

# 光学学报

## 基于宏观傅里叶叠层成像技术的光学传递函数测量

浦东<sup>1,2,3</sup>, 何小亮<sup>1,2,4</sup>, 戈亚萍<sup>1,2</sup>, 刘诚<sup>1,2</sup>, 朱健强<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>4</sup>江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 倾斜刃边法测量光学传递函数(OTF)只能准确地获取单一方向上的调制传递函数(MTF),且无法测量Zernike像差系数。傅里叶叠层成像技术在获得超分辨图像的同时能够重建光学系统的光瞳函数,实现Zernike像差系数和二维OTF的振幅与相位的测量。以往通过相机整体平移进行孔径扫描来实现宏观傅里叶叠层成像的方法难以适用于OTF测量光路中,因此提出了电控平移台带动照明光纤运动来实现光瞳在频域的平移,具有移动间距可调、亮度高和相干性好的优点。根据OTF测量光路搭建了实验平台,利用宏观傅里叶叠层成像技术对双胶合透镜及其存在遮拦的情况进行了测量,重建其光瞳函数,计算出Zernike像差系数和OTF。通过测量高清成像镜头,分析了采集步数和重叠率对准确性的影响。实验结果表明,子午方向和弧矢方向的MTF测量结果与传函仪测量结果的均方误差在 $10^{-4}$ 量级。

**关键词** 测量; 光学传递函数; 调制传递函数; 傅里叶叠层成像; 光学测量; 光瞳函数

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1412003

## Optical Transfer Function Measurement Based on Macroscopic Fourier Ptychography

Pu Dong<sup>1,2,3</sup>, He Xiaoliang<sup>1,2,4</sup>, Ge Yaping<sup>1,2</sup>, Liu Cheng<sup>1,2</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup>School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

**Abstract** When the slanted-edge method is applied to measure the optical transfer function (OTF), it not only can just accurately obtain the modulation transfer function (MTF) in a single direction, but also fails to measure the Zernike aberration coefficients. In contrast, Fourier ptychography can obtain super-resolution images and reconstruct the pupil function of the optical system, thereby achieving the simultaneous measurement of Zernike aberration coefficients, and the amplitude and phase of the two-dimensional OTF. The previous macroscopic Fourier ptychography method by aperture scanning during the translation of the whole camera is not applicable to the optical path for OTF measurement. Therefore, driving lighting fibers into motion with an electronically controlled translation platform is proposed to achieve pupil translation in the frequency domain, and this method has the advantages of adjustable moving intervals, high brightness, and favorable coherence. The experimental setup is built according to the optical path for OTF measurement, and a

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-14; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61827816, 11875308, 61905261)、上海市“科技创新行动计划”项目(19142202600)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA25020306)、中国科学院国际合作局对外合作重点项目(181231KYSB20170022)

通信作者: \*jqzhu@siom.ac.cn

doublet and the presence of obstruction are measured by macroscopic Fourier ptychography. The corresponding pupil function is reconstructed, and Zernike aberration coefficients and the OTF are calculated. The effects of the number of acquisition steps and the overlap rate on accuracy are analyzed by measuring high-resolution imaging lens. The experimental results show that the mean square errors of the MTF measurement results in meridian and sagittal directions relative to the measurement results of the OTF measuring equipment are in the  $10^{-4}$  magnitude.

**Key words** measurement; optical transfer function; modulation transfer function; Fourier ptychography; optical measurement; pupil function

## 1 引言

作为一个客观、定量、准确的镜头成像质量评价指标,光学传递函数(OTF)被广泛应用于各类镜头的成像质量检测中<sup>[1-3]</sup>,其振幅部分为调制传递函数(MTF),其相位部分为相位传递函数(PTF),对应的二维傅里叶变换是点扩展函数(PSF)。OTF的测量方法,特别是MTF的测量方法,主要分为频谱比较法、互相关法、扫描法和干涉法<sup>[4]</sup>。由于电荷耦合器件(CCD)等图像传感器的广泛应用,故扫描法被数字像傅里叶分析法取代。数字像傅里叶分析法对针孔、狭缝等靶标成像,并对所成的像进行傅里叶变换,进而得到二维或一维的OTF。目前数字像傅里叶分析法中最常用的方法为倾斜刃边法<sup>[5-6]</sup>,利用高对比度边缘在多个采样行上的相移来生成超采样边缘扩展函数(ESF),对ESF求导得线扩展函数(LSF),最后对LSF作傅里叶变换并取模得到垂直于边缘方向上的MTF。目前有一些针对倾斜刃边法的改进工作<sup>[2, 7-8]</sup>,虽然这些改进工作提升了测量的精度,但是都忽略了PTF的测量。作为光瞳函数复振幅自相关归一化的结果,OTF也应当用复数描述,即既有振幅部分MTF,又有相位部分PTF。在理想情况(相位随频率线性变化)下,相位的移动并不影响成像的清晰度<sup>[9]</sup>,但对于存在慧差等奇数阶像差的镜头,PTF中会存在非线性部分,其对此类像差的敏感性通常大于MTF的敏感性,且具有MTF不具备的方向性<sup>[10]</sup>,存在这类相差的典型的情况是辐射状靶标中出现的相位反转现象。此外,测量单一孔径方向上的一维OTF只适用于完全旋转对称光学系统,对于存在遮拦或者装调失配的光学系统,OTF并不完全旋转对称,故现有OTF的测量结果是不全面的。

