

文章编号 1004-924X(2021)07-1491-08

空间激光干涉仪光程倾斜耦合噪声抑制

王璐钰^{1,2}, 李玉琼^{3*}, 蔡榕^{1,2*}

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学航空宇航学院, 北京 101408;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要:在“太极计划”中由卫星抖动引起的光程倾斜(tilt-to-length, TTL)耦合噪声是影响激光干涉测量精度的第二大噪声源,为保证测量精度,该噪声要 $\leq \pm 25 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$ 。基于费马原理设计了由双凸透镜组成的成像系统,仿真分析了该成像系统对于TTL耦合噪声的抑制效果,搭建物理实验平台验证了该成像系统抑制TTL耦合噪声的有效性。仿真结果表明:加入双凸透镜成像系统后,TTL耦合噪声 $\leq \pm 10 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$;实验结果表明:加入双凸透镜成像系统后,TTL耦合噪声 $\leq \pm 15 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$,均满足“太极计划”对光程倾斜耦合噪声抑制水平的要求,且整个干涉光路易于调控、测量精度高。通过搭建物理实验平台验证了TTL耦合噪声的抑制效果,为“太极计划”激光干涉测量奠定了物理实验基础。

关键词:激光干涉测量;引力波探测;太极计划;空间激光干涉仪;光程倾斜耦合噪声
中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212907.1491

Noise suppression of tilt-to-length coupling in space laser interferometer

WANG Lu-yu^{1,2}, LI Yu-qiong^{3*}, CAI Rong^{1,2*}

- (1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*
2. *School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;*
3. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

* *Corresponding author, E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn; cairong@aircas.ac.cn*

Abstract: In the Taiji mission, the tilt-to-length (TTL) coupling noise caused by satellite jitter is the second largest noise source that affects the accuracy of the laser interferometer. In order to ensure measurement accuracy, it is necessary to suppress this noise to $\leq \pm 25 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$. Based on Fermat's principle, an imaging system composed of biconvex lenses was designed, and the effect of the imaging system on suppressing TTL coupling noise was simulated and analyzed. A physical experiment platform was built to verify the effectiveness of the imaging system in suppressing TTL coupling noise. The simulation results showed that the TTL coupling noise was $\leq \pm 10 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$ after the biconvex lens im-

收稿日期:2020-12-21;修订日期:2021-01-28.

基金项目:中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2018024);国家自然科学基金资助项目(No. 61575209);中国科学院战略重点研究计划资助项目(No. XDA17020103)

aging system was added; the experimental results showed that the TTL coupling noise was $\leq \pm 15 \mu\text{m}/\text{rad}$ @ $\pm 300 \mu\text{rad}$ after the biconvex lens imaging system was added. These results satisfied the requirements of the Taiji mission in terms of the level of TTL coupling noise. Moreover, the entire interference optical path was easy to control, and high measurement accuracy was achieved. The suppression effect of TTL coupling noise was verified by buliding a physical experiment platform, which laid the foundation for physics experiments of the Taiji mission laser interferometer.

Key words: laser interference measurement; gravitational-wave observation; Taiji mission; laser interferometer in space; tilt-to-length coupling noise

1 引言

“太极计划”拟在绕日轨道部署等边三角形结构的三颗引力波探测卫星,星间距为 300 万公里,每颗卫星包含两个测试质量(Test Mass, TM)。当引力波通过时,测试质量之间的距离会发生变化,激光干涉测量系统将读取这一距离变化,从而反演引力波信号^[1-8]。空间中,卫星受天体偶发事件、太阳辐射、宇宙射线和星际磁场等非保守力的影响会发生抖动,该抖动使得卫星上的测试质量倾斜,导致从测试质量反射的测量激光光束发生角度倾斜,从而引入额外的纵向光程信号,产生角度相干干涉效应,即产生光程倾斜(Tilt-to-length, TTL)耦合噪声^[9-18]。现有研究表明,在影响激光干涉测量精度的各种噪声中, TTL 耦合噪声是仅次于散粒噪声的第二大噪声源^[15]。“太极计划”使用无拖曳控制技术来抑制非保守力对卫星的扰动作用,并设计成像系统减小因卫星抖动所带来的 TTL 耦合噪声对激光干涉测量精度的影响。

