

引用格式: LIANG Rong, ZHOU Xiaojun, ZOU Chunbo, et al. Optical Design of High-compression Ratio and Low-wavefront Error Gravitational Wave Detection Telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0122002

梁荣,周晓军,邹纯博,等. 高倍率低波前畸变引力波探测望远镜的光学设计[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0122002

# 高倍率低波前畸变引力波探测望远镜的光学设计

梁荣<sup>1,2</sup>, 周晓军<sup>1</sup>, 邹纯博<sup>3</sup>, 许黄蓉<sup>1</sup>, 李晨曦<sup>1</sup>, 于涛<sup>1,2</sup>, 鱼卫星<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 福州大学, 福州 350116)

**摘要:** 基于离轴四反的方案设计, 从同轴反射系统的理论出发, 结合高倍率, 低波前畸变, 以及高杂散光抑制比等特点对天琴望远镜的原理系统进行了优化设计。实现了在捕获±200 μrad 视场内系统百倍的压缩倍率, 其入瞳直径 300 mm, 波前误差优于  $\lambda/80$ 。提高三四镜之间光线转折角度进行杂散光抑制, 在保证高质量波前的条件下, 其三镜的偏角优化结果为  $5.5^\circ$ , 且三镜为平面镜的引入, 降低了后期加工装调的难度。为了对原理系统的加工装调以及杂散光抑制能力进行验证, 建立了该系统下 0.5 倍的缩比系统, 实现了缩比系统的波前误差优于  $\lambda/175$ 。经公差分析, 原理系统有 90% 的累积概率其波前误差优于  $\lambda/40$ , 满足引力波望远镜的指标要求。

**关键词:** 引力波望远镜; 离轴四反; 高倍率; 杂散光抑制

中图分类号: TH744

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245301.0122002

## 0 引言

爱因斯坦的广义相对论提出能量和质量是可以互相交换的, 并且空间、时空与任意存在的物质和辐射的能量及其运动相关。据此推断, 黑洞或者巨大恒星物体的碰撞会造成引力的扭曲, 并且会向四周扩散<sup>[1]</sup>。这一预言于 2015 年得以证实, 源自宇宙的“水面涟漪”被美国激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO) 捕捉到, 并于 2016 年被证实是由双黑洞合并所产生的引力波击中地球所引起<sup>[2-3]</sup>, 这一事件开启了引力波探测的新阶段。引力波探测实质是对其特征振幅值进行测量, 大质量天体所发射的引力波随着传播距离越远, 其振幅也会越来越微弱, 例如中子双星的合并所产生的引力波传播到地球只有  $10^{-20}$  量级。由于地面引力波的探测受限于地面地震波的干扰, 因此要探测更为宽泛的波段以及更为微弱的引力波信号, 空间的引力波探测将成为下一步研究内容。典型的如由欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 和美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 合作的激光干涉空间天线 (Laser Interferometer Space Antenna, LISA) 将于 2034 年发射<sup>[4]</sup>, 如今该计划已由欧空局转为 e-LISA 计划, 具体内容是在以太阳为中心的开普勒轨道上, 由三个航天器组合成为一个等边三角形, 每条边长为 250 万公里, 其中任意两条边形成一个迈克尔逊干涉仪, 用于探测由引力波所引起的悬挂检验质量的微位移。

目前国内有两个空间引力波探测计划, 分别是中科院发起的边长为 300 万公里“太极计划”<sup>[5-6]</sup> 和中山大学发起的边长为 17 万公里的“天琴计划”<sup>[7-8]</sup>。这两个计划轨道以及边长的不同, 将实现探测引力波频率的互补。在引力波探测中, 望远镜作为核心部件之一, 其功能有两个方面: 1) 将本地小口径为瓦能量的高斯激

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFC2202002), 中国科学院特别研究助理项目 (No. J22-067-III)

第一作者: 梁荣, lovroso\_cn@163.com

通讯作者: 鱼卫星, yuwx@opt.ac.cn

收稿日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

光光束扩束为望远镜口径大小的激光并向对面百万公里外的航天基站发送;2)接收来自对方基站发送的经远距离传输的几百皮瓦的激光信号,经望远镜截取口径内其光束波面接近于平顶光束。为了使接收光束的波前接近理想平面波,因此要求望远镜的出射波前需优于 $\lambda/30$ 。同时由于发射能量与接收信号巨大的能量差,因此本地激光望远镜的后向杂散光需达到入射能量的 $10^{-10}$ 。在满足一定的信噪比需求的入瞳直径下,出瞳位置处的口径越小,到达实际探测器的后向散射光能量越小。因此在后续激光外差检测系统所需求的配准口径的基础上,尽可能降低望远镜的出瞳直径,进而产生一个高压缩倍率的望远镜。目前在LISA的方案设计中,原理样机口径为200 mm,压缩倍率为40倍,然而发射望远镜的口径为300 mm,压缩倍率为134倍<sup>[9]</sup>。国内“太极计划”以及“天琴计划”望远镜设计倍率基本为40倍(口径为200 mm)<sup>[10]</sup>或者60倍(口径为300 mm),因此对于高倍率、低波前畸变以及高信杂比的望远镜设计仍然需要探索与研究。由于系统严苛的后向散射光的要求及通过后期机械方法进行杂散光抑制改善效果有限,因此在前期光学设计过程中需考虑系统的杂散光抑制能力。同时应综合考虑光学系统的波前质量、压缩倍率、杂散光性能、紧凑性、加工工艺等因素,便于满足引力波探测的应用需求。

