

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311507

# 高精度微波时频传递链路体制设计及关键技术

孟志军<sup>1</sup>, 闫恩齐<sup>1</sup>, 陈林<sup>2</sup>, 高帅和<sup>3</sup>, 郭熙业<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 中国电子科技集团公司第29研究所 成都 610036;  
3. 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

**摘要:**高精度时间频率的产生和超高精度时频信号的传递是现代物理学、天文学和计量科学的基础,中国空间站高精度时频科学实验系统已随“梦天舱”成功发射,标志着我国天地融合、立体交叉的国家时频系统建设迈出了关键一步。介绍了高精度时频科学实验系统项目的基本情况以及微波时频传递链路的研究进展,重点阐述了高精度时频系统微波传递链路的信号体制设计,基于提出的信号体制设计了同频+三频两种微波时频传递链路比对模式并给出了钟差比对模型,最后通过仿真及在轨实测数据分析表明设计的微波时频传递链路可实现亚皮秒级伪距测量精度。

**关键词:**高精度;微波链路;时频传递;信号体制

**中图分类号:** TH76 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

## System design and key technologies of high-precision microwave time-frequency transmission links

Meng Zhijun<sup>1</sup>, Yan Enqi<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>2</sup>, Gao Shuaihe<sup>3</sup>, Guo Xiye<sup>1</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China; 3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The generation of high-precision time-frequency signals and the transmission of ultra-high-precision time-frequency signals are the foundation of modern physics, astronomy, and metrology. The high-precision time-frequency scientific experimental system of the Chinese space station has been successfully launched with the "Mengtian" cabins, which marks a crucial step in the construction of Chinese national time-frequency system with integration and interchange of space and ground. This article provides an overview of the high-precision time-frequency scientific experimental system project and the research progress of microwave time-frequency transmission links, with focus on the signal system design of the microwave transmission link in high-precision time-frequency systems. Based on the proposed signal system, two microwave time-frequency transmission link comparison modes of the same-frequency and three-frequency are designed, and a clock difference comparison model is provided. Finally, simulation and in-orbit measurement data analysis show that the designed microwave time-frequency transmission link can achieve sub-picosecond pseudo-range measurement.

**Keywords:** high-precision; microwave link; time-frequency transmission; signal system

## 0 引言

超高精度时频传递技术对于现代物理学、天文学以及计量科学具有重要意义,在卫星导航、地球物理等应用领域有着重要价值。原子钟是一种高精度时间频率基准源,其利用原子两个能级之间的跃迁信号产生频率基准,空间微重力环境为提高原子钟频率稳定度提供了有利条

件,因此,在空间建立高精度时间频率基准与地面原子钟系统进行超高精度时频传递,并以此为基础开展基础物理实验或其他应用研究是国际上的重要研究课题,同时也是国家航天科技实力的重要体现。

美国国家航空航天局(the National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)竞相开展空间原子钟计划,如NASA的深空光学时钟任务(deep space optical clock mission,

DSAC)项目(<http://www.nasa.gov/feature/jpl/deep-space-atomic-clock-moves-toward-increased-spacecraft-autonomy>、<http://www.nasa.gov/feature/the-deep-space-atomic-clock>)、美国-沙特-德国合作的小型时空不对称研究(mini space time asymmetry research, mSTAR)任务<sup>[1-2]</sup>、ESA的空间原子钟系综(atomic clock ensemble in space, ACES)和空间光学时钟(space optic clocks, SOC)<sup>[3-4]</sup>计划等。NASA的DSAC任务在2019年6月成功将汞离子光钟发射进入轨道,测得天稳定度为 $3 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15} @ 1 \text{ day}$ <sup>[5]</sup>。mSTAR任务计划将频率稳定度均达到或超过 $10^{-15}$ 的碘光钟和光学腔频率源搭载在低轨卫星上,测量Kennedy-Thorndike系数以测试狭义相对论<sup>[7]</sup>,具体实施计划未见报道。ACES项目计划将一台激光冷原子铯钟(projet d'Horloge atomique par refroidissement d'Atomes en orbit, PHARAO)和一台空间主动型氢钟(space hydrogen maser, SHM)部署至国际空间站(international space station, ISS),在空间完成高精度时间频率产生和星地超高精度时间频率传递两个关键技术问题<sup>[6]</sup>。为进行相互验证,采用微波比对链路(microwave link, MWL)和激光比对链路(European laser timing, ELT)两种双向时间频率传递方式实现。MWL采用Ku波段上下行与S波段下行信号链路设计,测距方式为载波相位和码相位同时测量,2014年5月,MWL工程样机完成全部测试,在300 s处时间偏差(time deviation, TDEV)达到亚皮秒,长期稳定度优于 $5 \text{ ps}$ <sup>[7]</sup>。该项目原预计于2017年上半年发射,但是载荷研制任务进度相较预期滞后至今仍未发射。2005年提出的SOC项目是ACES的后续计划,设计性能在ACES基础上提升至少一个数量级,原计划于2020年左右将光格晶钟部署至国际空间站上,产生更高精度的时间频率信号并开展星地时频比对<sup>[8]</sup>,目前无后续详细报道。