本文通过设计新型成像系统来抑制经无拖曳控制技术调控后(测试质量倾角在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 的范围内)的 TTL 耦合噪声^[15]。根据“太极计划”的指标要求,由本地卫星抖动所引起的 TTL 耦合噪声 $\leq \pm 25 \mu\text{m}/\text{rad}$ @ $\pm 300 \mu\text{rad}$ 。在 TTL 耦合噪声抑制方面,Chwalla 等人通过一组实验发现,没有引入透镜成像系统即含有 TTL 耦合噪声的实验确实会引起光程信号的改变,从而影响测距精度^[10];Schuster 等人通过模拟仿真引入凹凸透镜成像系统后,将 TTL 耦合噪声抑制了 3 个数量级^[12];Tröbs 等人利用精密干涉仪中的凹凸透镜成像系统,对减小 TTL 耦合噪声进行了实验研究,研究结果表明:加入成像系统可以抑

制 TTL 耦合噪声,且能达到 LISA 的指标要求,即 TTL 耦合噪声 $\leq \pm 25 \mu\text{m}/\text{rad}$ ^[13]。国内,赵亚等人模拟仿真研究发现当高斯光束的腰部位置与平顶光束的旋转点重合时,几何光路和光程长度之间存在偏移,通过使用大的平顶光束和单象限光电探测器可以消除 TTL 耦合噪声^[15]。目前,用于抑制 TTL 耦合噪声的成像系统均为凹凸透镜组,存在设计要求高、光路调控难度大等缺陷。

本文基于费马原理设计了由双凸透镜组成的成像系统,并通过仿真及物理实验验证了该成像系统抑制 TTL 耦合噪声的效果。

2 TTL 耦合噪声抑制系统设计

TTL 耦合噪声为纵向光程信号相对于倾斜角度的一阶导数。如图 1 所示,基于费马原理的等光程性设计了双凸透镜成像系统(焦距、物距和像距均为 f ,凸透镜间距为 $2f$,具体参数如表 1 所示),来减小由于测试质量倾斜引入的纵向光程信号,以抑制 TTL 耦合噪声。理想情况下,分光镜位于成像系统的物方焦点处,四象限光电探测器(Four-Quadrant Photodetector, QPD)位于成像系统的像方焦点处。图 1 中绘制了测量激光经过倾斜测试质量(倾角在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 以内)后,经成像系统到达 QPD 接收面与参考光束发生干涉现象的光线传播路径:偏振态为 S 态的测量激光经偏振分光镜、四分之一波片后,从倾斜测试质量表面反射再经四分之一波片后以 S 态传播经过双凸透镜成像系统,最后与 S 态的参考激光在四象限光电探测器光敏面上发生干涉。

本文针对“太极计划”引力波的探测频段 $0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$,通过实验研究了 0.1 Hz 处测试

质量倾角为±300 μrad 内的光程倾斜耦合噪声的抑制精度。

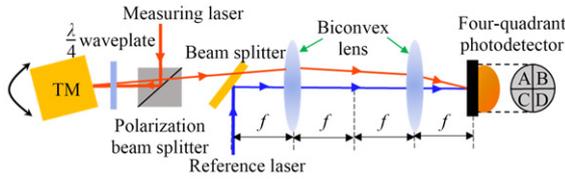


图 1 TTL 耦合噪声抑制系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of TTL coupling noise suppression system

表 1 成像系统中双凸透镜参数

Tab.1 Parameters of biconvex lens in imaging system

名称	值
型号	Thorlabs LB1757-C
材质	N-BK7
折射率	1.506 69
增透膜/nm	1 064
直径/mm	25.4
曲率半径/mm	29.5
前焦距/mm	30
后焦距/mm	27.3
中心厚度/mm	7.7

3 仿真实验及结果

3.1 仿真实验设计

基于光路传播公式计算出激光经测试质量后通过双凸透镜成像系统到达 QPD 表面这一传播过程中走过的路径(测试质量倾斜角 α 一般为 μrad 量级, 所以有 $\sin \alpha \approx \alpha$), 从而建立光学模型

