

# 中国空间站的微波星地时频比对技术及其初步试验验证和分析

郭燕铭<sup>1,2</sup>, 高帅和<sup>1\*</sup>, 潘志兵<sup>1</sup>, 王沛<sup>1</sup>, 龚学文<sup>1</sup>, 宋坤<sup>3</sup>, 周晨<sup>4</sup>, 张文颖<sup>4</sup>, 陈晓锋<sup>1,2</sup>,  
白燕<sup>1</sup>, 高玉平<sup>1,2</sup>, 卢晓春<sup>1,2</sup>, 张首刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600; 2. 中国科学院大学, 北京 100039;  
3. 中国电子科技集团公司第29研究所, 四川成都 610036; 4. 武汉大学, 湖北武汉 430072)

**摘要:** 高精度时频比对是现代科学技术的核心需求之一。然而, 现有的技术受限于比对系统测量水平和链路系统误差处理算法, 严重限制了时间比对性能的提升。针对这些问题, 本研究搭建了基于中国空间站的高精度星地微波时频比对系统, 并提出了一种基于双向测量的空间站-地面时频比对技术(三频模式), 包括了对各项链路系统误差精细化建模新方法。通过对不同星地时频比对场景的仿真模拟发现, 在配置高精度原子钟( $10^{-15}$ ~ $10^{-17}$ )进行星地时频比对的场景下, 经过本文算法优化后的比对长期性能仍可达与原本星地时钟相近的性能。利用中国空间站所搭载的氢钟与地面氢钟进行初步比对试验结果表明, 在300 s可视弧段内的空间站-地面时间比对精度可达到10.77 ps, 相应的ADEV(Allan DEVIation)达到 $9.992 \times 10^{-14}$ @100 s, 与仿真模拟结果大致吻合。本研究可为精密时频同步技术提供了新的理论依据和技术参考。

**关键词:** 中国空间站; 原子钟; 星地微波链路; 时频比对; 双向测量

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2023YFB3906500); 国家自然科学基金(No.12273045, No.42030105); 中国载人航天工程应用系统项目

**中图分类号:** TN98; P19

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)04-1239-11

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20240063

## Microwave Satellite-Ground Time-Frequency Comparison Techniques Based on the China Space Station: Initial Testing Validation and Analysis

GUO Yan-ming<sup>1,2</sup>, GAO Shuai-he<sup>1\*</sup>, PAN Zhi-bing<sup>1</sup>, WANG Pei<sup>1</sup>, GONG Xue-wen<sup>1</sup>, SONG Kun<sup>3</sup>,  
ZHOU Chen<sup>4</sup>, ZHANG Wen-ying<sup>4</sup>, CHEN Xiao-feng<sup>1,2</sup>, BAI Yan<sup>1</sup>, GAO Yu-ping<sup>1,2</sup>, LU Xiao-chun<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Shou-gang<sup>1,2</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China;

4. Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** High-precision time-frequency comparison is a crucial demand in modern science and technology. Yet, the performance of current technologies is significantly hindered by the measurement capabilities of comparison systems and the error processing algorithms of link systems. Addressing these challenges, this study establishes a high-precision satellite-ground microwave time-frequency comparison system based on the China Space Station (CSS), introducing a novel satellite-ground time-frequency comparison technique that employs two-way measurements (tri-frequency mode) and includes advanced methods for detailed modeling of link system errors. Simulations across various satellite-ground time-frequency comparison scenarios reveal that, even with high-precision clocks ( $10^{-15}$  to  $10^{-17}$ ), the long-term performance of the comparison, optimized through our algorithm, can achieve near-original satellite-ground clock performance. Preliminary comparison tests using the hydrogen maser clocks on the CSS and the ground demonstrate that, within a 300-second visibility arc,

CSS-ground time-frequency comparison precision can reach 10.77 ps, with an ADEV (Allan Deviation) of  $9.992 \times 10^{-14}$ @100 s, closely matching simulation results. This research provides new theoretical foundations and technical references for precision time-frequency synchronization technology.

**Key words:** China Space Station; atomic clock; satellite-ground microwave link; time-frequency comparison; two-way measurement

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB3906500); National Natural Science Foundation of China (No.12273045, No.42030105); Project supported by the Space Application System of China Manned Space Program

## 1 引言

在探索宇宙的过程中,人类一直在追求更高精度的时间和频率标准.原子钟作为一种高精度的时间频率标准,其发展历程和应用领域一直是科学家们研究的重点.回顾1949年,美国国家标准局(National Bureau of Standards, NBS)展示了世界上第一台原子钟——氨钟<sup>[1]</sup>.此后,原子钟技术经历了从微波原子钟到光学原子钟的演变,频率稳定度已经达到了惊人的 $10^{-17}$ ~ $10^{-19}$ 量级<sup>[2-4]</sup>,为基础科学的发展、深空探索、通信和导航、天文观测、计量学等领域带来了新的机遇<sup>[5]</sup>.

随着空间科学的不断进步,空间原子钟技术也得到了迅速的发展.作为这一领域的一个重要里程碑,欧洲空间局(European Space Agency, ESA)主导的ACES(Atomic Clock Ensemble in Space)计划,旨在国际空间站上搭载冷原子微波钟和主动氢钟的原子钟组合,并通过专门的微波链路载荷和激光链路载荷,建立与地面时钟的相干链路,预期将实现优于 $10^{-16}$ 量级的时频比对能力<sup>[6]</sup>.在ACES计划的基础上,欧洲空间局提出了I-SOC(ISS-Space Optical Clocks)计划<sup>[7]</sup>,旨在利用空间站部署光学晶格时钟以产生高精度的时间频率信号,并开展更高精度的星地频比对和相关科学探索工作.与此同时,美国在空间原子钟技术方面也取得了显著的成果.美国的DSAC(Deep Space Atomic Clock)任务<sup>[8]</sup>于2019年6月成功将汞离子光钟送入既定轨道,并测试其天稳定度优于 $5 \times 10^{-15}$ ,后续还将使用改进版的二代深空原子钟探索金星<sup>[9]</sup>.此外,美国还提出FOCOS(Fundamental physics with an Optical Clock Orbiting in Space)计划,旨在地球周围的椭圆轨道上运行一个稳定度达到 $1 \times 10^{-18}$ 量级的镱(Yb)光钟,并通过高精度光链路连接到地面光钟,以便进行基础物理学测试,并为计时/测地应用提供一个国际时钟参考<sup>[10]</sup>.中国在空间原子钟方面的研究和应用方面也取得了突破性进展,其中空间冷原子钟实验(Cold Atom Clock Experiment in Space, CACES)任务验证了微波冷原子钟在低轨空间的稳健性<sup>[11]</sup>.进一步地,中国空间

站(China Space Station, CSS)在高精度空间时频技术的研究上取得了重要进展,中国载人航天工程于2022年10月31日成功发射空间站“梦天”实验舱,舱上部署了高精度时频科学实验系统,包括了主动氢原子钟、冷原子铷微波钟以及冷原子铯光钟组成的空间原子钟组合,其时频性能将提升至 $10^{-17}$ 量级<sup>[12]</sup>.在此基础上,基于空间站高性能原子钟构建稳定可行的高精度星地时频比对系统,并利用精密星地时频比对技术准确评估中国空间站高性能原子钟的综合性能成为了面临的关键问题.

