

# 基于变形反射镜的光瞳滤波超分辨成像

赵丽娜<sup>1,2,3,4,5</sup>, 戴云<sup>1,4</sup>, 赵军磊<sup>1,4,5</sup>, 肖飞<sup>1,4</sup>, 赵豪欣<sup>1,4</sup>, 张小军<sup>1,4</sup>, 周晓军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054;

<sup>3</sup>成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610225;

<sup>4</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>5</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 变形反射镜作为超分辨成像系统中的光瞳滤波器,可以灵活快速地调制光场相位的性能。采用遗传算法设计具有不同超分辨参数的光瞳相位结构,通过修改自适应光学系统闭环参考矩阵实现对光瞳滤波器相位的闭环拟合。在此基础上,实验对比了不同光瞳滤波情形下的超分辨成像效果。结果表明,变形反射镜可以很好地拟合设计的光瞳滤波器相位,超分辨成像参数与理论设计值基本吻合。由于变形反射镜采用反射式并通过控制镜面面形进行超分辨光瞳相位拟合,在使用时对入射光无偏振态要求,有利于该方法的实际应用。

**关键词** 显微; 相位调制; 光瞳滤波器; 超分辨; 变形反射镜

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.041801

## Super-Resolution Imaging of Pupil Filter Using Deformable Mirror

Zhao Lina<sup>1,2,3,4,5</sup>, Dai Yun<sup>1,4</sup>, Zhao Junlei<sup>1,4,5</sup>, Xiao Fei<sup>1,4</sup>,  
Zhao Haoxin<sup>1,4</sup>, Zhang Xiaojun<sup>1,4</sup>, Zhou Xiaojun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of  
China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

<sup>3</sup>School of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>4</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>5</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In this paper, a deformable mirror is employed as a pupil filter in a super-resolution imaging system because it can be used to modulate optical field phase quickly and flexibly. The genetic algorithm is adopted to design pupil phase structures with different super-resolution parameters, and the closed-loop phase fitting of pupil filter is realized by modifying the closed-loop reference matrix of the adaptive optics system. On this basis, the experiments are conducted to compare the super-resolution imaging results with different pupil filter situations. The experimental results show that the deformable mirror can well fit the designed phase of pupil filter and the super-resolution imaging parameters are in agreement with theoretical predictions. The deformable mirror processes phase fitting of super-resolution pupil by employing reflective type and controlling mirror's shape. This method has no requirement of polarization state of incident light, and it is in favor of practical application.

**Key words** microscopy; phase modulation; pupil filter; super-resolution; deformable mirror

**OCIS codes** 180.5810; 010.1080; 120.5060; 350.4600; 350.5730

收稿日期: 2016-10-27; 收到修改稿日期: 2016-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(61378064)、国家 863 计划(2015AA020510)

作者简介: 赵丽娜(1976—),女,博士研究生,讲师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: bettyzhao@cuit.edu.cn

导师简介: 戴云(1976—),男,博士,研究员,主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: daiyunqq@163.com(通信联系人)

## 1 引言

19 世纪后期,德国物理学家阿贝揭示了衍射分辨率极限的存在<sup>[1]</sup>,这一客观物理规律从根本上限制了光学系统可获得的聚焦光斑的物理尺度。自此以后的 140 多年时间里,如何超越衍射分辨率极限的约束,实现超分辨聚焦和超分辨成像成为人们关注和研究的一个热点问题。20 世纪 50 年代开始发展的光瞳滤波技术是解决这一问题的有效途径之一。光学系统的光瞳函数定义为出瞳面的透射率空间分布,根据衍射理论,透明光瞳函数将获得艾里衍射斑,光瞳滤波技术是在出瞳面插入设计的滤波器以改变光瞳平面内光场的振幅或相位,调制空间域中的聚焦光场分布,从而改变衍射斑物理尺寸,使光学系统的点扩展函数(PSF)主瓣尺寸减小,以此提高光学系统分辨率。这种利用光瞳滤波实现超分辨的方法最早由 Di Francia G T<sup>[2]</sup>提出,并从理论上证明了用一组同心圆环结构的光瞳可以改变光学系统的出瞳函数,进而控制衍射模式的主瓣大小和旁瓣位置。当主瓣尺寸小于衍射极限时,即实现了光学超分辨。

具有超分辨调制效果的光瞳滤波器也被称为超分辨衍射元件(DSE)。根据调制对象的不同,DSE 可分为振幅型、相位型和复振幅型。振幅型 DSE 结构简单,能够较好地抑制旁瓣能量对系统的影响,但在实现超分辨的过程中存在不可忽视的能量损耗,并且振幅型 DSE 的制作存在一定的难度,尤其是透射率连续变化的振幅型超分辨光瞳滤波器。复振幅型 DSE 由于设计自由度较高,可以达到较好的超分辨效果,但其精度受到现有工艺水平的制约,因而应用受限。相对于前两种类型的 DSE,相位型光瞳滤波器具有光能利用率高、应用灵活等特点。随着二元光学制造技术的发展和日趋成熟,相位型光瞳滤波器逐渐成为研究的重点并得到广泛应用。

然而,采用二元光学等技术制作的相位型光瞳滤波器一旦加工成型,超分辨性能也就随之确定,无法改变。更为重要的是,相位型光瞳滤波器对波长的依赖性使得其仅适用于特定波长,当改变成像波长时需对滤波器进行重新设计和加工,成本高且费时费力。此外,由于光瞳滤波器存在不可避免的加工和装调误差,难以通过修改滤波器结构进行优化补偿。针对固化的超分辨光瞳滤波器存在的不足,1999 年,Davis J A 等<sup>[3]</sup>首次采用液晶空间光调制器实现了一种可编程式的轴向变迹和超分辨振幅型光瞳滤波器,理论与实验结果基本吻合。2003 年,Sharma M 等<sup>[4]</sup>同样采用液晶空间光调制器实现了相位型光瞳滤波器,获得了连续不同的相位调制。基于液晶空间光调制器的光瞳滤波器可以根据需要快速改变,实现容易且成本低廉。国内,云茂金等<sup>[5]</sup>采用电控径向双折射滤波器实现了光学系统的超分辨、焦深扩展及焦移。令人遗憾的是,由于液晶和波片的双折射特性,该类型光瞳滤波器只能在偏振光下使用,因此其应用领域受到极大限制。

变形反射镜(简称变形镜)是一种广泛应用于自适应光学系统的波前校正器,它通过改变镜面面形以校正动态波前误差。基于变形镜拟合相位动态可变的特性,本文采用 145 单元 3 mm 极间距的变形镜作为可编程相位型光瞳滤波器,通过修改自适应光学系统闭环参考矩阵实现对不同光瞳滤波器相位的闭环拟合。实验对比了不同光瞳滤波情形下的超分辨成像效果,结果表明,该款变形镜可以很好地拟合设计的光瞳滤波器相位,超分辨成像参数与理论设计值基本吻合。

## 2 超分辨光瞳滤波器设计

依据特征尺寸与光源波长之间的关系,超分辨光瞳滤波器的设计理论分为标量衍射理论和矢量衍射理论。所设计的变形镜光瞳滤波器特征尺寸远大于入射光波长,满足远场近似与傍轴近似,因此在标量衍射理论下,焦点附近的复振幅分布可表示为

$$U(\nu, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(\nu\rho) \exp\left(-i \frac{1}{2} u\rho^2\right) \rho d\rho, \quad (1)$$

式中, $P(\rho)$ 表示光瞳函数, $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数, $\rho$ 是滤波器表面归一化径向坐标, $u, \nu$ 分别表征焦点附近的轴向和径向坐标表达式如下:

$$\begin{cases} u = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta)^2 z \\ \nu = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \times r \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $r$ 是径向坐标, $z$ 是轴向坐标, $\lambda$ (单位为 nm)是单色光波长, $\theta$ 为边缘透射光线与光轴的夹角。

光学滤波器的超分辨性能由斯特列尔比  $S$ 、光斑尺寸  $G_T$  和旁瓣强度  $M$  三个评价参数综合衡量。 $S$  是滤波前后衍射光斑的最大光强之比;  $G_T$  是滤波前后衍射光斑横向主瓣极小值坐标之比;  $M$  是滤波后衍射光斑次级旁瓣的最大强度与主瓣最大强度之比。由于旁瓣强度  $M$  无法直接推导出解析表达式<sup>[6]</sup>, 故这里不将  $M$  作为设计滤波器的评价参数。根据级数展开近似理论, 对(1)式做系列推导后<sup>[7]</sup>, 得到  $S$  和  $G_T$  的解析表达式分别为

$$S = |I_0|^2 + \frac{[I_m(I_0^* I_1)]^2}{R_e(I_2^* I_0) - |I_1|^2}, \quad (3)$$

$$G_T = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2}{S} \left[ \text{Re}(I_0 I_1^*) + \frac{\text{Im}(I_0^* I_1) \text{Im}(I_0^* I_2)}{\text{Re}(I_2^* I_0) - |I_1|^2} \right] \right\}^2, \quad (4)$$

上式,  $*$  表示共轭,  $I_m$  为光瞳函数的  $m$  阶矩表达式如下:

$$I_m = 2 \int_0^1 P(\rho) \rho^{2m+1} d\rho. \quad (5)$$

超分辨滤波器设计一般是将光瞳函数展开成正交完备函数系形式, 考虑到自适应光学系统中, Zernike 多项式是应用最广泛的描述波前相位的基函数, 且任意两项 Zernike 多项式在圆域内彼此正交, 因此采用 Zernike 多项式加权叠加来表征光瞳滤波器的相位面形。常见的光瞳滤波器一般具有圆对称型结构, 极坐标下滤波器相位可描述为

$$\phi(\rho) = \sum_m c_m z_m(\rho), \quad (6)$$

式中,  $\rho$  表示半径,  $z_m$  为 Zernike 多项式,  $c_m$  为相应的 Zernike 系数。

为了增加滤波器设计自由度, 上式中的  $m$  应尽可能的多。但考虑到滤波器设计的复杂度并结合变形镜的相位拟合能力, 选取 Zernike 多项式中具有圆对称型结构的第 4 项(离焦)、第 12 项(球差)、第 24 项(二阶球差)和第 40 项(三阶球差)加权表示超分辨瞳面滤波器相位:

$$\phi(\rho) = c_4 z_4 + c_{12} z_{12} + c_{24} z_{24} + c_{40} z_{40}, \quad (7)$$

采用遗传算法寻找达到超分辨性能的 Zernike 系数最优解优化问题为 Maximize  $[G_T(c_4, c_{12}, c_{24}, c_{40})]$ , 满足约束

$$\begin{cases} |u_F(c_4, c_{12}, c_{24}, c_{40})| \leq u_F^0 \\ S(c_4, c_{12}, c_{24}, c_{40}) \geq S^0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中,  $u_F^0$  和  $S^0$  分别是实际情况中人为设置的焦深限制范围和斯特列尔比阈值。 $u_F$  表示微小量焦移, 表示为

$$u_F = 2 \frac{\text{Im}(I_0 I_1^*)}{\text{Re}(I_2^* I_0) - |I_1|^2}. \quad (9)$$

通过遗传算法得到一簇符合约束条件的 Zernike 系数。为方便对比, 这里选取两组相位结构和超分辨参数差别较大的滤波器系数, 如表 1 所示。两组滤波器的相位结构及横向 PSF 曲线如图 1、2 所示。

表 1 两组超分辨滤波器的相位结构系数及理论计算超分辨参数

Table 1 Phase structural coefficients and super-resolution parameters by theoretical calculation of two groups super-resolution filters

Filter	Coefficient				Figures of merit	
	$C_4$	$C_{12}$	$C_{24}$	$C_{40}$	$G_T$	$S$
1	-0.0728	0.4458	-0.1186	-0.1062	1.0909	0.7048
2	1.093	-0.788	0.3057	-0.00075	1.3333	0.4083

### 3 基于变形镜的超分辨成像系统

图 3 是基于变形镜的超分辨成像系统原理图, 整个系统通过可翻转的反射镜  $M_1$  实现两种工作模式, 即超分辨相位调制模式和超分辨成像模式。当反射镜  $M_1$  置于光路中, 波长 638 nm 的平行光管发出的平行光由  $M_1$  反射, 再经反射镜  $M_2$ 、球反镜  $SM_1$ 、反射镜  $M_3 \sim M_5$  和球反镜  $SM_2$  到达变形镜, 变形镜对入射光进行波前相位调制后入射到球反镜  $SM_3$  和  $SM_4$ , 经分光镜  $BS_1$  一分为二, 一路光进入哈特曼波前传感器, 控制软

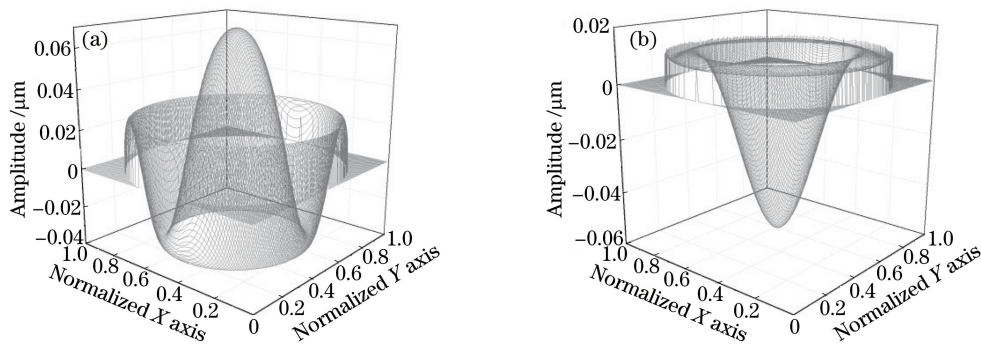


图 1 设计的两组光瞳滤波器的相位结构。(a)滤波器 1;(b)滤波器 2

Fig. 1 Phase structures of two designed pupil filters. (a) Filter 1; (b) filter 2

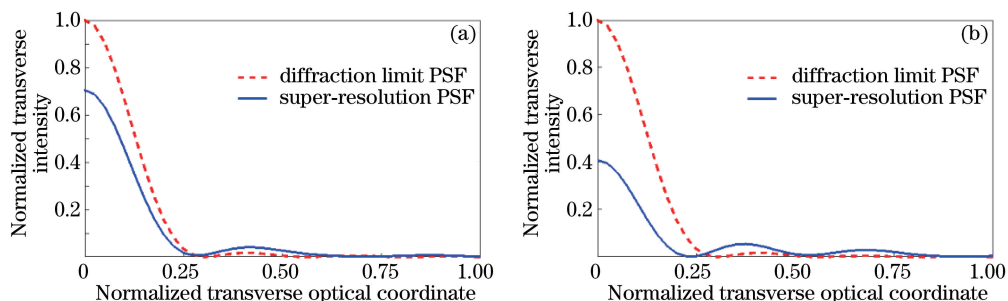


图 2 设计的两组光瞳滤波器横向 PSF。(a)滤波器 1;(b)滤波器 2

Fig. 2 Transverse PSFs of two designed pupil filters. (a) Filter 1; (b) filter 2

件根据哈特曼波前传感器(16×16 微透镜阵列,焦距 15 mm,微透镜直径 0.4 mm)的波前相位测量结果控制变形镜,从而实现对超分辨瞳面相位的闭环拟合;另一路光透过分光镜 BS<sub>1</sub>,经反射镜 M<sub>6</sub>、成像物镜 L<sub>2</sub> 聚焦在成像相机电荷耦合器件(CCD)(View Works Inc.生产,795 pixel×596 pixel)靶面上,以采集在不同成像条

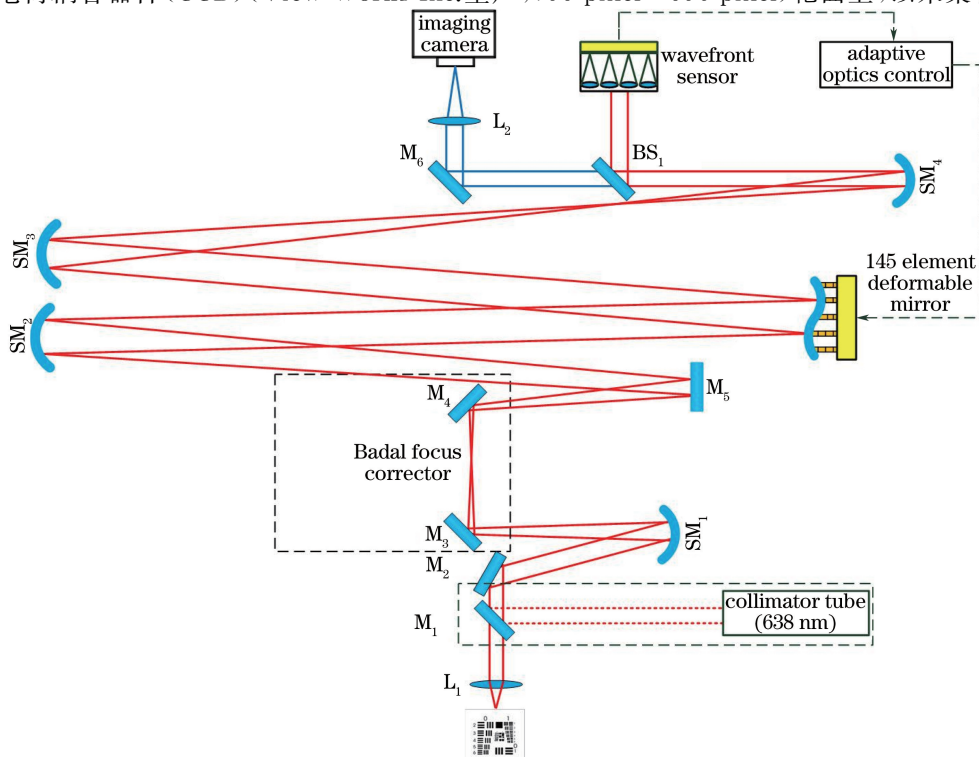


图 3 基于变形镜的超分辨成像系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of super-resolution imaging system with deformable mirror

件下的远场光斑(焦距 200 mm, 焦面直径 6 mm), 系统 NA 为 0.015。系统中, 变形镜、哈特曼波前传感器、微透镜阵列、成像透镜  $L_1$  及  $L_2$  共轭放置, 球反射镜  $SM_1 \sim SM_4$  用于中继光路及不同元件之间的口径匹配。反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  组成 Badal 调焦系统(矫正范围  $\pm 4D$  球差和  $\pm 3D$  柱状像差), 用于系统内调焦。若变形镜矫正后的超分辨瞳面相位为平面时, 上述过程即为传统的自适应光学闭环矫正。在变形镜超分辨光瞳滤波器相位拟合稳定后, 软件控制锁定变形镜驱动电压保持变形镜面形, 运用翻转机构将反射镜  $M_1$  移出光路, 系统对放置在成像透镜  $L_1$  焦面上的标准分辨率板(USAF1951)成像, 以此评价瞳面超分辨滤波情形下的成像效果。分辨率板由波长 617 nm 的发光二极管(LED)光源背照明。

为了使上述设计的瞳面滤波器相位尽可能达到高精度拟合, 系统采用 145 单元 3 mm 极间距的高密度变形镜作为可编程相位型光瞳滤波器。该变形镜可以对前 8 阶 44 项 Zernike 像差进行有效拟合, 并已成功用于眼底视网膜高分辨率成像<sup>[8]</sup>及可编程超分辨瞳面滤波原理验证性实验<sup>[9]</sup>。光瞳滤波器相位闭环拟合可以通过修改自适应光学系统闭环参考矩阵实现, 具体过程可参考文献<sup>[9]</sup>。

图 4 为实验系统对设计的两个超分辨瞳面滤波器的拟合结果, 拟合残差分别为  $0.018 \mu\text{m}$  和  $0.020 \mu\text{m}$ 。由于在对分辨率板进行超分辨成像时, 系统对超分辨光瞳滤波器结构不再进行闭环拟合, 变形镜驱动电压处于保持状态。为了保证超分辨成像的效果, 须对变形镜面形保持的稳定性进行评价, 图 5 为三种成像状态下, 哈特曼实际测得的波前均方根(RMS)随时间变化曲线。从图 5 可以看出, 在最初 1.5 s, 残余像差 RMS 从近  $0.4 \mu\text{m}$  降低到  $(0.04 \pm 0.002) \mu\text{m}$ , 并能够稳定保持达 5 min 之久, 这一时间长度足以完成对分辨率板的成像采集。

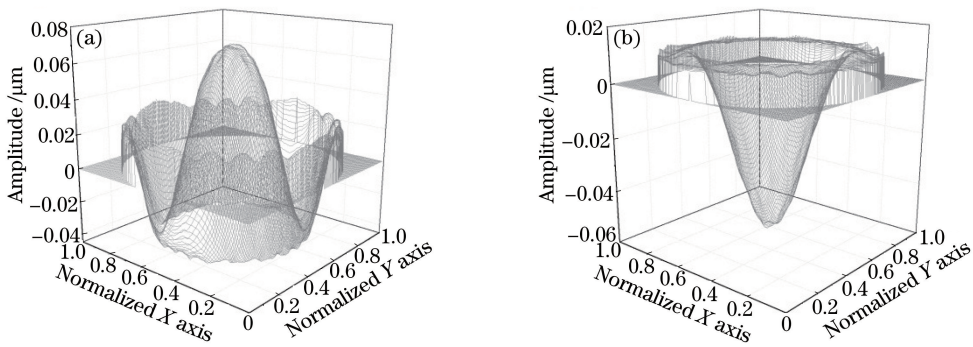


图 4 两超分辨瞳面滤波器闭环拟合结果。(a)滤波器 1;(b)滤波器 2

Fig. 4 Close-loop fitting results of two super-resolution pupil filters. (a) Filter 1; (b) filter 2

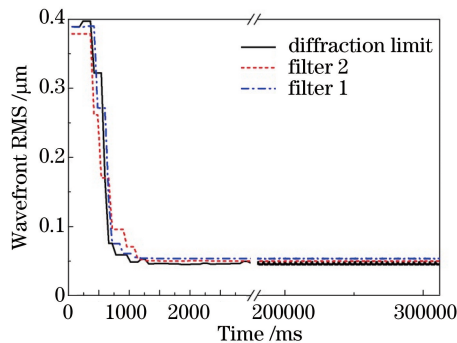


图 5 变形镜校正过程中波前 RMS 随时间变化曲线

Fig. 5 Wave-front RMS changing with time during the deformable mirror correction process

#### 4 光瞳滤波超分辨成像结果

采用标准分辨率板(USAF1951)作为样品, 实验采集了在传统闭环校正下衍射极限及不同瞳面滤波情形下的成像结果, 截取标准分辨率板(USAF1951)第 6 组第 2 个元素竖条纹线对做进一步成像效果对比, 如图 6 所示。图中直观反映出, 在超分辨滤波情形下, 由于旁瓣效应导致图像对比度显著低于衍射极限成像,

并且随着横向超分辨参数变大,对比度降低愈加明显,与理论预期一致。由于实验无法滤除旁瓣,旁瓣效应对成像的影响甚至掩盖了超分辨成像本身的效果。

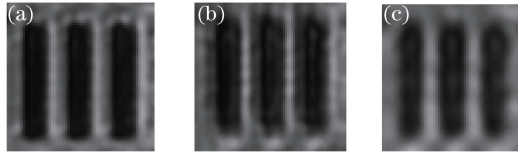


图6 分辨率板第6组第2个元素的衍射极限及超分辨成像结果对比。

(a) 衍射极限下成像; (b) 光瞳滤波器1获得的超分辨成像; (c) 光瞳滤波器2获得的超分辨成像

Fig. 6 Comparison between diffraction limit image and super-resolution image of element 2 group 6 of resolution test target.

(a) Imaging under diffraction limit; (b) super-resolution imaging using pupil filter 1;

(c) super-resolution imaging using pupil filter 2

为量化图6中的超分辨成像效果,图7(a)、(b)、(c)分别给出了图6(a)、(b)、(c)的横截线。图7(a)、(b)、(c)中的点划线为图像中单个条纹的实际横截曲线。为了方便对比,对每条横截线做了高斯拟合,如图中实线所示,每条实线的半峰全宽(FWHM)与灰度值范围在表2中列出。由表2中的数值可见,滤波器1超分辨效果较弱,滤波器2超分辨效果较明显,图像半峰全宽变窄且对比度(灰度范围)更低,实验结果与理论设计基本吻合。

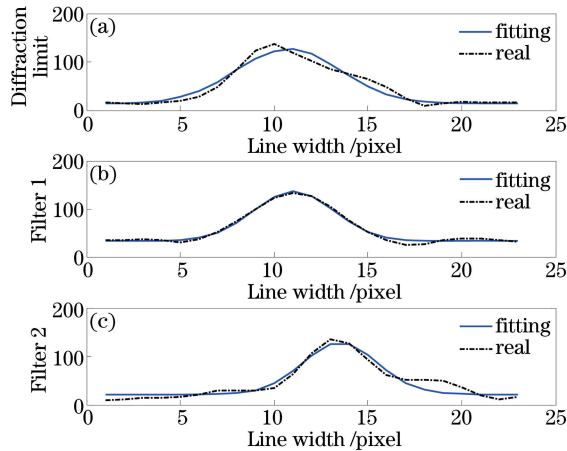


图7 (a)、(b)、(c)分别为图6(a)、(b)、(c)中的单条纹横截线

Fig. 7 (a), (b), (c) are unit stripes of transverse lines from (a), (b) and (c) in Fig. 6, respectively

表2 图7中三条横截线参数值

Table 2 Parameter values of 3 transverse lines from Fig.7

	Diffraction limit	Filter 1	Filter 2
FWHM / $\mu\text{m}$	32.68	25.43	23.57
Gray level (0~255)	12~142	11.060~134.070	30.616~125.198

值得注意的是,图7同时反映出超分辨成像时图像存在明显的条纹移动,这可能是由于滤波器发生的相移而产生的,这在某些对远场光强分布有特殊要求的场合需引起重视。受实验条件和篇幅限制,此处仅分析了横向超分辨效果,对轴向超分辨效果不做考察。

## 5 结论

基于变形镜的光瞳滤波超分辨成像方法可以在不改动硬件的情形下实现不同的超分辨成像效果,并且对入射光无偏振态要求,因此该方法具有较好的实际应用前景。通过图6中的超分辨成像结果可以看到,虽然变形镜拟合的超分辨滤波器2具有较明显的横向超分辨效果,但由于主瓣的压缩,旁瓣的增强,导致超分辨成像对比度降低,为了获得理想的超分辨成像效果,必须对旁瓣进行抑制。下一步工作将考虑结合共焦扫描成像技术,通过共焦小孔滤除旁瓣,消除旁瓣效应对超分辨成像的影响。

基于变形镜实现光瞳滤波超分辨成像,其可实现的滤波器形式完全取决于变形镜的相位拟合特性。采用自行研制的 145 单元变形镜,可以对前 8 阶 44 项 Zernike 像差进行有效拟合,结合变形镜的相位拟合能力,仅采用 4 项 Zernike 多项式表达滤波器相位。若想提高面形拟合能力,可通过选用更高空间密度的变形镜,即选用更多 Zernike 多项式项数来表达滤波器相位,从而提高滤波器设计的自由度及超分辨成像效果,当然同时也会增加滤波器设计的难度。

### 参 考 文 献

- [1] Abbe E. Contributions to the theory of the microscope and that microscopic perception[J]. Arch Micorsc Anat, 1873, 9: 413-168.
- [2] Di Francia G T. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. Il Nuovo Cimento (1943-1954), 1952, 9(3): 426-438.
- [3] Davis J A, Escalera J C, Campos J, *et al.* Programmable axial apodizing and hyperresolving amplitude filters with a liquid-crystal spatial light modulator[J]. Optics Letters, 1999, 24(9): 628-630.
- [4] Sharma M D, McOrist J, Sheppard C J R, *et al.* Using an optically-addressable liquid crystal spatial light modulator to generate phase only filters[C]. SPIE, 2003: 4829.
- [5] Yun Maojin, Wang Mei, Kong Weijin, *et al.* Axial focal shift and extended focal depth with tunable filter[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0311003.  
云茂金, 王 美, 孔伟金, 等. 可调光瞳滤波器的轴向焦移及扩展焦深[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0311003.
- [6] Zha Weiyi. Imaging principles and technologies of the super-resolving optical system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 15.  
查为懿. 超分辨光学系统成像原理与技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 15.
- [7] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. UK: Cambridge University Press, 1999: 484-492.
- [8] Xiao Fei, Dai Yun, Zhao Junlei, *et al.* High-resolution retinal imaging system with dual deformable mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501004.  
肖 飞, 戴 云, 赵军磊, 等. 双变形镜人眼视网膜高分辨率显微成像系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501004.
- [9] Zhao L N, Dai Y, Zhao J L, *et al.* Programmable super-resolution pupil phase filter with a deformable mirror[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(9): 091201.