

# 基于压缩感知的单光子时间分辨成像光谱技术

刘番<sup>1,3†</sup>, 姚旭日<sup>1,2\*†</sup>, 刘雪峰<sup>1,3\*\*</sup>, 翟光杰<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>北京理工大学物理学院, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 压缩感知成像可突破 Nyquist 采样定理限制实现亚采样成像, 同时还具备降维探测和高通量采集的优势。介绍压缩感知理论在单光子成像和成像光谱方面的研究进展, 详细分析压缩感知单光子成像光谱技术。讨论压缩感知时间分辨成像中堆积效应的影响和去除方法, 并对压缩感知在单光子时间分辨成像光谱领域的应用进行概述。

**关键词** 成像系统; 计算成像; 压缩感知; 单光子; 成像光谱; 时间分辨

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011016

## Single-Photon Time-Resolved Imaging Spectroscopy Based on Compressed Sensing

Liu Fan<sup>1,3†</sup>, Yao Xuri<sup>1,2\*†</sup>, Liu Xuefeng<sup>1,3\*\*</sup>, Zhai Guangjie<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Compressed sensing imaging can break through the limitation of Nyquist sampling theorem and realize sub sampling imaging, and has the advantages of dimension-reducing detection and high-throughput acquisition. In this paper, we reviewed the research progresses of compressed sensing theory in single-photon imaging and imaging spectra and analyzed compressed sensing single-photon imaging spectroscopy in detail. The influence and removal methods of pile-up effects in compressed sensing time-resolved imaging was discussed. The application of compressed sensing in the field of single-photon time-resolved imaging spectroscopy was summarized.

**Key words** imaging systems; computational imaging; compressed sensing; single-photon; imaging spectrum; time resolution

**OCIS codes** 110.1758; 110.3010; 300.6500; 100.6890

## 1 引言

压缩感知(CS)是近年来由数学家 Donoho 等提出的一种采样理论<sup>[1-2]</sup>, 它证明信号在满足稀疏或在某一变换域内稀疏要求的前提下, 仅对信号进行少量的采样后, 可通过重建算法完美恢复原始信号, 基于这一优越性, 压缩感知理论在众多领域引起了极

大的关注<sup>[3-6]</sup>。Baraniuk 等<sup>[7-9]</sup>利用压缩感知理论实现单像素成像, 即在利用一个点探测器的情况下, 通过空间光调制和压缩感知重建实现亚采样成像。单像素成像技术降低了光学成像对阵列探测器的需求, 特别适用于阵列探测器难以获取或性能有限的成像领域, 例如单光子成像领域。单像素相机的一个优势在于对成像目标进行探测时, 所有光信号均

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504302)

\* E-mail: yaoxuri@bit.edu.cn; \*\* E-mail: liuxuefeng@nssc.ac.cn

† 共同第一作者

集中在一个像素点上,具有降维探测和集中能量的特点,因此适合于对多维信息进行压缩探测的领域。

成像光谱获取目标空间强度分布和光谱三维信息,也被称为光谱成像,被广泛应用于医学<sup>[10-13]</sup>、天文学<sup>[14-16]</sup>、化学<sup>[17-20]</sup>等各领域。传统成像光谱技术通常需要在—个维度上进行扫描测量,存在不稳定性大及时间复杂度高等问题,同时因光强信号被大量分配,对探测器灵敏度提出了较高的要求。利用压缩感知单像素相机实现的单光子成像光谱,可利用高灵敏度单点光子探测器对三维成像光谱信息进行高效获取,降低了对探测器件的要求,同时提升了探测效率<sup>[21]</sup>。在单光子成像光谱的基础上融合光子时间分辨测量技术,可实现单光子灵敏度的时间分辨成像光谱获取,可为生物荧光探测<sup>[22-23]</sup>、医疗诊断<sup>[24-25]</sup>、材料分析<sup>[26]</sup>等领域提供一种有力的多维信息获取手段。

本文主要对本课题组在单光子时间分辨成像光谱方向的研究进展进行介绍。首先介绍基于压缩感知的单光子成像的提升灵敏度优势,并基于该优势发展了基于压缩感知的光谱测量与成像光谱技术;研究压缩感知成像光谱中光谱-成像分辨率之间的关联,提出一种同时满足二者分辨率最优的方法;最后介绍压缩感知时间分辨成像和压缩感知单光子时间分辨成像光谱技术。

## 2 单光子与压缩感知

### 2.1 单光子探测

光子作为光的最小能量单位,其量级仅约为  $10^{-19}$  J,对探测器的灵敏度提出了极高的要求。具有高灵敏、高时间分辨率特点的单光子探测器器件目前主要以单点探测器为主,如光电倍增管(PMT)、盖革模式雪崩二极管(GM-APD)和超导单光子探测器等。目前面阵单光子探测器器件像元数有限且价格昂贵,近红外波段等阵列单光子探测器存在禁运等问题,给单光子探测与成像研究带来了很大难度。基于压缩感知的单像素相机利用单点探测器可实现高效的面阵成像,为单光子探测与成像提供一种实现途径。

### 2.2 压缩感知理论

压缩感知理论证明,对稀疏信号进行亚采样后,可通过一系列恢复算法完美重建出原始信号。该理论打破了 Nyquist 采样定律中对采样率的约束,减少了精确恢复原始信号所需的采样数。

有别于传统测量方法,基于压缩感知的测量并非直接对原始信号进行测量,而是采用符合受限等距性质(RIP)的测量矩阵  $\mathbf{A}$  对稀疏的原始信号( $N$  维列向

量  $\mathbf{x}$ )进行  $M$  次测量,其中  $M \ll N$ ,将  $M$  个测量值组成列向量  $\mathbf{y}$ ,最终通过列向量  $\mathbf{y}$  与测量矩阵  $\mathbf{A}$  反演出原始信号。测量过程可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{e}$  为测量中的噪声。如信号不稀疏,存在稀疏变换域  $\Psi$ ,压缩感知可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\Psi\mathbf{x}' + \mathbf{e}, \quad (2)$$

式中:  $\Psi\mathbf{x}'$  为信号  $\mathbf{x}'$  的稀疏表示。

(2)式属于欠定方程,通常存在无穷尽解,压缩感知通过求解凸优化问题精确重建原始信号。凸优化问题的表达式为

$$\min_{\mathbf{x}'} \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\Psi\mathbf{x}'\|_2^2 + \tau \|\mathbf{x}'\|_1, \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为可调参数。可利用全变分(TVAL3)<sup>[27]</sup>、基追踪去噪(BPDN)<sup>[28]</sup>、正交匹配追踪(OMP)<sup>[29]</sup>等算法对(3)式优化问题进行求解。

## 3 压缩感知单光子成像

在弱光信号探测中,由于缺乏阵列单光子探测器,传统单光子成像往往采用点探测器扫描的成像方式。扫描成像方式不仅增加系统不稳定性、降低成像速度,而且成像灵敏度受到探测器暗噪声(即单光子探测器暗计数)限制,当目标像素光子水平低于探测器暗计数时,光子信号将淹没在暗噪声中无法获得。为解决以上问题,可将压缩感知与单光子成像相结合<sup>[30-31]</sup>。基于压缩感知的单光子成像光路如图 1 所示。

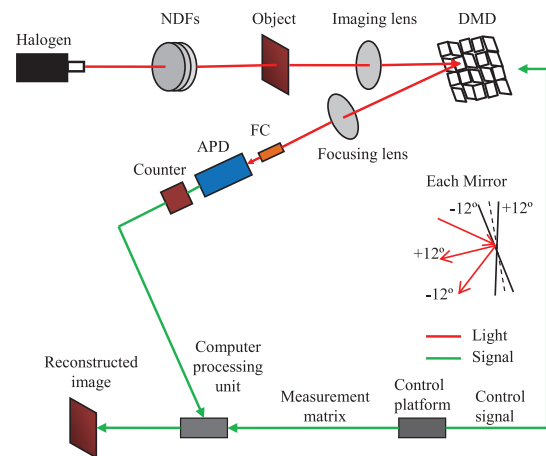


图 1 压缩感知单光子成像实验装置图<sup>[30]</sup>

Fig. 1 Experimental setup for single-photon imaging with compressive sensing<sup>[30]</sup>

入射光经衰减片组(NDFs)产生光子水平信号,信号照射到成像物体,成像物体透射光经透镜成像至数字微镜器件(DMD)上。DMD 由大量微反射镜组成(分辨率最高可达  $1920 \times 1080$ ),每个微镜可根据加

载的 0-1 调制矩阵分别进行 +12° 或 -12° 的翻转, 实现空间光调制功能。利用单点单光子探测器 (APD) 收集 DMD 反射到 +12° 方向上的所有光子, 并对 APD 输出脉冲进行计数得到总光子数, 即可通过压缩感知重建算法得到成像物体图像。该成像系统中, 成像分辨率由 DMD 提供的空间调制分辨率决定, 因此仅利用单点 APD 即可实现高分辨率单光子成像, 解决了阵列探测器对单光子成像的制约。

在压缩感知成像系统中, 0-1 随机矩阵不能严格满足 RIP 准则, 因而会导致成像质量较差, 为了实现 ±1 随机矩阵调制, 从而满足 RIP 准则, 需要在压缩感知单光子成像中引入互补测量技术。基于互补测量的压缩感知成像系统可被描述为

$$y_1 = Ax + e_1, \quad (4)$$

$$y_2 = (I - A)x + e_2. \quad (5)$$

联立 (4) 和 (5) 式, 可得到测量矩阵为 ±1 随机分布的压缩感知成像系统:

$$y_1 - y_2 = (2A - I)x + (e_1 - e_2). \quad (6)$$

在光子计数成像中, 假设成像像素数为  $N'$ , 其中目标所占像素数为  $N_k$ , 目标每像素光子通量为  $P$ , 单光子探测器暗噪声为  $P_d$ , 在固定的成像时间  $T$  内, 进行  $M$  组互补测量, 则通过理论计算, 可得基于互补测量的压缩感知单光子成像系统的信噪比  $R_{SN1}$  为

$$R_{SN1} = \frac{1}{C_{N'}} \sqrt{\frac{PT}{2M} \cdot \frac{1}{\left(\frac{N_k}{N'} + \frac{2P_d}{N'P}\right)}}, \quad (7)$$

式中:  $C_{N'}$  为与压缩感知重建算法相关的常数。当目标像素数足够大时, 由于单光子探测器上的总光通量  $N'P/2$  远大于暗噪声  $P_d$ , 信噪比可被简写为

$$R_{SN1} = \frac{1}{C_{N'}} \sqrt{\frac{P_{n1}}{k}}, \quad (8)$$

式中:  $P_{n1}$  为每次测量每像素的光子数, 可定义为有效光子数; 图像的稀疏性  $k = N_k/N'$ 。类似的, 计算可得基于传统点扫描的单光子成像信噪比  $R_{SN2}$  为

$$R_{SN2} = \sqrt{\frac{P_{n2}}{k} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{k} \frac{P_d}{P}}}. \quad (9)$$

对比 (8) 与 (9) 式可看出, 当光通量  $P$  和  $P_{n1}$  相近或者小于  $P_d$  时, 扫描成像的信噪比小于压缩感知成像的信噪比, 且随着光通量  $P$  的减小, 该现象愈加显著。该现象的物理本质在于, 点扫描成像时每次仅探测目标上单个像素的光子, 而压缩感知成像中点探测器测量图像经随机调制后的所有光子, 光子数约为目标全部光信号的 1/2, 远超单个像素上的光子数。因

此, 压缩感知成像提供了一种高通量的探测方式, 使探测器暗噪声对成像的影响几乎可以忽略, 而将单光子成像灵敏度提高到散粒噪声水平。

本课题组通过实验验证了基于压缩感知的单光子成像在弱光环境下的优势, 以“光”字作为成像目标, 大小为  $64 \times 64$  像素。分别使用 0-1 随机矩阵与 ±1 互补矩阵对图像进行调制, 对成像结果与基于扫描成像的结果进行对比, 结果如图 2 所示。在光

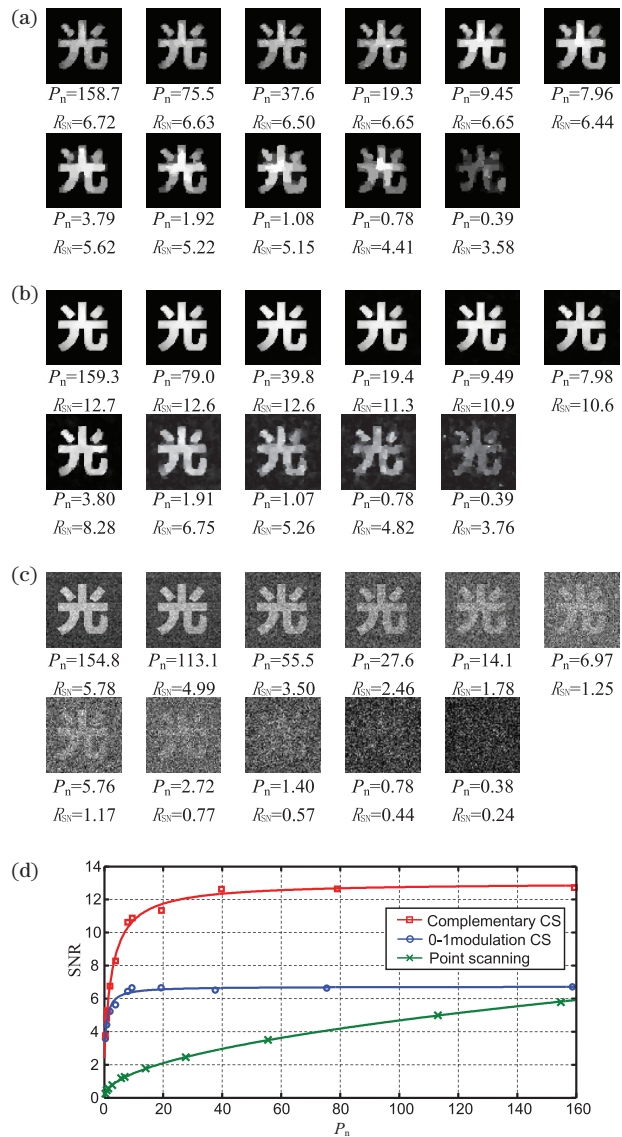


图 2 基于压缩感知的单光子成像实验结果。(a) 基于 0-1 矩阵的压缩成像结果; (b) 基于互补矩阵的压缩成像结果; (c) 基于点扫描的成像结果; (d) 单光子成像信噪比与有效光子数的关系<sup>[31]</sup>

Fig. 2 Experimental results of single-photon imaging based on compressed sensing. (a) Compressive imaging results based on 0-1 matrices; (b) compressive imaging results based on complementary matrices; (c) imaging results based on point scanning; (d) single-photon imaging SNR as functions of number of effective photons<sup>[31]</sup>

子低通量区域,压缩感知单光子成像信噪比远高于点扫描成像,以  $R_{SN} = 5$  为标准,0-1 调制和互补调制压缩感知成像所需光子数分别为  $P_n = 1.3$  及  $P_n = 0.9$ ,而点扫描成像需要的光子数为 114,压缩感知将成像灵敏度提高约 2 个数量级。

## 4 压缩感知单光子成像光谱

### 4.1 压缩感知光谱测量

借助压缩感知成像系统的架构,可将单光子成像扩展至光谱测量,实现一维光谱线的测量<sup>[32]</sup>。实验装置如图 3 所示,待测光经准直后被光栅分光,将 DMD 放置在透镜 L2 的焦平面上,使 DMD 上形成清晰的光谱线。DMD 以列为控制单元进行  $M$  次随机调制,达到对光谱中部分谱段进行随机采样的目的。通过光子计数型 PMT 对每次调制光谱总强度进行测量,得到由  $M$  个测量结果组成的列向量  $\mathbf{y}$ 。根据列向量  $\mathbf{y}$  与一维测量矩阵  $\mathbf{A}$ ,可通过压缩感知算法重建出光谱线。

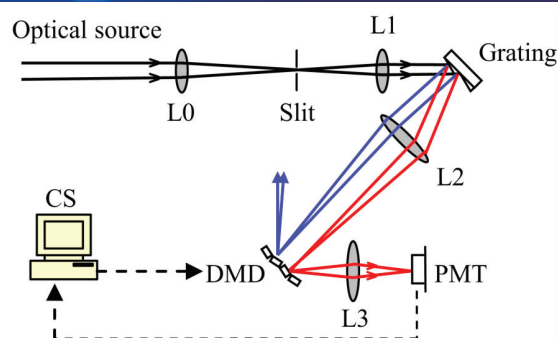


图 3 压缩感知光谱测量实验装置图<sup>[32]</sup>

Fig. 3 Experimental setup for spectral compressive sensing measurement<sup>[32]</sup>

课题组对比了非负矩阵、减均值处理及互补矩阵三种测量情况下的光谱重建质量,实验结果如图 4 所示。可以看出:利用非负矩阵测量重建的图像明显存在极大误差;通过对测量矩阵和测量值进行减均值处理,可以在一定程度上提升重建质量;而基于互补矩阵测量的重建结果更接近于原始光谱,重建质量最高。

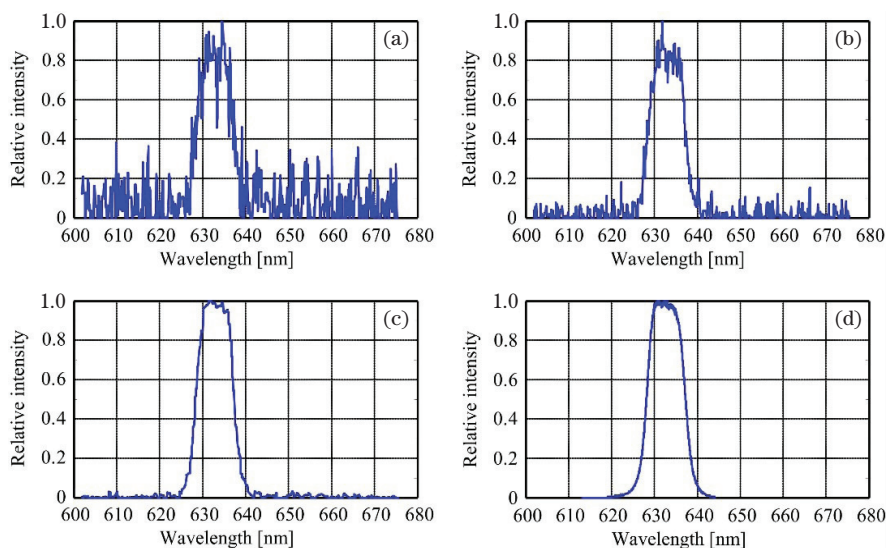


图 4 632.8 nm 波长的单色光在不同测量方案下的重建结果<sup>[32]</sup>。(a)非负矩阵测量;(b)减均值处理;(c)互补矩阵测量;(d)强光条件下 CCD 探测的原始光谱

Fig. 4 Reconstruction results for 632.8-nm wavelength monochromatic light under different measurement methods<sup>[32]</sup>. (a) Non-negative matrix measurement; (b) mean subtraction process; (c) complementary matrix measurement; (d) original spectrum detected by a CCD under strong light

### 4.2 基于光谱仪的压缩感知成像光谱

成像光谱技术同时获得目标的图像和光谱信息,即对目标不同光谱分别成像。由于光谱图像由空间二维信息与一维光谱信息构成,而目前现有的探测设备无法实现在三个维度的同时测量,存在探测器维度不足的问题。因此,传统的成像光谱技术往往通过基于点扫描的光谱测量来获取成像目标的

空间信息,这通常伴随着光谱仪的机械移动,降低了系统的稳定性和一致性。由于压缩感知理论可以降低对光电探测器维度的要求,即实现降维探测,本课题组将压缩感知成像与传统光谱测量相结合,运用压缩感知理论进行信号重建,实现了基于光谱仪的成像光谱<sup>[33-34]</sup>。实验装置如图 5 所示,与图 1 压缩感知单光子成像装置相比较,区别在于经 DMD 调

整的光信号不是由点探测器测量的,而是通过光纤准直器收集至光纤,并输入到一台商用光谱仪进行光谱测量。测量矩阵与光谱之间的线性关系可描述为

$$y(\lambda) = \mathbf{A}(\mathbf{x})t(\mathbf{x}, \lambda), \quad (10)$$

式中:  $t(\mathbf{x}, \lambda)$  为成像目标在空间坐标  $\mathbf{x}$  及波长  $\lambda$  处的传递函数。根据(10)式,利用任意波长位置  $\lambda_1$  处的测量结果与相应的 DMD 调制矩阵,即可由压缩感知重建得到  $\lambda_1$  处的目标图像,从而实现光谱成像。

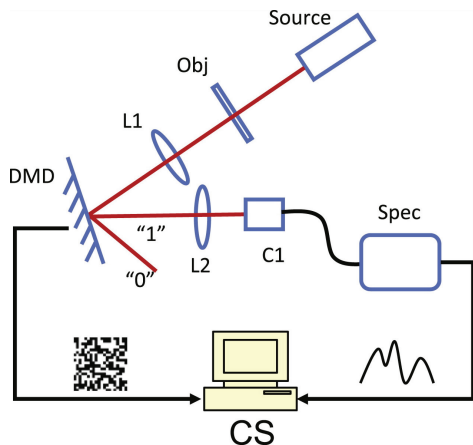


图 5 基于光谱仪的成像光谱实验装置图<sup>[33]</sup>

Fig. 5 Experimental setup of spectral imaging with a spectrometer<sup>[33]</sup>

图 6 为对连续全光谱成像目标——字母“X”的成像光谱结果,图像像素数为  $64 \times 64$ 。图 6(a) 为目标透射光谱曲线,图 6(b1)~(b7) 分别对应不同波长的成像结果,波长为  $500 \sim 800 \text{ nm}$ ,可以看出,不同波长所对应的重建结果都比较接近原始图像。若对光谱仪测量光谱曲线进行积分,得到总强度后进行压缩感知重建,则可得目标在全光谱范围的成像结果,如图 6(b8) 所示。根据图 6 可知,图像在不同波长下的重建图像的一致性良好。重建中噪声主要来源于压缩感知测量中的噪声,由于压缩感知成像系统具有较好的抗噪性,因此基于该系统的成像光谱鲁棒性较好。同时,根据压缩感知的亚采样特性,测量中的采样数为 1800,远小于图像像素数,与传统的空间扫描成像相比,测量时间明显减少。

#### 4.3 基于点探测的压缩感知单光子成像光谱

4.2 节利用 DMD 对目标空间信息进行压缩,将成像光谱三维测量压缩至一维测量。事实上,如通过双 DMD 级联的方式分别对目标空间信息和光谱信息进行压缩,可以进一步提高系统压缩效率,实现

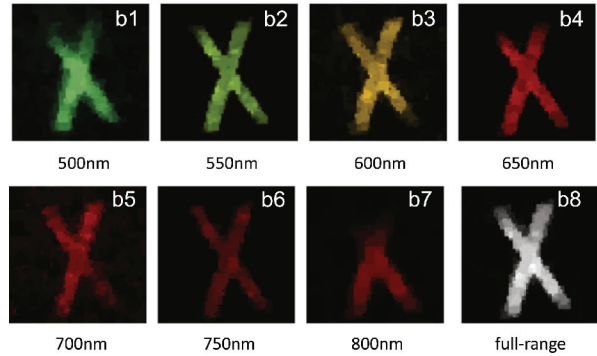
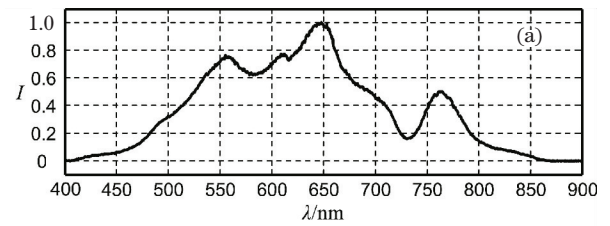


图 6 基于光谱仪的压缩感知成像光谱实验结果<sup>[33]</sup>。  
(a) 目标透射光谱; (b1)~(b7) 不同波长下的重建图像;  
(b8) 全光谱范围成像结果

Fig. 6 Spectral imaging results of compressive sensing based on a spectrometer<sup>[33]</sup>. (a) Transmission spectrum of the object; (b1)~(b7) reconstructed images under different wavelengths; (b8) imaging result under full-rangewavelength

基于点探测器的成像光谱探测<sup>[35]</sup>。该方案不仅可以进一步减少测量维度,有利于实现单光子水平光谱成像,而且这种基于点探测器的成像系统也提升了成像光谱的探测灵敏度。

基于点探测器的级联压缩感知成像光谱实验装置如图 7 所示,待测目标图像首先经过 DMD1 调制,此时经调制的光信号若通过压缩感知算法,可重建出具有空间信息的图像。为实现成像光谱信息的测量,在该基础上增加 DMD2,使其与光栅组合代替 4.2 节中的光谱仪。将 DMD1 调制后的光信号会聚焦直至光栅,从而分光形成光谱线,将 DMD2 放置于光谱线位置,对光谱线进行空间调制,最终利用光子计数型 PMT 收集调制光信号。DMD1 与 DMD2 工作时序如图 8 所示,  $m_1$  个随机矩阵  $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  依次加载至 DMD1 上,在 DMD1 的每个调制周期内,都将会有  $m_2$  个随机矩阵  $\mathbf{B}(\lambda)$  依次加载至 DMD2 上, PMT 对 DMD2 调制后的光信号进行收集,获取总光强。DMD1 的调制过程可描述为

$$\sum_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) T(\lambda, \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{S}(\lambda), \quad (11)$$

式中:  $T(\lambda, \mathbf{x}, \mathbf{y})$  为目标光谱图像;  $\mathbf{S}(\lambda)$  为经 DMD1 调制后由光栅分光得到的光谱线。DMD2 的调制过程可描述为

$$\sum_{\lambda} \mathbf{B}(\lambda) \mathbf{S}(\lambda) = \mathbf{I}, \quad (12)$$

式中:  $I$  为 PMT 检测到的总光子数。显然, 可根据总光强  $I$  与测量矩阵  $\mathbf{B}(\lambda)$ , 利用恢复算法重建光谱信息  $\mathbf{S}(\lambda)$ , 根据  $\mathbf{A}(x, y)$  与  $\mathbf{S}(\lambda)$  重建, 则可进一步获得目标光谱图像  $T(\lambda, x, y)$ 。

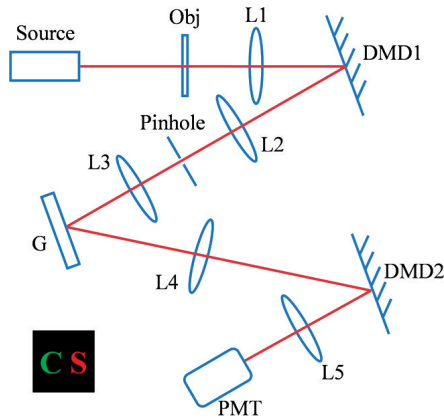


图 7 基于级联压缩感知的成像光谱系统实验装置图<sup>[35]</sup>  
Fig. 7 Experimental setup of spectral imaging system with dual compressed sensing<sup>[35]</sup>

利用印有绿色字母“C”与红色字母“S”的胶片进行实验验证, 目标空间分辨率为  $64 \times 64$ , 光谱覆

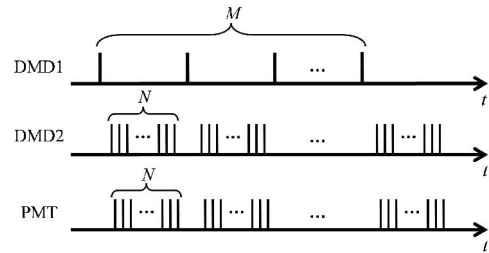


图 8 双 DMD 和 PMT 的工作时序图<sup>[35]</sup>

盖  $520 \sim 620 \text{ nm}$ , 光谱分辨率为 1024。DMD1 的调制次数  $m_1 = 1600$ , 在每次调制间隔内 DMD2 的调制次数  $m_2 = 400$ 。成像结果如图 9 所示。图 9(a) 为由 PMT 测量光子数与 DMD2 调制矩阵重建得到的部分光谱线, 横坐标为波长, 每一列则表示目标波长信号在 DMD1 多次调制下的强度变化, 目标“C”与“S”光谱范围对应的光谱线分别位于  $540 \text{ nm}$  与  $600 \text{ nm}$  位置。图 9(b1)~(b3) 展示不同波长下的光强变化。图 9(c1)~(c3) 为对应图 9(b) 曲线与 DMD1 测量矩阵重建得到的不同波长下的成像结果。根据成像结果可以看出, 基于级联压缩感知的成像光谱系统在重建不同波长图像时, 并没有其他光谱成分的干扰, 展示了很好的光谱分辨能力。

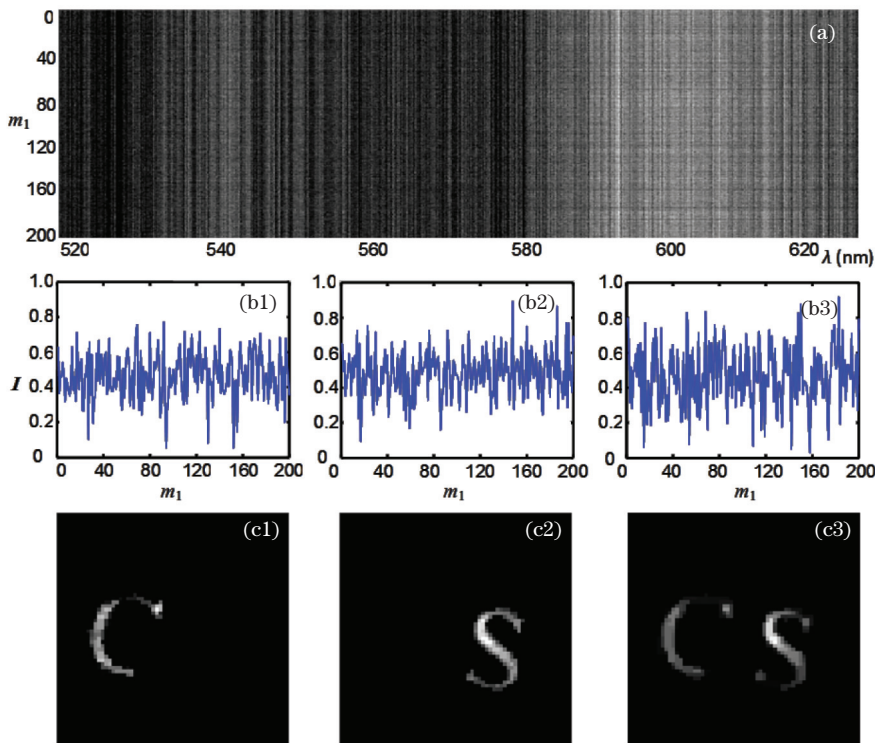


图 9 基于级联压缩感知的成像光谱实验结果<sup>[35]</sup>。(a) 不同空间调制下的光谱曲线; (b)  $530 \text{ nm}$ 、 $610 \text{ nm}$ 、全光谱下的强度变化; (c)  $530 \text{ nm}$ 、 $610 \text{ nm}$ 、全光谱下的成像结果

Fig. 9 Experimental results of spectral imaging based on cascade compressed sensing<sup>[35]</sup>. (a) Spectrum lines under different spatial modulations; (b) intensity fluctuations with different wavelengths of  $530 \text{ nm}$ ,  $610 \text{ nm}$ , and all-spectrum; (c) imaging results with different wavelengths of  $530 \text{ nm}$ ,  $610 \text{ nm}$ , and all-spectrum

传统的基于扫描的成像光谱系统每次测量目标单个像素单个波长的光信号时,由于信号在空间维和光谱维三个维度上的分配,成像光谱信噪比往往较低。在基于级联压缩感知的成像光谱系统中,单点探测器测量的是目标经空间调制和光谱调制后的总强度,在双 DMD 均为 0-1 随机调制情况下,点探测信号强度约是目标在全空间光谱范围总强度的 1/4,因此避免了信号在两个维度上的分配,探测信噪比大大提高,进一步增强了单光子成像光谱技术对弱目标探测的能力。

#### 4.4 成像光谱中的成像-光谱分辨率问题

成像光谱系统中存在拉氏不变量:

$$nyu = n'y'u' = J, \quad (13)$$

式中: $J$  为拉氏不变量; $n, n'$  分别为光学系统前后的介质折射率; $y, y'$  和  $u, u'$  分别为光学系统前后的物高和孔径角。根据(13)式,易得物高  $y$  与孔径角  $u$  呈反比,即当物高增大时,孔径角需相应减小,这意味着光学系统中的通光量也相应减少,光谱分辨率将降低,显然成像分辨率的提升要以牺牲光谱分辨率为代价。为解决这一问题,本课题组提出一种基于可重排布光纤束的方法,在成像系统输出端利用圆形排布光纤束增大孔径,而在光谱系统输入端将光纤束重排为线型排布以减小孔径,从而保证成像分辨率与光谱分辨率均能达到最优,如图 10 所示。其中,上图为可重排布光纤束实物图,下图左右分别为线型排布光纤束及圆形排布光纤束。

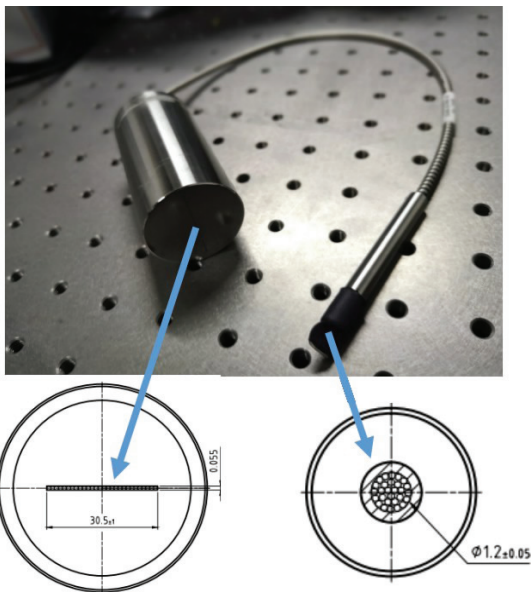


图 10 可重排布光纤束实物图及结构图

Fig. 10 Physical and structural drawings of rearranged fiber bundles

## 5 压缩感知单光子时间分辨成像

### 5.1 单光子时间分辨成像

将单像素相机与时间相关光子计数(TCSPC)系统相结合,可实现单光子时间分辨压缩感知成像。时间分辨成像可应用于激光雷达三维成像和荧光寿命成像等领域。单像素激光雷达系统实验装置如图 11 所示,利用 TCSPC 系统对光脉冲发出时间和光子到达时间进行了标记测量<sup>[36]</sup>。

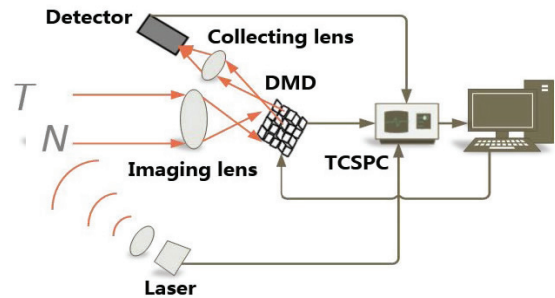


图 11 单像素三维激光雷达系统示意图<sup>[36]</sup>

Fig. 11 Schematic of single-pixel 3D laser radar system<sup>[36]</sup>

在单像素激光雷达中,可根据光子发出与到达探测器的光子飞行时间  $t_1$ ,利用飞行时间与距离的关系

$$d_1 = t_1 \times c/2, \quad (14)$$

统计单像素相机在每次调制过程中飞行时间  $t_1$  内的光子数,并形成测量值  $y_1$ 。其中  $c$  为光速, $d_1$  为确定物体所在深度位置。利用压缩感知重建算法求解

$$y_1 = AO_1 + e, \quad (15)$$

即可获得  $d_1$  深度处的目标图像  $O_1$ ,这种飞行时间(TOF)测量方法在三维成像中有着重要的意义<sup>[37]</sup>。

压缩感知荧光寿命测量系统与单像素激光雷达系统原理近似,利用 TCSPC 系统记录荧光光子到达时间,并按照上述测量值选择和重建过程可获得不同时间段物体荧光变化图像,形成荧光寿命图像。

### 5.2 光子计数堆积效应影响

单光子探测器完成一个光子的探测后会进入“死时间”,即在恢复探测状态之前不会再探测新的光子。当两个及以上的光子在同一探测区间到达相同区域时,第一个到达的光子被探测到后,探测器将无法再获取其余光子的信息。在光子探测概率低的情况下,未被探测的部分可忽略不计,当到达光子数较多,被丢失的光子信息将会不断增加,最终导致真实光子的时间强度分布与探测结果误差极大,被称

为“堆积效应”。单像素成像方式具有高通量测量的特点,即测量过程中约为一半像素的光强被探测器收集探测,在这一过程中容易使得探测器出现堆积效应。在单像素时间分辨成像特别是单像素相机激光雷达中,堆积效应会使得不同深度位置的图像发生串扰,如图 12 所示,字母“N”和“T”分别置于不同距离,实验中所使用的探测器的饱和率为 1 MHz,实验中发现当光子计数率大于 200 KHz 时,重建结果会明显受到堆积效应影响,在字母“N”的重建图像上有另一个深度灰度反转的图像“T”,而重建的“T”图像同样有灰度反转的“N”出现,图 12 显示探测器计数率为 655 KHz 时的成像结果。

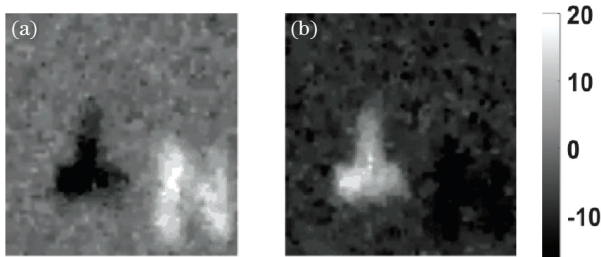


图 12 受堆积效应影响的单像素激光雷达重建结果<sup>[36]</sup>。

(a) 物体“N”重建结果; (b) 物体“T”重建结果

Fig. 12 Reconstruction results of single pixel lidar affected by stacking effect<sup>[36]</sup>. (a) Reconstruction results of “N”;

(b) reconstruction results of “T”

利用Coates提出的方法校正光子计数率高

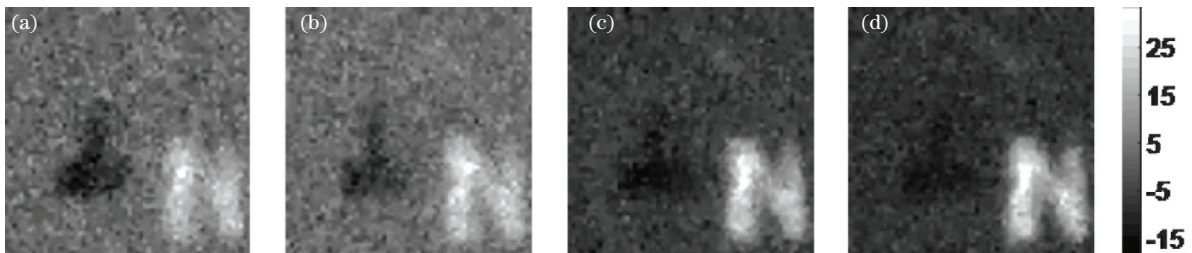


图 14 稀疏矩阵重建结果<sup>[36]</sup>。(a)每个调制矩阵中“1”数量为 1000; (b)每个调制矩阵中“1”数量为 500;

(c)每个调制矩阵中“1”数量为 100; (d)每个调制矩阵中“1”数量为 50

Fig. 14 Reconstruction result of the sparse matrix measurement<sup>[36]</sup>. (a) Number of “1” in each pattern is 1000;

(b) number of “1” in each pattern is 500; (c) number of “1” in each pattern is 100; (d) number of “1” in each pattern is 50

## 6 单光子时间分辨成像光谱仪

级联压缩感知成像光谱与压缩感知时间分辨成像技术均基于单点单光子探测器,因此可以将二者相结合,对空间、光谱调制后的单光子信号进行时间分辨测量,即可在成像光谱基础上进一步获得目标随时间演化的信息。在此原理基础上,课题组成功研制了单光子时间分辨成像光谱仪,实物图如图 15 所示。该仪器可以实现对样品图像、光谱、荧光寿命

的情况下堆积效应带来的误差<sup>[38]</sup>,将第  $i$  次测量图像“N”时的反射光子数修正为

$$\hat{y}_N^{(i)} = \ln [1 - y_N^{(i)} / (N_p - y_P^{(i)})], \quad (16)$$

式中: $y_P^{(i)}$  为第  $i$  次测量图像“T”时的反射光子数; $N_p$  为激光脉冲数。利用校正算法重建出的图像不再出现“T”的负像,如图 13 所示。

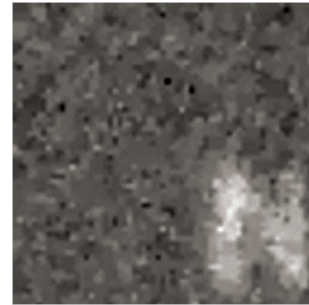


图 13 修正堆积效应影响图像<sup>[36]</sup>

Fig. 13 Corrected image affected by stacking effect<sup>[36]</sup>

单像素相机中测量矩阵构造方式也可影响探测器的计数率。利用稀疏矩阵方式,即通过减少每次测量中 DMD 转向收集方向的微镜的数量,降低堆积效应对成像结果的影响。在测量矩阵的设计上,使用稀疏 0-1 矩阵取代互补测量中使用的  $\pm 1$  矩阵。使用不同稀疏程度的矩阵,成像结果如图 14 所示,可见随着测量矩阵中 1 的数量减少,重建图像中的负像影响减弱。

等信息的同时获取,从而完成荧光寿命成像 (FLIM) 和荧光相关光谱 (FCS) 等多维度探测功能。

由于压缩感知和单光子计数在光学探测灵敏度等方面的优势,单光子时间分辨成像光谱仪具有高灵敏度、高光谱分辨率、高时间精度的“三高”优势,关键指标如表 1 所示,可以实现对痕量成分的高精度检测,同时具有光谱响应宽、稳定性高、适用范围广等特点,能够满足生命科学、材料科学、化学等领域的高性能样品分析需求。





图 15 单光子时间分辨成像光谱仪实物图

Fig. 15 Single-photon time-resolved imaging spectrometer

表 1 单光子时间分辨成像光谱仪的关键性能指标

Table 1 Key performance indicators of single-photon time-resolved imaging spectrometer

