

## 基于 dOTF 的大口径透射光学元件检测技术

唐 境<sup>1,2</sup>, 张景旭<sup>1</sup>, 安其昌<sup>1\*</sup>, 李洪文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**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, 需要研究一种可以适用于大口径透镜组的波前检测方法, 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 80 mm 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:** 大口径巡天望远镜; 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 **DOI:** 10.3788/IRLA20200358

## Large aperture transmission optical element detection method based on dOTF

Tang Jing<sup>1,2</sup>, Zhang Jingxu<sup>1</sup>, An Qichang<sup>1\*</sup>, Li Hongwen<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, 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), the wavefront alignment detection technology was proposed consequently. Next, the error effects caused by the phase resolution, CCD detection noise and atmospheric disturbance on the detection algorithm were 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 accuracy of the detection method in the 80 mm transmission system was verified by the experiment. 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 aperture corrector lens; differential optical transfer function; integration testing

收稿日期: 2020-09-15; 修订日期: 2020-11-04

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 (BQEGCZX2019042); 国家自然科学基金 (11803034, 62005279); 中国科学院装备研制项目 (YJKYYQ20200057)

作者简介: 唐境, 女, 主要从事地基大口径透射系统设计及仿真分析等方面的研究。

通讯作者: 安其昌, 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为大口径光机系统检测装调。

导师简介: 张景旭, 男, 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方面的研究。

## 0 引言

随着时域天文的发展,天文学界对大口径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、倾斜误差等,传统小型相机则采用张正友法<sup>[1]</sup>对系统进行检测表校。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<sup>[2]</sup>望远镜中已经开始应用。但该方法需要特殊的检测设备,同时只能针对特定的重力工况。

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,畸变入射光波通过位于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<sup>[3]</sup>。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,但缺点是检测的动态范围小,对大像差系统不容易收敛<sup>[4]</sup>,因此只能应用于像差较小的系统。

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 (dOTF) 方法是 2012 年由亚利桑那大学斯图尔德天文台的 Johanan. L. Codoan 提出的一种基于图像检测处理的波前检测技术<sup>[5-6]</sup>,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<sup>[7]</sup>,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地获取波前信息<sup>[8-9]</sup>。该检测过程简单且容易实现,通过表校和迭代,检测精度接近干涉测量。

在此,文中引入 dOTF 以实现在不同工况下的大口径透射波前检测。

## 1 透射波前集成检测技术

dOTF 是通过简单直接的技术获取光瞳面成像的波前相位和复振幅,两个点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 图像的傅里叶变换之差近似于光学传递函数 (Optical Transfer Function, 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,针对不重叠部分的光瞳可通过相位和振幅进行检测,针对重叠部分的光瞳,dOTF 引入部分遮挡,减小光瞳重叠区域内二次项影响的方法,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<sup>[10-11]</sup>。本质是利用两幅 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,傅里叶变换后所得的 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<sup>[12]</sup>。

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,  $\mathcal{H}(\xi)$  (OTF) 为  $h_f(x)$  (PSF) 的傅里叶变换:

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

OTF 在光瞳场内可表示为:

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

式中:  $\xi$  为空间频率。dOTF 中被遮挡部分的光瞳函数变化可由公式 (4) 表示:

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

$\Delta\mathcal{H}(\xi)$  (dOTF) 可表示为:

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

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 $A(\xi)$ 可由公式 (6)~(7) 表示:

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

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

## 2 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,应考虑各因素影响下的波前分布是否满足理想值偏离范围<sup>[13-15]</sup>,根据大口径透镜装调的固有特点,解算过程选取 Zernike 像差取 3~15 阶进行表示。

### 2.1 相位解算精度分析

相位的周期性导致计算过程只能得到  $2\pi$  周期内的相位差,超过  $2\pi$  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,计算得到最初的相位分布图像如图 1(b)所示。图 1(c)为相位解缠初始结果,图 1(d)为解算后 3~15 阶波前,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。

多项 Zernike 的检测误差如图 2 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%。因此单项 Zernike 像差相位解算效果较好,多项 Zernike 像差会产生一定的频率串扰,需要进一步利用算法进行迭代。

