

空间引力波探测前向杂散光测量和抑制

冷荣宽^{1,2}, 王 上^{1*}, 王 智^{1,3}, 陈志伟^{1,2}, 方 超¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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)

摘要:在空间引力波探测的超长臂干涉测量过程中, 杂散光问题长期以来受到广泛关注。一方面, 本地干涉仪发出的激光通过望远镜时会产生后向相干杂散光。另一方面, 在轨情况下, 来自空间的环境辐射入射到航天器还会产生前向非相干杂散光。一直以来, 前向非相干杂散光受到的关注较少, 然而却是空间引力波望远镜设计必须要考虑的因素。因此, 本文对空间引力波探测望远镜在轨情况下产生的杂散光进行测量与抑制。首先, 根据太极计划三星卫星编队的轨道数据对全年太阳角进行计算, 对 1064 nm 波段附近的太阳辐射进行评估, 推导了遮光罩投影函数, 最终给出遮光罩设计指标。然后, 对望远镜进行光学与机械建模, 并对关键光学元件进行散射测量。最后, 根据入射太阳光能量对到达望远镜出瞳的杂散光进行计算。结果表明: 当入射光与光轴夹角为 60°时, 出瞳处的杂散辐射可达到 3.9×10^{-12} W, 对应点源透射比为 8.7×10^{-9} , 满足空间引力波探测超低杂散光的需求。

关键词:空间引力波探测; 杂散光; 散射光学

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0251

Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection

LENG Rong-kuan^{1,2}, WANG Shang^{1*}, WANG Zhi^{1,3}, CHEN Zhi-wei^{1,2}, FANG Chao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

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

3. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study,

UCAS, Hangzhou 310024, China)

* Corresponding author, E-mail: ws790402497@163.com

Abstract: In the spaceborne gravitational wave interferometric detection, the problem of stray light has received long-term attention. The laser light emitted by the local interferometer produces backward coherent stray light when passing the telescope while the radiation from space that is incident to the spacecraft produces forward incoherent stray light. Forward incoherent stray light has received less attention at this point,

收稿日期: 2022-12-07; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62075214); 国家重点研发计划 (No. 2020YFC2200104)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075214); National Key R&D Program of China (No. 2020YFC2200104)

but it is a necessary factor of gravitational-wave telescope design. Therefore, this paper studies stray light produced by space gravitational wave telescopes in orbit. First, the annual solar angle is calculated according to the orbital data of the three-star satellite formation of the Taiji Project, and the solar radiation around the 1 064 nm band is evaluated. The baffle shadowing function is derived, which satisfies the requirement for the baffle design. The telescope is then modeled optically and mechanically and scatter measurements are conducted for critical optical components. Finally, the stray light reaching the pupil of the telescope is determined based on the energy of the incident sunlight. The results show that when the angle between the incident light and the optical axis is 60° , the stray radiation at the exit pupil is 3.9×10^{-12} W, and the corresponding point source transmittance is 8.7×10^{-9} which meets the requirement for space gravitational waves to detect extremely low levels of stray light.

Key words: spaceborne gravitational wave detection; optical scattering; stray light

1 引言

由于不受地球曲率限制,空间引力波探测可达到地面探测无法比拟的频率响应和探测精度。空间引力波探测的基本手段为超远距离高精度激光干涉测距。通过监测测试质量间由引力波引起的距离变化,可对引力波信号进行测量并反演出波源的性质。在太极计划中,三颗卫星在日心轨道组成等边三角形编队,其干涉臂长达到三百万公里^[1-2]。望远镜在探测中同时收发激光光束,是引力波探测计划中的关键组成部分。然而在实际加工设计过程中,由于光学表面不能完美地反射或吸收入射光,导致存在散射光。在德国加兴搭建的干涉仪原型中首次发现散射光对引力波探测产生影响^[3-4]。随后杂散光问题成为引力波探测的核心问题之一。空间引力波望远镜产生杂散光的过程通常分为相干散射和非相干散射。前者为发射激光光束与散射光束具有相同的相位变化^[5];后者中发射激光光束与散射光束的相位变化具有随机性。通常,相干散射来源于望远镜镜面的后向散射,而非相干散射来源于望远镜的结构部分或来自入射到望远镜的非相干环境光。近年来,相干光的计算及耦合机理均得到了广泛关注^[5-7]。然而,在空间引力波计划中,对非相干环境杂散光的讨论相对较少。本文基于中国太极计划的轨道数据,通过轨道分析软件对全年入射望远镜的主要散射源——直接太阳辐射,进行计算,给出遮光罩设计指标,对望远镜的光学表面进行散射测量,通过光学追迹软件 ASAP 对望远镜进