中国载人航天工程在空间站“梦天”实验舱上设计搭载了高精度时频科学实验系统,已于2022年10月31日成功发射入轨,通过主动氢原子钟、冷原子铷微波钟以及冷原子铯光钟3种不同类型空间原子钟组合,在空间站上建立起精度极高的时间频率运行系统。

本文主要阐述中国空间站“梦天”实验舱高精度时频实验柜微波时频传递链路信号体制设计及相关关键技术。微波时频传递链路是通过微波无线电双向精密测距实现空地时间频率比对的测量通信链路。

## 1 高精度时频实验柜<sup>[9]</sup>

高精度时频实验柜科学实验系统是通过不同特性原子钟组合,在空间站构建超高精度时间频率产生和运行系统,开展基础物理理论检验,并支持通过微波和激光传递链路向地面提供超高精度时间频率信号。主要由实验舱

内的主动氢原子钟、冷原子铷微波钟、冷原子铯光钟、窄线宽激光器、飞秒光梳、频率比对与分配单元、频率信号穿舱传递单元以及精密定轨单元等组成,以及实验舱外配备的高精度激光和微波时间频率传输和比对载荷组成。

高精度微波时频传递链路包括空间段和地面段两个部分,空间段由空间站“梦天”实验舱搭载时频柜微波链路传递载荷(对地安装),微波链路载荷以时频柜光信号为参考,产生高精度的下行测量信号以及接收地面站注入的上行测量信号;地面段配置了北京、上海、西安3套微波链路地面站,通过地面传递网络将各站的参考源统一,实现对空间站微波时频信号的分布式连续跟踪和测量。微波链路传递载荷与地面站之间通过双向时间比对实现对空间站原子钟组的特性评估。

为验证与评估微波传递链路设备的附加时频传递误差,在地面分别构建了基于不同氢钟基准的非同源测试场景和使用同一氢钟基准的同源测试场景,实测场景如图1所示<sup>[10]</sup>。

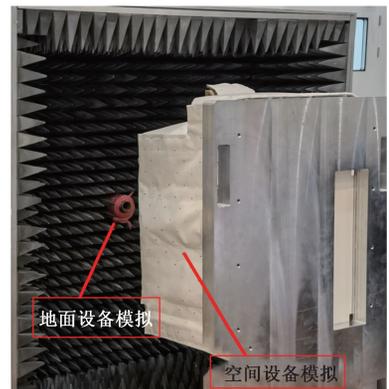


图1 地面模拟实测场景

Fig. 1 The ground simulation and actual measurement scenarios

微波传递链路地面测试结果的TDEV为 $2.93 \times 10^{-14} / \text{s}$ 、 $4.19 \times 10^{-14} / 300 \text{ s}$ 、 $6.90 \times 10^{-14} / 10\,000 \text{ s}$ 、 $2.71 \times 10^{-13} / 86\,400 \text{ s}$ ,附加频率稳定度(allan deviation, ADEV)为 $5.07 \times 10^{-14} / \text{s}$ 、 $5.31 \times 10^{-16} / 300 \text{ s}$ 、 $2.36 \times 10^{-17} / 10\,000 \text{ s}$ 、 $7.46 \times 10^{-18} / 86\,400 \text{ s}$ <sup>[10]</sup>。

## 2 高精度微波时频传递链路信号体制设计

高精度微波时频传递链路信号体制设计包括4个方面,分别为多址方式设计、调制方式设计、扩频伪码设计以及信号帧结构设计。

### 2.1 多址方式设计

考虑高精度微波时频传递链路采用伪码+载波测量方式,故其多址方式采用码分多址+频分多址设计,空间站时频传递载荷设计为“发射双频( $f_1, f_2$ )扩频信号+接

收单频( $f_3$ )扩频信号”模式,对应地面站设计为“发射单频( $f_3$ )扩频信号+接收双频( $f_1, f_2$ )扩频信号”模式,地面站利用接收的双频( $f_1, f_2$ )信号进行伪距或者载波相位电离层时延校正,以减小星地信号传输路径电离层引入的时延误差,提高时频传递精度。

双频伪距电离层时延校正正值  $I_{\rho k}$  可以表示为:

$$\begin{cases} I_{\rho 1} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(\rho_2 - \rho_1) \\ I_{\rho 2} = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2}(\rho_1 - \rho_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho_k$  表示频点  $k$  的伪距测量结果,  $k = 1, 2$ 。

双频载波相位电离层延时校正正值  $I_{\phi k}$  可以表示为:

$$\begin{cases} I_{\phi 1} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) \\ I_{\phi 2} = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2}(\lambda_2 \varphi_2 - \lambda_1 \varphi_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_k$  表示频点  $k$  载波波长,  $\varphi_k$  表示频点  $k$  载波相位测量结果,  $k = 1, 2$ 。

