至关重要。

综上所述,高性能的原子钟是导航卫星实现其功能的核心所在。

1.1.2 晶振

晶体振荡器是一种含有振荡电路的晶体元件,简称晶振^[40],通常被用来作为早期卫星、低轨卫星以及其他科学卫星的时间频率源。除了 GNSS 卫星,在其他卫星系统中,由于功率、大小、重量和花费等方面的限制,并不是全部都配备有原子钟。因此,高精度晶体振荡器成为了一种替代方案,以提供稳定的时间频率源。常用的晶体振荡器包括普通晶体振荡器(simple packaged crystal oscillators, SPXO)、电压控制晶体振荡器(voltage controlled crystal oscillators, VCXO)、恒温控制式晶体振荡器(oven controlled crystal oscillator, OCXO)、温度补偿式晶体振荡器

(temperature compensated crystal oscillator, TCXO)和超稳定晶体振荡器(ultra stable oscillator, USO)等^[61-62]。

普通晶体振荡器是一种简单的晶体振荡器,主要应用于稳定度要求不高的场合。美国早期的导航定位卫星系统,如子午仪卫星定位系统(NNSS)和 TIME-TION 1、2、3 系列卫星,均依赖于石英晶振作为其时间频率源。这些晶振的主要性能指标包括准确度达到 $10^{-9}/\text{d}$ 和短期稳定度维持在几分钟内 10^{-11} 的水平^[37]。中国海洋一号卫星也利用星务中心计算机内部的普通晶体振荡器作为时间频率源^[63]。

电压控制晶体振荡器,简称压控晶振(VCXO),其晶体的输出频率受外部电压的控制。相比于普通晶振,其输出的频率信号精度更高,稳定度约为 10^{-5} 量级^[64]。压控晶振有时会作为某些遥感卫星的时间频率源,并且遥感卫星的稳定运行依赖其时间频率系统的稳定性和精度。系统中所包括的设备主要有导航接收机、地面遥控注入系统以及数据管理系统的工作时钟等^[65-66]。当遥感卫星采用高精度同步时间管理方法时,卫星的时间频率源为导航接收机中的晶振,通过锁定导航信号中的高精度硬件秒脉冲可以确保时间信号的准确性。

恒温控制式晶体振荡器,简称恒温晶振(OCXO),可以通过恒温槽使其内部谐振器的温度保持稳定。通常在上电后约 5~10 min,其频率稳定度可以达到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 。OCXO 的稳定度优于其他晶振,多应用于对频率稳定性要求较高的场所^[64]。

铱星(Iridium)系统将星载 OCXO 作为时间频率源来维持系统时间和生成通信信号。尽管 OCXO 在短期内的稳定性良好,但 100 s 后的钟差和钟漂稳定性均低于星载原子钟。因此,铱星系统一天至少进行两次时间频率调整以确保时间同步^[67]。虽然 OCXO 的稳定性虽稍逊于 USO,但短期内仍可达到 10^{-12} 的水平^[68],因此被应用于 LuoJia-1A 和 COSMO SG 等卫星中^[69-70]。“东方红一号”卫星的时间频率源采用了高度稳定的精密恒温晶振,这是一种由中国航天科工集团第二研究院 203 所设计的抗震石英晶体,其标称频率为 5.05 MHz^[71-72]。

温度补偿式晶体振荡器,简称温补晶振(TCXO),装有热敏电阻和温度补偿电路,通常应用于环境温度变化较大的场所^[64]。在 Iridium-Next 卫星时频系统

中，一个关键组成部分是主频率产生单元（master frequency generation unit, MFGU）。该单元包含一个振荡频率为 5 MHz 的石英晶体振荡器，作为 MFGU 的稳定频率源。通过倍频或其他处理，MFGU 能够提供多个（10 个）10 MHz 频率信号的输出，并合成得到 10 路 1 545 MHz 频率信号。此外，晶体振荡器的频率可以通过地面站注入的命令进行调整。MFGU 内部对地面的控制指令进行处理，并转换为对应的调整电压，以实现石英晶体振荡器频率的精确调整^[73]。

超稳定晶体振荡器，简称超稳晶振（USO），是短期稳定度最高的振荡器，主要应用于航天、通信等领域^[74]。低轨卫星广泛采用恒温晶振（OCXO）、超稳定晶振（USO）作为其主要的频率源。特别是 USO，其短期稳定性可达到 10^{-13} ，并在中长期内也表现出良好的稳定性^[75-77]。在其他科学卫星中，如 GRACE、GRACE-FO、Jason-2、HY-2 和 SENTINEL-3 等，都采用了超稳定晶振（USO）作为时间频率源^[78-80]。例如，GRACE 卫星携带的 USO 是美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室（APL）研制的，其短期稳定度和长期稳定度都很好，短期稳定度可以达到 $2 \times 10^{-13}/s$ ^[81]。GRACE-FO 卫星上所有仪器的时间频率参考信号均由星载 USO 产生。

旅行者 1 号和旅行者 2 号探测器（Voyager-1/2）是人类历史上第一个携带超稳定晶体振荡器（USO）的外行星探测器。这些 USO 由 Frequency Electronics Incorporated 制造。其输出频率为 19.13 MHz，这一频率由温控晶体振荡器产生。对于小于 0.1 G 的外部磁场变化，其频率稳定性优于 5×10^{-12} 。旅行者探测器通过将 USO 的 19.13 MHz 输出频率乘以 120 倍，即可得到 2.3 GHz 的发射下行链路频率，为从航天器到地球的单向无线电传输提供了精确的参考频率。这一技术的应用，不仅展示了当时的技术水平，也为后来的深空探测任务提供了宝贵的经验和参考^[82]。

