

面向星间激光干涉测距的高精度小型化验证系统

姚鑫*, 李嘉敏, 王国永, 张中英, 王登峰

中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100

摘要 激光干涉测距仪是下一代地球重力场探测卫星和空间引力波探测任务的核心载荷。搭建了一套基于锁相应答机制的小型激光干涉仪, 在 0.1 Hz 处的噪声谱密度为 $0.17 \text{ nm/Hz}^{1/2}$, 远低于下一代地球重力场探测的测距噪声要求。另外, 验证了数据后处理方式抑制光学锁相噪声的可行性, 进一步将系统噪声降低到 $0.11 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ 。该高精度小型化验证系统是测试激光干涉测距系统关键技术指标的有力工具。

关键词 测量; 干涉度量法; 相位测量; 外差法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.0915001

星间位移的精密测量能够精确反演地球时变重力场信息^[1], 在多个领域具有重要的应用价值。2002 年, 美德合作发射的地球重力场探测卫星 (GRACE) 利用微波测距载荷实现了微米级的星间位移测量^[2]。由于激光干涉测量在高灵敏传感和高精度位移测量等方向具有重要的应用潜力^[3-5], 为了进一步提高地球重力场的反演精度并在轨验证激光干涉技术, 第二代地球重力场探测卫星 (GRACE-Follow on) 于 2018 年发射, 双星编队在 220 km 星间链路上达到了纳米级精度的星间激光干涉测距目标^[6]。另外, 在提出的空间引力波探测科学任务中, 为了反演 mHz 频段宇宙引力波信号, 需在数十万到数百万 km 的星间链路上实现 pm 级的位移测量精度, 这对星载激光干涉测距技术提出了更高的要求^[7-9]。在模拟星间距离与动态^[10]、超稳光学平台^[11]、高精度相位计^[12]、时间延迟干涉 (TDI) 数据处理算法^[13]等关键技术攻关中, 需开发一套多功能高精度地面验证系统, 这是星间激光干涉测距的重要研究内容之一。加州理工大学喷气推进实验室在真空系统中搭建了基于超稳光学平台的短距离激光干涉测距验证系统^[14], 实现了激光源噪声抑制和采样钟噪声的算法验证。Grüning 等^[15-16]和 Cruz 等^[17]分别开发了小型的桌面电光验证系统, 利用电

学延迟模块和声光移频器模拟引力波探测卫星编队中的大范围光学传播时延和星间多普勒频移, 验证了相位计与探测器等硬件部分和 TDI 算法的可靠性。未来激光干涉测距小型验证系统的发展将融合上述两类工作的特点, 即系统处于真空环境下, 光学平台噪声极低, 光学平台虽然距离较近但具备模拟实际星间距离与动态的能力。同时, 还将增强相位计采样抖动抑制能力, 增加星间绝对距离测量与通信等附加功能。为了建立激光干涉测距仪关键技术指标的地面验证工具, 本研究团队搭建了一套基于锁相转发式的高精度小型化激光外差干涉装置, 典型频点处的噪声谱密度达到了亚纳米级, 并验证了数据后处理抑制锁相转发噪声的方法, 为后续建立多功能地面验证系统打下了良好的基础。与前述工作相比, 本文介绍的验证系统主要是测试双星编队下的激光干涉测距系统的关键技术指标, 具备较低的背景噪声和较高的通用性, 能够方便、灵活地测试评估探测器、相位计与光学平台等关键组件的性能。

图 1 所示是搭建的基于锁相应答机制的小型化激光干涉测距验证系统, 采用两台 kHz 窄线宽 1064 nm 固体激光器, 其中一台激光器通过伺服控制器外差锁相跟踪另一台激光器。超稳晶振 (USO) 提供 10 MHz 的外差频率源。PD1 对应主星探测器,

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2021-12-21; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(11803023)、中国航天科技集团公司自主研发项目、173 计划重点项目

通信作者: *yaoxin_thu@163.com

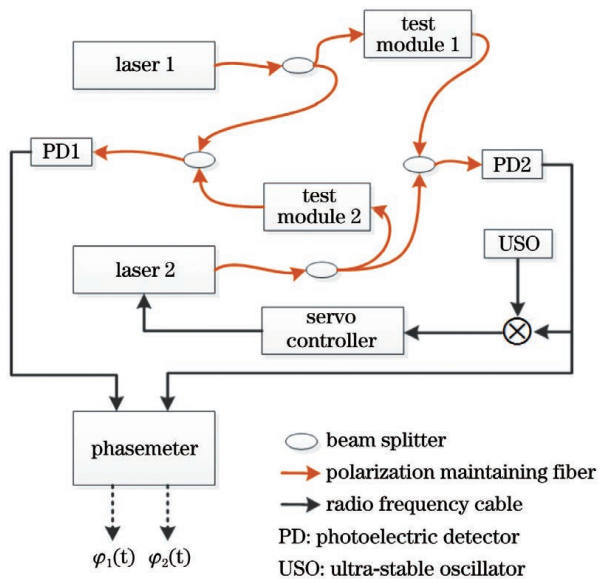


图 1 小型化激光干涉测距验证系统

Fig. 1 Miniaturized demonstration system for laser interferometric ranging

PD2 对应从星探测器, 两路探测器输出激光拍频信号, 经 58 MHz 采样率的模数转换器后进入多通道数字相位计。相位计经过开环捕获与闭环跟踪, 输出两路测相值 $\varphi_1(t)$ 与 $\varphi_2(t)$, 分别对应锁相转发体制下的主星测相值和从星测相值。闭环相位跟踪采取变带宽模式, 逐步将滤波器噪声带宽收敛到 1 Hz。

在该小型化验证系统中, 可在图 1 所示的测试模块 1 和 2 处插入由衰减器和移频器组成的星间链路模拟器, 用于评估探测器与相位计在较远星间距离和较大动态情况下的工作性能。另外, 测试模块可接入超稳光学平台, 用于评估光学平台的附加相位噪声, 并测试随温度变化的漂移曲线。通过增加一套激光器实现空间引力波探测三星编队干涉测距

的模拟, 用于验证 TDI 数据后处理算法。因此, 该小型化验证系统能够成为测试评估激光干涉测距系统多项关键技术指标的通用化工作平台。

图 2(a)、(b) 所示为无测试模块时的从星测相噪声和系统测距噪声。从星测相噪声在 0.1 Hz 处为 2.5×10^{-4} cycle/Hz^{1/2}, 系统测距噪声为 0.17 nm/Hz^{1/2}。其中, 系统测距噪声是由主星测相噪声乘以 1064 nm 波长得到的。考虑到锁相应答机制下的激光干涉测距系统由主、从星之间的往返链路构成, 因此将测量结果除以 2 以表征单程的测距噪声。在无测试模块的情况下, 系统测距噪声为该小型化验证系统的本底噪声, 远低于下一代重力场卫星 80 nm/Hz^{1/2} 的系统测距噪声要求^[6], 能够对研制的超稳光学平台等测试模块进行噪声评估。在该系统中, 按系统误差和随机误差区分测距噪声。系统误差由激光源频率噪声、外差锁相频率源即 USO 噪声以及光纤相位噪声构成。随机误差由从星锁相噪声、相位计模数转换器(ADC)孔径抖动噪声以及数字锁相环热噪声构成。在系统误差中, 由于小型化系统链路的时延约为 10 ns, kHz 线宽激光器的相位噪声对测距噪声的贡献不超过 1 pm/Hz^{1/2}, 因此激光源频率噪声可以忽略不计。同时, 外差频率源与系统采样钟同源, 因此 USO 噪声忽略不计。另外, 实验平台为光学隔振平台, 位于恒温恒湿光学实验室中, 因此保偏光纤的相位噪声可忽略不计。在随机误差中, 从星锁相噪声和孔径抖动噪声占据主导。锁相噪声可通过数据后处理方式进行抑制, 而对于孔径抖动噪声, 可在后续工作中通过引入导频信号实时测量 ADC 孔径抖动^[18], 从而实现该噪声的抑制。

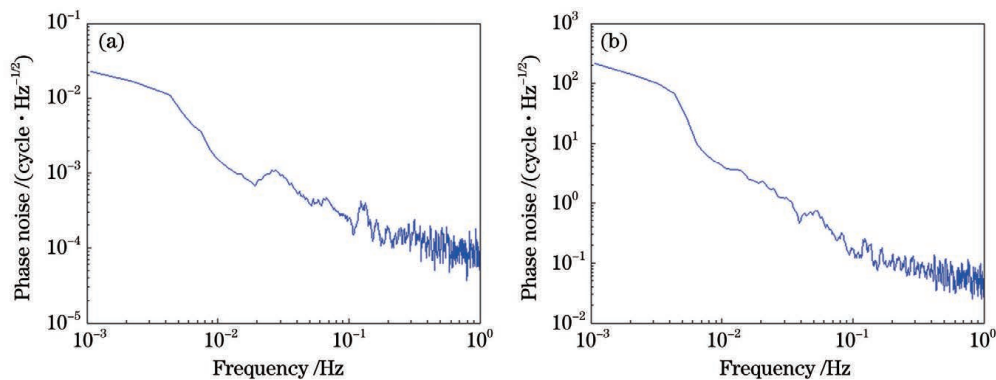


图 2 小型化验证系统的性能表征。(a) 从星测相噪声;(b) 系统测距噪声

Fig. 2 Performance characterization of miniaturized demonstration system. (a) Measured phase noise from slave satellite; (b) ranging noise of system

另一方面,小型化验证系统具备验证基于锁相转发系统的下一代重力场卫星抑制光学锁相噪声的数据处理算法的功能。在多通道数字相位计中,将双星测相值组合,采用类似于双单程测距(DOWR)的数据后处理方式^[19],消除从星锁相噪声。在该算法中,对主星和从星进行光载波相位测量,在 t 时刻主星测相值为 $p_1(t) - p_2(t - \tau)$,从星测相值为 $p_1(t - \tau) - p_2(t)$,其中 p_1 和 p_2 分别为主星和从星的激光相位噪声, τ 为星间链路的单程距离。将从星测相值延迟 τ 并与主星测相值相减,可得 $p_1(t) - p_1(t - 2\tau)$,此时测量值中仅剩余主星的激光相位噪声,而从星的激光相位噪声被消掉了。由于锁相噪声包含在 p_2 项中,因此,DOWR 这种双向对消的方式能够消除从星的锁相噪声。图 3 所示为小型化系统对数据后处理方式的验证,其中实线是测相值组合后的测距噪声,对比未经数据后处理的虚线,测距噪声在 0.1 Hz 处从 0.17 nm/Hz^{1/2} 降低到了 0.11 nm/Hz^{1/2}。DOWR 数据后处理方式实际上与空间引力波探测的 TDI 处理算法在本质上是相同的。后续可增加一台激光器构成环形的锁相转发系统,并引入导频信号抑制 ADC 采样抖动,从而使该系统可测试验证引力波探测三星星座的 TDI 数据处理算法。本文从频谱特性对小型化验证系统的位移测量精度进行了分析,后续研究团队将利用具有亚纳米级分辨率的高精度位移平台,以纳米级步进的方式,进一步验证该系统的测量精度。

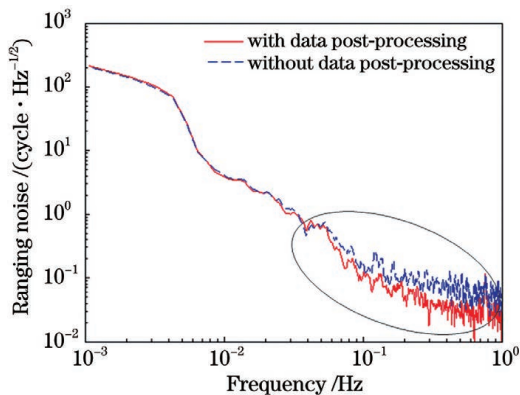


图 3 小型化系统对数据后处理方式的验证
Fig. 3 Demonstration of data post-processing
by miniaturized system

小型化激光干涉测距验证系统的本底噪声较低,在验证系统中接入不同的测试模块后能够测试评估面向下一代地球重力场卫星项目的激光干涉测距系统的多项关键技术指标,包括评估超稳光学平台的噪声性能、测试相位计与探测器的动态适应性、

验证数据后处理抑制光学锁相噪声算法等。同时,后续升级的三星环形锁相转发系统可进一步用于空间引力波探测项目的关键技术验证,如高精度载波相位测量技术和 TDI 数据处理算法等。因此,该小型化验证系统能够成为星间激光干涉测距系统关键技术攻关的通用化测试平台,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势[J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1290-1294.
Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(9): 1290-1294.
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [3] 孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904006.
Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904006.
- [4] 江毅, 张树桓. 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306017.
Jiang Y, Zhang S H. Research progress on fiber optical laser interferometry in signal demodulation of EFPI sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306017.
- [5] 郝义伟, 孔新新, 才啟胜, 等. 环形器噪声对激光干涉测量系统影响分析[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912003.
Hao Y W, Kong X X, Cai Q S, et al. Analysis of effect of circulator noise on laser interferometry system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0912003.
- [6] Abich K, Abramovici A, Ampanan B, et al. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(3): 031101.
- [7] Shaddock D A. An overview of the laser interferometer space antenna[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2009, 26: 128-132.
- [8] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [9] Luo Z R, Wang Y, Wu Y L, et al. The Taiji

- program: a concise overview[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020, 2021(5): 05A108.
- [10] Sanjuan J, Gohlke M, Rasch S, et al. Interspacecraft link simulator for the laser ranging interferometer onboard GRACE Follow-On [J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6682-6689.
- [11] Nicklaus K, Herding M, Baatzsch A, et al. Optical bench of the laser ranging interferometer on grace follow-on [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 1056321.
- [12] Bachman B, de Vine G, Dickson J, et al. Flight phasemeter on the laser ranging interferometer on the GRACE follow-on mission [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 840: 012011.
- [13] Tinto M, Dhurandhar S V. Time-delay interferometry [J]. Living Reviews in Relativity, 2014, 17(1): 6.
- [14] de Vine G, Ware B, McKenzie K, et al. Experimental demonstration of time-delay interferometry for the laser interferometer space antenna [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(21): 211103.
- [15] Grüning P, Halloin H, Prat P, et al. Status of the eLISA on table (LOT) electro-optical simulator for space based, long arms interferometers [J]. Experimental Astronomy, 2015, 39(2): 281-302.
- [16] Laporte M, Halloin H, Bréelle E, et al. Status of the LISA on table experiment: a electro-optical simulator for LISA [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 840: 012014.
- [17] Cruz R J, Thorpe J I, Preston A, et al. The LISA benchtop simulator at the university of Florida [J]. Classical and Quantum Gravity, 2006, 23(19): S751-S760.
- [18] Gerberding O, Diekmann C, Kullmann J, et al. Readout for intersatellite laser interferometry: measuring low frequency phase fluctuations of high-frequency signals with microradian precision [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(7): 074501.
- [19] Francis S P, Shaddock D A, Sutton A J, et al. Tone-assisted time delay interferometry on GRACE Follow-On [J]. Physical Review D, 2015, 92: 012005.

High-Precision Miniaturized Demonstration System for Inter-Satellite Laser Interferometric Ranging

Yao Xin^{*}, Li Jiamin, Wang Guoyong, Zhang Zhongying, Wang Dengfeng
China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, Shaanxi, China

Abstract

Objective A laser ranging interferometer is the core payload of the next-generation twin satellites of the earth gravitational detection and the mission of space-based gravitational wave detection. It is demanding to meet the requirement of the nanometer-level precision in the inter-satellite displacement measurement. For testing the key components and technologies on ground such as the ultra-stable optical bench, the flight phase meter, and the data post-processing algorithm, it is of high value to set up a high-precision miniaturized demonstration system for the development of a laser ranging interferometer.

Methods The demonstration system is a prototype of the laser interferometer based on the phase-locking transponder scheme (Fig. 1). There are two solid-state lasers with the kHz linewidth in the system of polarization maintaining fibers, wherein one laser tracks another one in phase by the servo controller. The offset frequency is 10 MHz from the ultra-stable oscillator. PD1 and PD2 correspond to the detectors in the master satellite and the slave counterpart, respectively. The beating signals from the two detectors are sampled by the rate of 58 MHz and processed in the digital phase-locking loop after the open-loop capture, and the bandwidth of the digital filter is decreased to 1 Hz step by step. The test modules in the system can be the optical benches for evaluating the performance of the benches or the inter-satellite simulators for evaluating the dynamical adaptability of detectors and phase meters.

Results and Discussions The miniaturized laser interferometer is set up based on the phase-locking transponder scheme. The linear spectral density of the measurement noise is $0.17 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ at 0.1 Hz (Fig. 2) without inserting any test module, which is far below the ten-nanometer level of the noise requirement in the next-generation earth

gravitational detection mission. In addition, the feasibility is demonstrated in the approach of data post-processing to suppress the optical phase-locking noise, and hence the system noise is decreased to $0.11 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ (Fig. 3).

Conclusions In this study, the miniaturized demonstration system shows the performance of the low noise background. By inserting specific test modules, it can be utilized to test and evaluate the key technologies towards the next-generation earth gravitational detection mission, such as the noise performance of an ultra-stable optical bench, the dynamical adaptability of the detector and the phase meter, and the data post-processing algorithm for the suppression of the optical phase locking. Therefore, the high-precision miniaturized demonstration system is a powerful tool in the future research of the space-based laser ranging interferometer.

Key words measurement; interferometry; phase measurement; heterodyne