中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

集成高精度光钟的空间引力波天线激光干涉测量系统原理分析

李智祥 杜明辉 徐鹏 罗子人

Principle analysis of laser interferometry systems for space-borne gravitational wave antennas integrating high-precision optical clocks

LI Zhi-xiang, DU Ming-hui, XU Peng, LUO Zi-ren

引用本文:
李智祥, 杜明辉, 徐鹏, 等. 集成高精度光钟的空间引力波天线激光干涉测量系统原理分析[J]. 中国光学, 2026, 19(6): 1−12. doi: 10.3724/CO.2026−0020
LI Zhi-xiang, DU Ming-hui, XU Peng, *et al*. Principle analysis of laser interferometry systems for space-borne gravitational wave antennas integrating high-precision optical clocks[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-12. doi: 10.3724/CO.2026-0020

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026−0020

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

空间引力波探测“太极计划”星间姿态−光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法
Iterative estimation and precision suppression of inter−spacecraft tilt−to−length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 583 https://doi.org/10.37188/CO.2025−0042

空间引力波探测航天器光学测距噪声链路指标优化
Optimization of optical metrology noise link metrics for space−based gravitational wave detection spacecraft
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 568 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0185

引力波探测中激光干涉量子噪声计算
Calculation of laser interferometric quantum noise in gravitational wave detection
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 698 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0180

空间引力波探测前向杂散光测量和抑制
Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection
中国光学（中英文）. 2023, 16(5): 1081 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0251

空间引力波探测中超低附加相噪频综研究
Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 661 https://doi.org/10.37188/CO.2025−0015

基于MHz深度频率调制激光干涉的相位测量技术
Phase measurement technique based on MHz−lever depth frequency modulated laser interferometry
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 622 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0157

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-12

集成高精度光钟的空间引力波天线激光干涉测量系统原理分析

李智祥[1], 杜明辉[2*], 徐 鹏[1,2,3,4], 罗子人[1,2,3]
（1. 国科大杭州高等研究院 基础物理与数学科学学院, 浙江 杭州 310024;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院力学研究所 引力波实验中心, 北京 100190;
4. 兰州大学 兰州理论物理中心, 甘肃 兰州 730000）

摘要: 为了解决毫赫兹频段天基引力波探测中激光频率噪声和时钟噪声的抑制难题, 并克服传统基于第二代时间延迟干涉 (Time-Delay Interferometry, TDI) 方案的复杂性与局限性, 本研究提出了一种基于空间光钟 (Space-borne Optical Clock, SOC) 的探测器载荷设计与噪声抑制新方案。本文首先阐述了该方案的核心载荷设计, 即在每颗航天器上配置星载光钟系统以替代传统的超稳晶振 (Ultra-Stable Oscillator, USO)。接着, 介绍了两种噪声同步抑制的实现机制, 即通过将激光锁定在原子跃迁频率上, 并利用光学频率梳将光钟频率下变频产生微波时钟信号。最后, 基于最新研究中星载光钟的稳定度, 采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 在 0.1 mHz 到 1 Hz 的目标频段内对系统的噪声抑制性能进行了验证。理论与仿真结果表明: 该方案在毫赫兹频段内将激光频率噪声和时钟噪声分别降低了两个和三个数量级; 在全目标频段内, 残余的激光和时钟噪声均远低于探测任务要求的本底噪声水平。此外, 该设计使得第一代 TDI 技术即可满足任务要求, 且无需加入额外的时钟噪声消除步骤。该方案在保证探测灵敏度的同时, 显著提高了数据处理的简洁性与鲁棒性, 并有效降低了对星间测距和时钟同步的精度要求。随着光钟小型化的发展, 该方案在天基引力波探测任务中具有重要的应用前景。

关 键 词: 天基引力波探测; 空间光钟; 时间延迟干涉; 噪声抑制
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0020 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0020

收稿日期: 2026-02-21; **修订日期:** 2026-03-27
基金项目: 国家重点研发计划（No. 2020YFC2200100, No. 2021YFC2201901, No. 2021YFC2201903）
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFC2200100, No. 2021YFC2201901, No. 2021YFC2201903)

Principle analysis of laser interferometry systems for space-borne gravitational wave antennas integrating high-precision optical clocks

LI Zhi-xiang[1], DU Ming-hui[2*], XU Peng[1,2,3,4], LUO Zi-ren[1,2,3]

（1. *School of Fundamental Physics and Mathematical Science*, *Hangzhou Institute for Advanced Study*, *UCAS*, *Hangzhou* 310024, *China*;

2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;

3. *Center for Gravitational Wave Experiment*, *Institute of Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190;

4. *Lanzhou Center for Theoretical Physics*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *China*）

* *Corresponding author*, *E-mail*: *duminghui@imech.ac.cn*

Abstract: To overcome the formidable challenges of suppressing laser frequency noise and clock noise in millihertz-band space-borne gravitational wave detection, as well as the inherent complexity and limitations of conventional second-generation Time-Delay Interferometry (TDI) schemes, we propose an innovative payload architecture and noise suppression strategy based on Space-borne Optical Clocks (SOCs). We first detail the core payload design, which replaces the traditional Ultra-Stable Oscillator (USO) on each spacecraft with an advanced SOC system. Subsequently, we introduce two synergistic noise suppression mechanisms: locking the laser strictly to atomic transition frequencies, and employing optical frequency combs (OFCs) to down-convert the optical clock frequency into a highly stable microwave clock signal. Drawing upon the stability parameters of state-of-the-art SOCs, the system's noise suppression performance across the target frequency band of 0.1 mHz to 1 Hz is comprehensively verified through both theoretical analysis and numerical simulations. The results demonstrate that the proposed scheme suppresses laser frequency noise and clock noise by two and three orders of magnitude in the millihertz band, respectively, ensuring that the residual noises remain well below the stringent noise floor required for the mission. Remarkably, this architecture enables the first-generation TDI technology to fully satisfy the mission requirements, thereby eliminating the need for additional complex clock-noise-removal algorithms. Consequently, while preserving high detection sensitivity, this scheme drastically enhances the simplicity and robustness of the data processing pipeline, and significantly relaxes the rigorous precision constraints typically imposed on inter-spacecraft ranging and clock synchronization. As SOC technology continues toward miniaturization, the proposed framework exhibits substantial application potential for future space-borne gravitational wave observatories.

