



红外与激光工程
Infrared and Laser Engineering
ISSN 1007-2276, CN 12-1261/TN

《红外与激光工程》网络首发论文

题目： 基于 dOTF 的大口径透射光学元件检测技术
作者： 唐境, 张景旭, 安其昌, 李洪文
收稿日期： 2020-09-20
网络首发日期： 2020-12-01
引用格式： 唐境, 张景旭, 安其昌, 李洪文. 基于 dOTF 的大口径透射光学元件检测技术. 红外与激光工程.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20201201.1624.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 dOTF 的大口径透射光学元件检测技术

唐 境^{1,2} 张景旭¹ 安其昌^{1*} 李洪文¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

摘要：为了保证在重力变化下大口径巡天望远镜透镜组的成像质量，需要研究一套可以适用于大口径透镜组的波前检测手段，用于实现系统装调检测。首先，基于差分光学传递函数（differential optical transfer function, dOTF）建立了一套波前对准检测技术，在此基础上，分析了运算过程中相位解缠，CCD 探测噪声以及大气扰动对检测算法造成的误差影响，结果表明检测误差分别小于 10%，1% 和 2.5%，经过叠加可得整体的测量精度约为 10.3%，满足一般大口径大视场检测系统设计指标。最后针对 80mm 的透射式系统进行验证，由实验结果得到波前检测主要成分为彗差，与理论分析结果一致，符合几何光学预测结果。

关键词：大口径大视场望远镜；大口径校正透镜；差分光学传递函数；集成检测

中图分类号：TH751 文献标志码：A

Large Transmission Optical Element Detection Method Based on dOTF

Tang Jing^{1,2} Zhang Jing-xu¹ An Qi-chang^{1*} Li Hong-wen¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: To ensure the corrector lens meet the imaging quality of design requirements under the change of gravity, the large aperture corrector lens needs a wavefront detection method for implementing system adjustment detection. Firstly, on the basis of the differential optical transfer function (dOTF), this investigation consequently proposes the wavefront alignment detection method. Next, the error effects caused by the phase resolution, CCD detection noise and atmospheric disturbance on the detection algorithm are analyzed. The results show that the detection error is less than 10%, 1% and 2.5%. The overall measurement precision obtained by superposition is about 10.3%, which meets the design indexes of general large-aperture survey design requirement. Finally, the experiment verifies the accuracy of the detection method in the 80mm transmission system. From the experimental results, the main error of wavefront detection is coma, which is consistent with the theoretical analysis results and consistent with the geometric optical prediction results.

Key words large aperture survey telescope; Large corrector lens; differential optical transfer function; integration testing

收稿日期：2020 年 9 月 20 日；**修回日期：**2020 年 11 月 4 日；**录用日期：**2020 年 11 月 5 日

基金项目：中国科学院青年创新促进会(2020221)，白求恩医学工程与仪器中心基金项目(No. BQEGCZX2019042)，国家自然科学基金项目(No. 11803034, 62005279)中科院装备研制项目(YJKYYQ20200057)资助

1 引言

随着时域天文的发展,天文学界大口径照相巡天望远镜这一科研利器的需求越来越大。随着系统口径的增加,校正镜组中的透射光学元件尺寸也随之增大,同时其准直装调难度也日益增加。校正镜组装调误差包括透镜的偏心,倾斜和透镜间的间隔误差。传统小型相机采用张正友法^[1]为了提高大口径透射系统检测精度,利用波前检测进行透射元件检测的方法,在 Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VISTA) 以及 James Webb Space Telescope (JWST) 等^[2]望远镜中已经开始应用。但是需要特殊的检测设备,同时也无法适应不同重力工况。

波前检测技术按照处理数据的来源主要分为光瞳面波前传感以及焦平面波前传感,其中光瞳面波前传感包括:干涉成像、哈特曼探测、角锥,泽尼克相衬,焦平面波前传感包括:曲率传感器与相位恢复技术。