为此,本文基于“天琴计划”项目百倍的压缩倍率,优于 $\lambda/40$ 的出射波前以及小于 $10^{-10}$ 的杂散光指标要求,对引力波望远镜的原理系统进行优化设计。同时为前期验证引力波望远镜系统的加工装调以及杂散光的性能,在该原理系统的设计结果基础上缩放0.5倍形成一个缩比系统,本文将围绕这两个系统进行分析研究。

## 1 理论推导

引力波望远镜具体的设计指标要求如表1所示,其中望远镜的入瞳直径为300 mm,压缩倍率为百倍,因此出瞳直径为3 mm,同时在捕获视场 $\pm 200 \mu\text{rad}$ 下,实际出波前畸变需优于 $\lambda/40$ 。从卫星的尺寸,轻量,紧凑型等要求出发,反射式系统在空间应用中占有绝对优势。其中典型的光学结构有同轴的卡塞格林结构以及离轴多反结构。同轴的卡塞格林式系统一般采用抛物面主镜以及双曲面次镜,系统因没有像差且结构简单而广泛应用。但是该系统也存在明显的缺点,由于同轴,次镜的存在会造成中心遮拦,这不仅会对激光能量的发射造成拦截,而且会阻碍来自对方航天器信号光束的接收,大幅降低信号光的能量。并且由于次镜机械结构在光路中,又会引入新的杂散光来源。因此目前最为典型的激光望远镜光学方案为离轴四反系统<sup>[11-12]</sup>。

表1 望远镜系统关键技术指标  
Table 1 Key technical specifications of telescope

Parameter	Specification
Wavelength/nm	1 064
Entrance pupil diameter/mm	300
Afocal magnification	100×
Acquisition field/ $\mu\text{rad}$	$\pm 200$
Far-field wavefront quality	$\lambda/40@1\ 064\ \text{nm}$
Scattered light power	$10^{-10}$ of laser power

离轴四反望远镜可分为两个成像系统去研究,一个是由主次镜构成长焦部分,另一个是三四镜构成短焦部分,两部分进行像差补偿来实现高倍率的压缩比以及高质量的波前。长焦部分是典型的卡塞格林结构,主镜为抛物面,次镜为双曲面,短焦部分典型的构成形式是双球面。主次镜部分的理论推导中,主次镜初始结构是同轴两反结构,如图1所示。 $R_1$ 、 $R_2$ 分别是主次镜的曲率半径, $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 是主次镜二次曲面系数, $d$ 为主次镜之间的距离,次镜对主镜的遮拦比为 $\alpha$ ,次镜放大率 $\beta_1$ 。

由于系统整体为无焦系统,因此主镜的物距 $l_1 = \infty$ ,主镜入射高度 $h_1 = 150\ \text{mm}$ ,次镜边缘光线的入射高度为 $h_2$ ,物方孔径角 $u_1 = 0$ 。取成像点位于主镜位置,则 $l_2' = d$ , $f_1'$ 为主镜的焦距, $F_1$ 为长焦系统的组合焦距。

$$\begin{cases} h_2 = h_1 \times \alpha \\ \beta_1 = \frac{f_1'(1-\alpha)}{\alpha f_1'} \\ F_1 = \beta_1 f_1' \end{cases} \quad (1)$$