还有许多科学卫星系统也都采用了晶振作为其时间频率源。例如，实践十号卫星的时间频率源由数据管理系统的晶体振荡器产生的工作时钟提供^[83]；北京三号 A/B 卫星采用了内时钟和外时钟两种时间频率源^[84]；隼鸟 2 号（Hayabusa-2）探测器

的时间频率源也为晶体振荡器^[85]。

1.2 时间维护

时间维护技术通常用于校正卫星上时间，进而保证星地时间同步，也称为星地时间校准^[86]。全球导航卫星系统中的星地同步指的是卫星与地面设备之间的时间同步。这种同步是确保 GNSS 系统精确、高效运行的关键^[87-89]。当前，卫星星地时间同步常用的技术方法主要有 3 种：星地单向时间同步^[90-92]、星地双向时间同步^[93-95]和激光时间同步^[96-98]。

1.2.1 星地单向时间同步

星地单向时间同步的工作过程为：地面站接收卫星发来的电磁波信号，计算出卫星与地面站之间距离，进而可以求出电磁波信号从卫星到达地面站所需的时间。通过地面站与卫星之间的伪距计算信号的传输时间，消除传输时间中其他的误差，包括电离层对流层延迟，设备传输延迟等。得到卫星钟与地面钟之间的差值，从而实现星地时间同步^[86,99-100]。星地单向时间同步的原理图如图 3 所示。

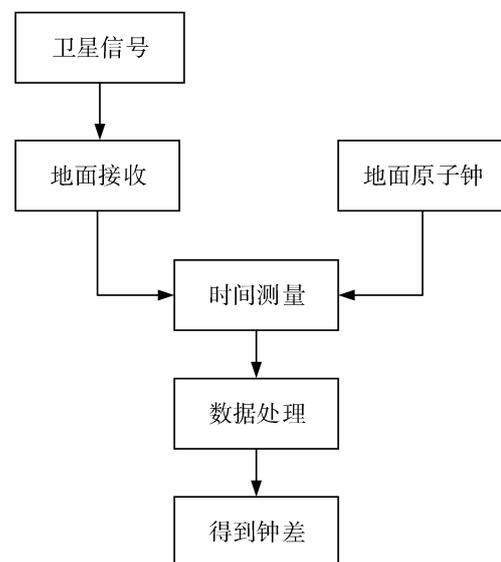


图 3 星地单向时间同步原理图

最早的卫星单向时间同步采用单站模式，即通过一个地面站的观测来实现卫星钟差的确定^[101]。随着精度和可靠性的提高，在多个地面站均实现同步的基础上提出了多站模式的卫星单向时间同步法^[102]。

GPS 系统的星地时间同步和校准采用单向时间同步法和轨道测定同步进行。GPS 卫星系统的星地时间同步过程涉及全球范围内的轨道测量和时间

同步监测站。这些监测站的时间频率源为高精度铯原子钟，可以与系统时间进行准确同步。GPS 系统主控站的时间频率源为 GPS 主钟，主控站可以对来自各个监测站测量的伪距值以及通过轨道定位得到的卫星与同步站之间的距离值进行分析和处理。通过复杂的计算和分析，主控站能够推算出新的合理数据，这些数据精确地反映了卫星时钟与地面时钟之间的时间差异。主控站通过上行注入站将时差信息发送至对应的 GPS 卫星，卫星接收到这些信息后，对星载原子钟进行时间校正处理。这一过程保证了整个 GPS 系统能够提供准确的时间和位置信息^[103]。

GLONASS 系统的地面中央同步器在星地同步过程中起着重要的作用，其产生的时间信号是整个系统时间同步的基准。这一标准时间信号会被中继至相位控制系统（PCS），PCS 负责监测通过导航信号传输的卫星时钟的时间与相位。为了实现精准同步，PCS 需要进行两种关键测量。首先，雷达测量地面时间同步器与卫星之间的距离，精度的级别为米级。然后，将精度高达 1×10^{-13} 的标准频率所产生的参考时间和相位与卫星发送的导航信号进行比较，以获取卫星时钟的准确状态^[103]。

基于上述两种观测数据，PCS 能够精确计算并预测卫星时钟和相位偏移，以及每颗卫星时钟的时间尺度相对于 GLONASS 时间与俄罗斯时间计量与空间研究所（IMVP）所保持的地方时 UTC（SU）的改正数。为了将这些改正数及时应用于卫星，时间注入站会定期上载数据。具体而言，每天上载一次生成的 2 h 预报星历，确保卫星能够提前了解未来的轨道变化。同时，每天上载两次卫星钟差数据，确保卫星时钟能够与系统时间保持高度一致。

Galileo 卫星导航系统是利用单向时间同步结合精密定轨技术得到的伪距值和站星距离的差值得到卫星原子钟与地面原子钟之间的偏差，从而实现星地时间同步^[103]。Galileo 的星地时间同步过程为：首先，地面控制中心接收来自监测站的观测数据，采用共视法获得由 UTC（PTB）、UTC（OP）等 6 个实验室保持的 UTC（ k ）时间。再进行预处理，预处理后的数据被送入定轨与时间同步处理模块进行进一步的分析。最后再进行滤波产生钟差改

正数和平均频率。上行注入站将钟差改正数上传至对应的 Galileo 卫星，系统主钟利用得到的平均频率来进行调整，产生系统时间基准，确保整个 Galileo 系统时间的同步性和稳定性。目前，Galileo 系统时与国际原子时（TAI）或 UTC 时间偏差保持在 50 ns 以内^[103]。