针对上述问题,本研究基于中国空间站搭载的载荷资源(包括空间站高性能原子钟)和地面系统,构建了基于空间站的微波星地时频比对系统,并利用该系统的微波三频精密测量体制,开展空间站与地面站的时频比对及相关关键技术研究.通过仿真建模,深入分析三频测量下空间站与地面站的时频比对性能.同时,利用空间站-地面时频比对系统产生的星地链路实测数据,对空间站与地面站的时频比对方法及性能开展进一步验证和分析工作.结果表明,仿真结果与实测结果大致吻合,验证了本研究提出的三频模式星地时间比对技术的有效性,为利用空间站实现高精度星地时频比对提供了理论和实证依据.

## 2 基于空间站的星地微波时频比对系统

基于空间站的微波星地时频比对系统分为空间系统和地面系统两部分,如图1所示.高精度微波时频比对空间和地面系统以高精度时钟信号作为输入频率基准,依次经过光学频率梳装置、光频信号时延稳相控制装置、光频本振信号合成装置和微波测量信号处理装置,实现精密的星地光频信号时差测量.具体地,地面或空间原子钟组(标称指标为 $2 \times 10^{-15}$ @86 400 s的氢原子钟、 $2 \times 10^{-16}$ @86 400 s的冷原子微波钟和 $3 \times 10^{-17}$ @86 400 s的冷原子光钟)负责产生和维持高精度时频信号,构建超高精度的空间时间频率源.该信号锁定到光学频率梳装置,使其产生高精度光重复频率信号(200 MHz和1 550 nm波长).光频信号时延稳相控制装置通过相位

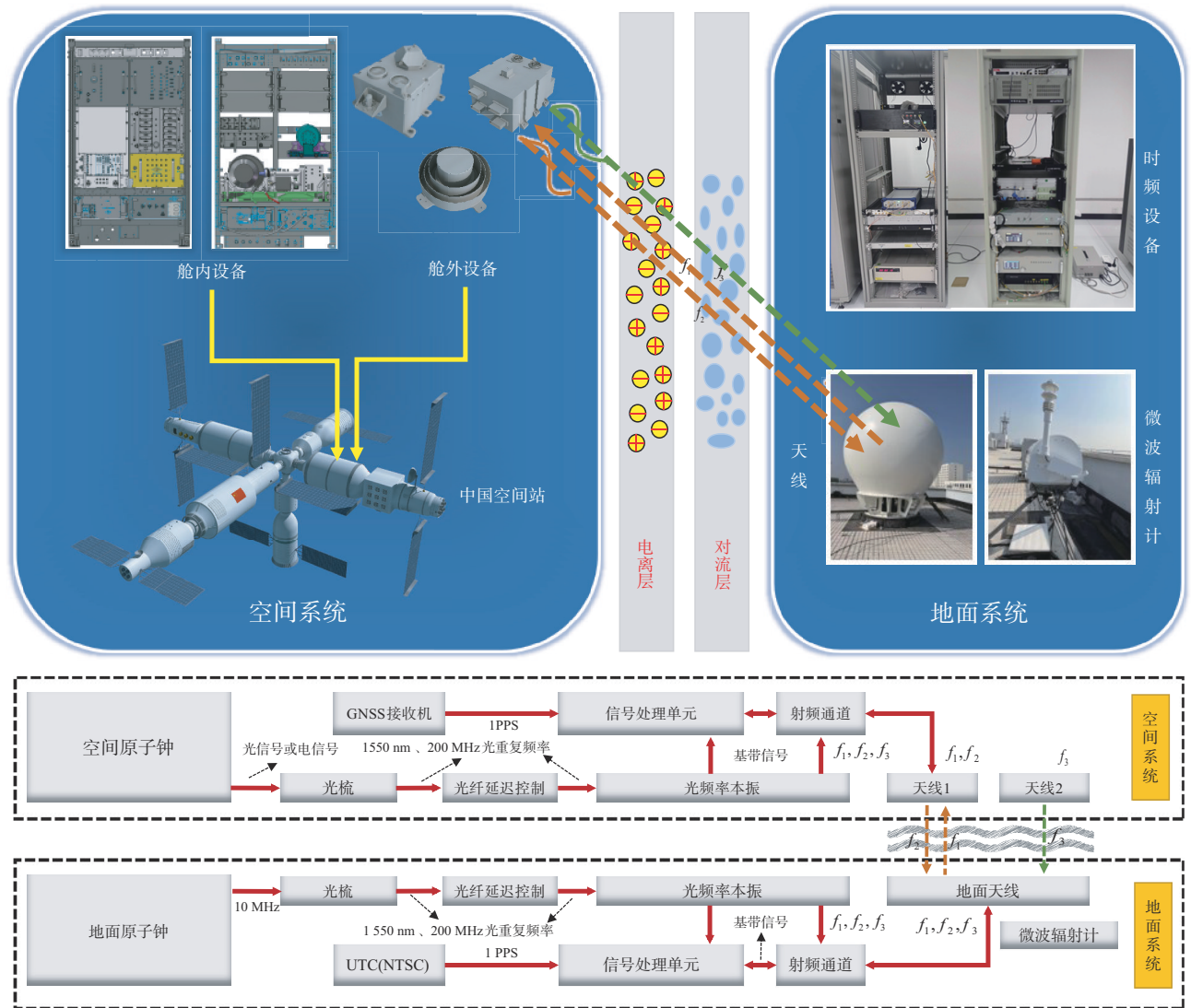


图1 基于空间站的星地时频比对系统

补偿减少光频信号传输过程中的波动,实现传输时延的精密控制.光频本振信号合成装置在光频上实现脉冲重复频率的倍增,通过光电转化、滤波放大后转化成所需的本振信号,提供给微波链路信号处理单元和射频单元.微波基带信号测量处理可实现稳定跟踪和精密测量.高精度1 PPS秒脉冲信号用于实现星地微波时频比对系统的首次时间同步和持续获取高精度位置信息.通过双向微波时频链路( $f_1$ 和 $f_2$ 链路)可以完成空间频率源和地面频率源的比对测量.而通过双下行微波时频链路( $f_2$ 和 $f_3$ 链路)和微波辐射计的实时气象数据,可以大大削弱比对过程中大气误差的影响.在空间站-地面星地时频比对系统的背景下,研究适用的高精度时频比对新技术,将有望提升精密时频比对和测量的准确度与可靠性,从而推动相关领域的技术进步和发展.

### 3 基于空间站的星地微波时频比对技术

不同于目前已经应用的星地时频比对技术,基于中国空间站实现的星地微波时频比对采用了一种创新的体制和技术(称为三频模式).区别于ACES计划早前构想的 $\Lambda$ 构型模式<sup>[13]</sup>,中国空间站计划设计了一种三频信号的测量体制,大大减小了时标不同造成的时延误差,核心在于利用星地三频微波链路(包括两条下行链路和一条上行链路)进行超高精度载波测距,以双向时差为基础进行星地时频比对,并通过双向时差过程中可能产生的各种时延误差进行精密建模和修正,有望实现超高精度的星地时频比对.

#### 3.1 双向时差测量原理

双向时差测量通过上下行伪距做差可以很好地消除大部分信号传播路径上的时延误差,是目前

实现星地时频比对的一种有效手段. 如图 2, 假设空间站 S 与地面站 G 分别在相同时刻接收频率为  $f_1$  和  $f_2$  的信号, 则在 ECI (Earth-Centered Inertial) 坐标系中可以建立空间站与地面站之间的双向测量方程.