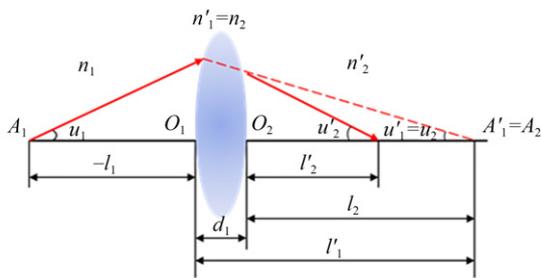


图 2 共轴球面系统光线传播路径

Fig. 2 Light propagation path of coaxial spherical system

并提取光学信号。如图 2 所示, 在共轴球面系统中透镜系统由两个折射面组成, 其中介质折射率 n_1, n_2, n'_1, n'_2 , 球面曲率半径 r_1, r_2 , 及透镜厚度 d_1 均已知。若已知物方截距 l_1 和孔径角 u_1 , 则可通过以下两步求得 l'_2, u'_2 :

(1) 如图 3(a) 所示, 由近轴公式可计算出光线经第一个折射面后的像方截距 l'_1 和孔径角 u'_1 ;

光路计算公式为^[19]:

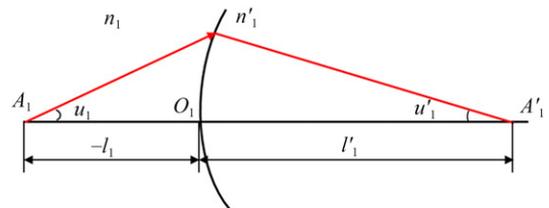
$$i_1 = \frac{l_1 - r_1}{r_1} \times u_1, \quad (1)$$

$$i_1' = \frac{n_1}{n_1'} \times i_1, \quad (2)$$

$$u_1' = u_1 + i_1 - i_1', \quad (3)$$

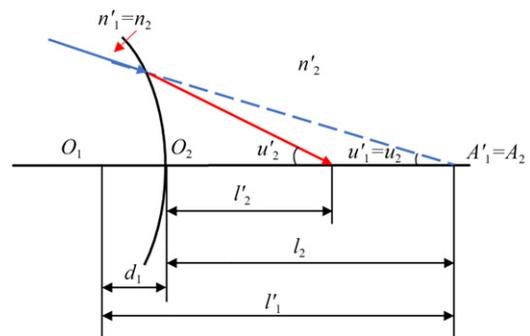
$$l_1' = r_1 \times \left(1 + \frac{i_1'}{u_1'}\right). \quad (4)$$

(2) 如图 3(b) 所示, 将第一个面的出射光线作为第二个面的入射光线, 再次利用近轴公式求解最终的像方截距 l'_2 和孔径角 u'_2 ($u_2 = u_1', l_2 = l_1' - d_1, n_2 = n_1'$)。同理, 则可求得光线经过双凸透镜成像系统的传播路径。



(a) 光线经第一个折射面

(a) Light passes through the first refraction surface



(b) 光线经第二个折射面

(b) Light passes through the second refraction surface

图 3 共轴球面系统中的光路计算

Fig. 3 Calculation of optical path for coaxial spherical system

3.2 实验结果分析与讨论

如图 4(a)所示,实验模拟了加入、未加入双凸透镜成像系统时,从 $-300\sim 300\ \mu\text{rad}$,以 $50\ \mu\text{rad}$ 为增量的倾斜测量激光和沿水平方向传播的参考激光从测试质量到 QPD 光敏面传播过程的光线路径。为找出 TTL 耦合噪声为零的位置,仿真绘制了光线经 QPD 后的传播路径,并得出 QPD 光敏面处 TTL 耦合噪声水平,如图 4(b)所示。由图 4 可知(彩图见期刊电子版),在加入成像系统后, TTL 耦合噪声得到了显著抑制,且 TTL 耦合噪声 $\leq \pm 10\ \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300\ \mu\text{rad}$ 。

本文设计的成像系统中仪器参数位置易于确定。双凸透镜参数可依据具体实验平台及 QPD 光敏面大小确定,测试质量、QPD 及双凸透镜组的相对位置可根据透镜焦距确定。此外,实验测量精度高。由图 4(a)可知,加入双凸透镜成像系统后存在 TTL 耦合噪声为零的位置(图 4(a)中测量激光(红色虚线)与横轴在 $2\ 115\ \text{mm}$ 处的交点位置),理论上只要实验中 QPD 光敏面置于该位置,则可完全消除 TTL 耦合噪声对激光干涉测量的影响。

