

基于大视场太空望远镜的主动光学波前探测与重建方法

郑潇逸 刘珂 张帆 咎世凯 吕雪莹 刘轩 张刘

Active optical wavefront detection and reconstruction method based on large field space telescope

ZHENG Xiaoyi, LIU Ke, ZHANG Fan, ZAN Shikai, LYU Xueying, LIU Xuan, ZHANG Liu

引用本文:

郑潇逸, 刘珂, 张帆, 等. 基于大视场太空望远镜的主动光学波前探测与重建方法[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 51–57. DOI: 10.5768/JAO202647.0101006

ZHENG Xiaoyi, LIU Ke, ZHANG Fan, et al. Active optical wavefront detection and reconstruction method based on large field space telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 51–57. DOI: 10.5768/JAO202647.0101006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0101006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种大视场高分辨率的复眼光学系统设计

Design of large field of view and high-resolution compound eye optical system

应用光学. 2024, 45(2): 314–320 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201006>

大视场低照度夜视头戴目镜光学系统设计

Optical system design of night vision goggles with large field of view and low illumination

应用光学. 2023, 44(3): 636–642 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304002>

小口径大视场工业内窥镜光学系统设计

Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope

应用光学. 2023, 44(1): 17–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101003>

超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>

倒立式三视场施密特望远镜关键技术研究

Research on key technologies of inverted 3-FOV Schmidt telescope

应用光学. 2023, 44(6): 1286–1293 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0601001>

小型化长出瞳距激光通信接收望远镜光学设计

Optical design of miniaturized laser communication receiving telescope with long exit pupil distance

应用光学. 2023, 44(5): 975–981 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0051-07

引用格式: 郑潇逸, 刘珂, 张帆, 等. 基于大视场太空望远镜的主动光学波前探测与重建方法 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 51-57.

ZHENG Xiaoyi, LIU Ke, ZHANG Fan, et al. Active optical wavefront detection and reconstruction method based on large field space telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 51-57.



在线阅读

基于大视场太空望远镜的主动光学 波前探测与重建方法

郑潇逸¹, 刘 珂², 张 帆³, 咎世凯³, 吕雪莹³, 刘 轩⁴, 张 刘³

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215031; 2. 中科院天空信息研究院, 江苏 苏州 215004; 3. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061; 4. 黑龙江工程学院 电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要: 主动光学技术可降低太空环境对太空望远镜成像质量的影响, 随着遥感领域对大幅宽图像需求的增加, 现有主动光学技术难以满足大视场光学系统对波前探测与重建的需求。为解决该问题, 提出一种仅需 3 个波前传感器和 1 个可变形镜的波前探测方法。该方法通过在探测器板与波前传感器对应位置开孔, 利用像面外的光信息成功获取了多个视场的波前, 此外, 利用基于 Zernike 多项式的算法进行波前重建。仿真分析结果表明: 该方法的波前重建精度高于 $\lambda/100$, 满足实际工程要求, 并且有效减小了系统体积和重量。

关键词: 太空望远镜; 主动光学; 波前探测与重建; 大视场光学系统

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0101006

Active optical wavefront detection and reconstruction method based on large field space telescope

ZHENG Xiaoyi¹, LIU Ke², ZHANG Fan³, ZAN Shikai³, LYU Xueying³, LIU Xuan⁴, ZHANG Liu³

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Suzhou University, Suzhou 215031, China; 2. Institute of Aerospace Information, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215004, China; 3. College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 4. School of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Active optical technology can reduce the impact of space environment on the imaging quality of space telescopes. However, with the increasing demand for large swath images in the remote sensing field, existing active optical technologies are unable to meet the requirements of wavefront detection and reconstruction in large field optical systems. To address this issue, we proposed a wavefront detection method only requiring 3 wavefront sensors and 1 deformable mirror. This method could successfully obtain wavefronts from multiple fields of view by opening holes at corresponding positions on the detector board and wavefront sensor, utilizing light information outside the image plane. In addition, wavefront reconstruction was performed using an algorithm based on Zernike polynomials. Simulation analysis shows that the wavefront reconstruction accuracy of this method is higher than $\lambda/100$, which meets practical engineering requirements and effectively reduces system volume and weight.

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62073150, 62227812)

第一作者: 郑潇逸, E-mail: 1196464973@qq.com

通信作者: 张刘, E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn

Key words: space telescope; active optics; wavefront detection and reconstruction; large field of view optical system

引言

随着遥感技术不断发展,为获得更高分辨率以及更清晰的图像,太空望远镜的口径在不断地增长^[1]。然而,随着口径的增大,太空环境(主要包括失重和温度波动)对成像质量的影响也被放大^[2-4],为解决该问题,主动光学技术(active optical, AO)应运而生^[5]。AO 是一种通过校正元件主动校正或补偿由外界环境因素造成的光学系统波前像差的技术。该技术需要通过闭环控制来提高成像质量,其三大核心技术包括:波前探测、波前重建和波前校正^[6]。具体来说,首先,使用波前探测器(WFS)测量畸变波前^[7];其次,利用探测波前对变形镜校正面形进行计算;最后,通过动态调整光学系统中可变形镜(deformable mirror, DM)的表面几何形态,达到对成像质量补偿的效果^[8]。

主动光学最早应用在地基望远镜中,通常称为自适应光学。在地基遥感系统中,主要扰动来源于大气湍流,星光在穿过地球大气层时会发生扭曲,利用自适应光学技术可实时校正大气湍流引起的高频率($>1\ 000\ \text{Hz}$)光学畸变。AO 校正目标往往是低频的($<10\ \text{Hz}$),适用于航天遥感领域中。太空望远镜在轨工作时,温度是像质的主要影响因素,而温度变化往往是缓慢的,在很长一段时间里可以看作是准静态^[6]。

传统太空望远镜的视场较小,往往小于 $10''$,这就导致获取的图像宽度有限^[9]。此外,由于只存在近轴光线像差,因此其波前像差可以直接对应校正镜面形的变化。在经典的 AO 中,波前和 DM 之间存在一对一的关系,但在大视场 AO 中随着对图像面积的需求增长,望远镜需要通过更大的视场获得更大的图像幅宽。对于大视场光学系统,系统波前像差代表了各个视场子孔径波前像差的综合结果,其关系并不那么简单,导致波前重建成为难题。

主动光学是通过改变镜面的形状来改变不同光束的光程差,进而达到校正整个系统波前像差的目的。此时波前和面形是有区别的,波前表示光的传播面,反映了光从初始位置到目标表面的光程差。理论上光学系统有无数个波前,不同波长、不同视场的波前会有差异。但是,某一个镜面只有唯一的面形,它代表了镜面的实际变形量。

如何利用多个视场的波前信息重建待校正镜面的目标面形是目前的研究难点。

为解决大视场的波前重建问题,在天文领域诞生了多共轭自适应光学技术(multiconjugate adaptive optics, MCAO)^[10]。该技术原理是将大气湍流分为若干层,然后在每一层的共轭位置上放置一块可变形镜,用于校正该层大气引起的波前畸变。根据不同的探测方式, MCAO 可以分为星导向 MCAO^[11]和层导向 MCAO^[12]。由此可见, MCAO 系统需要使用多个波前传感器探测多个视场(子孔径)的波前,并使用多个变形镜进行校正,但是传统 MCAO 会导致系统体积和重量庞大,不利于在航天领域广泛使用^[13-14]。

随着未来星载遥感系统向大口径、大视场方向发展,外界环境对其成像质量的影响会愈加显著^[15-17]。为解决航天领域主动光学在大口径光学系统中波前探测与重建问题,本研究首先提出了一种仅使用 3 个 WFS 和 1 个可变形镜的波前探测方法;然后,通过在探测器板附件开孔的方法,获取多个视场的波前信息;最后,利用基于 Zernike 多项式的算法进行波前重建。

1 基本原理

本研究针对航天领域应用的主动光学(space active optical, SAO)设计了新的波前探测方法,与传统 MCAO 相比较, SAO 有着原理性的区别,三者的区别如图 1 所示。