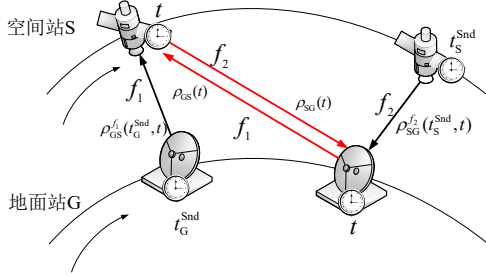


图 2 双向测量示意图

每次双向测量的测距方程可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{GS}^{f_1}(t_G^{\text{Snd}}, t) &= \left( \left| \mathbf{R}_S(t) - \mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}) \right| + cx_S(t) - cx_G(t_G^{\text{Snd}}) \right) \\ &\quad + c\delta_{GS}^{\text{tro}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad + c\delta_{GS}^{\text{ion}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad + c\delta_{GS}^{\text{rel}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) + c\delta_{GS}^{\text{bias}, f_1} + \varepsilon_{GS}^{f_1} \\ \rho_{SG}^{f_2}(t_S^{\text{Snd}}, t) &= \left( \left| \mathbf{R}_G(t) - \mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}) \right| + cx_G(t) - cx_S(t_S^{\text{Snd}}) \right) \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{tro}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{ion}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{rel}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) + c\delta_{SG}^{\text{bias}, f_2} + \varepsilon_{SG}^{f_2} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中,  $c$  为真空光速;  $\rho_{GS}^{f_1}$  和  $\rho_{SG}^{f_2}$  分别为上行和下行测量伪距;  $t_G^{\text{Snd}}$  是上行信号的发射时刻;  $t_S^{\text{Snd}}$  是下行信号的发射时刻;  $t$  是上下行信号的接收时刻;  $\mathbf{R}_S$  和  $\mathbf{R}_G$  分别为空间站和地面站在地心惯性系中的位置向量;  $x_S$  和  $x_G$  分别为空间站和地面站的搭载时钟钟差;  $\delta^{\text{tro}}$  为对流层等效时延;  $\delta^{\text{ion}}$  为电离层等效时延;  $\delta^{\text{rel}}$  为相对论效应等效时延;  $\delta^{\text{bias}}$  为固定偏差等效时延(主要包括通道硬件时延);  $\varepsilon$  为链路测距噪声.

在进行空间站的地面观测时, 会得到大量式(1)中的双向单程伪距测量对. 在这些双单程测量对中, 上行链路和下行链路的接收时刻是一致的, 但由于上下行信号的频点不同导致上下行信号路径时延并不完全一致, 通过添加位置和钟差修正量, 可以将双单程伪距测量对校正至相同时刻的几何距离(如图 2 中红线), 则式(1)可修正为

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{GS}(t) &= \left| \mathbf{R}_S(t) - \mathbf{R}_G(t) \right| \\ &= \rho_{GS}^{f_1}(t_G^{\text{Snd}}, t) - (cx_S(t) - cx_G(t)) - \Delta d_{GS}^{f_1} - c\Delta x_{GS}^{f_1} \\ &\quad - c\delta_{GS}^{\text{tro}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad - c\delta_{GS}^{\text{ion}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad - c\delta_{GS}^{\text{rel}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) - c\delta_{GS}^{\text{bias}, f_1} - \varepsilon_{GS}^{f_1} \\ \rho_{SG}(t) &= \left| \mathbf{R}_G(t) - \mathbf{R}_S(t) \right| \\ &= \rho_{SG}^{f_2}(t_S^{\text{Snd}}, t) - (cx_G(t) - cx_S(t)) - \Delta d_{SG}^{f_2} - c\Delta x_{SG}^{f_2} \\ &\quad - c\delta_{SG}^{\text{tro}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\quad - c\delta_{SG}^{\text{ion}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\quad - c\delta_{SG}^{\text{rel}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - c\delta_{SG}^{\text{bias}, f_2} - \varepsilon_{SG}^{f_2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中,  $\Delta d$  为位置修正量;  $\Delta x$  为钟差修正量;  $\rho_{GS}(t)$  和  $\rho_{SG}(t)$  分别为归算到  $t$  时刻的上行和下行几个距离.

在空间站和与地面站的比对中, 将式(2)中两式作差分, 并进行系统误差修正后, 即可解算出  $f_1$  上行和  $f_2$  下行双向测量对应的解算钟差  $\Delta x^{f_1, f_2}$  为

$$\begin{aligned} \Delta x^{f_1, f_2}(t) &= x_S(t) - x_G(t) \\ &= \left\{ \left( \rho_{GS}^{f_1}(t_G^{\text{Snd}}, t) - \rho_{SG}^{f_2}(t_S^{\text{Snd}}, t) \right) + \varepsilon_{SG}^{f_2} - \varepsilon_{GS}^{f_1} \right. \\ &\quad + \Delta d_{SG}^{f_2} - \Delta d_{GS}^{f_1} + c\Delta x_{SG}^{f_2} - c\Delta x_{GS}^{f_1} + c\delta_{SG}^{\text{bias}, f_2} - c\delta_{GS}^{\text{bias}, f_1} \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{ion}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - c\delta_{GS}^{\text{ion}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{tro}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - c\delta_{GS}^{\text{tro}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \\ &\quad + c\delta_{SG}^{\text{rel}, f_2}(\mathbf{R}_S(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\quad \left. - c\delta_{GS}^{\text{rel}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_S(t)) \right\} / 2c \end{aligned} \quad (3)$$

上述基于双向时差的时频比对技术类似于北斗三号卫星间链路系统所采用的时频比对技术<sup>[14]</sup>, 但北斗星间链路时频比对受限于空间原子钟精度、测量体制、链路时延误差处理算法和硬件噪声水平, 目前最高只能实现亚 ns 的比对精度. 在空间站和地面站目前均具备能够实现更高时频比对精度的硬件条件下<sup>[15]</sup>, 除了考虑上述不同测量体制下的时差测量方法外, 同时还需要更加精确的链路系统误差修正方法.

### 3.2 系统误差修正

基于空间站实现的星地时频比对, 在经过双向伪距差分后大部分系统误差可以被抵消, 但仍然存在部分由于信号路径不完全对称导致的系统误差需要精确修正, 主要包括运动时延误差、相对论时延误差、大气时延误差和固定时延偏差.

### 3.2.1 运动时延误差修正

空间站和地面站在空间中高速相对运动引起的运动时延误差主要包括两个方面的误差,一是空间距离误差(空间几何距离非对称量),二是钟差误差(钟差非同时量).式(3)中,由于不同频点的双向伪距不对称引入的时延误差总和 $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{mov}(t)$ 可以表示为

$$\Delta\delta_{f_1, f_2}^{mov}(t) = \{ \Delta d_{SG}^{f_2} - \Delta d_{GS}^{f_1} \} / 2c + \{ \Delta x_{SG}^{f_2} - \Delta x_{GS}^{f_1} \} / 2 \quad (4)$$

这一误差项是由航天器和地面站之间的高速相对运动引起,由于空间站运动速度快,导致本误差项量级高,需依据提供的事后高精度轨道信息进行精确修正<sup>[15]</sup>.计算如下:

$$\begin{cases} \Delta d_{SG}^{f_2} = |R_G(t) - R_S(t_S^{Snd})| - |R_G(t) - R_S(t)| \\ \Delta d_{GS}^{f_1} = |R_S(t) - R_G(t_G^{Snd})| - |R_S(t) - R_G(t)| \\ \Delta x_{SG}^{f_2} = x_G(t) - x_S(t_S^{Snd}) \\ \Delta x_{GS}^{f_1} = x_S(t) - x_G(t_G^{Snd}) \end{cases} \quad (5)$$

一般情况下,空间站和地面站的测距信号的接收时刻时标会直接在伪距观测文件中标明,而信号的发射时刻需要利用双向伪距计算得到

$$\begin{cases} t_S^{Snd} = t - \frac{\rho_{SG}^{f_2}(t_S^{Snd}, t)}{c} \\ t_G^{Snd} = t - \frac{\rho_{GS}^{f_1}(t_G^{Snd}, t)}{c} \end{cases} \quad (6)$$

利用式(4)~(6)可以计算出空间站与地面站在任意时刻的运动时延误差修正量,并在钟差解算时进行补偿以消除其对星地时频比对影响.

### 3.2.2 相对论时延误差修正

由于空间站在低轨环境下的高速运动和受到复杂的空间摄动力作用,使得星载原子钟和时频信号传播路径会产生显著的附加时延误差,具体包括相对论对频率的影响(标称频率偏移和周期相对论效应)和相对论路径效应(引力时延).

相对论导致的标称频率偏移可以通过降低航天器或地面站的原子钟频率来精确校准.因此,空间站-地面时频比对过程中主要考虑周期性相对论效应和相对论路径效应的作用,周期性相对论效应主要是由于原子钟在惯性空间中运动和所处引力势变化引起的,而原子钟所处引力势通常与其在空间中受到的外部摄动力有关,因此在建立周期性相对论误差修正模型时需要充分考虑各类可能摄动力的作用.

引力时延是由于星地测距信号在空间传播过程中地面站、航天器与地心的相对位置发生变化引起的.从式(3)中可以看出,对于相对论效应引起的时延误差总

和可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{f_1, f_2}^{rel}(t) &= \delta_{SG}^{rel, f_2}(R_S(t_S^{Snd}), R_G(t)) \\ &\quad - \delta_{GS}^{rel, f_1}(R_G(t_G^{Snd}), R_S(t)) \Big\} / 2 \\ &= \left\{ \delta_G^{rel, p}(R_G(t)) - \delta_S^{rel, p}(R_S(t_S^{Snd})) \right. \\ &\quad \left. - \delta_S^{rel, p}(R_S(t)) + \delta_G^{rel, p}(R_G(t_G^{Snd})) \right. \\ &\quad \left. + \delta_{SG}^{rel, g}(R_S(t_S^{Snd}), R_G(t)) \right. \\ &\quad \left. - \delta_{GS}^{rel, g}(R_G(t_G^{Snd}), R_S(t)) \right\} / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\delta^{rel, p}$  表示在空间某处的周期性相对论时延;  $\delta^{rel, g}$  表示在信号传播路径的引力时延.

针对周期性相对论时延,狭义相对论和广义相对论效应的综合作用导致目标时钟(空间或地面原子钟)钟频发生变化,变化量为

$$\Delta f \cong \left( -\frac{v_s^2}{2c^2} - \frac{\Delta U}{c^2} \right) f_b \quad (8)$$

其中,  $c$  为光速;  $v_s$  为目标的速度;  $\Delta U$  为目标所处引力势与目标在大地水准面时的引力势位差;  $f_b$  为目标在大地水准面时的标称频率.

在低轨环境下的目标引力势情况复杂,导致引力势位差  $\Delta U$  除了受到地球引力作用,还可能受到其他各类摄动力作用,所以有

$$\Delta U = V + \Delta V - V_e = \frac{g_m}{r_s} + \Delta V - \frac{g_m}{r_e} \quad (9)$$

其中,  $g_m$  为地球地心引力常数;  $r_e$  为地球半径;  $r_s$  为目标到地心的距离;  $V$  为目标所在地球引力势;  $V_e$  为目标在大地水准面时的引力势;  $\Delta V$  为目标所处位置受到的除地球引力外的其他摄动力引力势.

因此,由式(8)和式(9)可以推出:

$$\Delta f \cong \left( \frac{g_m}{r_e c^2} - \frac{g_m}{r_s c^2} - \frac{v_s^2}{2c^2} - \frac{\Delta V}{c^2} \right) f_b \quad (10)$$

通常,可以通过计算目标所受摄动力量级来表征实际轨道因摄动存在而偏离二体问题轨道的程度,间接衡量一个目标在各个轨道的受摄动力情况<sup>[16]</sup>,对于摄动力量级的计算可以参考式(11):

$$\zeta = |\mathbf{p}| \cdot \left( \frac{g_m}{r_s^2} \right)^{-1} \quad (11)$$

其中,  $\zeta$  为摄动力量级;  $\mathbf{p}$  为摄动力加速度.

根据式(11)可以估计得到不同轨道下的各类摄动力摄动力量级,如表1<sup>[17]</sup>.可以看出,对于处在低轨道位置的目标,其主要摄动力影响是非球形摄动中的  $J_2$  带谐项影响,与其他摄动力相比要低至少三个量级.因此,对于目标在空间中所受引力势我们主要考虑地球引力势和非球形摄动引力势对时钟相对论的作用.在

此情况下,摄动力引力势(只考虑非球形摄动力引力势)可以描述为

$$\Delta V = \frac{g_m}{r_s} \left[ \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left( \frac{a_e}{r_s} \right)^l P_{lm}(\sin \varphi) [C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda] \right] \quad (12)$$

式(12)中,  $a_e$  为地球赤道的半长轴;  $\varphi$  是纬度;  $\lambda$  是经度;  $(C_{lm}, S_{lm})$  是引力场球谐系数;  $P_{lm}$  为勒让德函数.

式(12)中,与扁率有关的二阶球谐系数项  $C_{20}$  是  $J_2$  项,在只考虑  $J_2$  项引力势时,式(12)的摄动函数可以改写为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{g_m}{r_s} \cdot \left( \frac{a_e}{r_s} \right)^2 P_{20}(\sin \varphi) C_{20} \\ &= -\frac{1}{2} J_2 \frac{g_m a_e^2}{r_s^3} (3 \sin^2 \varphi - 1) \\ &= -\frac{1}{2} J_2 \frac{g_m a_e^2}{r_s^3} (3 \sin^2 i_s \sin^2 u_s - 1) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $i_s$  和  $u_s$  分别表示目标所处地球轨道的偏心率和纬度俯角;  $J_2$  项常数通常取  $1.082\ 63 \times 10^{-3}$ .

那么,假设目标从地面拿到空间中某处,由相对论引起的钟频变化可以转化为时间偏差  $\Delta\tau$ ,则结合式(9)和式(13)可以推出:

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= \int \frac{\Delta f}{f_b} dt = \int \left( \frac{g_m}{r_e c^2} - \frac{g_m}{r_s c^2} - \frac{v_s^2}{2c^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2c^2} J_2 \frac{g_m a_e^2}{r_s^3} (3 \sin^2 i_s \sin^2 u_s - 1) \right) dt \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(14)进一步计算得到目标所处位置的周期性相对论时延为

$$\delta_{rel,p} = -\frac{2\sqrt{a_s g_m}}{c^2} e_s \sin E_s - \frac{J_2}{2c^2} \int \frac{g_m a_e^2}{r_s^3} (3 \sin^2 i_s \sin^2 u_s - 1) dt \quad (15)$$

其中,右边第一项是地球引力引起的周期性常规项时延;第二项是地球非球形摄动力引起的  $J_2$  项周期性时延;  $a_s$  表示目标所处的轨道半长轴;  $e_s$  为轨道偏心率;  $E_s$  为轨道偏近点角.

针对引力时延,从空间站到地面站接收机的信号传输由于广义相对论效应的作用导致存在引力传输时延.在超高时频比对精度需求下,仅需要考虑地球中心

引力引起的引力时延,计算方法如下:

$$\begin{cases} \delta_{SG}^{rel,g}(\mathbf{R}_S(t_S^{Snd}), \mathbf{R}_G(t)) \\ = -\frac{2g_m}{c^3} \ln \left( \frac{r_S(t_S^{Snd}) + r_G(t) + |\mathbf{R}_S(t_S^{Snd}) - \mathbf{R}_G(t)|}{r_S(t_S^{Snd}) + r_G(t) - |\mathbf{R}_S(t_S^{Snd}) - \mathbf{R}_G(t)|} \right) \\ \delta_{GS}^{rel,g}(\mathbf{R}_G(t_G^{Snd}), \mathbf{R}_S(t)) \\ = -\frac{2g_m}{c^3} \ln \left( \frac{r_G(t_G^{Snd}) + r_S(t) + |\mathbf{R}_G(t_G^{Snd}) - \mathbf{R}_S(t)|}{r_G(t_G^{Snd}) + r_S(t) - |\mathbf{R}_G(t_G^{Snd}) - \mathbf{R}_S(t)|} \right) \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $r_s$  和  $r_g$  分别为空间站 S 和地面站 G 到地心的距离.

根据式(7)、式(15)和式(16)可以估计得到空间站-地面时频比对过程中的相对论效应误差修正量,并代入式(3)中修正.

### 3.2.3 大气时延误差修正

地球大气层分为中性大气层和电离层,中性大气层和电离层对无线电波传播都具有十分重要的影响,主要包括电波信号的吸收、相位变化、传播时延、频率色散,以及极化旋转等.对于定位、导航和授时(Positing Navigating and Timing, PNT)系统而言,微波信号时延的影响主要包括传播介质导致的时延和传播信号偏折导致的时延.

在传统的大气误差修正中,一般大于 3 GHz 的星地链路,只考虑对流层大气的非色散延迟,但是在超高比对精度需求下,需考虑对流层非色散时延误差、对流层色散时延误差和电离层误差(一阶和二阶效应)的影响.

对于对流层时延误差,对流层的折射率已被确定为微波链路时间延迟的可能原因<sup>[18]</sup>.一般来说,对流层的大气折射率表示为

$$N = N_0 + N'(f) + iN''(f) \quad (17)$$

其中,  $N_0$  是非色散项;  $N'(f)$  和  $N''(f)$  是频率相关的复合折射率部分;  $f$  是传播信号频点,计算折射率延迟时不需要考虑折射率的虚部.

考虑到对流层时延误差的非色散项及色散项,可通过气象数据(地表处的干空气压力、水汽压力及温度)进行计算.为实现这一目的,我们采用欧洲中期天气预报中心的第五代再分析数据(European Center for

表 1 不同轨道卫星的摄动力量级(面质比约为  $0.01\ m^2/kg$ )

轨道类型	摄动力量级						
	非球形		日月引力		大气阻力	太阳辐射	潮汐
	$J_2$	其他项	日	月			
LEO	$10^{-3}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$
MEO	$10^{-4}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$< 10^{-10}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$
GEO	$10^{-4}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$< 10^{-10}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$

Medium-Range Weather Forecasts 5th Re-Analysis Data, ECMRWF-5RAD), 该数据具有 1 h 的时间分辨率,  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的水平网格间隔, 以及在 100 hPa 至 1 000 hPa 之间的 19 个压力层次, 使得能够导出折射率场, 这对于计算频率依赖性的传播路径以及沿该路径的对流层时延至关重要. 对空间站-地面链路的大气层时延进行射线追踪估计, 计算如下:

$$\delta^{\text{tro}} = \sum_{i=1}^m N_i |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{i-1}| - |\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_0| \quad (18)$$

在信号传播路径上, 等距取  $(m+1)$  个点 ( $0 \sim m$ ), 下标  $i$  代表第  $i$  个点, 0 代表起始点,  $m$  代表终点, 而  $\mathbf{X}$  表示某个点的空间位置坐标. 因此, 通过式 (18), 可以计算得到地面站不同仰角和方位角下的对流层折射时延.

利用射线追踪获取天顶方向的大量对流层时延样本, 通过映射函数将天顶方向投影到任何仰角. 并利用样本数据构建训练模型:

$$\Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(\theta) = \frac{a_0 \cdot P_d(\theta) + a_1 \cdot P_w(\theta) + a_2 \cdot T(\theta) + a_3}{\sin \theta} + a_4 \quad (19)$$

其中,  $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(\theta)$  表示仰角为  $\theta$  时的对流层样本,  $(P_d(\theta), P_w(\theta), T(\theta))$  表示 ECMRWF-5RAD 数据的气象参数,  $a_0 \sim a_4$  是通过对流层样本训练得到的模型参数.

然后, 利用训练的模型可以估计式 (3) 中在  $t$  时刻的双向差分对流层时延误差修正量  $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(t)$ , 如下:

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(t) &= c\delta_{\text{SG}}^{\text{tro}, f_2}(\mathbf{R}_s(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - c\delta_{\text{GS}}^{\text{tro}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_s(t)) \\ &\approx \frac{a_0 \cdot P'_d(t) + a_1 \cdot P'_w(t) + a_2 \cdot T'(t) + a_3}{\sin[\theta(t)]} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $(P'_d(t), P'_w(t), T'(t))$  为地面微波辐射计监测的气象参数,  $\theta(t)$  为空间站相对于地面站的仰角.

同样地, 可以通过训练模型的方法得到双下行链路对应的对流层时延误差修正量  $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(t)$ :

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{tro}}(t) &= \delta_{\text{SG}}^{\text{tro}, f_2}(\mathbf{R}_s(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - \delta_{\text{SG}}^{\text{tro}, f_1}(\mathbf{R}_s(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) \\ &\approx \frac{b_0 \cdot P'_d(t) + b_1 \cdot P'_w(t) + b_2 \cdot T'(t) + b_3}{\sin[\theta(t)]} + b_4 \end{aligned} \quad (21)$$

在三频模式下, 通过 Ka 频段微波信号测距得到三条链路, 双单向测距链路比对过程中会产生亚纳秒级电离层时延误差. 利用式 (21) 得到的双下行链路对流层时延估计结果计算倾斜总电子含量 (Slant Total Electron Content, STEC), 并修正式 (3) 中的电离层误差  $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{ion}}(t)$ , 计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{STEC}(t) &= \frac{\rho_{\text{SG}}^{f_2}(t)/c - \rho_{\text{SG}}^{f_3}(t)/c - \Delta\delta_{f_2, f_3}^{\text{tro}}(t) - \Delta\delta_{f_2, f_3}^{\text{other}}(t)}{\left(\frac{K_1}{f_2^2} \pm \frac{K_2(B_0 \cos[\theta(t)])}{f_2^3}\right) - \left(\frac{K_1}{f_3^2} \pm \frac{K_2(B_0 \cos[\theta(t)])}{f_3^3}\right)} \end{aligned} \quad (22)$$

其中,  $\Delta\delta_{f_2, f_3}^{\text{other}}(t)$  为式 (3) 中除大气误差外的其他误差总和.