傅里叶叠层显微成像技术(FPM)是近年来持续发展进步的一种新型计算成像技术,其能通过同时恢复强度和相位分布来实现宽视场和高分辨率的成像<sup>[11-13]</sup>。傅里叶叠层显微成像技术不仅具有超分辨的成像能力,还能同步计算出显微物镜的像差<sup>[14-15]</sup>。在对远距离目标而非显微目标成像方面的应用中,傅里叶叠层显微成像技术被称为宏观傅里叶叠层成像<sup>[16-17]</sup>。宏观傅里叶叠层成像与傅里叶叠层显微成像都是依靠孔径在频域的移动实现超分辨,宏观傅里叶叠层成像的实现方法为整体移动镜头和图像传感器一体的相机,可以获得超过衍射极限的图像<sup>[18]</sup>。Holloway等<sup>[19]</sup>提出了通过激光主动照明反射式目标

配合相机阵列实现宏观傅里叶叠层成像的方法。深度学习算法与宏观傅里叶叠层成像相结合,提高了傅里叶叠层成像技术在实验应用中的鲁棒性<sup>[20-21]</sup>。目前MTF测量对象中最常见的是无限-有限共轭成像镜头,如卫星遥感成像系统、监控镜头和手机镜头等,需要利用大口径、长焦距的平行光管将目标靶成像到无穷远处,并在此成像距离上对比设计指标。因为通常待测镜头的截止频率高,CCD等图像传感器的像素尺寸较大,所以需要增加显微物镜放大所成的像以满足奈奎斯特采样要求,这会导致待测镜头、显微物镜和CCD组成的相机整体过于庞大,尤其是当待测镜头焦距较长时,更难以通过相机整体的二维移动来实现宏观傅里叶叠层成像。此外,在傅里叶叠层成像的迭代计算中,往往将光瞳函数的振幅部分设为1作为约束。然而,对于存在遮拦的镜头,如卡塞格林式镜头,光瞳函数的振幅中应当存在数值为0的部分,这部分对应于光瞳中不透光的部分。

针对上述问题,本文提出了基于移动光纤头的宏观傅里叶叠层成像的OTF测量方法,搭建了基于平移光纤头的测量装置,重建了高清成像镜头和存在遮拦情况下的透镜的光瞳函数,实现了二维OTF的振幅和相位测量,并研究了不同采集步数和重叠率下所提方法的测量准确性。

## 2 测量基本原理

### 2.1 相干传递函数与光学传递函数

相干照明情况下衍射受限光学系统的频域光瞳函数 $P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$ 即是该光学系统的相干传递函数(CTF)。对于常见的圆形孔径光学系统,CTF的表达式为

$$H_c(f_x, f_y) = P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y) = \text{circ}\left(\frac{\lambda d_i \sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{D/2}\right) = \text{circ}\left[\frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{D/(2\lambda d_i)}\right], \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 、 $D$ 和 $d_i$ 分别为波长、孔径直径和像距; $f_x$ 和 $f_y$ 为空间频率; $\text{circ}(\cdot)$ 为圆函数。对于存在遮拦的光学系统,其光瞳函数与实际孔径遮拦情况一致<sup>[22]</sup>。当光学系统存在像差 $W(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$ 时,光瞳函数 $P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$ 可用广义光瞳函数 $P_w(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$ 代替,则式(1)的CTF变为

$$H_c(f_x, f_y) = P_w(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y) = \text{circ} \left[ \frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{D/(2\lambda d_i)} \right] \exp[jkW(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)], \quad (2)$$

式中:  $k=2\pi/\lambda$  为波矢大小。在非相干光照明条件下, 衍射受限光学系统像面上的光分布是由光强度的线性叠加得到的, 故图像的清晰度由不同空间频率的调制度或反差度的大小决定。当存在像差时, 空间频率的振幅和相位会同时改变, 所以 OTF 是一个复函数, 其表达式为

$$H_i(f_x, f_y) = |H_i(f_x, f_y)| \exp[-j\phi(f_x, f_y)] = T(f_x, f_y) \exp[-j\phi(f_x, f_y)], \quad (3)$$

式中:  $T(f_x, f_y)$  和  $\phi(f_x, f_y)$  分别为 OTF 的振幅和相位, 二者分别称 MTF 和 PTF。OTF 与 CTF 的联系在于 OTF 可以通过 CTF 自相关并归一化得到, 此时 OTF 的表达式为

$$H_i(f_x, f_y) = \frac{H_c(f_x, f_y) \otimes H_c(f_x, f_y)}{H_i(0, 0)} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H_c^*(\xi, \eta) H_c(\xi + f_x, \eta + f_y) d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_c(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta}, \quad (4)$$

式中:  $\otimes$  表示相关运算符号; \* 表示共轭。因此, 可以通过测量出光学系统的广义光瞳函数得到光学系统的像差和 Zernike 系数, 进而计算出 OTF, 取 OTF 的振幅后可得到 MTF。

## 2.2 宏观傅里叶叠层成像模型

在傅里叶叠层成像技术中, 利用计算成像方式结合合成孔径思想, 通过让有限孔径大小的光瞳与物体频谱产生相对移动, 并记录对应位置处的图像, 进而采集到物体频谱中不同位置的子频谱信息, 最后利用计算成像的算法恢复出高分辨率的物体复振幅信息。虽然单次采集的频谱信息有限, 但是傅里叶叠层成像可

以利用移频技术拼接子频谱<sup>[23]</sup>, 将小孔径等效合成大孔径, 进而实现高分辨率的图像重构。在显微成像中, 为了提升成像清晰度, 傅里叶叠层成像技术结合 ePIE (extended ptychography iterative engine) 算法在更新物体频谱的同时, 更新了显微物镜的广义光瞳函数, 无需先验知识就可以将显微物镜的像差同步迭代计算出来<sup>[14]</sup>。由 2.1 节可知, 计算出广义光瞳函数即可得到光学系统的 MTF, 因此针对常用的远场成像镜头, 可以通过宏观傅里叶叠层成像测量其 MTF。OTF 的测量光路是一个相干的级联系统, 根据物像缩放倍率, 空间频率有相应的倍率缩放。因此, 如果放在同一空间频率下描述, 待测透镜的 CTF 相当于准直镜和物镜 CTF 的大圆里面的小圆, 整个光学系统的衍射极限由待测透镜的孔径限制, 波像差的大小也由待测透镜主导, 而非中心小视场下像差校正良好的准直镜和物镜。宏观傅里叶叠层成像的正向成像和重建模型与傅里叶叠层显微成像基本一致, 故基于宏观傅里叶叠层成像的 MTF 计算过程如下。

1) 记录光瞳在频谱面位置  $k_i$  处时的实际图像  $I_i^r(x, y)$ , 其中  $i$  代表记录的第  $i$  幅图像。

2) 建立物体频谱  $\tilde{O}(f_x, f_y)$  和光瞳函数  $\tilde{P}(f_x, f_y)$  的空矩阵, 作为初始猜测。

3) 物体频谱  $\tilde{O}(f_x, f_y)$  中位置  $k_i$  处的频谱  $\tilde{O}_i(f_x, f_y)$  乘以光瞳函数得到猜测图像的频谱  $\tilde{I}_i^g(f_x, f_y)$ , 对  $\tilde{I}_i^g(f_x, f_y)$  作傅里叶变换得到猜测图像  $\tilde{I}_i^g(x, y)$ 。

4) 用实际图像强度的根号值  $\sqrt{I_i^r(x, y)}$  替换  $\tilde{I}_i^g(x, y)$  的振幅, 但保留  $\tilde{I}_i^g(x, y)$  的相位, 得到更新的  $\tilde{I}_i^p(x, y)$ , 对其进行傅里叶变换得到对应更新的频谱  $\tilde{I}_i^p(f_x, f_y)$ 。

5) 根据 ePIE 更新公式<sup>[24]</sup>, 更新对应位置的物体频谱  $\tilde{O}_i^{\text{up}}(f_x, f_y)$  和光瞳函数  $\tilde{P}^{\text{up}}(f_x, f_y)$ , 二者的表达式为

$$\tilde{O}_i^{\text{up}}(f_x, f_y) = \tilde{O}_i(f_x, f_y) + \alpha \frac{|\tilde{P}(f_x, f_y)| \tilde{P}^*(f_x, f_y)}{|\tilde{P}(f_x, f_y)|_{\max} \times [|\tilde{P}(f_x, f_y)|^2 + \beta]} \times [\tilde{I}_i^{\text{up}}(f_x, f_y) - \tilde{I}_i^g(f_x, f_y)], \quad (5)$$

$$\tilde{P}^{\text{up}}(f_x, f_y) = \tilde{P}(f_x, f_y) + \alpha \frac{|\tilde{O}_i(f_x, f_y)| \tilde{O}_i^*(f_x, f_y)}{|\tilde{O}_i(f_x, f_y)|_{\max} \times [|\tilde{O}_i(f_x, f_y)|^2 + \beta]} \times [\tilde{I}_i^{\text{up}}(f_x, f_y) - \tilde{I}_i^g(f_x, f_y)], \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  是步长系数, 影响更新结果的变化速度;  $\beta$  是为了避免分母为 0 的常数。

6) 用  $\tilde{O}_i^{\text{up}}(f_x, f_y)$  替代  $\tilde{O}(f_x, f_y)$  中位置  $k_i$  处的数值, 得到新的  $\tilde{O}(f_x, f_y)$ , 同时  $i=i+1$ 。