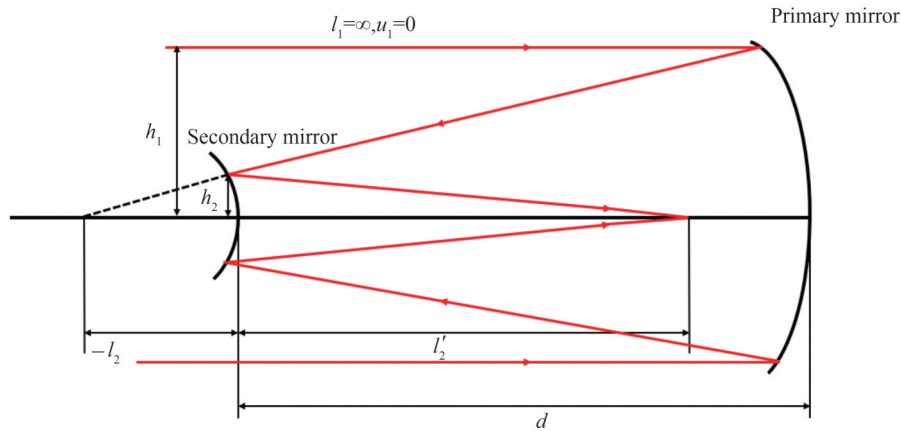


图1 同轴两反光学初始结构示意图  
Fig. 1 Initial coaxial two-mirror optical structure

$$\begin{cases} l_2' = d \\ R_1 = 2f_1' \\ R_2 = \frac{\alpha\beta_1}{\beta_1 + 1} R_1 \\ e_2'^2 = \frac{(1 - \beta_1)^2}{(1 + \beta_1)^2} \end{cases} \quad (2)$$

按照式(1)、(2),将参数带入,计算出主次镜的初始结构参数。要实现百倍的压缩比,则垂轴放大率 $\beta$ 为

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} = \frac{F_1}{F_2} = 100 \quad (3)$$

且光学系统处于同一种介质中 $n = n'$ ,其角放大率 $\gamma$ 为

$$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

式(3)中,三四镜组合焦距为 $F_2$ , $D_1$ 为系统的入瞳直径, $D_2$ 为出瞳直径, $u$ 为物方孔径角, $u'$ 为像方孔径角。为了降低次镜的加工难度(次镜曲率半径过小),适当增大主次镜的组合焦距 $F_1$ ,在保证百倍压缩比的条件下,需要增加三四镜的组合焦距 $F_2$ 。优化后卡式系统的结构参数为: $R_1=1\,248.802\text{ mm}$ , $R_2=50.871\text{ mm}$ , $d=600\text{ mm}$ , $e_1'^2=1$ , $e_2'^2=1.177$ 。两反系统的光学结构布局以及成像质量如图2(a)、(b)所示,从图2(b)中可见各个视场内的弥散斑均在艾里斑范围内,成像质量达到衍射极限。

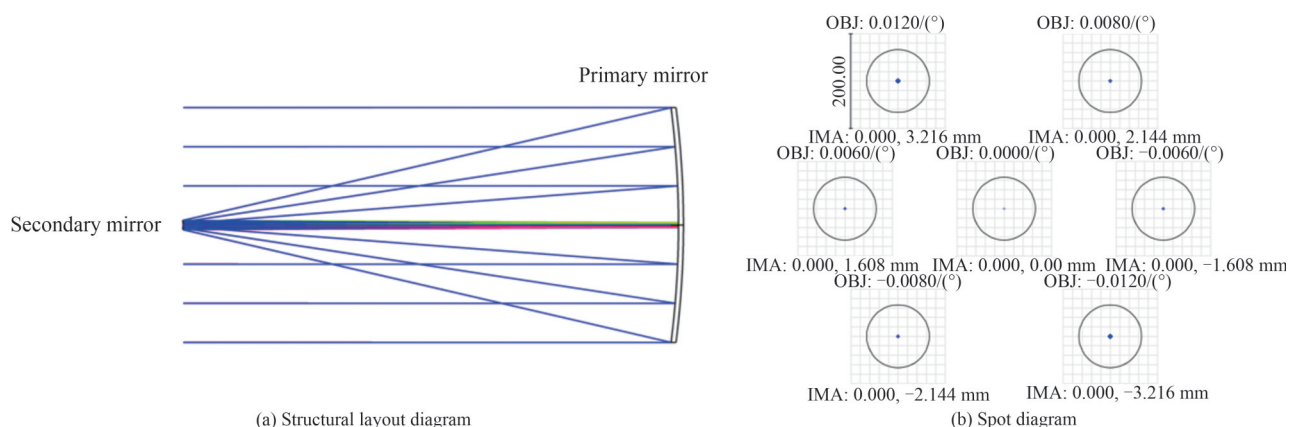


图2 同轴两反光学结构图和点列图  
Fig. 2 The results of coaxial RC design

## 2 优化设计

在同轴两反初始结构的基础上,对主镜进行孔径离轴来消除次镜引起的中心遮拦的影响。选取离轴量为 220 mm,同时添加三四镜,并对三四镜赋予一定的倾斜离轴量,确保系统有位于四镜后的实出瞳。在优化的过程中,仍需要考虑以下几个因素。