## 2.2 调制方式设计

高精度微波时频传递链路信号体制调制方式设计为载波频点  $f_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 下 QPSK 扩频伪码调制模式,调制信号结构中设计测量与通信两个正交支路,将测量支路与通信支路在频点  $f_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 上分别进行不同伪码序列扩频,得到码分多址+频分多址的 QPSK 调制扩频信号结构表达式如下:

$$S^i = A_{Mk} C_{Mk}^i(t) D_{Mk}^i \cos(2\pi f_k t + \varphi_{Mk}^i) + A_{Ck} C_{Ck}^i(t) D_{Ck}^i \sin(2\pi f_k t + \varphi_{Ck}^i) \quad (3)$$

式中:  $i$  表示空间载荷或地面节点编号;  $A_{Mk}$  表示频点  $k$  的测量支路信号振幅;  $C_{Mk}^i(t)$  表示频点  $k$  的测量支路扩

频码序列;  $D_{Mk}^i(t)$  表示频点  $k$  的测量支路调制数据码序列;  $f_k$  表示频点  $k$  的载波频率;  $\varphi_{Mk}^i$  表示频点  $k$  的测量支路载波初相;  $A_{Ck}$  表示频点  $k$  的通信支路信号振幅;  $C_{Ck}^i(t)$  表示频点  $k$  的通信支路扩频码序列;  $D_{Ck}^i(t)$  表示频点  $k$  的通信支路调制的数据码序列;  $\varphi_{Ck}^i$  表示频点  $k$  的通信支路载波初相。测量支路  $A_{Mk} C_{Mk}^i(t) D_{Mk}^i \cos(2\pi f_k t + \varphi_{Mk}^i)$  完成高精度伪码和载波相位测量,为不影响测量精度,测量支路只调制扩频码序列,不调制数据码,即  $D_{Mk}^i(t) = 1$ 。通信支路  $A_{Ck} C_{Ck}^i(t) D_{Ck}^i \sin(2\pi f_k t + \varphi_{Ck}^i)$  在调制扩频码序列的基础上,调制数据码  $D_{Ck}^i(t)$ ,用于传输单向伪距测量结果及遥测信息等通信数据。数据码  $D_{Ck}^i(t)$  符号速率可以根据数据传输速率需求以及天地信号灵敏度进行灵活设计与切换,单个数据码符号宽度需与扩频码宽度保持整倍数关系。测量支路与通信支路的幅度  $A_{Mk}$ 、 $A_{Ck}$  可根据提高测量支路灵敏度以及实际通信天地链路预算进行灵活配比。载波频率  $f_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 依据测量精度需求进行设计,根据载波相位测量误差公式<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_{PLL} = \frac{1}{2\pi f_k} \sqrt{\frac{B_{carrL}}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T_{coh} C/N_0}\right)} \quad (4)$$

式中:  $B_{carrL}$  为载波环路噪声带宽;  $C/N_0$  为信号载噪比;  $T_{coh}$  为积分时间。载波频率越高,测量误差  $\sigma_{PLL}$  越小,测量精度越高。

## 2.3 扩频伪码设计

高精度微波时频传递链路信号体制扩频伪码设计包括扩频伪码速率、扩频伪码周期以及扩频伪码序列设计。

### 1) 扩频伪码速率设计

扩频伪码速率设计依据系统测量精度需求以及工作带宽限制,一方面,根据伪码测量误差公式<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_{DLL} = \begin{cases} \sqrt{\frac{B_{codel}}{2C/N_0} D \left(1 + \frac{2}{(2-D)T_{coh} C/N_0}\right)}, & D \geq \frac{\pi}{B_{fe} T_c} \\ \sqrt{\frac{B_{codel}}{2C/N_0} \left(\frac{1}{B_{fe} T_c} + \frac{B_{fe} T_c}{\pi - 1} \left(D - \frac{1}{B_{fe} T_c}\right)^2\right) \left(1 + \frac{2}{(2-D)T_{coh} C/N_0}\right)}, & \frac{1}{B_{fe} T_c} < D < \frac{\pi}{B_{fe} T_c} \\ \sqrt{\frac{B_{codel}}{2C/N_0} \frac{1}{B_{fe} T_c} \left(1 + \frac{1}{T_{coh} C/N_0}\right)}, & D \leq \frac{1}{B_{fe} T_c} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $B_{codel}$  为伪码环路噪声带宽;  $D$  为前后相关器间距;  $B_{fe}$  为射频前端带宽;  $T_c$  为扩频伪码宽度。  $T_c$  越窄,即伪码速率越高,误差  $\sigma_{DLL}$  越低,伪距测量精度越高;另一方面,系统 3 dB 工作带宽大于 2 倍伪码速率,即伪码速率越高,系统工作带宽越大,系统具有更佳的多径抑制性能,但系统实现难度也越高,故扩频伪码速率需根据系统实际需求平衡设计。