7) 重复步骤 3)~步骤 6), 并以图像的能量顺序<sup>[25]</sup>遍历位置  $k_i$ , 得到全域更新的物体频谱  $\tilde{O}(f_x, f_y)$  和光瞳函数  $\tilde{P}(f_x, f_y)$ , 完成一次迭代计算。

8) 重复步骤 3)~步骤 7), 直至迭代次数或误差函数满足要求。

9) 根据  $\tilde{P}(f_x, f_y)$  的相位计算 Zernike 系数, 对  $\tilde{P}(f_x, f_y)$  进行自相关运算并归一化后可得到 OTF。

10) 经过辅助透镜校正、CCD 传函校正<sup>[26]</sup>得到待测镜头的 OTF, 提取一维方向数据并取模得到子午方向和弧矢方向的 MTF。

具体的计算流程如图 1 所示, 其中  $n$  为预设的迭代

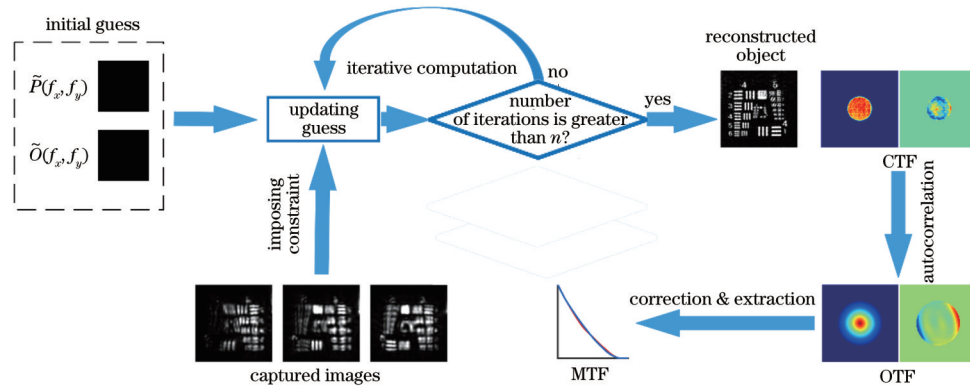


图 1 基于宏观傅里叶成像的 OTF 测量计算过程示意图

Fig. 1 Flow chart of OTF computation based on macroscopic Fourier ptychography

次数,重建清晰图像可以验证迭代结果的准确性。

### 3 测量实验

为了验证宏观傅里叶叠层成像测量 OTF 的有效性,针对无限/有限共轭成像镜头,在光学平台上搭建了基于宏观傅里叶叠层成像的测量装置,实验原理如图 2 所示。将氦氖激光器发出的波长为 632.8 nm 的相干光通过光纤导出,光纤头安装在精密电控平移台上,可在  $x$ - $y$  平面内平移并照明透射式分辨率板。将焦距为  $f=1000$  mm,口径为  $D=100$  mm 的双胶合透镜作为准直镜,分辨率板放置在准直镜的前焦平面处,类似于传统传递函数测量仪中的小孔、狭缝目标靶。待测透镜的口径应小于准直镜的口径,调整待测透镜

在光路中准直,相当于无穷远处的分辨率板成像在后焦平面处。根据采样定律选择 10、20 或 40 倍的平场复消色差物镜将待测透镜所成的图像放大,并二次成像到 CCD 面上,物镜的物方孔径角满足大于待测镜头的像方孔径角的要求。采用像元尺寸为  $7.4 \mu\text{m}$ ,填充因子为 100% 的 8 位 CCD 采集图像,奈奎斯特频率为 67.6 lp/mm。在测量过程中,光纤头从起始位置处开始依次移动,每次移动光纤头到指定位置处就采集一张图像,不断移动光纤头直至采集完成。与固定间距的 LED 光源比较,该方法光源相干性好,且移动的间距可调。相比传统的宏观傅里叶叠层成像系统,所提方法无需移动由待测镜头、物镜和 CCD 组成的相机整体,与现有 OTF 测量仪器的光路一致。

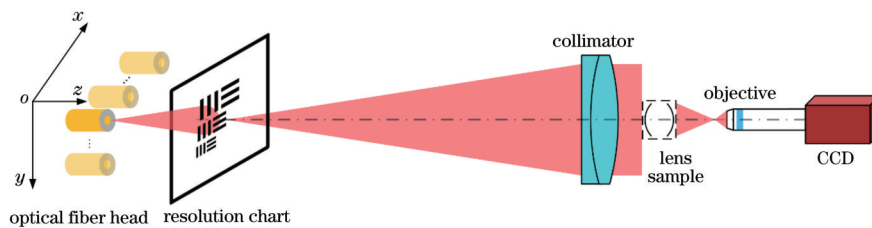


图 2 基于宏观傅里叶成像的 OTF 测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram for OTF measurement based on macroscopic Fourier ptychography