干涉成像法主要包括泰曼格林干涉仪,斐索干涉仪和剪切干涉仪,其工作原理是通过干涉系统将波前信息转换为干涉条纹,利用干涉图解算波面相位信息。检测精度较高,对检测装置和环境要求同样较高。哈特曼波前传感器由微透镜阵列和电荷耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) 组成,畸变入射光波通过为光瞳面的微透镜阵列后分割取样,CCD 放置于微透镜焦面处接收光斑,测量光斑的质心偏移求得波前斜率,通过重构最终得到待测波前相位分布。角锥波前探测原理是将角锥棱镜放置于焦点处分光,出射光束在探测元件上形成四个由波前畸变导致的不同亮度的光瞳像。根据亮度差异求得波前斜率,推算波前畸变的相位分布^[3]。相位恢复波前检测技术采用迭代或直接的相位恢复算法对直接测量的光强信息反演系统波前相位。该检测方法可适用不同的波长,但是缺点为检测的动态范围小,对大像差系统不容易收敛^[4]。

以上方法均需要额外的光学设备进行探测传感,并不能很好地满足大口径大视场光学系统集成检测需求。差分光学传递函数方法 (dOTF) 是 2012 年由亚利桑那大学斯图尔德天文台的 Johanan. L. Codoan 所提出的一种基于图像检测处理的波前检测技术^[5,6],该方法对图像的处理过程简单且非迭代,只通过遮挡光学系统的部分入射光瞳孔径,即可直接通过放置于焦平面的相机成像检测光瞳面的相位及振幅变化^[7],无需波前重建算法,即使光瞳掩模未知并且像差较大的情况下也可以十分容易的获取波前信息^[8,9]。该检测过程简单且容易实现,检测结果精度接近干涉测量。

在此,本文引入 dOTF 以实现在不同工况下的大口径透射波前检测。

2 透射波前集成检测技术

dOTF 是检测光瞳面成像的相位和复振幅从而获得波前的简单技术,其本质是利用两幅点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 图像的傅里叶变换之差 (分别取全部光瞳面和部分遮挡的光瞳面) 计算光瞳面 (pupil field) 的相位分布。因为 PSF 是光瞳面的二次泛函,傅里叶变换后所得光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF) 本质上为非线性函数,dOTF 则是通过微分方法将 OTF 的二次泛函变为线性的过程。两个 PSF 图像的傅里叶变换之差近似于 OTF 对光瞳掩模 (pupil mask) 的导数,而 OTF 导数的几何意义为翻转对称且存在部分重叠的共轭光瞳图像不重叠时^[10],光瞳面可通过相位和振幅进行检测,但重叠部分内不方便进行测量计算,dOTF 采用引入部分遮挡,减小了光瞳重叠区域的方法,计算得到光瞳面的差分光学传递函数,估算整个光瞳面的相位和振幅分布,得到光学系统的波前分布^[11,12]。

设光瞳掩模后复振幅为 $u(x)$,

$$u(x) = \Pi(x) u_0(x) \quad (1)$$

式中 $\Pi(x)$ 为光瞳掩模函数, $u_0(x)$ 为入射光瞳复振幅。

由傅里叶光学可知,光学传递函数 (OTF) $\mathcal{H}(\xi)$ 为点扩散函数 (PSF) $h_f(x)$ 的傅里叶变换,

$$\mathcal{H}(\xi) = \mathcal{F}\{h_f(x)\} \quad (2)$$

光学传递函数 (OTF) 在光瞳场内可表达为,

$$\mathcal{H}(\xi) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int e^{-j\kappa\xi} |u(x)|^2 dx \quad (3)$$

其中 ξ 为空间频率。dOTF 中被遮挡部分的光瞳函数变化可由式 (4) 表示,

$$\Pi'(x) = \Pi(x) + \Delta\Pi(x) \quad (4)$$

差分光学传递函数为 $\Delta\mathcal{H}(\xi)$ 可表示为,

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{H}(\xi) &= \mathcal{H}_{\Pi+\Delta\Pi}(\xi) - \mathcal{H}_{\Pi}(\xi) \\ &= u\Delta u^* + \Delta u u^* + \Delta u \Delta u^* \end{aligned} \quad (5)$$

当不考虑重叠区域点时,最终求得光瞳面的相位

$\vartheta(\xi)$ 和振幅 $A(\xi)$ 可由式 (6) (7) 表示,

$$\vartheta(\xi) = \arg \{ \Delta \mathcal{H} \} \quad (6)$$

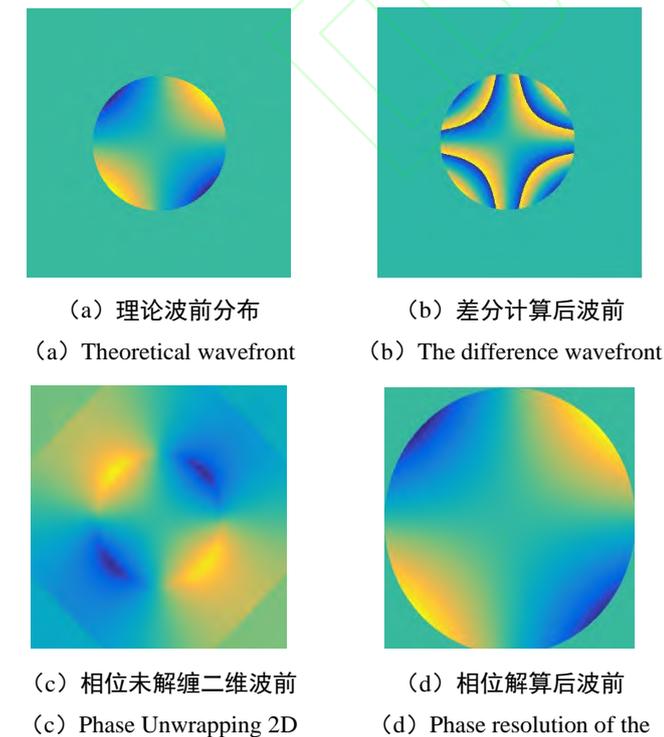
$$A(\xi) = | \Delta \mathcal{H} | \quad (7)$$

3 检测算法精度分析

对准检测过程中如相位解缠, CCD 探测噪声和大气扰动等因素都直接影响检测算法的精度, 为了保证该算法在实际应用中的输出尽可能贴近理论值的波前信息, 除了考虑模型训练误差外, 还应考虑在其他因素的影响下的波前分布是否仍满足理想值偏离范围内^[13-15], 解算过程 Zernike 像差取 3 到 15 阶。

3.1 相位解算精度分析

相位的周期性导致计算过程只能得到 2π 周期内的相位差, 超过 2π 的相位数据会重新循环, 因此需要对最初的波前信息进行相位解缠, 将其恢复至真实的相位差。为了进一步验证相位解缠和解算精度, 分别输入单项 Zernike 像差和多种 Zernike 像差组合的输入波前 (幅值均为一个波长), 对解算精度进行检测, 其中单项 Zernike 像差结果如图 1 所示。图 1 (a) 为像散的理论计算波前分布示意图, 图 1 (b) 为遮挡部分入瞳孔径后的 PSF 图像, 将遮挡和未遮挡部分入瞳孔径的 OTF 相减, 计算得到的最初的相位分布图像如图 1 (b) 所示。从图 1 (c) 的为相位解缠前的二维波前, 图 1 (d) 为相位解算后的相位分布, 与图 1 (a) 对比可以看出相位解缠后分布图与理论分布值相差不大。图 2 为输入多种 Zernike 像差组合的 dOTF 计算结果图。



wavefront wavefront

图 1 像散 dOTF 计算过程图

Fig. 1 Astigmatism dOTF calculation process

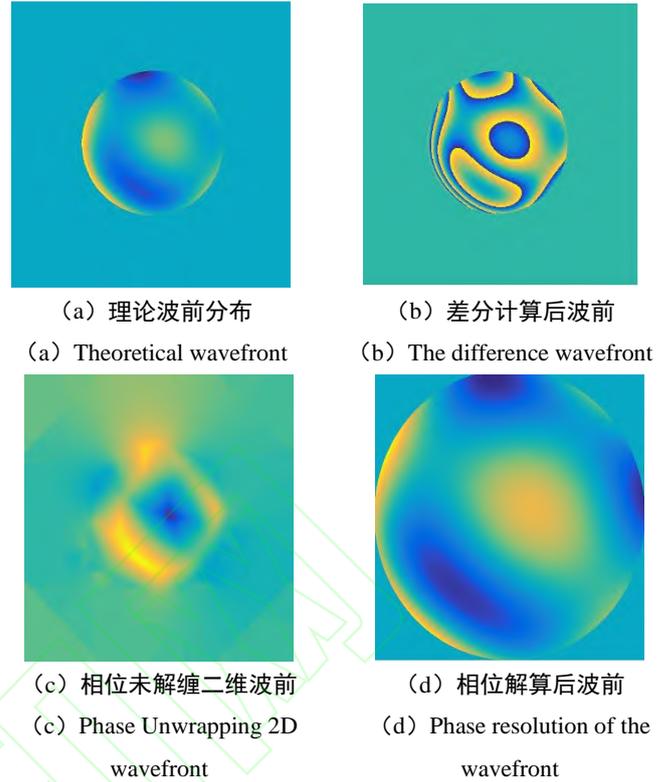


图 2 多项 Zernike 组合的 dOTF 计算过程图

Fig. 2 Multiple Zernike dOTF calculation process

各项 Zernike 的检测误差如图 3 所示, 幅值为 1.5、1、0.5 个波长时, 分析可得多项 Zernike 组合后波前整体误差小于 60%。因此, 需要进一步的利用算法进行迭代, 最终通过两次迭代将误差降到 10% 以下, 如图 4 所示。

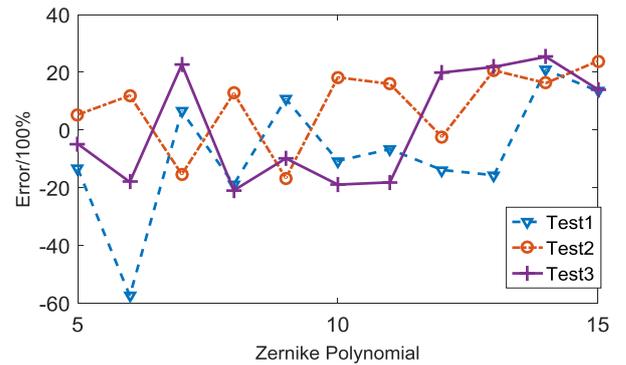


图 3 不同相位缠绕程度相位解缠初始精度折线图

Fig. 3 Zernike phase unwinding error accuracy

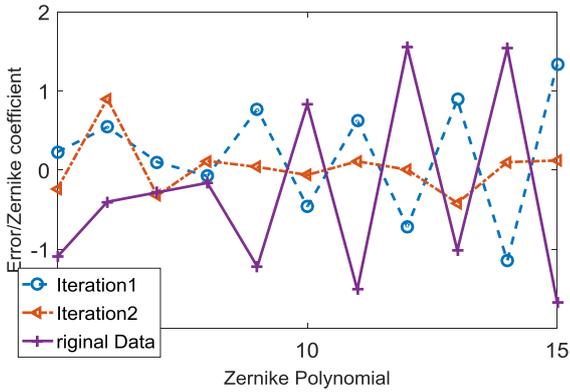


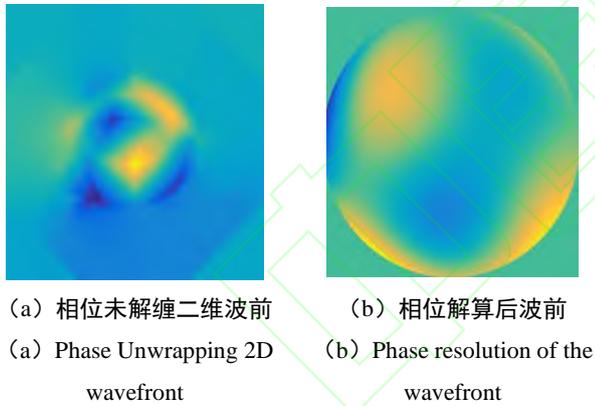
图 4 各项 Zernike 相位解缠迭代后精度折线图

Fig. 4 Zernike phase unwinding error accuracy

3.2 CCD 探测噪声

CCD 作为图像传感器被广泛应用于成像系统中，具有动态范围大，量子效率高，线性度好，光谱响应范围宽等优点，其工作原理导致 CCD 在成像过程中必然会产生噪声和干扰，主要包括：光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声、转移噪声、复位噪声等^[16]。由于暗电流建模过程较复杂，因此直接采用暗场测量的方法，CCD 探测噪声的影响均值为 7.4 灰度值，标准差为 18.9 灰度值。

在点扩算函数中，加入噪声解算结果如图 5 所示，误差小于 1%，因此 CCD 探测噪声在检测过程中可以忽略不计。



(a) 相位未解缠二维波前 (a) Phase Unwrapping 2D
(b) 相位解算后波前 (b) Phase resolution of the wavefront

图 5 CCD 噪声相位解缠示意图

Fig. 5 CCD noise Phase Unwrapping

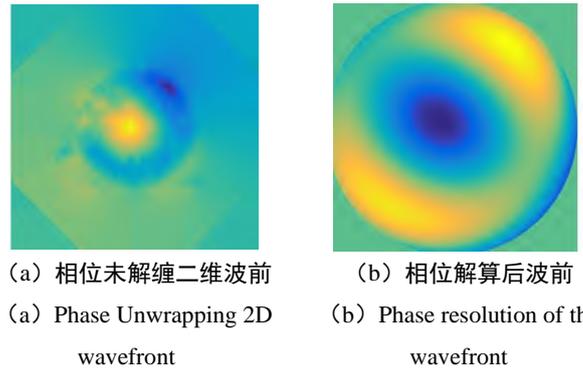
3.3 大气扰动

天文观测过程中目标发出的光波通过大气传输到望远镜系统中成像^[17]，该过程中大气湍流造成的折射率虽然变化较小，但远距离观测的累计效果导致大气扰动所造成的影响不容忽视^[18,19]。视宁度主要分为大气视宁度、圆顶视宁度和镜面视宁度，在自适应光学领域，研究大多集中于大气视宁度上^[20]。

分析过程中，在 PSF 中添加三种不同的大气相干长度 $R_0=0.02m$, $0.01m$ 和 $0.1m$ ，其中 $R_0=0.02m$ 拟合结果如图 6 所示，计算可得大气扰动引入的相位变化量分别为

1.95%，1.87%和 2.27%，小于 2.5%。

综合考虑上述分析的相位解缠精度，CCD 探测噪声和大气扰动所带来的影响，总结出单次检测整体误差不大于 10.5%，至于经过两次调整迭代计算即可满足要求，



(a) 相位未解缠二维波前 (a) Phase Unwrapping 2D
(b) 相位解算后波前 (b) Phase resolution of the wavefront

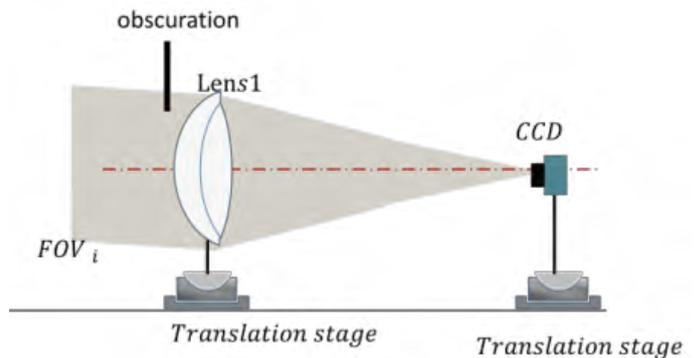
图 6 $R_0=0.02m$ 大气扰动相位解缠示意图

Fig. 6 $R_0=0.02m$ Atmospheric Perturbation Phase Unwrapping

图 7 为 dOTF 的实验装置图，由实验结果可以看出，见图 8 和图 9，该双胶合透镜轴外视场波前检测中，主要的成分为彗差，这与理论分析的结果像一致，也很好的符合几何光学预测的结果。同时，在振幅分布图中，可以明显的看到二次项对波前解算结果的耦合。



(a) 实验设备图 (a) Experimental equipment diagram
(b) 未遮挡 PSF 图 (b) Unshielded PSF
(c) 遮挡 PSF 图 (c) Shielded PSF



(d) 实验装置示意图

(d) Schematic diagram of experimental set-up

图 7 dOTF 实验及结果分析图

Fig. 7 dOTF experiment and result analysis chart

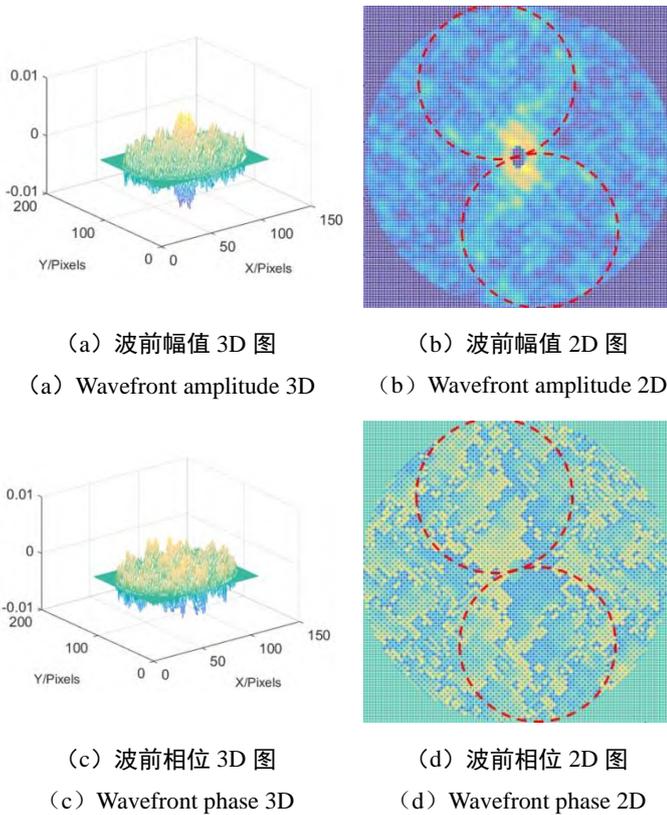


图 8 dOTF 实验及结果分析图

Fig. 8 dOTF experiment and result analysis chart

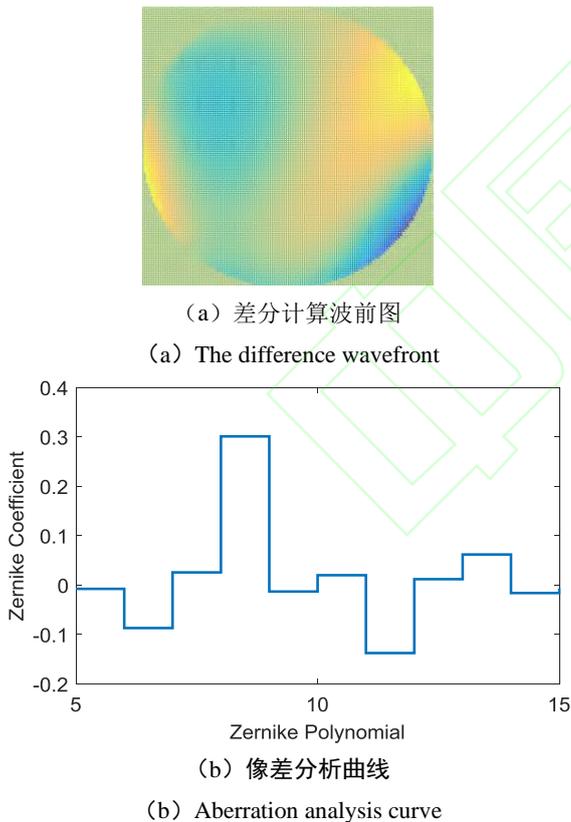


图 9 dOTF 实验及结果分析图

Fig. 9 dOTF experiment and result analysis chart

4 结 论

本文采用 dOTF 作为获得大口径透镜波前的方法，该方法检测设备简单，仅通过对口径的遮挡实现波前检测，

无需其他部件和波前重建环节，可在光学系统工作的状态下进行检测，不受非共光路像差影响，即可直接得到波前，在大口径透射式系统波前检测方面具有无与伦比的优势

本文首先介绍 dOTF 的基础理论和与之对应检测流程，重点讨论大口径透射波前的对准检测方法，此外，根据检测算法精度的影响因素，分析计算相位解算精度、CCD 探测噪声和大气扰动误差的误差范围，结果显示检测误差分别小于 10%，1% 和 2.5%，与理论分析数据较为贴合，误差范围满足要求，经过叠加可得整体的测量精度约为 10.3%，针对约 550 纳米的误差（轴外视场），其误差为 56 纳米，满足一般大口径大视场检测系统设计指标^[21-26]。本科研究可为未来研究工作的开展和实验起到很好的指导作用。

参考文献

- [1] Chi Dexia, Wang Yang, Ning Liqun, et al. Experimental research of camera calibration based on ZHANG's method [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36(02): 287-289+337. (in Chinese)
- [2] Smith K, Acton D S, Gallagher B, et al. Calibration results using highly aberrated images for aligning the JWST instruments to the telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9904:990442.
- [3] N'Diaye M, Dohlen K, Caillat A, et al. Design optimization and lab demonstration of ZELDA: a Zernike sensor for near-coronagraph quasi-static measurements [C]. *Adaptive Optics Systems IV*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [4] Zhang Ning, Ye Lu, Song Ying, Design and detection for the photoelectric device used in the point source transmission testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 039 (001): 92-99. (in Chinese)

张宁, 叶露, 宋莹. 用于点源透射比测试的光电探测装置设计及检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 039(001): 92-99.

- [5] Codona J L. Differential optical transfer function wavefront sensing [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 097105.
- [6] Codona J L. Theory and Application of Differential OTF (dOTF) Wavefront Sensing[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8447.
- [7] Codona J L, Doble N, Ellerbroek B L, et al. Experimental evaluation of differential OTF (dOTF) wavefront sensing [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8447: 321-323.
- [8] Jiang F Y, Ju G H, Qi X, et al. Cross-iteration deconvolution strategy for differential optical transfer function (dOTF) wavefront sensing [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4283-4286.
- [9] Knight J M, Rodack A T, Codona J L, et al. Deconvolution of differential OTF (dOTF) to measure high-resolution wavefront structure [C]. *Techniques & Instrumentation for Detection of Exoplanets VII*. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [10] Hart M, Codona J L. Wavefront Sensing with the Differential Optical Transfer Function [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2012, 52(9).
- [11] Korkiakoski V, Keller C U, Doelman N, et al. High-order Wavefront Correction with a Spatial Light Modulator: Calibrations with dOTF Method [C]. *Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications*. 2013.
- [12] Rodack A T, Knight J M, Codona J L, et al. Adaptive optics self-calibration using differential OTF (dOTF) [C]. *Techniques & Instrumentation for Detection of Exoplanets VII*. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [13] Luo Yuzhuo, Ma Yu, Wang Wenna, et al. Application of environmental monitoring based on BP neural network optimized by FPSO [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 037 (003): 136-142.
- 罗宇卓, 马瑜, 王文娜, 等. 基于 FPSO 优化的 BP 神经网络算法及环境监测应用 [J]. *国外电子测量技术*, 2018, 037(003): 136-142.
- [14] Zhang Dong, Gui Jie, Wang Xiaoling, et al. Phased array ultrasonic detection using equal height focusing algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 032(002): 42-47. (in Chinese)
- 章东, 桂杰, 王晓玲, 等. 等高度聚焦算法的超声相控阵检测技术 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 032(002): 42-47.
- [15] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Evaluation of the performance of large telescope based on normalized point source sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1218001. (in Chinese)
- 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. PSSn 在大口径望远镜误差评估中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1218001.
- [16] Li Lixing, Huang Yongmei, Wang Qiang, et al. Noise adaptive Kalman filter for video point target tracking [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017(06): 170-174. (in Chinese)
- 李力行, 黄永梅, 王强, 等. 点目标视频跟踪中的噪声自适应卡尔曼滤波器[J]. *电子测量技术*, 2017(06): 170-174.
- [17] Tibor A, Abrams D C, Infantes D C, et al. Preliminary optical design for the WEAVE two-degree prime focus corrector [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes IV*. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [18] Smith K, Acton D S, Gallagher B, et al. Calibration results using highly aberrated images for aligning the JWST instruments to the telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9904:990442.
- [19] Pazder J S, Vogiatzis K, Angeli G Z. Dome and Mirror Seeing Estimates for the Thirty Meter Telescope [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2008, 7017.
- [20] Yang X F, Han C Y. Novel Algorithm for Computer-Aided

Alignment of Wide Field of View Complex Optical System [J].

Key Engineering Materials, 2007: 1066-1071.

[21] Kent S. Preliminary optical design for a 2.2 degree diameter prime focus corrector for the Blanco 4 meter telescope [J].

Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6269.

[22] Blanco D, Pentland G, Smith C, et al. A prime focus corrector for the Lowell 4m telescope [C]. Specialized Optical Developments in Astronomy. EOS Technologies, Inc. 925 W. Grant Road Tucson, AZ 85705, 2003.

[23] Tibor A, Abrams D C, Emilie L, et al. Final optical design for the WEAVE two-degree prime focus corrector [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. International Society for Optics and Photonics, 2014.

[24] Doel P, Abbott T, Antonik M, et al. Design and status of the optical corrector for the DES survey instrument [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. International Society for Optics and Photonics, 2008.

[25] Poteet W M, Cauthen H K, Kappler N, et al. Design and Fabrication of Three 1.6-Meter Telescopes for The Korea Microlensing Telescope Network (KMTNet) [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8444:84445S-84445S-9.

[26] Liu Xiangyi, Wang Fuguo, Zhang Jingxu, et al. Study on moment correction method of primary mirror semi-active support [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (5): 0518003. (in Chinese)

刘祥意, 王富国, 张景旭, 等. 主镜半主动支撑的力矩校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0518003.

作者简介:

唐境 (1993-), 女, 2015 年于长春理工大学获得学士学位, 2020 年于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事地基大口径望远镜方面的研究。

E-mail: tangjing171@mailsucas.edu.cn

导师简介:

张景旭(1964-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大型光电望远镜结构总体技术的研究。E-mail:

zhangjx@ciomp.ac.cn

通讯作者简介:

安其昌, 博士, 助理研究员, 中国科学院青年创新促进会成员。于2011在中国科学技术大学获得工学学士学位。于2018年在中国科学院大学获得博士学位, 现就职于中国科学院长春光机所, 研究方向为大口径光机系统检测装调。

E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn