



紧凑双光路单像素成像系统 (特邀)

廖兆琨 王汉 陈文 孙鸣捷

Compact dual optical path single-pixel imaging system (*Invited*)

Liao Zhaokun, Wang Han, Chen Wen, Sun Mingjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210723>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

傅里叶单像素成像技术与应用

Fourier single-pixel imaging techniques and applications

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603002–0603002(19) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603002>

单像素成像中的光信息编码与解码

Coding and decoding of optical information in single-pixel imaging

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603004–0603004(11) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603004>

单像素成像在特殊波段及三维成像的应用发展

Application and development of single pixel imaging in the special wavebands and 3D imaging

红外与激光工程. 2020, 49(3): 0303016–0303016–16 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0303016>

水平大气环境34 km单像素成像实验

Single-pixel imaging experiment through 34 km horizontal atmosphere

红外与激光工程. 2019, 48(9): 925002–0925002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0925002>

单像素成像及其在三维重建中的应用

Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603003–0603003(11) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603003>

单像素成像在三维测量中的应用

Application of single pixel imaging in 3D measurement

红外与激光工程. 2020, 49(3): 0303017–0303017–9 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0303017>

紧凑双光路单像素成像系统 (特邀)

廖兆琨, 王 汉, 陈 文, 孙鸣捷*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 不同于使用阵列探测器的常规数码相机, 单像素相机使用不具空间分辨能力的单像素探测器对目标进行成像。由于其工作波长覆盖广、灵敏度高, 单像素相机在特殊波段和弱光照明等特殊场景中较普通相机更有优势, 在遥感探测、显微成像、军事侦察等领域得到广泛应用。提出一种紧凑型单像素成像系统, 该系统利用数字微镜阵列的工作特性形成了对称的折叠双光路以快速完成差分测量。紧凑的结构降低了相机系统的体积, 使系统可采用标准尼康镜头作为成像透镜。系统具有双光路差分成像、双光路平均降噪、宽谱波段成像、双光路交替采样等多种模式, 并且可根据场景对重建图像信噪比、实时帧率、成像波段的不同需求切换应用模式。基于系统样机的实验结果表明其能实现预期的功能、达到相应的性能。紧凑型单像素成像系统的提出是一次较成功的单像素成像工程化尝试, 为单像素成像技术后续的实际应用奠定了较好的技术和工程基础。

关键词: 单像素成像; 单像素相机; 差分成像; 宽谱成像; 计算成像

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210723

Compact dual optical path single-pixel imaging system (*Invited*)

Liao Zhaokun, Wang Han, Chen Wen, Sun Mingjie*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Unlike conventional digital cameras that used array detectors, single-pixel cameras used single-pixel detectors without spatial resolution to image targets. Due to its wide operating wavelength coverage and high sensitivity, single-pixel cameras are more advantageous than ordinary cameras in special scenarios such as special wavelengths and low light illumination, and are widely used in remote sensing detection, microscopic imaging, military reconnaissance, and other fields. A compact single-pixel imaging system was proposed, which used the working characteristics of the digital micro-mirror array to form a symmetrical folded double optical path to quickly complete differential measurement. The compact structure reduced the size of the camera system and allowed the system to use a standard Nikon lens as the imaging lens. The system had various modes such as dual-optical differential imaging, dual-optical averaging noise reduction, broad-spectrum band imaging, and dual-optical alternate sampling, and the application modes could be switched according to the different needs of the scene for reconstructed image signal-to-noise ratio, real-time frame rate, and imaging band. The experimental results based on the system prototype showed that it could realize the expected functions and achieve the corresponding performance. The proposed compact single-pixel imaging system was a successful engineering attempt of single-pixel imaging, which laid a good technical and engineering foundation for the subsequent practical application of single-pixel imaging technology.

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61922011); 之江实验室公开课题 (2021MC0AB03)

作者简介: 廖兆琨, 男, 硕士生, 主要从事单像素成像方面的研究。

通讯作者: 孙鸣捷, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进光电成像方面的研究。

Key words: single-pixel imaging; single-pixel camera; differential measurement; broad spectrum imaging; computational imaging

0 引言

长期以来,图像获取技术一直是研究热点。从过去的胶片相机到现在的数码相机,本质上都是应用传统光学成像,通过光学透镜将目标物体成像至感光器件的工作面,由空间强度分布得到图像。目前的电荷耦合器件 (Charge-coupled Device, CCD) 和互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 等阵列式探测器已经能够捕获亿级像素的图像,但是在近红外、太赫兹等特殊波段,由于制作工艺复杂导致阵列探测器造价极其高昂。

单像素成像技术凭借单像素探测器灵敏度高、工作波长覆盖广的优势,能够低成本获取到特殊波段的图像。单像素成像起源于鬼成像,鬼成像将光源分为信号光路和参考光路。其中,用单像素探测器测量信号光路,得到目标物体的光强信息;用面阵探测器测量参考光路,得到光强的空间分布,对二者进行关联运算后重建出图像。1995年,史砚华小组^[1]首次用纠缠光源实现了鬼成像。2002年,Boyd等^[2]用经典光源完成了鬼成像实验,由于经典光源比纠缠光源更容易获取,因此大大推进了鬼成像技术的发展。2008年,Shapiro等^[3]提出计算鬼成像,用空间光调制器生成已知空间信息的散斑,从而省去了参考光路。由于计算鬼成像通常采用单像素探测器,因此也被称作单像素成像。但是在实际应用中,单像素成像图像重建质量差、测量次数庞大的问题还仍待解决。同年,美国 Rice 大学研制出一种结合压缩感知^[4-8]与单像素成像的单像素相机^[9],只需要远小于图像总像素个数的采样次数就可以重建出较为清晰的图像,极大地提升了成像速度。随后研究人员相继提出差分鬼成像^[10]、归一化鬼成像^[11]、数字微扫描^[12]等工作,大幅提升了重建图像的信噪比。

由于单像素探测器在特殊波段的天然优势,研究人员在红外成像^[13-16]、X射线成像^[17-19]、太赫兹成像^[20-23]等领域开展了广泛研究,展示了单像素成像的巨大潜力。

鉴于目前单像素成像系统中的空间光调制器基本采用数字微镜阵列 (Digital Micromirror Device,

DMD),并且只使用了调制后沿+12°方向出射的光路,而沿-12°方向出射的另一光路并没有得到有效利用^[24-25],导致系统整体能量利用率低下;同时,双光路单像素成像系统由于采集到的光强信息不完整、收集透镜不易放置,因此也没有得到应用。文中提出一种紧凑双光路单像素成像系统,利用数字微镜阵列的工作特性形成了对称的折叠双光路,紧凑化结构缩小系统的体积的同时也保证了光强信息的完整性,解决了双光路单像素成像系统在实际中难以搭建的问题,大大提高了系统的能量利用率。系统具有双光路差分成像、双光路平均降噪、宽谱成像、双光路交替采样等多种应用模式,并通过实物搭建和实验验证了系统的可行性。

1 紧凑双光路单像素成像系统

1.1 单像素成像基本原理

单像素成像技术通过空间光调制器调制光场产生掩膜图案,同时用一个不具空间分辨能力的单像素探测器收集光强。如果掩膜图案采用正交化的 Hadamard 矩阵^[26-29],则 N 次 (场景的总像素个数为 N) 测量后可以完美重建场景:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N P_i \cdot S_i \quad (1)$$

式中: I 表示重建的图像; P_i 表示 Hadamard 图案; S_i 表示单像素探测器收集的光强值。

1.2 系统基本结构

紧凑双光路单像素成像系统由镜头、DMD、平面反射镜、光束收集透镜、单像素探测器组成,如图 1(a) 所示。DMD 是一种二值调制器件,集成了数万个可独立控制的微反射镜。微反射镜根据控制信号沿其对角线方向进行 $\pm 12^\circ$ 翻转,分别对应 1 和 0 调制。Hadamard 矩阵是由 ± 1 元素组成的二值矩阵,由于 DMD 无法直接投影 Hadamard 矩阵,所以通常需要将 Hadamard 矩阵中-1 元素换成 0 元素,得到的掩膜图案称为正模式;同时将正模式中的元素互换,得到的掩膜图案称为负模式^[30]。用正模式减去负模式就可以模拟 Hadamard 矩阵,同时还可以抑制环境噪

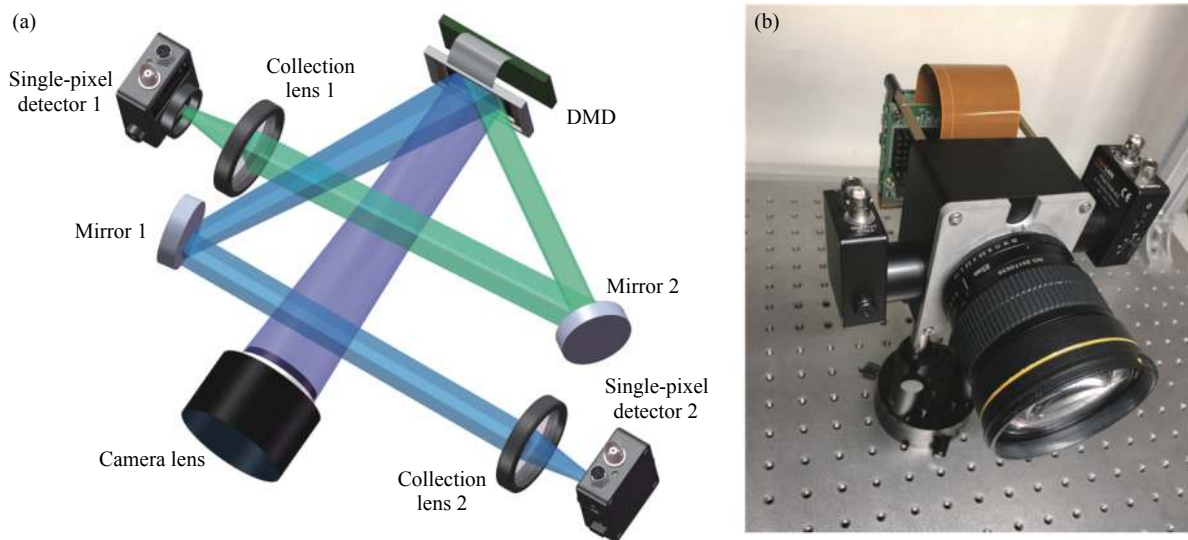


图 1 紧凑双光路单像素成像系统示意图。(a) 系统内部结构图; (b) 实物图

Fig.1 Schematic diagram of the compact dual optical path single-pixel imaging system. (a) Internal structure diagram of the camera; (b) Physical diagram

声^[31]。由于 DMD 调制产生两条光路并且二者对应的掩膜图案正好相反, 因此利用其互补特性设计了双光路单像素成像系统。

当系统工作时, 带有场景信息的光束经过镜头成像在 DMD 工作面上; DMD 调制光束并将其分为两路, 分别沿±12°两个方向出射; 光束依次经过平面反射镜、光束收集透镜, 最后由单像素探测器接收。

为保证系统的可拓展性和通用性, 按照 Nikon 标准镜头法兰距, 相机法兰距设定为 46.5 mm。同时, 系统可根据应用场景需求随时替换不同波长的探测器。系统整体尺寸为 78 mm×49.91 mm×90 mm, 紧凑化的结构设计提高了空间利用率; 同时, 双光路设计提高了成像系统的能量利用率。

2 实验结果

搭建好的成像系统实物图如图 1(b) 所示, 前端装配镜头 (Nikon AF 85 mm); 左右两侧通过透镜套筒分别连接单像素探测器 1(Thorlabs PDA 100A-EC, 工作波长 340~1 100 nm) 和探测器 2(Thorlabs PDA 50B-2, 工作波长 800~1 800 nm); 套筒内放置光束收集透镜; 后端安装 DMD 及其控制装置 (Vialux, V-7000, 刷新速率 22 kHz); 内部沿 DMD 调制的±12°出射方向分别安装平面反射镜; 数据采集装置采用高速采集卡 NI USB-6361 (采样率 500 kSPS)。

2.1 双光路差分成像

传统单光路差分成像^[10,31]通过 DMD 连续投影两组相反的 Hadamard 图案实现差分测量, 可有效提高重建的信噪比, 但是会增加一倍的采样次数, 限制了实时帧率。

双光路差分成像只用一次投影即可获取差分信号, 无需增加额外的采样次数。当系统应用双光路差分成像模式时, 需更换为两个相同型号的探测器, 并对探测器进行标定, 以保证二者增益一致。探测器 1 收集沿 DMD+12°方向出射光束的光强, 探测器 2 收集沿 DMD-12°方向出射光束的光强, 则图像可重建为:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N P_i \cdot (S_i - \bar{S}_i) \quad (2)$$

式中: I 表示重建的图像; P_i 表示当前投影的 Hadamard 图案; S_i 表示探测器 1 收集的光强值, \bar{S}_i 表示探测器 2 收集的光强值。

文中采用以下公式计算信噪比^[32-33] (Signal-Noise Ratio, SNR):

$$SNR = \frac{\langle I_f \rangle - \langle I_b \rangle}{\frac{\sigma_f + \sigma_b}{2}} \quad (3)$$

式中: $\langle I_f \rangle$ 表示图像中的特征区域的测量信号平均值 (此处用图 2 中红色虚线内的白色区域计算); $\langle I_b \rangle$ 是图像中背景部分的测量信号平均值 (此处用图 2 中蓝色

虚线内的黑色区域计算); σ_f 和 σ_b 分别是图像特征与背景的测量信号强度标准差^[34]。

实验结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 非差分单像素成像的 SNR 为 13.45, 光源波动噪声较为明显; 双光路差分成像 SNR 为 72.33, 抑制了大部分噪声后重建质量显著提高; 对于 64×64 pixel 的场景, 单光路差分

成像模式下的帧率为 2.6 fps, 非差分成像和双光路差分成像模式下的帧率为 5.2 fps。可见, 双光路差分成像利用差分测量抑制噪声从而提高图像信噪比, 同时没有增加额外的采样次数, 能够保持与非差分成像相同的帧率。

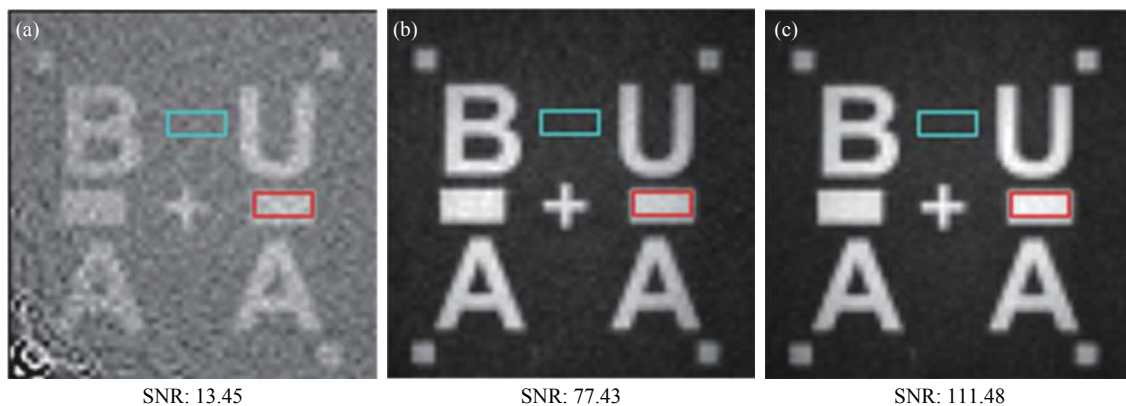


图 2 不同模式下重建图像的信噪比 (64×64 pixel 上采样到 128×128 pixel)。 (a) 非差分成像; (b) 双光路差分成像; (c) 双光路平均降噪
Fig.2 The signal-to-noise ratio of the reconstructed image in different modes (64×64 pixel up-sampled to 128×128 pixel). (a) Non-differential imaging; (b) Dual optical path differential imaging; (c) Dual optical path average noise reduction

2.2 双光路平均降噪

系统可通过双光路平均降噪模式来提高图像的重建质量。单像素重建的图像可表示为无噪声图像和加性噪声的叠加:

$$I(x,y) = o(x,y) + \beta(x,y) \quad (4)$$

式中: $I(x,y)$ 表示重建的图像; $o(x,y)$ 表示无噪声图像; $\beta(x,y)$ 表示加性噪声。则对 M 幅重建的图像进行平均操作后满足:

$$\bar{I}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i(x,y) \quad (5)$$

$$E\{\bar{I}(x,y)\} = o(x,y) \quad (6)$$

$$\sigma_{\bar{I}(x,y)}^2 = \frac{1}{M} \sigma_{\beta(x,y)}^2 \quad (7)$$

式中: $\bar{I}(x,y)$ 是平均操作后的图像; $E\{\bar{I}(x,y)\}$ 表示平均图像 $\bar{I}(x,y)$ 的期望值; $\sigma_{\bar{I}(x,y)}^2$ 和 $\sigma_{\beta(x,y)}^2$ 分别是 $\bar{I}(x,y)$ 和 $\beta(x,y)$ 在点 (x,y) 的方差。

公式 (6)、(7) 表明噪声会随着 M 增加而减小^[35]。双光路平均降噪模式利用上述特点, 将探测器 1 和探

测器 2 所在光路独立重建的图像取平均值来降低噪声。

该实验中用双光路独立差分成像的结果取平均值, 如图 2(c) 所示。经计算, SNR 为 111.48, 相比于图 2(b) 差分重建的图像, 信噪比得到明显改善。在不追求高帧率的情况下, 例如当场景静止时, 采用双光路平均降噪模式可以进一步提高成像的重建质量以便获取更多目标物体的细节。

2.3 宽谱波段成像

系统可实现对可见光和特殊波段同时成像。在本实验中光源采用白炽灯(宽光谱光源), 探测器 1 使用 Thorlabs PDA 100A-EC, 所在光路对可见光成像, 由于其工作波长与近红外有部分重叠, 因此在该探测器套筒端加近红外吸收型中性密度滤光片以屏蔽近红外光。探测器 2 使用 Thorlabs PDA 50B-2, 所在光路对近红外成像。并事先在字母 U 处涂一层红外油墨(透过波长 900~1 100 nm, 透过率约 85%) 达到屏蔽可见光和透过近红外光的效果。

实验结果如图 3(a) 所示, 可以观察到近红外波段

重建的图像中油墨涂层下的字母 U, 而可见光波段重建的图像则不能, 验证了系统在宽谱波段光源照明下对可见光和近红外同时成像的性能。除此以外, 系统

仍适用于其他特殊波段 (紫外、太赫兹等波段), 只需更换为相应工作波长的探测器, 突破了现有阵列探测器高成本的限制。

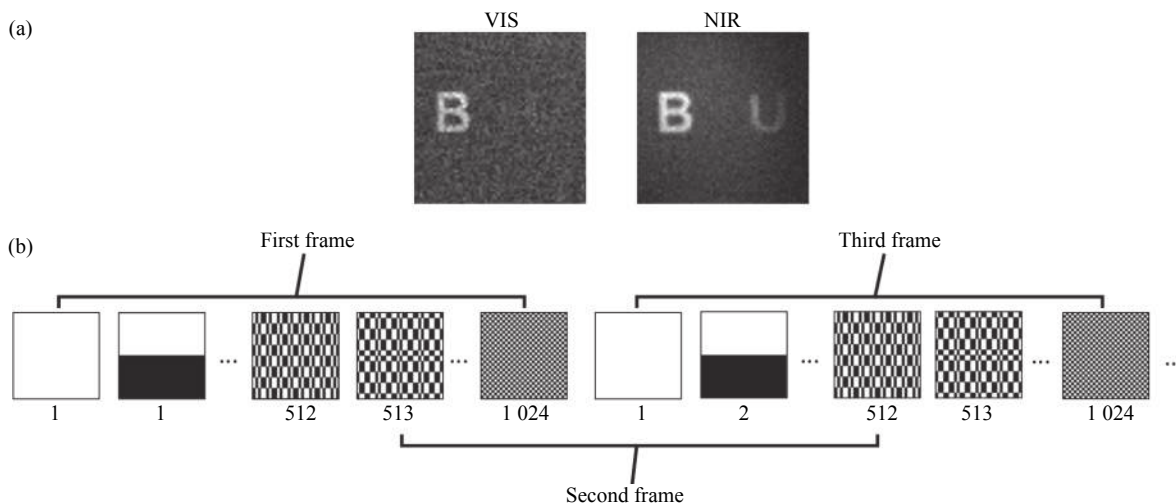


图 3 (a) 可见光和近红外同时成像 (64×64 pixel 上采样到 128×128 pixel); (b) 双光路交替采样示意图 (32×32 pixel)

Fig.3 (a) Simultaneous imaging of visible light and near-infrared (64×64 pixel up-sampling to 128×128 pixel); (b) Two-light path alternate sampling schematic diagram (32×32 pixel)

2.4 双光路交替采样

系统可通过双光路交替采样来提高实时帧率。双光路交替采样是指单像素探测器 1 所在光路从第 1 个掩膜图案投影开始测量, 到第 n 个掩膜图案投影结束后完成一次单像素成像, 显示一帧图像; 而探测器 2 所在光路从第 $n/2+1$ 个掩膜图案投影开始测量, 到下一组第 $n/2$ 个掩膜图案投影结束后完成一次单像素成像, 显示一帧图像, 按此规律交替采样, 如图 3(b) 所示。以 32×32 pixel 图像为例, 从第一组 Hadamard 图案投影开始, 每完成 512 次测量, 就进行重建图像并刷新帧。

实验表明, 对于 32×32 pixel 的场景单光路差分成像模式下的帧率为 10 fps, 而在该模式下差分成像的帧率为 20 fps, 帧率提升了一倍。在追求高帧率而目标细节可忽略的情况下, 采用双光路交替采样模式进行非差分成像可进一步提升实时帧率至 40 fps, 在无人驾驶、目标跟踪等场景能够发挥出重要作用。

3 结 论

紧凑双光路单像素成像系统解决了双光路单像素成像系统在实际中难以搭建的问题, 使得 DMD 调

制产生的两路光束都得到有效利用, 提高了单像素成像系统的能量利用率和成像速率。系统可根据实际需求切换应用模式: 双光路差分成像模式下不需要增加额外的测量次数即可实现差分成像; 双光路平均降噪可提高重建图像的信噪比; 宽谱波段成像模式下可同时对可见光和非可见光成像, 能够应用于医疗诊断、安防、工业检测等领域; 双光路交替采样模式下可有效提升系统的实时帧率。

此外, 该系统还具有以下的潜力:

(1) 在成像速度方面, 可通过降低采样率来加快成像速度。应用传统的压缩感知理论重建图像耗时长, 而进化压缩感知^[13,36]基于前一帧的先验知识, 计算耗时短, 更适合实时成像^[37]。例如, 在不追求图像细节的情况下, 采用 25% 压缩率的进化压缩感知可使帧率提升 4 倍;

(2) 在信息获取效率方面, 可应用仿生人眼单像素成像理论^[31]。用模拟人眼视锥细胞分布的掩膜图案进行单像素成像, 能够提高感兴趣目标所在区域的分辨率 (目标以外区域的分辨率会降低);

(3) 在提升信噪比方面, 可通过对实验光源进行预标定^[34], 来降低光源不均匀性对单像素成像对比度

和动态范围的影响。

参考文献:

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429.
- [2] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-Photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [3] Shapiro J H. Computational ghost imaging [C]// Conference on Lasers & Electro-optics, 2008: 061802.
- [4] Candès E, Romberg J. Sparsity and incoherence in compressive sampling [J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969-985.
- [5] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [6] Baraniuk R G. Compressive sensing [lecture notes] [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-120.
- [7] Candès E J. Compressive sampling [C]// Proceedings of the 2006 International Congress of Mathematicians, 2006: 1433-1452.
- [8] Llull P, Liao X, Yuan X, et al. Coded aperture compressive temporal imaging [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10526-10545.
- [9] Duarte M F, Davenport M A, D Takhar, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [10] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [11] Sun B, Welsh S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [12] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10476.
- [13] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 745-755.
- [14] Gibson G M, Sun B Q, Edgar M P, et al. Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera [J]. *Optics Express*, 2017, 24(10): 62-66.
- [15] Liu S, Yao X R, Liu X F, et al. Pile-up effect in an infrared single-pixel compressive LiDAR system [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22138-22146.
- [16] Sun B Q, Jiang S, Ma Y Y, et al. Application development of single-pixel imaging in special wavebands and 3D imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303016. (in Chinese)
- [17] Klein Y, Schori A, Dolbnya I P, et al. X-ray computational ghost imaging with single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3284-3293.
- [18] He Y H, Zhang A X, Li M F, et al. High-resolution sub-sampling incoherent x-ray imaging with a single-pixel detector [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(5): 056102.
- [19] Yu H, Lu R, Han S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [20] 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.
- [21] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [22] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Non-invasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single pixel detector [J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [23] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, et al. Research on terahertz active correlation imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 280-287. (in Chinese)
- [24] Cheng T, Li Z W, Wang J L, et al. Single-pixel camera imaging system using compressed sensing theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530. (in Chinese)
- [25] Peng J Y, Jing H Q, Shi J H, et al. High-speed single-pixel camera data acquisition system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 837-843. (in Chinese)
- [26] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: A brief review [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 732.
- [27] Li M F, Kan B X, Huo J, et al. Single-pixel imaging experiment through 34 km horizontal atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0925002. (in Chinese)
- [28] Lochocki B, Gambín A, Manzanera S, et al. Single pixel camera ophthalmoscope [J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1056-1059.
- [29] Sun B Q, Wang Y P. Time-domain ghost imaging and its application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1212001. (in Chinese)
- [30] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.
- [31] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): 1601782.

- [32] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 355-359.
- [33] Schechner Y, Nayar S K, Belhumeur P N. Multiplexing for optimal lighting [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, 29(8): 1339-1354.
- [34] Yan S M, Sun M J, Chen W, et al. Illumination calibration for computational ghost imaging [J]. *Photonics*, 2021, 8(2): 59.
- [35] Kohler R J, Howell H K. Photographic image enhancement by superposition of multiple images [J]. *Photogr Sci Eng*, 1963, 7(4): 241-245.
- [36] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [37] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A russian dolls ordering of the hadamard basis for compressive single-pixel imaging [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.