1.2.2 星地双向时间同步

星地双向时间同步的工作原理为：卫星将测距信号进行伪码扩频调制发射给地面站，地面站接收到信号后可以测出卫星信号到地面站传输所经过的时延。与此同时，地面站也将测距信号进行伪码扩频调制，通过地面站设备将信号发射给卫星。卫星接收到地面站的信号后，通过相关技术测量出地面站信号到卫星传输所经过的时延，并将此时延数据通过通信链路发送给地面站。地面站将得到的两个数据相减，再去掉各种误差时延影响，就可以得到卫星和地面之间的钟差，实现星地时间同步^[93]。星地双向时间同步的原理图如图 4 所示。

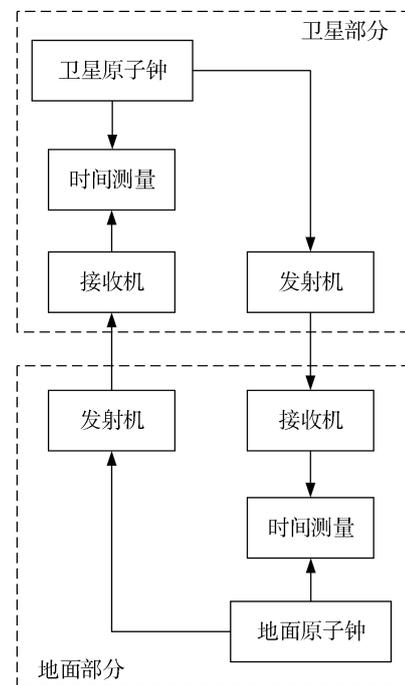


图 4 星地双向时间同步原理图

北斗系统的星地时间同步采用的是双向时间同步技术。通过双向时间同步技术可以消除电离层时延影响，从而使得星地时间同步精度更高^[104-106]。北斗卫星系统的星地时间同步依赖于地面注入站发送的上行 L 波段信号。这些信号中包含了精确的

时间信息、卫星星历以及注入站坐标等关键数据。卫星接收到这些信号后，利用其中的信息计算出电波在星地之间传播的时延，并据此建立星上时间。这一步骤初步完成了卫星与系统时间的粗同步，为后续精确同步奠定了基础。

在粗同步的基础上，卫星会连续接收并测量来自两个测量条件最佳的注入站发射的上行 L 波段伪距。伪距测量是卫星导航系统中一种常用的测距方法，它考虑了信号传播中的误差因素，能够提供较为准确的距离估计。卫星通过下行信号将测得的伪距数据发送给时间同步站，为后续的精确定同步提供了关键数据。

时间同步站接收到卫星发送的伪距数据后，会连续测量所有可视卫星的下行 L 波段信号的伪距。其中包含了卫星与地面站之间的准确距离信息，可以依据这些数据来实现星地时间同步。时间同步站会将接收到的观测数据发送给主控站，以便进一步处理和分析。主控站在接收到时间同步站发送的观测数据后，进行卫星与系统之间的钟差计算。这一计算过程会综合考虑多种因素，如卫星轨道、地球自转、电离层延迟等，以确保计算结果的准确性和可靠性。当卫星钟在初次同步或者运行过程中出现时间偏差接近预设阈值时，主控站的运控系统会向卫星发出指令，控制卫星上的有效载荷对卫星钟进行自动调整，包括调相和调频等操作，使卫星时钟能够与系统时间保持高度一致，从而实现星地时间的精确同步。

1.2.3 激光时间同步

星地单向时间同步和星地双向时间同步都是以电磁波作为时间信号的传输媒介，而激光时间同步是利用激光作为时间信号的传输媒介。激光时间同步的基本原理为：地面站向卫星发射激光脉冲，该信号到达卫星并被卫星接收，测得一个伪距观测值。同时卫星上放置的后向反射器会将光脉冲反射回地面站，在地面站接收回波并测得另一个伪距观测值。由于卫星的激光观测量含有卫星相对于地面的钟差，而地面上的激光观测量不含卫星钟差。因此，用卫星上测得的激光观测量减去地面上的激光观测量，就可以得到卫星与地面的钟差，从而实现星地时间同步。激光双向时间同步原理图如图 5 所示。