最终通过两次迭代将误差降至 10% 以下,如图 3 所示。图 4 为迭代计算后的多项 Zernike 像差组合的波前解算结果。

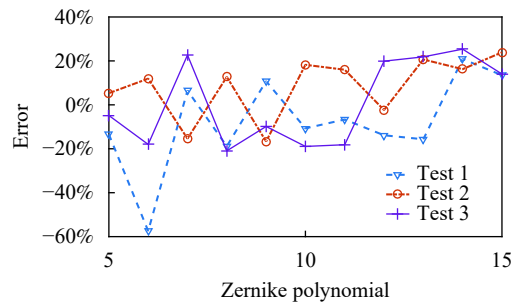


图 2 不同幅值波前解缠初始误差

Fig.2 Initial error of wavefront unwrapping with different amplitudes

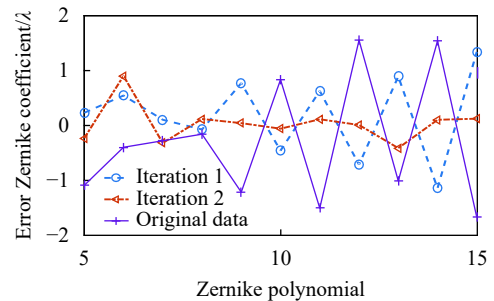
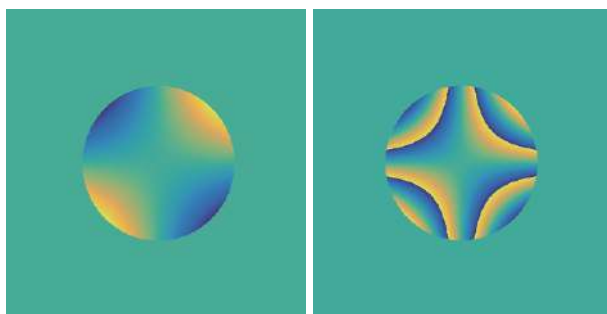
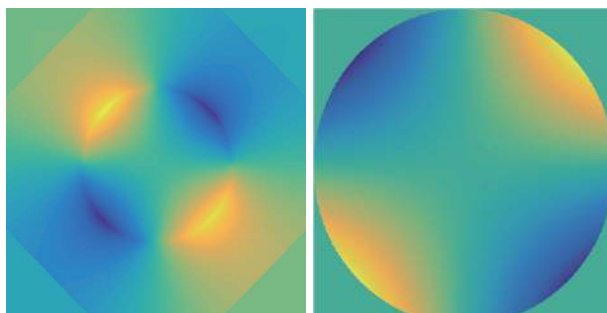


图 3 不同迭代次数所对应的解缠误差

Fig.3 Unwrapping error of different iteration times



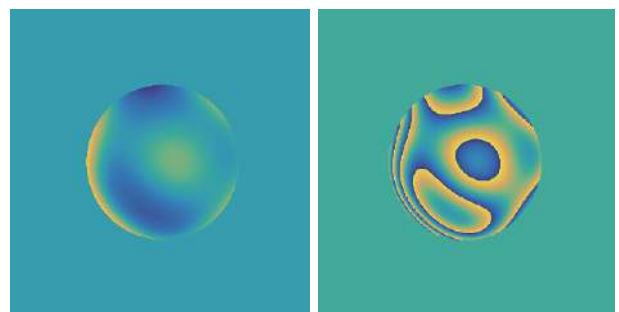
(a) 理论波前分布  
(a) Theoretical wavefront  
(b) 差分计算后波前  
(b) The difference wavefront



(c) 相位解缠初始结果  
(c) Initial results of phase unwrapping  
(d) 解算后 3~15 阶波前  
(d) 3~15 order wavefront after resolution

图 1 像散 dOTF 计算过程

Fig.1 Calculating process of astigmatism dOTF



(a) 理论波前分布  
(a) Theoretical wavefront  
(b) 差分计算后波前  
(b) The difference wavefront

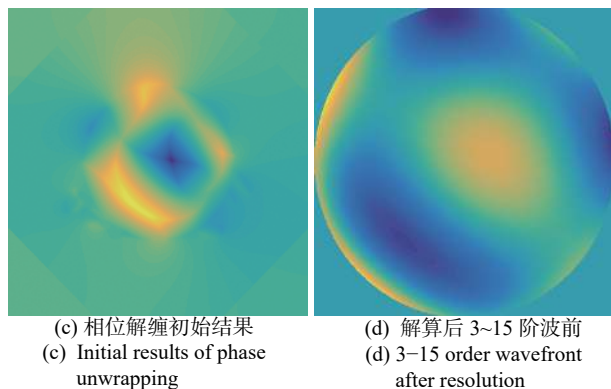


图 4 多项 Zernike 组合的 dOTF 计算过程

Fig.4 Calculating process of multiple Zernike dOTF

### 2.2 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<sup>[16]</sup>。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,

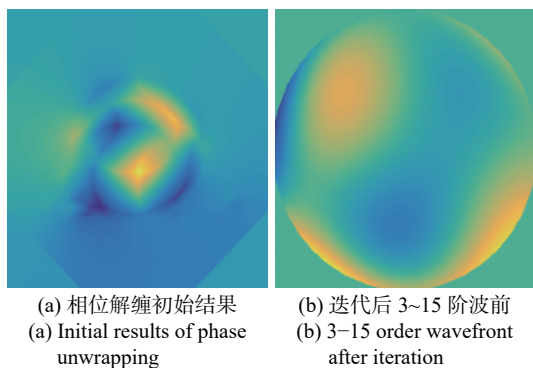


图 5 CCD 噪声相位解缠示意图

Fig.5 Phase Unwrapping of CCD noise

误差小于 1%,因此 CCD 探测噪声在检测过程中可以忽略不计。

### 2.3 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<sup>[17]</sup>,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<sup>[2,18]</sup>。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<sup>[19]</sup>。

分析过程中,在 PSF 中添加三种不同的大气相干长度  $R_0=0.02, 0.01, 0.1$  m,其中  $R_0=0.02$  m 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%、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%,经过两次调整迭代计算即可满足要求。

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,

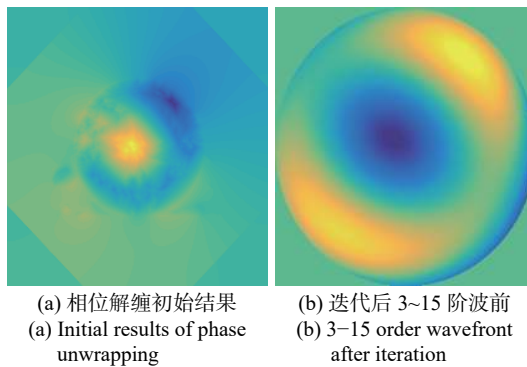


图 6  $R_0=0.02$  m 大气扰动相位解缠示意图

Fig.6 Phase unwrapping of  $R_0=0.02$  m atmospheric perturbation

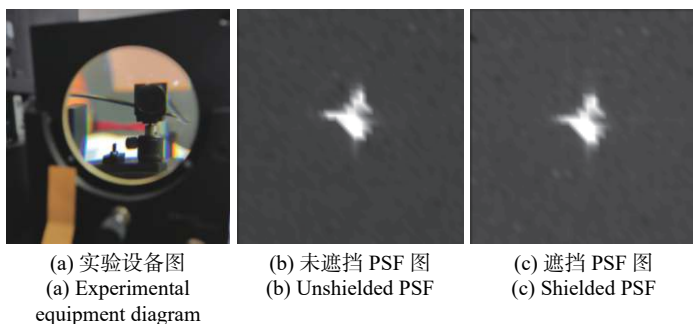
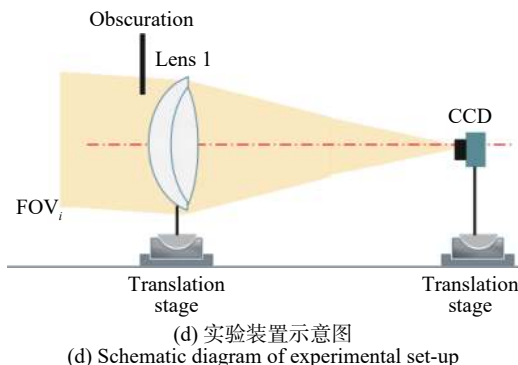


图 7 dOTF 实验装置图

Fig.7 Figures of dOTF experiment installing





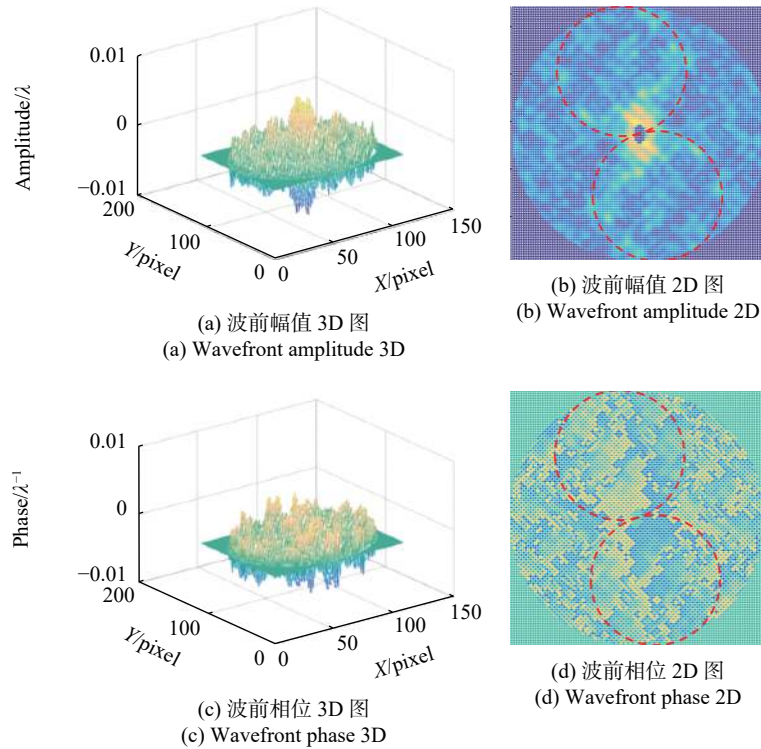


图 8 幅值与相位分布测量结果

Fig.8 Results of amplitude and phase distribution

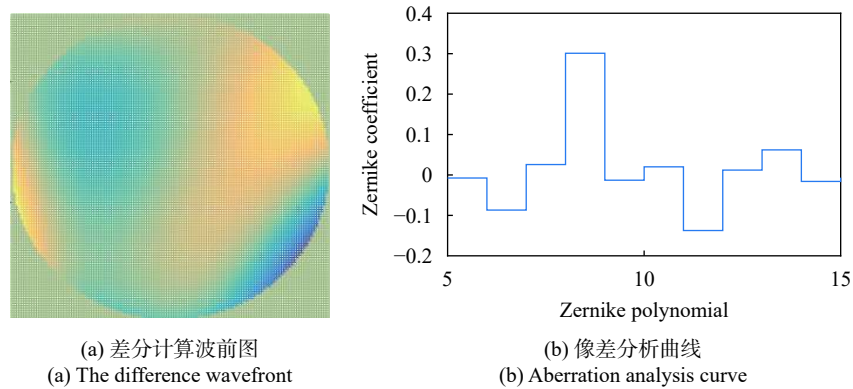


图 9 解缠后的相位及 Zernike 系数分布

Fig.9 Phase and Zernike coefficient distribution of unwrapping

也很好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。

### 3 结 论

文中采用 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很大的优势。

文中首先介绍 dOTF 的基础理论和与之对应的检测流程,重点讨论了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了计算相位解算精度、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 nm 的误差 (轴外视场), 其误差为 56 nm, 满足一般大口径大视场检测系统的设计指标<sup>[20-25]</sup>, 为未来研究工作的开展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(2): 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[C]//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]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9148: 91485H.
- [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, 39(1): 92-99. (in Chinese)
- [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[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8447: 84476P.
- [7] Codona J L, Doble N, Ellerbroek B L, et al. Experimental evaluation of differential OTF (dOTF) wavefront sensing[C]//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, 9605: 960529.
- [10] 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: OM3A.4.
- [11] 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, 9605: 96052B.
- [12] Hart M, Codona J L. Wavefront sensing with the differential optical transfer function[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2012, 8520: 85200I.
- [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, 37(3): 136-142. (in Chinese)
- [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, 32(2): 42-47. (in Chinese)
- [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)
- [16] Li Lixing, Huang Yongmei, Wang Qiang, et al. Noise adaptive Kalman filter for video point target tracking [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017(6): 170-174. (in Chinese)
- [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, 8444: 84446J.
- [18] Pazder J S, Vogiatzis K, Angeli G Z. Dome and mirror seeing estimates for the thirty meter telescope [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2008, 7017: 70170R.
- [19] 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, 364-366: 1066-1071.
- [20] Kent S. Preliminary optical design for a 2.2 degree diameter prime focus corrector for the Blanco 4 meter telescope[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6269: 626937.
- [21] Blanco D, Pentland G, Smith C, et al. A prime focus corrector for the Lowell 4m telescope [C]//Conference on Specialized Optical Developments in Astronomy, 2003: 85-94.
- [22] 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. Inter-

- national Society for Optics and Photonics, 2014, 9147: 914773.
- [23] 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, 7014: 70141V.
- [24] 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) [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8444: 84445S.
- [25] 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)