

基于像素编码的大 F 数高分辨成像技术研究

单秋莎^{1,2**}, 郝伟¹, 刘朝晖^{1,2*}, 周亮¹, 陈荣利^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了使小口径相机具有与大口径相机同等的分辨能力, 提出一种基于像素编码的高分辨成像技术。为了降低图像高、低频信息的混叠, 提出基于以系统点扩展函数为运算核的像素编码算法。首先在空间域中直接构建系统的编码矩阵; 然后采用求逆的方法实现对输出图像的解码, 以达到提高图像质量的目的; 最后利用焦距为 100 mm 和像元尺寸为 $9\ \mu\text{m}$ 的成像系统在 F 数分别为 11(F11)和 25(F25)下进行室内实验验证, 采用像素编码算法对 F25 系统所成的鉴别率板像进行校正, 校正后的调制传递函数值(0.18)与 F11 系统(0.24)相当, 图像对比度得到提高, 验证像素编码算法的合理性和可行性, 使得小口径相机具备高分辨率的成像能力成为可能。

关键词 成像系统; 高分辨成像; 大 F 数; 像素编码; 调制传递函数

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811027

High-Resolution Imaging Technology for Large F -Numbers Based on Pixel Coding

Shan Qiusha^{1,2**}, Hao Wei¹, Liu Zhaohui^{1,2*}, Zhou Liang¹, Chen Rongli^{1,2}

¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, China Academy of Science, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To realize small-aperture cameras with the same resolving power as large-aperture cameras, a high-resolution imaging technology based on pixel coding is proposed. To reduce image aliasing at high and low frequencies, a pixel coding algorithm based on the system point spread function as the computing core is proposed. First, the encoding matrix of the system is directly constructed in the spatial domain. Then, the inversion method is used to decode the output image for enhanced image quality. Finally, the imaging system with a focal length of 100 mm and a pixel size of $9\ \mu\text{m}$ is developed. The F -numbers of 11 (F11) and 25 (F25) are used for indoor experimental verification. The pixel coding algorithm is used to correct the image of distinguish plate obtained using the F25 system. The value of the corrected modulation transfer function (0.18) is equivalent to that obtained using the F11 system(0.24), and high image contrast is obtained. The experimental results verify the feasibility and effectiveness of the pixel coding algorithm, thereby allowing small-aperture cameras to achieve high-resolution imaging.

Key words imaging systems; high resolution imaging; large F -number; pixel coding; modulation transfer function

OCIS codes 110.2970; 200.4560; 080.1753

1 引言

高分辨率成像在光电探测成像领域一直是重要

的研究和探索方向,尤其在航天、遥感和目标识别等领域。由于光的衍射现象,传统光学成像系统的角分辨率会受到光波波长 λ 和主镜尺寸 D 的限制,而

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-07-03; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61805275)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(XAB2017B27)

通信作者: *lzh@opt.ac.cn; **shqsh.2007@163.com

两个参数满足瑞利判据 $1.22\lambda/D$ 。在特定的工作波长下,提高成像系统分辨能力的主要手段只有增大主镜口径,但随着成像系统主镜口径的增大,系统的加工、镀膜和装配难度也将大幅度提高,由此限制了主镜口径的增大,而日益增长的高分辨率成像需求与大口径光学系统的加工工艺及成本之间的矛盾愈来愈明显。在传统的光学成像手段上,衍生出的合成孔径成像技术和阵列成像系统拼接技术^[1]均可提高成像的分辨率,本质都是通过扩大系统的等效口径来达到提高成像分辨率的目的,但子孔径的共相位拼接、加工和装配等难点限制了技术的发展。

计算光学成像技术是传统光学成像技术与数字信号处理技术相结合的一种新型成像方式。相比于传统的光学成像技术不能直接通过光学系统得到最终图像^[2],计算光学成像技术首先利用光学成像技术对目标进行调制/编码成像,在有效认知光学成像过程的基础上,利用数字信号处理技术对调制/编码信号进行解调/解码,最终得到清晰图像。计算光学成像技术摆脱了传统成像技术的限制,能够使系统具有大景深、大视场和高分辨率等特性^[3],极大地拓展了传统光学成像系统的潜力。由此衍生出的多帧图像融合、超分重建技术^[4-5]和超分辨光瞳滤波成像技术^[6-9]等在高分辨成像方面具有显著优势,但超分重建技术需要目标的多幅图像才能进行图像的重建,通过牺牲时间分辨率或者增加系统的复杂性来提高空间分辨率,而超分辨光瞳滤波技术利用光瞳调制技术来压缩衍射光斑的主瓣以提高分辨率,同时伴随旁瓣能量的显著增加,这限制了在成像系统中的广泛推广。

根据瑞利判据可知,增大焦距可提高系统的角分辨率,为此本文提出一种基于像素编码的大 F 数和大 Q 值的高分辨成像技术,大 F 数和大 Q 值可降低高、低频的混叠,其中 Q 值为探测器的采样频率与光学系统的衍射截止频率之比。从光学成像原理出发,将点扩展函数(PSF)看作成像系统对目标场景的一种像素化编码并将其作为系统高分辨成像的运算核,用来弥补大 F 数所引起的调制传递函数(MTF)值较小的问题,以达到提高系统成像分辨率的目的,通过室内系统进行理论验证,即对 $F=11$ (F11)和 $F=25$ (F25)下拍摄的图像采用像素编码算法进行校正。实验结果表明,校正后的 F25 图像的 MTF 值与 F11 图像相当,图像细节清晰,对比度得到提高,验证了该技术的合理可行。

2 像素编码的基本原理

对于理想的成像系统而言,物点经过成像系统后能够获得完善点像,其中成像系统对物方信息可以完美传递,没有信息丢失,能够得到清晰的图像。但对于实际光学系统而言,几何像差和衍射现象均会引起光学图像有不同程度的退化,造成图像模糊。点光源通过光学系统后不能会聚在同一点上,而是形成一个弥散斑,光学系统对点光源的响应即为点扩展函数,其分布形态会受到光学系统几何像差和衍射的共同影响。对于大 F 数的成像系统,由于其自身的 F 数较大,因此衍射现象较为明显,艾里斑的直径变大,从而造成成像质量下降,可认为光学系统 F 数的增加会导致光学图像“模糊”。

像素编码的目的是探测器在图像读出过程中,对探测器所接收的降质图像进行某种“编码”,使得读出的图像能够尽可能恢复出高质量图像,打破传统成像系统在传递函数幅值较小的情况下成像质量不佳的局限。

经过成像系统后的图像退化和像素编码过程如图 1 所示,其中 $f(x,y)$ 为原始图像, (x,y) 为图像坐标, $n(x,y)$ 为加性噪声, $\hat{f}(x,y)$ 为探测器的读出图像, \mathbf{H}_e 为成像系统的块循环矩阵, \mathbf{H}_e^{-1} 为像素编码逆矩阵, \oplus 为在计算过程中加入噪声的影响。

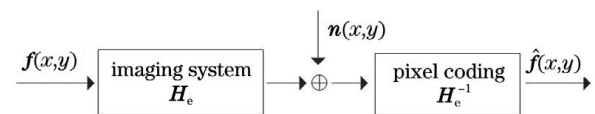


图 1 图像退化和像素编码的过程

Fig. 1 Process of image degradation and pixel coding

图像的退化过程可简化为一原始图像 $f(x,y)$ 与点扩展函数(模糊核) $h(x,y)$ 先卷积,再与加性噪声求和的过程,表达式为

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \oplus n(x,y), \quad (1)$$

式中: $g(x,y)$ 为成像系统退化后的图像; $*$ 为卷积符号。根据光学成像原理可知,图像退化过程即为卷积过程。为了实现读出图像的清晰成像,需要对退化图像进行解卷积,因此将图像退化过程转换为矩阵和向量相乘的形式,表达式为

$$g_e(x,y) = \mathbf{H}_e(x,y) \times f_e(x,y) + n_e(x,y), \quad (2)$$

式中: \mathbf{H}_e 为由点扩展函数构成的块循环矩阵; f_e 和 g_e 分别为图像 f 和 g 按行串接的向量; n_e 为背景噪声。忽略噪声的影响,原始目标图像的估计值 $\hat{f}_e(x,y)$ 可表示为

$$\hat{f}_e(x, y) = g_e(x, y) / H_e(x, y). \quad (3)$$

由此,将探测器采集到的图像在读出过程中与 H_e^{-1} 进行相互作用,即可使读出图像接近原始目标的图像,整个过程为像素编码算法的基本处理过程,具体实现过程如下。

给定点扩展函数,则可构造出 H_e^{-1} ,构造过程如图 2 所示。

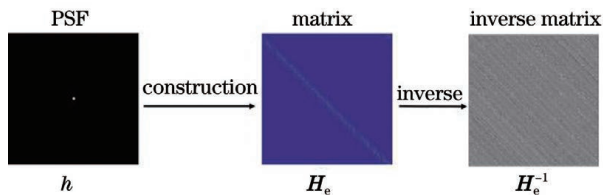


图 2 使用 PSF 构建编码矩阵的过程

Fig. 2 Process of building coding matrix using PSF

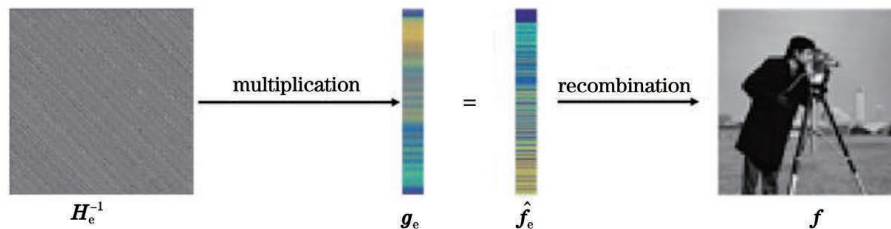


图 4 图像的读出解码过程

Fig. 4 Process of reading and decoding image

像素编码算法通过点扩展函数在空间域中构建系统的编码矩阵,再利用其逆矩阵实现对输出图像的解码,但该方法存在如下缺点。1)在空间域中直接构建成像系统的编码矩阵需要较大的内存;2)直接对编码矩阵进行求逆易受噪声的影响。因此,为了解决上述问题,采用低噪声 CCD(Charge Coupled Device)探测器和图像分块处理的思想,图像分块处理可有效解决处理内存不足的问题,使其在图像加速处理和并行计算中应用广泛。

由于大 F 数成像系统的点扩展函数较为稳定,系统残余像差小,焦深较长,所以对焦面位置精度的要求较低。在前期成像系统的测试过程中,多次采集可基本确定系统的退化图像(图 5),同时还可通过系统衍射的艾里斑尺寸来判断退化函数的正确性。

对于大 F 数图像(分辨率为 $4008 \text{ pixel} \times 2672 \text{ pixel}$)实现像素编码来说,所需的内存较大,现有内存无法满足要求,因此采用图像分块处理的思想可降低对处理内存的要求。在 4 G 内存的 Win32 系统下,处理相同的图像可以通过图像分块来处理大 F 数图像,而且不会存在内存不足的缺点,并且处理时间比分块前少了 0.5 s。

对探测器接收到的图像按行串接成向量,该过程可看作图像的读出过程,读出过程如图 3 所示。



图 3 图像的读出过程

Fig. 3 Process of reading image

在探测器中将图像按照行的顺序读出后,将读出值与 H_e^{-1} 相乘,再将向量重组为矩阵即可得接近原始目标的图像,图像的读出解码过程如图 4 所示。

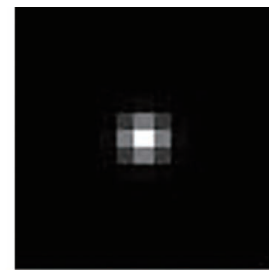


图 5 大 F 数系统的退化图像

Fig. 5 Degraded image of large F -number system

图像分块的思想是将图像按照一定区域进行分块处理,接着对每个分区域进行像素编码校正处理,分区域处理结束后按照已知的顺序进行组合以获得最终的结果图像,带图像分块处理思想的像素编码校正流程如图 6 所示。在图像分块处理的过程中会存在边缘突变的问题,现有的处理方式主要有边界 0 值填充、镜像边界和重叠边界等,本文主要采用重叠边界的处理方式将图像分成 4 块,重叠像素值为点扩展函数值的 $1/2$,利用重叠像素进行拼接即可裁掉边界,从而实现边界伪影的去除。

3 光学系统 F 数对 MTF 的影响

光学成像系统的 MTF 是表征光波经过成像系

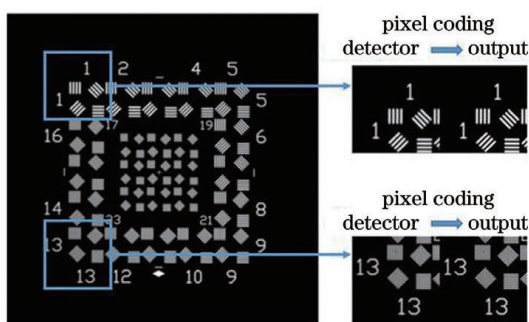
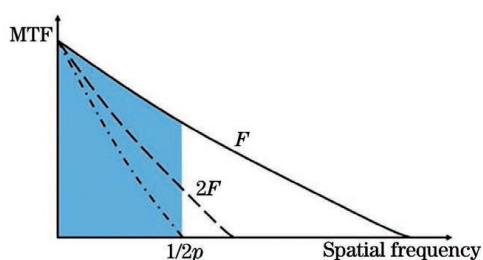


图 6 像素编码算法的校正流程

Fig. 6 Correction process of pixel coding algorithm

统后在频率域中调制衰退的函数,这是评价光学成像系统性能的一个重要指标。由于图像的光学信息获取与传输过程要经过目标、大气、光学系统和 CCD 等一系列介质,而各个介质均可能对图像起到退化作用,引起图像质量的下降。

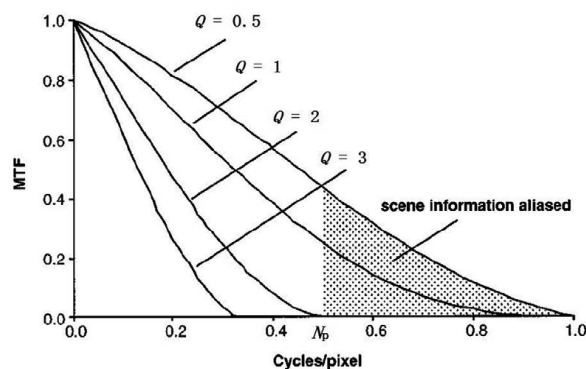
根据光学衍射效应可知,无像差的光学系统的分辨率是受限的。对于入射光波长为 λ 、入瞳直径为 D 、焦距为 f' 和 $F=f'/D$ 的光学系统,其空间衍射极限为 $1.22\lambda F$,对应的艾里斑直径为 $2.44\lambda F$,空间截止频率 $N_c=1/\lambda F$ 。因此,随着 F 数的增加,衍射效应越明显,而光学系统的分辨率逐渐下降,光学系统的截止频率向着低频方向移动,最终导致系统的传递函数值减小,MTF 曲线如图 7 所示,其中 $F=f'/D$, $1/2p$ 为奈奎斯特频率 N_p , p 为像元尺寸。

图 7 不同 F 数下的 MTF 曲线Fig. 7 MTF curves with different F -number

从图 7 可以看到,MTF 值反映了成像信息在不同空间频率下的衰减情况,即频率越高,信号衰减得越多,MTF 值就越小;当系统的奈奎斯特频率处于空间截止频率范围内时,随着 F 数的增加,图像高频信息的衰减速度相对加快,因此不同 F 数的图像在数字化的过程中主要表现为高频信息存在差异,其中大 F 数图像的纹理更贴切,但图像边缘和细节等变得相对模糊。

通常系统的空间分辨率除了受光学系统的影响以外,还与探测器的像元尺寸 p 有关。根据采样定

理可知,当输入图像的频谱大于奈奎斯特频率的高频频谱时,则输入图像的频谱会对折混入低频信息中,造成频谱混叠。采用 Q 值来描述图像混叠效应,不同 Q 值下的 MTF 曲线如图 8 所示^[10]。根据香农采样定理,当 $Q>2$ 时,系统为过采样;当 $Q<2$ 时,系统欠采样,会造成图像混叠,使图像质量下降;当 $Q=2$ 时,系统性能最佳。

图 8 不同 Q 值下的 MTF 曲线^[10]Fig. 8 MTF curves of different Q values^[10]

由于 CCD 成像系统为欠采样系统,其存在图像混叠现象,所以图像质量降低。当探测器的像元尺寸 p 一定时,增大 F 数可以增大 Q 值,从而减少图像混叠现象的发生,有利于提高图像质量。

4 高分辨成像的实现

为了验证像素编码高分辨技术的合理性和可行性,采用镜头焦距为 100 mm 的系统进行室内验证,系统光圈从 2.9 可调至全关闭状态,所用相机的像元尺寸为 $9\ \mu\text{m}$,成像镜头如图 9 所示,主要指标如表 1 所示。



图 9 成像镜头图

Fig. 9 Image of imaging lens

实验数据包括 $F=11$ (小 F 数)、 $Q=0.7$ (小 Q 值)和 $F=25$ (大 F 数)、 $Q=1.7$ (大 Q 值)下的成像图像,将两种光圈的成像条件(图像亮度和成像积分时间)保持一致,对大 F 数图像进行 PSF 像素编码算法的处理,将处理后的图像和小 F 数原始图像进行对比分析,通过对比两种图像的 MTF 值来验证

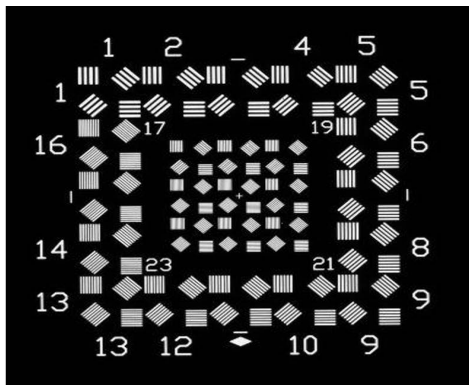
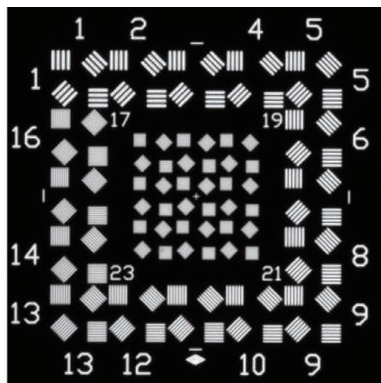
表 1 缩比系统的参数

Table 1 Parameter of scale system

Parameter	Value
Focal length /mm	100
F -number	25,11
Diameter /mm	4,9
Field of view /[(°)×(°)]	20.6×13.8,20.6×24.8
Pixel size / μm	9
Size /(pixel×pixel)	4008×2672

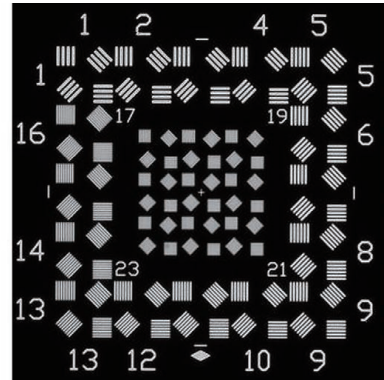
像素编码算法提高成像分辨率的可行性。

室内实验以分辨率鉴别板为被测目标,分别获取 $F=11$ 和 $F=25$ 下的图像,控制相机的积分时间使两种 F 数下获取的鉴别率板像具有相近的成像条件,结果如图 10 和图 11 所示。

图 10 $F=11$ 的鉴别率板像Fig. 10 Image of distinguish plate with $F=11$ 图 11 $F=25$ 的鉴别率板像Fig. 11 Image of distinguish plate with $F=25$

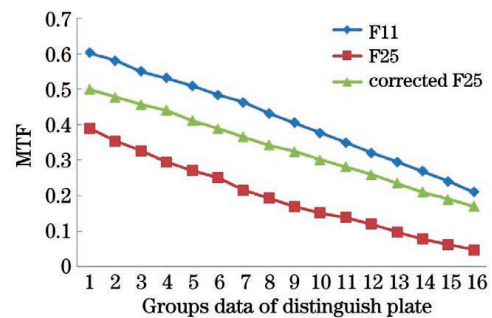
从图 10 和图 11 可以看到,经过计算可知鉴别率板像的大小为 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$,其对于镜头的视场为 1.54° , $F=11$ 可辨识第 17 组, $F=25$ 可辨识第 14 组。经过计算第 15 组对应的奈奎斯特频率为 56 lp/mm (像元尺寸为 $9 \mu\text{m}$),说明 $F=11$ 对

第 15 组的分辨能力优于 $F=25$,同一频率下,系统的 F 数越大,对目标的识别能力有所下降,对 $F=25$ 的图像采用像素编码算法进行校正,校正后的图像如图 12 所示。

图 12 $F=25$ 校正后的鉴别率板像Fig. 12 Corrected image of distinguish plate with $F=25$

从图 12 可以看到,经像素编码算法校正后, $F=25$ 鉴别率板图像的第 15 组 4 个方向的黑白线对可清晰分辨,图像边缘变得尖锐,对比度得到一定提高。

上述数据是定性分析结果,为了定量分析数据,分别对 $F=25$ 校正前后的鉴别率板像和 $F=11$ 的鉴别率板像进行分析,计算不同组鉴别率板像对应的 MTF 值,结果如图 13 所示。不同频率下鉴别率板像的 MTF 可表示为 $M_{\text{MTF}} = \frac{\pi}{4} \times \frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{R_{\text{max}} + R_{\text{min}}}$,其中 R_{max} 为亮条纹的灰度响应值, R_{min} 为暗条纹的灰度响应值。

图 13 不同 F 数下不同鉴别率板组对应的 MTF 值Fig. 13 MTF values corresponding to different discriminant plate groups under different F -number

从图 13 可以看到, $F=25$ 图像在各个频率下的 MTF 值均最小,校正后的 $F=25$ 图像在各个频率下的 MTF 值较 $F=25$ 原始图像均有较大提升,在 15 组对应频率下的 MTF 值是 $F=25$ 原始图像的 2 倍左右;在奈奎斯特频率为 56 lp/mm (对应鉴别率板第

15 组)处, F11 图像的 MTF 值为 0.24, 校正后 F25 图像的 MTF 值为 0.18, 虽然校正后 F25 图像的 MTF 值略小于 F11 图像, 但是像素编码算法在提高分辨率方面具有一定的潜力, 因此可认为 F25 图像经校正后对目标的识别能力与 F11 图像近似相当, 像素编码校正后的 F25 图像质量与 F11 图像相当, 这说明像素编码高分辨成像技术的合理性和可行性。

5 结 论

根据光学成像理论可知, 光学成像系统的分辨率会受到衍射效应的影响。对于大 F 数系统, 其衍射现象明显, 衍射的艾里斑直径变大, 从而造成成像质量下降, 可以认为 F 数的增加会造成光学图像“模糊”。基于大 F 数系统提出以 PSF 为运算核的像素编码算法, 首先采用该算法对目标信息进行编码并在空间域中构建系统的编码矩阵, 然后利用其逆矩阵来实现对输出图像的解码, 最终得到高分辨率图像。为了验证算法的合理性和可行性, 开展了室内验证实验, 分别在 F11 和 F25 下获得两种 F 数的鉴别率图像。通过对比发现, F11 图像对目标的分辨能力优于 F25 图像; 同一空间频率下, 系统的 F 数越大, 对目标的识别能力有所下降。对 $F=25$ 的图像运用像素编码算法进行校正, 校正后的 F25 图像和 F11 原始图像具有近似相当的分辨能力, 目标的对比度有所提高, 图像质量得到一定提升, 室内实验验证像素编码算法提高系统成像分辨率的合理性和可行性, 使得小口径相机具备大口径相机的成像能力成为可能, 为下一步的工程应用实施奠定了理论基础。

参 考 文 献

- [1] Xu Z H, Feng H J. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 456-463.
徐之海, 冯华君. 超高分辨光电成像技术的研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(4): 456-463.
- [2] Zheng Y D. Research on computational imaging technology of simple optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [3] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 020001.
- [4] Liu Y Y. The research on a novel super-resolution reconstruction method [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
刘妍妍. 一种新型超分辨重建技术的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- [5] Hu F, Lin Y, Hou M D, et al. Super-resolution reconstruction of cytoskeleton image based on deep learning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2410001.
胡芬, 林洋, 侯梦迪, 等. 基于深度学习的细胞骨架图像超分辨重建 [J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2410001.
- [6] Zha W Y. Imaging principles and technologies of the super-resolving optical system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
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.
- [7] Wang C, Shi H D, Li Y C, et al. Design of super-resolution telescopic imaging optical system with relative large field-of-view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322002.
王超, 史浩东, 李英超, 等. 较大视场超分辨望远成像光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1322002.
- [8] Wei M, Wang C, Li Y C, et al. Effect and compensation mechanism of field stop in telescopic super-resolution imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0214004.
魏明, 王超, 李英超, 等. 望远超分辨成像中的视场光阑影响及补偿机理 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0214004.
- [9] de Juana D M, Oti J E, Canales V F, et al. Design of superresolving continuous phase filters [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 607-609.
- [10] Fiete R D. Image quality and $\lambda FN/p$ for remote sensing systems [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(7): 1229-1240.