### 2.1 超高倍率

作为收发一体的光学系统,与 40 倍、60 倍压缩倍率相比,百倍的压缩倍率要求三四镜的组合焦距更短。从式(3)可知,要实现百倍压缩倍率,有两种方式:1)保持主次镜组合焦距  $F_1$  不变,减小三四镜的组合焦距  $F_2$ ,这种方式会提高系统的紧凑性,然而会增加三四镜的聚焦能力,聚焦效应越强,镜面加工难度越高并且由于三四镜表面光洁度所带来的散射效应越明显,使得后向散射光能量增强;2)同时增大长焦和短焦部分的组合焦距  $F_1F_2$ ,这种方式不仅降低了次镜的加工难度,而且降低了三四镜的聚焦效应,但结构尺寸会有所增加。因此综合考虑系统的加工难度和杂散光的抑制能力,本文采用第二种方式来提高系统的压缩倍率,将主次镜组成的长焦部分以及三四镜组成的短焦部分的焦距尽可能增加。

### 2.2 杂散光抑制能力

由于引力波望远镜要求后向杂散光为入射能量的  $10^{-10}$  量级,而加工完成后光阑、遮光罩以及发黑等抑制杂散光的手段改善效果有限,因此在初期光学设计中需要考虑设计结果对于杂散光的抑制能力。由文献<sup>[13]</sup>可知,增加光线转折角,可降低后向散射光能量,为了验证该方式,对初始光学系统进行仿真。在出瞳位置放置一个后向散射光探测器,用于接收由于镜面不完全反射引起的光散射能量。接着删除系统中主次以及三镜,并对四镜表面赋予一定的粗糙度,不断改变四镜偏角,对其进行光线追迹,从而得到由四镜引起的后向散射能量结果,如图 3 所示,在保证出射光水平且与入射光方向平行的情况下,增加四镜的偏角,可降低四镜表面引起的后向杂散光。但是,随着四镜偏角的增大,会引起三四镜纵向距离的增加,则系统的波前误差会随之增加。因此在实现指标要求的波前误差下,最大程度的增大三四镜之间光线的偏角。折中考虑选择三镜偏角为  $5.5^\circ$ ,三四镜之间光线转折角度在  $11^\circ$  以上。

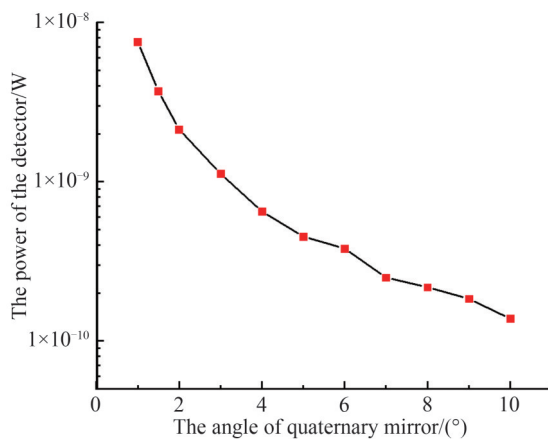


图 3 四镜偏角与后向散射光能量关系

Fig. 3 The backscattered light energy with different deflection angle of quaternary mirror

### 2.3 高质量的波前

望远镜系统对于高质量波前的需求来源于两个方面:1)由于航天器本身存在的呼吸角引起间距为百万公里的两个航天器之间的交互视轴发生抖动,这个抖动将直接耦合为 TTL(Tilt-To-Length)噪声。为降低该噪声,要求远场波面为球面且足够光滑;2)提高航天器间的传输效率,通常使用斯特列尔比作为光束传输能量评价指标,公式为  $1 - (2\pi\sigma)^2$ ,由此可知传输效率与波前误差  $\sigma$  呈负相关,因此在满足高传输效率的同时应有较低的波前误差,详细信息参考文献<sup>[14]</sup>。表 1 中要求捕捉视场内望远镜的实际远场波前要达到  $\lambda/40$ ,因



此光学系统的波前设计值需优于 $\lambda/80$ 。在利用增大三四镜之间光线转折角度来提高系统杂散光抑制能力的基础上,仍然需要保证光学系统拥有高质量的波前,为加工装调留出一定的裕度。

## 2.4 结构紧凑化

基于空间光学系统对于质量轻、体积小要求,结构紧凑化是优化设计过程中一个重要的考虑因素。在原理系统中,主次镜之间纵向距离不仅要考虑紧凑特性还需要考虑为后续次镜遮光罩的设计以及机械结构留出一定空间,因此选取孔径离轴量为220 mm,三镜和四镜之间的纵向距离由三四镜之间的夹角决定。为了进一步减小望远镜横向尺寸,主次镜之间的横向距离也尽可能压缩,取主次镜之间距离为600 mm。同时留出足够的出瞳距离,便于与后续激光外差干涉系统有效配准组合,同样从紧凑性的角度考虑,设置出瞳距离三镜后100 mm。

## 3 设计结果与像质评价

原理系统的优化设计结果参数如表2所示,缩比系统为原理系统缩放0.5倍形成,其口径为150 mm。图4为望远镜系统的光路布局。系统主镜(Primary Mirror, PM)采用抛物面,次镜(Secundary Mirror, SM)为双曲面,三镜(Tertiary Mirror, TM)为平面镜,四镜(Quaternary Mirror, QM)为球面镜。平面镜作为三镜的引入,虽然减少一个优化变量,然而增加加工以及装调的便利性,并且由于高倍率的要求,四镜所承担的光焦度并不大,在可加工的范围内。为了便于孔径光阑的固定设计,将孔径光阑置于次镜正上方。由于次镜与三镜之间存在一个非理想中间像面,因此在中间像面处设置视场光阑用来抑制由主次镜引入的视场内杂散光以及由视场外部光源所造成的视场外杂散光。系统出瞳位置处的波像差如图5所示,由图可见,在捕获视场内,两个系统的波前误差均方根误差(Root Mean Square, RMS)均优于 $\lambda/80$ ,其中缩比系统的波前误差RMS均优于 $0.0075\lambda$ ,P-V值均优于 $0.035\lambda$ ,两个系统的波像差RMS设计值均满足指标要求。原理系统的边缘视场系统畸变小于0.0569%,如图6所示。

表2 光学系统的设计参数(300 mm口径)  
Table 2 Design parameters of optical system (the aperture of 300 mm)

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Conic	Tilt/(°)
PM	-1 255.843	-600	-1	—
SM	-62.827	690	-1.187	—
TM	—	-120	—	5.5
QM	333.946	200	—	5.679

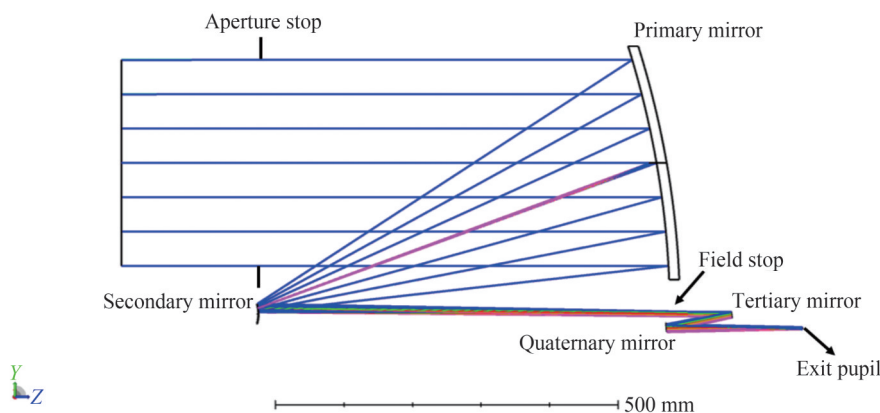


图4 离轴四反望远镜系统光学结构  
Fig. 4 Optical layout of off-axis four-mirror telescope

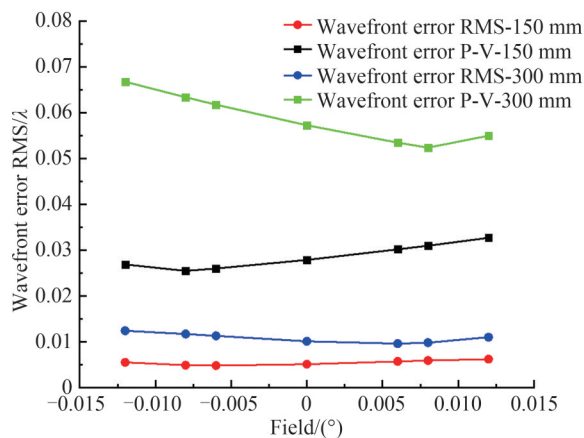


图5 不同系统下的波像差曲线

Fig. 5 The curve of wavefront error with different system

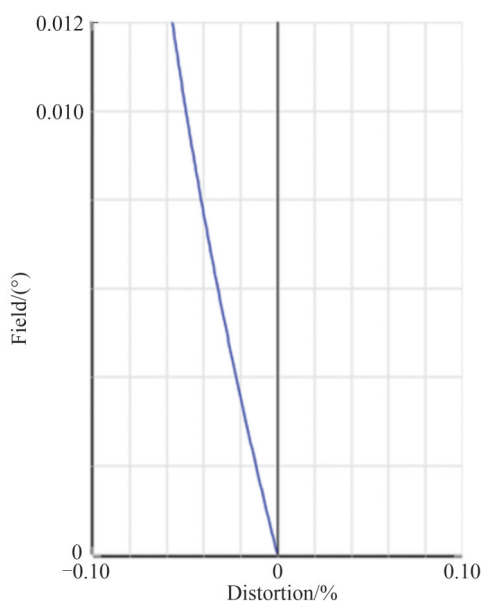


图6 原理系统的畸变图

Fig. 6 Grid distortion diagram of the principle system

## 4 杂散光分析

系统杂散光分析步骤为光学结构的选型与优化、建立相应的机械三维结构、设定相应的表面反射和散射模型、系统整体的杂散光分析、迭代优化设计、完成指标要求。按照上述杂散光分析流程,经过不断地优化迭代,将上述光学设计结果导入杂散光分析软件,对镜面模型进行设置,进行光线追迹后具体的杂散光路径分析结果如表3所示。从表3可知,三四镜所引起的杂散光能量占比达90%以上。由次镜所引起的杂散光因中间像面位置处视场光阑的阻碍,占比最小。原理系统出瞳位置处的后向散射光探测器所接收的能量如图7所示,当入射光能量为1 W且光学镜面满足一定的质量要求时,系统整体的后向散射光能量为 $9.61 \times 10^{-10}$  W。因此该光学设计结果满足高杂散光抑制能力的要求。

表3 原理系统的杂散光路径分析

Table 3 Stray light path analysis of the principle system

Ray paths	Path	No. rays	Absorbed flux	Percentage of total
1	Emitted→QM→TM(scatter)→QM→detector	199	$5.0334088 \times 10^{-10}$	52.36
2	Emitted→QM(scatter)→detector	144	$3.6789633 \times 10^{-10}$	38.27
3	Emitted→QM→TM→SM(scatter)→TM→QM→detector	36	$9.0148520 \times 10^{-11}$	9.38

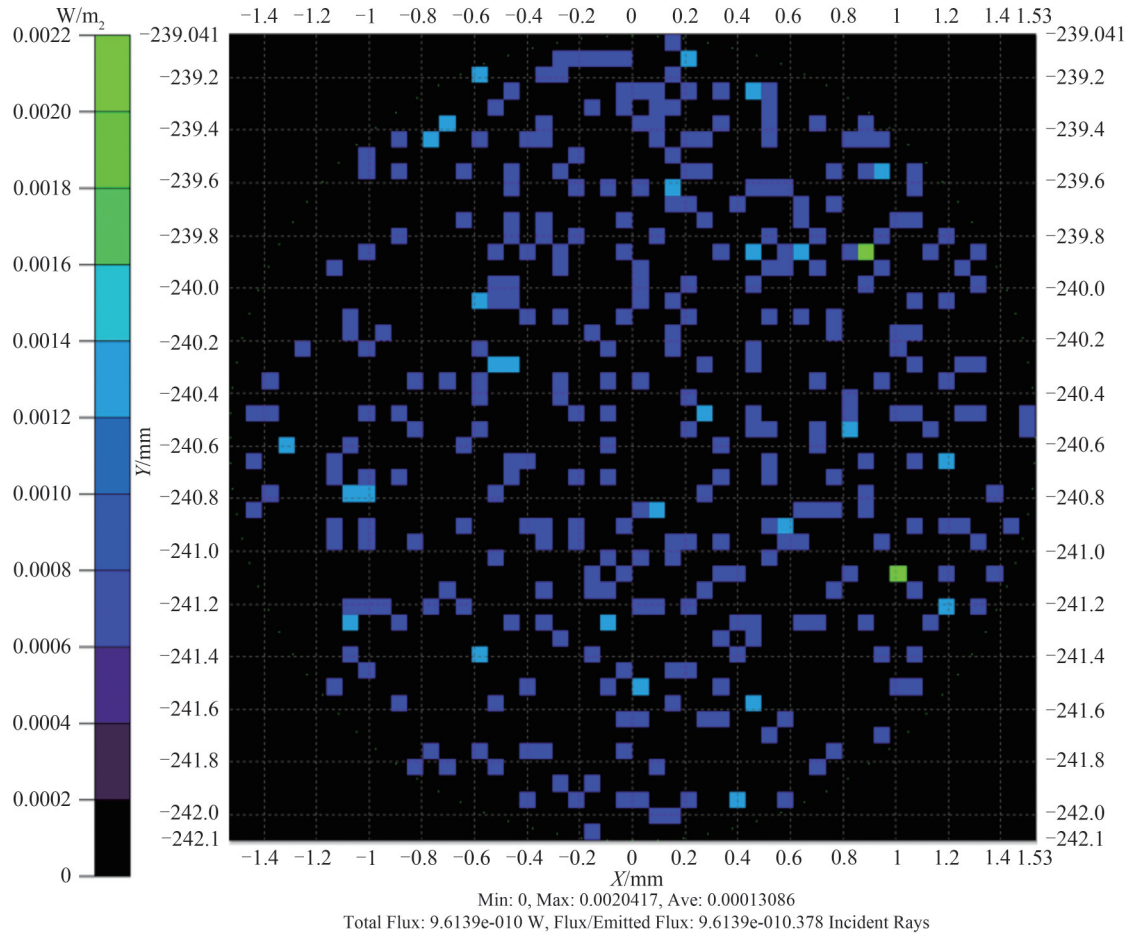


图7 原理系统的后向散射光能量分布

Fig. 7 The backscattered light energy distribution diagram of the principle system

## 5 公差分析

光学设计的公差分析包括加工公差以及装调公差。对于该离轴四反无焦系统而言,加工公差包含表面的曲率半径公差、二次曲面系数公差和面型公差RMS。装调公差包含镜面之间的位移公差,以及在X、Y方向的位移公差和倾斜公差。一方面考虑到非球面、球面的加工与装调难度差距,另一方面考虑实际加工与设计结果之间的偏差,对镜面面型误差进行如表4分配,系统的波前误差RMS= $\sqrt{(1/90 \times 2)^2 + (1/90 \times 2)^2 + (1/110 \times 2)^2 + (1/110 \times 2)^2} \times (632.8/1\ 064) = \lambda/41.4 < \lambda/40 (\lambda = 1\ 064\ \text{nm})$ 满足望远镜低波前畸变的要求。通过对国内加工能力调研,该精度要求在可加工能力范围内。

表4 原理系统的面型精度分配结果  
Table 4 The surface figure of principle system

Surface	Surface figure error/RMS( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ )
PM	$\leq \lambda/90$
SM	$\leq \lambda/90$
TM	$\leq \lambda/110$
QM	$\leq \lambda/110$

四个镜面的公差分配结果如表5所示。从灵敏度方面进行分析,主镜的公差最为敏感,包含曲率半径以及X、Y方向的位移量和倾斜量。当平行光入射,抛物面主镜能够完美地满足等光程条件,因而可对平行光束完美成像。然而抛物面只有一条对称轴,对于不沿对称轴入射的平行光线,无法完美成像。即使入射角度很小,成像质量也迅速降低。上述公差分配结果对于入瞳直径为300 mm的原理系统,对于缩比系统的

表5 系统的公差分配结果  
Table 5 Tolerance setting in sensitivity analysis of the principle system

Surface	Tolerances					
	Radius	Thickness	Decenter X	Decenter Y	Tilt X	Tilt Y
PM	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1.8''$	$\pm 1.8''$
SM	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 3.6''$	$\pm 3.6''$
TM	—	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 36''$	$\pm 36''$
QM	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 36''$	$\pm 36''$

公差分析相比于原理系统公差分配结果会更为宽松。基于该系统高质量波前的要求以及对于系统公差的敏感性,采用高精度的磁流变加工方式进行加工,并使用Zygo干涉仪进行精密装配检测。

在表5的分配结果下,经蒙特卡洛分析500次所得到的分析结果如表6所示。蒙特卡洛公差分析是对每个参数引入一个在设置值范围内的随机扰动,进而分析出相应评价指标的变化。从表6中可见,系统有90%累积概率其波前误差(Wavefront Error, WFE)RMS小于 $0.021\lambda$ 。

表6 波前误差累积概率  
Table 6 Cumulative probability of wavefront error RMS

Probability	98%	90%	80%	50%	20%	10%	2%
WFE RMS	0.027	0.021	0.017 5	0.012 2	0.007 6	0.006 1	0.004 3

## 6 结论

本文从天琴望远镜的设计指标出发,以同轴两反的理论为基础,优化设计了高压缩倍率、低波前畸变以及高杂散光抑制能力的紧凑型离轴四反原理系统。其入瞳直径为300 mm,压缩倍率为100,在 $\pm 200 \mu\text{rad}$ 捕获视场内出瞳位置处波前误差优于 $\lambda/80$ ( $\lambda=1\ 064 \text{ nm}$ ),且0.5倍缩比系统的波前误差优于 $\lambda/175$ ,两个系统的波前误差均优于 $\lambda/40$ 。并对原理系统的公差做出了分析,满足引力波探测的指标要求。