### 2) 扩频伪码周期设计

扩频伪码周期设计主要解决天地测量伪距模糊度问

题,对扩频伪码周期  $T$  设计约束为:

$$T \geq \frac{\text{MAX}(\rho_{sc})}{c} \quad (6)$$

式中:  $c$  为真空光速;  $\rho_{sc}$  为空间站与地面站之间的伪距时延。即扩频伪码周期  $T$  大于等于最大天地传播时延以保证天地伪距时延在一个伪码周期内,故不存在测距解算伪码周期数模糊问题。

### 3) 扩频伪码序列设计

扩频伪码序列设计采用线性移位寄存器、混沌扩频序列等方式生成,在生成扩频伪码序列后,根据扩频伪码周期和伪码速率对扩频伪码序列进行截短,得到备选码组,再在备选码组的集合中,依据互相关性能、自相关性能、平衡性等指标筛选得到最终的优选码组<sup>[12]</sup>。

### 2.4 信号帧结构设计

针对 QPSK 扩频调制信号,其信号帧结构设计如图 2 所示,将整个扩频调制信号按时间片划分,每个时间片长度为 1 s,对于测量支路,为提高测量精度,不调制数据,每个时间片只包含循环扩频码序列,循环码周期码片数  $N$  与单个扩频伪码宽度  $T_c$  的乘积即扩频伪码周期  $T$ ,扩频伪码周期  $T$  除需满足式(6)外,还需满足时间片 1 s 内的周期数为整数;对于通信支路,每个时间片除包含循环扩频码序列,同时调制数据码符号,单个数据码符号宽度  $T_d$  根据通信速率确定,但  $T_d/T_c$  需保持整倍数关系,以便数据码符号解调。

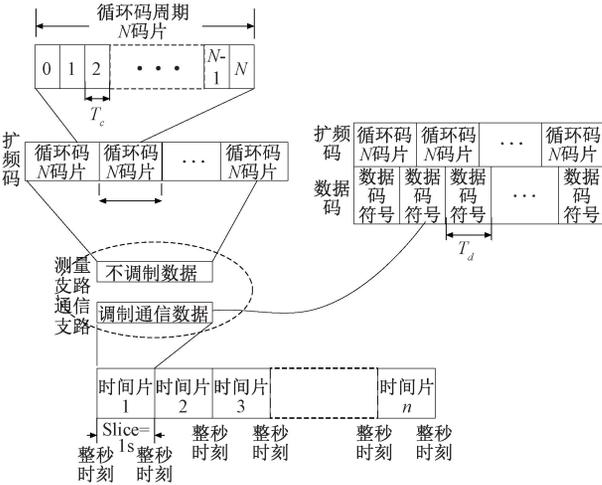


图 2 信号帧结构设计

Fig. 2 The design diagram of signal frame structure

与现有信号体制相比,本文针对高精度时频传递的体制设计优点如下。

1) 支持单频点+多频点载波频率,可以利用双频测定减小电离层时延误差,提高测量精度;利用高频点、高伪码速率提高测量精度,进而提高时频传递精度,同时,伪码速率越高,信号工作带宽越大,具有更佳的多径抑制性能,能够减小多径带来的测量误差,提高测量精度。

2) 支持测通一体,信号结构分为测量支路与通信支路,测量支路实现高精度测量,通信支路传输单向测量结果,辅助完成双向时频传递解算,不需要额外建立通信渠道传输测量结果。