4 物理实验及结果

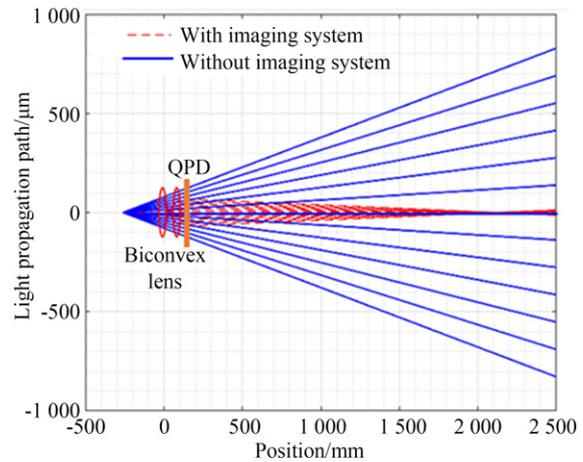
4.1 物理实验设计

实验中由 QPD 和相位计测得相位变化 $\Delta\varphi_A$,从而求得 TTL 耦合噪声。当传播介质为真空,折射率 $n=1$ 时,纵向光程信号即光程差及 TTL 耦合噪声分别为:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi_A, \quad (5)$$

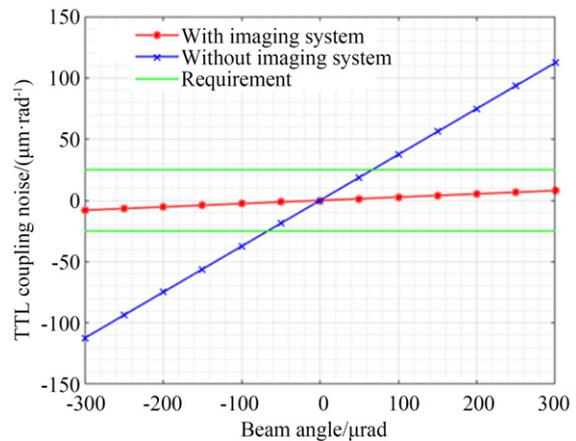
$$TTL = \frac{d\Delta L}{d\alpha} \propto \frac{d\Delta\varphi_A}{d\alpha}. \quad (6)$$

如图 5(a)所示,搭建了两路等臂长的干涉光路,其中一路不受抖动影响,用于测得恒稳干涉信号,以消除时钟噪声、后端接线射频噪声等带来的额外且无法确定具体来源的噪声误差,通过两路干涉信号数据处理则可得 TTL 耦合噪声及成像系统对 TTL 耦合噪声的抑制效果。



(a) 光线传播路径

(a) Light propagation path



(b) TTL 耦合噪声

(b) TTL coupling noise

图 4 TTL 耦合噪声抑制的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of TTL coupling noise suppression

实验中,激光器出射的光经法拉第隔离器后被 5:5 分光镜分为两束光,经过声光调制器、楔形片后产生差分频率为 $40\ \text{kHz}$ (当两路激光束差分频率为 $40\ \text{kHz}$ 时系统自身的读出噪声最小^[20])的两束仅含一级 Bragg 衍射光的平行光束,并由光纤耦合器传输到真空腔内的超稳干涉平台上(图 5(b)),分别用于模拟激光干涉测量系统中的测量激光和参考激光。图 5(a)中,中性密度滤光片用于调节激光强度;线性偏振片用于将两束激光偏振态调为一致以便产生干涉信号;模拟器采用 XE17 型号的压电控制器,用于发射信号模拟卫