Parameter	Value
Spectral response range/nm	350—1800
Imaging pixel	1024×768
Imaging resolution/(nm×nm)	300×300
Maximum spectral resolution/nm	1
Time measurement resolution/ps	100
Range of time measurement/μs	0.06—5000

## 7 结 论

介绍了基于压缩感知的单光子成像技术,并在此基础上发展的光谱测量技术、成像光谱技术和时间分辨成像光谱技术。基于压缩感知的单光子时间分辨成像光谱具有高通量特性,其能在极弱光环境下具有较高的灵敏度与成像能力,同时利用压缩感知的亚采样能力实现了时间、光谱、光强分布等多维信息的高效获取,提高了成像光谱的稳定性,同时也减小了时间复杂度,可为材料科学、生命科学、医疗研究等领域的研究提供技术支撑。

### 参 考 文 献

- [1] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [3] Dai H D, Gu G H, He W J, et al. Adaptive compressed photon counting 3D imaging based on wavelet trees and depth map sparse representation [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26080-26096.
- [4] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141123.
- [5] Chandarana H, Feng L, Ream J, et al. Respiratory motion-resolved compressed sensing reconstruction of free-breathing radial acquisition for dynamic liver magnetic resonance imaging [J]. Investigative Radiology, 2015, 50(11): 749-756.
- [6] Zhang H, Cao L C, Jin G F, et al. Progress on lensless digital holography imaging based on compressive holographic algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 080001. 张华, 曹良才, 金国藩, 等. 基于压缩感知算法的无透镜数字全息成像研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 080001.
- [7] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 83-91.
- [8] Baraniuk R G. Compressive sensing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [9] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6065: 606509.
- [10] Nallala J, Gobinet C, Diebold M D, et al. Infrared spectral imaging as a novel approach for histopathological recognition in colon cancer diagnosis [J]. Journal of Biomedical Optical, 2012, 17(11): 116013.
- [11] Boydston-White S, Gopen T, Houser S, et al. Infrared spectroscopy of human tissue. V. infrared spectroscopic studies of myeloid leukemia (ML-1) cells at different phases of the cell cycle [J]. Biospectroscopy, 1999, 5(4): 219-227.
- [12] Fernandez D C, Bhargava R, Hewitt S M, et al. Infrared spectroscopic imaging for histopathologic recognition [J]. Nature Biotechnology, 2005, 23(4): 469-474.
- [13] Wang C, Liu B, Zhou C, et al. Multispectral microimaging system with narrowband LED illumination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1207006. 王成, 刘宾, 周楚, 等. 窄带 LED 照明的多光谱显微成像系统研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1207006.
- [14] Christensen P R, Jakosky B M, Kieffer H H, et al. The thermal emission imaging system (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey mission [J]. Space Science Reviews, 2004, 110(1/2): 85-130.

- [15] Mende S B, Heetderks H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 3. spectral imaging of Lyman- $\alpha$  and OI 135.6 nm [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91: 287-318.
- [16] Holman G D, Aschwanden M J, Aurass H, et al. Implications of X-ray observations for electron acceleration and propagation in solar flares [J]. *Space Science Reviews*, 2011, 159(1/2/3/4): 107-166.
- [17] Watanabe Y, Kawase K, Ikari T, et al. Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(4): 800-802.
- [18] Hsieh K T, Urban P L. Spectral imaging of chemical reactions using a computer display and a digital camera [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(59): 31094-31100.
- [19] Wang J, Chen-Wiegart K Y C, Wang J. *In situ* chemical mapping of a lithium-ion battery using full-field hard X-ray spectroscopic imaging [J]. *Chemical Communications*, 2013, 49(58): 6480-6482.
- [20] Ly E, Piot O, Wolthuis R, et al. Combination of FTIR spectral imaging and chemometrics for tumour detection from paraffin-embedded biopsies [J]. *The Analyst*, 2008, 133(2): 197-205.
- [21] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(31): 5917-5920.
- [22] Ulrich V, Fischer P, Riemann I, et al. Compact multiphoton/single photon laser scanning microscope for spectral imaging and fluorescence lifetime imaging [J]. *Scanning*, 2004, 26(5): 217-225.
- [23] Sytsma J, Vroom J M, de Grauw C J, et al. Time-gated fluorescence lifetime imaging and microvolume spectroscopy using two-photon excitation [J]. *Journal of Microscopy*, 2008, 191(1): 39-51.
- [24] Rajendran K, Tao S Z, Abdurakhimova D, et al. Ultra-high resolution photon-counting detector CT reconstruction using spectral prior image constrained compressed-sensing (UHR-SPICCS) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10573: 1057318.
- [25] Lauzier P T, Chen G H. Characterization of statistical prior image constrained compressed sensing. I. applications to time-resolved contrast-enhanced CT [J]. *Medical Physics*, 2012, 39(10): 5930-5948.
- [26] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot X-ray diffraction imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 111-114.
- [27] Li C B. An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing [D]. Houston: Rice University, 2004.
- [28] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998, 20(1): 33-61.
- [29] Pati Y C, Rezaifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition [C] // *Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, November 1-3, 1993, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 40-44.
- [30] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Single-photon compressive imaging with some performance benefits over raster scanning [J]. *Physics Letters A*, 2014, 378(45): 3406-3411.
- [31] Liu X F, Yao X R, Wang C, et al. Quantum limit of photon-counting imaging based on compressed sensing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3286-3296.
- [32] Lan R M, Liu X F, Yao X R, et al. Single-pixel complementary compressive sampling spectrometer [J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 349-353.
- [33] Wang C, Liu X F, Yu W K, et al. Compressed spectral imaging with a spectrometer [J]. *Optics Communications*, 2015, 352: 45-48.
- [34] Wang C, Liu X F, Yu W K, et al. Computational spectral imaging based on compressive sensing [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(10): 104203.
- [35] Liu X F, Yu W K, Yao X R, et al. Measurement dimensions compressed spectral imaging with a single point detector [J]. *Optics Communications*, 2016, 365: 173-179.
- [36] 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.
- [37] Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 040001.  
卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 040001.
- [38] Coates P B. The correction for photon 'pile-up' in the measurement of radiative lifetimes [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1968, 1(8): 878-879.