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{f_1, f_2}^{\text{ion}}(t) &= \delta_{\text{SG}}^{\text{ion}, f_2}(\mathbf{R}_s(t_S^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_G(t)) - \delta_{\text{GS}}^{\text{ion}, f_1}(\mathbf{R}_G(t_G^{\text{Snd}}), \mathbf{R}_s(t)) \\ &= \left(\frac{K_1}{f_2^2} \pm \frac{K_2(B_0[\theta(t)])}{f_2^3}\right) \\ &\quad - \left(\frac{K_1}{f_1^2} \pm \frac{K_2(B_0 \cos[\theta(t)])}{f_1^3}\right) \cdot \text{STEC}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

其中,

$$\begin{cases} K_1 = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 M} \\ K_2 = \frac{\mu_0 Q^3}{16\pi^3 \epsilon_0 M^2} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $B_0$  是地磁场的强度;  $M$  是电子的质量;  $Q$  是电子携带的电荷;  $\epsilon_0$  是真空中携带的介质;  $\mu_0$  是真空中磁导率.

### 3.2.4 固定时延偏差修正

空间站-地面微波时频比对系统旨在通过载波相位测量来实现超高精度测距, 并使用载波相位测距来实现更高精度和更高稳定性的空间站-地面时频比对. 从式 (3) 来看, 仅通过星地三频链路观测目前还无法准确解耦双向比对过程中的固定时延偏差量. 用于校准这种固定偏差的方法之一可以参考北斗三号星间链路组合硬件时延校准方法, 利用同等或更高精度的测量手段闭环估计这种冗余偏差, 基于空间站设计的星地激光双向时频比对方法虽然不能保证持续建链, 但其设计精度与微波三频模式是匹配的, 因此可以通过空间站-地面的激光双向链路与三频模式估计的钟差结果进行比较来找出固定时延偏差, 一般来说这种固定时延偏差在短期内是稳定的, 并且可以被视为常数<sup>[19]</sup>, 通过对两种链路结果的定期比较可以较为准确地估计偏差量并修正.

## 4 星地微波时频比对仿真验证试验及分析

### 4.1 仿真试验设置

为了仿真验证基于空间站的微波时频系统在全新体制下的时频比对能力和时延误差修正关键技术, 按

照表2的仿真试验方案及试验配置开展星地时频比对技术的试验验证。

具体情况为:将空间站与地面站分别配置不同类型的时钟(它们对应的精度和稳定度不同),并采用三频模式载波测量进行星地时频比对.空间站的轨道信息可以参见中国载人航天工程办公室发布的数

据,地面站则位于中国科学院国家授时中心(西安).为了保证设备测量精度与实际情况一致,我们根据地面测试结果<sup>[15]</sup>控制载波测量设备的精度.试验将持续3天,利用仿真系统生成星地三频载波观测数据对本文第3节提到的星地时频比对技术进行试验验证.

表2 仿真方案及配置

编号	试验方案	试验配置
方案1	空间站氢钟( $2 \times 10^{-15}$ @1 day)+地面站氢钟( $4 \times 10^{-15}$ @1 day)+三频模式(载波)	航天器轨道:空间站轨道( <a href="http://www.cmse.gov.cn/gfgg/zgkjzgdcs/">http://www.cmse.gov.cn/gfgg/zgkjzgdcs/</a> ) 轨道姿态误差: $0.2^\circ$
方案2	空间站氢钟( $2 \times 10^{-15}$ @1 day)+地面站光钟( $4 \times 10^{-18}$ @1 day)+三频模式(载波)	精密定轨(Precision Orbit Determination,POD)误差: 10 cm 微波载荷相位中心标定误差:3 mm
方案3	空间站微波钟( $2 \times 10^{-16}$ @1 day)+地面站光钟( $4 \times 10^{-18}$ @1 day)+三频模式(载波)	大气参数误差: 温度= $0.5^\circ\text{C}$ ,湿压= $0.5\text{ hPa}$ ,干压= $0.5\text{ hPa}$ 地面站位置: 西安(34,108,550)
方案4	空间站光钟( $3 \times 10^{-17}$ @1 day)+地面站光钟( $4 \times 10^{-18}$ @1 day)+三频模式(载波)	载波设备测量精度:约0.5 ps(接微波钟或光钟),约4 ps(接氢钟) 仿真试验时长: 3 day,采样时间: 1 s

## 4.2 时频比对性能分析

在不同方案条件下分别开展3 day的星地时频比对仿真试验,以三频载波观测值和通过星载接收机精密定轨得到的先验轨道钟差信息为输入,在修正各项系统误差后可以解算出星地相对钟差,解算钟差反应了搭载钟的特性,通过对相对钟差的二次拟合去除时钟特性后,可以间接得到双向时频比对在消除大部分误差后的残余误差分布,去势后的残余误差反应了星地测量误差分布,但其中仍耦合了一部分链路系统误差特性,用误差的均方根(Root Mean Square, RMS)值代表时频比对精度.

在研究星地时频传递的过程中,计算相对钟差的比对精度是一个关键的指标.相对钟差是由星地双方的时钟差异产生的,其精度会受到时钟的固有噪声和链路残

余噪声的影响.如表3所示,本文在不同仿真方案设置下(见表2)计算得到原始星地仿真钟差与三频模式星地解算钟差的时频比对精度.在方案1中,星地双方配备性能水平相当的氢钟时,原始星地钟差与解算钟差在短期和中期的比对精度上有所差异,这说明利用本文算法修正后仍存在较大的链路残余误差,且噪声水平要高于搭载时钟的固有噪声水平.方案2~4模拟了未来正式稳定运行的空间站-地面时频比对情况对应空间站分别搭载氢钟、微波钟和光钟,地面搭载比空间站时钟性能更高的光钟,可以看出空间站配置性能更优的原子钟将使得星地时频比对精度显著提升,但是算法修正后的系统残余误差仍会导致星地钟差的短期评估结果不佳.然而,在长期时间尺度上,星地时频比对解算钟差的比对精度接近于原始星地钟差的精度水平.

表3 典型时间间隔的星地时频比对精度统计

单位:ps

编号	时频比对精度(300 s)		时频比对精度(10 000 s)		时频比对精度(86 400 s)	
	原始钟差	解算钟差	原始钟差	解算钟差	原始钟差	解算钟差
方案1	1.932 8	9.941 6	11.126 7	14.867 0	30.593 6	31.616 9
方案2	0.698 3	3.798 2	4.047 6	5.561 2	14.809 9	15.286 6
方案3	0.175 6	0.623 3	1.014 7	1.185 8	2.531 1	2.611 3
方案4	0.018 2	0.596 9	0.102 6	0.609 5	0.367 1	0.705 6

为了进一步评估时频比对技术的性能,通过计算钟差的艾伦方差(Allan DEViation, ADEV)来评估时钟稳定性.