Key words: space-based gravitational wave detection; space optical clock; time-delay interferometry (TDI); noise suppression

1 引 言

面向 0.1 mHz 至 1 Hz 频段的低频引力波探测是当前空间科学与天文学领域的前沿热点。包括欧洲的 LISA[1-4] 以及我国的“天琴”[5]、“太极”[6] 在内的未来天基引力波探测任务，均采用三颗卫星构成的十万或百万公里级臂长的近等边三角形星座并通过激光干涉技术测量引力波导致的微弱星间距离变化。星间激光干涉测量的精度面临两大核心噪声源的制约：激光频率噪声和时钟噪声。具体而言，LISA 与太极计划采用 1 064 nm 激光器，载波激光的中心频率约为2.816×10^{14} Hz，而经预稳频后其频率噪声约为30 Hz/$\sqrt{\text{Hz}}$ [7-8]，这

比O(10^{-21})量级的相对频率波动探测目标高出约8个数量级[9]。其中的 10^{-21} 对应于毫赫兹频段目标引力波信号(如银河系致密双星绕转、极端质量比旋近系统等)典型强度。近年来, 国内学者在面向太极计划等空间引力波探测任务的噪声抑制关键技术上取得了丰硕成果, 例如在星间姿态-光程耦合噪声的高精度抑制[10], 以及超低附加相噪微波频率综合器的研制等领域均取得了重要突破[11]。此外, 由于轨道动力学效应, 干涉仪臂长存在约 1% 的差异, 因而无法通过传统的迈克尔逊干涉仪精确消除激光频率噪声。此外, 作为相位参考的星载超稳晶振 (Ultra-Stable Oscillator, USO), 阿伦偏差 $\sigma \approx 10^{-13}@1\ \mathrm{s}$[11], 其引入的时钟噪声也高出探测需求 2 ~ 3 个数量级[13-14]。因此, 激光频率噪声和时钟噪声的有效抑制, 是实现空间引力波探测科学目标的关键前提。

目前, 主流方案主要依赖时间延迟干涉(Time-Delay Interferometry, TDI)算法在数据处理阶段抑制上述噪声[15-18]。第一代 TDI 适用于臂长固定的探测器星座模型, 而第二代 TDI 则针对臂长随时间变化的实际探测场景进行了优化, 能够有效消除由航天器相对运动带来的不等臂干涉影响[19]。对于时钟噪声, 则通过边带调制技术和 TDI 时钟噪声校正算法实现有效抑制[20]。尽管学者们提出了基于光学频率梳 (Optical Frequency Comb, OFC) 的 TDI 方案[21-24], 且部分地面 TDI 验证实验已取得进展[25-28], 但基于十万至百万公里长基线激光干涉的 TDI 技术仍缺乏直接的在轨实验验证。更重要的是, 过度依赖第二代 TDI 算法存在潜在的工程与数据处理隐患: (1) 计算成本高昂: 第二代 TDI 复杂的数据组合增加了波形模板计算的负荷, 这在涉及数百万次迭代的引力波源参数估计中尤为突出; (2) 频域奇点问题: 相较于第一代 TDI, 第二代 TDI 在频域的高频部分引入了更多的“零点”, 极易在数据分析中引发奇点问题[29]; (3) 数据连续性风险: 更长的虚拟光程导致在数据间断附近的数据丢失率增加[30-31]; (4) 预处理精度要求高: TDI 的实施高度依赖于对星间距离、时钟偏差的精确测定[32]。

鉴于上述局限性, 从硬件源头寻求噪声抑制方案成为新的突破方向。近年来, 空间光学时钟(Space-borne Optical Clock, SOC)技术取得了里程碑式进展。2018 年, 欧盟 SOC 合作组实现了体积仅为 60 cm × 163 cm × 99 cm的可移动锶光钟, 阿伦偏差稳定度达到$4.1\times10^{-16}/\sqrt{\tau}$[33]。我国在此领域也处于国际前列: 国家授时中心已研制出满足空间站应用要求的锶光钟(稳定度为$3.6\times10^{-15}/\sqrt{\tau}$)[34-35]; 中国科学技术大学团队近期实现的锶光钟在10^4秒积分时间内稳定度优于5×10^{-18}, 并正致力于卫星搭载验证[36]。虽然已有文献提出利用 SOC 直接测量激光多普勒频移效应的引力波探测方案, 但这类方案往往要求光钟稳定度达到极高的10^{-21}水平, 短期内难以工程化[37-38]。

本文提出了一种集成空间光钟的新型空间引力波探测载荷架构。与传统方案不同, 本方案利用近年相关文献研究成果指标下的 SOC 实现两大功能: (1) 激光源头稳频: 通过将激光锁定于原子跃迁谱线, 直接压低激光频率噪声, 使得结构简单的第一代 TDI 即可满足任务要求; (2) 微波时钟信号生成: 利用光学频率梳 (Optical Frequency Comb, OFC) 将稳定后的激光从光频下变频至微波波段, 生成高稳定性的时钟信号, 不再需要额外的边带调制时钟校正算法。理论分析与数值模拟表明, 该方案仅需 $10^{-15}\ \mathrm{Hz}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$(对应阿伦偏差$10^{-15}/\sqrt{\tau}$)水平的光钟稳定性即可显著降低数据处理复杂度, 提升探测任务的鲁棒性。

2　传统的载荷设计与数据处理

2.1　星间激光干涉链路模型与信号定义

在类 LISA 引力波探测任务的经典设计中, 星座由 3 个航天器($S/C_i, i=1,2,3$)构成近似正三角形编队, 干涉链路的几何定义如图 1 所示。为了描述激光在长达数百万公里的臂长L_i上的传播延迟效应, 引入延迟算子符$\mathcal{D}_i$, 其作用于任意时域信号 $F(t)$定义如下:

$$\begin{aligned}&\mathcal{D}_iF(t)\equiv F(t)_{;i}=F\left(t-\frac{L_i(t)}{\mathrm{c}}\right)\\&\mathcal{D}_i\mathcal{D}_jF(t)\equiv F(t)_{;ji}=\mathcal{D}_iF\left(t-\frac{L_j(t)}{\mathrm{c}}\right)=\\&\qquad F\left(t-\frac{L_i(t)}{\mathrm{c}}-\frac{L_j(t-L_i(t)/\mathrm{c})}{\mathrm{c}}\right),\end{aligned}\quad(1)$$

式中 c 表示光速。

每个航天器搭载两个光学平台, 分别负责与相邻航天器收发激光。每个光学平台需完成 4 组

关键的相位读出，以提取引力波信号并分离系统噪声。(1) 星间科学干涉 (s_i^{c})：测量远端入射激光与本地激光的拍频，包含引力波信号及首要的激光频率噪声。(2) 测试质量干涉 (ε_i)：监测测试质量相对于光学平台的微小位移，用于扣除光学平台在敏感轴向的抖动噪声。(3) 参考干涉 (τ_i)：测量同一航天器内两个光学平台激光的相位差。(4) 时钟边带干涉 (s_i^{sb})：通过电光调制将时钟信号加载至激光载波，利用边带拍频实现星间时钟噪声的传递与比对。

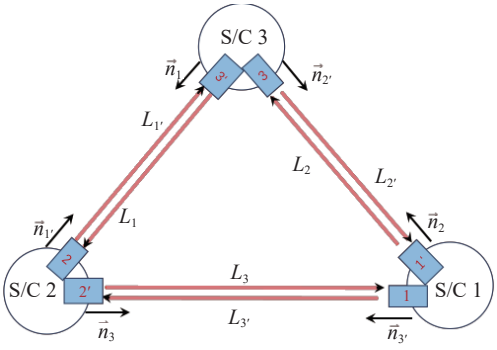


图 1 类 LISA 任务的星座构型与光路示意图

Fig. 1 Constellation configuration and optical paths schematic diagram of the LISA-like detector