由于激光传播具有精度高、误差小等特点，一些国家已经成功进行了激光时间同步的试验，结果证明利用激光进行星地之间的时间同步是有效可行的^[100]。

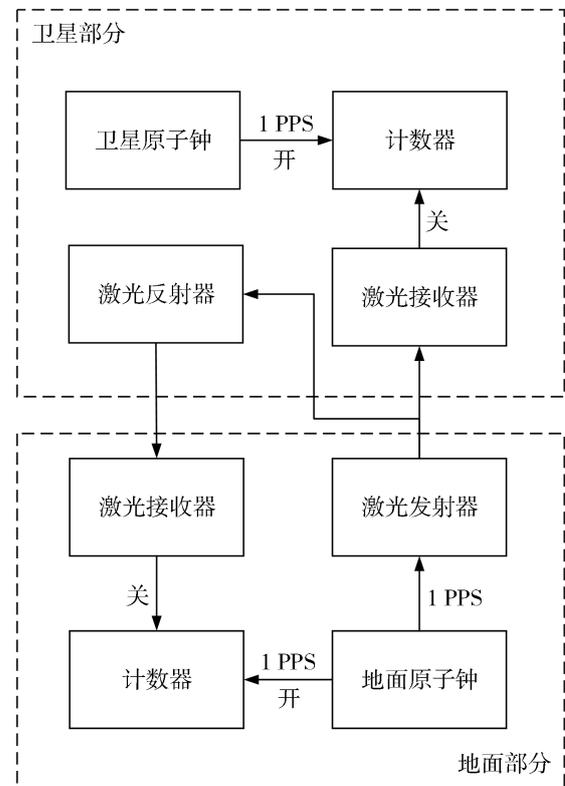


图 5 激光时间同步原理图

1972 年 M. Lefebvre 和 J. Gaignebet 提出 LASSO 项目，设想在地球同步卫星上安装激光反射器、激光接收器、计时器等设备来实现洲际激光时间同步。1982 年第一颗试验卫星 Sirio/2 卫星发射失败坠入大西洋^[107]。第二颗试验卫星 Meteosat-P2 于 1988 年发射，法国蓝色海岸天文台激光测月站（OCA/CERGA）在不久后就收到了回波。1989 年，OCA 和奥地利 TUG/Graz 两站首次进行了激光时间传递同步实验。1992 年，Meteosat-P2 卫星移至大西洋上空，试验开始在美国 McDonald 测月站（MLRS）和 OCA 进行^[108]。

墨子号量子科学卫星于 2016 年 8 月在酒泉成功发射升空，是中国科学院空间科学战略先导科技专项首批 5 颗科学实验卫星之一。墨子号科学实验卫星搭载了大量光学设备以及电子学仪器，同时搭载了脉冲同步光，也具备单光子探测器以及高精度的时间探测器转换器。从墨子号搭载的设备仪器可以看出，其具备了利用激光时间同步方法实现星地

同步的资源条件^[109]。

1.2.4 其他时间同步技术

除了全球导航卫星，其他卫星系统也有各自的时间维护和同步技术，例如集中校时和均匀校时等策略^[110]。

在遥感卫星的时间同步过程中，首先，导航接收机在完成开机、卫星定位以及秒功能调整后，数据管理系统将接收地面系统发送的专门用于时间校准的工作指令，并将这些指令转发给所有需要进行时间同步的用户。接收到校时指令后，导航接收机会在下一秒立即产生秒脉冲信号，与整秒信号进行精确同步，并锁定此信号所携带的时间信息。这些信号和信息将作为整个系统运作的基础起始点。秒脉冲信号通过时间传输通道被发送至各个时间用户^[111]。整秒时间码信息经由 1553B 总线进行广播，最终实现了遥感卫星的高精度时间维护与发布。遥感卫星的时间管理有授时和校时两种方法。其中，授时技术有地面授时和导航授时；校时可分为星上集中校时、导航自主校时和地面均匀校时^[17]。

实践十号卫星的时间维护的方法包括集中校时、均匀校时、自主校时以及时间广播等机制。当卫星与地面站的时间出现较大差异时，实践十号卫星会依赖中央处理单元（central terminal unit, CTU）和回收仓管理单元（reentry management unit, RMU）的集中校时机制，来校准星上的 CTU 和 RMU 时间^[83]。

北京三号 A/B 卫星为先进高分辨率对地观测卫星，其高精度时间系统核心由秒脉冲信号和相应的星务时间基准广播构成^[112]。在时间校正上，北京三号 A/B 卫星运用了地面校时、GNSS 时间主动校时及无 GNSS 自主校时 3 种模式，以确保时间精确性^[84]。

1.3 时间用户和时间传输通道

卫星时频系统的核心任务是为时间用户提供满足特定任务需求的精准卫星时间频率。这些时间用户广泛分布于卫星的各个组成部分，包括但不限于卫星载荷、控制分系统、数传分系统等各个卫星分系统^[113]。

时间传输通道作为连接时间频率源和时间用户的桥梁，是提供时间频率信息的关键部分。不同的卫星系统根据其任务特性和硬件配置，采用不同

的时间传输通道。常见的传输通道有硬件秒脉冲通道、1553B 总线和 CAN 总线等。

硬件秒脉冲通道通常为由 RS422 接口等组成的硬件时间传输通道，用来将秒脉冲发送给时间用户^[114]。RS422 接口通常采用全双工通信模式^[114]，传输速率可高达 10 Mbit/s，传输距离可长达 2 000 m。并且 RS422 具有高输入电阻和更强的驱动能力，可以在一条平衡总线上连接多达 10 个接收器^[115]。

MIL-STD-1553B 总线，简称 1553B 总线，通常用于航空工业领域。1553B 总线具有的特点为：① 1553B 总线是广播式分布处理的网络，任一终端的故障不会造成整个终端的故障；② 1553B 总线传输码速率为 1 Mbit/s，传输消息的时间较短；③ 1553B 总线按指令的方式异步操作，非常适合集中控制的分布式处理系统；④ 1553B 采用了合理的差错控制措施，即反馈重传方法^[116]。

CAN 总线发布于 1986 年，通常用来进行仪器之间的数据交换^[117]。CAN 总线强调了实时性，并且具有极高的可靠性和独特的设计，发展前景十分广阔。

相比于 1553B 总线，CAN 总线具有以下特点：① CAN 的组网形式更灵活，可以使总线上挂接更多的设备；② CAN 总线具有更强的故障监测和隔离能力，通信可靠性和容错能力与 1553B 相差不多^[118]；③ CAN 总线功耗更低、质量更轻、连接更便携并且成本较低；④ CAN 总线对通信数据块进行编码，具有良好的实时性。