目前, MCAO 按照不同的探测方式分为两种:星导向 MCAO 和层导向 MCAO,如图 1(a)和图 1(b)所示。星导向 MCAO 是以天空中的多个导星为观测目标,使用多个 WFS 探测不同方向上 WFS 累积的波前误差,利用大气层析技术重建出不同高度层的大气湍流对光学波前的扰动信息,通过控制校正器校正不同层的波前误差。层导向 MCAO 使用四棱锥波前传感器,可以不通过大气层析的方法进行波前重建,四棱锥波前传感器对单视场的焦点进行分光,获得多个子孔径波前信息。探测器与不同高度的大气湍流形成共轭关系,可直接测量不同高度上湍流层的大气湍流相位,从而实现对大气分层的直接探测。

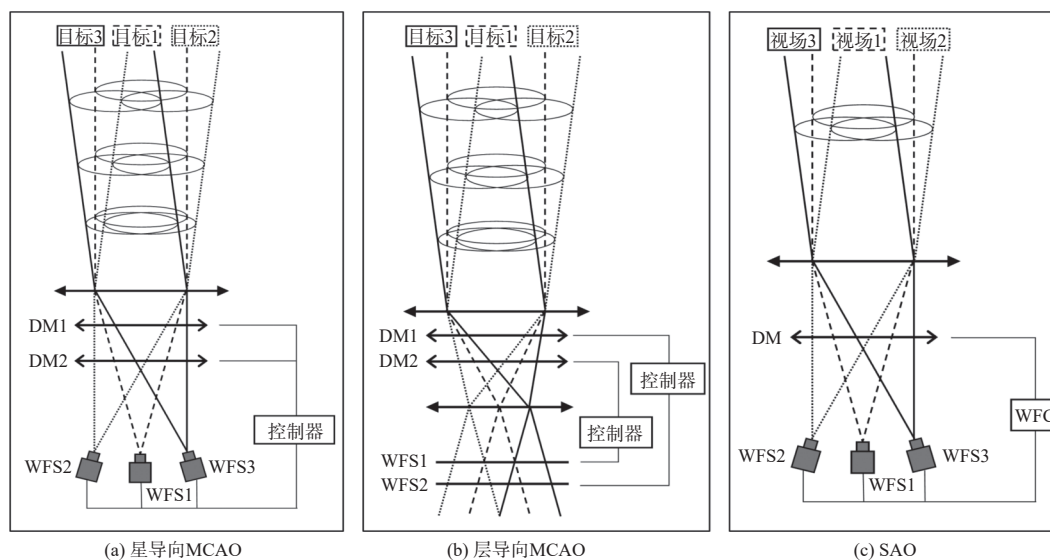


图1 多视场波前探测与重建技术对比

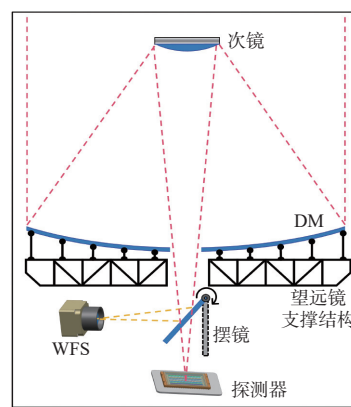
Fig. 1 Comparison of multi-field wavefront detection and reconstruction techniques

在太空中, SAO的像差全部由望远镜自身的形变以及误差引起。如果将望远镜自身视为理想的, 像差可看作是一层大气湍流对波前的影响造成的。由于卫星的体积、重量和能源是有限制的, 因此使用3个波前探测器以及1块变形镜对像差进行探测和校正是最优解。由此可见, SAO的结构最简单, 更容易满足航天领域对可靠性的要求。

通过介绍SAO在原理上与MCAO的不同, 将从波前探测方法和波前校正算法2个方面对本研究进行详细分析。

1.1 波前探测方法

目前在地面天文学领域, 波前探测的理论和技術都已经很成熟, 传统波前探测器安装方式如图2所示。但是由于航天任务的工作环境具有特殊性, 导致之前的技术不能很好地适用。



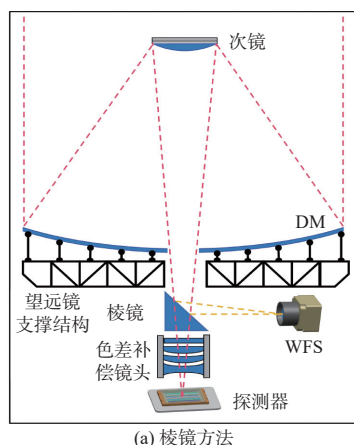
(b) 摆镜方法

图2 传统波前探测器安装方法

Fig. 2 Traditional wavefront detector installation method

棱镜波前探测方法如图2(a)所示。通过在探测器前使用棱镜对光线进行分光, 虽然可以保证探测器和波前传感器都能接受到光信息, 但是这样一方面会导致光线能量损失, 另一方面, 由于光线通过棱镜会产生色差, 需要额外添加一个镜头去校正, 导致系统整体重量和尺寸增加, 间接导致成本升高。

摆镜波前探测方法如图2(b)所示。通过在探测器设置可高速摆动的反射镜, 类似于“快门”的装置, 虽然可以解决光能损失和色差问题, 但摆镜作为一种运动机构, 重复精度是最大的问题。由于运动机构在真空中容易出现冷焊现象, 随着工作时间的增加, 其重复精度难以保证, 导致系统可靠性降低。更为致命的是, 太空望远镜在成像过程中, 探测器和WFS不能同时工作, 这就导致牺牲



(a) 棱镜方法

了一部分图像信息。

为避免以上出现的问题,本研究提出了一种在探测器侧面开通窗孔,为WFS提供光源的方法,如图3所示。针对太空望远镜,为获取大视场使用了多块探测器拼接的方式,使得整体像面为长条状,长宽比达到了10:1。

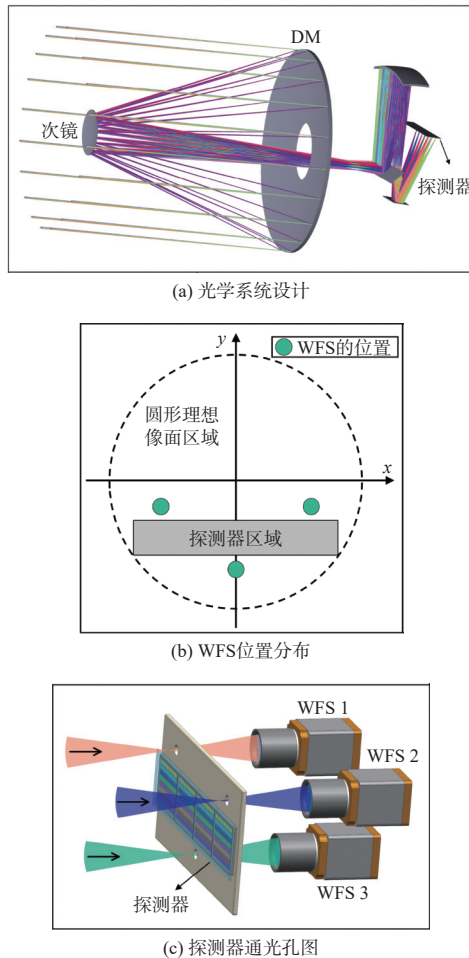


图3 波前探测方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wave front detection method

由于使用了图3(a)所示同轴反射式光学系统,整个理想像面呈圆形,如图3(b)所示。实际探测器使用的范围只是理想像面的一部分,利用未被探测器使用的部分光束为波前传感器提供光信息。从图3(c)中可以看出,探测器由4块拼接而成,在探测器的上、下两侧设置通光孔,上侧2个、下侧1个。这种波前探测方式可以保证探测器和WFS同时获取能量无损的光信息。此外,由于在长条形探测器对应的光学像差区域内,Y方向的距离小,像差变化小,因此WFS虽然检测到的是探测器边缘的像差,但和探测器内像

差基本相同。

值得一提的是,几乎所有光学设计的理想像面都会比实际探测器大,探测器以外的光束可以通过本研究方法被WFS利用,因此,本研究方法具有一定的普适性。

1.2 波前重建算法

波前重建算法是利用已知的几个不同视场的波前,计算出位置的综合波前信息,为波前校正提供目标。

在传统MCAO中,将大气湍流分为若干层,使用多个变形镜分别矫正不同层湍流引起的像差,这样WFS均匀分布在边缘视场。各视场在某个高度的大气的投影如图4(a)中虚线的小圆所示,也是均匀分布的。它们的外接圆称为元瞳面,如图4所示。

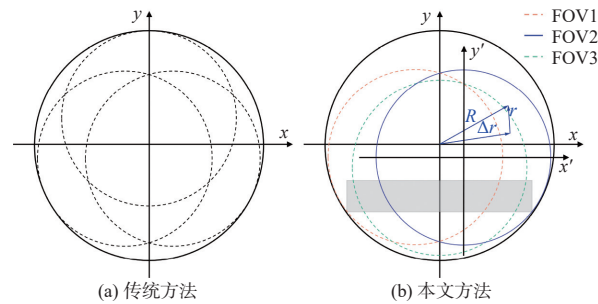


图4 元瞳面上视场分布对比

Fig. 4 Comparison of field of view distribution on meta-pupil plane

本研究中,由于推扫成像模式使得像面为条状,因此,3个WFS不是旋转对称地放置在边缘视场,3个视场的投影则是与元瞳面外接,如图4(b)所示。图4中 R 与 r 分别是元瞳面和小圆的坐标, Δr 为小圆相对于元瞳面的位移量。选取其中一个视场为例进行分析,其波前 $W(r)$ 的圆形部分可以根据泽尼克多项式分解:

$$W(r) = \sum_{i=1}^J A_i Z_i\left(\frac{2R}{D}\right) = \sum_{j=1}^J a_j Z_j\left(\frac{2r}{d}\right)$$

式中: Z 为定义归一化半径的泽尼克多项式; a_j 和 A_i 分别是对应的泽尼克系数; d 和 D 分别为投影小圆和元瞳面的直径。

2个泽尼克系数之间可以通过模态投影矩阵 P 相关联:

$$Z_i\left(\frac{2R}{D}\right) = \sum_{j=1}^J P_{ij} Z_j\left(\frac{2r}{d}\right) \quad (1)$$

联立上面 2 个公式可得:

$$a_j = \sum_{i=1}^J P_{ij} A_i \quad (2)$$

如果看作是矩阵形式, 即:

$$\mathbf{a} = \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (3)$$

通过求解 $\mathbf{P}$ 矩阵的逆矩阵, 可以对整体波前进行重建:

$$\mathbf{P} = \mathbf{a} \mathbf{A}^{-1} \quad (4)$$

2 分析与讨论

为验证本研究方法的可行性, 设计了如下仿真分析过程。利用 Zemax 软件对上述光学系统进行修改, 具体来说, 在主镜(光阑)位置叠加一个已知的扰动波前, 该面形使用 Zernike 多项式生成, 此时的光学系统将发生一定的变化。扰动波前由 4~9 阶 Zernike 生成, 其表面的均方根值(RMS)为 1.38×10^{-5} nm, 如图 5 所示。

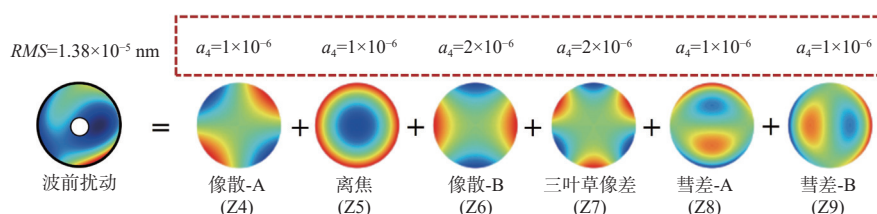


图 5 扰动面形

Fig. 5 Disturbed surface shape

利用本研究方法可获得拟合波前, 并将扰动的波前作为目标, 通过对比两者之间的残差, 验证该方法的拟合效果。由以上分析可知, 该方法利用多个不同视场的波前进行计算, 最终获得一个综合的波前, 当该波前在一个表面上时也可称为面形。下面将获取两组波前, 为计算面形做准备。第 1 组是在初始光学系统中选取 3 个视场的波前,

如图 6 左列所示, 分别为 -1、0 和 1 视场, 下面简称为 FOV 1、FOV 2 和 FOV 3。第 2 组是在受扰动的光学系统中, 提取图 3(b) 所示的 WFS 位置的波前, 如图 6 中列所示。将两组对应的波前做差, 可得到系统在 3 个视场位置受到扰动后的波前变化, 称为波前残差, 如图 6 右列所示。图 6 中纵向颜色图为 RMS 值, 单位为 nm。

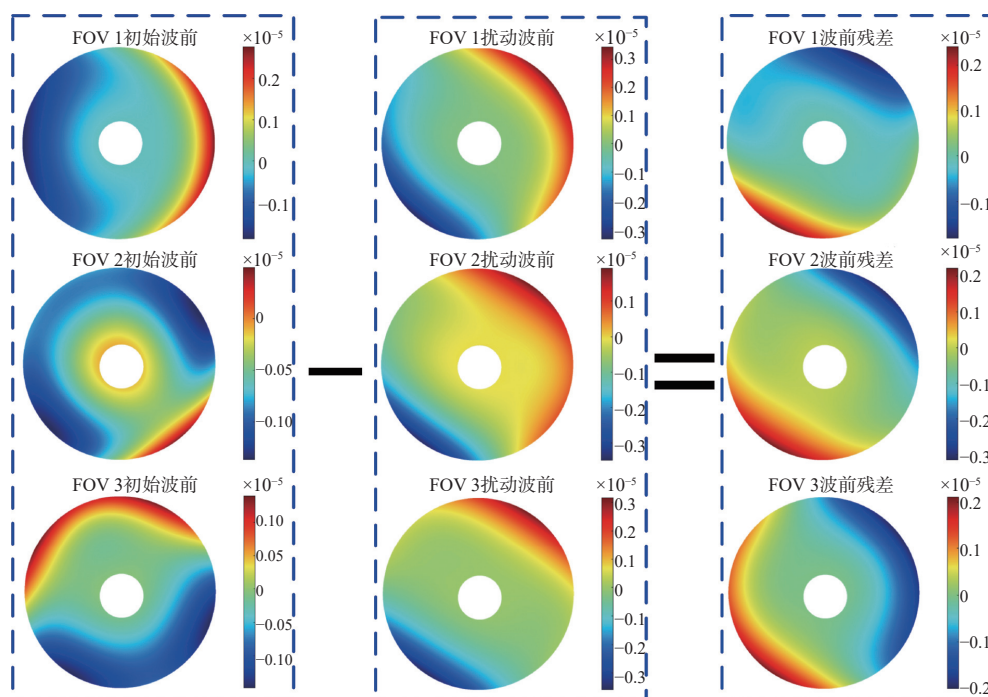


图 6 各视场波前对比

Fig. 6 Wavefront comparison of each FOV

利用该波前重建算法,对图6中不同视场波前残差进行波前重建,重建后的面形如图7(b)所示(图中纵向颜色图为RMS值,单位为nm)。通过与图7(a)所示扰动面形对比,经计算它们之间的波前残差RMS值为4.02 nm,如图7(c)所示。经过对比分析可知,该方法拟合精度高于 $\lambda/100$ (波长 λ 为632.8 nm),并且一般大口径光学元件的制造和加工精度难以高于 $\lambda/100$,那么认为该方法满足实际工程需求。

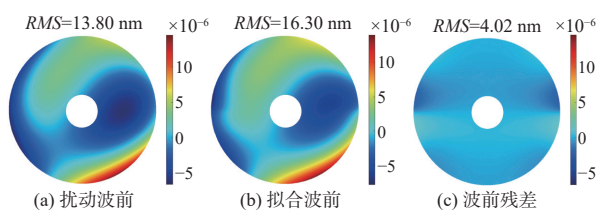


图7 波前对比

Fig. 7 Wavefront comparison

综上所述,本文方法针对大视场空间遥感系统,利用最少数量的WFS和校正镜,实现了将多视场波前重建为综合系统波前。经过仿真分析,表明本方法的重建精度满足实际工程需求。

3 结论

在航天大口径遥感系统中采用主动光学,可有效补偿太空环境对成像质量的影响。随着对大幅宽遥感图像的需求日益增加,大视场光学系统给主动光学技术提出了新的挑战,如何获得光学系统综合波前像差,为波前校正提供目标成为了难题。本文提出了一种仅需使用3个波前传感器(WFS)和1个可变形镜即可进行波前探测的方法。该方法通过在探测器板上开孔的方式,获取了多个视场的波前信息,并利用基于Zernike多项式的波前重建算法计算出综合的波前像差。仿真分析结果表明:该方法的波前重建精度优于 $\lambda/100$,满足实际工程需求,有望在航天领域得到广泛应用。

参考文献:

- [1] MCGUIRE P C, SANDLER D G, LLOYD-HART M, et al. Adaptive optics: neural network wavefront sensing, reconstruction, and prediction[J]. Scientific Applications of Neural Nets, 2007,9(4): 97-138.
- [2] ZHANG L, ZHENG X, LYU X, et al. Optimization method of the thermal control index of space remote sensors based on force-thermal coupling algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119058.
- [3] WAHBALLAH W A, ELTOHAMY F, BAZAN T M. Influence of attitude parameters on image quality of very high-resolution satellite telescopes[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(2): 1177-1183.
- [4] DOYLE K B, GENBERG V L, MICHELS G J. Integrated optomechanical analysis: Second edition[M]. Washington: SPIE, 2012.
- [5] WILSON R N, FRANZA F, NOETHE L. Active optics I: a system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes[J]. Journal of Modern Optics, 1987, 34(4): 485-509.
- [6] WANG K N. Piezoelectric adaptive mirrors for ground-based and space telescopes[D]. Brussels: Free University of Brussels, 2018.
- [7] RODDIER F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1223.
- [8] ROBERTSON H J. Development of an active optics concept using a thin deformable mirror[R]//NASA Contractor Reports. Washington: NASA, 1970.
- [9] 操超, 范真节, 廖胜, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 1-9.
CAO Chao, FANG Zhenjie, LIAO Sheng, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 1-9.
- [10] BECKERS J M. Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics[J]. Very Large Telescopes and their Instrumentation, 1988, 2: 693.
- [11] TALLON M F R. Adaptive telescope with laser probe: isoplanatism and cone effect[J]. Astronomy and Astrophysics, 1990, 235: 549-557.
- [12] RAGAZZONIA R, FARINATO J, MARCHETTI E. Adaptive optics for 100 m class telescopes: new challenges require new solutions[J]. SPIE: Adaptive Optical Systems Technology, 2000, 4007: 486-497.
- [13] Of Natural History. A M James Webb space telescope science guide[J/OL]. NASA(121-137): 554. <http://www.biodiversitylibrary.org/item/136149>.
- [14] MALBET F, SHAO M, YU J. Active optics and coronagraphy with the Hubble space telescope[J]. 1994, 2201:

- 1135-1144.
- [15] LASLANDES M, FERRARI M, HUGOT E G L. Space active optics: in flight aberrations correction for the next generation of large space telescopes[J]. [International Conference on Space Optics, 2017](#), 10565 : 105651Z-1-7.
- [16] COSTES V, DELVIT J, PERRET L, et al. Active optics for next generation space telescopes[J]. [International Conference on Space Optics, 2017](#), 10562: 1-9.
- [17] COSTES V, LAUBIER D, DARRE P, et al. Optical design and active optics for next generation space telescopes[J]. [Space Telescopes and Instruments, 2013](#), 8860: 88600B-1-7.