

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

高帅和¹,张首刚¹,潘志兵¹,宋 坤²,岳耀笠³,刘禹圻²,张 浩⁴,王 沛¹,郭燕铭¹

(1. 中国科学院国家授时中心,陕西西安 710600;2. 中国电子科技集团公司第29研究所,四川成都 610036;
3. 中国电子科技集团公司第34研究所,广西桂林 541004;4. 中国电子科技集团公司第44研究所,重庆 400060)

摘 要: 针对星地复杂环境下空间光学频率信号稳定度评估的需求,设计基于微波时频传递链路的双向时差测量系统. 利用内置激光器对光学频率信号光纤传递链路进行相位漂移检测并补偿,控制光频信号传输时延;基于马赫-曾德尔干涉仪结构进行光学本振合成,提高射频信号质量;通过分时复用实现对通道载波多普勒频率牵引和相位跟踪,实现高精度测量. 地面测试结果表明该系统可实现测量系统附加频率稳定度 5.07×10^{-14} s/1 s, 5.31×10^{-16} s/300 s, 2.36×10^{-17} s/1 $\times 10^4$ s, 7.46×10^{-18} s/8.64 $\times 10^4$ s.

关键词: 微波时频传递;时差测量;光纤相位补偿;马赫-曾德尔干涉仪

基金项目: 国家自然科学基金(No.11873009);中国科学院西部引进人才项目(No.E016YR1R);陕西省高层次人才项目(No.E039SB1K)

中图分类号: TN925;P19;V19

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)08-2043-07

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

DOI:10.12263/DZXB.20220376

A Microwave Bidirectional Measurement System for Evaluating the Stability of Spatial Optical Frequency Signal

GAO Shuai-he¹, ZHANG Shou-gang¹, PAN Zhi-bing¹, SONG Kun², YUE Yao-li³, LIU Yu-qi²,
ZHANG Hao⁴, WANG Pei¹, GUO Yan-ming¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

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

3. The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin, Guangxi 541004, China;

4. The 44th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: According to the requirements of frequency stability evaluation of spatial optical signal in satellite-ground environment, a two-way time differences of arrival (TDOA) measurement system based on microwave link is designed. The built-in laser is used to detect and compensate the phase drift of optical frequency transmission fiber, so as to control the transmission delay of optical frequency signal. The optical local oscillator is synthesized based on the structure of Mach-Zehnder interferometer (MZI) to improve the quality of radio frequency signal. The Doppler frequency traction and phase tracking of channel carrier are realized through time-sharing multiplexing to obtain high-precision measurement. The test results show that the designed measurement system can realize the level of additional frequency stability at 5.07×10^{-14} s/1 s, 5.31×10^{-16} s/300 s, 2.36×10^{-17} s/1 $\times 10^4$ s, 7.46×10^{-18} s/8.64 $\times 10^4$ s.

Key words: microwave time-frequency transmission; time differences of arrival; optical fiber phase compensation; mach-zehnder interferometer

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.11873009); Western Talent Introduction Project of Chinese Academy of Sciences (No.E016YR1R); Shaanxi Provincial High Level Talent Project (No.E039SB1K)

1 引言

空间微重力环境有利于提高原子钟组性能,具备广域覆盖的优势,有利于拓展高精度时频基准的应用范围. 国内外均将发展空间高精度原子钟组作为空间前沿科学探索和时频体系建立的重要研究方向. 由欧洲空间局主导的先进原子钟计划(Atomic Clock Ensemble in Space, ACES)拟在国际空间站搭载冷原子微波钟、主动氢钟,实现不确定度和日稳定度达E-16量级的空间原子钟组能力,研究冷原子物理现象,检验相对论^[1,2]. 此外,欧洲空间局布局了空间光钟(Space Optical Clocks, SOC)的研制计划,项目第二阶段已实现了长期稳定度5E-17量级的空间光钟原理样机,计划安装到国际空间站上^[3]. 中国载人航空气空间站也布局了高精度时频柜实验系统. 其中,如何建立高精度星地时差测量比对链路,客观、准确评价空间钟组效能,促进高精度时频基准应用,是建立空间时频体系迫切需要形成的核心能力,尤其是面向星地复杂环境、可实现持续建链的星地微波比对评估的方法.

空间高精度基于伪距的时差测量的典型代表是北斗卫星星间Ka频段双向链路,实现了精度优于0.3 ns的星地和星间时间传递^[4]. ACES计划的微波链路,预计实现优于6 ps的星地比对精度^[5]. EGE(Einstein Gravity Explorer)项目在ACES的基础上进一步提高精度,预期实现时差测量精度仍在ps量级^[6]. 文献[7]和文献[8]从系统层面分别设计了面向大气传输误差修正、相对论效应修正等关键技术的同频星地时频比对方法和三频星地时频比对方法,旨在实现星地亚ps级时间同步.

本文从产品实现的角度设计了一种星地时差精密测量的设备方案,利用光频信号稳相传输、本振频率光学合成、精密载波跟踪测量等提升测量精度,并在实验室环境下开展了测试验证.

2 双向测量系统设计

2.1 双向时频比对原理

以典型的微波双向时差测量为例,由于路径相同、方向相反,大部分时延误差均可抵消. 卫星与地面之间持续收发测距信号进行测量,每提取出一组双向测距值,可完成一次钟差解算. 假设所提取的下行测距信号为卫星在 t_S^{Snd} 时刻发送,地面在 t_G^{Rcv} 时刻接收;上行测距信号由地面在 t_G^{Snd} 时刻发送,卫星在 t_S^{Rcv} 时刻接收. 对应的测距过程如图1所示^[9].

星地设备分别在本地秒脉冲的上升沿向对方发射测距信号,其中 Δt 表示卫星与地面设备的时间偏差(星地钟差), τ_S^{Snd} 和 τ_G^{Snd} 分别表示卫星和地面的设备发射时延, τ_G^{Rcv} 和 τ_S^{Rcv} 分别表示卫星和地面的设备接收时延, $\tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}$ 表示信号从地面到卫星的空间传播时延, $\tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}$ 表示信号从卫星到地面的空间传播时延.

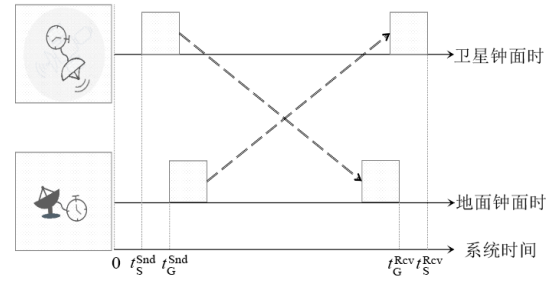


图1 微波双向时差测量流程

此外,在实际星地测量环境中还应当考虑由于相对论效应引起的附加空间传播时延 $\tau_{\text{rel}}^{\text{SG}}$ 和 $\tau_{\text{rel}}^{\text{GS}}$,以及对流层和电离层引起的附加空间传播时延 $\tau_{\text{tro}}^{\text{SG}}$ 和 $\tau_{\text{tro}}^{\text{GS}}$,以及卫星和地面设备的测量噪声 δ^{SG} 、 δ^{GS} ,则卫星和地面设备得到的下行观测时延值 T_S^G 和上行观测时延值 T_G^S 分别表示为

$$T_S^G(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) = \tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + [\Delta t_G(t_G^{\text{Rcv}}) - \Delta t_S(t_S^{\text{Snd}})] + \tau_S^{\text{Snd}} + \tau_G^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \tau_{\text{rel}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \delta^{\text{SG}} \quad (1)$$

$$T_G^S(t_G^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) = \tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) + [\Delta t_S(t_S^{\text{Rcv}}) - \Delta t_G(t_G^{\text{Snd}})] + \tau_G^{\text{Snd}} + \tau_S^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) + \tau_{\text{rel}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) + \delta^{\text{GS}} \quad (2)$$

一般情况下,假设上行观测和下行观测的接收时刻的钟面时存在固定时间偏差 ΔT ,即 $t_S^{\text{Rcv}} = t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T$,则式(1)和式(2)可以改写为

$$T_S^G(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) = \tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + [\Delta t_G(t_G^{\text{Rcv}}) - \Delta t_S(t_S^{\text{Snd}})] + \tau_S^{\text{Snd}} + \tau_G^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \tau_{\text{rel}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \delta^{\text{SG}} \quad (3)$$

$$T_G^S(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) = \tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) + [\Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \Delta t_G(t_G^{\text{Snd}})] + \tau_G^{\text{Snd}} + \tau_S^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) + \tau_{\text{rel}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) + \delta^{\text{GS}} \quad (4)$$