星抖动;数字相位计、个人电脑用于接收处理数据。图 5(b)中(彩图见期刊电子版),粉红色光线

表示:(1)干涉光经过双凸透镜成像系统后被 QPD1 接收;(2)干涉光直接被 QPD2 接收。

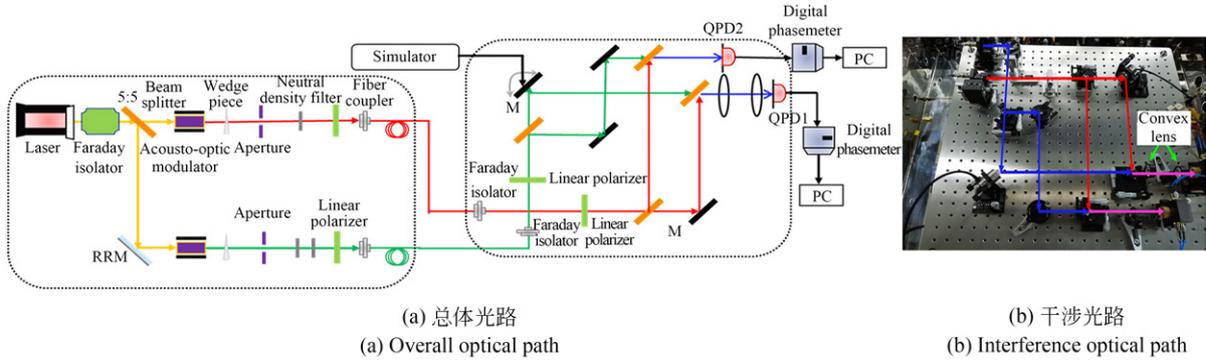


图 5 抑制 TTL 耦合噪声的物理实验系统

Fig. 5 Physical experimental system for suppression of TTL coupling noise

实验时,通过压电控制器模拟抖动信号(由于物理实验中 TM 无法自行产生倾斜效果,因此用压电控制器代替 TM 以产生倾斜光束), QPD1、QPD2 测得纵向光程信号;其中, QPD1 测得抖动状态下的纵向光程信号, QPD2 测得稳定状态下因其他因素(时钟噪声、后端接线射频噪声)所引起的纵向光程信号。然后加入抖动信号,未加成像系统时由 QPD1 和 QPD2 测得数据分析可知卫星抖动所引起的 TTL 耦合噪声;加入抖动信号和成像系统时,由 QPD1 和 QPD2 测得数据分析可知 TTL 耦合噪声是否得到了有效的抑制。

4.2 实验结果分析与讨论

实验中由 XE17 压电控制器模拟的抖动信号为: $\alpha(t) = 333.3 \times \sin(0.2\pi t)$, 如图 6 所示。本文以测量实验中无成像系统情况下加入抖动噪声为例,来说明构建两路干涉光路的作用:一路测得恒稳噪声,由 QPD2 测得,如图 6(a)所示;另一路测得恒稳噪声和抖动噪声的混合噪声,由 QPD1 测得,如图 6(b)所示。因为两者之间没有相关性,仅仅是时间上存在累加效果,因此,两路信号差即为无成像系统时的抖动噪声。

如图 7 所示(彩图见期刊电子版),蓝色实线为实验测得未加入成像系统时的数据,红色实线

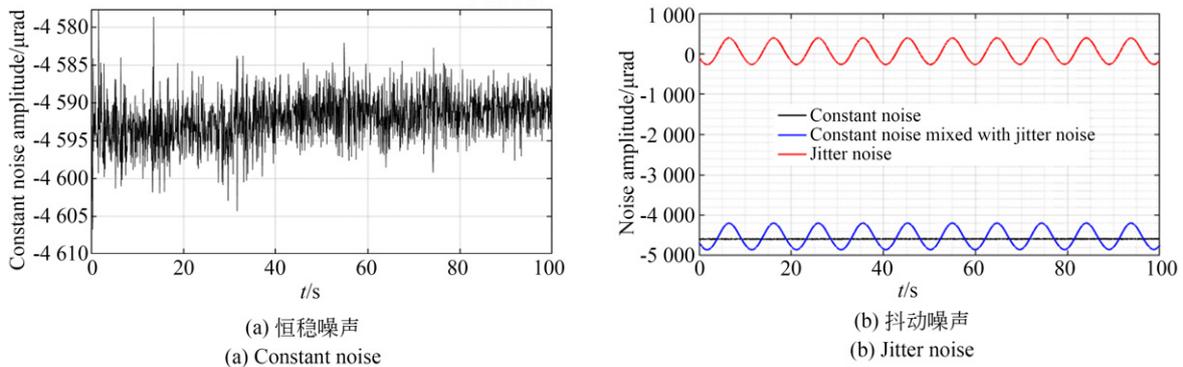


图 6 噪声水平

Fig. 6 Noise level

为加入成像系统后测得数据,绿色实线为“太极计划”要求的噪声抑制水平。其中,图 7(a)为光程差随测试质量倾斜角度的变化情况,图 7(b)为 TTL 耦合噪声随测试质量倾斜角度的变化情况。由图 7 可知,加入成像系统可有效抑制 TTL 耦合噪声,TTL 耦合噪声 $\leq \pm 15 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$,满足“太极计划”的指标要求。