#### 3.1 针对长焦距双胶合镜头的测量实验

选择焦距为 400 mm,口径为 5.08 cm 的双胶合透镜 (AC508-400-A-ML) 作为待测透镜,由待测镜头、物镜和 CCD 组成的相机整体总长约 70 cm,实验装置如图 3 所示。采用平移光纤头的方法免去了平移庞大复杂的相机整体。 $f_{\text{co-cut}}$  的表达式为

$$f_{\text{co-cut}} = \frac{1}{2\lambda F_{\#}}, \quad (7)$$

式中:  $F_{\#}$  为镜头的  $F$  数。根据式 (7) 计算出像面相干截止频率为 100 lp/mm,进而选择 10 倍物镜即可。光纤头与分辨率板之间的距离为 83.3 mm,每次移动的间距为 0.5 mm,在  $x$ - $y$  平面内沿平行于  $x$  轴和  $y$  轴设置的点坐标依次移动,共  $15 \times 15$  张图像,其中中心部分的  $9 \times 9$  张图像如图 4(a) 所示。图 4(b) 是重建的高分辨率图像,对比原始图像可以发现,可分辨的靶标从

第 5 组第 3 个提升到第 6 组第 5 个。

图 5(a)、(b) 是重建的光瞳函数即 CTF 的振幅和相位,图 5(c)、(d) 是通过自相关归一化计算出来的 OTF 的振幅和相位。可以发现,存在一定像差的情况下,MTF 并非理想旋转对称,作为奇函数的 PTF 的数值反映了非对称像差的存在。对光瞳函数的相位采用 36 项的条纹 Zernike 多项式进行拟合,得到相应的多项式系数后可以判断存在离焦、 $y$  方向的倾斜、 $y$  方向的慧差和 3 阶球差。条纹 Zernike 多项式系数如图 6 所示。

此外,为了模拟存在遮拦的镜头,在待测透镜前固定一根金属棒,如图 7(a) 所示。每移动 1 mm 后采集数据,图 7(b) 展示了其中的  $3 \times 3$  张图像,重建的高清图像如图 7(c) 所示。从图 7(b) 可以看出,光瞳上的遮拦影响了直接采集的图像的质量,但宏观傅里叶叠层成像算法成功重建了高清图像,恢复的光瞳函数的振

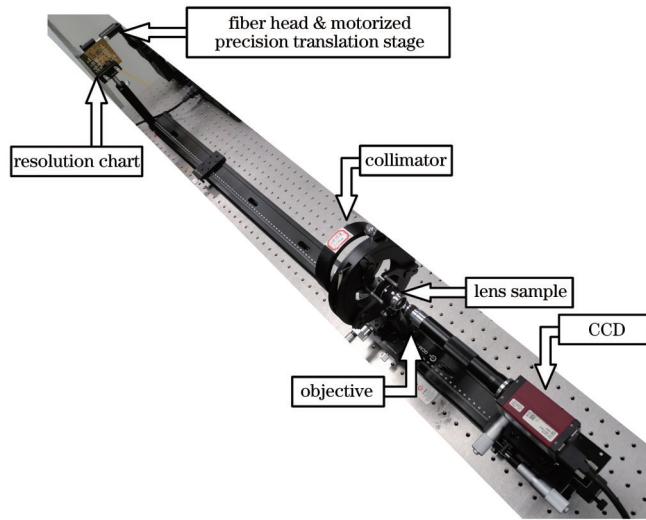


图 3 基于宏观傅里叶成像的 OTF 测量实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for OTF measurement based on macroscopic Fourier ptychography

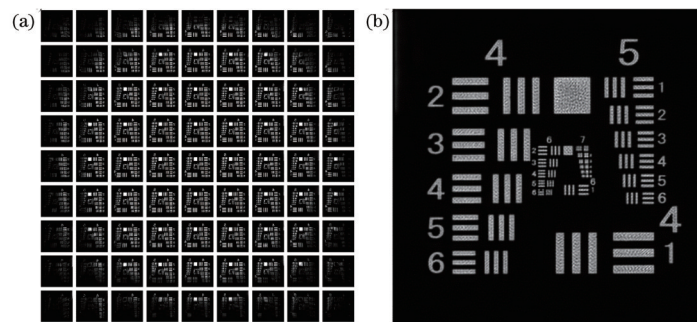
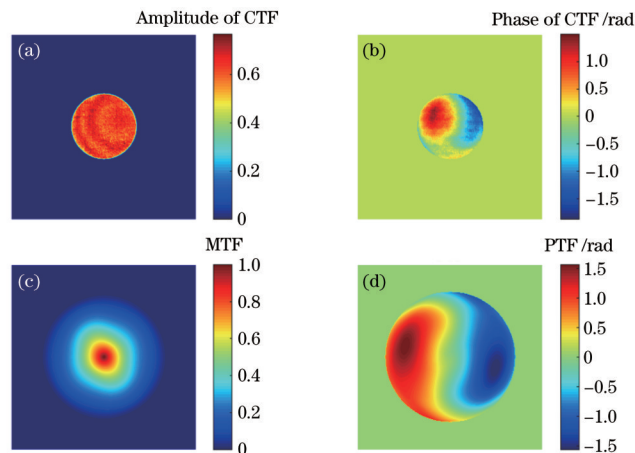
图 4 实验中采集的图像和重建结果。(a) 实验采集到的  $9 \times 9$  幅图像；(b) 重建的高分辨率图像Fig. 4 Images captured in experiment and reconstruction results. (a)  $9 \times 9$  images captured in experiment; (b) reconstructed high-resolution image

图 5 测量结果。(a) CTF 的振幅；(b) CTF 的相位；(c) MTF；(d) PTF

Fig. 5 Measurement results. (a) Amplitude of CTF; (b) phase of CTF; (c) MTF; (d) PTF

幅中断开的一条线对应的是实际遮拦的金属棒,对应的相位部分则是随机值。此时的二维 MTF 如图 7(f) 所示,可以发现,二维 MTF 并不规则,进而仅看一维的子午方向或弧矢方向是不全面的。

### 3.2 采集步数和孔径重叠率的影响分析

虽然宏观傅里叶叠层成像方法可以重建高分辨率的图像,但是基于该方法的主要目的是测量 OTF 而非重建高分辨率图像,这也就意味着不必追求对物体频谱中高频部分的采集,进而光瞳函数在频域上的最大

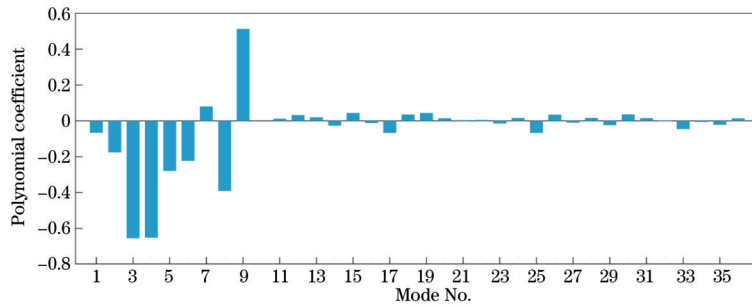


图 6 条纹 Zernike 多项式系数  
Fig. 6 Fringe Zernike polynomial coefficients

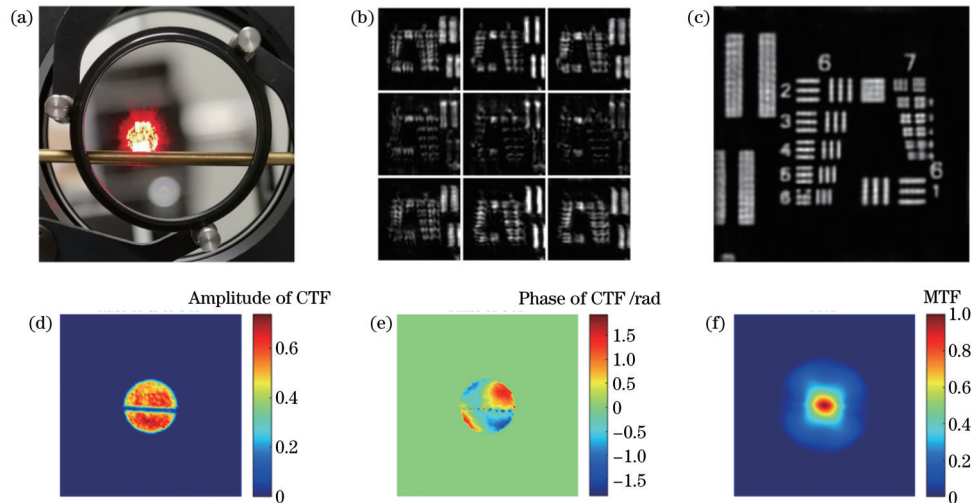


图 7 实验数据与测量结果。(a)存在遮拦的镜头;(b)实验采集到的 $3 \times 3$ 张图像;(c)重建的高分辨率图像;(d)恢复的光瞳函数的振幅;(e)恢复的光瞳函数的相位;(f) MTF

Fig. 7 Experimental data and measurement results. (a) Obstructed lens; (b)  $3 \times 3$  images captured in experiment; (c) reconstructed high-resolution image; (d) reconstructed amplitude of pupil function; (e) reconstructed phase of pupil function; (f) MTF

平移量不需要过大。光瞳函数在频域上的最大平移量由采集步数和步长决定,步长也就是孔径重叠率。因此通过实验设定不同的采集步数和孔径重叠率,分析其对 OTF 测量准确性的影响。

