

# 大倍率离轴无焦四反光学系统设计

陈胜楠<sup>1</sup>, 姜会林<sup>1\*</sup>, 王春艳<sup>1</sup>, 陈哲<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 空间引力波探测任务采用的是外差法激光干涉测量技术, 其对系统的噪声和精度要求极为苛刻。望远镜是引力波探测天文台的重要组成部分, 起到激光信号收发的作用, 其光学系统应具备大倍率、高像质、杂光抑制能力强、波前误差一致性好的特点。针对上述要求, 对大倍率离轴四反无焦光学系统进行了设计和优化。基于初级像差理论阐述了初始结构的求解方法。系统具有中间像面和可用的实出瞳, 便于杂光抑制和与后端科学干涉仪的承接。优化过程中, 建立了波前一致性优化函数, 通过优化设计, 系统入瞳直径为 200 mm, 放大倍率为 40 倍, 科学视场为  $\pm 8 \mu\text{rad}$ , 波前误差 RMS 值优于  $0.005\lambda$ , PV 值优于  $0.023\lambda$  ( $\lambda = 1\ 064 \text{ nm}$ ), 波前一致性残差 RMS 值优于  $0.000\ 8\lambda$  ( $\lambda = 1\ 064 \text{ nm}$ ), 在捕获视场  $\pm 200 \mu\text{rad}$  内的成像质量均接近衍射极限, 并对系统公差进行了分析, 满足引力波探测的应用需求。

**关键词:** 望远镜; 空间引力波探测; 离轴四反系统; 像质评价; 公差分析

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20201301.0179

## Design of off-axis four-mirror afocal optical system with high magnification

CHEN Sheng-nan<sup>1</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1\*</sup>, WANG Chun-yan<sup>1</sup>, CHEN Zhe<sup>2</sup>

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: hljiang@cust.edu.cn

**Abstract:** The space gravitational wave detection is realized by adopting the technology of heterodyne laser interferometry. The accuracy and noise level of the measurement are extremely rigorous. As an important part of space-based gravitational wave observatory, telescope plays the role of laser signal transceiver, and is characterized by high magnification, high image quality, high similarity of wave-front error over the field of view and extraordinary ability to suppress stray light. Aiming at above requirements, methods of design and analysis of the off-axis four-mirror afocal optical system with high magnification are investigated. Based on the theory of primary aberration, the design method of initial structure is explored. The system has an intermediate image plane and an available exit pupil, which facilitates stray light suppression and integration with the scientific in-

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(No. 91838301)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 91838301)

terferometer. The wave-front similarity merit function is established. After optimization, the entrance pupil diameter is 200 mm, the magnification is 40. The Root-Mean-Square (RMS) wave-front error is better than  $0.005\lambda$  and the Peak-to-Valley (PV) value is less than  $0.023\lambda$ , moreover, the RMS of wave-front similarity residuals are better than  $0.0008\lambda$  ( $\lambda = 1064\text{ nm}$ ) within the  $\pm 8\ \mu\text{rad}$  scientific field of view. Over the field of regard for acquisition, the imaging quality is close to the diffraction limit. The tolerance of the system is analyzed and meets the requirements of space-based gravitational wave detection.

**Key words:** telescope; space gravitational wave detection; off-axis four-mirror optical system; image quality evaluation; tolerance analysis

## 1 引言

区别于地面引力波探测采用的零差法干涉测量技术,空间引力波探测利用航天器相对运动产生的多普勒频移,通过外差法激光干涉测量技术,测量空间自由悬浮质量块间距离的周期性变化,解算引力波信号。其测量基线长达百万公里量级,有效提高了引力应变的灵敏度,使得对中低频  $0.1\text{ mHz} \sim 1.0\text{ Hz}$  引力波的探测成为可能。

目前,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的空间激光干涉引力波探测项目 Laser Interferometer Space Antenna(LISA)<sup>[1]</sup>和中国科学院的空间太极计划<sup>[2]</sup>规划的空间引力波天文台星座均包括三颗在行星轨道上运行的卫星,每颗卫星由两台光学望远镜、惯性传感器以及光学平台组成。

光学望远镜的作用是实现数百万公里间距的两卫星间激光的接收和发射<sup>[3-5]</sup>,其波前质量及稳定性直接影响收发信号的强度及相位分布,从而影响引力波信号的解算精度。美国的 NASA & University of Florida 进行了望远镜原理样机的研制和结构特性的测试,得到了较好的效果<sup>[6]</sup>。

望远镜的设计应避免使用透射元件,以消除温差折射率变化的影响。由于干涉臂长在百万公里量级,望远镜应具备大倍率的特点,在拥有足够的入瞳口径,以保证接收信号强度的同时,出瞳也要与本地参考光束匹配。此外,望远镜系统中的杂散光,尤其是后向散射光,是激光干涉测量噪声的主要来源之一<sup>[3,7]</sup>。

因此,空间激光干涉测量望远镜通常采用四

反无焦光学系统结构。其中,同轴四反系统具有结构紧凑、易于加工的优点,温度变化导致的系统波前误差变化对称性较高,有利于测量噪声的剔除。但作为发射端,次镜轴上存在强烈的后向反射和散射<sup>[8]</sup>。作为接收端,中心遮拦将产生泊松亮斑和波前变形,对于泊松亮斑,虽然可通过设计和制作花瓣形掩模予以控制,但受到工艺和精度的限制,效果难以达到指标要求<sup>[9]</sup>。离轴四反无焦系统结构,不存在中心遮拦,同时具备大倍率、杂光抑制能力强的特点,设计时应全面考虑系统波前质量、杂光性能、加工工艺等因素,以适应引力波探测的应用需求。

## 2 应用需求

为了满足空间引力波探测的要求,望远镜关键技术指标如表 1 所示。其中望远镜的工作波段由干涉测量系统使用的激光器决定,激光光源需在具备极好的频率和相位稳定性的同时拥有较短的波长,以减小由于衍射效应导致的能量损失。捕获视场是指能够建立星间激光链路的视场,即卫星间的相互捕获所需的视场,但受百万公里量级臂长以及光速的影响,考虑卫星在轨指向稳定性,接收端望远镜应位于发射端望远镜的科学视场范围内,才能完成引力波测量任务<sup>[10]</sup>。空间外差法激光干涉测距系统测量光束的角度失调会与干涉测距结果相耦合,产生的 TTL(Tilt-To-Length)噪声是空间引力波探测的第二大噪声源<sup>[11-13]</sup>。如果光学系统科学视场内波前误差一致性较差,当行星轨道上的卫星视轴发生微量变化,望远镜的非对称波前误差也会最终导致 TTL

噪声的产生。此外,为保证信号传播过程中的能量传递效率,同时为系统加工和装调留出充分的余量,应尽可能减小设计残差。

表 1 光学系统指标

**Tab.1 Optical system requirements**

系统参数	技术指标
光学口径/mm	200
工作波长/nm	1 064
捕获视场/ $\mu\text{rad}$	$\pm 200$
科学视场/ $\mu\text{rad}$	$\pm 8$
激光束放大倍数	40
波前质量(科学视场内)	$\leq \lambda/30\text{RMS}(\lambda = 1\ 064\ \text{nm})$

### 3 离轴四反无焦光学系统设计方法

离轴四反光学系统是在同轴四反系统的基础上经过孔径离轴优化得到的<sup>[14]</sup>。为保证接收的信号在出瞳附近与干涉测量系统的四象限计相承接,光学系统应存在实出瞳。此外,综合考虑望远镜对杂光和波前的影响,系统次三镜中应存在中间像面,以便消杂光结构的设计和优化。望远镜光学系统初始结构如图 1 所示, $d_i$ 为镜间距离, $R_i$ 为镜面曲率半径, $k_i$ 为镜面二次曲面系数。结构参数包括次镜对主镜的遮拦比 $\alpha_1$ ,三镜对次镜的遮拦比 $\alpha_2$ ,四镜对三镜的遮拦比 $\alpha_3$ ,以及次镜和三镜的放大率 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。孔径光阑位于主镜,对于无焦系统,主镜物距 $l_1 = \infty$ ,物方孔径角 $u_1 = 0$ ,入射高度 $h_1 = 100$ ,四镜像距 $l_4' = \infty$ ,像方孔径角 $u_4' = 0$ 。系统放大倍率 $\tau = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 = 40$ ,视场 $\omega = 0.000\ 2\ \text{rad}$ 。优化设计时采用孔径离轴消除次镜的中心遮拦,经过初步试算,次镜有效口径 $D_2$ 满足: $5\ \text{mm} < D_2 < 25\ \text{mm}$ 。次镜口径过小,则次三镜间隔较小,不利于杂光的控制和结构排布;次镜口径较大, $\alpha_1$ 随之增加,主镜离轴量增大。由于主镜加工难度最大,初始结构设计时,应优先规划主镜半径及 F 数。考虑次镜口径 $D_2 \approx 15\ \text{mm}$ ,则主镜离轴量 $h_{\text{offset}} \approx 115\ \text{mm}$ ,主镜母镜尺寸 $D_M \approx 430\ \text{mm}$ 。考虑主镜加工工艺,主镜 F 数取 1.25,则取主镜曲率半径 $R_1 = 1\ 075\ \text{mm}$ 。经推导:

$$\begin{cases} R_2 = \frac{R_1 \alpha_1 \beta_1}{1 + \beta_1} \\ R_3 = \frac{R_1 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2}{1 + \beta_2} \\ R_4 = R_1 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \beta_1 \beta_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{R_1(1 - \alpha_1)}{2} \\ d_2 = \frac{R_1 \alpha_1 \beta_1 (1 - \alpha_2)}{2} \\ d_3 = \frac{R_1 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 (1 - \alpha_3)}{2} \end{cases}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,光学系统结构由 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$ 完全决定。系统结构形式为次三镜间存在中间像面的四反结构,则结构参数的取值范围如表 2 所示。

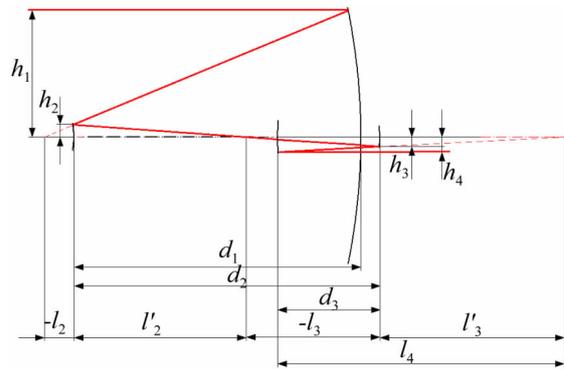


图 1 光学系统初始结构

Fig. 1 Initial structure of optical system

表 2 光学系统的结构参数

**Tab.2 Structural parameters of optical system**

结构参数	取值范围	取值
$\alpha_1$	(0, 1)	0.055 47
$\alpha_2$	( $-\infty, 0$ )	-0.101 75
$\alpha_3$	(0, $\infty$ )	4.432 66
$\beta_1$	( $-\infty, 0$ )	-18.020 53
$\beta_2$	( $-\infty, \infty$ )	-1.130 47

系统光焦度主要由主镜和次镜承担,设计时为控制反射元件尺寸以提高工艺性,实际 $\beta_2$ 的绝对值接近 1。 $\beta_2$ 的绝对值过大,会导致三四镜间隔过大,不利于系统装调;过小则导致四镜尺寸增加,后向散射杂光增加。基于 Seidel 像差理论进行求解,对于引力波望远镜系统而言,由于设计视

场较小,对场曲的要求可以有所放宽。系统出瞳仅为 5 mm,三镜和四镜的口径相对较小,为简化复杂性,令三镜和四镜为球面,即  $k_3 = 0, k_4 = 0$ ,则设计变量包括 5 个结构参数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$  和 2 个二次曲面系数  $k_1, k_2$ ,在优化系统球差、彗差、像散、场曲和畸变后,仍存在多余的自由度控制系统的轮廓尺寸和结构布局。经过优化和求解,结构参数见表 2,初始结构设计结果如图 2 所示。

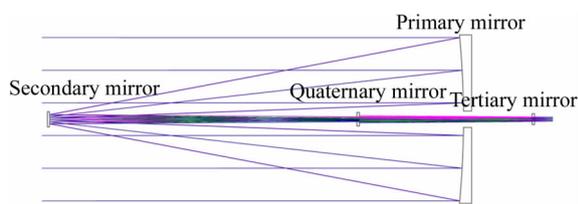


图 2 初始同轴系统结构设计结果

Fig. 2 Result of structure design for initial on-axis optical system

#### 4 光学系统的优化设计

在初始结构的基础上进行孔径离轴以消除中心遮拦,对三镜和四镜进行倾斜设计,确保系统具备可用的实出瞳。优化时,针对科学视场进行波像差的优化,针对捕获视场进行 MTF 的优化,以保证与后续设计的捕获镜头连接后具备良好的像质。优化过程中,合理调整结构布局,将系统光阑调整至主镜前端,控制主、次镜间隔和次镜口径,协调光路的折叠方式和出瞳位置,压缩体积使结构紧凑。

望远镜系统的波前误差会导致 TTL 噪声的产生。不同视场波前误差  $E_{wi}$  可表示为:

$$E_{wi} = E_a + E_{di}, \quad (3)$$

其中,  $i$  表示不同的视场 ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  $E_a$  为全视场平均波前误差,即波前误差的共模部分,  $E_{di}$  为各视场波前误差与平均波前误差  $E_a$  的残差。由  $E_a$  产生的 TTL 噪声可作为系统误差通过标定剔除<sup>[11]</sup>,由残余的  $E_{di}$  产生的 TTL 噪声则会耦合进入测量结果中。因此,在系统优化过程中不仅要尽可能地减小波前误差  $E_{wi}$ ,还要注意控制波前误差的一致性,即控制  $E_{di}$ ,以减小最终的 TTL 噪声水平。

光学系统的波前误差可以由光瞳平面中不同位置光线与主光线间的光程差表示。在望远镜光瞳平面选择  $n$  条光线,则第  $i$  个视场的第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 条光线的光程差为  $OPD_{i,j}$ ,则全视场口径位置  $j$  处的平均光程差可表示为:

$$OPD_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m OPD_{i,j}. \quad (4)$$

则  $E_{di}$  可由不同视场各口径位置光程差与该位置平均光程差的差值的总和来表示:

$$E_{di} = \sum_{j=1}^n |OPD_{i,j} - OPD_j|. \quad (5)$$

而全视场的光程一致性可由  $E_{di}$  的总和来表示:

$$E_d = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |OPD_{i,j} - OPD_j|. \quad (6)$$

优化过程中,在系统科学视场内取  $(0, 0)$ 、 $(5.6 \mu\text{rad}, 0)$ 、 $(8 \mu\text{rad}, 0)$ 、 $(0, 5.6 \mu\text{rad})$ 、 $(0, 8 \mu\text{rad})$ 、 $(0, -5.6 \mu\text{rad})$ 、 $(-8 \mu\text{rad}, 0)$  7 个视场点,在口径范围内取 16 个位置(如图 3 所示),将光程一致性函数  $E_d$  作为优化函数的一部分,进行优化。

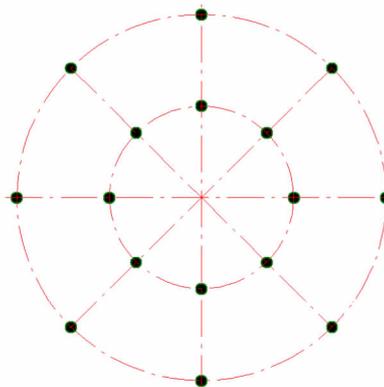


图 3 口径中采样位置的选取

Fig. 3 Selection of sampling positions on the pupil

此外,由于极高的杂光抑制要求,系统对光学元件表面粗糙度的要求极高。为提高系统工艺性,应适当控制反射镜尺寸和光路折转角度。采用离轴光学系统设计,提升次镜表面光线的入射角度和次三镜间隔,并在中间像面设置视场光阑可有效减小次镜产生的后向散射杂光。增加光线在三镜和四镜表面的折转角度,同样可以有效降低系统的后向散射能量。优化过程中,还应考虑光阑、遮光罩、挡光板等机械结构的位置和尺寸,

以减小来自视场外非成像光束的杂散光。为提高次镜的工艺性,需要对其二次曲面系数进行约束,以控制次镜的非球面度。优化设计得到的光学系统结构如图 4 所示,参数如表 3 所示。中心视场主光线在三镜和次镜的折转角度均大于  $15^\circ$ ,次镜的非球面度低于  $6 \mu\text{m}$ ,系统具有较高的杂光抑制能力和工艺性。

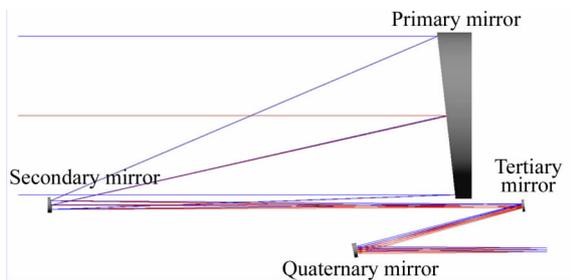


图 4 优化后的光学系统结构

Fig. 4 Optical system structure after optimization

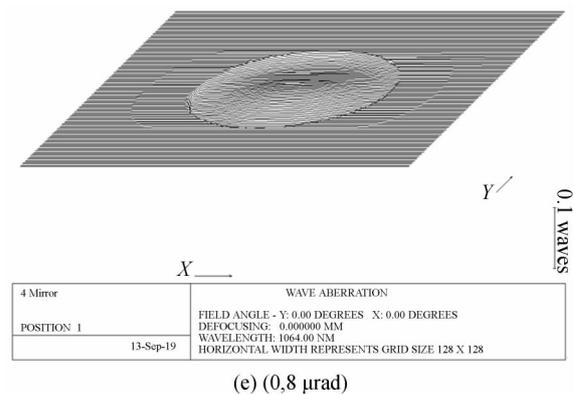
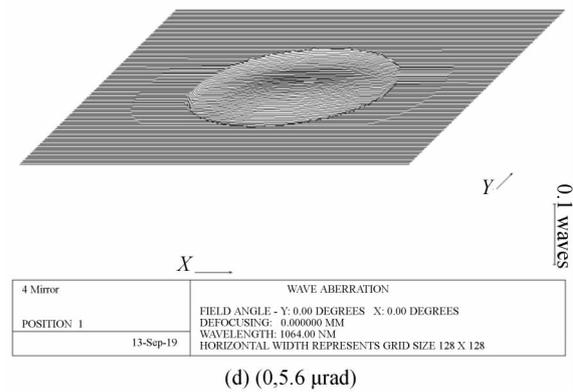
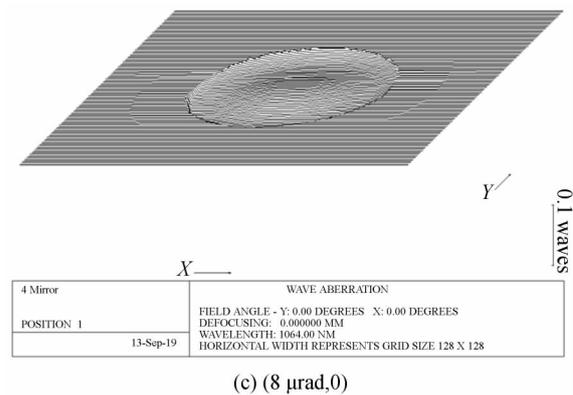
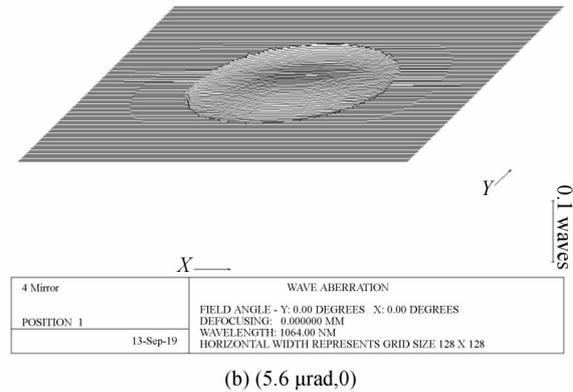
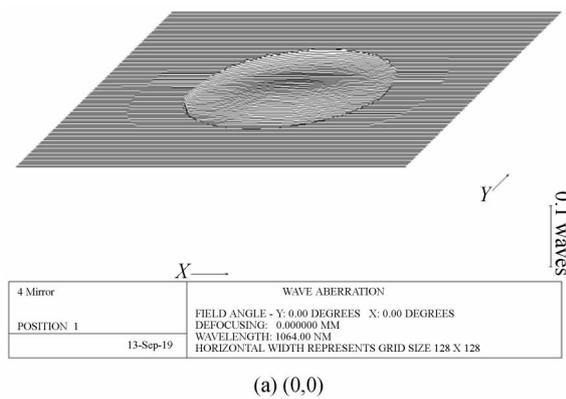
表 3 优化后光学系统的设计参数

Tab.3 Design parameters of optical system after optimization

	半径( mm)	间隔( mm)	二次曲面类型
主镜	-1 075	-507.68	Ellipsoid
次镜	-63.13	591.95	Ellipsoid
三镜	-947.40	-217.58	-
四镜	-543.89	235.46	-

### 5 像质分析

各视场波前误差情况如图 5 所示,波前误差的  $PV$  值和  $RMS$  值见表 4。由表 4 可知,波前误差  $RMS$  值优于  $0.005\lambda$ ,  $PV$  值优于  $0.023\lambda$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ )。



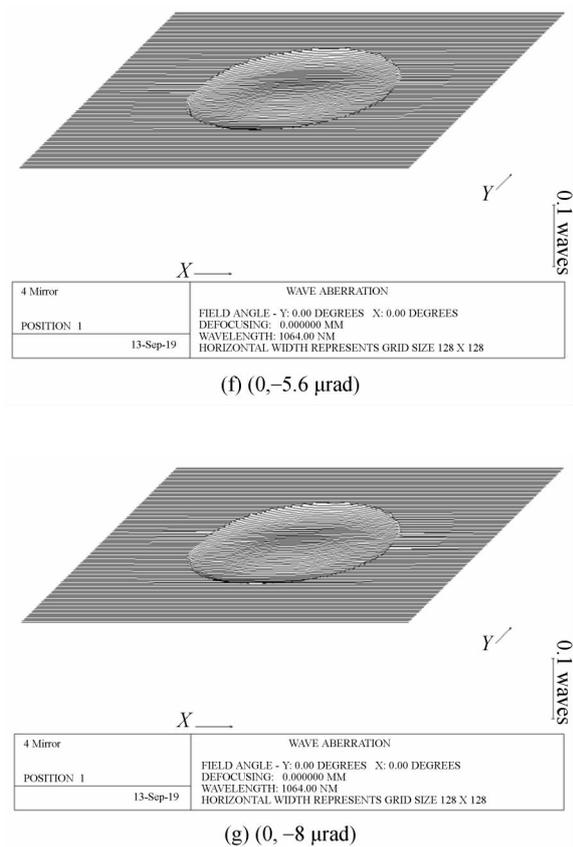


图 5 出瞳不同视场点的波前误差  
Fig.5 Wave-front errors on exit pupil at different field of view points

表 4 出瞳波前误差

Tab.4 Wave-front errors on exit pupil

视场( μrad)	RMS( λ = 1 064 nm)	PV( λ = 1 064 nm)
( 0,0)	0.005λ	0.021λ
( 5.6,0)	0.005λ	0.023λ
( 8.0,0)	0.005λ	0.023λ
( 0,5.6)	0.005λ	0.022λ
( 0,8.0)	0.005λ	0.022λ
( 0, -5.6)	0.004λ	0.021λ
( 0, -8.0)	0.004λ	0.021λ

采用 Zernike 多项式拟合各视场波前误差,并求解平均波前误差,如图 6 所示。其中,RMS 值

为 0.004λ,PV 值为 0.021λ( λ = 1 064 nm)。用各视场波前误差减去平均波前误差,称为各视场波前一致性残差,如图 7 所示。波前一致性残差的 PV 值和 RMS 值见表 5。可见,RMS 值优于 0.001λ,PV 值优于 0.007λ( λ = 1 064 nm)。可见各视场系统波前一致性较好,这对 TTL 系统噪声的标定和消除具有重要意义。捕获视场 MTF 曲线如图 8 所示,可见系统像质接近衍射极限。

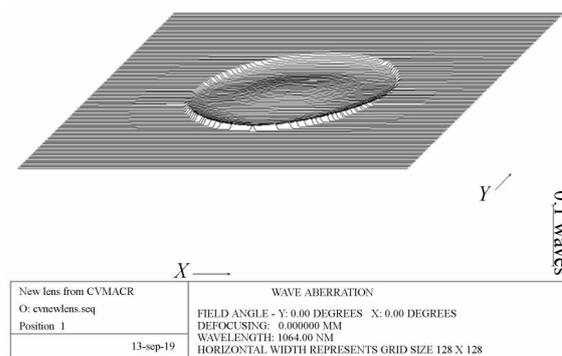
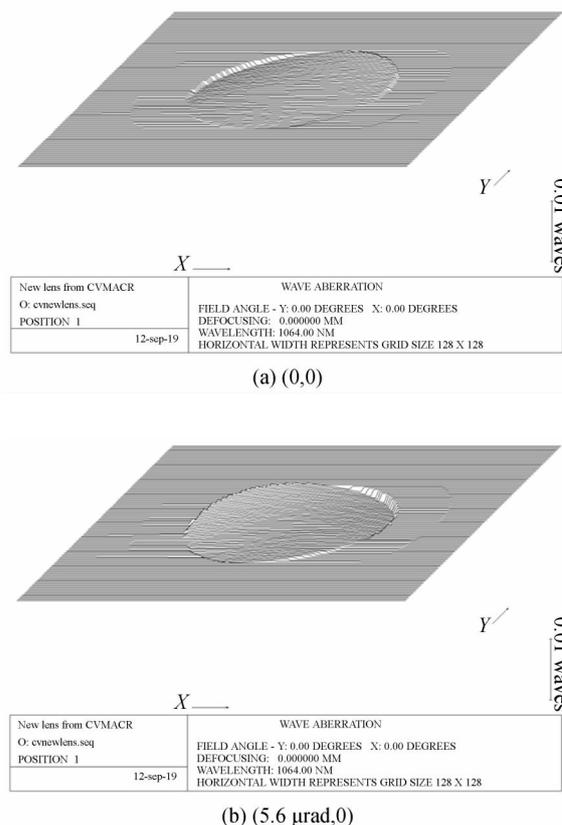
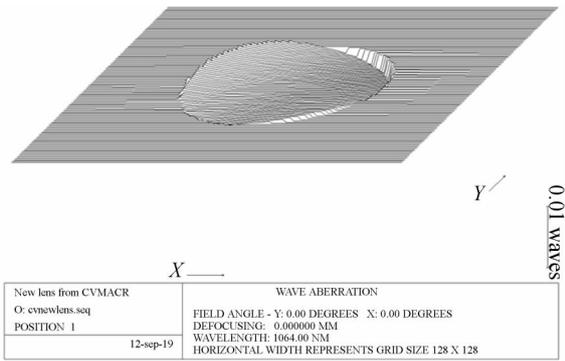
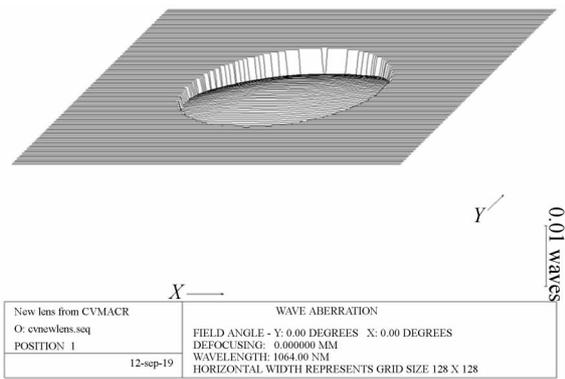


图 6 平均波前误差  
Fig.6 Average wave-front error

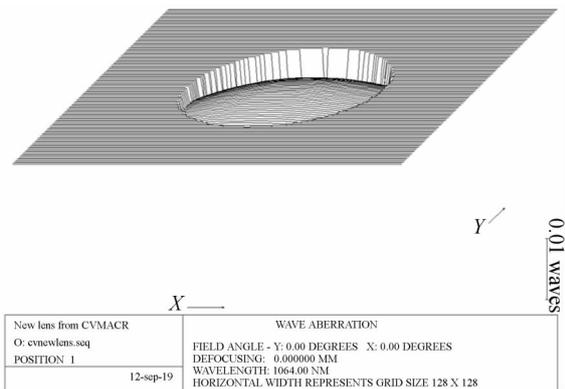




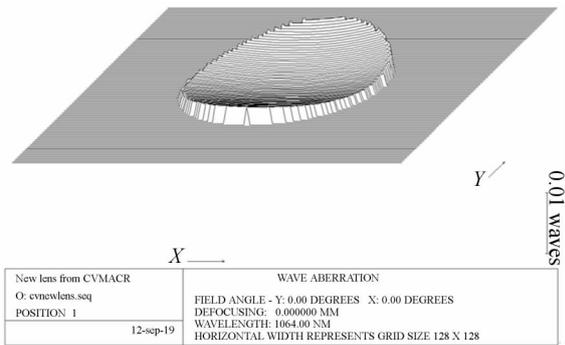
(c) (8 μrad, 0)



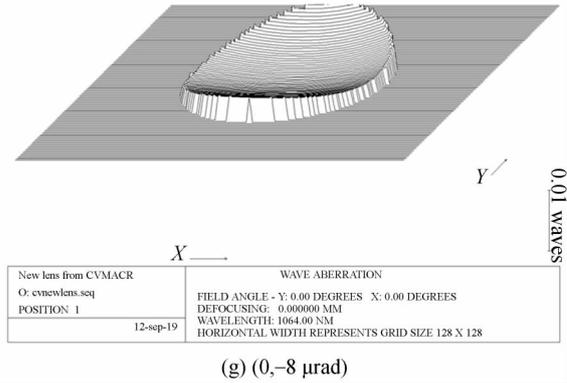
(d) (0,5.6 μrad)



(e) (0,8 μrad)



(f) (0,-5.6 μrad)



(g) (0,-8 μrad)

图 7 不同视场点处的波前一致性残差

Fig. 7 Wave-front similarity residuals at different field-of-view points

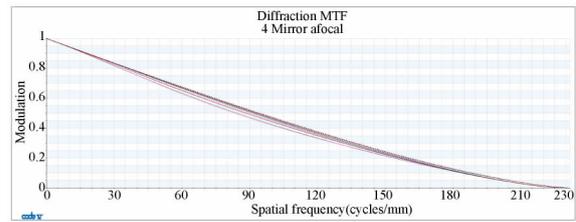


图 8 捕获视场 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of capture field of view

表 5 波前一致性残差

Tab. 5 Wave-front similarity residuals

视场( μrad)	RMS( λ = 1 064 nm)	PV( λ = 1 064 nm)
( 0,0)	0.000 19λ	0.001λ
( 5.6,0)	0.000 35λ	0.003λ
( 8.0,0)	0.000 58λ	0.005λ
( 0,5.6)	0.000 57λ	0.005λ
( 0,8.0)	0.000 79λ	0.007λ
( 0, -5.6)	0.000 57λ	0.005λ
( 0, -8.0)	0.000 79λ	0.007λ

## 6 公差分析

光学系统的公差主要包括加工公差和装调公差。加工公差包括曲率半径公差、二次曲面系数

公差、面型公差(RMS)。离轴四反无焦光学系统的每个反射镜均有 6 个自由度,即镜面坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向的刚体位移,以及绕  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的倾斜<sup>[15]</sup>。坐标系原点位于各镜面中心, $x$  为弧矢方向, $y$  为子午方向, $z$  轴为镜面光轴方向。公差分析时,为保证光学系统全视场像质,以像质分析选用的 7 个视场的波前误差作为性能指标。

通过灵敏度分析可知,主镜公差最为严格,所以装调时可将主镜固定,作为基准,再对三镜和四镜进行粗定位,并最终根据系统波前误差的像差成分对次镜进行精调。根据灵敏度分析的结果,并考虑加工和装调工艺水平对公差进行分配。表 6 给出了离轴四反无焦光学系统的公差分配结果。可见系统中三镜和四镜装调公差较为宽松。除面形误差外的误差源导致的系统波前变化概率曲线如图 9(彩图见期刊电子版)和表 7 所示。则按照表 6 所示的公差,系统由于半径、二次曲面系数和装调误差引起的波前误差  $E_e$  有 80% 以上的概率优于  $0.0076\lambda$  ( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ )。按照误差合成方法,将表 6 中 4 个反射镜的面形误差值带入式(7),得到系统最

终的波前误差估计  $E_f = 1/30.4\lambda$  ( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ ),可见当在轨工作环境发生变化时,只要确保各反射镜失调量在公差范围内,出瞳波前质量即可满足设计要求<sup>[16]</sup>。

$$E_f = \sqrt{\left(\frac{E_{M1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{E_{M2}}{2}\right)^2 + \left(\frac{E_{M3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{E_{M4}}{2}\right)^2 + E_w^2 + E_e^2} \quad (7)$$

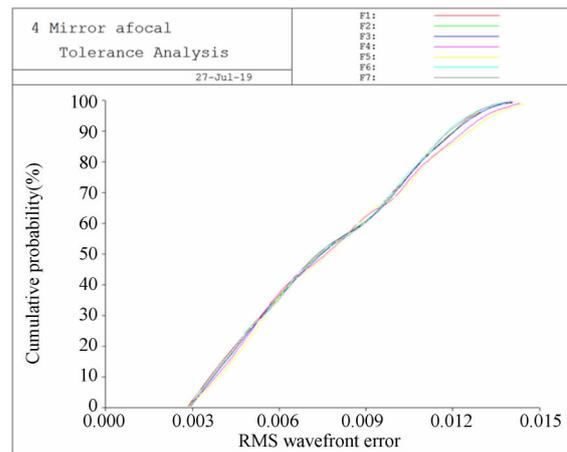


图 9 波前误差累积概率曲线图

Fig. 9 Cumulative probability of RMS wave-front error

表 6 公差分配结果

Tab. 6 Tolerance allocation of optical system

类型	公差项	主镜	次镜	三镜	四镜
加工公差	曲率半径(mm)	0.1	0.02	0.5	0.1
	二次曲面系数	0.000 5	0.001	-	-
	面形精度( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ )	$1/100\lambda$	$1/100\lambda$	$1/200\lambda$	$1/200\lambda$
装调公差	X 向位移( $\mu\text{m}$ )	-	5	20	20
	Y 向位移( $\mu\text{m}$ )	-	5	20	20
	Z 向位移( $\mu\text{m}$ )	-	5	20	20
	绕 X 轴倾斜( $^{\circ}$ )	-	20	20	20
	绕 Y 轴倾斜( $^{\circ}$ )	-	20	20	20
	绕 Z 轴倾斜( $^{\circ}$ )	-	40	60	60

表7 波前误差累积概率

Tab.7 Cumulative probability of RMS wave-front error

累积概率	全视场波前误差变化( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ )
50%	0.005 $1\lambda$
84.1%	0.007 $6\lambda$
97.7%	0.009 $6\lambda$
99.9%	0.011 $4\lambda$

## 7 结 论

引力波探测望远镜在星间激光干涉测量系统中承担着信号收发的重要作用,本文针对不同于

传统成像系统的特殊应用需求,基于初级像差理论,阐述了离轴四反光学系统初始结构的设计方法。基于光程差建立了波前误差一致性优化函数,优化得到了大倍率离轴四反无焦系统,其入瞳直径为200 mm,放大率为40倍,具有中间像面和可用的实出瞳,在 $\pm 8\ \mu\text{rad}$ 的科学视场中波前误差RMS值优于 $0.005\lambda$ ,PV值优于 $0.023\lambda$ ( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ ),波前一致性较高,一致性残差RMS值优于 $0.000\ 8\lambda$ ( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ )。在 $\pm 200\ \mu\text{rad}$ 的捕获视场内,成像质量接近衍射极限。经过公差分析和分配,系统最终的波前误差优于 $1/30\lambda$ ( $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$ ),满足引力波探测任务对望远镜的设计要求。

### 参考文献:

- [1] JENNRICH O. LISA technology and instrumentation [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(15): 153001.
- [2] 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.
- [3] LIVAS J C, ARSENOVIC P, CROW J A, et al.. Telescopes for space-based gravitational wave missions [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091811.
- [4] VERLAAN A L, HOGENHUIS H, PIJNENBURG J, et al.. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA [C]. *International Conference on Space Optics—ICSO 2012. International Society for Optics and Photonics*, 2017, 10564: 105640K.
- [5] 刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术 [J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 486-492.  
LIU H SH, GAO R H, LUO Z R, et al.. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 486-492. (in Chinese)
- [6] SANKAR S, LIVAS J. Testing and characterization of a prototype telescope for the evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA) [C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. International Society for Optics and Photonics*, 2016, 9904: 99045A.
- [7] 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)
- [8] 孙可, 江厚满, 程湘爱. 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 493-499.  
SUN K, JIANG H M, CHENG X A. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 493-499. (in Chinese)
- [9] SHIRI R, STEIN R, MURPHY K, et al.. Fabrication of petal-shaped masks for suppression of the on-axis poisson spot in telescope systems [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(4): 043112.
- [10] 高瑞弘, 刘河山, 罗子人, 等. 太极计划激光指向调控方案介绍 [J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 425-431.  
GAO R H, LIU H SH, LUO Z R, et al.. Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program [J]. *Chinese Op-*

- tics, 2019, 12(3): 425-431. (in Chinese)
- [11] SCHUSTER S. Tilt-to-length coupling and diffraction aspects in satellite interferometry [D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [12] SCHUSTER S, WANER G, TRÖBS 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(5): 1010-1014.
- [13] WANNER G. Complex optical systems in space: numerical modelling of the heterodyne interferometry of LISA Pathfinder and LISA [D]. Hannover: Albert Einstein Institute & University of Hannover, 2010.
- [14] 马烈, 陈波. 三维成像载荷共孔径光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9): 2326-2333.  
MA L, CHEN B. Optical design of a co-aperture system for 3-D remote sensing payload [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9): 2326-2333. (in Chinese)
- [15] 梅贵, 翟岩, 曲贺盟, 等. 离轴三反系统的无应力装调 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3414-3421.  
MEI G, ZHAI Y, QU H M, *et al.*. Stress-free alignment of off-axis three-mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3414-3421. (in Chinese)
- [16] 杜福嘉, 李朋辉. 低温环境下材料膨胀系数和润滑对望远镜负载扭矩的影响 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3): 616-623.  
DU F J, LI P H. Effect of material expansion coefficient and lubrication on telescope load torque under low temperature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 616-623. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈胜楠(1988—),女,吉林长春人,博士,2015年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 865666068@qq.com



姜会林(1945—),男,辽宁辽中人,博士,教授、博士生导师,中国工程院院士,应用光学专家。E-mail: hljiang@cust.edu.cn