总体而言，由于总线协议不同，1553B 更适合构建集散控制系统，而 CAN 总线更适合构建网络控制系统^[119]。

遥感卫星为了确保时间信息的精确传输，通常依靠硬件秒脉冲通道以及串行 1553B 总线通道作为其时间传输通道^[17]；实践十号卫星则依靠串行 1553B 总线通道作为其时间传输通道^[83]。在北京三号 A/B 卫星中，时间用户涵盖了星上的多个关键分系统。这些分系统对时间精度的要求极高，因此，北京三号 A/B 卫星采用了高精度秒脉冲以及星务时间基准广播作为它们工作的时间基准。为了满足这些时间用户对时间信息的实时性和准确性需求，北京三号 A/B 卫星在其星上网络中，选用了两条 CAN

总线作为整星的实时现场总线以进行时间传输。这种总线技术高效地整合了卫星上分散的各个组成部分，确保了星上信息的迅速交换与共享，从而确保卫星能够实时完成任务的运行管理和控制^[84]。

2 存在的问题及发展趋势

2.1 时间频率源

卫星系统所使用的时间频率源的性能对于整个系统的稳定运行是非常重要的。一个高稳定、高精度的时间频率源不仅是卫星正常运行的基础，还可以体现一个国家发展水平的高低。结合卫星系统运行的需求和相关技术的研究现状，时间频率源技术的发展趋势可归纳为以下几个方面：从晶振的小型化和高稳定度发展，到原子钟的小型化与低成本方向发展，最终可能过渡到芯片原子钟和光钟技术的广泛应用。

晶体振荡器的小型化和高稳定度发展。在卫星系统中，恒温晶体振荡器的频率稳定度在提升过程中，主要依赖于频率调谐技术和算法优化处理。尽管其最终稳定度已经达到了 10^{-11} 量级^[120]，但在复杂的空间环境下，晶振的长期稳定性和抗环境干扰能力仍存在不足。尤其是在长时间任务中，晶振的性能容易退化，影响任务的精度和可靠性。未来的发展趋势包括进一步减小晶振的体积，以降低功耗，提升能源效率。同时，频率稳定度和相位噪声的进一步优化也是重要方向。并且，尽可能提高晶振的寿命和可靠性，以确保其在长期任务中的应用稳定性和性能^[121]。

原子钟的小型化和低成本发展。原子钟凭借其高精度和高稳定性，已成为卫星系统的主流时间频率源^[122-125]。然而，当前的原子钟仍存在结构复杂、价格高昂、体积庞大等问题，限制了其在低轨小型卫星等空间和成本受限的场景中的应用。未来的研究重点将是如何在不牺牲精度的情况下，进一步降低原子钟的体积和成本。目前，已有研究所成功研发出一种星载铷钟，它兼具低成本和小型化的优势，重仅 1.2 kg，体积小于 0.9 L。秒稳定度超过 3×10^{-12} ，千秒稳定度更是优于 1×10^{-13} ，完全契合上星搭载的需求^[126]。这款产品的出现，标志着原子钟技术在

小型化、低成本化方面取得了重要突破。

芯片原子钟和光钟技术的潜力发展。近年来，CPT 芯片级原子钟技术因能显著减小原子钟体积而备受瞩目。CPT 原子钟以其高度集成化和小型化的特点，使得其应用场景更加广泛^[127]。此外，随着光钟技术的不断成熟，其高于微波频段 5~6 个数量级的频率特性，带来了更低的不确定度和更高的稳定性^[128]。未来，光钟技术有望成为时间频率源的新趋势，能够为科学研究和工程应用提供更为精准、可靠的时间频率服务^[129]。

2.2 时间维护

时间同步技术在卫星系统中至关重要，尤其是星地时间同步，直接影响数据传输的准确性和系统的整体效能。结合当前技术现状，时间同步技术的发展趋势可以归纳为以下几个方面：通过提高测量精度、优化时间同步算法，以及针对极端环境的同步技术进行深入研究。

精度提升及误差校正的发展。尽管当前的双向测距技术已经在很大程度上减少了同步误差，但仍面临着测量精度不足的挑战。现有的双向测距技术主要依赖伪距测量，无法达到载波相位测量的精度，这成为影响同步精度的核心问题之一。未来，随着载波相位测量技术的应用，时间同步精度有望提升至亚纳秒级。此外，几何路径时延误差、卫星轨道影响、以及广播星历中的随机噪声等问题也将通过高精度的传输路径分析和模型校正技术得到进一步优化。

针对极端环境的同步技术研究。未来，时间同步技术不仅要面向深空等复杂空间环境，还需适用于极端环境（如深海、极地、沙漠等）。在这些条件下，现有的时间同步技术可能无法满足需求，因此需要开发专门的同步设备和算法，以确保在恶劣环境下依然能够实现精准的时间同步。

星历生成和传输技术的优化。为了减少广播星历中的随机噪声对同步精度的影响，未来的发展将侧重于优化星历的生成和传输过程，进一步提升整体系统的时间同步能力。这些技术的进步将为高精度应用，尤其是面向深空任务的高精度时间同步提供保障。

3 结语

在本文中,基于广泛的文献总结和系统性分析,深入探讨了卫星时频系统的定义、核心组成、主要功能及其未来发展趋势。

首先,在引言部分,强调了时间频率在现代社会中的重要性,并自然引出卫星时频系统的基本概念。接着,从4个关键方面——时间频率源、时间维护、时间用户和时间传输通道,对卫星时频系统的组成及其功能进行了详细的介绍。具体而言,卫星时频系统的时间频率源主要由晶体振荡器和原子钟组成,并确保了系统的高精度和稳定性。时间维护通常用于校正卫星星上时间,进而保证星地时间同步,保障系统时间准确无误且一致。时间用户作为系统的服务对象,通常包括卫星载荷以及各个卫星分系统,它们依赖系统提供的时间频率信息来实现各自的功能。时间传输通道作为连接时间源和时间用户的桥梁,通常采用串行1553B总线等硬件线路,确保了时间频率信息的可靠传输。