图3(a)~(d)给出了四种不同方案下的空间站钟差、地面钟差、原始星地钟差和三频模式解算钟差的ADEV曲线.从结果来看,方案1~4中原始星地钟差ADEV曲线几乎与星地双方中性能较差时钟的ADEV曲线吻合,因此可以通过比较原始钟差和解算钟差在几个关键时间点的稳

定度来评估分析本文提出的时频比对技术的性能水平.如表4可以得出,方案1~4在短时间内的解算钟差稳定度差于原始钟差的稳定度,这可能是由于短时间范围内的三频模式解算钟差主要受到三频修正系统误差后的残余噪声影响,而原始钟差主要受到星地时钟内部噪声(白频率噪声等<sup>[20]</sup>)影响.随着平滑时间的增加,解算钟差的稳定度水平逐渐靠近原始钟差,这说明经过长时间的平滑使得解算钟差的噪声得到了抑制,并在某一时间阈值后,

二者的稳定性逐渐趋同。因此,尽管本文使用了先进的测量体制和技术进行星地时频比对,链路系统误差修正精度达到了 ps 量级<sup>[21]</sup>,但对于超高精度的时频比对需求,短

期稳定性依旧受到链路残余误差的制约,无法完全还原在轨比对时钟的真实状态,但通过长期数据的积累可以有效评估星地比对的长期稳定性。

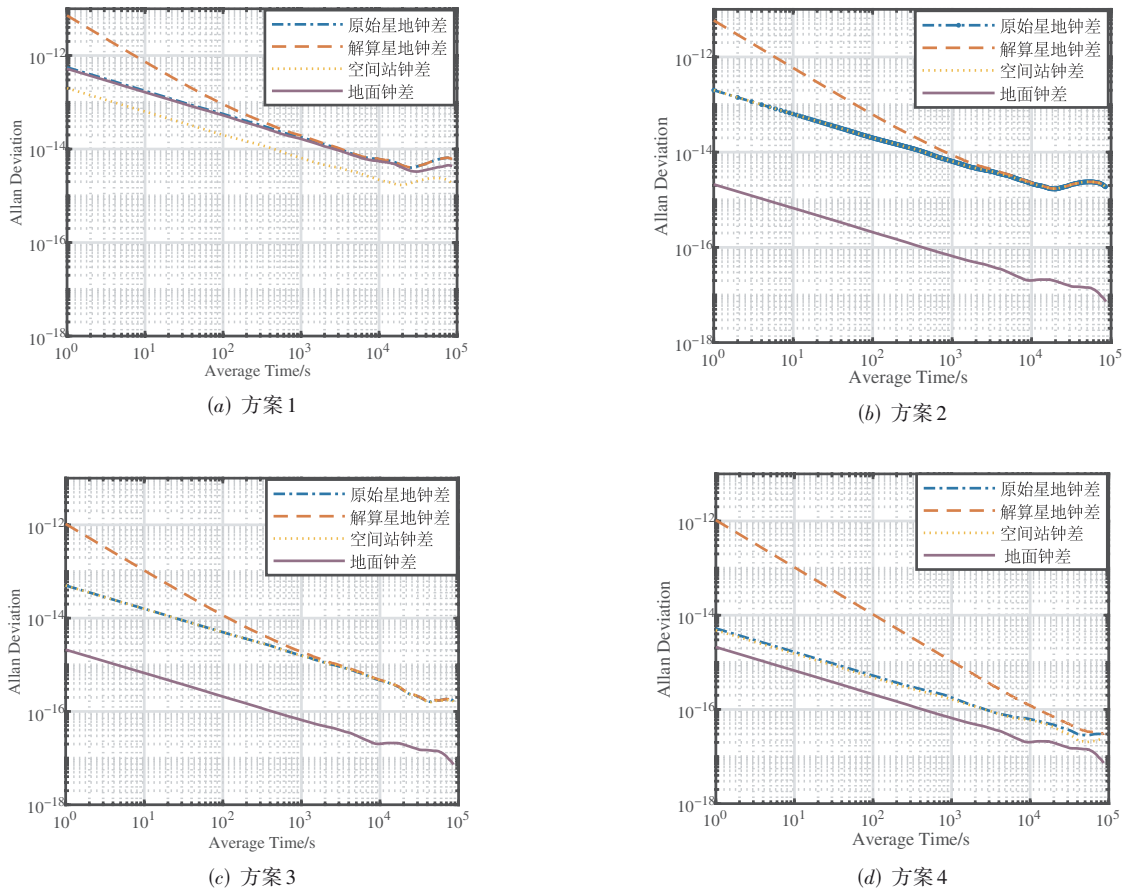


图3 不同仿真方案各类钟差稳定度结果

表4 典型时间间隔的星地时频比对频率稳定度统计

编号	频率稳定度(100 s)		频率稳定度(10 000 s)		频率稳定度(86 400 s)	
	原始钟差	解算钟差	原始钟差	解算钟差	原始钟差	解算钟差
方案1	$5.621\ 1 \times 10^{-14}$	$9.114\ 3 \times 10^{-14}$	$6.076\ 4 \times 10^{-15}$	$6.122\ 3 \times 10^{-15}$	$6.125\ 4 \times 10^{-15}$	$6.126\ 0 \times 10^{-15}$
方案2	$1.993\ 2 \times 10^{-14}$	$6.187\ 6 \times 10^{-14}$	$2.185\ 4 \times 10^{-15}$	$2.265\ 3 \times 10^{-15}$	$1.832\ 6 \times 10^{-15}$	$1.834\ 0 \times 10^{-15}$
方案3	$5.000\ 5 \times 10^{-15}$	$1.156\ 8 \times 10^{-14}$	$4.637\ 1 \times 10^{-16}$	$4.758\ 4 \times 10^{-16}$	$1.632\ 2 \times 10^{-16}$	$1.632\ 3 \times 10^{-16}$
方案4	$5.226\ 7 \times 10^{-16}$	$1.044\ 1 \times 10^{-14}$	$6.195\ 7 \times 10^{-17}$	$1.209\ 7 \times 10^{-16}$	$2.856\ 1 \times 10^{-17}$	$3.050\ 5 \times 10^{-17}$

### 5 空间站在轨初步试验验证及分析

2022年10月31日,中国空间站“梦天实验舱”搭载时频试验柜成功进入预定轨道,随后开始空间站对地测距和通信功能调试,并基于时频柜上的氢原子钟和地面氢钟开展初步星地时频比对试验验证。由于空间站处于低轨,运动速度快,因此空间站与地面站每天可视弧段少且持续时间较短,每天大约4~6个弧段,每个

弧段持续4~6 min左右。2023年07月~11月,开展多次星地时频比对调试试验,得到共5天(07-21、07-24、08-09、10-11和11-04)三频观测数据,每天选取其中一个连续数据较多的弧段进行分析,每个弧段大约300~400 s的数据,时间间隔为1 s。利用本文算法对测量数据进行处理和误差校准后,进一步解算出地面时钟与空间站时钟的相对钟差,其解算钟差拟合残差结果如图4所示,可以看出,试验期间得到的300 s星地时频比

对精度最优为 10.77 ps.

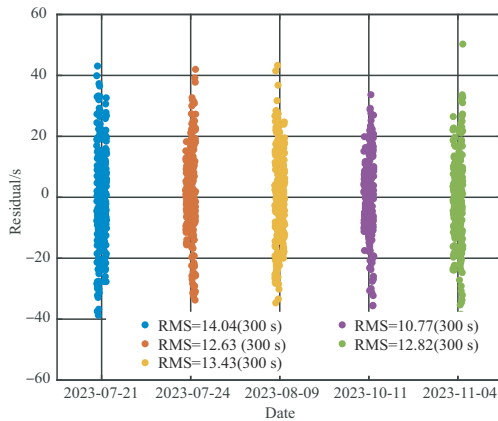


图4 基于三频模式的解算钟差拟合残差

然后,选取比对精度最优的弧段进行稳定度分析,其短期稳定度如图5所示,在100 s处的ADEV为 $9.9921 \times 10^{-14}$ . 综合结果显示与初步在轨试验和仿真试验结果相符.

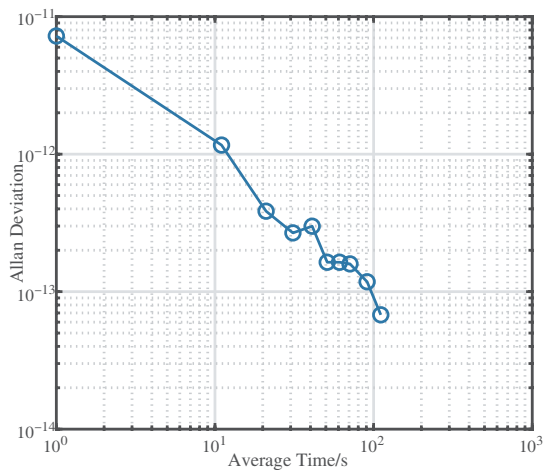


图5 基于三频模式的解算钟差稳定度

## 6 结论

本文基于空间站搭载的超高精度时频试验系统与地面时频系统开展基于星地微波时频比对系统在全新体制下的关键技术验证. 通过仿真试验和真实在轨空间站初步试验验证了技术的有效性和先进性. 该方案已经应用于我国载人航天工程任务中空间站-地面时频比对试验,同样也适用于任意航天器与地面的超高精度时频比对,可以为未来实现更高精度的时钟比对及相关应用提供一定参考.

### 参考文献

[1] National Institute of Standards and Technology (NIST). A walk through time the evolution of time measurement through

the ages[EB/OL]. (2009-08-12)[2023-10-20]. <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/walk-through-time/walk-through-time-atomic-age-time>.

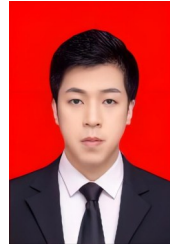
- [2] OELKER E, HUTSON R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of  $4.8 \times 10^{-17}$  stability at 1 s for two independent optical clocks[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 714-719.
- [3] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, et al. An atomic clock with  $10^{-18}$  instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [4] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [5] ALONSO I, ALPIGIANI C, ALTSCHUL B, et al. Cold atoms in space: Community workshop summary and proposed roadmap[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2022, 9(1): 30.
- [6] LAURENT P, MASSONNET D, CACCIAPUOTI L, et al. The ACES/PHARAO space mission[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 540-552.
- [7] CACCIAPUOTI L, SCHILLER S. I-SOC Scientific Requirements. SCI-ESA-HRE-ESR-ISOC document[R]. 2017. [https://indico.cern.ch/event/830432/contributions/3503912/attachments/1884566/3106184/Schiller-Presentation\\_ISOC\\_-\\_AEDGE\\_-\\_CERN\\_30\\_min\\_v2.pdf](https://indico.cern.ch/event/830432/contributions/3503912/attachments/1884566/3106184/Schiller-Presentation_ISOC_-_AEDGE_-_CERN_30_min_v2.pdf).
- [8] ELY T, PRESTAGE J, TJOELKER R, et al. Deep space atomic clock technology demonstration mission results[C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Piscataway: IEEE, 2022: 1-20.
- [9] MREKAR S, HENSLEY S, NYBAKKEN R, et al. VERITAS (venus emissivity, radio science, InSAR, topography, and spectroscopy): A discovery mission[C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Piscataway: IEEE, 2022: 1-20.
- [10] DEREVIANKO A, OATES C, SAFRONOVA M S, et al. Fundamental physics with a state-of-the-art optical clock in space[J]. *Quantum Science and Technology*, 2022, 7(4): 044002.
- [11] LIU L, LÜ D S, CHEN W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled (87)Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [12] LU X T, GUO F, WANG Y B, et al. Absolute frequency measurement of the 87Sr optical lattice clock at NTSC using international atomic time[J]. *Metrologia*, 2023, 60(1): 015008.
- [13] 杨文可, 孟文东, 韩文标, 等. 欧洲空间原子钟组 ACES 与超高精度时频传递技术新进展[J]. *天文学进展*, 2016, 34(2): 221-237.
- YANG W K, MENG W D, HAN W B, et al. Advances in atomic clock ensemble in space of Europe and ultrapre-

cise time and frequency transfer[J]. Progress in Astronomy, 2016, 34(2): 221-237. (in Chinese)

- [14] PAN J Y, HU X G, ZHOU S S, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(1): 145-153.
- [15] 高帅和, 张首刚, 潘志兵, 等. 一种用于空间光学频率信号稳定度评估的微波双向测量系统[J]. 电子学报, 2023, 51(8): 2043-2049.  
GAO S H, ZHANG S G, PAN Z B, et al. A microwave bidirectional measurement system for evaluating the stability of spatial optical frequency signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(8): 2043-2049. (in Chinese)
- [16] 单荃, 李培佳, 樊敏, 等. 火星探测器动力学模型优化及“天问一号”探测器定轨研究[J]. 天文学进展, 2023, 41(2): 279-291.  
SHAN Q, LI P J, FAN M, et al. Dynamic model optimization of Mars probe and orbit determination analysis of Tianwen-1[J]. Progress in Astronomy, 2023, 41(2): 279-291. (in Chinese)
- [17] 陈宏宇, 吴会英, 周美江, 等. 微小卫星轨道工程应用与 STK 仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 71.  
CHEN H Y, WU H Y, ZHOU M J, et al. Application of Microsatellite Orbit Engineering and STK Simulation[M]. Beijing: Science Press, 2016: 71. (in Chinese)
- [18] HOBIGER T, PIESTER D, BARON P. A correction model of dispersive troposphere delays for the ACES microwave link[J]. Radio Science, 2013, 48(2): 131-142.
- [19] GUO Y M, BAI Y, ZHANG J, et al. Methods and assessments of two-way time synchronization based on BDS-3 Ka-band satellite-ground link observations[J]. GPS Solutions, 2023, 27(3): 135.
- [20] 孙乐园. 导航星座星间链路时间基准自主建立与维持[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.  
SUN L Y. Autonomously Establish and Keep the Inter-satellite Link Time Reference for Navigation Satellite Constellations[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] GUO Y M, BAI Y, GAO S H, et al. A satellite-ground

precise time synchronization method and analysis on time delay error caused by motion[M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 158-171.

#### 作者简介



**郭燕铭** 男, 1995年2月出生于福建莆田市. 现为中国科学院国家授时中心博士. 主要研究方向为空间高精度时频技术.  
E-mail: guoyanming@ntsc.ac.cn



**高帅和** 男, 1986年10月出生于辽宁瓦房店市. 现为中国科学院国家授时中心正高级工程师. 主要研究方向为星间链路、空间时频. 中国电子学会会员编号: E190024398S.  
E-mail: gaoshuaihe@ntsc.ac.cn