基于图 2 所示的光学平台架构，以航天器 1 为例，其相位测量模型可由式 (2) ~ 式 (3) 描述。这些原始数据流中包含了激光频率噪声 p_i、时钟噪声 q_i 以及光学平台位移噪声，其幅度远超引力波信号，必须通过后续算法消除[39]。

$$
\begin{aligned}
&s_1^{\mathrm{c}} = H_1 + \mathcal{D}_3 p_{2'} - p_1 + 2\pi\nu_{2'}\left(\vec{n}_3\cdot\mathcal{D}_3\vec{\Delta}_{2'} + \vec{n}_{3'}\cdot\vec{\Delta}_1\right) + \\
&N_1 - a_1 q_1, \\
&s_1^{\mathrm{sb}} = H_1 + \mathcal{D}_3 p_{2'} - p_1 + 2\pi\nu_{2'}\left(\vec{n}_3\cdot\mathcal{D}_3\vec{\Delta}_{2'} + \vec{n}_{3'}\cdot\vec{\Delta}_1\right) + \\
&N_1 + m_{2'}\mathcal{D}_3 q_2 - m_1 q_1 - c_1 q_1, \\
&\varepsilon_1 = p_{1'} - p_1 - 4\pi\nu_{1'}\left(\vec{n}_{3'}\cdot\vec{\delta}_1 - \vec{n}_{3'}\cdot\vec{\Delta}_1\right) + \mu_{1'} - b_1 q_1, \\
&\tau_1 = p_{1'} - p_1 + \mu_{1'} - b_1 q_1 \quad ,
\end{aligned}
\tag{2}
$$

$$
\begin{aligned}
&s_{1'}^{\mathrm{c}} = H_{1'} + \mathcal{D}_{2'} p_3 - p_{1'} + 2\pi\nu_3\left(\vec{n}_2\cdot\vec{\Delta}_{1'} + \vec{n}_{2'}\cdot\mathcal{D}_{2'}\vec{\Delta}_3\right) + \\
&N_{1'} - a_{1'} q_1, \\
&s_{1'}^{\mathrm{sb}} = H_{1'} + \mathcal{D}_{2'} p_3 - p_{1'} + 2\pi\nu_3\left(\vec{n}_2\cdot\vec{\Delta}_{1'} + \vec{n}_{2'}\cdot\mathcal{D}_{2'}\vec{\Delta}_3\right) + \\
&N_{1'} + m_3\mathcal{D}_{2'} q_3 - m_{1'} q_1 - c_{1'} q_1, \\
&\varepsilon_{1'} = p_1 - p_{1'} - 4\pi\nu_1\left(\vec{n}_2\cdot\vec{\delta}_{1'} - \vec{n}_{2'}\cdot\vec{\Delta}_{1'}\right) + \mu_{1'} - b_{1'} q_1, \\
&\tau_{1'} = p_1 - p_{1'} + \mu_1 - b_{1'} q_1 \quad ,
\end{aligned}
\tag{3}
$$

其中各项物理参量的定义如下：H_i 与 $H_{i'}$ 代表待探测的引力波信号响应；p_i 和 $p_{i'}$ 为激光频率噪声；矢量 $\vec{\Delta}_i$，$\vec{\Delta}_{i'}$ 与 $\vec{\delta}_i$，$\vec{\delta}_{i'}$ 别对应光学平台的位移噪声与测试质量的位移噪声；N_i，$N_{i'}$ 表示干涉仪的测量读出噪声；μ_i，$\mu_{i'}$ 为光纤传输引入的附加噪声；q_i 为时钟噪声；m 为定义调制频率的整数因子；ν 为激光中心频率。此外，系数 a, b, c（及其带撇对应项）构成了从时钟噪声耦合至干涉仪读出的转换因子。

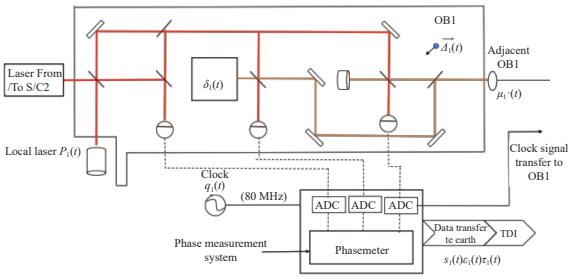


图 2 类 LISA 任务的传统光学平台设计图

Fig. 2 Conventional optical bench architecture for LISA-like missions

2.2 时间延迟干涉技术与噪声抑制

为了提取微弱的引力波信号，有效抑制激光频率噪声、时钟噪声、光学平台位移噪声等首要噪声，传统的 TDI 处理流程主要分为三个层级。

(1) 构建测试质量-测试质量干涉数据流：首先，通过组合科学干涉、测试质量干涉和参考干涉信号，构建“星间测试质量对测试质量”的中间变量 η_i（见式 (4)）。这一步骤的核心目的是消除光学平台自身的位移噪声 $\vec{\Delta}$，将物理测量基准从光学平台转移至惯性测试质量。

$$
\begin{aligned}
&\eta_i \equiv s_i^{\mathrm{c}} - \frac{\nu_{(i+1)'}}{\nu_{i'}}\frac{\varepsilon_i - \tau_i}{2} - \frac{\nu_{(i+1)'}}{\nu_{i+1}}\mathcal{D}_{i-1}\frac{\varepsilon_{(i+1)'} - \tau_{(i+1)'}}{2} - \mathcal{D}_{i-1}\frac{\tau_{i+1} - \tau_{(i+1)'}}{2} = \\
&\quad H_i + \mathcal{D}_{i-1} p_{i+1} - p_i + 2\pi\nu_{(i+1)'}\vec{n}_{i-1}\cdot\left[\mathcal{D}_{i-1}\vec{\delta}_{(i+1)'} - \vec{\delta}_i\right] + N_i + b_{i+1}\mathcal{D}_{i-1} q_{i+1} - a_i q_i, \\
&\eta_{i'} \equiv s_{i'}^{\mathrm{c}} - \frac{\nu_{i-1}}{\nu_i}\frac{\varepsilon_{i'} - \tau_{i'}}{2} - \frac{\nu_{i-1}}{\nu_{(i-1)'}}\mathcal{D}_{(i+1)'}\frac{\varepsilon_{i-1} - \tau_{i-1}}{2} + \frac{\tau_i - \tau_{i'}}{2} = \\
&\quad H_{i'} + \mathcal{D}_{(i+1)'} p_{i-1} - p_i + 2\pi\nu_{i-1}\vec{n}_{i+1}\cdot\left[\vec{\delta}_{i'} - \mathcal{D}_{(i+1)'}\vec{\delta}_{i-1}\right] + N_{i'} + (b_{i'} - a_{i'}) q_i \quad .
\end{aligned}
\tag{4}
$$

(2)激光频率噪声抑制: TDI 利用延迟算符构造虚拟的等臂干涉仪。通过对η_i进行特定的时间平移与线性组合(如式 (5) 所示), 使得沿不同路径传播的激光噪声在时间上精确抵消。对于臂长变化的实际探测场景, 通常需要采用包含更多延迟项的第二代 TDI 组合(如 Michelson-X 组合)才能满足噪声抑制需求。任意 TDI 方案均可统一写成以下表达式:

$$\mathrm{TDI}=\sum_{i=1}^{3}\left(\mathcal{P}_i\eta_i+\mathcal{P}_{i'}\eta_{i'}\right)=H+N_{\mathrm{other}}\quad , \qquad (5)$$

式中: $\mathcal{P}_i$与$\mathcal{P}_{i'}$为基于时间延迟算符$\mathcal{D}$构建的多项式函数, 它们决定了各路信号的时间平移与叠加方式; H为保留的引力波信号; N_{other}囊括了除激光频率噪声外的所有剩余噪声项(如读出噪声、加速度噪声等)。公式 (5) 的第二个等号隐含了 TDI 组合必须满足的代数约束条件, 即通过合理设计多项式系数$\mathcal{P}$, 使得激光噪声项在合成数据流中恒等于零[40-41]。

(3)时钟噪声校正: 在传统方案中, 时钟噪声q_i直接影响相位计的数据读出。利用载波信号s_i^{c}与边带信号s_i^{sb}的差分组合(定义为变量r_i与$r_{i'}$, 见式 (6)), 可以提取出独立的时钟噪声项。

$$r_i\equiv\frac{s_i^{\mathrm{c}}-s_i^{\mathrm{sb}}}{m_{(i+1)'}},\quad r_{i'}\equiv\frac{s_{i'}^{\mathrm{c}}-s_{i'}^{\mathrm{sb}}}{m_{i-1}}. \qquad (6)$$

通过代数运算, 该差分变量与时钟噪声q_i的显式关系可表示为:

$$r_i=q_i-\mathcal{D}_{i-1}q_{i+1},\quad r_{i'}=q_i-\mathcal{D}_{(i+1)'}q_{i-1}\quad . \qquad (7)$$

式 (7) 揭示了r_i和$r_{i'}$实质上提供了对本地时钟与远端时钟相位差的独立测量。值得注意的是, 式 (7) 中时钟噪声的传播形式与式 (4) 中激光频率噪声的传播形式具有相同的特性。这意味着, 针对激光频率噪声设计的时间延迟干涉组合算法, 在经过适当的系数调整后, 同样适用于消除时钟噪声。

3　集成 SOC 的干涉测量系统设计与数据处理优化

3.1　激光稳频

本研究提出的集成星载光钟的载荷设计如图 3 所示。激光器的频率稳定性由 SOC 提供。该系统的核心在于利用高 Q 值的原子跃迁谱线作为鉴频参考, 将激光器的频率锁定在原子跃迁频率, 对激光频率噪声进行主动抑制。

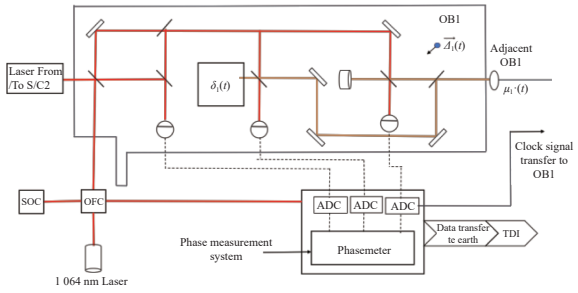


图 3　集成 SOC 系统的升级光学平台设计图

Fig. 3　Upgraded optical bench architecture integrating the SOC system

频率锁定过程采用时间交替的探询策略以构建误差信号[42-46]。控制探测激光频率f在原子共振峰两侧进行交替失谐调制, 即分别探测$f_+=f+\delta_m$与$f_-=f-\delta_m$处的原子激发率。最佳失谐量δ_m通常取为原子共振线宽的一半, 以获得最大的鉴频斜率。若记录到的激发率分别为P_+与P_-, 则经过平均后的误差信号e可由下式解算:

$$e=\delta_m\frac{P_+-P_-}{z}\quad . \qquad (8)$$

该误差量通过积分反馈回路作用于激光器, 即在下一周期施加频率修正, 如式 (9) 所示:

$$f\rightarrow f+g\cdot e\quad , \qquad (9)$$

其中g为伺服增益。

通过这种闭环控制, 激光器的频率稳定性将逼近原子跃迁的本征极限。光钟的性能主要受限于 Dick 效应(由探测死区时间的噪声混叠引起)及参考腔热噪声[47]。根据目前相关文献研究进展, 空间光钟的 Allan 偏差通常为$10^{-15}/\sqrt{\tau}$至$10^{-16}/\sqrt{\tau}$量级, 这比传统方案中的 USO 高出 2 ~ 3 个量级[48]。

3.2　时钟信号生成

OFC 在本方案中充当了连接光学频段与微波频段的精密分频器。通过飞秒锁模激光器, OFC 产生一系列在频域上等间距分布的梳齿, 其频率满足以下关系[49-52]:

$$f_n=f_{\mathrm{ceo}}+n\cdot f_{\mathrm{rep}}\quad . \qquad (10)$$

在实际应用中，可以将载波包络偏移频率f_{ceo}通过$f-2f$干涉仪锁定至射频参考保持固定[53]，而特定的梳齿f_n则精确锁定至上述 SOC 稳频后的钟激光，随后，该锁定的重复频率f_{rep}即直接作为高稳定性的微波时钟信号输出。假设所采用的光频梳稳定度为$10^{-18}/\sqrt{\tau}$，由于已有文献通过实验证明，在该指标下，光学-微波下转换过程中的附加噪声在毫赫兹频段可忽略不计[54]，微波时钟的相位噪声q_i与光钟激光相位噪声p_i^{SOC}之间满足严格的比例传递关系：

$$q_i=\frac{f_{q,i}}{\nu_i^{\mathrm{SOC}}}p_i^{\mathrm{SOC}}\quad . \tag{11}$$

此外，针对空间引力波探测的科学干涉激光（如 1064 nm）与光钟的钟激光（如 698 nm）波长不一致的情况，OFC 同样可以作为频率传递的桥梁。通过将科学激光拍频锁定至对应的梳齿，光钟的超稳特性可“复制”至科学干涉激光，其相位噪声p_i与p_i^{SOC}满足如下线性关系：

$$p_i=\frac{\nu_i}{\nu_i^{\mathrm{SOC}}}p_i^{\mathrm{SOC}}\quad . \tag{12}$$

3.3 TDI 数据处理优化

新型载荷设计通过引入 SOC 和 OFC，实质上改变了干涉测量方程中噪声的耦合传递方式。将经过 SOC 稳频后的激光噪声与微波时钟噪声（式 (11) 与式 (12)）代入原始测量方程（式 (4)），得到了新设计下的变量η_i^{SOC}：

$$\begin{aligned}\eta_i^{\mathrm{SOC}}&=H_i+K_{i+1}\mathcal{D}_{i-1}p_{i+1}^{\mathrm{SOC}}-K_ip_i^{\mathrm{SOC}}+2\pi\nu_{(i+1)'}\overrightarrow{n_{i-1}}\cdot\left[\mathcal{D}_{i-1}\overrightarrow{\delta_{(i+1)'}}-\overrightarrow{\delta_i}\right]+N_i+G_{i+1}b_{i+1}\mathcal{D}_{i-1}p_{i+1}^{\mathrm{SOC}}-G_ia_ip_i^{\mathrm{SOC}},\\ \eta_{i'}^{\mathrm{SOC}}&=H_{i'}+K_{i-1}\mathcal{D}_{(i+1)'}p_{i-1}^{\mathrm{SOC}}-K_ip_i^{\mathrm{SOC}}+2\pi\nu_{i-1}\overrightarrow{n_{i+1}}\cdot\left[\overrightarrow{\delta_{i'}}-\mathcal{D}_{(i+1)'}\overrightarrow{\delta_{i-1}}\right]+N_{i'}+G_i(b_{i'}-a_{i'})p_i^{\mathrm{SOC}}\quad .\end{aligned} \tag{13}$$

在式（13）中，定义两个关无量纲比例因子：$K_i\equiv\nu_i/\nu_i^{\mathrm{SOC}}$表征干涉激光与钟激光的频率比而$G_i\equiv f_{q,i}/\nu_i^{\mathrm{SOC}}$则表征微波时钟频率与光钟频率之比。本文方案是通过变换$p_i\to K_ip_i^{\mathrm{SOC}}$和$q_i\to G_ip_i^{\mathrm{SOC}}$来显著抑制激光噪声$p_i$和时钟噪声$q_i$。

在新的设计方案下，激光噪声与时钟噪声被归为同一物理源（即光钟基准），两类关键噪声被同步抑制。仅利用第一代 Michelson-X 组合（式 14）对数据流进行处理，表达式如下：

$$X=\left(\mathcal{D}_{2'}\mathcal{D}_2\mathcal{D}_3\eta_{2'}^{\mathrm{SOC}}+\mathcal{D}_{2'}\mathcal{D}_2\eta_1^{\mathrm{SOC}}+\mathcal{D}_{2'}\eta_3^{\mathrm{SOC}}+\eta_{1'}^{\mathrm{SOC}}\right)-\left(\mathcal{D}_3\mathcal{D}_{3'}\mathcal{D}_{2'}\eta_3^{\mathrm{SOC}}+\mathcal{D}_3\mathcal{D}_{3'}\eta_{1'}^{\mathrm{SOC}}+\mathcal{D}_3\eta_{2'}^{\mathrm{SOC}}+\eta_1^{\mathrm{SOC}}\right). \tag{14}$$

求得其最终的残余噪声功率谱密度（Power Spectral Density, PSD）$S_X(f)$可表示为：

$$\begin{aligned}S_X(f)=&16u^2\left(\frac{\dot{L}_2-\dot{L}_3}{c}\right)^2S_{\mathrm{SOC}}(f)+4\sin^2u\left[(a_1-a_{1'})^2+a_{2'}^2+a_3^2+4b_{1'}(a_1-a_{1'}+b_{1'})\sin^2u\right]\frac{G^2}{K^2}S_{\mathrm{SOC}}(f)-\\ &8u\left(\frac{\dot{L}_2-\dot{L}_3}{c}\right)[\cos4u(b_{1'}-a_{1'}+a_1)+\cos2u(-2b_{1'}+a_{1'}-a_1)+b_{1'}]\frac{G}{K}S_{\mathrm{SOC}}(f)+\\ &\left(8\sin^22u+32\sin^2u\right)\frac{S_{\mathrm{ACC}}(f)}{(2\pi fc)^2}+16\sin^2u\frac{(2\pi f)^2S_{RO}(f)}{c^2}\quad ,\end{aligned} \tag{15}$$

式中：S_{SOC}(f)项即代表 SOC 自身的相位噪声本底功率谱；残余噪声包含 5 部分，分别对应激光频率噪声、时钟噪声、激光-时钟噪声耦合项、加速度噪声和读出噪声在第一代 Michelson 组合 X 后的残余量。其中，与激光频率噪声、时钟噪声等“首要”噪声相比，后两者被称为“次级”噪声，构成了空间引力波探测器的本底噪声。对首要噪声的抑制要求是其残余噪声应低于本底噪声水平，以满足空间引力波探测的灵敏度需求。

通过对上述数据预处理过程进行数值仿真分析发现，由于光钟的稳定性极高，所以其 PSD $S_{\mathrm{SOC}}(f)$极低，最终即便仅使用第一代 TDI，其中残余激光频率噪声项和时钟噪声项也远低于由加速度噪声和读出噪声构成的次级噪声残余项。

3.4 稳定性分析

在复杂的空间环境中，“激光器-光频梳-光钟”多级锁定方案的长期锁定稳定性是保障本方案可行性的关键。空间引力波探测任务对卫星平台提出了极高的控制要求，包括敏感轴 nm 级位置抖动、nrad 级姿态控制与 μK 级温度稳定性[55]，

这为基于光梳的多级锁定方案提供了良好的运行环境基础。

目前, 依托中国空间站开展的空间冷原子光钟项目, 以及国际上旨在测试空间光梳自主频率校准的 COMPASSO 任务[56], 均旨在实现空间光梳相关技术的在轨验证, 表明光梳和光钟的空间可靠锁定技术正逐步走向成熟。已有研究表明, 在发生瞬时失锁时, 空间光梳可在约 90 s 内自主恢复锁定[57]。由此产生的干涉数据间断, 在后续数据处理阶段可借助贝叶斯数据插补[58]、采用特定的贝叶斯统计量[59]以及先进的人工智能方法[60]进行处理, 以降低其对科学数据分析和引力波探测的影响。而对于在数据处理中重构 TDI 组合的环节, 以常用的 Michelson TDI 方案和太极任务的 300 万公里臂长为例, 硬件恢复锁定后, 第一代 TDI 组合重新实现的连续有效测量时间为 40 s, 第二代则需 80 s。这也表明第一代 TDI 相比第二代在快速恢复方面具有优势。

此外, 考虑到空间光钟载荷系统复杂度高、在轨连续运行面临完全失锁的风险, 还可以采取一种“光钟+USO”的冗余备份设计理念。在该架构下, 卫星同时搭载 SOC 与传统的 USO。系统将光钟作为主频率基准, 优先采用本方案提出的硬件稳频加第一代 TDI 的处理路径。一旦监测到光钟信号异常或失锁, 载荷系统可实时切换至备用 USO 提供的频率参考, 此时数据处理策略将从第一代 TDI 模式平滑降级为传统的第二代 TDI 算法及其配套的边带时钟校正流程。这种多层级的冗余设计确保了即使在高精度载荷失效的极端情况下, 探测器仍能维持基本的探测能力, 提升科学任务的整体可靠性。

4　仿真实验与结果

4.1　仿真参数设置

为了验证含 SOC 载荷架构的可行性, 本文构建了基于“太极计划”任务参数的数值仿真。其核心参数设定如下: 星座臂长标称值 $L = 3\times 10^9$ m, 科学干涉激光中心频率 $\nu_i = 2.816\times 10^{14}$ Hz, 微波时钟频率 $f_{q,i} = 7.5\times 10^7$ Hz。本文采用了来自太极数据挑战的数值模拟轨道数据[61], 其中航天器动力学使用太阳系星历表建模。模拟时长为 5×10^5s, 选取第 200 天作为仿真起点, 干涉读出的采样频率为 4 Hz。在此期间, 基于轨道数据的计算得出 $\dot{L}_2 - \dot{L}_3 \approx 6.220$ m/s。拍频频率系数a_i和b_i由锁相拓扑、频率规划以及航天器相对运动引起的多普勒频移共同决定[62], 由此得到 $a_1 = 0.0798, a_{1'} = -0.108, a_{2'} = -0.148, a_3 = 0.196$ 和 $b_{1'} = -0.228$。

本文对传统测量链路设计和集成 SOC 的设计分别进行模拟。在前者中, 所有仪器噪声均遵循太极任务设计的噪声谱模型。而在后者中, 假设所采用的空间光钟的稳定度为$1\times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$, 转换到对应相对频率噪声的幅度谱密度 (Amplitude Spectral Density, ASD) 为 $\sqrt{2}\times 10^{-15}/\sqrt{\text{Hz}}$, 然后生成 3 个独立光钟噪声时间序列 $p_i^{\text{SOC}}(t)$。之后, 通过公式 (11) 和公式 (12) 给出的关系, 将这些基础噪声项转换到每个航天器的激光频率噪声和微波时钟抖动上。所有其他设置(包括轨道动力学、本底噪声水平、TDI 组合)均保持一致。根据相位测量方程, 合成干涉仪的原始相位读出数据, 最后结合由轨道数据计算出的延迟时间, 构造第一代 TDI-X 组合。

4.2　结果与分析

对生成的两组原始数据进行第一代 TDI (Michelson-X 组合)处理, 得到的残余噪声的 ASD 如图 4 ~ 图 5(彩图见期刊电子版)所示。

在传统设计方案中(如图 4 所示), 受限于动态臂长效应, 仅使用第一代 TDI 无法有效抵消 USO 和激光频率噪声。在 0.1 mHz ~ 0.1 Hz 的关键频段, 残余噪声高出次级噪声约 0.5 ~ 1 个数量级, 其中时钟噪声占主导地位。相反, 在集成 SOC 的设计中(如图 5 所示), 由于载波激光和时钟信号均由 SOC 产生, 具有更高的频率稳定性。以探测频带的下限10^{-4}Hz(即 0.1mHz)频点为例: 如图 4 所示, 在传统架构下仅采用第一代 TDI 时, 受限于 USO 的噪声, 该频点的残余噪声 ASD 高达约$10^{-20}/\sqrt{\text{Hz}}$; 而图 5 展现的集成光钟方案中, 同一频点的残余噪声被有效压制至$10^{-24}/\sqrt{\text{Hz}}$量级以下。这在幅度上实现了 3 ~ 4 个数量级的抑制, 相当于在硬件物理层面直接提供了约 60 dB ~ 80 dB 的噪声抑制裕度。结果显示, 残余激光频率噪声和时钟噪声仅通过第一代 TDI 组合均被压低至次级噪声基准以下。这表明该方案

通过在硬件层面的改进，使得噪声处理仅需要第一代 TDI 即可满足探测任务的要求。

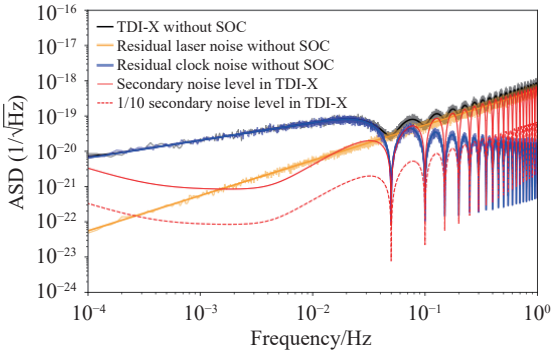


图 4 传统的第一代 TDI(Michelson-X 组合) 数据处理后的残余噪声幅度谱密度图

Fig. 4 ASD of residual noise following conventional first-generation TDI (Michelson-X configuration) processing

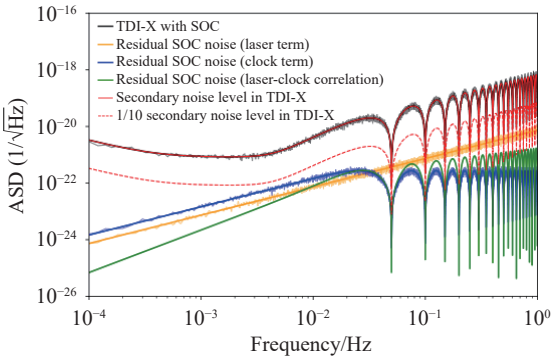


图 5 集成 SOC 的第一代 TDI(Michelson-X 组合) 数据处理后的残余噪声幅度谱密度

Fig. 5 ASD of residual noise following SOC-integrated first-generation TDI (Michelson-X configuration) processing

集成 SOC 的设计放宽了对 TDI 数据处理的要求，有以下几方面的优势：第一，其大大降低了计算复杂度。面对动态臂长的现实场景，仅使用第一代 TDI 即可实现对激光频率噪声和时钟噪声的有效抑制。这消除了对复杂的第二代 TDI 组合和额外时钟噪声校正的需求。所带来的计算效率提升将对依赖于大量模板生成的引力波源参数估计带来极大的好处；第二，增加数据稳定性。与第二代 TDI 组合相比，第一代 TDI 组合在高频处表现出明显更少的“零点”，从而降低了似然函数中出现奇异点的风险，确保了整个数据处理具有更高的数值稳定性；第三，减少数据的丢失。由于计算时刻t的 TDI 数据通常需要几个臂长之前的原始测量值，较短的延迟可以更快地构建有效的 TDI 数据流。因此，与第二代相比，第一代 TDI 较短的光路自然减少了数据丢失；第四，放宽了星间测距和时钟同步的要求。在空间引力波探测中，相对论效应对星载时钟的影响不可忽略。与太阳系质心坐标时（TCB）相比，星载时钟的相对论漂移可达约 0.5 秒/年[63]，该效应与采用的具体时钟类型无关，仅与航天器所处的引力场环境和航天器的运动状态有关。为了将星间时钟同步至空间引力波探测要求的纳秒到 10 纳秒级量级精度[64]，在传统的设计方案中，通常需要利用卡尔曼滤波等算法，通过复杂的数据融合过程集成多种观测量（例如伪随机码、边带、定轨数据）来实现精确校正[65-66]。例如，近期针对太极计划的星间激光通信与测距，研究人员对伪随机码的选取进行了深度优化[67]；同时，为满足皮米级测距精度，空间引力波探测航天器的光学测距噪声链路指标也得到了系统性优化[68]。这些最新研究均体现了在传统架构下实现极高精度星间测距所面临的严苛工程挑战。上述应对引力红移等系统性漂移的校正算法对于本文提出的光钟方案依然适用，而新的硬件设计方案放宽了其精度要求，从而为数据处理误差提供了余量。

5 结 论

本文提出并验证了一种面向空间引力波探测任务的新型载荷架构。该方案通过在卫星平台集成高精度的 SOC 与 OFC，构建了以原子跃迁为参考的频率基准系统。仿真结果表明，利用光钟对激光进行稳频并通过光频梳合成微波时钟信号，可从硬件源头上将毫赫兹频段的激光频率噪声与时钟噪声压低 2 ~ 3 个数量级。

研究证明，在采用光钟载荷后，仅需使用结构简单的第一代 TDI 技术即可满足探测灵敏度需求，无需再引入第二代 TDI 算法或额外的时钟噪声校正步骤。归纳而言，该设计在数据处理与科学产出方面具有显著优势：它大幅降低了数据处理的算力负荷与算法复杂度，提升了数值计算的稳定性，有效缓解了由长延迟导致的数据丢失问题，并显著放宽了系统对星间测距和时间同步的精度要求。

未来，空间光钟方案的工程化应用将取决于相关光学载荷的技术成熟度。后续工作将重点围

绕 SOC 载荷的地面集成测试以及模拟空间环境下的长期稳定性验证展开。随着低温光学腔及微腔光频梳技术的突破, 预计到 2040 年, 光钟稳定性将优于 10^{-19}量级[69]。特别值得关注的是, 我国“极端精密测量”重大科技专项已将研制稳定性达10^{-18}的空间光钟列为核心任务[70]。这一系列技术进展有望使光钟成为未来空间引力波探测的关键技术, 为拓展低频引力波探测的灵敏度极限奠定坚实基础。

参考文献:

[1] DANZMANN K, RÜDIGER A. LISA technology—concept, status, prospects[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20(10): S1-S9.

[2] BARAUSSE E, BERTI E, HERTOG T, *et al*.. Prospects for fundamental physics with LISA[J]. *General Relativity and Gravitation*, 2020, 52(8): 81.

[3] JENNRICH O. *LISA* technology and instrumentation[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(15): 153001.

[4] DANZMANN K. LISA mission overview[J]. *Advances in Space Research*, 2000, 25(6): 1129-1136.

[5] 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.

[6] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.

[7] COLPI M, DANZMANN K, HEWITSON M, *et al*.. LISA definition study report[J]. arXiv preprint arXiv: 2402.07571, 2024.

[8] LUO Z R, GUO Z K, JIN G, *et al*.. A brief analysis to Taiji: science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102918.

[9] OTTO M. *Time-delay interferometry simulations for the laser interferometer space antenna*[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2015.

[10] 叶磊巧, 杜明辉, 徐鹏, 等. 空间引力波探测“太极计划”星间姿态-光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 583-595.
YE L Q, DU M H, XU P, *et al*.. Iterative estimation and precision suppression of inter-spacecraft tilt-to-length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 583-595. (in Chinese).

[11] 王雷刚, 云恩学, 罗鑫, 等. 空间引力波探测中超低附加相噪频综研究[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 661-671.
WANG L G, YUN E X, LUO X, *et al*.. Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 661-671. (in Chinese).

[12] CANDELIER V, CANZIAN P, LAMBOLEY J, *et al*.. Space qualified 5 MHz ultra stable oscillators[C]. *IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003*, IEEE, 2003: 575-582.

[13] TINTO M, HARTWIG O. Time-delay interferometry and clock-noise calibration[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(4): 042003.

[14] HARTWIG O, BAYLE J B. Clock-jitter reduction in LISA time-delay interferometry combinations[J]. *Physical Review D*, 2021, 103(12): 123027.

[15] NI W T, SHY J M, TSENG S M, *et al*.. Progress in mission concept study and laboratory development for the astrodynamical space test of relativity using optical devices (ASTROD)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3116: 105-116.

[16] ARMSTRONG J W, ESTABROOK F B, TINTO M. Time-delay interferometry for space-based gravitational wave searches[J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 527(2): 814-826.

[17] TINTO M, ESTABROOK F B, ARMSTRONG J W. Time-delay interferometry for LISA[J]. *Physical Review D*, 2002, 65(8): 082003.

[18] TINTO M, DHURANDHAR S V. Time-delay interferometry[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2005, 8(1): 4.

[19] TINTO M, DHURANDHAR S, MALAKAR D. Second-generation time-delay interferometry[J]. *Physical Review D*, 2023, 107(8): 082001.

[20] OTTO M, HEINZEL G, DANZMANN K. TDI and clock noise removal for the split interferometry configuration of LISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(20): 205003.

[21] TINTO M, YU N. Time-delay interferometry with optical frequency comb[J]. *Physical Review D*, 2015, 92(4): 042002.

[22] VINCKIER Q, TINTO M, GRUDININ I, *et al*.. Experimental demonstration of time-delay interferometry with optical frequency comb[J]. *Physical Review D*, 2020, 102(6): 062002.

[23] TAN Y J, XU M Y, WANG P P, *et al*.. Modified time-delay interferometry with an optical frequency comb[J]. *Physical Review D*, 2022, 106(4): 044010.

[24] WU H ZH, WANG P P, HAO P, *et al*.. Time delay interferometry using laser frequency comb as the direct signal source[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106938.

[25] 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.

[26] YAMAMOTO K, BYKOV I, REINHARDT J N, *et al*.. Experimental end-to-end demonstration of intersatellite absolute ranging for the Laser Interferometer Space Antenna[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 22(5): 054020.

[27] LI X K, LIU H SH, WU P ZH, *et al*.. Proof-of-principle experimental demonstration of time-delay-interferometry for Chinese space-borne gravitational wave detection missions[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, 34(4): 64.

[28] XU M Y, TAN Y J, LIANG Y R, *et al*.. Experimental demonstration of sub-100 picometer level signal extraction with time-delay interferometry technique[J]. *Results in Physics*, 2024, 56: 107221.

[29] WANG G. Time delay interferometry with minimal null frequencies[J]. *Physical Review D*, 2024, 110(4): 042005.

[30] WANG G. Time delay interferometry with minimal null frequencies and shortened time span[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2026, 69(2): 220411.

[31] CASTELLI E, BAGHI Q, BAKER J G, *et al*.. Extracting gravitational wave signals from LISA data in the presence of artifacts[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, 42(6): 065018.

[32] REINHARDT J N, EURINGER P, HARTWIG O, *et al*.. Time-delay interferometry with onboard optical delays[J]. *Physical Review D*, 2024, 110(8): 082005.

[33] ORIGLIA S, PRAMOD M S, SCHILLER S, *et al*.. Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053443.

[34] WANG Y B, YIN M J, REN J, *et al*.. Strontium optical lattice clock at the National Time Service Center[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 023701.

[35] KONG D H, WANG ZH H, GUO F, *et al*.. A transportable optical lattice clock at the National Time Service Center[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(7): 070602.

[36] LI J, CUI X Y, JIA ZH P, *et al*.. A strontium lattice clock with both stability and uncertainty below 5×10^{-18}[J]. *Metrologia*, 2024, 61(1): 015006.

[37] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGELLIER N, *et al*.. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks[J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.

[38] WANG B, LI B CH, XIAO Q Q, *et al*.. Space-based optical lattice clocks as gravitational wave detectors in search for new physics[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 68(4): 249512.

[39] WANG P P, TAN Y J, QIAN W L, *et al*.. Refined clock-jitter reduction in the Sagnac-type time-delay interferometry combinations[J]. *Physical Review D*, 2021, 104(8): 082002.

[40] WANG G. *Time-delay interferometry for ASTROD-GW*[D]. Nanjing: Purple Mountain Observatory, 2011.

[41] GHOSH S, SANJUAN J, MUELLER G. Arm locking performance with the new LISA design[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(11): 115009.

[42] TAMM C, HUNTEMANN N, LIPPHARDT B, *et al*.. Cs-based optical frequency measurement using cross-linked optical and microwave oscillators[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2): 023820.

[43] BARWOOD G P, HUANG G, KLEIN H A, *et al*.. Agreement between two $^{88}Sr^{+}$ optical clocks to 4 parts in 10^{17}[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(5): 050501.

[44] BARWOOD G P, EDWARDS C S, PILL G, *et al*.. Observation of the $5s^2S_{1/2}$–$4d_2D_{5/2}$ transition in a single laser-cooled trapped Sr^{+} ion by using an all-solid-state system of lasers[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(9): 732-734.

[45] BARWOOD G, GILL P, HUANG G, *et al*.. Characterization of a $^{88}Sr^{+}$ optical frequency standard at 445 THz by two-trap comparison[C]. *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, IEEE, 2012: 270-271.

[46] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, *et al*.. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.

[47] AL-MASOUDI A, DÖRSCHER S, HÄFNER S, *et al*.. Noise and instability of an optical lattice clock[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 063814.

[48] RILEY W, HOWE D. (2008), Handbook of frequency stability analysis, special publication (NIST SP), national institute of standards and technology, gaithersburg, MD, [EB/OL]. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50505

[49] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.

[50] DIDDAMS S A. The evolving optical frequency comb [invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B51-B62.

[51] CHANG L, LIU S T, BOWERS J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(2): 95-108.

[52] FORTIER T, BAUMANN E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. *Communications Physics*, 2019, 2(1): 153.

[53] JONES D J, DIDDAMS S A, RANKA J K, *et al*.. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.

[54] MA L SH, BI ZH Y, BARTELS A, *et al*.. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1843-1845.

[55] 徐欣, 林湫童, 穆衡霖, 等. 激光外差干涉皮米级平动测量技术研究[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 535-546.
XU X, LIN Q T, MU H L, *et al*. Laser heterodyne interferometry for picometer-level displacement measurement[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 535-546.

[56] SCHMIDT T D, SCHLÜTER S, SCHULDT T, *et al*.. COMPASSO: in-orbit verification of optical key technologies for future GNSS[C]. *Proceedings of the 53rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, The Institute of Navigation, 2022: 158-182.

[57] PRÖBSTER B J, LEZIUS M, MANDEL O, *et al*.. FOKUS II—Space flight of a compact and vacuum compatible dual frequency comb system[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(3): 932-939.

[58] BAGHI Q, THORPE J I, SLUTSKY J, *et al*.. Gravitational-wave parameter estimation with gaps in LISA: A Bayesian data augmentation method[J]. *Physical Review D*, 2019, 100(2): 022003.

[59] BURKE O, MARSAT S, GAIR J R, *et al*.. Addressing data gaps and assessing noise mismodeling in LISA[J]. *Physical Review D*, 2025, 111(12): 124053.

[60] XU Y X, DU M H, XU P, *et al*.. Gravitational wave signal extraction against non-stationary instrumental noises with deep neural network[J]. *Physics Letters B*, 2024, 858: 139016.

[61] DU M H, WANG P CH, LUO Z R, *et al*.. Towards realistic detection pipelines of Taiji: New challenges in data analysis and high-fidelity simulations of space-based gravitational wave antenna[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2026, 69(4): 249501.

[62] HEINZEL G, ÁLVAREZ-VIZOSO J, DOVALE-ÁLVAREZ M, *et al*.. Frequency planning for LISA[J]. *Physical Review D*, 2024, 110(4): 042002.

[63] PIREAUX S. Time scales in LISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2007, 24(9): 2271-2281.

[64] 范习谦, 刘河山, 罗子人, 等. 基于 MHz 深度频率调制激光干涉的相位测量技术[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 622-630.
FAN X Q, LIU H SH, LUO Z R, *et al*.. Phase measurement technique based on MHz-lever depth frequency modulated laser interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 622-630.

[65] WANG Y, HEINZEL G, DANZMANN K. First stage of LISA data processing: Clock synchronization and arm-length determination via a hybrid-extended Kalman filter[J]. *Physical Review D*, 2014, 90(6): 064016.

[66] NIKLAS REINHARDT J, HARTWIG O, HEINZEL G. Clock synchronization and light-travel-time estimation for space-based gravitational-wave detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, 42(5): 055014.

[67] 陈沛权, 邓汝杰, 张艺斌, 等. 太极计划星间激光通信测距的伪随机码选取[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 547-556.
CHEN P Q, DENG R J, ZHANG Y B, *et al*.. Pseudo-random code selection for inter-satellite laser ranging and data communication in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 547-556. (in Chinese).

[68] 方子若, 朱振才, 蔡志鸣, 等. 空间引力波探测航天器光学测距噪声链路指标优化[J]. 中国光学 (中英文), 2025,

18(3): 568-582.
FANG Z R, ZHU ZH C, CAI ZH M, *et al*.. Optimization of optical metrology noise link metrics for space-based gravitational wave detection spacecraft[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 568-582. (in Chinese).

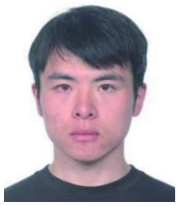
[69] DIMARCQ N, GERTSVOLF M, MILETI G, *et al*.. Roadmap towards the redefinition of the second[J]. *Metrologia*, 2024, 61(1): 012001.

[70] LU X T, GUO F, LIU Y Y, *et al*.. NTSC SrII optical lattice clock with uncertainty of 2×10^{-18}[J]. *Metrologia*, 2025, 62(3): 035007.

作者简介：



李智祥(1999—)男，四川泸州人，硕士，主要研究方向为空间引力波探测数据处理。E-mail: lizhixiang23@mails.ucas.ac.cn



杜明辉(1993—)，男，河北保定人，博士，副研究员，2022 年于大连理工大学理论物理专业获得博士学位，主要研究方向为空间引力波探测数据仿真分析及科学目标论证。E-mail: duminghui@imech.ac.cn