进一步推算,式(3)和式(4)可以改写为

$$T_S^G(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) = \tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) + [\tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) - \tau_{\text{sp}}^{\text{SG}}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}})] - \Delta t + [\Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}}) - \Delta t_S(t_S^{\text{Snd}})] + \tau_S^{\text{Snd}} + \tau_G^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \tau_{\text{rel}}^{\text{SG}}(t_S^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}}) + \delta^{\text{SG}} \quad (5)$$

$$T_G^S(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) = \tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) + [\tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \tau_{\text{sp}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}})] + \Delta t + [\Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \Delta t_G(t_G^{\text{Snd}})] - \Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}}) + \Delta t_G(t_G^{\text{Rcv}})] + \tau_G^{\text{Snd}} + \tau_S^{\text{Rcv}} + \tau_{\text{tro}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) + \tau_{\text{rel}}^{\text{GS}}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) + \delta^{\text{GS}} \quad (6)$$

其中, $-\Delta t = -\Delta t_S - \Delta t_G$, 将式(5)和式(6)相减可以得到星地相对钟差为

$$\begin{aligned} \Delta t = & \left\{ T_G^S(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - T_S^G(t_S^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) \right\} / 2 \\ & - \left\{ \tau_{\text{sp}}^{GS}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) - \tau_{\text{sp}}^{SG}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) \right\} / 2 \\ & - \left\{ \left[\tau_{\text{sp}}^{GS}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \tau_{\text{sp}}^{GS}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) \right] \right. \\ & \left. - \left[\tau_{\text{sp}}^{SG}(t_S^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) - \tau_{\text{sp}}^{SG}(t_G^{\text{Rcv}}, t_G^{\text{Rcv}}) \right] \right\} / 2 \\ & - \left\{ \left[\Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \Delta t_G(t_G^{\text{Snd}}) - \Delta t_S(t_G^{\text{Rcv}}) \right] \right. \\ & \left. + \Delta t_G(t_G^{\text{Rcv}}) - \left[\Delta t_S(t_S^{\text{Rcv}}) - \Delta t_S(t_S^{\text{Snd}}) \right] \right\} / 2 \quad (7) \\ & - \left\{ \tau_G^{\text{Snd}} + \tau_S^{\text{Rcv}} - \tau_S^{\text{Snd}} - \tau_G^{\text{Rcv}} \right\} / 2 \\ & - \left\{ \tau_{\text{tro}}^{GS}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \tau_{\text{tro}}^{SG}(t_S^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) \right\} / 2 \\ & - \left\{ \tau_{\text{rel}}^{GS}(t_G^{\text{Snd}}, t_G^{\text{Rcv}} + \Delta T) - \tau_{\text{rel}}^{SG}(t_S^{\text{Snd}}, t_S^{\text{Rcv}}) \right\} / 2 \\ & - \left\{ \delta^{GS} - \delta^{SG} \right\} / 2 \end{aligned}$$

其中, $\left\{ \tau_G^{\text{Snd}} + \tau_S^{\text{Rcv}} - \tau_S^{\text{Snd}} - \tau_G^{\text{Rcv}} \right\} / 2$ 反映的是在不考虑路径情况下, 信号由卫星到地面的信号来回时间差, 即两个单向测量中设备时延的差异. 因此设备的时延误差在某种程度上对时间同步精度起到了重要影响.

2.2 空地光频信号比对设计

根据双向测量流程, 构建双向微波时频比对链路系统, 如图 2 所示. 光频信号作为系统的输入频率基准, 分别经过光频信号稳相传输装置、光频本振信号合成装置, 以及微波测量信号处理装置, 实现光频信号的精密时差测量, 进而完成稳定度评估. 其中, 光频信号稳相传输装置实现光频信号的时延精密控制; 光频本振信号合成装置在光频上实现脉冲重频的倍增, 光电转化、滤波放大后转化成所需的本振信号; 微波测量信号处理装置包括射频通道、基带信号处理等, 实现稳定跟踪和精密测量.

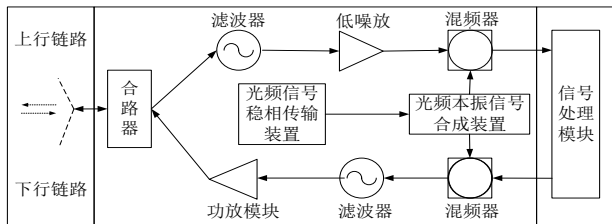


图2 传递链路设备组成

2.2.1 光纤相位检测补偿实现光频信号时延控制

如图 2 所示, 受温度变化、环境振动等影响, 光学频率信号传输过程中将产生 ps 级以上的时延变化量. 为了实现高精度时延补偿, 采用等长光纤替代法, 即令输入端或输出端光纤干涉仪的测量臂中非公共光纤段长度与盲区光纤长度一致, 从而等效测量盲区光纤的相位漂移, 实现了业务光信号在光纤链路传输的相位漂移检测误差最小化, 从而获得更高的相位补偿精度, 如

图 3 所示.

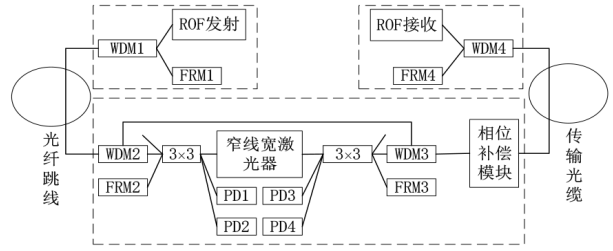


图3 高精度时延补偿方法

采用内置激光器对光学频率信号光纤传递链路进行相位漂移检测. 波分复用设计使检测激光和传递频率信号光在同一根光纤里传输, 检测激光检测到的光纤相位漂移量同时也是传递频率信号光频率信号的传输时延变化量.

根据相位漂移检测结果, 采用压电陶瓷光纤伸缩器 (Piezoelectric ceramics, PZT)、温控光纤伸缩器 (Temperature Control, TEC) 的相位补偿模块对频率信号光纤传递链路进行实时负反馈相位补偿, 使光纤传递链路保持在近似恒定光程的情况下进行频率信号相位稳定传递.

为了实现高精度的相位补偿, 本实验装置采用激光相干检测方法提高频率信号光纤传输链路相位漂移检测的精度, 并结合高精度和大量程的相位补偿器件, 实现了高精度时延控制.

2.2.2 MZI 结构的光学本振频率合成

传统微波信号上变频相位噪声损失大, 无法满足高精度测量的要求. 本实验装置设计了基于 MZI 结构的 optical 本振合成方法. MZI 结构实现光频梳脉冲的时分复用, 通过设计并精密制作 MZI 两干涉光路光纤的相对光学长度, 实现光频梳脉冲在时域上按一定相对延时规律的脉冲分离, 经过光合路后可以实现脉冲重频的倍增. 采用小功率高线性光电转换器实现光电信号的转换, 使用梳状滤波低噪声增益放大电路实现电频率信号的放大, 从而实现所需本振信号倍频放大.

2.2.3 分时复用的载波相位高精度测量

环路跟踪主要功能是实现捕获的多普勒和码相位信号进行精确跟踪. 跟踪模块包括锁频环 (Frequency-Locked Loop, FLL)、锁相环 (Phase-Locked Loop, PLL)、码跟踪环 (Delay-Locked Loop, DLL), 通过分时复用的方式实现对通道载波多普勒频率的牵引和相位跟踪, 以及对伪码频率和相位的跟踪. 为了实现亚 ps 级测量, 本实验装置利用载波环路的精密相位测量结果进行时差测量, 并通过优化环路带宽、增加相干积分时间, 减少载波环路相位抖动.

此外,为了确保收发通道时延稳定度,本实验装置还增加了微波时频传递设备时延校正回路和温度控制措施.

3 测试场景构建

为了完整测试设备层误差,评估设备附加时频传递误差,分别构建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.

(1)非同源测试场景构建

在实验室测试环境条件下,分别采用两台氢原子钟为星载终端和地面终端设备提供时频参考信号,测试在非同源条件下的时频传递稳定度,测试框图如图4所示.

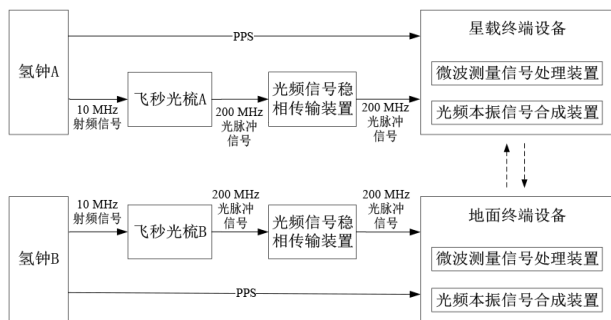


图4 非同源测试框图

(2)同源测试场景构建

受限非同源钟组性能限制,无法摸底测量链路设备自身指标.考虑同源测试场景,即星载终端和地面终端设备采用同一个时频基准信号,消除钟组引入的误差,评估微波时频传递链路的附加噪声,如图5所示.

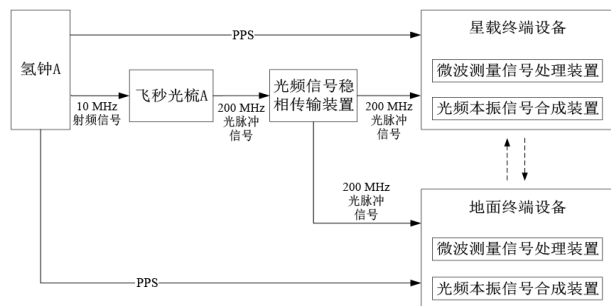


图5 同源测试框图

在测试过程中保持测试环境温度基本恒定,同时通过微波吸波暗箱屏蔽可能存在的多径干扰,实验测试场景如图6所示.

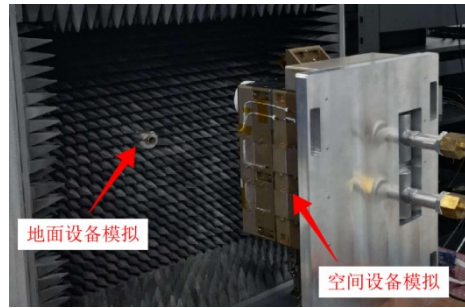


图6 测试场景照片

4 测试结果分析

4.1 非同源测试场景的结果分析

在非同源测试场景下,星上终端发-地面终端收和地面终端发-星上终端收两条双向链路的测量结果如图7所示.

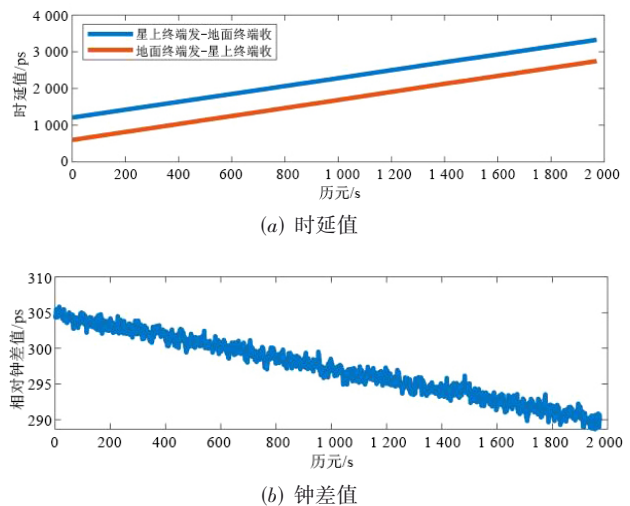


图7 非同源双向测量结果

图7(a)展示了非同源测试场景下“星上终端发-地面终端收”和“地面终端发-星上终端收”两条双向链路的时延值测量结果;图7(b)展示了非同源测试场景下两条双向链路时延值之差的1/2,即对应式(7)中的相对钟差值测量结果.

针对两台氢钟的频率偏离,对Microchip 5125A测试的结果和非同源测试中微波双向测量链路的测量结果进行了对比,如表1所示.结果表明微波双向测量链路的测量结果和Microchip 5125A相噪测试仪对两个氢钟频率偏离的测量结果基本吻合.

对测量结果采用一次线性拟合方法可消除两个氢钟的频率偏离,如图8所示,可看出“星上终端发-地面终端收”和“地面终端发-星上终端收”两条双向测量链

表 1 不同测试方案对两台氢钟的频率偏离的测量结果对比

序号	测试项目	测量结果	
1	两台氢钟的频率偏离 (使用 Microchip 5125A 测试)	1.067 ps/s	
2	两台氢钟的频率偏离 (使用微波双向测量链路测试)	星上终端发-地面终端收	地面终端发-星上终端收
		1.08 ps/s	1.09 ps/s

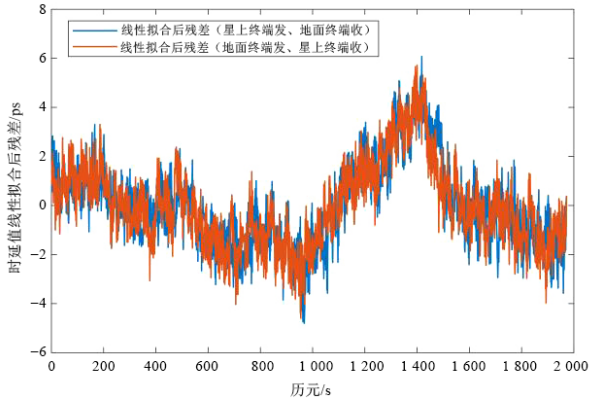


图 8 非同源随机测量误差

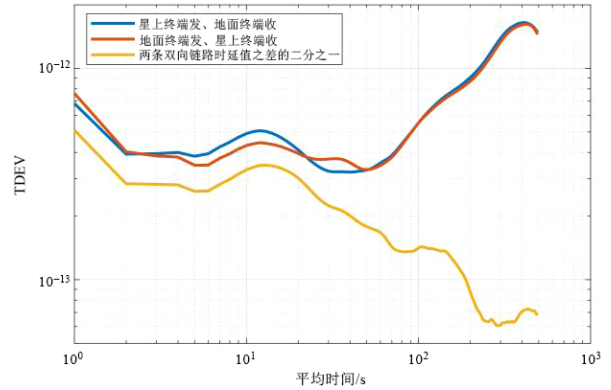


图 10 非同源测量的 TDEV 结果

路的拟合残差基本一致。

双向时差测量的随机误差分别为 0.68 ps 和 0.76 ps, 如图 9、图 10 和表 2 所示。微波链路测量结果和非同源的时频基准的短期特性一致, 因此所提的基于微波双向测量的信号稳定度评估系统未恶化非同源钟组的比对结果。从图 9、图 10 也可看出“星上终端发-地面终端收”和“地面终端发-星上终端收”两条双向测量链路对两台氢钟的频率测量结果的 ADEV 和 TDEV 计算结果基本一致。

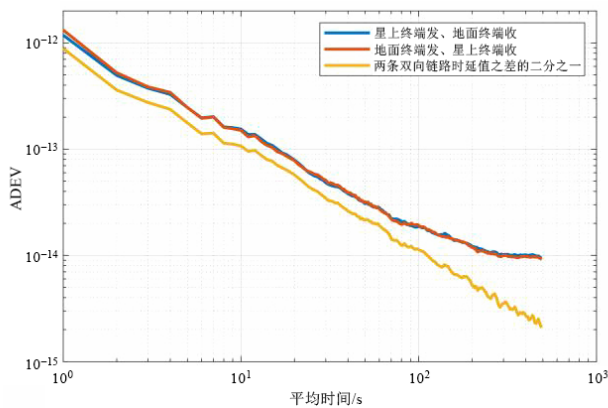


图 9 非同源测量的 ADEV 结果

4.2 同源测试场景的结果分析

为了进一步摸底提出的用于光频信号稳定度评估的微波双向测量系统的指标能力, 采用了同源测试方法, 得到的双向测量结果如图 11 所示。图 11(a) 展示了同源测试场景下“星上终端发-地面终端收”和“地面终端

端发-星上终端收”两条双向链路的时延值测量结果, 图 11(b) 展示了同源测试场景下两条双向链路时延值之差的二分之一即相对钟差值测量结果。

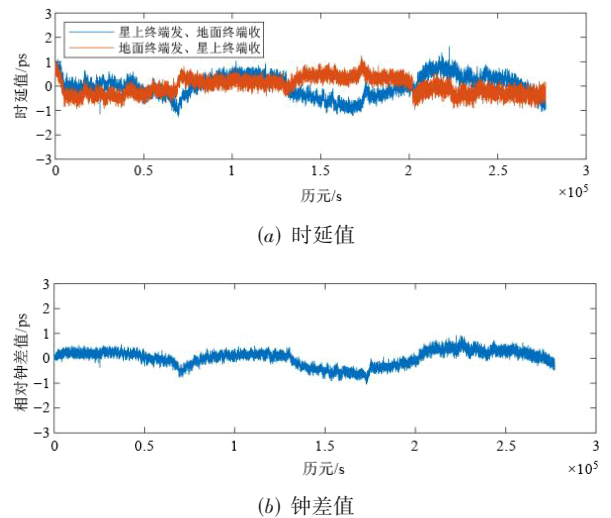


图 11 同源测试场景的时延值测量结果

如图 12 所示, 测试结果表明微波双向测量链路的 TDEV 可实现 2.93×10^{-14} s/1 s, 4.19×10^{-14} s/300 s, 6.90×10^{-14} s/10 000 s, 2.71×10^{-13} s/86 400 s。

如图 13 所示, 对应的传递链路附加稳定度可实现 5.07×10^{-14} s/1 s, 5.31×10^{-16} s/300 s, 2.36×10^{-17} s/10 000 s, 7.46×10^{-18} s/86 400 s, 统计结果见表 3。

表2 非同源测量的ADEV结果和TDEV结果

传递链路	TDEV		ADEV	
	Tau=1 s	Tau=300 s	Tau=1 s	Tau=300 s
星上终端发-地面终端收	$6.826\ 023 \times 10^{-13}$	$1.387\ 677 \times 10^{-12}$	$1.182\ 302 \times 10^{-12}$	$1.020\ 699 \times 10^{-14}$
地面终端发-星上终端收	$7.626\ 606 \times 10^{-13}$	$1.332\ 797 \times 10^{-12}$	$1.320\ 967 \times 10^{-12}$	$9.933\ 208 \times 10^{-15}$
(“星上终端发-地面终端收”-“地面终端发-星上终端收”)/2	$5.106\ 153 \times 10^{-13}$	$6.095\ 340 \times 10^{-14}$	$8.844\ 116 \times 10^{-13}$	$3.585\ 748 \times 10^{-15}$

注: Tau表示特定长度的时间窗。

表3 同源测量的ADEV结果和TDEV结果

传递链路	TDEV				ADEV			
	Tau=1 s	Tau=300 s	Tau=10 000 s	Tau=86 400 s	Tau=1 s	Tau=300 s	Tau=10 000 s	Tau=86 400 s
星上终端发-地面终端收	2.04×10^{-14}	6.47×10^{-14}	1.20×10^{-13}	1.93×10^{-13}	3.54×10^{-14}	7.49×10^{-16}	3.75×10^{-17}	9.32×10^{-18}
地面终端发-星上终端收	5.48×10^{-14}	5.55×10^{-14}	9.87×10^{-14}	3.52×10^{-13}	9.49×10^{-14}	7.68×10^{-16}	3.63×10^{-17}	8.07×10^{-18}
(“星上终端发-地面终端收”-“地面终端发-星上终端收”)/2	2.93×10^{-14}	4.19×10^{-14}	6.90×10^{-14}	2.71×10^{-13}	5.07×10^{-14}	5.31×10^{-16}	2.36×10^{-17}	7.46×10^{-18}

注: Tau表示特定长度的时间窗。

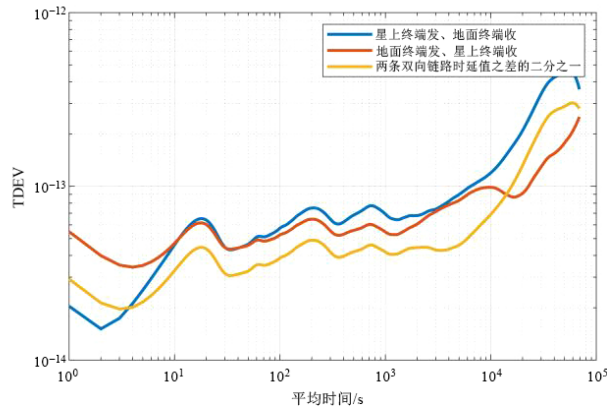


图12 同源测量的TDEV结果

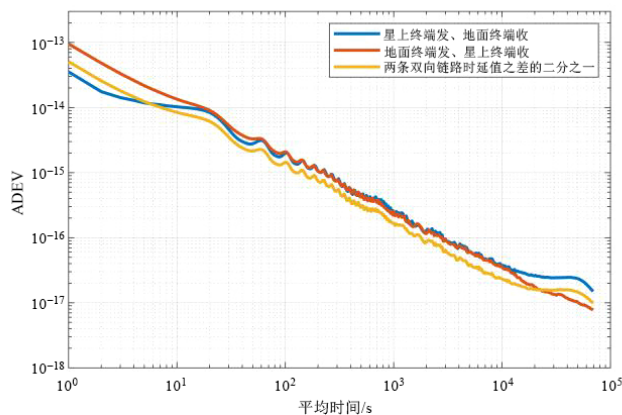


图13 同源测量的ADEV结果

5 结论

本文根据星地复杂环境下空间光频信号稳定度评估需求,开展微波双向测量系统设计,构建了非同源和同源测试验证系统,测试结果表明:

(1)非同源场景下的微波链路测量结果和时频基

准的短期特性一致,提出的基于微波双向测量的信号稳定度评估系统未恶化非同源钟组的比对结果。

(2)同源情况下提出的微波双向测量链路的TDEV可实现 2.93×10^{-14} s/1 s, 4.19×10^{-14} s/300 s, 6.90×10^{-14} s/10 000 s, 2.71×10^{-13} s/86 400 s,对应的传递链路附加稳定度可实现 5.07×10^{-14} s/1 s, 5.31×10^{-16} s/300 s, 2.36×10^{-17} s/10 000 s, 7.46×10^{-18} s/86 400 s。

参考文献

- [1] PHILIPPE L, DIDIER M, LUIGI C, et al. The ACES/PHARAO space mission[J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 540-552.
- [2] YANG W K, MENG W D, HAN W B, et al. Advances in atomic clock ensemble in space of Europe and ultraprecise time and frequency transfer[J]. Progress in Astronomy, 2016, 34(2): 221-237.
- [3] SCHILLERA S, GÖRLITZA A, NEVSKYA A, et al. Optical clocks in space[C]// Proceedings of the Third International Conference on Particle and Fundamental Physics in Space. Beijing: Nuclear Physics B, 2007: 300-302.
- [4] 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.
- [5] SEIDEL A, HESS M P, KEHRER J, et al. The ACES microwave link: Instrument design and test results[C]//2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. Geneva: IEEE, 2007: 1295-1298.
- [6] SCHILLER S, TINO G M, GILL P, et al. Einstein Gravity Explorer-a medium-class fundamental physics mission[J].

Experimental Astronomy, 2009, 23(2): 573-610.

- [7] GUO Y, GAO S, 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(3): 528-542.
- [8] GUO Y, BAI Y, GAO S, et al. Relativistic effects on satellite-ground two-way precise time synchronization[J]. Information, 2021, 12(10): 422.
- [9] GAO S, LIU Y, GUO L, et al. Error analysis of high precision two-way time difference measurement in satellite-ground links[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 887(1): 1-7.

作者简介



高帅和 男,1986年10月出生,辽宁瓦房店人.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.
E-mail: gaoshuaihe@ntsc.ac.cn



张首刚 男,1966年12月出生,陕西咸阳市人.中国科学院国家授时中心研究员.主要研究方向为量子频标、空间时频.
E-mail: szhang@ntsc.ac.cn



潘志兵 男,1990年6月出生,广东韶关人.中国科学院国家授时中心助理研究员.主要研究方向为空间时频、时频系统.
E-mail: panzhibing@ntsc.ac.cn



宋坤 男,1983年11月出生,陕西西安人.中国电子科技集团公司第二十九研究所高级工程师.主要研究方向为空间有效载荷技术.
E-mail: 496557301@qq.com



岳耀筌 男,1983年2月出生,广西人.中国电子科技集团公司第三十四研究所高级工程师.主要研究方向为光纤稳相传输、光纤传感.
E-mail: 13635199784@163.com



刘禹圻 男,1983年11月出生,四川泸州人.中国电子科技集团公司第二十九研究所高级工程师.主要研究方向为卫星导航.
E-mail: liu.yuqi@139.com



张浩 男,1989年11月出生,重庆人.重庆光电技术研究所高级工程师.主要研究方向为微波光子时间频率综合与传输.
E-mail: zhanghao678@126.com



王沛 男,1983年9月出生,陕西西安人.中国科学院国家授时中心高级工程师.主要研究方向为卫星导航、高精度授时.
E-mail: wangpei@ntsc.ac.cn



郭燕铭 男,1995年02月出生,福建莆田人.中国科学院国家授时中心博士研究生.主要研究方向为空间高精度时间同步技术.
E-mail: guoyanming@ntsc.ac.cn