采用焦距为 35 mm,  $F_{\#}$  为 2 的高清 C 口成像镜头作为待测镜头,测试波长为 632.8 nm,相干成像的截止频率为 395 lp/mm,对应非相干成像的截止频率为 790 lp/mm。当设定光纤头移动间距分别为 3, 4, 5 mm 时,根据文献[27]给出的公式,相对步长  $R_{LED}$  (频谱采样比)分别为 2.47, 1.82, 1.44,对应的孔径重叠率  $R_{overlap}$  分别为 74.4%, 65.5%, 56.7%。分别按照采集  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, 11 \times 11, 13 \times 13, 15 \times 15$  张图像迭代计算,提取弧矢方向的 MTF,同时与现有传函仪的结果进行对比,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在  $3 \times 3$  幅图像的计算结果中,无论孔径重叠率为多少,低频部分中都有不同于其他采集步数结果趋势的偏差,说明采集步数过少,约束条件不足。图 8(a)~(c)的区别为孔径重叠率不同,随着孔径重叠率的降低,不同采集步数的结果一致性越好。原因在于计算过程中相对移动需要取整到像素,移动

间隔越大导致的舍入误差相对也就越小,孔径重叠率越高误差也就越大。对于傅里叶叠层成像算法,孔径重叠率存在一个下限,需要达到一定的阈值即数据冗余度达到一定的阈值才能达到最佳重构质量[27],故孔径重叠率应在一个合适的范围内。以图 8(a)为例,采集步数的增加相当于数据量的增加,理论上相同噪声水平的情况下步数越多应该准确性越高。然而,移动过远时会采集较多高频部分的暗场图像,渐晕效应会导致暗场图像信噪比较低,这会影响到测量的准确性。综合对比,移动间距为 3 mm,采集  $7 \times 7$  张图像时的结果最准确,此时子午方向的结果、弧矢方向的结果、传函仪测量结果和设计理想值的对比如图 9 所示。

将基于宏观傅里叶叠层成像方法的结果缩放到与仪器结果相同的空间频率采样点上,此时的 MTF 均方误差(MSE)在弧矢方向为  $1.75 \times 10^{-5}$ ,在子午方向为  $1.23 \times 10^{-4}$ ,证明所提方法具有实际应用的潜力。

## 4 结 论

开展了基于宏观傅里叶叠层成像的 OTF 测量研究,根据傅里叶叠层成像算法重建高清图像,并基于迭

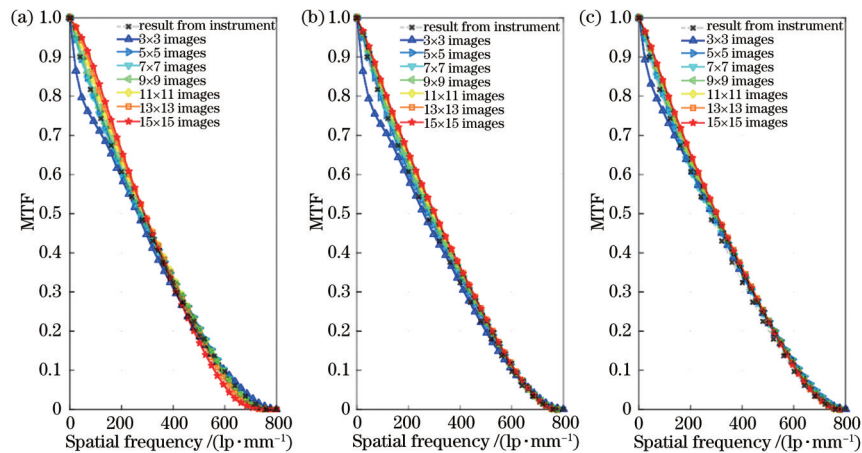


图 8 不同重叠率下的 MTF 测量结果。(a) 74.4%;(b) 65.5%;(c) 56.7%

Fig. 8 MTF measurement results under different overlap rates. (a) 74.4%; (b) 65.5%; (c) 56.7%

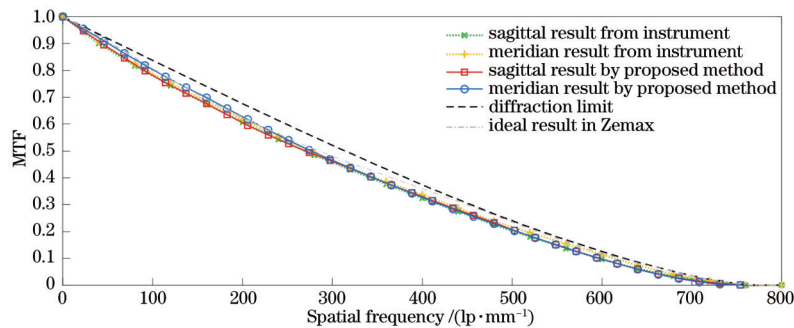


图 9 所提方法的 MTF 测量结果、理论值和传函仪测量值的对比

Fig. 9 Comparison among MTF results obtained by proposed method, theoretical values and instrument measurements

代计算光瞳函数的原理改进现有宏观傅里叶叠层成像装置,采用平移光纤头照明分辨率板,降低了对平移台的要求,具有移动间距可调、亮度高和相干性好的优点。根据成像镜头的测量光路搭建了 OTF 测量实验平台,在焦距为 400 mm 的双胶合透镜及其遮拦情况下的测量实验中,重建了高分辨率图像和光瞳函数的振幅和相位,计算得出 Zernike 系数和 OTF 的振幅与相位,验证了所提方法的有效性,存在遮拦情况下的 MTF 不再是旋转对称的。通过对 35 mm 焦距的高清成像镜头的测量,选择合适的采集步数和孔径重叠率,MTF 实验测量结果与现有传递函数测量仪器结果基本一致。上述实验说明傅里叶叠层成像技术可应用于 OTF 的测量中,未来结合傅里叶叠层成像技术中的众多改进措施,该技术在各类镜头的成像质量检测中具有明显的应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 马卫红. 基于图像分析的光学传递函数测试技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005. Ma W H. Study of MTF measurement technique based on image analysis[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [2] Masaoka K. Edge-based modulation transfer function

measurement method using a variable oversampling ratio [J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37628-37638.

- [3] 徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器像质评价方法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0928003. Xu W W, Zhang L M, Si X L, et al. Image-quality evaluation of high-spatial-resolution satellite optical sensor based on radial target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0928003.
- [4] Boreman G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [5] 程莹, 易红伟, 刘鑫龙. 一种改进的空间相机在轨调制传递函数检测方法[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704010. Cheng Y, Yi H W, Liu X L. Improved method for on-orbit modulation transfer function detection of space cameras[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704010.
- [6] Masaoka K. Practical edge-based modulation transfer function measurement[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1345-1352.
- [7] Delley B, van den Bergh F. Fast full-field modulation transfer function analysis for photographic lens quality assessment[J]. Applied Optics, 2021, 60(8): 2197-2206.
- [8] Viallefont-Robinet F, Helder D, Fraisse R, et al. Comparison of MTF measurements using edge method:

- towards reference data set[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33625-33648.
- [9] Hufnagel R E. Significance of the phase of optical transfer functions[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, 58(11): 1505-1506.
- [10] Bhakta V R, Somayaji M, Christensen M P. Applications of the phase transfer function of digital incoherent imaging systems[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): A17-A26.
- [11] Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745.
- [12] Pan A, Zuo C, Yao B. High-resolution and large field-of-view Fourier ptychographic microscopy and its applications in biomedicine[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83(9): 096101.
- [13] 张韶辉, 周国城, 崔柏岐, 等. 傅里叶叠层显微成像模型、算法及系统研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1400001.
- Zhang S H, Zhou G C, Cui B Q, et al. Review of Fourier ptychographic microscopy: models, algorithms, and systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1400001.
- [14] Ou X Z, Zheng G A, Yang C. Embedded pupil function recovery for Fourier ptychographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4960-4972.
- [15] Song P M, Jiang S W, Zhang H, et al. Full-field Fourier ptychography (FFP): spatially varying pupil modeling and its application for rapid field-dependent aberration metrology[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(5): 050802.
- [16] Dong S Y, Horstmeyer R, Shiradkar R, et al. Aperture-scanning Fourier ptychography for 3D refocusing and super-resolution macroscopic imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13586-13599.
- [17] 赵明, 王希明, 张晓慧, 等. 宏观傅里叶叠层超分辨率成像实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121101.
- Zhao M, Wang X M, Zhang X H, et al. Experimental research on macroscopic Fourier ptychography super-resolution imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121101.
- [18] Konda P C, Loetgering L, Zhou K C, et al. Fourier ptychography: current applications and future promises[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9603-9630.
- [19] Holloway J, Asif M S, Sharma M K, et al. Toward long-distance subdiffraction imaging using coherent camera arrays[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 2(3): 251-265.
- [20] 沙浩, 刘阳哲, 张永兵. 基于深度学习的傅里叶叠层成像技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811020.
- Sha H, Liu Y Z, Zhang Y B. Fourier ptychography based on deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811020.
- [21] Zheng G, Shen C, Jiang S, et al. Concept, implementations and applications of Fourier ptychography[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(3): 207-223.
- [22] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. 4th ed. London: Macmillan, 2017.
- [23] 郝翔, 杨青, 匡翠方, 等. 光学移频超分辨成像技术发展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0111001.
- Hao X, Yang Q, Kuang C F, et al. Optical super-resolution imaging based on frequency shift[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0111001.
- [24] 孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 等. 傅里叶叠层显微成像技术: 理论、发展和应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1011005.
- Sun J S, Zhang Y Z, Chen Q, et al. Fourier ptychographic microscopy: theory, advances, and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1011005.
- [25] Guo K K, Dong S Y, Nanda P, et al. Optimization of sampling pattern and the design of Fourier ptychographic illuminator[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6171-6180.
- [26] 袁理, 张晓辉, 刘振江, 等. 便携式调制传递函数测试仪的研制[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1111001.
- Yuan L, Zhang X H, Liu Z J, et al. Developing of portable modulation transfer function tester[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1111001.
- [27] Sun J S, Chen Q, Zhang Y Z, et al. Sampling criteria for Fourier ptychographic microscopy in object space and frequency space[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15765-15781.