3) 支持参数灵活配置,可根据传递精度需求、天地距离以及在轨软硬件限制,灵活配置载波频点、扩频伪码速率、扩频伪码周期、通信速率、测量通信功率比等信号参数。

## 3 高精度微波时频传递链路比对模式设计

高精度微波时频传递链路钟差比对设计三频+同频两种模式。

### 3.1 三频时间比对模式

三频模式下,根据高精度微波时频传递链路信号体制设计,空间站时频传递载荷设计为“发射双频( $f_1, f_2$ )扩频信号+接收单频( $f_3$ )扩频信号”模式,对应地面站设计为“发射单频( $f_3$ )扩频信号+接收双频( $f_1, f_2$ )扩频信号”模式。空间站在  $t_0$  时刻接收地面站信号测量得到伪距  $\rho_{GS,f_3}$ ,地面站接收空间站时刻  $t_0$  发射的信号,测量得到伪距  $\rho_{SG,f_1}$  和  $\rho_{SG,f_2}$ 。以地面站原子钟作为基准,即可认为地面站钟差为 0,则在地心惯性系下,三频模式伪距观测方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{GS,f_3} &= |R_S(t_0) - R_G(t_G^{Snd})| + cx_S(t_0) + \\ & c\delta_{S,f_3}^{Rev} + c\delta_{G,f_3}^{Snd} + \delta_{GS,f_3}^{ion}(R_G(t_G^{Snd}), R_S(t_0)) + \\ & R_S(t_0) + \delta_{GS}^{tro}(R_G(t_G^{Snd}), R_S(t_0)) + \\ & \delta_{GS}^{rel\_period} + \delta_{GS}^{gra} - \delta_{GS}^{PCO} + \varepsilon_{GS,f_3} \\ \rho_{SG,f_1} &= |R_S(t_0) - R_G(t_G^{Rev})| - cx_S(t_0) + \\ & c\delta_{S,f_1}^{Snd} + c\delta_{G,f_1}^{Rev} + \delta_{SG,f_1}^{ion}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0)) + \\ & R_S(t_0) + \delta_{SG,f_1}^{tro}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0)) + \\ & \delta_{SG}^{rel\_period} + \delta_{SG}^{gra} - \delta_{SG}^{PCO} + \varepsilon_{SG,f_1} \\ \rho_{SG,f_2} &= |R_S(t_0) - R_G(t_G^{Rev})| - cx_S(t_0) + \\ & c\delta_{S,f_2}^{Snd} + c\delta_{G,f_2}^{Rev} + \delta_{SG,f_2}^{ion}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0)) + \\ & R_S(t_0) + \delta_{SG,f_2}^{tro}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0)) + \\ & \delta_{SG}^{rel\_period} + \delta_{SG}^{gra} - \delta_{SG}^{PCO} + \varepsilon_{SG,f_2} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中:  $R_S$  和  $R_G$  分别为空间站和地面站在惯性系中的矢量位置;  $x_S$  为空间站钟差;  $\delta_{S,f_3}^{Snd}$  和  $\delta_{G,f_3}^{Rev}$  分别为信号发射通道和接收通道硬件传输时延;  $\delta_{GS}^{ion}$  为电离层时延;  $\delta_{GS}^{tro}$  为对流层时延;  $\delta_{GS}^{rel\_period}$  为相对论周期效应等效时延;  $\delta_{GS}^{gra}$  为地球引力场造成的等效传输时延;  $\delta_{GS}^{PCO}$  为天线相位中心偏移等效时延;  $\varepsilon$  为测距噪声。根据伪距  $\rho_{GS,f_3}, \rho_{SG,f_1}$ , 可解算出空间站  $t_0$  时刻钟差  $x_S(t_0)$  为:

$$\left. \begin{aligned} x_S(t_0) &= \{ (\rho_{GS,f_3} - \rho_{SG,f_1}) - c(\delta_{S,f_3}^{Rev} - \delta_{S,f_1}^{Snd}) - \\ & c(\delta_{G,f_3}^{Snd} - \delta_{G,f_1}^{Rev}) - [\delta_{GS,f_3}^{ion}(R_G(t_G^{Snd}), R_S(t_0)) - \\ & \delta_{SG,f_1}^{ion}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0))] - [\delta_{SG,f_3}^{tro}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0)) - \\ & \delta_{SG,f_1}^{tro}(R_G(t_G^{Rev}), R_S(t_0))] - |R_S(t_0) - R_G(t_G^{Snd})| + \\ & |R_S(t_0) - R_G(t_G^{Rev})| - \delta_{GS}^{rel\_period} + \delta_{SG}^{rel\_period} - \delta_{GS}^{gra} + \delta_{SG}^{gra} - \\ & \delta_{GS}^{PCO} + \delta_{SG}^{PCO} - \varepsilon_{GS,f_3} + \varepsilon_{SG,f_1} \} / 2c \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,空间站与地面站设备发射通道与接收通道组合时延 $\delta^{Snd}$ 和 $\delta^{Rev}$ 可以提前地面精确标定,惯性系下地面站坐标 $\mathbf{R}_G(t_G^{Snd})$ 和 $\mathbf{R}_G(t_G^{Rev})$ 为已知,空间站坐标 $\mathbf{R}_S(t_0)$ 可根据空间站事后精密轨道计算得出,电离层时延 $\delta^{ion}$ 可根据伪距 $\rho_{SG,f_1}$ 、 $\rho_{SG,f_2}$ 组合差分模型式(1)或(2)计算得出,对流层时延 $\delta^{tro}$ 可利用伪距 $\rho_{SG,f_1}$ 、 $\rho_{GS,f_3}$ 的对流层色散时延模型进行修正<sup>[13-14]</sup>,相对论周期效应等效时延 $\delta^{rel\_period}$ 和引力时延 $\delta^{gra}$ 可通过空间站事后精密轨道参数进行模型修正<sup>[15-18]</sup>,天线相位中心偏移 $\delta^{PCO}$ 通过空间站姿态模式进行修正<sup>[18-19]</sup>。

### 3.2 同频时间比对模式

通过同频对消技术,空间站与地面站时频传递载荷可设计为发射与接收采用同一频率同时收发的同频模式。同样,以地面站原子钟作为基准,地面站钟差为0,则在地心惯性系下,伪距观测方程为:

$$\begin{cases} \rho_{GS} = |\mathbf{R}_S(t_0) - \mathbf{R}_G(t_G^{Snd})| + cx_S(t_0) + c\delta_S^{Rev} + \\ c\delta_G^{Snd} + \delta_{GS}^{ion}(\mathbf{R}_G(t_G^{Snd}), \mathbf{R}_S(t_0)) + \delta_{GS}^{tro}(\mathbf{R}_G(t_G^{Snd}), \\ \mathbf{R}_S(t_0)) + \delta_{GS}^{rel\_period} + \delta_{GS}^{gra} - \delta_{GS}^{PCO} + \varepsilon_{GS} \\ \rho_{SG} = |\mathbf{R}_S(t_0) - \mathbf{R}_G(t_G^{Rev})| - cx_S(t_0) + c\delta_S^{Snd} + \\ c\delta_G^{Rev} + \delta_{SG}^{ion}(\mathbf{R}_G(t_G^{Rev}), \mathbf{R}_S(t_0)) + \delta_{SG}^{tro}(\mathbf{R}_G(t_G^{Rev}), \\ \mathbf{R}_S(t_0)) + \delta_{SG}^{rel\_period} + \delta_{SG}^{gra} - \delta_{SG}^{PCO} + \varepsilon_{SG} \end{cases} \quad (9)$$

在同频模式下进行钟差解算,式(9)中电离层时延 $\delta^{ion}$ 、对流层时延 $\delta^{tro}$ 以及天线相位中心偏移 $\delta^{PCO}$ 可双向对消,故根据伪距 $\rho_{GS}$ 、 $\rho_{SG}$ ,得出空间站 $t_0$ 时刻的钟差 $x_S(t_0)$ 为:

$$\begin{aligned} x_S(t_0) = \{ & (\rho_{GS} - \rho_{SG}) - c(\delta_S^{Rev} - \delta_S^{Snd}) - c(\delta_G^{Snd} - \delta_G^{Rev}) - \\ & |\mathbf{R}_S(t_0) - \mathbf{R}_G(t_G^{Snd})| + |\mathbf{R}_S(t_0) - \mathbf{R}_G(t_G^{Rev})| - \\ & \delta_{GS}^{rel\_period} + \delta_{SG}^{rel\_period} - \delta_{GS}^{gra} + \delta_{SG}^{gra} - \varepsilon_{GS} + \varepsilon_{SG} \} / 2c \end{aligned} \quad (10)$$

同理,式(10)中空间站与地面站设备发射与接收通道组合时延 $\delta^{Snd}$ 和 $\delta^{Rev}$ 可以提前地面精确标定,惯性系下地面站坐标 $\mathbf{R}_G(t_G^{Snd})$ 和 $\mathbf{R}_G(t_G^{Rev})$ 为已知,空间站坐标 $\mathbf{R}_S(t_0)$ 可根据空间站事后精密轨道计算得出,相对论周期效应等效时延 $\delta^{rel\_period}$ 和引力时延 $\delta^{gra}$ 可通过空间站事后精密轨道参数进行模型修正<sup>[15-18]</sup>。

## 4 高精度微波时频传递链路伪距仿真与在轨验证

### 4.1 伪距测量精度仿真

根据高精度微波时频传递链路信号体制设计,伪距测量采用伪码+载波相位测量方式,载波相位测量精度高,再利用伪码测量值实现载波相位整周模糊度解算。根据式(4),仿真选取典型参数,载波环路噪声带

宽 $B_{carrL} = 15$  Hz,积分时间 $T_{coh} = 1$  ms,得到载波频率 $f_k$ 、载噪比 $C/N_0$ 与载波相位测量精度 $\sigma_{PLL}$ 的关系如图3所示。

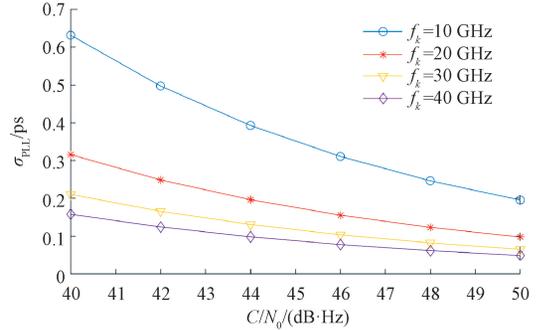


图3 载波相位测量精度示意图

Fig. 3 The measurement accuracy diagram of carrier phase

由图3可知,当接收信号载噪比范围 $C/N_0 > 45$  dB·Hz时,只要载波频率 $f_k > 20$  GHz,载波相位测量精度 $\sigma_{PLL} < 0.2$  ps。

根据式(5),仿真选取典型参数,伪码环路噪声带宽 $B_{codeL} = 0.5$  Hz,积分时间 $T_{coh} = 1$  ms,前后相关器间距 $D = 0.5$ ,射频前端带宽 $B_{fe} = 500$  MHz,得到扩频码速率 $R_c$ ( $R_c = 1/T_c$ )、载噪比 $C/N_0$ 与伪码测量精度 $\sigma_{DLL}$ 的关系如图4所示。

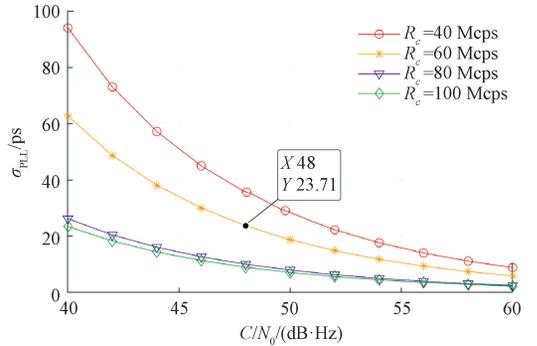


图4 伪码相位测量精度示意图

Fig. 4 The measurement accuracy diagram of pseudo-code phase

对于载波频率 $f_k > 20$  GHz,其载波相位一周为50 ps,根据伪距取整估算法求解载波相位整周模糊度<sup>[11,20]</sup>,要求伪距测量精度优于25 ps。根据图4,当接收信号载噪比范围 $C/N_0 > 48$  dB·Hz时,只要伪码速率 $R_c > 60$  Mcps,伪码相位测量精度 $\sigma_{DLL} < 25$  ps。

### 4.2 伪距在轨试验验证

根据空间站“梦天”实验舱高精度时频实验柜初步功能验证阶段在轨测试,以2023年4月7日空间站-西

安站微波时频传递链路在轨实测数据为例进行分析说明。测试采用三频模式,考虑到本文只对微波时频传递链路的伪距测量精度进行评估,不对空间距离运动非对称误差、电离层时延、对流层时延以及相对论效应时延进行修正,故采用地面接收双频伪距差分拟合残差法对实测数据进行处理,即先将式(7)中 $\rho_{SG,f_1}$ 和 $\rho_{SG,f_2}$ 进行伪距差分得到:

$$\begin{aligned} \rho_{diff} = & \rho_{SG,f_1} - \rho_{SG,f_2} = c(\delta_{S,f_1}^{Snd} - \delta_{S,f_2}^{Snd}) + \\ & c(\delta_{G,f_1}^{Rev} - \delta_{G,f_2}^{Rev}) + \delta_{SG,f_1}^{ion}(\mathbf{R}_G(t_G^{Rev}), \mathbf{R}_S(t_0)) - \\ & \delta_{SG,f_2}^{ion}(\mathbf{R}_G(t_G^{Rev}), \mathbf{R}_S(t_0)) + \varepsilon_{SG,f_1} - \varepsilon_{SG,f_2} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,差分伪距 $\rho_{diff}$ 包含电离层双频差分时延(存在传播空间单位截面积电子数导致的缓变趋势项)<sup>[21]</sup>,收发硬件差分常量时延以及测量随机误差,对 $\rho_{diff}$ 进行高阶拟合并求得拟合残差如图5所示。

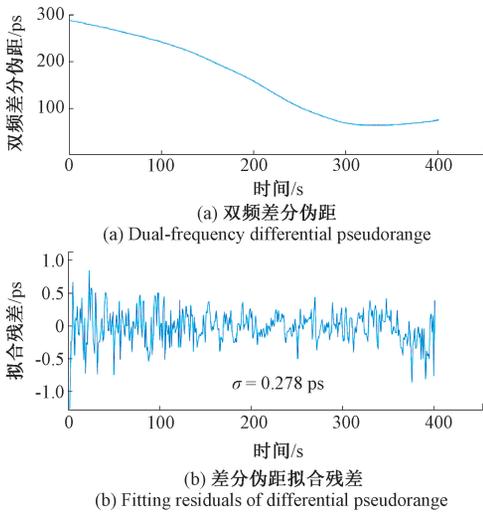


图5 双频差分伪距及拟合残差

Fig. 5 Dual-frequency differential pseudorange and fitting residuals

由图5(b)的差分伪距拟合残差统计求得标准方差 $\sigma = 0.278$  ps,表明微波时频传递链路伪距测量精度可达亚皮秒级。

## 5 结 论

本文根据空间站微波时频传递链路研究进展,重点阐述了高精度时频系统微波传递链路的信号体制及链路比对模式设计等关键技术,通过伪距测量精度仿真及在轨实测数据分析表明微波时频传递链路单向伪距测量精度达到亚皮秒级。下一步将结合精密轨道、大气修正模型以及相对论修正模型对时频实验柜空间原子钟组完成在轨性能评估。

## 参考文献

- [1] SCHULDT T, NAGEL M, KEETMAN A, et al. The STAR mission: Space time asymmetry research[C]. 46th Rencontres de Moriond on Gravitational Waves and Experimental Gravity, 2011:429-430.
- [2] SCHULDT T, SARAF S, STOCHINO A, et al. mSTAR: Testing special relativity in space using high performance optical frequency references[C]. IFCS-EFTF, 2015.
- [3] CACCIAPUOTI L, SALOMON C. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 172 (1):57-68.
- [4] SCHILLER S, GÖRLITZ A, NEVSKY A, et al. The space optical clocks project: Development of high-performance transportable and breadboard optical clocks and advanced subsystems[C]. 2012 European Frequency and Time Forum (EFTF), 2012: 412-418.
- [5] BURT E A, PRESTAGE J D, TJOELKER R L, et al. Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space[J]. Nature, 2021, 595(7865): 43-47.
- [6] HESS M P, STRINGHETTI L, HUMMELBERGER B, et al. The ACES mission: System development and test status [J]. Acta Astronautica, 2011, 69 (11-12): 929-938.
- [7] PHILIPPE L, MASSONNET D, CACCIAPUOTI L, et al. The ACES/PHARAO space mission[J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5):540-552.
- [8] ORIGLIA S, PRAMOD M S, SCHILLER S, et al. An optical lattice clock breadboard demonstrator for the I-SOC mission on the ISS [C]. Lasers & Electro-optics Europe & European Quantum Electronics Conference, 2017.
- [9] 中国载人航天办公室. 中国空间站科学实验资源手册[Z]. 2019:38-40.  
China Manned Space Office. China space station scientific experiment resource manual[Z]. 2019:38-40.
- [10] 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.
- [11] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [12] XIE G. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [12] 朱建锋. 卫星导航信号扩频码构造、优选和增强接收

技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.

ZHU J F. Research on the construction, optimization, and enhanced reception techniques of spread spectrum codes for satellite navigation signals [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

- [13] 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.
- [14] SUN X, SHEN W B, SHEN Z, et al. Formulation to test gravitational redshift based on the tri-frequency combination of ACES frequency links [J]. *European Physical Journal C*, 2021, 81:634.
- [15] LARSON K M, ASHBY N, HACKMAN C, et al. An assessment of relativistic effects for low Earth orbiters: the GRACE satellites [J]. *Metrologia*, 2007, 44 (6): 484-490.
- [16] GUO Y M, BAI Y, ZHANG S G, et al. Relativistic effects on satellite-ground two-way precise time synchronization [J]. *Information*, 2021, 12(10): 422.
- [17] 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 [C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings*, 2021.
- [18] GUO Y M, GAO S H, BAI Y, et al. A new space-to-ground microwave-based two-way time synchronization method for next-generation space atomic clocks [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14:528.
- [19] XIE X, ZHAO Q L, LIU J N, et al. Orbit and clock analysis of BDS-3 satellites using inter-satellite link observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94 (7): 1-18.
- [20] DEDES G, GOAD C. Real-time cm-level GPS positioning of cutting blade and Earth moving equipment [J]. *Proceedings of the National Technical Meeting Navigating the Earth & Beyond*, 1994 (1): 587-594.
- [21] PARKINSON B W, ENGE P K, SPILKER J J. *Global positioning system: Theory and applications* [M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

## 作者简介



孟志军, 2009年于湖南师范大学获得学士学位, 2012年于华中科技大学获得硕士学位, 2017年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学副研究员, 主要研究方向为空间仪器工程。

E-mail: mzej727@126.com

Meng Zhijun received his B. Sc. degree in 2009 from Hunan Normal University, received his M. Sc. degree in 2012 from Huazhong University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 2017 from National University of Defense Technology, now he is an Associate Research Fellow in National University of Defense Technology. His main research interests is space instrument engineer.



陈林, 2004年于电子科技大学获得学士学位, 2007年于电子科技大学获得硕士学位, 2022年于国防科技大学获得博士学位, 现为中国电子科技集团公司第二十九所教授级高级工程师, 主要研究方向为卫星导航、空间有效载荷技术。

E-mail: 40134384@qq.com

Chen Lin received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2004, M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2007, and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2022. He is currently a professional engineer at the 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interests include satellite navigation and space payload technology.



高帅和, 2008年于吉林大学获得学士学位, 2012年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心正高级工程师, 主要研究方向为卫星导航、时频传递。

E-mail: gaoshuaihe@ntsc.ac.cn

Gao Shuaihe received his B. Sc. degree from Jilin University in 2008, and Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2012. He is currently a senior engineer at National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences. His main research interests include satellite navigation and time-frequency transmission.



郭熙业 (通信作者), 分别在 2003 年、2005 年和 2010 年于国防科技大学获得学士学位、硕士学位以及博士学位, 现为国防科技大学副研究员, 主要研究方向为天基智能以及精密时空测量。

E-mail: 13574832047@163.com

Guo Xiye (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from National University of Defense Technology in 2003, 2005, and 2010, respectively. He is currently an associate research fellow at National University of Defense Technology. His main research interests include space-based intelligent system, precise positioning and timing.