

文章编号 2097-1842(2023)06-1384-10

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

余苗¹, 李建聪¹, 林宏安¹, 黄耀樟¹, 罗佳雄¹, 伍雁雄^{1,3*}, 王智^{2,4*}

(1. 佛山科学技术学院 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000;

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;

3. 季华实验室, 广东 佛山 528000;

4. 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: 太极计划是中国探测空间引力波的一项重点任务。望远镜作为空间引力波探测中的重要组成部分, 它的性能会直接影响引力波探测的精度。现有的典型空间引力波望远镜结构中次镜灵敏度高, 难以满足更大口径的空间引力波望远镜对制造装调公差的要求, 特别是在轨稳定性公差要求。为解决以上问题, 首先, 提出了一种中间像面设置于三四镜之间的新型空间引力波望远镜光学系统结构, 以降低次镜灵敏度; 结合高斯光学理论方法, 从理论上分析并计算新型望远镜结构的初始参数。其次, 通过优化设计, 获得入瞳直径为 400 mm, 放大倍率为 80 倍, 科学视场为 $\pm 8 \mu\text{rad}$, 波前误差 RMS 值优于 0.0063λ 的望远镜光学系统。最后, 建立了望远镜系统的灵敏度评价公差分配表, 对比分析了现有望远镜结构与新型望远镜结构的公差情况。结果显示: 相较于现有望远镜结构, 新型望远镜结构的灵敏度降低了 30.4%, 具有低灵敏度优势, 为空间引力波望远镜的设计提供了一种优选方案。

关键词: 望远镜; 空间引力波探测; 波前误差; 低灵敏度; 光学设计

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0006

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

YU Miao¹, LI Jian-cong¹, LIN Hong-an¹, HUANG Yao-zhang¹, LUO Jia-xiong¹,

WU Yan-xiong^{1,3*}, WANG Zhi^{2,4*}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Jihua Laboratory, Foshan 528000, China;

4. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences,

Hangzhou Institute for Advanced Study, Hangzhou 310024)

* Corresponding author, E-mail: 364477424@qq.com; wz070611@126.com

Abstract: The Taiji program is a key task for China's space gravitational wave detection, and as an import-

收稿日期: 2023-01-09; 修订日期: 2023-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62075214); 广东省科技计划项目(No. X190311UZ190); 广东省重点领域研发计划项目(No. 2020B1111040001)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075214); Guangdong Science and Technology Program (No. X190311UZ190); Guangdong Key Field R&D Program (No. 2020B1111040001)

ant part of space gravitational wave detection, the telescope's performance will directly affect the accuracy of gravitational wave detection. For the existing typical space gravitational wave telescope structures, due to the high sensitivity of secondary mirror, it is difficult to meet the requirements for manufacturing and adjustment tolerance of larger aperture space gravitational wave telescopes, especially the tolerance requirements for in-orbit stability. In order to solve the above problems, firstly, a new optical system structure of space gravitational wave telescope with intermediate image plane set between three and four mirrors is proposed to reduce the sensitivity of the secondary mirror. Combined with the theoretical method of Gaussian optics, the initial parameters of the structure of the new telescope are theoretically analyzed and calculated. Secondly, through the optimization design, a telescope optical system with a pupil diameter of 400 mm, a magnification of 80 times, a field of view of $\pm 8 \mu\text{rad}$, and a wavefront error RMS value of better than 0.0063λ was obtained. Finally, the sensitivity evaluation tolerance allocation table of the telescope system is established, and the tolerances of the existing telescope structure and the new telescope structure are compared and analyzed. Compared with the existing telescope structure, the sensitivity of the new telescope structure is reduced by 30.4%. The results show that the new telescope structure has the advantage of low sensitivity, which provides an optimal scheme for the design of space gravitational wave telescopes.

Key words: telescope; space gravitational wave detection; wavefront error; low sensitivity; optical design

1 引言

空间引力波探测是人类研究宇宙早期形成与演化过程的不可或缺的途径。目前,对引力波的探测主要分为两种方式:一种是地基干涉测量系统;另一种是空间干涉测量系统。空间干涉测量系统相较于地基干涉测量系统可以避免地震波、重力梯度、人为噪声的影响^[1],并且可以探测到频率范围在中低频 $10^{-4} \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$ 波段的引力波,有效补充了地基干涉测量系统缺少的波段。其中,中低频段的引力波信息具有丰富的天体物理来源,是研究宇宙早期结构形成及历时不可缺少的依据。

针对空间干涉系统测量在中低频段探测的优势,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(NASA)提出了 Laser Interferometer Space Antenna (LISA) 计划,中国科学院提出了太极计划^[2-4]。LISA 项目主要是探测和研究频段在 $10^{-4} \text{ Hz} \sim 10^{-1} \text{ Hz}$ 的引力波,而太极计划探测和研究的引力波频段在 $10^{-4} \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$ ^[5-6]。因此,太极计划的波段将覆盖欧空局 LISA 计划的探测频段,并且在重点探测频段($10^{-2} \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$)具有比 LISA 更高的探测灵敏度^[6]。空间干涉测量系统由 3 个相同的航天器构成,每个航天器上有

两个相同的光学望远镜作为信号的接收和发射装置。由于望远镜在收发信号过程中会受到各种噪声的影响。这些噪声将直接影响收发信号的强度信息和相位信息,从而影响引力波信号的解析精度^[7]。对收发信号影响最大的两种噪声分别是波前误差与抖动光程(TTL)耦合噪声和散粒噪声^[8],为了减少这两大噪声带来的影响,要求望远镜具有非常好的波前质量^[6]。

基于太极计划的牵引,ZHAO Y 和李建聪等人已完成了基于原理样机的空间引力波望远镜设计,其望远镜的入瞳直径达 200 mm,放大倍率达 40 倍^[8-9]。接下来,本文将根据中国科学院太极计划项目披露的当前空间引力波望远镜设计指标^[3]进行设计,要求望远镜的入瞳直径达 400 mm,放大倍率达 80 倍。在现有的空间引力波望远镜系统的设计指标中,望远镜的口径和倍率有所增大。口径的增大会使远场航天器接收到的激光光强增强,两航天器间能量的传输效率提高,从而减小散粒噪声对干涉信号提取的影响^[10]。但是,相较于 200 mm 口径,400 mm 口径的空间引力波望远镜光学系统的球差和慧差控制难度会变大。更重要的是,在加工误差和装调误差相同的情况下,大口径望远镜系统的波前误差变化更加剧烈。这意味着大口径和高倍率系统的灵敏度会更

高,相应地设计难度也会更大^[1]。此外,在“太极”计划空间引力波望远镜的实际研发过程中发现,空间引力波望远镜在轨时会受到温度的变化以及重力释放的影响,由此导致结构变形,反射镜特别是次镜的空间位置会产生一定的偏移,导致望远镜系统的波前质量下降。因此,若实现低灵敏度,则望远镜在轨后仍然能维持高质量波前,这对于保证空间引力波望远镜的在轨稳定性是至关重要的,也是关键难题。

针对上述难题,本文首先分析现有的空间引力波望远镜系统的结构特点,发现空间引力波望远镜结构中次镜灵敏度高,难以满足更大口径的空间引力波望远镜对制造装调公差的要求,特别是对在轨稳定性公差要求。因此,提出一种新型望远镜光学系统结构,利用三镜分担次镜的光焦度、中间像面设置于三四镜之间并降低次镜放大倍率,从而减小次镜的灵敏度;再结合高斯光学理论方法,分析计算望远镜的初始结构参数。其次,根据获得的初始结构参数,对科学视场内的望远镜初始结构进行波像差优化,获得满足设计要求的望远镜系统。最后,通过建立望远镜系统的灵敏度评价公差分配表,对新型望远镜结构和现有望远镜结构进行蒙特卡罗分析预测光学系统性能,并通过灵敏度分析得到误差源导致的系统波前变化的累计概率。对新型望远镜结构和现有望远镜结构的灵敏度结果进行对比分析,验证新型望远镜光学结构的低灵敏度优势。本文研究可为太极计划的望远镜设计提供可靠的参考方案。

2 望远镜光学系统初始结构设计与优化

2.1 望远镜系统的技术要求

太极计划中的望远镜作为空间激光干涉测距系统的重要组成部分,需要实现相距三百万公里的两卫星间的激光接收和发射,对其光程稳定性有着严格要求。本文根据太极计划的技术指标要求^[3],设置望远镜的关键技术指标,如表 1 所示。望远镜的工作波长选用频率和相位稳定性极好的 1064 nm 波长。考虑到望远镜系统中的光学元件难以避免地存在加工误差和系统装调误差,故要求全视场 RMS 波前退化量小于 $\lambda/30$ ($\lambda=1064$ nm) 的概率达到 80% 以上。

表 1 望远镜系统的技术指标
Tab. 1 Specifications of telescope system

系统参数	技术指标
光学口径/mm	400
工作波长/nm	1064
捕获视场/ μ rad	± 200
科学视场/ μ rad	± 8
激光束放大倍数	80
波前质量(科学视场内)	$\leq \lambda/30$ ($\lambda=1064$ nm)

2.2 望远镜初始结构分析

目前,空间引力波探测任务采用的望远镜结构是离轴四反无焦系统。根据目前披露的望远镜结构形式^[6-9,12],望远镜的中间像面普遍在次三镜之间,可视为由两个独立的双反射结构共同构成。该离轴四反无焦系统的光焦度主要由主次镜承担,导致主次镜的公差过于敏感。在装调时一般会将主镜固定,作为基准,避免主镜偏移造成的装调误差^[7]。在剩余的 3 个反射镜中次镜灵敏度最高,对系统成像质量影响最大。因此,如何降低次镜的灵敏度是引力波望远镜光学系统设计的主要难点。为解决该难点,本文提出一种新型望远镜架构,通过将望远镜的中间像面调整到三四镜之间,三镜分担次镜的部分光焦度,并降低次镜的放大倍率,从而起到降低次镜公差灵敏度的效果。新型望远镜结构可视为由一个三反射镜系统和一个单反射镜系统共同构成,分别称为望远镜的前组和后组,望远镜的初始结构如图 1 所示。

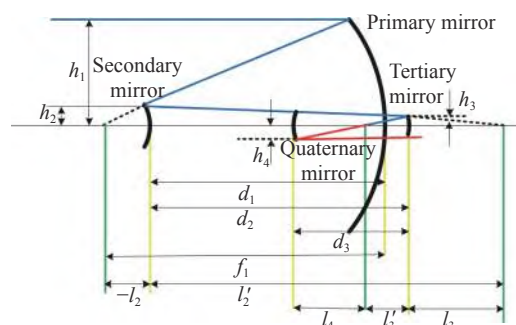


图 1 新型望远镜系统的初始结构图

Fig. 1 Initial structural diagram of the new telescope system

设 α_2 为次镜对主镜的遮光比; α_3 为三镜对次镜的遮光比; α_4 为四镜对三镜的遮光比; β_2 、 β_3 分

别为次镜和三镜的放大率; f 为望远镜前组的焦距。引力波望远镜的光学系统作为一个无焦系统, 其主镜物距为 $l_1 = \infty$, 物方孔径角 $u_1 = 0$ 。对系统进行归一化处理, 则主镜半口径 $h_1 = 1$, 前组系统焦距 $f = 1$ 。同时对于反射式光学系统, 折射率可以表示为: $n_1 = n'_2 = n_3 = n'_4 = 1$, $n'_1 = n_2 = n'_3 = n_4 = -1$ 。根据图 1, 结合高斯光学理论, 该同轴四反系统^[13-15]的结构参数可由式(1)、式(2)表示。

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{l_2}{f'_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \alpha_3 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \\ \alpha_4 = \frac{l_4}{l'_3} \approx \frac{h_4}{h_3} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \beta_2 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u'_2} \\ \beta_3 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u'_3} \end{cases}. \quad (2)$$

同轴四反系统各镜的曲率半径 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的表达式如式(3)所示, 主次镜间隔 d_1 、次三镜间隔 d_2 、三四镜间隔 d_3 的表达式如式(4)表示。

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2}{\beta_2 \beta_3} f \\ R_2 = \frac{2\alpha_2}{\beta_3 (1 + \beta_2)} f \\ R_3 = \frac{2\alpha_2 \alpha_3}{1 + \beta_3} f \\ R_4 = 2\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 f \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{(1 - \alpha_2)}{\beta_2 \beta_3} f \\ d_2 = \frac{\alpha_2 (1 - \alpha_3)}{\beta_3} f \\ d_3 = \alpha_2 \alpha_3 (1 + \alpha_4) f \end{cases}. \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)可知, 引力波望远镜光学

系统的具体结构由 α_2 、 α_3 、 α_4 决定。结合式(1)~式(4), 并根据望远镜系统的放大倍率 $\tau = 1/\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 = 80$, 经推导, 本文的望远镜系统结构参数如表 2 所示。

表 2 本文提出光学系统的结构参数

Tab. 2 Structural parameters of the proposed optical system

结构参数	取值范围	取值
α_2	(0, 1)	0.113924050
α_3	(0, ∞)	0.060710194
α_4	(0, ∞)	1.820512820
β_2	($-\infty$, 0)	-9.700000000
β_3	(0, ∞)	1.471698113

2.3 光学系统的优化设计与分析

离轴四反光学系统是在同轴四反光学系统初始结构的基础上, 对孔径光阑离轴后优化得到的。优化过程中, 需要在 Zemax 中建立科学视场内的波前误差一致性优化函数, 调整望远镜系统的结构布局, 控制主次镜之间的距离为 700 mm, 次镜口径大小为 55 mm, 主镜 y 向偏心量为 270 mm。除此之外, 望远镜系统需要协调光路的折叠方式、中间像面位置和出瞳位置, 保证合理的装调空间。考虑到望远镜系统中次镜会产生后向散射杂散光, 本设计在中间像面处预留了放置视场光阑的合理空间, 从而抑制杂散光的产生。优化后的光学系统结构如图 2 所示。光学系统镜头数据如表 3 所示。望远镜主镜面型采用抛物面, 次镜面型采用双曲面, 三镜和四镜面型采用球面。

各视场的波前误差情况如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 波前误差的 RMS 值和 PV 值如表 4 所示。在科学视场范围内, 望远镜出瞳处的波前误

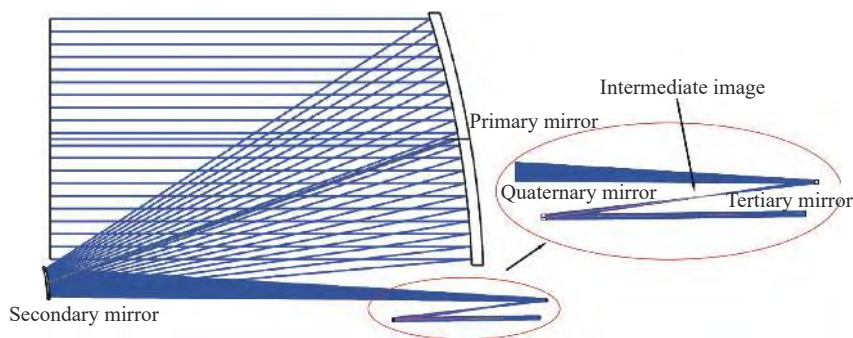


图 2 优化后的新型望远镜结构

Fig. 2 Optimized new telescope structure

表 3 优化后的光学系统镜头数据

Tab. 3 Lens parameters of optimized optical system

	曲率半径/mm	间隔/mm	圆锥系数	Y向偏心/mm	绕X轴倾斜/(°)
主镜	-1579.701	-700.0	-1.000	-270.0	0.00
次镜	-200.025	820.0	-1.503	-270.0	0.00
三镜	360.730	-250.0	0.000	-268.0	-2.80
四镜	301.309	240.1	0.000	-288.5	-1.32

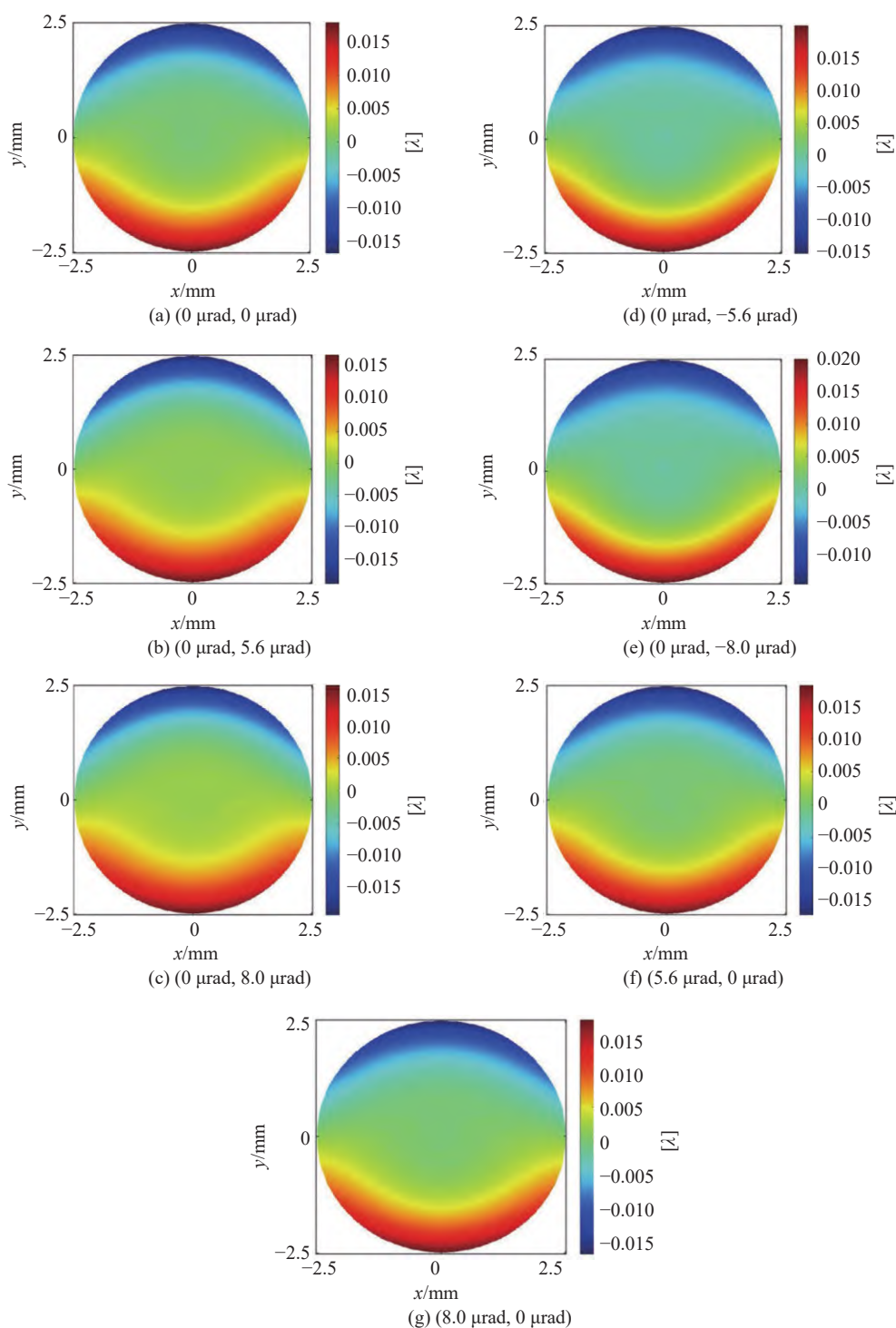


图 3 出瞳处不同视场的波前图

Fig. 3 Wavefront diagrams of different fields of view at the exit pupil

表 4 出瞳处的波前误差

Tab. 4 Wavefront errors at the exit pupil

视场 / μrad	RMS($\lambda = 1\,064\,\text{nm}$)	PV($\lambda = 1\,064\,\text{nm}$)
(0,0)	0.0063λ	0.0349λ
(0,5.6)	0.0063λ	0.0351λ
(0,8.0)	0.0063λ	0.0352λ
(0,-5.6)	0.0063λ	0.0346λ
(0,-8.0)	0.0063λ	0.0345λ
(5.6,0)	0.0063λ	0.0349λ
(8.0,0)	0.0063λ	0.0349λ

差 RMS 值为 0.0063λ , PV 值为 $0.0349\lambda\sim0.0352\lambda$ 。结果表明望远镜系统的各视场波前质量一致性好,望远镜系统的全视场都具有高质量波前。

3 验证分析

3.1 现有望远镜结构设计

为了验证新型引力波望远镜光学系统在大口径、高倍率的情况下具有低灵敏度的优势,依据表 1 的设计指标,在相同的尺寸包络下,设计了一款典型的离轴四反望远镜光学系统进行对比分析。在结构尺寸相同的情况下,新型望远镜结构的波前误差 $\text{RMS}(\lambda=1\,064\,\text{nm})$ 为 0.0063λ ,次镜的放大倍率为 9.7,现有望远镜结构的波前误差 $\text{RMS}(\lambda=1\,064\,\text{nm})$ 为 0.0062λ ,次镜的放大倍率为 12.8。具体结构形式如图 4 所示,波前分析如图 5 (彩图见期刊电子版)所示。

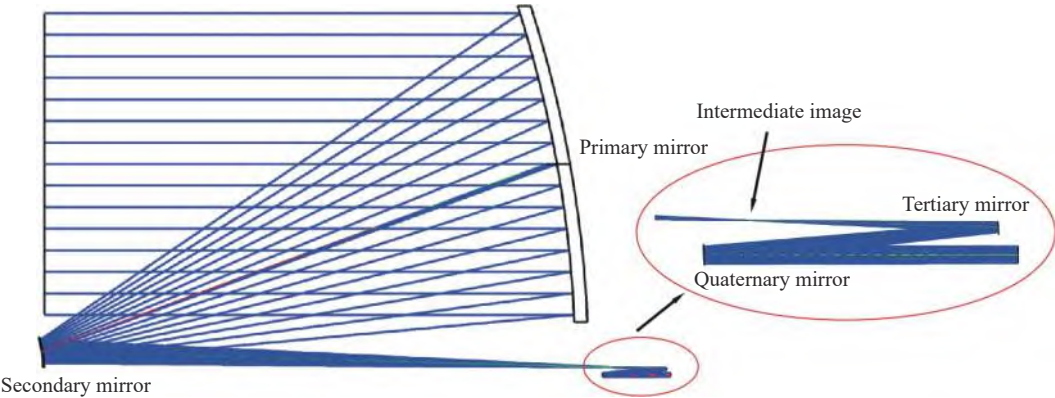


图 4 优化后的现有望远镜结构

Fig. 4 Optimized existing telescope structure

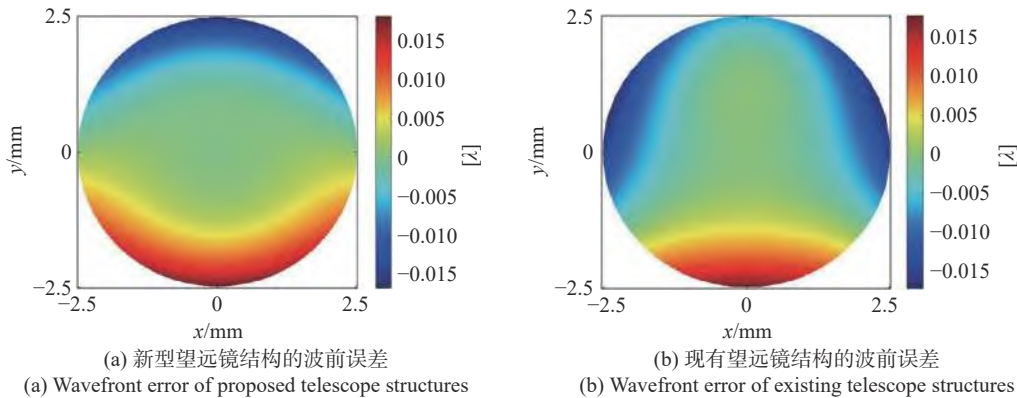


图 5 现有望远镜结构经优化后的波前误差图

Fig. 5 Wavefront error diagram of existing telescope structure

3.2 公差的对比较分析

由于实际生产中难以避免会存在加工误差以及装调误差。空间引力波望远镜的加工误差包括

反射镜的曲率半径公差、二次曲面系数公差、面型公差。装调误差包括反射镜绕 x, y, z 轴 3 个方向的倾斜和反射镜在 x, y, z 轴方向上的位移,一

般称 x 、 y 轴方向上的位移为 x 、 y 向偏心。由于主镜在装调时一般会固定作为基准,所以公差分析时,主镜只需要分析加工误差。综合考虑望远

镜光学系统由于加工误差、装调误差导致的望远镜系统变化后,设计公差分配方案,具体公差分配如表 5 所示。

表 5 公差分配表
Tab. 5 Tolerance distribution

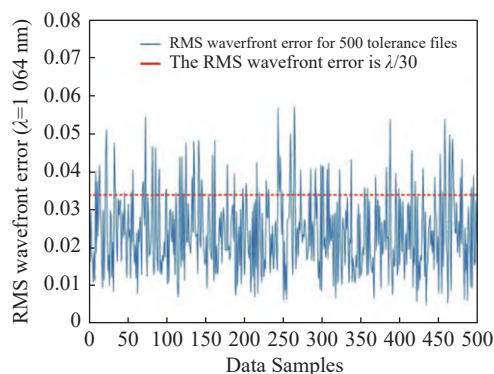
类型	公差项	主镜	次镜	三镜	四镜
加工公差	曲率半径(mm)	± 0.3	± 0.2	± 0.5	± 0.1
	二次曲面系数	± 0.0001	± 0.0004	-	-
	面型误差($\lambda=1064\text{ nm}$)	$\pm \lambda/100$	$\pm \lambda/100$	$\pm \lambda/200$	$\pm \lambda/200$
装调误差	X向偏心(μm)	-	± 18	± 18	± 18
	Y向偏心(μm)	-	± 18	± 18	± 18
	Z向位移(μm)	-	± 20	± 20	± 20
	绕X轴倾斜(°)	-	± 10	± 10	± 10
	绕Y轴倾斜(°)	-	± 10	± 10	± 10
	绕Z轴倾斜(°)	-	± 10	± 10	± 10

按照表 5 的公差分配情况,在 Zemax 中,分别对新型和现有的望远镜结构进行蒙特卡罗分析及预测光学系统性能,并在灵敏度分析中得到了误差源导致系统波前变化的累计概率,具体如表 6、7 所示。为了检验公差分析结果是否满足探测要求,本文分别提取了新型和现有望远镜结构的 500 个公差文件的波前误差数据进行分析,公差文件对应的分析结果如图 6 所示。新型望远镜结构全视场 RMS 波前退化量小于 $\lambda/30$ ($\lambda=1064\text{ nm}$) 的概率为 82.4%,现有望远镜结构全视场 RMS 波前退化量小于 $\lambda/30$ ($\lambda=1064\text{ nm}$) 的概

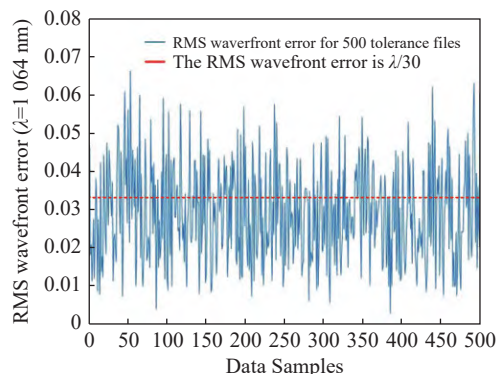
表 6 新型望远镜结构波前误差累计概率

Tab. 6 Cumulative probability of wavefront error of the proposed telescope structure

累计概率	全视场波前误差变化($\lambda=1064\text{ nm}$)
2%	0.00683λ
10%	0.01126λ
20%	0.01478λ
50%	0.02255λ
80%	0.03235λ
90%	0.03859λ
98%	0.04824λ



(a) 新型望远镜结构的波前误差分析结果
(a) Wavefront error analysis results of the proposed telescope structure



(b) 现有望远镜结构的波前误差分析结果
(b) Wavefront error analysis results of the existing telescope structures

图 6 公差分析结果

Fig. 6 Tolerance analysis results

率为 63.2%。经计算, 新型望远镜结构的灵敏度相较于现有望远镜结构的灵敏度降低了 30.4%, 证明了新型结构形式不仅满足设计指标要求, 而且具有更加宽松的公差条件。

表 7 现有望远镜结构波前误差累计概率

Tab. 7 Cumulative probability of wavefront error in existing telescope structures

累计概率	全视场波前误差变化($\lambda=1064\text{ nm}$)
2%	0.00807 λ
10%	0.01278 λ
20%	0.01727 λ
50%	0.02773 λ
80%	0.04124 λ
90%	0.04642 λ
98%	0.05660 λ

另外, 由于在所有可能的公差范围内, 灵敏度分析结果数据量多达 56 组, 因此, 通过 Zemax 的灵敏度分析文件分别导出了新型和现有望远镜结构中最灵敏的 10 项公差项, 在表 8 和表 9 中以递减的方式呈现。表 8、表 9 中的影响量用于预测光学系统的性能。影响量数值越大代表该公差项对波前质量影响越大, 该类型的公差项越灵敏。通过观测表 8 和表 9 的影响量, 发现相较于现有望远镜结构, 新型望远镜结构的主要优势是降低了望远镜次镜偏心变化导致的高灵敏度。为了进一步验证该发现的准确性, 本文分析两种望远镜的次镜偏心变化对系统波前质量的影响, 获得望远镜光学系统的波前退化数据。因此, 本文根据公差分配条件, 分别分析了两种望远镜关于次镜 x 向或 y 向偏心变化引起的波前质量退化, 具体分析结果如图 7、8 所示。

由图 7、图 8 可知, 新型望远镜结构的次镜在 $\pm 18\text{ }\mu\text{m}$ 的 x 、 y 向偏心变化范围内的波前退化量明显小于现有望远镜结构。随着偏心量由 0 至 $18\text{ }\mu\text{m}$ 或由 0 至 $-18\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐偏移望远镜的初始偏心设计参数时, 新型望远镜结构和现有望远镜结构的 RMS 波前退化量相差数值逐渐增大。例如, 在次镜的 Y 向偏心变化为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 时,

两种系统的 RMS 波前退化量相差数值达到了最大, 新型望远镜结构相较于现有望远镜结构的 RMS 波前退化量减少了 $\lambda/100$ ($\lambda=1064\text{ nm}$), 而望远镜系统的全视场 RMS 波前退化量要求仅是小于 $\lambda/30$ ($\lambda=1064\text{ nm}$)。以上具体数据验证了新型望远镜结构可有效减少由次镜偏心变化引起的 RMS 波前退化量, 具有低灵敏度优势。可有效解决空间引力波望远镜光学系统大口径、高倍率和低灵敏度的难点。

表 8 新型望远镜结构中最灵敏的 10 项公差项

Tab. 8 The 10 most sensitive tolerance terms in new telescope structure

类型	反射镜面	数值	影响量
Y 向偏心(μm)	次镜	18	0.03588128
Y 向偏心(μm)	次镜	-18	0.03483910
X 向偏心(μm)	次镜	18	0.03354102
X 向偏心(μm)	次镜	-18	0.03354102
二次曲面系数	主镜	-0.0001	0.01435808
二次曲面系数	主镜	0.0001	0.01257815
绕 X 轴倾斜($^{\circ}$)	次镜	10	0.00846399
绕 Y 轴倾斜($^{\circ}$)	次镜	-10	0.00752685
绕 Y 轴倾斜($^{\circ}$)	次镜	10	0.00752685
绕 X 轴倾斜($^{\circ}$)	次镜	-10	0.00744224

表 9 现有望远镜结构中最灵敏的 10 项公差项

Tab. 9 The 10 most sensitive tolerance terms in existing telescope structures

类型	反射镜面	数值	影响量
Y 向偏心(μm)	次镜	-18	0.04193880
X 向偏心(μm)	次镜	18	0.03553085
X 向偏心(μm)	次镜	-18	0.03553085
Y 向偏心(μm)	次镜	18	0.03329243
二次曲面系数	主镜	0.0001	0.01654640
二次曲面系数	主镜	-0.0001	0.00907945
绕 X 轴倾斜($^{\circ}$)	次镜	10	0.00695408
曲率半径(mm)	次镜	0.2	0.00588237
面型误差($\lambda=1064\text{ nm}$)	主镜	$-\lambda/100$	0.00479811
二次曲面系数	次镜	-0.0004	0.00368115

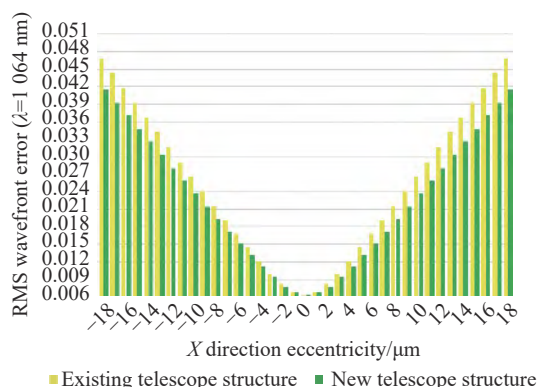


图7 新型和现有望远镜结构的次镜X向偏心与波前关系

Fig. 7 Relationships between X-eccentricities and wavefronts of the secondary mirror in the new and existing telescope structures

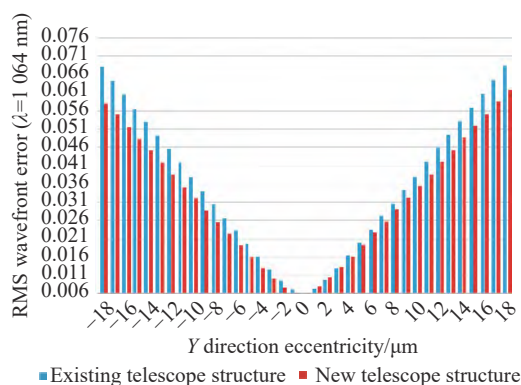


图8 新型和现有望远镜结构的次镜Y向偏心与波前关系

Fig. 8 Relationships between Y-eccentricities and wavefronts of the secondary mirror in the new and existing telescope structures

4 结 论

本文针对引力波探测对望远镜的大口径、高倍率、低灵敏度的需求,首先分析了现有空间引力波望远镜的光学系统特性,提出了一种降低次镜放大倍率且中间像面在三四镜之间的新型望远镜结构,从而降低望远镜系统的灵敏度。结合高斯光学公式,计算获得了望远镜初始结构数据。其次,通过在Zemax中建立各视场波前误差的一致性优化函数,对望远镜初始结构进行优化,得到了离轴望远镜系统,其入瞳直径达400 mm,放大倍率达80倍,并且在 $\pm 8 \mu\text{rad}$ 的科学视场内,波前误差RMS值优于 0.0063λ 。最后,根据望远镜系统的公差分配条件,利用Zemax的灵敏度分析结果,得到了误差源导致系统波前变化的累计概率。结果表明:由系统的加工误差和装调误差引起的波前退化量有82.4%以上的概率优于 $\lambda/30$ ($\lambda=1064 \text{ nm}$)。对比现有望远镜结构与新型望远镜结构的灵敏度分析结果,新型望远镜结构的灵敏度较现有望远镜结构高30.4%。新型望远镜结构的主要优势是降低了望远镜次镜偏心变化导致的高灵敏度。结果表明,本文提出的新型望远镜结构具有低灵敏度优势,而且降低了由次镜偏心变化导致的高灵敏度,为空间引力波探测的望远镜系统设计提供了一种优选方案。

参考文献:

- [1] MILLER M C, YUNES N. The new frontier of gravitational waves[J]. *Nature*, 2019, 568(7753): 469-476.
- [2] ESA. LISA assessment study report (Yellow Book)[EB/OL]. https://sci.esa.int/documents/35005/36499/1567258681608-LISA_YellowBook_ESA-SRE-2011-3_Feb2011.pdf. (2011-10-11)
- [3] 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.
- [4] TIAN Y CH. Research on the analytical development and progress of gravitational wave detection technology[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2021, 2083(2): 022043.
- [5] ZHAO Y, SHEN J, FANG CH, et al.. Tilt-to-length noise coupled by wavefront errors in the interfering beams for the space measurement of gravitational waves[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25545-25561.
- [6] 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)
- [7] 陈胜楠, 姜会林, 王春艳, 等. 大倍率离轴无焦四反光学系统设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 179-188.
CHEN SH N, JIANG H L, WANG CH Y, et al.. Design of off-axis four-mirror afocal optical system with high magnification[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 179-188. (in Chinese)
- [8] 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(中英文)*, 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)
- [9] ZHAO Y, SHEN J, FANG CH, *et al.*. Far-field optical path noise coupled with the pointing jitter in the space measurement of gravitational waves[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(2): 438-444.
- [10] 范纹彤, 赵宏超, 范磊, 等. 空间引力波探测望远镜系统技术初步分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1): 178-185.
- FAN W T, ZHAO H CH, FAN L, *et al.*. Preliminary analysis of space gravitational wave detection telescope system technology[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(1): 178-185. (in Chinese)
- [11] QIN Z CH, WANG X D, REN CH M, *et al.*. Design method for a reflective optical system with low tilt error sensitivity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43464-43479.
- [12] FAN Z CH, ZHAO L J, CAO SH Y, *et al.*. High performance telescope system design for the TianQin project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(19): 195017.
- [13] 赵宇宸, 胡长虹, 吕恒毅, 等. 紧凑型偏视场多光路耦合同轴四反光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(3): 20200197.
- ZHAO Y CH, HU CH H, LV H Y, *et al.*. Design of high-density coaxial four-mirror optical system with field-bias and multi-light-channel coupled[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200197. (in Chinese)
- [14] 陈太喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计与装调[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1722001.
- CHEN T X, WU Y X, SONG SH M, *et al.*. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1722001. (in Chinese)
- [15] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2326-2333. (in Chinese)

作者简介:



余 苗(2001—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 2020 年于佛山科学技术学院获得学士学位, 现于佛山科学技术学院攻读硕士学位, 主要从事空间引力波望远镜光学系统方面的研究。E-mail: 1150457865@qq.com



伍雁雄(1982—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为航空航天光学系统设计和光学仪器研制。E-mail: 364477424@qq.com



王 智(1978—), 男, 山东寿光人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位, 主要研究方向为空间引力波探测中的高精度测量技术。E-mail: wz070611@126.com