行建模。得到望远镜出瞳处非相干杂散光通量和望远镜杂散光抑制能力。

2 空间引力波探测计划

2.1 任务概述

太极计划由三颗卫星构成的等边三角形编队组成,3颗卫星均处于日心轨道上,与地心轨道相比,热稳定性更好。如图1所示,卫星编队三角形质心相对于地球的拖尾角约为 20° ,卫星编队平面与黄道面夹角约为 60° 。每颗卫星通过望远镜同时发射与接收波长为 1 064 nm 的激光,接收到的激光信号通过本地干涉仪导入到测试质量上,光束经过测试质量反射后于本地干涉仪发生干涉^[8]。通过监测干涉信号的相位变化,可以反演由引力波引起的距离变化。太极计划可以探测 0.1 mHz~0.1 Hz 的引力波信号,可探测的振幅达到 10^{-20} 以下。由于空间环境不可避免地存在太阳辐射,太阳风等各种不可控因素的影响,使得干涉精度下降。对于望远镜而言,其光程稳定性需要达到 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$,指向稳定性需要达到 $1 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[9]。

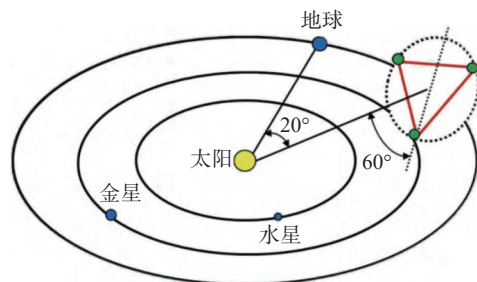


图1 太极计划卫星编队示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the satellite constellation for the Taiji program

2.2 空间引力波望远镜概述

根据前文所述,6个望远镜同时收发激光光束,并进行扩束与缩束,在空间引力波探测计划中,承担关键角色。由于望远镜的设计制造精度直接影响引力波探测精度。这要求望远镜具有高度光程与指向稳定性^[10],高光学输出效率,低抖动噪声^[11]。由于激光信号经过百万公里传输后,衰减为皮瓦量级,因此,还必须对杂散光进行控制与抑制。根据太极计划的要求,对于单位入射光能量,到达探测器的杂散光功率应小于 10^{-10} W ^[2,5]。

太极计划的望远镜光路如图2所示,相关设计参数由表1给出。太极计划望远镜采用的是离轴四反型设计,入瞳直径为400 mm。早期望远镜设计采用经典轴上Cassegrain式望远镜。其优点是结构紧凑,稳定性高。然而,轴上设计会产生后向反射光^[12],加之干涉仪平台与望远镜并非绝对静止,因此,后向反射光的存在使得望远镜杂散光问题更加严重。由于离轴角的存在,离轴设计不存在后向反射光的问题,且与轴上设计相比,不存在中心遮拦。因此,尽管离轴设计的体积更大,设计难度更高,但国际主流望远镜设计还是采用了离轴设计。

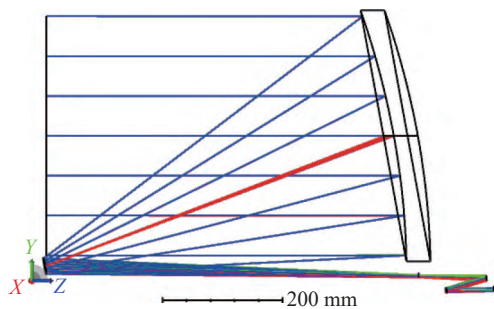


图2 望远镜样机光学布局

Fig. 2 The optical layout of the telescope prototype

表1 空间引力波望远镜设计参数

Tab.1 Design parameters of the space gravitational wave telescope

参数	设计指标
光学口径/mm	400
捕获视场/ μrad	± 400
科学视场/ μrad	± 8
放大倍率	80×
波前质量(RMS)	$\lambda/30$

