

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0159

离焦光源的傅里叶单像素成像及其优化

贾锦一, 李宗国, 王彪, 刘占栋, 吴峰, 李洪国*

(天津理工大学理学院, 天津 300384)

摘要: 傅里叶单像素成像是一种新型光学成像技术, 在三维成像等领域具有重要应用前景。为了促进傅里叶单像素成像的应用, 本文分析研究光源的离焦对傅里叶单像素成像的影响并探索离焦成像的优化策略。首先基于描述光源离焦的高斯模型, 理论分析离焦光源的傅里叶单像素成像, 接着实验上以傅里叶基底图案调制的数字光投影仪为光源, 通过改变光源的离焦参量, 分析研究光源离焦对傅里叶单像素成像的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PR_{SN}) 的影响。结果表明: 光源偏离焦点越多, 成像质量越差, 具体为重建图像 PR_{SN} 从 28.4 dB 下降至 20.5 dB。为此, 本文探索实现了一种融合自适应滤波和盲去卷积的成像质量优化策略, 优化后的图像 PR_{SN} 提高了 1.4—4.0 dB。该结果对于傅里叶单像素成像应用于远距离成像等复杂环境具有重要意义。

关键词: 傅里叶单像素成像; 离焦光源; 峰值信噪比 (PR_{SN}); 自适应滤波; 盲去卷积

中图分类号: O438.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)12-1323-06

Fourier single-pixel imaging with defocused light source and its optimization

JIA Jinyi, LI Zongguo, WANG Biao, LIU Zhandong, WU Feng, LI Hongguo*

(School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: As a novel imaging technique, Fourier single-pixel imaging has potential applications in many fields such as 3D imaging. In order to promote the application of Fourier single-pixel imaging, we investigate the impact of light source defocusing on Fourier single-pixel imaging and its optimization strategy in this paper. Applying Gaussian model to describe the defocusing, we analyze theoretically Fourier single-pixel imaging with defocused light source. Then employing digital light projector modulated by Fourier basis pattern as the light source, we investigate the influence of the defocusing on the peak signal-to-noise ratio PR_{SN} of Fourier single-pixel imaging by changing the defocused parameter of the light source. The results show that the more the light deviates from the focus of light field, the worse the imaging quality. Correspondingly, the PR_{SN} of the reconstructed image decreases from 28.4 dB to 20.5 dB. In terms of this problem, we explore an adaptive strategy to optimize the defocused image which combines adaptive filter with blind deconvolution, the PR_{SN} of the optimized image improved by 1.4—4.0 dB. It is helpful to the application of Fourier single-pixel imaging in complex environments such as long-distance imaging.

Key words: Fourier single-pixel imaging; defocused light source; peak signal-to-noise ratio (PR_{SN}); adaptive filter; blind deconvolution

1 引言

单像素成像是从鬼成像到计算鬼成像逐步形成的一种新型光学成像技术^[1-3]。2008年, BRO-

MBERG等^[4]实现了计算鬼成像, 通过计算机控制空间光调制器来产生随机散斑图, 实验上不需要参考臂, 只需在物光臂利用一个单像素探测器获得物光光强, 参考光强度分布通过菲涅耳衍射

* E-mail: lihongguo@tjut.edu.cn

收稿日期: 2022-03-14 修订日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(11604243)、天津市自然科学基金(16JCQNJC01600)和天津理工大学教改基金(ZD21-22)资助项目

计算得到,然后通过对实验得到的物光光强与计算得到的参考光强度分布进行强度关联获得物体的“鬼像”。2010年,FERRI等^[5]提出了差分鬼成像。2012年,孙宝清等^[6]提出了归一化鬼成像,在一定程度上提高了成像质量。2013年,孙宝清等^[7]基于计算鬼成像方案融合三维重建算法,用数字光投影仪产生结构调制光实现了三维物体的计算鬼成像。

2015年,张子邦等^[8]提出了傅里叶单像素成像方案,该方案不同于空域计算鬼成像的方法,该方案通过计算机产生傅里叶基底图案控制投影仪产生结构光(空间频率域条纹)照射物体,再用一个单像素探测器采集物光光强,最后通过四步相移算法重建得到物体的图像,与传统空域单像素成像方案相比,该方案得到了更高质量的图像。此后还有关于进一步改进成像质量的相关报道,例如“有效和快速傅里叶单像素成像”。除使用傅里叶基底图案外,还有使用哈达玛基底和小波基底的成像方案。单像素成像具有成本低和能够实现多光谱和高光谱成像的特点,在全息成像、相位成像、压缩光学加密、红外成像、太赫兹成像、荧光显微镜、三维成像、散射介质成像、光声成像等领域具有许多潜在的应用^[9-13]。

在单像素成像应用到实际领域中,分析成像质量的影响因素是必要的。众所周知,在传统光学成像中,照相机获得的物体图像质量会受到景深的影响。在傅里叶单像素成像中光源的离焦会造成条纹模糊,也会影响成像质量,最近有基于离焦高斯模型^[14]和深度学习方法^[15]进行离焦校正优化模糊条纹提高成像质量的相关报道。为便于优化离焦校正方法在单像素成像中的应用,本文基于离焦高斯模型进一步详细分析光源离焦对傅里叶单像素成像的影响,得到成像峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PR_{SN})随离焦参量的变化规律并探索提出一种融合自适应滤波和盲去卷积的自适应优化策略。

$$\begin{cases} B_1(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 0) dx dy \\ B_2(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi/2) dx dy \\ B_3(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi) dx dy \\ B_4(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 3\pi/2) dx dy \end{cases} \quad (5)$$

根据四步相移算法,可得到物体的频谱即傅里叶系数为:

$$C(f_x, f_y) = [B_1(f_x, f_y) - B_3(f_x, f_y)] + j[B_2(f_x,$$

2 理论分析

2.1 傅里叶单像素成像

为了便于后面分析离焦光源的傅里叶单像素成像,首先介绍非离焦光源的傅里叶单像素成像^[8],投射到物体上的傅里叶基底图案即空间频率域条纹用下式描述:

$$P_\varphi(x, y; f_x, f_y) = a + b\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi), \quad (1)$$

式中, a 表示照射图案的直流分量, b 表示条纹对比度, x 和 y 是平面坐标, f_x 和 f_y 分别代表 x 方向和 y 方向对应的空间频率, φ 表示初相位。若采用四步相移算法,傅里叶基底图案可分别表示为:

$$\begin{cases} P_1(x, y; f_x, f_y) = a + b\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 0) \\ P_2(x, y; f_x, f_y) = a + b\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi/2) \\ P_3(x, y; f_x, f_y) = a + b\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi) \\ P_4(x, y; f_x, f_y) = a + b\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 3\pi/2) \end{cases} \quad (2)$$

空间频率域条纹照射到目标物体后的反射光总强度可表示为:

$$I(f_x, f_y) = \iint_s O(x, y) P_\varphi(x, y; f_x, f_y) dx dy, \quad (3)$$

式中, s 表示基底图案的照明区域, $O(x, y)$ 表示目标物体的空间分布。考虑实验中探测可能受到周围环境背景光噪声的影响,单像素探测器最终测得目标物体反射的总光强为:

$$B_\varphi(f_x, f_y) = B_n + \gamma \cdot I(f_x, f_y), \quad (4)$$

式中, B_n 表示环境背景光噪声强度, γ 表示与探测器的增益等有关的参量。将式(2)和式(3)代入式(4)可得,采用四步相移算法时,单像素探测器测得的反射光总强度分别为:

$$f_y) - B_4(f_x, f_y)] = 2b\gamma \cdot F\{O(x, y)\}, \quad (6)$$

式中, j 表示虚数, $F\{\}$ 表示傅里叶变换。对目标物

体投射不同空间频率的结构光条纹可以获得包含物体所有傅里叶系数的完整频谱,然后利用傅里叶逆变换可以实现目标物体的图像重建,即:

$$O(x, y) = \frac{1}{2b\gamma} \cdot F^{-1}\{C(f_x, f_y)\}, \quad (7)$$

式中, $F^{-1}\{\}$ 表示逆傅里叶变换。

2.2 离焦光源的傅里叶单像素成像

在傅里叶单像素成像过程中,数字光投影仪的镜头焦点偏离目标物体会产生光源离焦现象,可能影响成像质量。为了探究影响规律,引入描述光源离焦的数学模型,光源离焦造成图案模糊数学上可利用二维高斯函数描述为^[14-16]:

$$\begin{cases} P'_1(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 0) \\ P'_2(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi/2) \\ P'_3(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi) \\ P'_4(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 3\pi/2) \end{cases} \quad (10)$$

在光源离焦条件下,单像素探测器记录的反射光总强度可分别表示为:

$$\begin{cases} B'_1(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \times \\ \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 0) dx dy \\ B'_2(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \times \\ \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi/2) dx dy \\ B'_3(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \times \\ \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi) dx dy \\ B'_4(f_x, f_y) = B_n + a\gamma \iint_s O(x, y) dx dy + b\gamma \iint_s O(x, y) \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \times \\ \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + 3\pi/2) dx dy \end{cases}, \quad (11)$$

相应地,可得到离焦条件下物体的频谱系数即傅里叶系数为:

$$\begin{aligned} C'(f_x, f_y) &= [B'_1(f_x, f_y) - B'_3(f_x, f_y)] + \\ &j[B'_2(f_x, f_y) - B'_4(f_x, f_y)] = \\ &2b\gamma \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \iint_s O(x, y) \cdot \\ &\exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \end{aligned} \quad (12)$$

最后可得基于离焦光源的傅里叶单像素成像方案,重建目标物体的图像表达式为:

$$\tilde{O}(x, y) = \frac{1}{2b\gamma} \cdot F^{-1}\{C'(f_x, f_y)\}, \quad (13)$$

式中, $\tilde{O}(x, y)$ 表示 $O(x, y)$ 的近似分布。由上式可以看出表征光源离焦程度的高斯函数半高宽对重建图像质量会造成影响,高斯函数半高宽越大,对图像的影响越大。

$$W(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

式中, σ 为高斯函数的半高宽,表征光源离焦程度。光源离焦后的傅里叶基底图案可以表示为:

$$\begin{aligned} P'_\varphi(x, y; f_x, f_y) &= \\ \iint_s \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2 + \nu^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \{a + b\cos[2\pi f_x(x - \mu) + \\ 2\pi f_y(y - \nu) + \varphi]\} d\mu d\nu &= \\ a + b \cdot \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2 + f_y^2)] \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y \\ + \varphi). \end{aligned} \quad (9)$$

若采用四步相移算法,则光源离焦后的傅里叶单像素基底图案可表示为:

3 离焦光源的傅里叶单像素成像实验结果

为了验证上述理论,下面实验研究离焦光源的傅里叶单像素成像。离焦光源的傅里叶单像素成像实验装置示意如图1所示,图2给出了相对应的实验装置图。在实验中,通过旋转数字光投影仪的离焦旋钮来改变离焦参量(对应理论中改变高斯函数的半高宽),达到对结构光源进行离焦的目的。首先利用计算机(computer)生成傅里叶基底图案控制数字光投影仪(digital light projector, Sony, VPL-EW575)产生结构调制光,即空间频率域条纹,然后离焦结构光经过43 cm传输后投射到一个反射式黑底白字物体(“光”字样, 64×64 pixel)上,在距离目标

物体 20 cm 处放置一个单像素探测器(single-pixel detector, Thorlabs, PDA100A2)用于采集目标物体被离焦结构光源照射后的反射光信号,然后将探测器采集到的信号传输至数据采集系统(data acquisition system, 包括接线盒(NI BNC-2110)和数据采集卡(NI PCIe-6251))以在计算机进行数据处理,最后利用测量的数据并结合四步相移算法进行物体图像的重建。

利用上述实验装置,实验中先实现了非离焦光源的傅里叶单像素成像,实验结果如图 3(a)所示,然后旋转数字光投影仪的离焦旋钮改变离焦参量,图 3(b1)~(b10)是光源离焦参量分别为 1—6, 8, 10, 12, 14 时重建得到的物体图像。本文用 $PR_{SN}^{[17]}$ 来评定重建图像的质量,图 4 给出了重建图像的 PR_{SN} 随光源离焦参量的变化。由图 3 和图 4 可以看出:随着光源离焦参量的增大即光源离焦程度加深,重建图像的 PR_{SN} 逐渐下降,即成像质量变差。

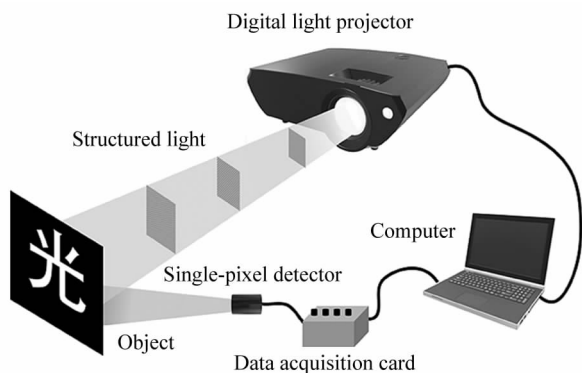


图 1 离焦光源的傅里叶单像素成像装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Fourier single-pixel imaging with defocused light source

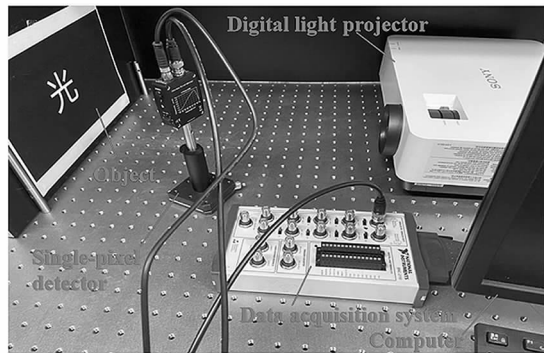


图 2 离焦光源的傅里叶单像素成像实验装置图

Fig. 2 Experimental set-up of Fourier single-pixel imaging with defocused light source

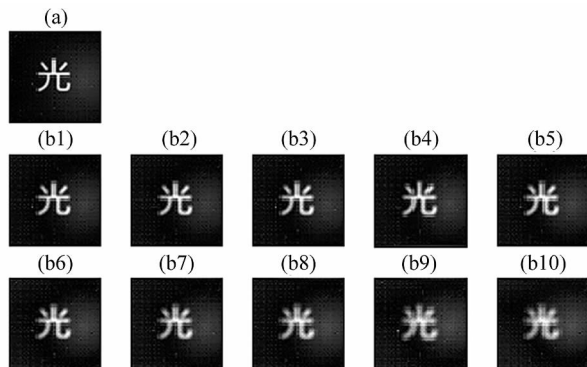


图 3 (a) 非离焦光源的傅里叶单像素成像结果;
(b1)~(b10) 光源离焦参量分别为 1—6, 8, 10, 12, 14
条件下得到的成像结果

Fig. 3 (a) Results of Fourier single-pixel imaging with focus light source; (b1)~(b10) Images of object obtained under the different defocusing parameters of 1—6, 8, 10, 12, 14, respectively

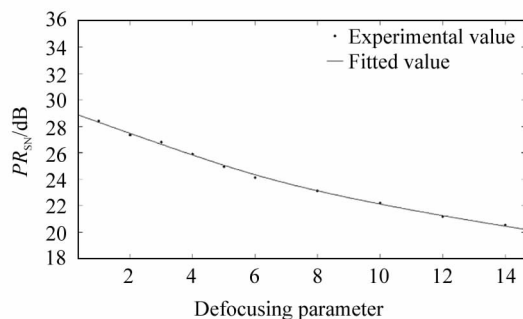


图 4 重建图像的 PR_{SN} 随离焦参量的变化关系

Fig. 4 The PR_{SN} of reconstructed images changes with the defocusing parameter

4 自适应优化策略

为优化离焦图像,本文探索实现一种自适应优化策略。在传统的图像处理中常用自适应滤波^[18]和盲去卷积^[19]进行图像优化处理。自适应滤波就是利用前一时刻获得的滤波器参量来自动调节当前时刻的滤波器参量以适应信号或噪声随时间变化的统计特性,实现最佳滤波,适用于实时处理。通常情况下,图像复原需要的成像系统的点扩散函数是未知的,给图像复原造成了很大的困难。当点扩散函数未知时,盲去卷积算法能够有效地进行图像复原,它是以最大似然估计为基础的一种方法图像复原方法,最大似然估计是一种能对被随机噪声干扰的量进行估计的优化策略。笔者分别使用自适应滤波和盲去卷积的优化策略对离焦图像进行优化并得到 PR_{SN} , 随后通过分析 PR_{SN} , 发现融合自适应滤波和盲去卷积的优化策略更适合优化图像

质量。

图 5(a1)是非离焦光源下的傅里叶单像素成像结果,(c1)一(c10)分别是图 3(b1)一(b10)优化后的傅里叶单像素成像的结果。优化后图像的 PR_{SN} 与离焦参数的关系如图 6 所示,由图 6 可以看出优化后的图像 PR_{SN} 提高了 1.4—4.0 dB。表 1 给出了优化图像复原算法的掩膜尺寸对比随离焦图像 PR_{SN} 的变化规律,其中 T_m 是优化算法的掩膜尺寸,表示优化窗口的大小为 $m \times m$ 的矩阵。表 1 证明了优化算法选择掩膜尺寸与离焦图像 PR_{SN} 成反向关系,即随着离焦图像的 PR_{SN} 逐渐减小,优化算法的掩膜尺寸逐渐增大。本文在对离焦光源的傅里叶单像素成像进行图像优化时,通过分析 PR_{SN} ,执行了一种简单的优化策略,即融合自适应滤波和盲去卷积优化离焦图像的策略,其中优化算法的掩膜尺寸可以根据离焦图像的 PR_{SN} 自适应地选择。需要指出的是本文融合自适应滤波和盲去卷积的优化策略与前期文章报道的深度学习优化策略^[15]不同,侧重于根据离焦模糊图像自适应选择优化模板的尺寸,而深度学习优化策略侧重于离焦模糊数据的训练与优化。

5 结 论

本文首先在理论上利用二维高斯函数建立光源离焦模型,分析了离焦光源的傅里叶单像素成像,然后在实验上探究了不同离焦条件下的傅里叶单像素成像,并得到了离焦光源条件下重建图像的 PR_{SN} ,结果表明:随着光源离焦参数的增大,物体重建图像

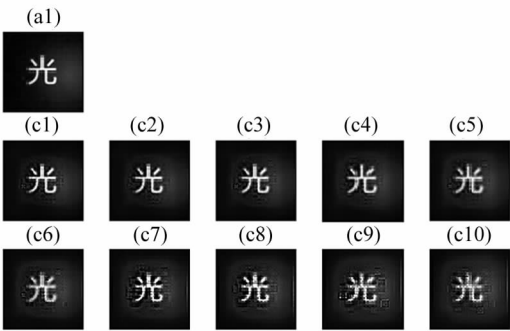


图 5 (a1) 非离焦光源的傅里叶单像素成像结果; (c1)一(c10) 图 3(b1)一(b10)分别优化后的傅里叶单像素成像的结果

Fig. 5 (a1) Result of Fourier single-pixel imaging with focused light source; (c1)–(c10) Optimized Fourier single-pixel imaging results of Fig. 3 (b1)–(b10), respectively

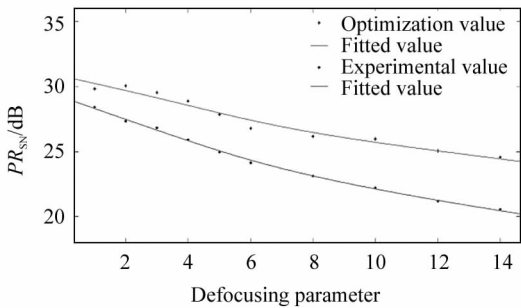


图 6 优化后的图像 PR_{SN} 随离焦参数的变化关系
Fig. 6 The PR_{SN} of optimized images changes with the defocusing parameter

表 1 离焦图像的 PR_{SN} 和优化算法的掩膜尺寸对比关系
Tab. 1 The PR_{SN} of defocused image vs mask size of optimization algorithm

PR_{SN}/dB	28.4	27.3	26.8	25.9	24.9	24.1	23.1	22.2	21.2	20.5
Mask size	T_{24}	T_{26}	T_{27}	T_{29}	T_{31}	T_{33}	T_{37}	T_{39}	T_{41}	T_{42}

质量越差。随后探索了一种融合自适应滤波和盲去卷积的自适应优化策略,实现对模糊图像的优化,可用于指导合理调控离焦参数实现高质量成像。这对于傅里叶单像素成像在复杂环境中的应用提供了参考。

参考文献:

[1] EDGAR M P, GIBSON G M, PADGETT M J. Principles and prospects for single-pixel imaging[J]. Nature Photonics, 2019, 13(1): 13-20.
[2] YE Z Y, QIU P H, WANG H B, et al. Image watermarking

and fusion based on Fourier single-pixel imaging with weighed light source[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36505-36523.
[3] GIBSON G M, JOHNSON S D, PADGETT M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28190-28208.
[4] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector[J]. Physical Review A, 2009, 79(5): 053840.
[5] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, et al. Differential ghost imaging[J]. Physical Review Letters, 2010, 104

- (25):253603.
- [6] SUN B Q, WELSH S S, EDGAR M P, et al. Normalized ghost imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [7] SUN B Q, EDGAR M P, BOWMAN R W, et al. 3D Computational imaging with single-pixel detectors[J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [8] ZHANG Z B, MA X, ZHONG J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6225.
- [9] HU X Y, ZHANG H, ZHAO Q, et al. Single-pixel phase imaging by Fourier spectrum sampling[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(5): 051102.
- [10] ZHANG C G, HAN B N, HE W Q, et al. A novel compressive optical encryption via single-pixel imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1-8.
- [11] STANTCHEV R I, YU X, BLU T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2535.
- [12] ZANOTTO L, PICCOLI R, DONG J L, et al. Single-pixel terahertz imaging: a review [J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(9): 200012.
- [13] LIU Y, SUO J L, ZHANG Y L, et al. Single-pixel phase and fluorescence microscope[J]. Optics Express, 2018, 26(25): 32451-32462.
- [14] XU B J, JIANG H Z, ZHAO H J, et al. Projector-defocusing rectification for Fourier single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 5501-5017.
- [15] RIZVI S, CAO J, HAO Q. Deep learning based projector defocus compensation in single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25134-25148.
- [16] FLUSSER J, FAROKHI S, HOSCHL C, et al. Recognition of images degraded by Gaussian blur[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(2): 790-806.
- [17] YANG X, JIANG P F, JIANG M F, et al. High imaging quality of Fourier single pixel imaging based on generative adversarial networks at low sampling rate[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 140: 106533.
- [18] KRSTAJIC B, STANKOVIC L, USKOKOVIC Z. Combined adaptive filter with lms-based algorithms[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2003, 57(4): 295-299.
- [19] AHMED A, DEMANET L. Leveraging diversity and sparsity in blind deconvolution[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(6): 3975-4000.

作者简介:

李洪国 (1981—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事信息光学、量子成像、关联成像等方面的研究。