### 参考文献

- [1] IRVINE J M. General relativity: an einstein centenary survey[J]. Physics Bulletin, 1980, 31(4): 140-140.
  - [2] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
  - [3] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW150914: Implications for the stochastic gravitational-wave background from binary black holes[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(13): 131102.
  - [4] CORNELISSE J W. Lisa mission and system design[J]. Classical and Quantum Gravity, 1996, 13(11A): A251.
  - [5] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time[J]. Nature, 2016, 531(7593): 150-151.
  - [6] HU Wenrui, WU Yueliang. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. National Science Review, 2017, 4(5): 685-686.
  - [7] LUO Jun, CHEN Lisheng, DUAN Huizong, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
  - [8] MILYUKOV V K. TianQin space-based gravitational wave detector: Key technologies and current state of implementation[J]. Astronomy Reports, 2020, 64: 1067-1077.
  - [9] SANKAR S R, LIVAS J. Optical alignment and wavefront error demonstration of a prototype LISA telescope[J]. Classical and Quantum Gravity, 2020, 37(6): 065005.
  - [10] FAN Zichao, ZHAO Lujia, PENG Jianguo, et al. Recommended high performance telescope system design for the TianQin project[J]. Classical and Quantum Gravity, 2022, 39(19): 195017.
  - [11] SANKAR S R, LIVAS J C. Optical telescope design for a space-based gravitational-wave mission[C]. Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, SPIE, 2014, 9143: 283-289.
  - [12] Escudero S I, HESKE A, LIVAS J C. A telescope for lisa - the laser interferometer space antenna[J]. Advanced Optical Technologies, 2018, 7(6): 395-400.
  - [13] LIVAS J C, ARSENOVIC P, CROW J A, et al. Telescopes for space-based gravitational wave missions[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 091811.
  - [14] WANG Zhi, SHA Wei, CHEN Zhe, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. Chinese Optics, 2018, 11(1): 131-151.
- 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.



## Optical Design of High-compression Ratio and Low-wavefront Error Gravitational Wave Detection Telescope

LIANG Rong<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiaojun<sup>1</sup>, ZOU Chunbo<sup>3</sup>, XU Huangrong<sup>1</sup>, LI Chenxi<sup>1</sup>,  
YU Tao<sup>1,2</sup>, YU Weixing<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Since the first detection of gravitational wave, gravitational wave astronomy has advanced swiftly. As a crucial component of the detection system, the gravitational wave telescope is obviously crucial. The highly stable laser telescope with a low wavefront error and a high suppression ratio of stray light is a crucial medium for the detection of gravitational waves, as it must not only transmit energy in the order of watt to distant spacecraft, but also receive weak laser signals in the order of picowatt from other satellite base station located millions of kilometers away. Therefore, the backward stray light of the local telescope is required to reach  $10^{-10}$  orders of the incident laser power. Considering the requirements of small size, light weight, and high compactness, it is clear that the benefits of a reflective system cannot be compared to those of a transmission design. In general, the coaxial Cassegrain structure and off-axis multi-mirror structure are utilized. The off-axis design is preferred over the coaxial design for gravitational wave telescopes due to advantages such as the ability to optimize multiple parameters, the absence of a central obstruction, and the high energy collection capacity. In this paper, based on the design of off-axis four-mirror and the theory of coaxial reflection system, we designed and optimized the telescope combined with the characteristics of high magnification, low wavefront error and high suppression ratio of stray light. In the capture field of view of  $\pm 200 \mu\text{rad}$ , we realized the compression ratio of 100 of telescope, and the entrance pupil diameter of the principle system is 300 mm, whose design result of wavefront error is less than  $\lambda/80$  because the actual outgoing wavefront error must be less than  $\lambda/40$ . The system distortion of the edge field is less than 0.056 9%. In order to verify the processing and alignment of the principle system as well as the ability of stray light suppression of it, a 0.5 times scale system is established beneath the system with a wavefront error less than  $\lambda/175$ . Internal stray light is suppressed by increasing the light turning angle between the tertiary mirror and quaternary mirror on the condition of low wavefront error of  $\lambda/80$ . The optimized deflection angle of the tertiary mirror is 5.5 degrees, and the tertiary mirror is the plane surface, which can significantly reduce the difficulty of processing and alignment. A simulation of stray light is applied to analyze the stray light of our designed telescope. The steps of stray light analysis consist of the following steps: 1) selection and optimization of the optical structure; 2) model setting of the corresponding reflection, scattering, and absorption surfaces; 3) stray light analysis of the entire system; 4) iterative optimization design; 5) fulfillment of the system's requirements. Therefore, we investigated the optical paths and power of the backscattered stray light. After positioning the field stop in the middle image plane between the secondary mirror and the tertiary mirror, the proportion of the stray light caused by the secondary mirror is the smallest. The stray light energy caused by the tertiary mirror and the quaternary mirror is the largest, which can reach more than 90%. The tolerance of the optical design is also analyzed, and the results of the analysis indicate that the tolerance of the parabolic primary mirror has the strongest impact on the wavefront error of the system. The principle system has a 90% cumulative probability wavefront error less than  $\lambda/40$ , which can satisfy the design requirement of gravitational wave detection and have the potential to play a significant role in future missions aimed at low wavefront error, high magnification and a high suppression ratio of stray light in the telescope while detecting gravitational waves.

**Key words:** Telescope of gravitational wave detection; Off-axis four-mirror optical system; High afocal magnification; Suppression of stray light

**OCIS Codes:** 110.6770; 080.4035; 230.4555; 290.2648