最后,对近年来卫星时频系统的技术发展及现存不足进行总结,并展望了该系统的未来演进方向。随着科技的迅猛发展和应用领域的不断扩展,卫星时频系统正向着更高的精度、更佳的便携性和更强的稳定性迈进,从而满足不断增长的多元化应用需求。同时,随着物联网、大数据、人工智能等前沿技术的融合,卫星时频系统有望实现更精准、更高效的时间同步和频率标准化服务,覆盖全球用户。

综合本文的系统性分析,我们对卫星时频系统的定义、核心组成、主要功能进行了详尽的阐述,并对未来的发展趋势提出了展望。这些研究成果不仅有助于推动卫星时频技术的持续进步,更为相关领域的创新发展提供了有价值的参考和指导。我们坚信,在科技发展的推动下,卫星时频系统将在未来发挥更加重要的作用,为人类社会的进步贡献更多力量。

参考文献:

- [1] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 周渭, 偶晓娟, 周晖, 等. 时频测控技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [3] 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(国家授时中心), 2003.
- [4] 吴海涛, 李孝辉, 卢晓春, 等. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [5] 童宝润. 时间统一系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 韩春好. 时空测量原理[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] 王燕平, 董绍武, 袁海波. 时间频率科学数据库的建设和应用[C]//2009 全国时间频率学术会议论文集, 成都: 全国时间频率学术会议组委会, 2009: 554-558.
- [11] 澎湃新闻. 星链互联网发展或进入新阶段[EB/OL]. (2021-07-02)[2024-03-23]. https://www.thepaper.cn/news-Detail_forward_13397397.
- [12] 吴海涛, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星导航系统时间频率性能测度方法研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2011, 41(5): 635-639.
- [13] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21+27.
- [14] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
- [15] 张军. 导航高精度时频基准源生成技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2016.
- [16] 秦红磊, 丛丽, 金天. 全球卫星导航系统原理、进展及应用[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [17] 田贺祥, 王同桓, 李璇, 等. 遥感卫星星上时间管理方法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 80-82+87.
- [18] 王玮, 陈丹, 徐晓光. 航天器自主高精度时间管理系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(7): 127-129+133.
- [19] 宋冰冰, 陈江, 廉吉庆, 等. 基于全球导航卫星系统应用的光频原子钟发展现状与可用性分析[J]. 真空与低温, 2024(6): 664-679.
- [20] 赵书红, 董绍武, 白杉杉, 等. 光钟与氢钟联合的时间尺度算法研究[J]. 天文学报, 2024, 65(3): 66-76.
- [21] 王宇谱, 马保印, 赵营营, 等. GPS III 星载原子钟长期性能评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(11):

- 1148-1154. .
- [22] GUO Y, ZENG L, ZHANG F, et al. Time synchronization between satellites via inter-satellite link observations of BDS-3 constellation: method, experiment and analysis[J]. *Measurement*, 2024, 224: 113855.
- [23] GUO Y, BAI Y, GAO S, et al. Relativistic effects on satellite-ground two-way precise time synchronization[J]. *Information*, 2021, 12(10): 422.
- [24] 黄飞, 明德祥, 乔纯捷, 等. 时间统一系统中多基准时间源的设计[J]. *兵工学报*, 2008(11): 1330-1334.
- [25] 贺玉玲, 何克亮, 王国永, 等. 导航卫星时频系统发展综述[J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(5): 61-70. .
- [26] 梅刚华, 赵峰, 祁峰, 等. 用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟特性[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2021, 51(1): 118-124.
- [27] 王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [28] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 星载铷原子频率标准的可靠性研究[J]. *时间频率学报*, 2004, 27(2): 138-145.
- [29] 马艳. 星载铷原子钟的频率漂移补偿技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [30] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- [31] 徐俊秋, 李俊瑶, 赵峰, 等. 高性能铷原子钟的高精度频率漂移补偿研究[J]. *波谱学杂志*, 2024, 41(2): 184-190.
- [32] LI W B, HAO Q, DU Y B, et al. Demonstration of a sub-sampling phase lock loop based microwave source for reducing dick effect in atomic clocks[J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(7): 23-26.
- [33] 顾亚楠, 陈忠贵, 帅平. 国外导航卫星星载原子钟技术发展概况[J]. *国际太空*, 2008(10): 12-16.
- [34] 程梦飞, 王宇谱, 薛申辉, 等. 北斗二号卫星导航系统运行末期卫星钟性能评估[J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(3): 372-379.
- [35] 张振兴. 铯原子喷泉钟微波源关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [36] 郭渊. 卫星时频生成与保持系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [37] 刘铁新, 翟造成. 卫星导航定位与空间原子钟[J]. *全球定位系统*, 2002(2): 7-17.
- [38] 王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2018.
- [39] 苟向阳. 导航卫星时钟的锁相环技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [40] 李溢翔. 晶振同步卫星信号算法的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [41] 肖波. 精密时钟管理系统关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2023.
- [42] 王庆华, FABIEN D, PASCAL R. 用于 GNSS 的 SpT 星载原子钟及时间系统介绍[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(10): 1177-1181.
- [43] 赵学军. GNSS 系统时间及星载钟研究[J]. *现代导航*, 2018, 9(6): 399-404.
- [44] 赵丹宁, 雷雨. GLONASS 星载原子钟的长期特性分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(6): 895-904.
- [45] 赵丹宁. GLONASS 星载钟性能分析[J]. *时间频率学报*, 2020, 43(1): 66-71.
- [46] XIE W, HUANG G W, WANG L, et al. Long-term performance detection and evaluation of GLONASS onboard satellite clocks[J]. *Measurement*, 2021(175): 109091.
- [47] 何克亮, 张为群, 林传富. 主动型氢原子钟的研究进展[J]. *天文学进展*, 2017, 35(3): 345-366.
- [48] 胡锦涛. 氢钟守时应用[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2000: 144-147.
- [49] 陈汗龙, 董哲, 周真帆, 等. 国产原子钟频率稳定度评估分析[J]. *导航定位学报*, 2023, 11(6): 28-33.
- [50] 陈静. 原子钟性能试验与分析[J]. *市场监管与质量技术研究*, 2023(5): 27-31+43.
- [51] 李方能, 梁益丰, 许江宁, 等. BDS/GPS 新型铷原子钟长期特性分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(5): 452-461.
- [52] 程彤. GNSS 卫星钟性能评估与基准卫星钟优选[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [53] 张照瑞, 廉吉庆. 北斗与 GPS 系统在轨原子钟钟差数据分析与评估[J]. *真空与低温*, 2024, 30(6): 691-696.
- [54] 陈忠贵, 武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(6): 835-845.
- [55] 卢璠, 武建峰, 袁海波, 等. 北斗三号系统时频体系设计与实现[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(8): 1340-1348.
- [56] 程彤, 王潜心, 胡超, 等. BDS-2 和 BDS-3 卫星原子钟特

- 性分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 69-76.
- [57] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3 卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 53-61.
- [58] 潘雄, 杨玉锋, 卿晨昕, 等. Galileo 在轨卫星钟性能评估与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 53-59.
- [59] 钦伟瑾, 葛玉龙, 杨旭海. 伽利略星载被动型氢原子钟性能评估[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 93-99.
- [60] 唐升. 星上时频主备链路比对测量及自主完好性监测方法[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2014.
- [61] 陶俊江. 低相位噪声石英晶体振荡器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [62] 吴豪. 晶体振荡器自校准技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [63] 贾涛, 伍保峰. 中国海洋一号卫星星务管理系统设计与在轨性能评估[J]. 航天器工程, 2003(3): 71-78.
- [64] 李贺. 基于 GPS 授时秒脉冲的高稳晶振驯服与保持系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [65] 分析测试百科网. GJB 2994-1997 航天器数据系统时间码格式[EB/OL]. (2020-01-08)[2024-03-23]. <https://www.antpedia.com/standard/1336048020-1.html>.
- [66] 郝建波. 遥感卫星有效载荷观测区域地面覆盖与卫星轨道控制[J]. 通信电源技术, 2022, 39(5): 48-50+60.
- [67] PRATT J, AXELRAD P, LARSON K M, et al. Satellite clock bias estimation for iGPS[J]. GPS Solutions, 2013, 17(3): 381-389.
- [68] HUDSON A I, IYANU G H, WANG H, et al. Long-term performance of a space-system OCXO[C] // 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), Orlando: IEEE, 2019: 1-5.
- [69] WANG L, CHEN R, LI D, et al. Initial assessment of the LEO based navigation signal augmentation system from Luojia-1A satellite[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3919.
- [70] VENTURINI R, SPADONI F, CROCI R, et al. COSMO SG, SAR instrument design[C] // 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin: IEEE, 2014: 1-4.
- [71] 国家空间科学中心. “东方红一号”卫星跟踪、定位系统—地面锁相接收机研制纪实[EB/OL]. (2022-08-04)[2024-04-02]. http://www.nssc.cas.cn/ztzl2015/zgkjxkzl2015/DFH50/202005/t20200507_5574101.html.
- [72] 国家空间科学中心. “东方红一号”卫星星载单频超短波多普勒信标机的研制[EB/OL]. (2022-05-04)[2024-04-02]. http://www.nssc.ac.cn/ztzl2015/zgkjxkzl2015/DFH50/202005/t20200507_5574151.html.
- [73] BLOCH M, HO J, MANCINI O, et al. Iridium-next master clock[C]//European Frequency and Time Forum, Noordwijk: IEEE, 2012: 260-262.
- [74] 杨磊, 秦玉浩. 5 MHz 超稳定晶体振荡器(USO)设计与实现[C] // 第九届中国卫星导航学术年会论文集——S06 时空基准与时频技术, 哈尔滨: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2018.
- [75] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 107-1087.
- [76] BERTIGER W, DUNN C, HARRIS I, et al. Relative time and frequency alignment between two low earth orbiters, grace[EB/OL]. (2023-05-08)[2024-03-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1275101>.
- [77] 聂欣, 郑晋军, 范本尧. 低轨卫星导航系统技术发展研究[J]. 航天器工程, 2022, 31(1): 116-124.
- [78] CASE K, KRUIZINGA G, WU S C. GRACE level 1B data product user handbook[K]. 2010.
- [79] KORNFELD R P, ARNOLD B W, GROSS M A, et al. GRACE-FO: The gravity recovery and climate experiment follow-on mission[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(3): 931-951.
- [80] AURIOL A, TOURAIN C. DORIS system: The new age[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(12): 1484-1496.
- [81] 余世刚. 高精度 K 频段星间微波测距技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [82] KRISHER T P, ANDERSON J D, CAMPBELL J K. Test of the gravitational redshift effect at Saturn[J]. Physics Review Letters, 1990, 64(12): 1322-1325.
- [83] 王文平, 元勇, 王颖, 等. 实践十号返回卫星时间同步系统设计与验证[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(8): 237-240.
- [84] 田帅虎, 李超, 赵丽, 等. 北京三号 A/B 卫星星务分系统信息处理技术[J]. 航天器工程, 2023, 32(3): 85-92.
- [85] OSHIMA T, TERUI F, TSUDA Y. Chapter 3-Spacecraft system design of Hayabusa2[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022: 25-48.

- [86] 李树洲. 卫星导航定位系统星地时间同步方法[J]. 无线工程, 2002, 32(10): 60-63.
- [87] 武珺, 王韵涵, 张祎莲, 等. 2023 年国外导航卫星系统发展综述[J]. 国际太空, 2024(4): 17-20.
- [88] 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.
- [89] 张梓巍, 白玉星, 李晨曦. 全球导航卫星系统的发展综述[J]. 科技与创新, 2023(9): 150-152.
- [90] 叶增. 卫星授时方法与星地同步数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [91] 张伦. 星地时间同步技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [92] 赵金生. GNSS 导航系统星地时间同步研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
- [93] 孟凡芹. 基于星地双向时间比对的卫星钟差确定方法[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2014.
- [94] 韩子彬. 星地精密时间同步及模糊度处理技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2023.
- [95] 王威, 魏立栋, 范国清. 星地距离变化对星地双向时间比对的影响及改正[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2): 23-26+45.
- [96] 陈菲. 星地时间同步基带处理关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2016.
- [97] 张靖. GPS 导航卫星星地时间同步技术的仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [98] 丁鹏. 卫星网络的时间同步技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [99] 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(国家授时中心), 2021.
- [100] 刘利, 韩春好, 朱陵凤, 等. 基于伪距测量的钟差计算模型[J]. 时间频率学报, 2009, 32(1): 36-42.
- [101] 王正明, 高俊法. 高精度国际时间比对的进展[J]. 天文学进展, 2000, 18(3): 181-191.
- [102] 李鑫, 杨福民. 激光时间传递技术的进展[J]. 天文学进展, 2004, 22(1): 10-22.
- [103] 蔡志武, 蔺玉亭, 肖胜红, 等. 时间基准与授时服务[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
- [104] 吕宏春. 基于北斗 Ka 星间链路体制的星地时间同步方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2018.
- [105] 李瑞锋, 王元明. 星地双向时间同步技术在 COMPASS 中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 842-844.
- [106] LIU L, ZHU L F, HAN C H, et al. The model of radio two-way time comparison between satellite and station and experimental analysis[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2009, 33(4): 431-439.
- [107] 张忠萍, 杨福民. 卫星激光测距的新进展[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 283-288.
- [108] 李鑫. 高精度激光时间传递技术的研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2005.
- [109] 戴辉. 基于墨子号卫星的激光时间传递的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [110] 高建军, 兰天, 王斌. 一种高可靠的星载软件时间管理方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 806-808.
- [111] 李新贝, 谭超, 高山, 等. 星上 RS422 接口电路的建模与仿真[J]. 航天器工程, 2011, 20(1): 109-113.
- [112] 李超, 赵键, 杨芳, 等. 一种卫星星上高精度时间同步方法[P]. 2011-12-21.
- [113] 冯蕊. 基于空间任务的卫星平台仿真研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2010.
- [114] 赵佳, 唐祯安. 一种实现 RS 422 通信协议的接口电路[J]. 现代电子技术, 2007, 30(20): 179-181+186.
- [115] 王丁磊, 冯冬青. RS-232 至 RS-422/485 接口多路转换电路[J]. 河南广播电视大学学报, 2003, 16(3): 75-77.
- [116] 廉保旺, 李勇, 张怡, 等. CAN 总线与 1553B 总线性能分析比较[J]. 测控技术, 2000, 19(6): 47-49.
- [117] 于欢, 颜晓明, 陈明欣, 等. CAN 总线在运载火箭控制系统中的应用分析[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2024(3): 100-106.
- [118] 肖龙龙, 程谋森, 张为华. 运载器控制系统 CAN 总线数据传输仿真与评估研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(2): 256-260.
- [119] 李盘文, 王亮. 机载 CAN 总线中继器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 47-50.
- [120] PAWŁOWSKI E. Method and system for disciplining a local reference oscillator by GPS 1 PPS signal[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2018, 1(7): 40-43.
- [121] 谢亦龙. 星载晶体振荡器抗振设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [122] ESSEN L, PARRY J V L. An atomic standard of frequency

- and time interval: a caesium resonator[J]. *Nature*, 1955, 176(4476): 280-282.
- [123] CAMPARO J. The rubidium atomic clock and basic research[J]. *Physics Today*, 2007, 60(11): 33-39.
- [124] STRELNITSKI V, PONOMAREV V O, SMITH H A. Hydrogen masers. I: theory and prospects[J]. *The Astrophysical Journal*, 1995, 470: 1118.
- [125] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [126] 杨同敏, 徐娆美, 张威, 等. 小型化星载铷原子钟研制[C]// 第十四届中国卫星导航年会论文集——S04 时间频率与精密授时, 株洲: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2024.
- [127] GODONE A, LEVI F, VANIER J. A new atomic frequency standard: the coherent population trapping Cs maser[C]// 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Washington: IEEE, 1998: 175-176.
- [128] 韦博, 陈铭铭, 程序, 等. 太赫兹量子频标的研究进展[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(6): 1-12.
- [129] 王强. 光钟——时间频率定义新趋势[J]. *计量技术*, 2019(5): 11-13.
- [130] 陈晓锋, 白燕, 郭燕铭, 等. 导航星间链路体制星地时间同步性能及其相关因素分析[J]. *测绘通报*, 2023(9): 35-39.