图3为太极计划望远镜的结构设计方案,主承力结构为主镜背板,前端桁架为次镜提供支撑。光学元件采用了微晶玻璃材料,结构件采用殷钢材料制作,二者线胀系数能够匹配(0.05×10^{-6})。因此,具备极强的热性能,满足在轨抗热扰动能力,且可以保证光程的稳定性。遮光罩采用柔性结构安装,在不影响望远镜动力学性能的同时,能够初步隔绝绝大多数的外部杂散光。内部挡光环的间隔与形状经过精细设计,旨在精细控制来自空间环境的前向杂散光。

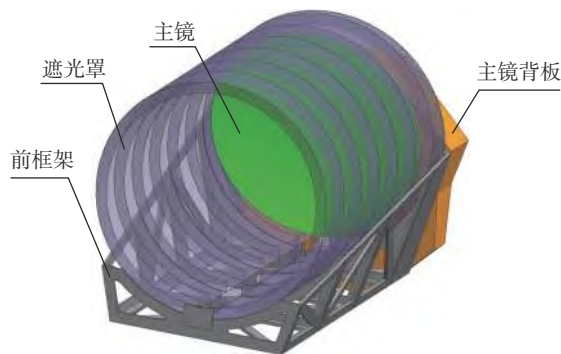


图3 望远镜结构设计方案

Fig. 3 Schematic diagram of telescope structure

3 空间环境辐射计算

卫星在轨运动接收到的外辐射主要包括太阳辐射和宇宙背景辐射,其中太阳的直接辐射是很重要的辐射源,对卫星表面温度,系统波前和杂散光都有很大影响。因此,本节将计算望远镜全年接收到的太阳光功率。根据第二节可知,引力波探测单个卫星的两个望远镜分别指向其他两个望远镜。由于卫星轨道全年不断变化,只有在望远镜入瞳处于光照区时才会接收到直接太阳辐射。卫星编队的半长轴约为一个天文单位,此时太阳光可以近似为平行光,在单位时间内投射到单位面积的全部辐射约为一个常数1353 W,该常数通常称为太阳常数 R_s 。假设望远镜入瞳的法向量为 $\vec{n}_0$,太阳矢量为 $\vec{S}$,太阳矢量与入瞳法向量的夹角为 θ_{sun} ,则面积为 A 的曲面接收到的直接太阳辐射为^[13]:

$$P_0 = \iint R_s \cdot \frac{(\cos \theta_{\text{sun}} + |\cos \theta_{\text{sun}}|)}{2} dA \quad (1)$$

当 $\cos \theta_{\text{sun}} < 0$ 时,望远镜入瞳接收到的太阳辐射为零。可以看作望远镜此时处于阴影区,不会

被太阳直接照亮。由于望远镜的入瞳为平面。则卫星表面接收到的太阳辐射可简化为:

$$P = R_s A \frac{(\cos \theta_{\text{sun}} + |\cos \theta_{\text{sun}}|)}{2} \quad (2)$$

假设 2025 年 1 月 27 日三星编队入轨,以编队稳定性为优化指标,采用日心黄道 J200 坐标系,并假定太阳为坐标原点。单颗卫星位置由近日点幅角,倾角,升交点赤经确定,卫星位置由真近点角与速率确定。将太极计划轨道相关场景带入到航天轨道分析软件中,构建望远镜入瞳法向量与太阳矢量的关系,将全年的 6 个望远镜与太阳矢量的夹角数据导出。然后,根据光谱数据与半长轴对太阳常数进行校正并带入到公式(2)中,得到望远镜在 1000~1100 nm 波段,全年接收到的太阳辐射。其中卫星 1 的两个望远镜的入射光功率随时间的变化情况如图 4(彩图见期刊电子版)如示。卫星 2 与卫星 3 的曲线形状与为卫星 1 的曲线形状相似,仅存在一定的相位差,因此不再赘述。根据图 4 可以发现,望远镜全年处于太阳光照区的时间约为 184 天左右,峰值功率约为 4.5 W。

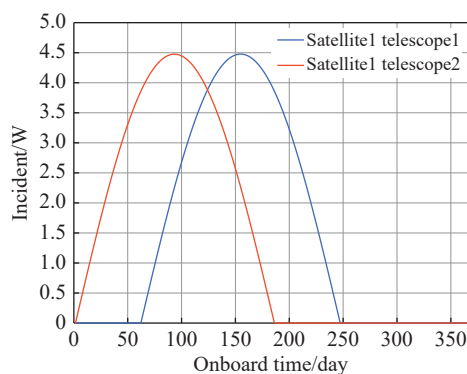


图 4 卫星 1 望远镜接收太阳直接辐射随时间的变化图

Fig. 4 Received direct solar radiation of the telescope of satellite 1 varying with onboard time

4 遮光罩设计

根据引力波望远镜全年的光照情况,可以增加遮光罩以消除杂散光。根据当前总体设计方案,望远镜本身暂未考虑遮光罩的设计。目前主要存在两种方案;第一种是为望远镜增加保护外包络,以提高望远镜的隔热性和稳定性;第二种是将航天器本身作为遮光罩。但无论那种方案,均涉及到望远镜与遮光罩分离的情况。基于该情

况,本文采用重叠投影法对遮光罩进行设计,并对遮光罩投影函数 (BPF) 进行了理论推导。假设遮光罩长度为 L_s ,遮光罩的上沿与望远镜光轴的距离为 D_s ,望远镜的入瞳半径为 D_t ,则遮光罩的遮光效果可以通过遮光罩投影函数来描述。其定义为在遮光罩投影面与入瞳的重叠面积与入瞳面积的比值。经过理论推导可得:

$$\text{BPF} = -\sqrt{1-\alpha^2} \left[\alpha D_t^2 + \sqrt{D_s^2 D_t^2 + D_t^4 (\alpha^2 - 1) d^2} \right] + D_t^2 \arccos \alpha + D_s^2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2} D_t}{D_s} \right) \quad (3)$$

其中, α 满足:

$$\alpha = \frac{L_s^2 \tan^2(\theta_{\text{sun}}) + D_t^2 - D_s^2}{2 L_s D_t \tan(\theta_{\text{sun}})} \quad (4)$$

根据公式 (3) 和 (4), 当 $\tan \theta_{\text{sun}} \geq (D_s + D_t)/L_s$ 时, $\text{BPF}=0$ 。当 $\tan \theta_{\text{sun}} \leq (D_s - D_t)/L_s$ 时, $\text{BPF}=1$ 。由于望远镜视场角较小,所以可以不考虑由遮光罩引起的渐晕效应。导入引力波望远镜数据,可得当 D_s, D_t, L_{sun} 满足如下关系时可以实现较好的遮蔽效果:

$$\frac{D_s + D_t}{L_s} \leq 1.732 \quad (5)$$

由此可见, L_s 的长度越长,遮蔽效果越好。然而在实际工程应用中, L_s 过长,会使得遮光罩异常笨重。因此,需要综合考虑遮光罩的重量,望远镜外包络的尺寸等因素。本文给出光学相关设计要求,在后续望远镜集成时,仅需根据上述结论进行简单代数运算,即可完成遮光罩设计(图 5)。

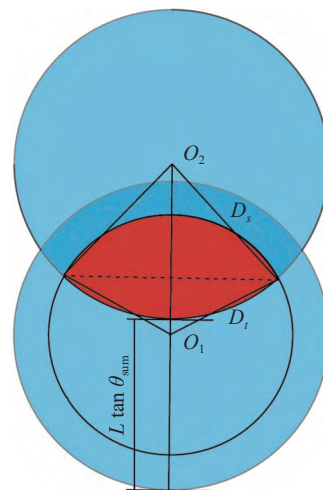


图 5 用于计算遮光罩投影函数的示意图

Fig. 5 Schematic diagram for BPF calculation

5 光学表面测量

空间引力波探测采用的反射式望远镜的主要光学表面包括用于收发激光的光学镜面与涂在结构表面用来吸收环境光的黑漆。由于表面缺陷不可避免地存在, 光学表面不能完美的吸收或者反射入射光, 形成散射光。当散射光经过探测系统到达出瞳后, 将形成杂散光。本文对加工得到的光学镜面进行形貌学测量, 并且基于光学表面形貌特征, 对表面进行了散射学测量。

5.1 光学表面形貌测量

为探究光学表面的表面特性, 对超光滑表面进行样品制备。光学镜面拟采用的基底为ZERODUE, 在室温条件下, 热膨胀系数可达到 10^{-8} K^{-1} , 在 $10^{-5} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的温控水平下, 可以满足空间引力波的探测需求。针对 1064 nm 波段, 对光学表面进行银增强反射镀膜, 二氧化硅保护镀膜。理论上, 反射率可达到97%以上。处理后的光学表面如图6(a)所示。光学表面的均方根粗糙度 δ_{rms} 可以表示为:

$$\delta_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (6)$$

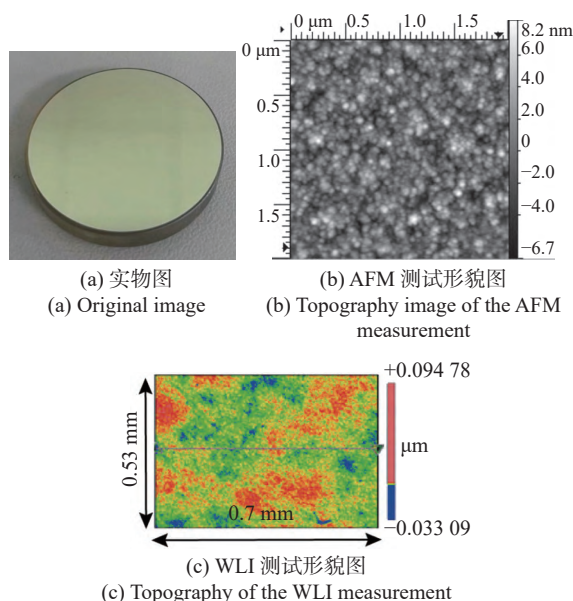


图6 待测超光滑表面实物图与形貌学测试结果

Fig. 6 Superpolished surface under test and its topography graphs

式中: N 为采样点个数, z_i 为光学表面相对平均表面的偏移, 满足 $\sum_{i=1}^N z_i = 0$ 。根据公式(6), 均方根

粗糙度的计算结果取决于视场宽度 L , 即最大空间波长与采样间隔。另一方面, 粗糙度的计算结果还依赖于横向分辨率, 这与采用的仪器分辨率有关。因此, 对于给定的光学表面, 不存在唯一的粗糙度值。出于研究的严谨性, 对于光学表面需要采用不同的技术对不同空间频率表面进行表征。因此, 本文分别采用了原子力显微镜 (AFM) 及非接触式白光干涉仪 (WLI) 对表面进行了接触式及非接触式测量。AFM 测试结果如图6(b)所示, 视场为 $0.02 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$, $\delta_{\text{rms}} = 0.29 \text{ nm}$ 。图6(c)为 WLI 的测量结果, 物镜的放大率为 $10\times$, $\delta_{\text{rms}} = 0.58 \text{ nm}$ 。

5.2 光学表面散射测量

粗糙度是光学表面的典型缺陷之一, 会产生散射光。由于其处于望远镜工作视场内, 很难通过结构设计来抑制。而超光滑表面处理为典型手段。为量化杂散光的影响, 本文对上述超光滑材料进行散射测量。通常散射光用双向反射分布函数 (BRDF) 进行量化。其定义为:

$$BRDF(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) \approx \frac{P_s / \Omega_s}{P_i \cos \theta_s} \quad (7)$$

其中 $\theta_i, \theta_s, \varphi_s$ 分别为入射光的入射角, 散射极角和散射方位角。 P_i, P_s 分别为入射光和散射光功率, Ω_s 为散射光立体角。积分散射损失 (TIS) 的表达式为:

$$TIS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} BRDF \cdot \sin(\theta_s) d\theta_s d\varphi_s \quad (8)$$

对于望远镜超光滑表面, 采用散射仪进行测量, 在入射角分别为 $5^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ 时的 BRDF 测试结果如图7(a)(彩图见期刊电子版)所示。根据图7可知, 当入射角等于散射角时, BRDF 达到峰值。当入射角为 0° 时, TIS 约为 0.0055% , 对应粗糙度为 0.62 nm 。在相同频域范围内, 其与上述形态学测量结果相近, 可视为有效测量。

针对涂黑表面, 同样采用了相同方式进行散射学测量。测量结果如图7(b)(彩图见期刊电子版)所示。当接近于正入射时, 与镜面相比, 涂黑表面在反射光附近具有良好的消光性, 大部分的能量会被吸收, 此时的散射损失为 0.83% 。然而,

随着入射角增加,消光性能减弱(图7(b)黄色曲线)并呈现镜面反射特征,散射损失达到50%。

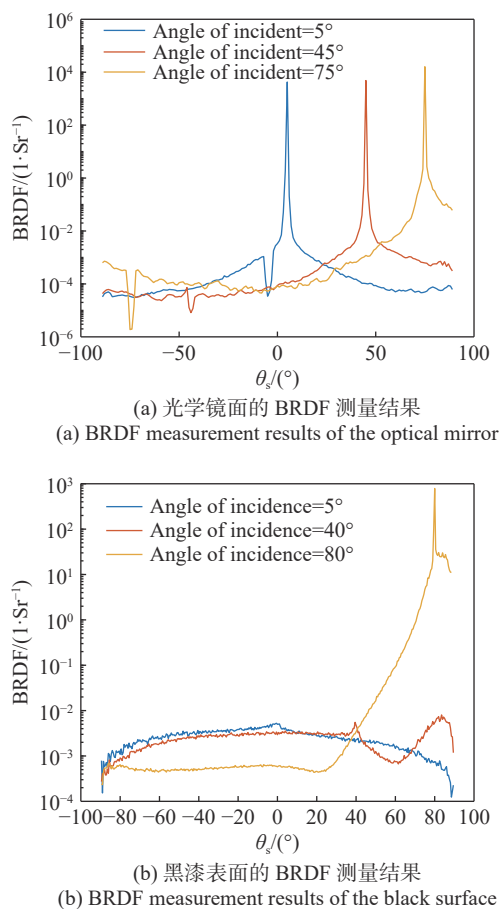


Fig. 7 Scattering measurement results of the scattering surface

6 前向杂散光分析

为研究上述表面所产生的散射光对光学系统的影响,对散射测量结果分别采用 Harvey 模型和多项式模型进行拟合,并带入到光学追迹软件中。本文采用的是非序列光线追迹软件 ASAP,且暂未考虑遮光罩的影响。本文对在太阳照射下,望远镜最差杂散光表现进行评估。光线追迹结果如图8所示。此时的入射光与光轴夹角为60°。为进一步抑制入射的直接太阳辐射,采用投影法对挡光环进行设计。挡光环的高度与距离满足以下公式:

$$\begin{aligned} \text{Height} &= e + (D - A) \cdot \tan(\theta) \\ \text{Space} &= I - D = (i - a) \cdot \frac{B - A}{c - a} - (d - a) \cdot \frac{H - A}{g - a} \end{aligned} \quad (9)$$

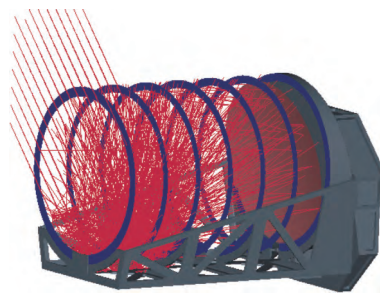


图8 空间引力波望远镜追迹示意图
Fig. 8 Ray-tracing diagram of the spaceborne gravitational wave telescope

相关参数的定义可参考文献[14]。在图8中,为了更好地展示散射光的传输,外围镜筒并未进行展示。追迹光路结果显示:望远镜镜筒的下侧内表面为关键照明表面,为主要的向前杂散光来源。为量化望远镜的杂散光抑制能力,一般通过点源透射比(PST)进行描述。其定义为:

$$\text{PST} = \frac{E_{\text{SL}}}{E_{\text{in}}} \quad (10)$$

其中: E_{SL} 为出瞳处由杂散光引起的辐射照度, E_{in} 为入瞳处的辐射照度。通过光线追迹得到 PST 随入射光与光轴夹角的变化情况如图9(彩图见期刊电子版)蓝色曲线所示。当入射太阳光的角度为60°时, PST 为 8.7×10^{-9} 。随着入射角度的增加,入射到光学系统的能量逐渐减弱。

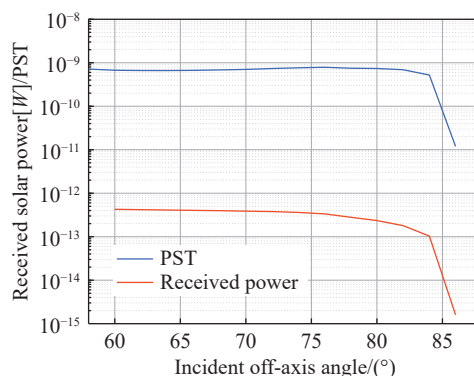


图9 空间引力波望远镜 PST 与接收到的杂散光功率
Fig. 9 The PST and the received stray light powers of the spaceborne gravitational wave telescope

将第三节计算得到的入射太阳辐射通量带入光学系统,可以得到太阳接收到的功率。结果如图9中橙色曲线所示。当 $\theta_{\text{sun}} = 60^\circ$ 时,峰值功率为 $3.9 \times 10^{-12} \text{ W}$ 。结果表明该系统对前向杂散光有良好的抑制能力。