然而,物理实验结果显示,TTL 耦合噪声未被完全抑制,制约噪声抑制精度的主要原因如下:(1)测量系统中两路干涉信号不完全等臂长,使得系统本身存在一定的读出噪声(如图 5 所示,

干涉信号臂长受光学镜片位置精确度的影响,且该影响无法定量研究);(2)凸透镜受加工精度的影响存在散射现象,而且参数相同的两个凸透镜难以具有完全一致的成像效果;(3)受光学平台(长 60 cm,宽 60 cm)QPD 安装位置的限制,未能将 QPD 安装在仿真结果中确定的 TTL 耦合噪声为零的位置处(图 4(a)中横坐标 2 115 mm),实验中 QPD 的位置为横坐标 110 mm 处。

“太极计划”空间激光干涉测量不存在温度漂移等噪声影响且拟采用的高精度测量系统,更有利于抑制 TTL 耦合噪声。

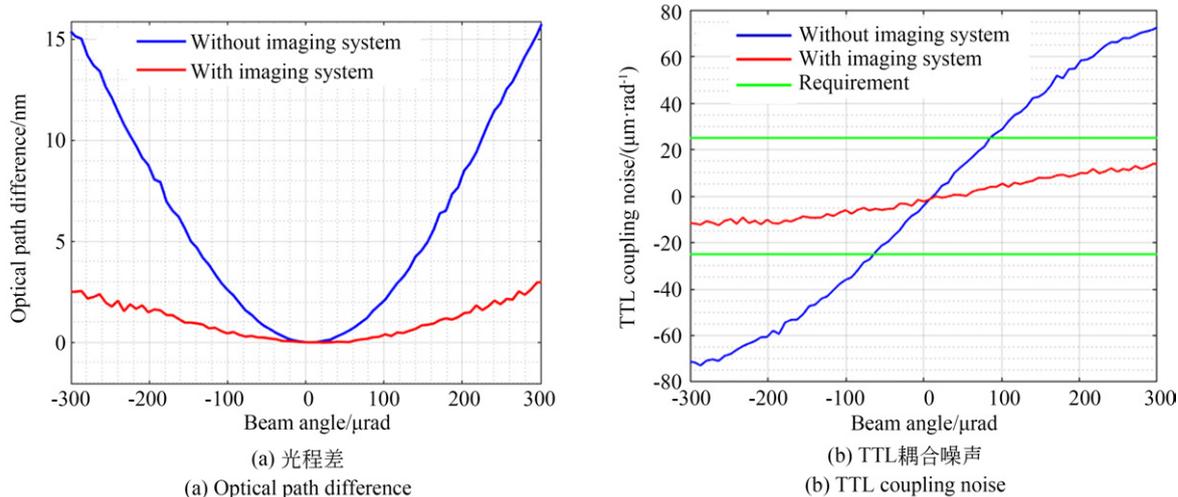


图 7 抑制效果

Fig. 7 Inhibitory effects

5 结 论

本文根据“太极计划”激光干涉测量高精度、装置易调节的要求,设计了由双凸透镜组成的成像系统,通过仿真和物理实验充分验证了该成像系统对 TTL 耦合噪声的抑制水平。仿真实验结果表明:加入双凸透镜成像系统后,TTL 耦合噪声 $\leq \pm 10 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$;物理实验结果表

明:加入双凸透镜成像系统后,TTL 耦合噪声 $\leq \pm 15 \mu\text{m}/\text{rad}@ \pm 300 \mu\text{rad}$,满足“太极计划”的指标要求。系统中加入双凸透镜成像系统后,仅改变光线的传播方向,不会引入影响测量结果的其他因素,且干涉光路易于调节、系统易于搭建、测量结果精度较高,为“太极计划”TTL 耦合噪声的抑制方法提供了参考。

参考文献:

[1] 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.
- [2] JIN G. Program in space detection of gravitational wave in Chinese Academy of Sciences[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840:012009.
- [3] 刘志国,朴云松,乔从丰. 多波段引力波宇宙研究和空间太极计划[J]. 现代物理知识, 2016, 28(5): 28-33.
LIU ZH G, PIAO Y S, QIAO C F. Multi-band gravitational wave cosmic research and the Taiji program of space [J]. *Modern Physics*, 2016, 28(5): 28-33. (in Chinese)
- [4] 王林斗,王加新,邢文烈,等. 具有隔离器功能的激光干涉仪的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 465-470.
WANG L D, WANG J X, XING W L, et al. Laser interferometer with isolator function [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 465-470. (in Chinese)
- [5] 李玉琼,王璐钰,王晨昱. 面向空间引力波探测的弱光探测器性能检测与分析[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1710-1718.
LI Y Q, WANG L Y, WANG CH Y. Preliminary test of performance detection and analysis of weak-light detector for space gravitational wave detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1710-1718. (in Chinese)
- [6] 姚东,李钰鹏,赵亚,等. 适用于光黏工艺的干涉仪公差保证方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1945-1953.
YAO D, LI Y P, ZHAO Y, et al. Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1945-1953. (in Chinese)
- [7] 罗子人,白姗,边星,等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 43(4): 415-447.
LUO Z R, BAI SH, BIAN X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry [J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447. (in Chinese)
- [8] PITKIN M, REID S, ROWAN S, et al. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space)[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2011, 14(1): 1-75.
- [9] LI Y Q, LUO Z R, LIU H S, et al. Laser interferometer for space gravitational waves detection and earth gravity mapping[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, 30(6): 817-829.
- [10] CHWALLA M, DANZMANN K, BARRANCO G F, et al. Design and construction of an optical test bed for LISA imaging systems and tilt-to-length coupling[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2016, 33(24):245015.
- [11] SCHUSTER S, WANNER G, TROBS M, et al. Vanishing tilt-to-length coupling for a singular case in two-beam laser interferometers with Gaussian beams[J]. *Applied Optics*, 2015, 54:1-8.
- [12] SCHUSTER S, TRÖBS M, WANNER G, et al. Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by a two-lens imaging system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10466-10475.
- [13] TROBS M, CHWALLA M, DANZMANN K, et al. Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by using imaging systems in precision interferometers [C]. *International Conference on Space Optics*, 2016,10562(1056245):1-9.
- [14] TROBS M, SCHUSTER S, LIASER M, et al. Reducing tilt-to-length coupling for the LISA test mass interferometer [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(10):105001.
- [15] ZHAO Y, WANG Z, LI Y, et al. Method to remove tilt-to-length coupling caused by interference of flat-top beam and Gaussian beam [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19):4112.
- [16] WANG Z, YU T, ZHAO Y, et al. Research on telescope TTL coupling noise in intersatellite laser interferometry [J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(3): 265-274.
- [17] CHWALLA M, DANZMANN K, ÁLVAREZ M D, et al. Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1):1-11.
- [18] SCHUSTER S. *Investigation of the Coupling Between Beam Tilt and Longitudinal Pathlength Signal in Laser Interferometers* [D]. Germany: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2013.
- [19] 韩军,刘钧. 工程光学[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
HAN J, LIU J. *Engineering Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [20] 董玉辉. 面向空间激光干涉引力波探测的精密指向和弱光锁相控制技术的研究[D]. 北京:中国科

学院力学研究所, 2015.

DONG Y H. *Inter-satellite Interferometry: Fine Pointing and Weak-light Phase-locking Techniques*

for Space Gravitational Wave Observatory [D].

Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

作者简介:



王璐钰(1995—),女,陕西渭南人,硕士研究生,2018年于西安工业大学获得学士学位,主要从事面向空间引力波探测中影响激光干涉仪测量精度的光程倾斜耦合噪声和激光抖动噪声抑制的研究。E-mail: wangluyu18@mails.ucas.ac

通讯作者:



蔡榕(1964—),男,福建泉州人,研究员,博士生导师,空天信息创新研究院党委书记,1986年于清华大学获得学士学位,1989年于同济大学获得硕士学位,主要从事激光传输与临近空间环境探测的研究。E-mail: cairong@aircas.ac.cn

通讯作者:



李玉琼(1982—),男,湖南娄底人,副研究员,中国科学院青年创新促进委员会会员,2005年于陕西科技大学获得学士学位,2010年于北京理工大学获得博士学位,主要从事面向空间引力波探测的激光干涉测量研究。E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn