

望远超分辨成像中的视场光阑影响及补偿机理

魏明^{1,2}, 王超^{1,2*}, 李英超^{1,2}, 付强^{1,2}, 刘壮^{1,2}, 史浩东^{1,2}, 李冠霖^{1,2}, 姜会林^{1,2}

(1. 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 根据衍射光学理论, 分析了基于瞳函数调制的望远超分辨成像系统中, 用于视场选择和过滤旁瓣影响的视场光阑的衍射效应对成像效果的影响机理, 并给出了补偿原理和方案。微孔视场光阑和四环带阶跃型位相滤波器分别放置在系统一次像面和出瞳位置。理论分析和仿真表明: 视场光阑口径越小, 最终像面光斑主瓣越宽甚至失去超分辨效果, 旁瓣光强峰值与主瓣光强峰值之比也越高。对此出瞳处的光场振幅、位相场分别进行多项式拟合, 求解进行修正的复振幅型光瞳滤波器设计参数, 可以有效抑制视场光阑的衍射效应, 获得良好的超分辨成像效果, 且超分辨成像与光阑效应补偿合二为一, 不会增加系统光路的复杂度。并进行了实际实验, 验证了以上设计方法的有效性。以上研究结果可为应用在天文观测、空间探测等方面的超分辨成像系统设计提供依据。

关键词: 超分辨; 视场光阑; 衍射; 光瞳滤波器; 复振幅

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0214004

Effect and compensation mechanism of field stop in telescopic super-resolution imaging

Wei Ming^{1,2}, Wang Chao^{1,2*}, Li Yingchao^{1,2}, Fu Qiang^{1,2}, Liu Zhuang^{1,2}, Shi Haodong^{1,2},
Li Guanlin^{1,2}, Jiang Huilin^{1,2}

(1. National and Local joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University
of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the theory of diffractive optics, the imaging quality influence mechanism of the diffraction effect of the field stop for the field of view selection and side lobes filtering in the pupil function modulated modulation telescope telescopic super-resolution imaging was analyzed, and the compensating principle and method were given. The tiny hole field stop and the four-ring step phase filter were placed in the first image plane and the exit pupil respectively. Theoretical analysis and simulation show that the smaller the field stop aperture, the wider the main lobe of the spot on the final image surface, (even the super-resolution effect will disappear), and the higher the ratio of the peak

收稿日期: 2019-10-01; 修订日期: 2019-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61805028, 61805027); 国家重点研发计划(2017YFC0803806); 吉林省教育厅基金(JJKH20190563KG); 国防科工局专项(KJSP2016010202)

作者简介: 魏明(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: 1479737492@qq.com

通讯作者: 王超(1986-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计和高超分辨成像等方面的研究。

Email: nicklo19992009@163.com

intensity of the side lobe to the peak intensity of the main lobe. The polynomial fitting of the amplitude and phase fields at the exit pupil and the solving of the modified complex-amplitude pupil filter design parameters can effectively suppress the diffraction effect of the field stop, which leads to a good super-resolution imaging. Moreover, the super-resolution imaging and the pupil effect compensation were combined into one, which did not increase the complexity of the system optical path. The actual experiment was carried out to verify the availability of the above design method. The above research results can be used as a basis for the design of super-resolution imaging system applied in the astronomical observation and space exploration.

Key words: super-resolution; field stop; diffraction; pupil filter; complex amplitude

0 引言

光学望远镜自 17 世纪被发明以来,在天体探测、激光测距、空间遥感、激光通信、工业测量、光谱成像等领域受到广泛应用^[1-7]。传统望远光学系统的角分辨率受限于入瞳直径 D 和相应入射光波波长 λ , 同时其极限角分辨率 $\alpha=1.22\lambda/D$ 。提高分辨率的通常方法是增加望远镜主镜口径,但主镜的加工成本和难度会随着望远镜口径增大而迅速增大,同时系统的装调难度也会随着口径非线性地快速增长。而调制光瞳的透过率和位相函数的超分辨技术有望解决这一难题,它可以实现在口径不变的情况下提高望远镜的极限角分辨率^[8]。如 Juana 等设计出的正弦位相型光瞳滤波器可以使系统衍射分辨率提高到原来的 1.2 倍^[9];李凌霄对二区阶跃相位型光瞳滤波器进行了研究,发现区域之间相位差为 π 时,横向分辨率增长最快,并在共聚焦显微镜的入瞳和出瞳位置同时放置滤波器使得分辨率提高到原来的 1.2 倍^[10];汤东亮设计一种超振荡型光瞳滤波器,分辨率提高到 1.6 倍^[11];郭玲和唐芳等分别针对径向偏振光入射设计了余弦相位型光瞳滤波器,分辨率分别提高到 1.56 和 1.21 倍^[12-13]。

然而,由于能量守恒定律,调制瞳函数的超分辨技术在压缩衍射光斑主瓣、提高分辨率的同时也会显著增加光斑的旁瓣能量,从而产生干扰像面的杂光^[14]。

通常在使用光瞳滤波器进行成像时,物体上每

个物点都将产生高强度旁瓣。因而在像平面上,隔开一定距离的高强度旁瓣和主瓣将出现混叠现象,对于大型目标物体难以正常成像。对此采取的通常做法是通过光路设计,使得光线在到达光瞳滤波器之前形成中间像面,并在此像面处加入直径经过设计的微孔视场光阑,仅筛选出局部视场的光线最终到达像面;对大目标物体成像时,再通过移动视场光阑的位置,对多个局部视场成像后拼接而形成最终像^[15-16]。然而,由于视场光阑为一微米级孔径,其本身也不可避免地产生了衍射效应并对最终像质造成明显影响。

文中定量的研究了瞳函数调制的超分辨望远系统中,微孔视场光阑对于最终像质的影响,同时给出了补偿机理和方法。对于四环阶跃型位相滤波超分辨望远成像系统,利用标量衍射理论分析了含视场光阑的系统出瞳处复振幅和最终像面处的光强分布,并提出将阶跃型滤波器改为复振幅型滤波器来改善视场光阑不利影响的补偿方法,计算了滤波器的振幅与位相分布;通过仿真和实验验证说明该补偿方法取得了较好的效果。

1 有视场限制的超分辨成像基本原理

图 1 为望远超分辨系统示意图。其由望远物镜、视场光阑、准直物镜、光瞳滤波器、成像透镜和探测器构成。远处的光线通过望远物镜 L_1 聚焦到一次像面,在此处插入视场光阑以进行视场选择,消除视场外物点的超分辨聚焦光场旁瓣对成像的干扰。之后

一次像面的光经过准直物镜 L_2 重新变为准平行光, 经过出瞳平面处的光瞳滤波器调制, 然后经过紧贴光瞳滤波器的成像透镜 L_3 聚焦到像面成像。将 L_1 、 L_2 、 L_3 的焦距均设置为 f , 光瞳滤波器位于 L_2 后 $2f$ 处^[16], L_3 紧贴光瞳滤波器后表面。为简化分析, 忽略该系统中所有元件的厚度。

下面以衍射光学理论对该光学系统进行分析。文中涉及的光瞳滤波器特征尺寸远大于入射光波长, 且望远系统相对孔径通常较小, 因此可采用标量衍射理论。

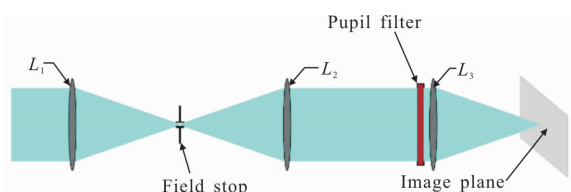


图 1 超分辨望远成像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of super-resolution telescopic imaging system

设 L_1 前表面光场复振幅为 $U_1(\rho_1)$, 平行光经过望远物镜 L_1 , 到达 L_1 后焦面, 此传播过程为夫琅禾费衍射, 再经过视场光阑的调制, 此时波前复振幅可表示为^[17]:

$$U_{fs}'(\rho_{fs}) = \frac{k}{if} e^{ik(f + \frac{\rho_{fs}^2}{2f})} \int_0^{\frac{D_1}{2}} U_1(\rho_1) P_{fs}(\rho_{fs}) J_0\left(\frac{k\rho_1\rho_{fs}}{f}\right) \rho_1 d\rho_1 \quad (1)$$

$$P_{fs}(\rho_{fs}) = \begin{cases} 1 & (\rho_{fs} \leq \frac{d_0}{2}) \\ 0 & (\rho_{fs} > \frac{d_0}{2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_0 为设定的视场光阑口径; ρ_1 、 ρ_{fs} 分别为 L_1 和视场光阑处的坐标; D_1 为 L_1 的通光孔径; λ 为入射光波长; $k=2\pi/\lambda$, $P_{fs}(\rho_{fs})$ 为视场光阑透过率函数。

视场光阑后表面到光瞳滤波器前表面的传播可表述为^[17-18]:

$$U_3(\rho) = \frac{k^2}{2f^2} e^{\frac{ik\rho^2}{4f}} \int_0^{\frac{d_0}{2}} \int_0^{D_2} U_{fs}'(\rho_{fs}) P_2(\rho_2) \cdot e^{\frac{ik}{4f}(2\rho_{fs}^2 + \rho_2^2)} J_0\left(\frac{k\rho_{fs}\rho_2}{f}\right) J_0\left(\frac{k\rho_2\rho}{2f}\right) \rho_{fs}\rho_2 d\rho_{fs} d\rho_2 \quad (3)$$

式中: $U_3(\rho)$ 表示光瞳滤波器前表面复振幅分布; ρ 为光瞳滤波器处径向坐标;

$$P_2(\rho_2) = \begin{cases} 1 & (\rho_2 \leq \frac{D_2}{2}) \\ 0 & (\rho_2 > \frac{D_2}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_2 为 L_2 通光孔径; ρ_2 为 L_2 处坐标; $P_2(\rho_2)$ 为透镜 L_2 的透过率函数。根据光瞳滤波器基本原理, $U_3(\rho)$ 经滤波调制, 然后经过 L_3 聚焦后, 像面焦点附近光场复振幅可表示为^[19]:

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 U_3(\rho) P(\rho) J_0(v\rho) e^{-i\frac{1}{2}u\rho^2} \rho d\rho \quad (5)$$

$$\begin{cases} u = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta)^2 z \\ v = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta \cdot r \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P(\rho)$ 表示光瞳滤波器的调制函数; ρ 为滤波器表面的归一化径向坐标; u 和 v 为两个无量纲的量, 分别表示焦点附近轴向和径向坐标。

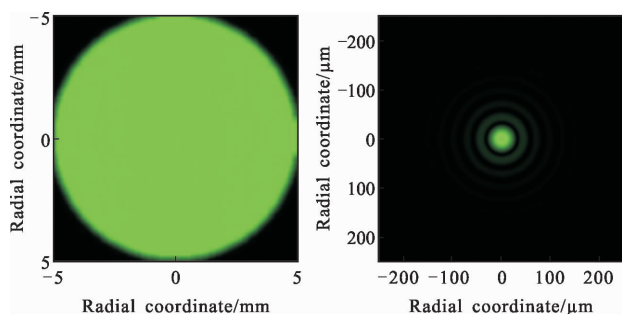
对于光瞳滤波器的设计, 具体表现为设计 $P(\rho)$ 。例如对于 $0 \sim \pi$ 跃变型位相板的设计, 可以表示成如下形式, 分区半径满足 $r_0=0, r_n=1, r_0 < r_1 < \dots < r_{n-1} < r_n$ 则有:

$$\begin{cases} P(\rho) = e^0, r_0 \leq \rho < r_1 \\ P(\rho) = e^{i\pi}, r_0 \leq \rho < r_2 \\ \vdots \\ P(\rho) = e^0, r_{n-1} \leq \rho \leq r_n \end{cases} \quad (7)$$

2 视场光阑对超分辨光斑影响仿真

2.1 瞳函数调制的位相板设计

在望远成像系统中不存在视场光阑, 即 $d_0 = \infty$ 时, 中继透镜系统整体可看成一个开普勒式望远镜, 平面波由入瞳进入系统, 忽略光学系统本身的像差, 则在系统出瞳处仍然得到平面波。系统参数设置为: L_1 、 L_2 、 L_3 焦距 500 mm, 通光孔径均为 10 mm, 照明光为波长 $\lambda=532$ nm 的非相干光。忽略系统像差, 求得艾里斑直径为 $64.904 \mu\text{m}$ 。为了保证入射光信息的完整, 至少单物点的主瓣要完整的通过一次像面处的视场光阑, 则光阑通光孔径不能小于 $64.904 \mu\text{m}$ 。使用数学计算软件进行仿真, 系统一次像面处未插入视场光阑时该系统出瞳处光强图和像面光斑分布见图 2。由图 2 可看出, 系统中未加入视场光阑时系统出瞳处依然为平面波, 像面光斑为艾里斑。



(a) 出瞳处光强分布 (b) 像面光强分布

(a) Light intensity distribution at exit pupil (b) Light intensity distribution on image plane

图 2 系统中无光瞳滤波器和视场光阑时光强分布

Fig.2 Light intensity distribution without pupil filter and field stop in the system

在该望远成像系统出瞳处紧贴 L_3 前表面加入有效口径为 10 mm 的四环带阶跃位相型光瞳滤波器,环带位相分布为 0, 交错。由于是四环带,故在 3 处径向位置存在跃变点。超分辨成像系统的光斑压缩比 G 定义为光瞳滤波器使用前后的聚焦衍射光斑主瓣宽度之比^[20],旁瓣强度比 M ,定义为超分辨光斑旁瓣强度最大值与主瓣强度最大值之比^[19,21]。采用 Toraldo 和全局优化算法,边界条件为给定的 M 值上

限,获得该 M 值下最大 G 值。 G 、 M 值关系曲线见图 3。

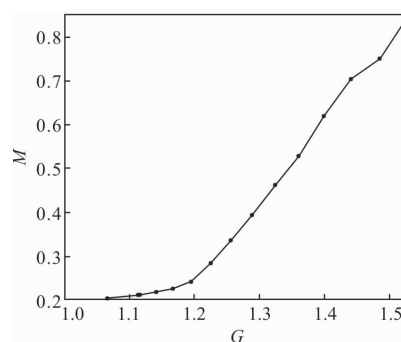


图 3 旁瓣强度比与光斑压缩比关系图

Fig.3 Relationship between side lobe intensity ratio and spot compression ratio

可见二者正相关。在实际应用中, G 值越大超分辨率效果越明显,一般应大于 1.2,而 M 值越大对成像干扰越大。但在同时, M 峰值的径向位置越往外,局部视场也越大。在工程应用中,可利用像面处小孔挡去局部视场以外的旁瓣,因此较大的局部视场结合小孔能够消除 M 过高的不利影响。综合考虑以上因素,选择归一化位相跃变径向坐标为 $R=[0.231 \ 0.54 \ 0.769]$,见图 4(a)。望远成像系统出瞳处的光经过光瞳滤波器调制,然后经过透镜聚焦得到的像平面光强分布

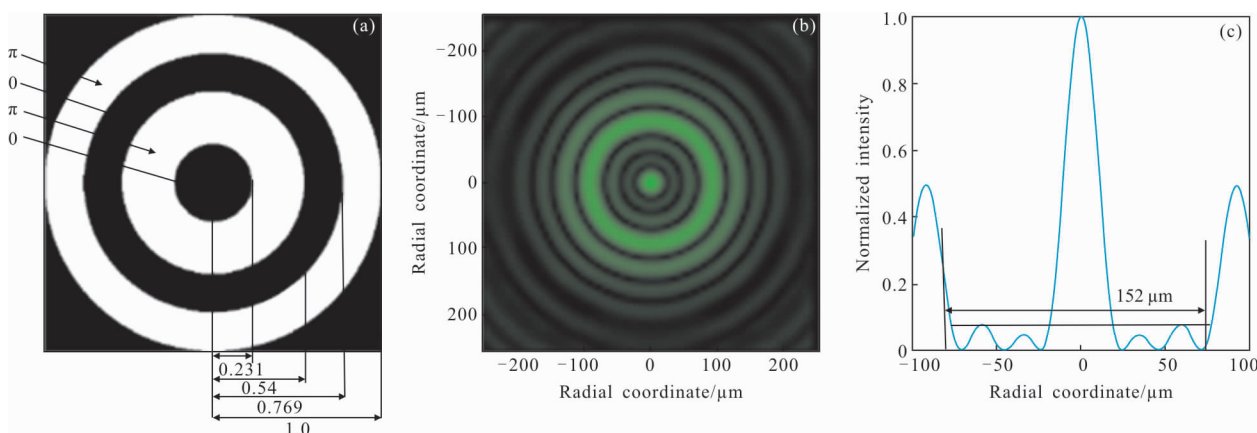


图 4 滤波器设计及成像效果图

Fig.4 Filter design and imaging results

见图 4(b)、(c)。此时图 4(a)对应的光瞳滤波器调制得到的超分辨光斑主瓣宽度为 $48.5 \mu\text{m}$,超分辨率倍率 $G=1.34$, $M=0.49$ 。

从图中可以看出,在这一位相板参数下,该超分辨光斑的第一、第二旁瓣能量都很低,其强度最大值不超

过 0.08 倍主瓣强度峰值,可认为即使与邻近像点的主瓣重叠也不会对成像造成明显影响,因此此超分辨光斑拥有较大的局部视场,达 $152 \mu\text{m}$,符合实际应用需求。

2.2 视场光阑对出瞳处光场分布影响分析

在加入视场光阑以后,若平面波由入瞳进入二

次成像望远系统,则系统出瞳处,即到达滤波器之前的光场不再是平面波,而是会由于视场光阑的衍射效应的影响有一定的变化。如图 4 所示,视场光阑口

径在可选范围内分别 140、100、65 μm , 得到出瞳处光强分布图。图 2 和图 5 对比可知,视场光阑直径越小,衍射效应越明显,出瞳处光强变化也愈加明显,

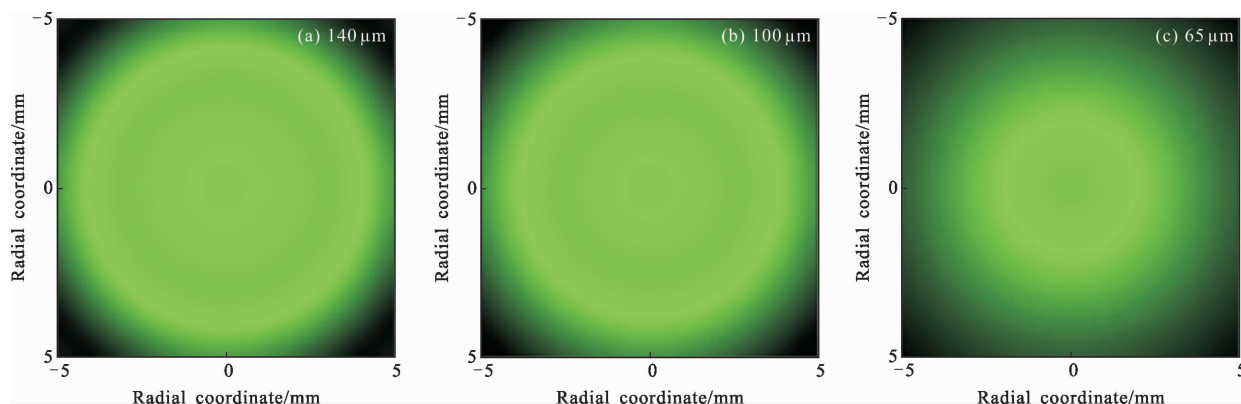


图 5 加入视场光阑后对应的出瞳光强分布图

Fig.5 Exit pupil intensity distribution after adding the field stop

能量从均匀分布变为中央高,边缘低,将不可避免地导致最终像面的光强分布也产生变化。

和相位分开表示,可得到如图 6 所示的分布。

由图 6 可知,一次像面处视场光阑对望远系统

出了进一步说明问题,将出瞳处复振幅的振幅

出瞳处光场振幅和位相分布都有明显影响。

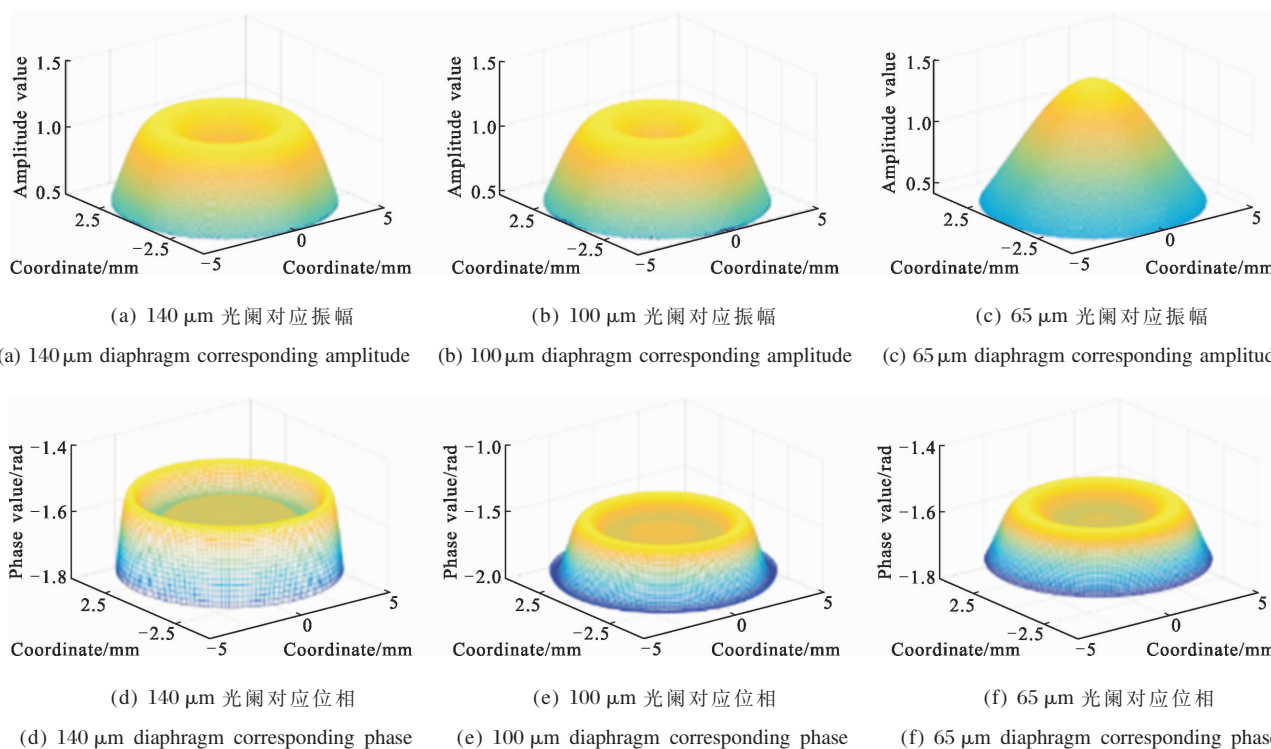


图 6 不同口径光阑下出瞳处振幅、位相分布

Fig.6 Distribution of amplitude and phase at the exit pupil with stop of different diameters

2.3 视场光阑对像面光场的影响定量分析

将以上出瞳处的振幅、位相分布代入公式(5)之中进行计算,可得到加入视场光阑以后的出瞳光场

经四环阶跃型位相板调制后,像面光强的分布曲线。将此曲线与加入视场光阑之前像面的超分辨光强分布曲线进行比较,如图 7 所示。

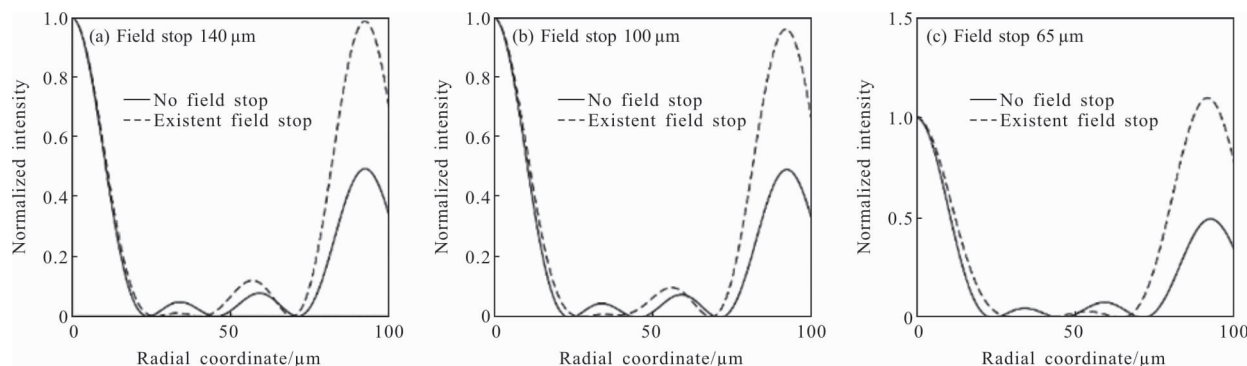


图 7 视场光阑加入前后像面光强归一化分布图

Fig.7 Normalized distribution of image intensity before and after adding field stop

可见, 光阑 140 μm 时光斑主瓣直径为 52 μm, 超分辨率倍率 $G=1.25, M=0.99, G$ 减小为加入视场光阑前的 0.93 倍, M 扩大至加入视场光阑前的 2.02 倍; 光阑 100 μm 时光斑主瓣直径为 56 μm, 超分辨率倍率 $G=1.16, M=0.96, G$ 减小为加入视场光阑前的 0.87 倍, M 扩大至加入视场光阑前的 1.96 倍; 光阑 65 μm 时, 光斑主瓣直径为 66 μm, 超分辨率倍率 $G=0.98, M=1.1, G$ 小于 1, 已无超分辨效果, M 扩大至加入视场光阑前的 2.24 倍。可见微米级视场光阑对于该望远光学系统超分辨光斑的影响不可忽略, 而且视场光阑口径越小, 光斑主瓣越宽甚至没有超分辨效果, 旁瓣能量与主瓣能量之比也越高, 必须加以补偿。

3 光阑影响补偿原理与方法

容易想到, 要补偿视场光阑的影响, 需在光阑后的光路中加入振幅和位相的补偿元件。考虑到衍射元件对光线入射角度敏感, 该补偿元件最好位于平行光路中, 出瞳处是较好的选择。设加入光阑后出瞳处光场 $U_3(\rho)$ 的振幅分布为 $V(\rho)$, 位相分布为 $\phi(\rho)$ 。则出瞳处光场分布可表示为:

$$U_3(\rho) = V(\rho)e^{i\phi(\rho)} \quad (8)$$

则该补偿元件复振幅分布应具有如下特性:

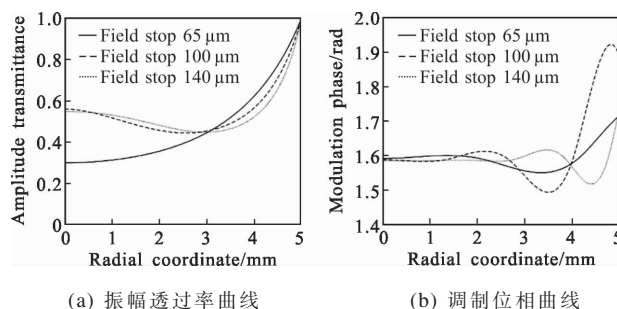
$$P'(\rho) = \frac{1}{V(\rho)} e^{-i\phi(\rho)} \quad (9)$$

则 $U_3(\rho) \cdot P'(\rho) = 1$ 。观察图 5, 可知在小孔光阑直径减小时, 会造成到达出瞳处的光场部分位置振幅小于 1, 则公式(12)中, $V(\rho)$ 取倒数以后必然有大于 1 的部分, 而透过率不可能大于 1。因此必须进一步处

理, 可以将取倒数以后的数据同除 $V^{-1}(\rho)$ 的峰值, 即

$$P'(\rho) = \frac{V^{-1}(\rho)}{\max V^{-1}(\rho)} e^{-i\phi(\rho)} \quad (10)$$

提取出瞳处的光场振幅、位相数据, 并依据上式进行处理。由于系统具有旋转对称性, 可将振幅和位相分布由二维曲面转化为一维曲线进行分析。补偿元件应具有振幅透过率曲线和位相分布曲线如图 8 所示。



(a) Amplitude transmittance curve (b) Modulation phase curve

图 8 补偿元件设计参数分布图

Fig.8 Distribution of design parameters of compensation elements

由图 8 可见曲线均为平滑曲线, 因此可利用多项式拟合的方式求得补偿元件振幅及位相分布的多项式参数, 以便于加工, 令 $V'(\rho) = \frac{V^{-1}(\rho)}{\max V^{-1}(\rho)}, \phi'(\rho) = -\phi(\rho)$, 则:

$$P'(\rho) = V'(\rho)e^{i\phi'(\rho)} \quad (11)$$

分别对 $V'(\rho)$ 和 $\phi'(\rho)$ 进行四次多项式拟合:

$$V'(\rho) = a_{10} \cdot \rho^4 + a_{11} \cdot \rho^3 + a_{12} \cdot \rho^2 + a_{13} \cdot \rho + a_{14} \quad (12)$$

$$\phi'(\rho) = b_{10} \cdot \rho^4 + b_{11} \cdot \rho^3 + b_{12} \cdot \rho^2 + b_{13} \cdot \rho + b_{14} \quad (13)$$

不同光阑大小时对应的多项式每一项的系数见表 1、2。

表 1 复振幅型补偿器振幅透过率拟合多项式参数
Tab.1 Amplitude transmittance fitting polynomial parameters of complex amplitude compensator

Aperture size/ μm	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
65	1.239 1	-1.406 4	0.956 8	-0.101	0.304 8
100	1.669 3	-1.372 2	0.442 8	-0.335 7	0.571 8
140	3.14	-3.711 4	1.262 7	-0.289 9	0.558 9

同时由于出瞳处还放置着超分辨位相型光瞳滤波器,考虑将复振幅补偿元件和超分辨滤波器合二为一。滤波器是纯位相型,其振幅透射率为 1。原位相板叠加补偿元件,成为复振幅型光瞳滤波器,其调制函数可表示为:

$$\begin{cases} P(\rho)=V'(\rho)e^{i\phi'(\rho)}, (0\leq\rho<0.231, 0.54\leq\rho<0.769) \\ P(\rho)=V'(\rho)e^{i(\phi'(\rho)+\pi)}, (0.231\leq\rho<0.54, 0.769\leq\rho\leq 1) \end{cases} \quad (14)$$

表 2 复振幅型补偿器位相分布拟合多项式参数
Tab.2 Phase distribution fitting polynomial parameters of complex amplitude compensator

Aperture size/ μm	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
65	0.897 0	-0.586 3	-0.330 8	0.175 4	1.585 2
100	3.273 0	-3.691 6	0.776 1	0.111 6	1.573 7
140	3.369 1	-6.346 0	3.752 8	-0.732 0	1.616 1

将依据此原理设计的光瞳滤波器代替原位相板插入望远光学系统并进行仿真,得到最终像面光场光强归一化分布曲线,并与补偿前进行比较,见图 9。

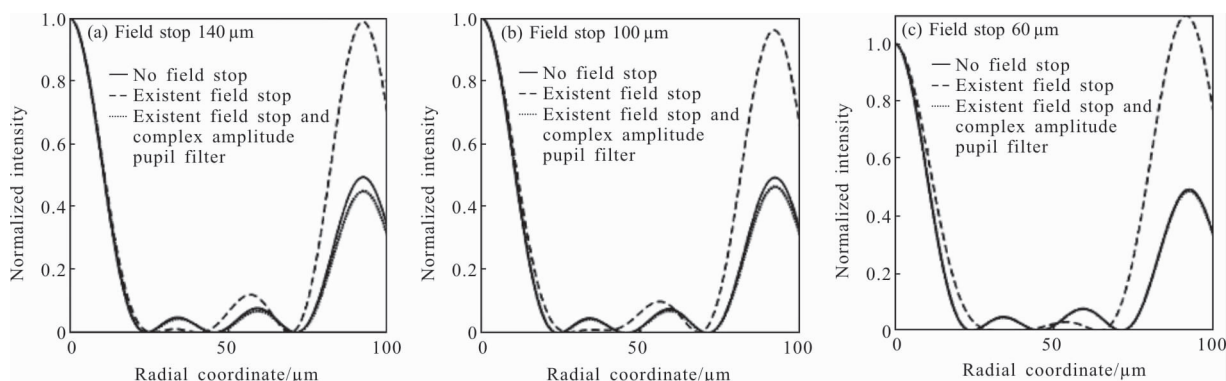


图 9 复振幅型光瞳滤波器对视场光阑衍射效应抑制效果图

Fig.9 Suppression effect of complex amplitude pupil filter on the diffraction effect of field stop

可见,加入修正的光瞳滤波器后,光强分布与无视场光阑时几乎重合。

下面将分析视场光阑给调制传递函数(MTF)带来的影响。对于加入超分辨位相板的系统,根据参考文献[16]的方法,仅关注局部视场区域,对局部视场内的点扩散函数(PSF)复振幅进行傅里叶变换,得到光学传递函数(OTF),并取实部得到 MTF。最终获得的在衍射极限、超分辨成像和带有视场光阑超分辨成像的各种情况下 MTF 曲线如图 10 所示。

由图 10 可看出,在到达衍射极限截止频率后,超分辨成像的 MTF 仍大于 0,符合参考文献[16]中结论。在加入视场光阑以后 MTF 值明显下降,成像

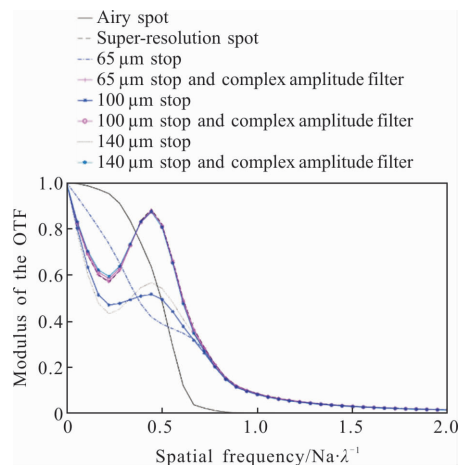


图 10 MTF

Fig.10 MTF

质量变差。光阑直径越小,MTF 下降的越明显。通过调整滤波器为复振幅型光瞳滤波器以后,MTF 值与原超分辨斑的值基本一致,说明根据以上原理设计得出的复振幅型光瞳滤波器已经对视场光阑的衍射效应进行了良好纠正,与前面针对像面光强分布的分析结论相符。

望远超分辨系统中的两个关键器件为微米级视场光阑和复振幅型光瞳滤波器。其中,视场光阑小孔直径为几十到几百微米,类似光学器件星点板,可利用激光直写方式进行加工,加工技术较为成熟,成本约数千元。而复振幅型光瞳滤波器在实际应用中可利用纯振幅型和纯相位型滤波器进行叠加,其中振幅型可通过染色,相位型可将滤波器位相离散化后通过光刻和反应离子刻蚀的方法进行加工,工艺较为繁琐,总成本在数万元左右。或者利用空间光调制器来模拟光瞳滤波器,该方法较为简单,但使得光路体积较大且需要电控系统。实际中可按需求选择不同的实现方式^[16]。

4 实验验证

为验证文中理论部分,搭建如图 11 所示的实验。根据现有条件,实验采用 632 nm 激光光源,利用扩束器扩束以后可得到近理想的单色光源, L_1 、 L_2 、 L_3

均采用口径 25.4 mm,焦距为 30 cm 的透镜,为减少像差入射光口径限制为 3.6 mm。由这些参数计算得到一次像面(放置光阑处)艾里斑直径为 128.7 μm 。

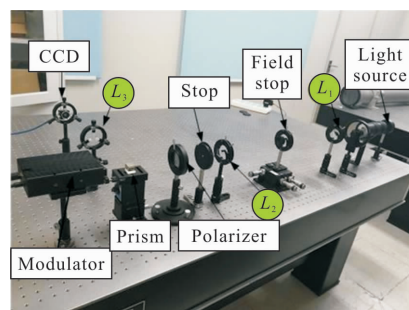
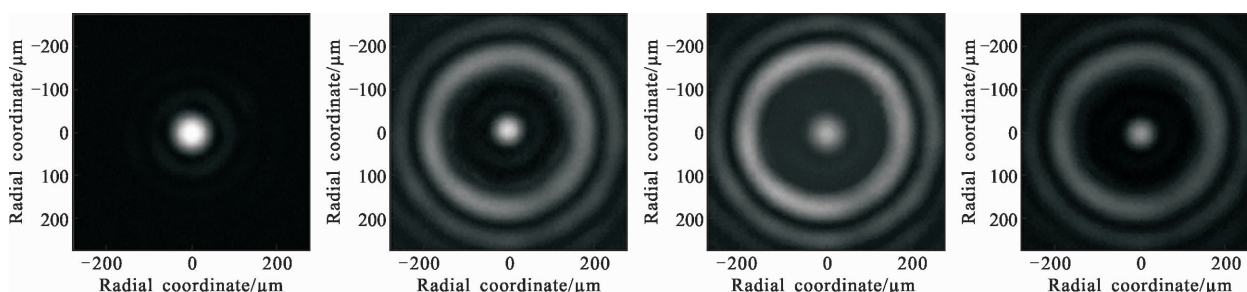


图 11 实验场景图

Fig.11 Experimental scene

根据上述计算结果,一次像面采用 150 μm 视场光阑。实验结果如图 12 所示。

实测艾里斑直径为 131.1 μm ,占 38 个像元。未放入视场光阑时,经过位相调制,得到的超分辨斑主瓣直径为 100.05 μm ,占 29 个像元。超分辨倍率 $G=1.31$ 。加入视场光阑以后,光斑主瓣直径为 134.55 μm ,占 39 个像元,明显已无超分辨效果。针对该系统,用前述原理设计对应的复振幅型光瞳滤波器,导入空间光调制器以后获得的超分辨斑主瓣直径约占 29 个像元,与未加光阑前超分辨效果类似。截取图 12(b)、



(a) 艾里斑

(b) 无视场光阑时像面超分辨斑

(c) 存在视场光阑时像面超分辨斑

(d) 系统中同时存在视场光阑和复振幅型光瞳滤波器时像面超分辨斑

(a) Airy spot

(b) Super-resolution spots at the image plane when there is no field stop

(c) Super-resolution spots at the image plane with field stop

(d) Super-resolution spots when both the field stop and the complex amplitude stop filter exist

图 12 超分辨实验结果

Fig.12 Super-resolution experimental results

(c)、(d)径向数据绘制光斑分布图,如图 12 所示。

由图 13 可知,系统中未加入光阑时,旁瓣强度比 M 为 0.51,当加入视场光阑后, M 为 0.89,当改位相板为复振幅型光瞳滤波器后, M 值约为 0.53。旁瓣强度也得到了恢复。实验结果与前节理论仿真得出的结论基本相符。

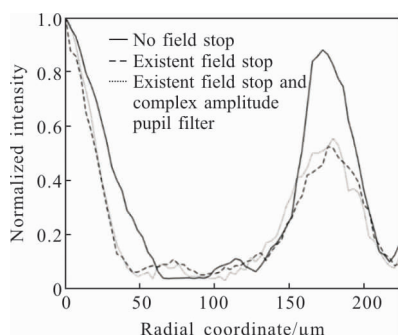


图 13 超分辨斑二维数据分布图

Fig.13 Super-resolution spot two-dimensional data distribution

5 结 论

根据衍射光学理论,探索了基于瞳函数滤波的超分辨望远成像系统中,用于过滤旁瓣影响的视场光阑对于超分辨成像效果的影响机理。进行了光路设计,分别在一次像面和出瞳处放置微孔视场光阑和光瞳滤波器。初始超分辨滤波器采用四环带阶跃型位相板。通过理论与仿真分析最终像面光强分布,可知 $140\ \mu\text{m}$ 的视场光阑使得超分辨倍率 G 减小为加入视场光阑前的 0.93 倍,最大旁瓣与主瓣峰值能量之比 M 提高到未加光阑时的 2.02 倍; $100\ \mu\text{m}$ 的视场光阑使得超分辨倍率 G 减小为加入视场光阑前的 0.87 倍,最大旁瓣与主瓣峰值能量之比 M 提高到未加光阑时的 1.96 倍; $65\ \mu\text{m}$ 的视场光阑使得超分辨倍率 G 减小为加入视场光阑前的 0.73 倍,此时 $G=0.98$,已无超分辨效果,最大旁瓣与主瓣峰值能量之比 M 提高到未加光阑时的 2.24 倍。可见微米级视场光阑口径越小,光斑主瓣越宽甚至失去超分辨效果,进入旁瓣的杂光能量也越多,必须加以补偿。提出了一种针对视场光阑影响的补偿原理及方法,对出瞳处的光场振幅、位相场分开单独处理,求解进行透过率和位相修正的复振幅型光瞳滤波器并与初始光瞳滤波器进行复合。仿真分析结果表明,此复振幅滤波器可以有效抑制视场光阑的衍射效应,获得良

好的超分成像效果,且使用一个器件同时具备超分辨和光场补偿效果,简化了系统结构。经过实验验证,可知此种方法可有效校正视场光阑对成像超分辨效应的影响。

参考文献:

- [1] Yan Dan, Zhang Huiyan, Cheng Xuan, et al. Astrometric performance of the 50 cm optical telescope of national time service center[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2015, 38(4): 243–251. (in Chinese)
- [2] Wang Zhi, Sha Wei, Chen Zhe, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 131–151. (in Chinese)
- [3] Zhang Haifeng, Long Mingliang, Deng Huarong, et al. Detection ability of laser ranging system based on multi-telescope to receive echo signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906002. (in Chinese)
- [4] Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Yao Wenhui. Polarization analysis of the cassegrain telescope used for the lidar polarization active imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007(10): 1771–1774. (in Chinese)
- [5] Guan Shu, Wang Chao, Tonf Shoufeng, et al. Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1222003. (in Chinese)
- [6] Yu Qing, Lu Jiayan, Lao Lilu, et al. Discussion of calibration method for curvature measurement apparatus of telescopic cannon barrel angle [J]. *Journal of Mechanical Engineers*, 2015(6): 184–186. (in Chinese)
- [7] Chen Wei, Xue Chuang. Design of wide field-of view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8): 950–955.
- [8] Wereley Steve, Zhang Yuxing, Khor Jianwei, et al. Single acquisition wide-field superresolution for telescopes [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 10025–10029. (in Chinese)
- [9] Daniel M D J, José E O, Vidal F C, et al. Design of superresolving continuous phase filters [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 607–609.
- [10] Li Lingxiao. Application of pupil modulation technique to improve the resolution of fundus imaging [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)

- [11] Wang Changtao, Tang Dongliang, Wang Yanqin, et al. Super-resolution optical telescopes with local light diffraction shrinkage[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1–5.
- [12] Guo Ling, Li Jinsong. Phase pupil filter with cosine function for sharper focus of radially polarized beam [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 75–79 .(in Chinese)
- [13] Tang Fang. Research of super-resolution radially-polarized-light pupil-filtering differential confocal microscopy [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Ryu Suho, Joo Chulmin. Design of binary phase filters for depth-of-focus extension via binarization of axisymmetric aberrations[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30312–30326.
- [15] Tang Dongliang, Tang Dongliang, Zhao Zeyu, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 713–719.
- [16] Tang Dongliang. Investigation of far-field super-resolution imaging method based on super-oscillatory phenomenon [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
- [17] Yang Guoguang, Song F J. Higher Physical Optics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008. (in Chinese)
- [18] Lyu Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [19] Cha Weiyi. Imaging Principles and technologies of the super-resolving optical system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [20] Liu Xianzhu, Wang Chao, Jiang Lun, et al. Super-resolution in telescope imaging system by two-dimensional polynomial phase pupil filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0418007. (in Chinese)
- [21] Liu Jiaying, Zhou Zehai, Zhu Lianqing, et al. Structure design of annular pupil for super-resolution microscopy imaging[J]. *Laser Journal*, 2016, 37(12): 5–8. (in Chinese)