7 结 论

根据空间引力波探测计划,本文对空间引力波望远镜非相干前向杂散光展开研究。首先,基于空间轨道数据,对引力波望远镜在轨全年光照进行计算。然后,对超光滑表面进行形貌学与散射学测量。实验结果显示:正入射情况下,光学镜面的散射损失为0.0055%,消光表面的散射损失为0.83%。最后,将光学表面的散射结果带入到光学系统中,并针对杂散光对光学系统进行优

化。当入射光与光轴夹角为 60° 时,出瞳处的杂散辐射为 $3.9 \times 10^{-12} \text{W}$,对应点源透射比为 8.7×10^{-9} 。结合空间引力波望远镜轨道构型与优化设计,可以得出以下结论:由太阳照射航天器引起的非相干杂散光对光学系统的影响较小,通过本文的结构设计和表面处理可以得到良好地抑制。对于空间环境引起的杂散光,接下来的工作应考虑空间环境中,高能粒子对镜面结构的破坏和支架热弹性变形对望远镜输出的影响。此外,还应考虑星间尘土吸附在镜面上所产生的杂散光等。

参考文献:

- [1] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al.*. The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A108.
- [2] 罗子人,白姍,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)
- [3] BILLING H, WINKLER W, SCHILLING R, *et al.*. The munich gravitational wave detector using laser interferometry[M]//MEYSTRE P, SCULLY M O. *Quantum Optics, Experimental Gravity, and Measurement Theory*. New York: Springer, 1983: 525-566.
- [4] MAISCHBERGER K, RÜDIGER A, SCHILLING R, *et al.*. High precision laser interferometry for detection of gravitational radiation[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Laser Spectroscopy V*, Springer, 1981: 25-32.
- [5] SASSO C P, MANA G, MOTTINI S. The LISA interferometer: impact of stray light on the phase of the heterodyne signal[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36(7): 075015.
- [6] CANUEL B, GENIN E, VAJENTE G, *et al.*. Displacement noise from back scattering and specular reflection of input optics in advanced gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10546-10562.
- [7] LENG R K, WANG ZH, FANG CH, *et al.*. Backscattering estimation of a tilted spherical cap for different kinds of optical scattering[J]. *Optics*, 2022, 3(2): 177-190.
- [8] 李卓,王有亮,郑建华,等.空间引力波探测任务的入轨误差分析[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 493-502.
LI ZH, WANG Y L, ZHENG J H, *et al.*. Injection error analysis of space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 493-502. (in Chinese)
- [9] 王智,马军,李静秋.空间引力波探测计划-LISA系统设计要点[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 980-987.
WANG ZH, MA J, LI J Q. Space-based gravitational wave detection mission: design highlights of LISA system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 980-987. (in Chinese)
- [10] 李建聪,林宏安,罗佳雄,等.空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 761-769.
LI J C, LIN H A, LUO J X, *et al.*. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 761-769. (in Chinese)
- [11] 王智,沙巍,陈哲,等.空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 131-151.
WANG ZH, SHA W, CHEN ZH, *et al.*. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 131-151. (in Chinese)
- [12] SANJUAN J, MUELLER G, LIVAS J, *et al.*. LISA telescope spacer design investigations[C]. *38th COSPAR Scientific Assembly*, COSOAR, 2010.
- [13] 向诗红,张涛.利用STK计算卫星外表面接收的太阳直接辐射[J]. *红外技术*, 2007, 29(9): 508-511.
XIANG SH H, ZHANG T. Calculation of solar direct radiation on the satellite external surface using STK[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(9): 508-511. (in Chinese)
- [14] BREAUULT R P. Vane structure design trade-off and performance analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 967: 90-117.

作者简介:



冷荣宽(1994—),男,吉林长春人,博士研究生,2021年于德国耶拿大学获得光子学硕士学位,曾工作于 Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering (IOF)。主要从事散射光学与杂散光研究。E-mail: lengrongkuan@126.com



王 上(1996—),男,吉林长春人,2021年于中国科学院大学获得硕士学位,现就职于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要从事光机结构与工程分析工作。E-mail: ws790402497@163.com



王 智(1978—),男,山东寿光人,博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员、博士生导师,国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院双聘教授,长春理工大学双聘教授,吉林省 B 类(国家级领军)人才,主要从事引力波相关领域研究。E-mail: wz070611@126.com