

基于 SPAD 阵列的共光路扫描三维成像

康岩¹, 薛瑞凯^{1,2}, 李力飞¹, 张同意^{1,2*}, 高奇^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于单光子雪崩二极管(SPAD)阵列探测器的三维成像技术在工业和科学领域具有重要的应用前景。然而现有的 SPAD 阵列器件仍存在小阵列规模和低像素填充率所导致的低空间分辨率问题,为此基于 SPAD 阵列(32 pixel×32 pixel)和衍射光学元件(DOE)搭建收发共光路扫描三维成像实验系统。利用 DOE 将出射激光整形为激光点阵并与接收视场匹配可以提升激光能量利用效率,通过共光路扫描可以实现高分辨三维成像。利用基于滑动时间窗的噪声光子滤除算法和基于全变分正则化的图像重构算法对回波光子数据进行处理。实验结果表明,图像重构算法可以获取 10 m 外目标 64 pixel×64 pixel 的三维图像,且在平均每像素 0.86 个信号光子的条件下实现清晰成像,成像结果的平均绝对误差为 0.016 m。

关键词 成像系统; 三维成像; 光子计数; 飞行时间; 共光路扫描; 正则化方法

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011024

Coaxial Scanning Three-dimensional Imaging Based on SPAD Array

Kang Yan¹, Xue Ruikai^{1,2}, Li Lifei¹, Zhang Tongyi^{1,2*}, Gao Qi^{1,2}

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

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

Abstract Three-dimensional (3D) imaging technology based on single-photon avalanche diode (SPAD) array detectors has important industrial and scientific applications. However, existing SPAD array devices are limited by low spatial resolution due to small array size and low pixel-filling factor. Therefore, a coaxial scanning 3D imaging experiment system is built using a SPAD array (32 pixel×32 pixel) and a diffractive optical element (DOE). Using the DOE to shape an outgoing laser into a laser lattice and match it with the receiving field of view can improve laser energy utilization efficiency and achieve high-resolution 3D imaging through coaxial scanning. A noise photon-filtering algorithm based on a sliding time window and an image reconstruction algorithm based on total variational regularization are used to process the echo photon data. Experimental results show that, a 64 pixel×64 pixel 3D image of a target at a distance of 10 m can be obtained with an average of 0.86 signal photons per pixel to achieve clear imaging, the average absolute error of imaging results is 0.016 m.

Key words image systems; three-dimensional imaging; photon counting; time of flight; coaxial scanning; regularization method

OCIS codes 110.6880; 030.5260

1 引言

随着单光子探测器技术的发展,特别是各像素

具有独立定时功能的单光子雪崩光电探测器 (SPAD)阵列研制水平的日益提高^[1-3],基于 SPAD 阵列的三维成像技术受到研究人员的广泛关

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-03-16; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(62001473, 61875228)

* E-mail: tyzhang@opt.ac.cn

注^[4-11]。基于 SPAD 阵列可实现具有单光子灵敏度和皮秒量级时间分辨率的目标场景三维图像的获取,在地形地貌测绘、航天器着陆、考古学及生物学等领域具有巨大的应用前景。

2002 年,美国麻省理工林肯实验室研制出了基于 SPAD 阵列(分辨率为 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$)的扫描式激光雷达系统^[12]。随后在美国国防高级研究计划局(DARPA)的支持下又研制出了 Jigsaw^[13]、ALIRT^[14]、HALOE、MACHETE 及 AOSTB 等型号的面阵光子计数雷达系统^[15],采用分辨率为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 或 $128 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的 SPAD 阵列并结合机载飞行扫描系统,实现了穿透遮蔽物的揭伪成像和高分辨率的三维地形测绘等试验,主要有监视边境区域等军事用途。2015 年,美国 Harris 公司在林肯实验室技术的基础上研制出了非军事用途的光子计数雷达系统,采用分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的 InP/InGaAsP SPAD 面阵并结合全息光学扫描器,拓展了该技术在民用领域的应用,包括土地利用、城市规划、基础设施监控和应急救援等^[16]。2018 年,韩国天文与空间科学研究所对 SPAD 面阵光子计数雷达系统在航天器安全着陆区探测的过程进行了仿真研究,在快速运动的条件下,采用所设计的噪声光子滤除算法提高了低信噪比距离图像的精度^[17]。国内在 SPAD 阵列激光雷达系统方面的研究起步较晚,大部分研究限于点扫或线扫光子计数雷达系统^[18-23],直到近年来针对 SPAD 阵列器件的研制才取得突破^[24]。2016 年,孙剑峰等^[9]基于国内自主研发的 SPAD 面阵(分辨率为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$)搭建了一套波长为 1570 nm 的光子计数三维成像实验平台,在成像帧频为 1 kHz 和单脉冲能量为 2 mJ 的条件下,获取到了 720 m 距离外目标的清晰表面结构距离像。2018 年,谢绍禹等^[10]构建了一种基于 SPAD 阵列(分辨率为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$)的微扫描光子计数成像实验系统,其空间分辨率提高了 4 倍($64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$)。2020 年,葛鹏等^[11]基于国内自研的 InGaAs SPAD 阵列(分辨率为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$)搭建了波长为 1064 nm 的光子计数三维成像实验装置,实现了对 600 m 距离外目标的三维成像,并采用正则化图像重构方法改善了累积光子数不足的图像质量。

由于受到生产工艺的限制,目前的 SPAD 阵列并不成熟,其中较为显著的一个缺点就是非常低的像素填充率和阵列规模所导致的低空间分辨率问

题,此外 SPAD 阵列还普遍存在热像素问题^[25],部分像素的暗计数速率超过其他正常像素的 $1 \sim 2$ 个数量级,这会严重影响成像质量。本团队调研了当前国际上具有代表性的三个 SPAD 阵列,包括美国 Princeton Lightwave 公司的 Kestrel、英国 Photon Force 公司的 PF32 及意大利米兰理工大学的 SPAD 芯片(分辨率为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$),这些 SPAD 阵列的像素填充率均在 10% 以下^[26],且其中最大的阵列规模仅为 $64 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。鉴于此,本文搭建基于 SPAD 阵列和衍射光学元件(DOE)的共光路扫描三维成像系统。首先使用 DOE 将出射激光整形为激光点阵并与低填充率的 SPAD 阵列所对应的成像视场进行匹配,然后通过共光路扫描实现高分辨的三维成像。此外,为了克服杂散噪声光子和 SPAD 阵列的热像素对成像质量的影响,设计基于滑动时间窗的噪声光子滤除算法和图像正则化重构算法,最终实现基于 SPAD 阵列和 DOE 的高效率、高分辨和高质量的光子计数三维成像。

2 实验研究

2.1 实验系统

基于 SPAD 阵列和 DOE 搭建了收发共光路扫描三维成像系统,系统结构如图 1 所示,PBS 为偏振分束器。成像系统主要由脉冲激光器、发射光学系统、共光路收发开关、二维扫描镜、接收光学系统、SPAD 阵列、信号发生器以及计算机构成。

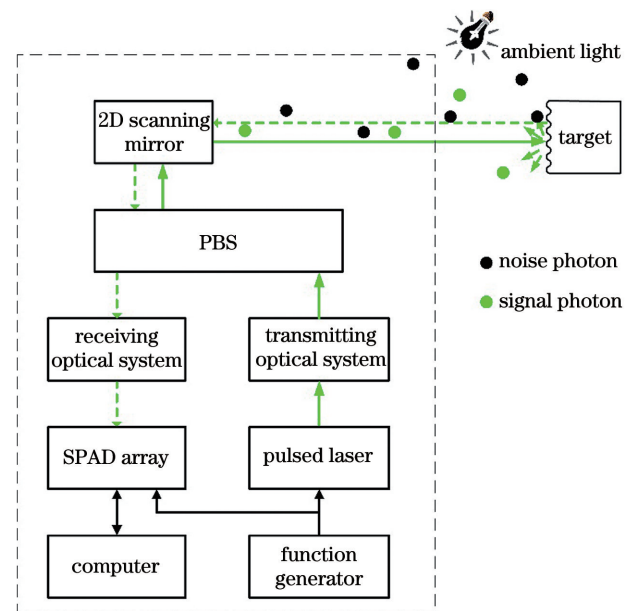


图 1 实验系统结构

Fig. 1 Experimental system structure

采用的脉冲激光器波长为 532 nm ,脉冲宽度约

为 70 ps。使用由 DOE 和扩束透镜组构成的扩散发射光学系统对出射激光进行整形,获得与接收视场匹配的点阵照明效果。PBS 被用作收发开关。使用变焦光学镜头收集并聚焦回波光。分辨率为 32 pixel×32 pixel 的 SPAD 阵列的 PF32 被用于探测回波光。PF32 可响应 350~1060 nm 波段的光信号,在 500 nm 波长处的最大光子探测效率为 28%。SPAD 阵列的尺寸为 1.6 mm×1.6 mm,像素光敏面的直径为 6.95 μm,像素间距为 50 μm,则像素填充率约为 1.5%。PF32 中的各像素自带一个数据容量为 10 bit 的时间数字转换器(TDC),时间间隔的分辨率为 55 ps。PF32 的最小帧时为 2 μs,实验中将其设为 10 μs。设置信号发生器产生频率为 20 MHz 的脉冲信号,使用该脉冲信号对 PF32 和激光器进行同步控制,使得 PF32 工作在定时模式下,即高级时间相关单光子计数(TCSPC)模式^[27]。当探测到光子时 TDC 开始启动计时,直到下次激光脉冲发射 TDC 停止计时,最后通过对停止和开始计时的时刻作差,得到飞行时间(TOF)的测量值 T_0 。真实的光子飞行时间为 $T_1 = T_r - T_0$,

其中 T_r 为 TDC 定时周期。将回波光子的飞行时间传送至计算机中,结合光速常数可对每个像素上的距离信息进行估计,从而得到目标的三维图像。共光路阵列扫描成像原理如图 2 所示。实验系统的性能参数如表 1 所示。

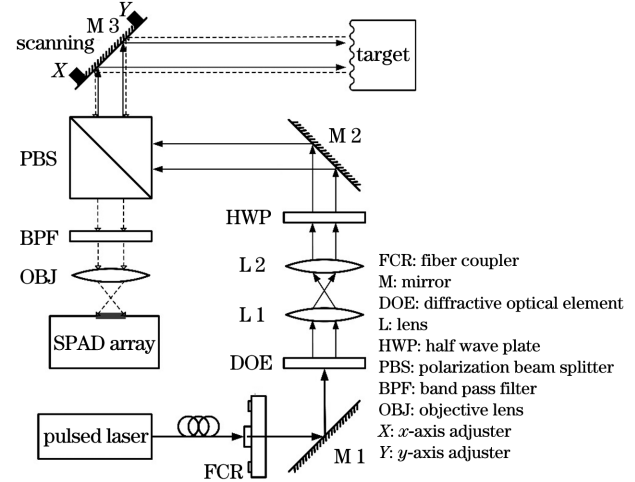


图 2 共光路阵列扫描成像原理图

Fig. 2 Schematic of common path array scanning imaging

表 1 实验系统的性能参数

Table 1 Performance parameters of experimental system

System	Parameter	Value
Emitting pulsed laser	Wavelength /nm	532
	Repetition frequency /MHz	20
	Pulse width /ps	~70
	Average power /μW	20
DOE	Beam splitting	32×32
	Divergence angle /(mrad×mrad)	59.86×59.86
Beam expanding system	Focal length of L 1 (f_1) /mm	40
	Focal length of L 2 (f_2) /mm	75
Objective lens	Focal length (f_3) /mm	24–75
	Array size /(pixel×pixel)	32×32
SPAD array	SPAD active area /μm	6.95
	Diameter /μm	50
	Pixel pitch /%	1.5
	Pixel size /(mm×mm)	1.6×1.6
TDC unit	TDC bin size /ps	55
	TDC range /ns	56.3

波长为 532 nm 的脉冲激光经过单模光纤传输后通过光纤准直器(FCR)准直输出,单束激光被通

过 DOE 后整形为 32×32 的激光点阵,发散全角 $\theta_t = 59.86$ mrad。随后使用由 L 1($f = 40$ mm)和

L 2 ($f=75\text{ mm}$) 双胶合透镜组构成的扩束系统将照明光束的发散全角压缩到 31.93 mrad 。旋转半波片 (HWP), 可以使从 PBS 发射至目标场景的激光功率最大。经过目标反射和散射后, 退偏的回波光光子透过 PBS 并通过物镜 (OBJ) (焦距调节至约为 50 mm) 聚焦和成像至 SPAD 阵列上。物镜之前放置带宽为 10 nm 的带通滤波片, 用来滤除背景光。由物镜焦距约为 50 mm 和光敏面尺寸为 $1.6\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$, 可计算得到接收视场角 (FOV) 约为 32 mrad , 其与照明光束的发散全角 (31.93 mrad) 基本匹配, 通过微调 OBJ 的焦距可以提高激光照明点阵以及与低填充率接收视场的匹配程度。最后, 采用 Z812B 促动器分别控制反射镜 M 3 的水平 (X) 和俯仰 (Y) 方向的偏转角度, 实现激光照明点阵和成像视场的同时移动, 从而实现收发共光路扫描成像。

调节 OBJ 的焦距和反射镜 M 2 的偏转角度可分别调整成像视场和激光照明点阵与标定图案的对齐程度, 进而实现共光路的收发对准, 标定图案及其与视场、激光点阵的对准图案如图 3 所示。具体对准调节步骤: 首先依据目标距离 (对准实验中距离为 3 m) 和 32 mrad 的 FOV, 可以计算得到视场区域的尺寸为 $96\text{ mm}\times 96\text{ mm}$, 据此设计制作图 3(a) 的标定图案, 标定图案由 16 对黑白条纹组成, 条纹宽度均为 3 mm ; 其次将 PF32 调整为光子计数模式并对标定图案进行强度成像, 通过微调镜头的焦距直到成像结果与标定图案一致, 如图 3(b) 所示; 最后打开激光器并通过调节 M 2, 使照明点阵与标定图案达到图 3(c) 的对齐效果。通过上述调节步骤可以使激光照明点阵和接收视场基本匹配。

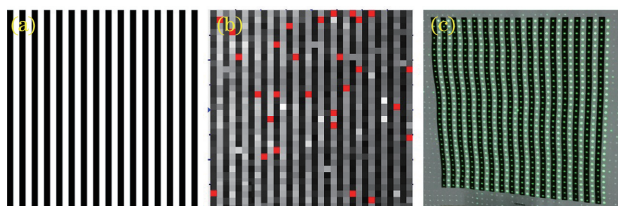


图 3 标定图案及其与视场、激光点阵的对准图案。

(a) 标定图案; (b) 校准后的接收视场; (c) 校准后的照明点阵

Fig. 3 Calibration pattern and its alignment pattern with FOV and laser dot matrix. (a) Calibration pattern; (b) receiving FOV after calibration; (c) illumination dot matrix after calibration

共光路系统存在一个固有缺点, 即共用光路中元件的后向反射光对目标回波的干扰。为了规避这

一问题, 目前多数面阵激光雷达系统采用了收发分置的简单光路结构^[9-11], 但这会存在近距离探测盲区。双站模式下视场偏离的模拟路径如图 4 所示^[26]。当对不同距离处的两个目标进行探测成像时, 发射与接收位置的间隔会导致无法同时获取二者图像, 此时需要重新调节接收视场的光轴。

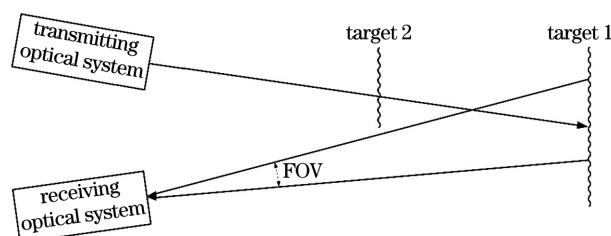


图 4 双站模式下的视场偏离示意图^[26]

Fig. 4 Diagram of FOV deviation in bi-static mode^[26]

虽然共光路系统解决了近距离探测盲区的问题, 但是收发共用的 PBS 前表面所引起的后向反射不容忽视。由于 SPAD 存在死时间 (即 SPAD 探测一个光子后的恢复时间), 在一个探测周期内若 SPAD 首先探测到一个后向反射光子, 则随后到来的信号光子无法被响应, 越强的后向反射将会丢失越多的信号光子。为了缓解后向反射的影响, 将 PBS 旋转微小角度, 可以使后向反射光子偏离原本的垂直反射角度, 从而避免 PBS 前表面的后向反射光子到达探测器光敏面。实验过程中, 在 PBS 前表面垂直于出射光束和 PBS 被小角度旋转的情况下, 对同一个像素上的光子计数分布数据进行采集。图 5(a) 为 PBS 前表面与出射光束垂直放置的后向反射路径和回波信号光子计数分布; 图 5(b) 为 PBS 前表面与出射光束以微小夹角放置的后向反射路径和回波信号光子计数分布。从图 5 可以看到, 当存在微小夹角时, PBS 前表面的后向反射光子大多没有进入探测器中, 这可以减弱对信号光子探测的影响。

2.2 成像系统各像素的探测性能差异分析与处理

成像系统各像素的性能差异主要包括暗计数速率和定时性能, 其中由 SPAD 阵列的制造工艺缺陷导致暗计数速率异常大的像素称为热像素^[21]。通过遮挡 SPAD 阵列前表面的接收镜头, 对探测器暗计数进行数据采集, 采用统计分析方法可定位热像素坐标, 利用坐标信息则可剔除原始光子计数测量数据中的热像素数据。

采集 5 组 TCSPC 模式下的暗计数速率数据并对其进行分析。图 6(a)~6(e) 为 5 组 TCSPC 模式

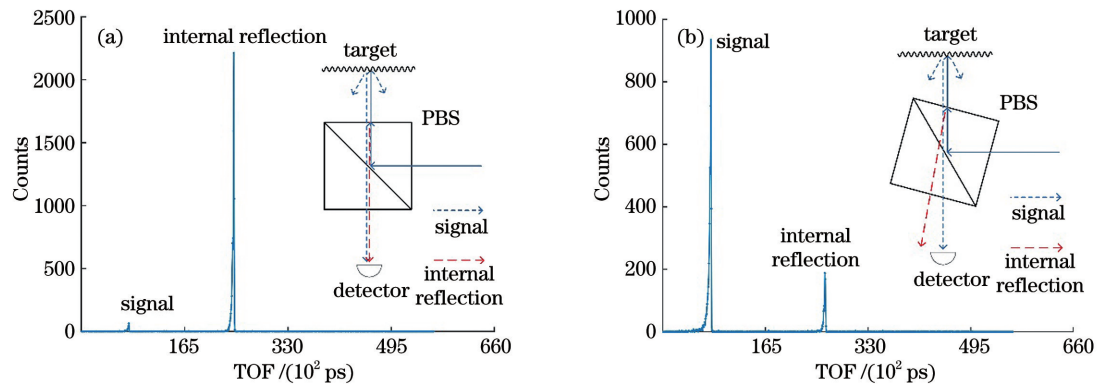


图 5 不同情况下的后向反射和回波信号光子计数分布曲线。(a) PBS 前表面与出射光束垂直放置; (b) PBS 前表面与出射光束以微小夹角放置

Fig. 5 Photon count distribution curves of backward reflection and echo signals under different conditions. (a) Front surface of PBS is placed perpendicular to outgoing beam; (b) front surface of PBS is placed at small angle with outgoing beam

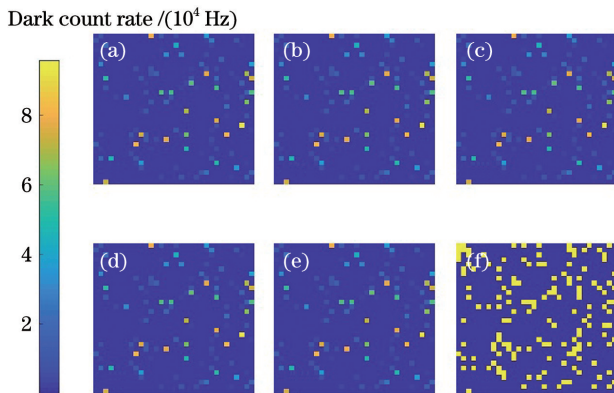


图 6 SPAD 阵列各像素暗计数速率的分布图。(a) 第一次采集; (b) 第二次采集; (c) 第三次采集; (d) 第四次采集; (e) 第五次采集; (f) 暗计数速率大于 200 Hz 的像素在面阵上的分布

Fig. 6 Distribution of dark count rate of each pixel in SPAD array. (a) 1st collection; (b) 2nd collection; (c) 3rd collection; (d) 4th collection; (e) 5th collection; (f) distribution of pixels with dark count rate greater than 200 Hz on planar array

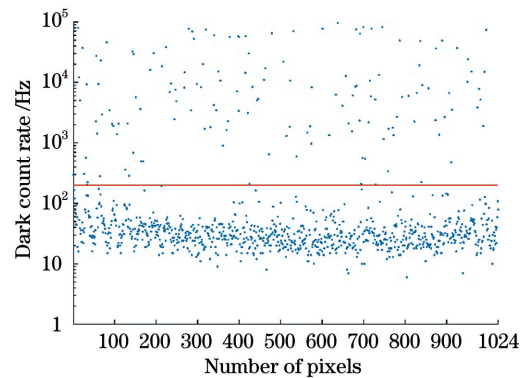


图 7 暗计数速率的一维分布

Fig. 7 1D distribution of dark count rate

下 SPAD 阵列各像素暗计数速率的二维空间分布。图 7 为暗计数速率的一维分布。从图 6 和图 7 可以看到, 每个像素的暗计数速率不同, 而且每个像素的暗计数速率较固定; 所有像素的暗计数速率均分布在 $0 \sim 10^5$ Hz 之间, 而且有 85.4% 像素的暗计数速率小于 200 Hz 且分布集中, 均值为 35.8 Hz, 剩余像素的暗计数速率均匀分布在 $2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ Hz 之间; 对于暗计数速率大于 200 Hz 的热像素, 其在面阵上的分布较为稠密, 如图 6(f) 所示, 这会严重影响成像质量, 尤其在弱回波下信号光子累积不足的情况下, 热像素上将难以输出准确的距离估计值。

因此, 在三维距离图像的重构过程中, 首先剔除热像素上的无效数据, 然后采用正则化图像重构算法复原热像素上的距离信息。

各像素的定时性能差异主要表现为各像素之间存在固定的定时偏差。当所有像素对同一距离的目标进行测距时, 则各个像素的距离测量值之间会存在固定偏差。使用 SPAD 阵列成像系统采集垂直于接收视场轴线放置的平板上的目标三维距离数据, 将每个像素的距离值减去所有像素距离的均值, 可以得到各个像素的距离改正值, 使用改正值可对距离成像结果进行校正。对图 8(a) 的目标场景进行成像, 目标场景包括最前面的箭头形状纸片、人形状纸片以及最后面的背景平板三个平面。获取到校正前与校正后的距离图像分别如图 8(b) 和 8(c) 所示。从图 8 可以看到, 校正前场景中三个平面成像结果的表面波动较大, 校正后三个平面的表面波动都减小, 与真实目标更相符。

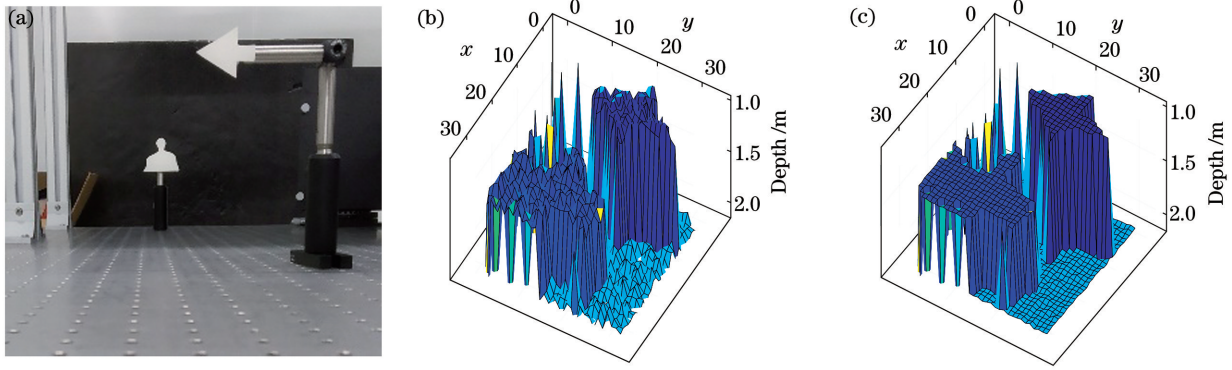


图 8 目标场景及校正前后的成像结果。(a)目标场景;(b)校正前的距离图像;(c)校正后的距离图像

Fig. 8 Target scene and imaging results before and after correction. (a) Target scene; (b) distance image before correction; (c) distance image after correction

2.3 噪声光子滤除及正则化图像重构算法

探测过程中,噪声光子主要包括环境光的背景噪声光子和探测器的暗计数噪声光子。当白天太阳光等背景噪声强度远大于暗计数时,即便采用严格的光谱滤波等硬件手段,总会存在与照明激光波长一致的背景噪声光子并被 SPAD 探测到,不过探测时刻都是均匀分布在探测周期内。对于很多自然场景来说,目标物体总是单独聚集在若干个纵向深度位置处,因此从目标返回的信号光子的探测时刻则呈现出不同于噪声光子的聚集性分布情况。这种聚集程度依赖于由激光脉冲宽度、探测器定时抖动及 TDC 计时抖动等决定的系统响应函数(IRF),通常采用 IRF 的半峰全宽来刻画信号光子的聚集程度,假设目标脉冲响应为理想的狄拉克函数^[27]。依据噪声和信号光子的不同时域分布特征,采用滑动时间窗法自适应地确定每一个像素上的信号光子聚类集。设在像素 (i, j) 上可探测到 k 个光子,则所有像素上光子探测的飞行时间数据可表示为 $T_{(i,j)} = \{t_{(i,j)}^{(1)}, t_{(i,j)}^{(2)}, \dots, t_{(i,j)}^{(k)}\}$,当 k 的最小值为 0 时,即没有探测到光子。由于受到 SPAD 阵列数据读出速度的限制,1 frame 内仅能记录一个光子探测时刻,因此 k 的最大值为探测帧数 N_f 。具体的噪声光子滤除步骤:首先对每个像素上探测到的所有 k 个回波光子按照飞行时间进行升序排序,然后以第一个回波光子作为起点,依据

$$D_l = \{t_{(i,j)}^{(s)} : t_{(i,j)}^{(l)} \leq t_{(i,j)}^{(s)} < t_{(i,j)}^{(l)} + T_w\} \quad (1)$$

以一个宽度为 IRF 半峰全宽 2 倍的时间窗进行聚类集 D_l 搜索。式中: l 为从第一个到最后一个光子飞行时间的索引, $l=1, 2, \dots, k$; T_w 为时间窗的宽度; D_l 为满足不等式的回波光子集合,即光子飞行时间处于以 $t_{(i,j)}^{(l)}$ 为起点和 T_w 为宽度的时间窗内的

所有回波光子; s 为该集合内回波光子的索引。最后,假定成像目标为单表面,也就是每个像素上仅存在一个信号光子聚类集,因此在获得的聚类集 D_l 中选择尺寸最大的作为信号聚类集 $V_{(i,j)}$,可表示为

$$\{V_{(i,j)} : |V_{(i,j)}| = \max_l |D_l|\}. \quad (2)$$

通过上述步骤可以滤除由环境光和探测器暗计数所引发的绝大部分噪声光子,关于距离图像 $z_{(i,j)}$ 的对数似然函数 L_z 可表示为^[28]

$$L_z(z_{(i,j)}; \{t_{(i,j)}^{(l)}\}_{l \in V_{(i,j)}}) = \sum_{l \in V_{(i,j)}} \ln \left\{ s_t \left[t_{(i,j)}^{(l)} - \frac{2z_{(i,j)}}{c} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: c 为空气中的光速常数; $s_t(\cdot)$ 为回波形状函数。结合目标先验信息,即大多数目标在距离维度上的梯度稀疏特性,求解带全变分(TV)正则项^[29]的最小化问题就可获得目标图像的距离估计,表达式为

$$\hat{z}_{(i,j)} = \underset{z_{(i,j)} \geq 0}{\operatorname{argmin}} \left[\sum_i \sum_j - L_z(z_{(i,j)}; \{t_{(i,j)}^{(l)}\}_{l \in V_{(i,j)}}) + \beta_z x_{\text{TV}} \right], \quad (4)$$

式中: β_z 为权重因子; x_{TV} 为所选择的 TV 正则项函数。(4)式中的第一项控制图像重构的保真度,第二项控制重构图像与先验信息的匹配度。最终采用稀疏泊松强度重构(SPIRAL)算法^[30]对其中的目标函数进行修改,可以求解上述最小化的问题,从而完成目标距离图像估计。

3 实验结果与讨论

图 9 为成像目标和实验现场。成像目标是一个尺寸约为 $19 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$ 的工艺品,表面粗糙且具有漫反射特性。目标表面特征可分为左中右

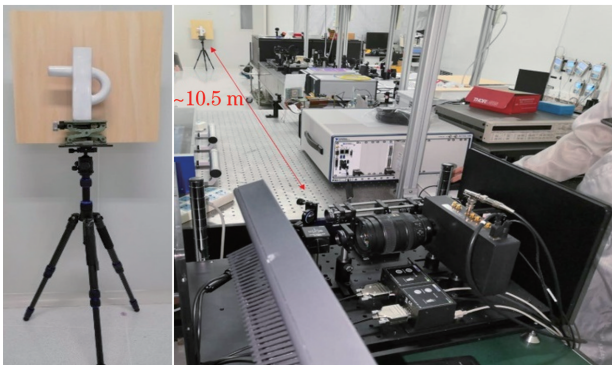


图 9 成像目标及实验现场图

Fig. 9 Imaging target and experimental site photograph

三个区域,中间区域为平面,左侧“一”字型和右侧“C”字型区域均为弧形表面。中间区域表面与左右两侧弧面顶点的纵向距离分别为 1.5 cm。目标被放置在距离成像系统约为 10.5 m 处。

实验过程中,出射激光的脉冲重复频率为 20 MHz,平均功率约为 20 μ W。由于出射激光被 DOE 调制为 32×32 点阵的照明方式,单个激光束的功率小于 20 nW。采取图 10 的扫描轨迹将像素数由 32×32 增加至 64×64 ,成像视场约为 32 mrad。将 PF32 的帧时设为 10 μ s,单视场采集的帧数设为 7×10^5 frame(大于 7×10^5 frame 会出现内存溢出错误),则总的采集时间为 28 s。

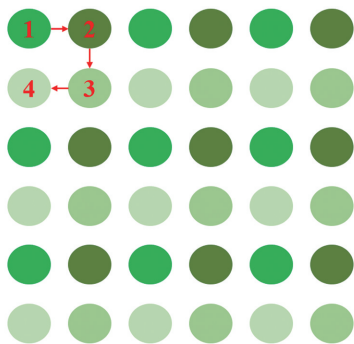


图 10 扫描轨迹

Fig. 10 Scanning trace

完成回波光子数据的采集后,对回波光子数据的信噪比进行分析。由于光子计数一般为泊松过程,因而此处的信噪比(SNR)定义为回波光子中的信号光子数与噪声光子数之比^[31],实验测量得到 SNR 为 0.26。为了方便对少光子条件下的成像效果进行评价,首先基于所有 7×10^5 frame 的回波光子数据进行参考真值图像的获取,结果如图 11 所示,其中平均每像素的信号光子数(SPP)为 59.58 个。随后,基于 $1 \times 10^5, 5 \times 10^4, 1.5 \times 10^4, 1 \times 10^4, 5 \times 10^3$ frame 回波光子数据,对应的平均每像素 SPP 分别为 8.49、4.28、1.23、0.86 和 0.44 个,采用传统方法和所提方法进行少光子条件下的三维图像重构。

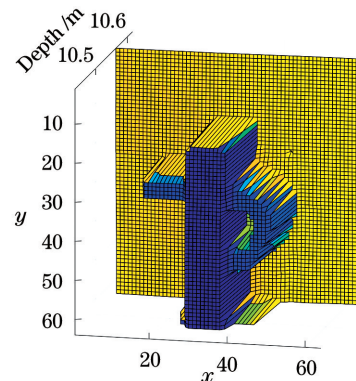


图 11 目标的参考真值图像

Fig. 11 Reference ground truth image of target

在相同的信号光子计数条件下(SPP 值为 8.49),对阵列扫描与非扫描的成像结果进行比较,结果如图 12 所示。在 4 个扫描滞留位置(图 10 中的 1、2、3 和 4 处)获取的 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 低分辨率距离图像如图 12(a)~12(d)所示。图 12(e)为扫描重构得到的 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 高分辨距离图像,距离图像即指目标的三维图像伪彩图。为了便于对比,低分辨率和高分辨距离图像的重构均采用传统的距离最大似然估计和中值滤波方法。从图 12 可以

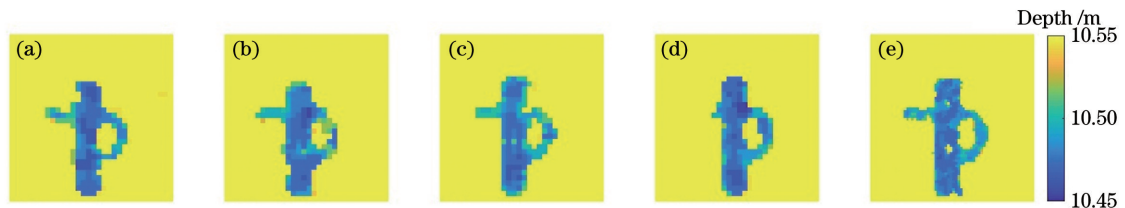


图 12 低分辨率距离图和高分辨扫描重构距离图。(a)图 10 中扫描点 1;(b)图 10 中扫描点 2;(c)图 10 中扫描点 3;

(d)图 10 中扫描点 4;(e)扫描重构得到的高分辨率距离图像

Fig. 12 Low resolution and high resolution scan reconstruction distance images. (a) Scanning point 1 in Fig. 10; (b) scanning point 2 in Fig. 10; (c) scanning point 3 in Fig. 10; (d) scanning point 4 in Fig. 10; (e) high resolution distance image obtained by scanning reconstruction

看到,阵列扫描得到的高分辨距离图像质量明显优于 4 个滞留位置的非扫描低分辨距离图像,主要表现在图像结构的细节和完整度方面。例如,在第 4 滞留位置处的低分辨距离图像无法呈现目标物体左侧的“一”字型结构特征,而图 12(e)中的高分辨距离图对目标左右两侧的“一”和“C”字型特征的重构效果均优于 4 个滞留位置的低分辨距离图像。

图 13 为采用传统方法和所提方法获取到的不同信号光子数下的成像结果,其中上面一行为不同 SPP 的条件下,采用传统最大似然估计和中值滤波方法得到的距离图像,下面一行为采用所提噪声光子自适应滤除和正则化重构算法得到的距离图像。

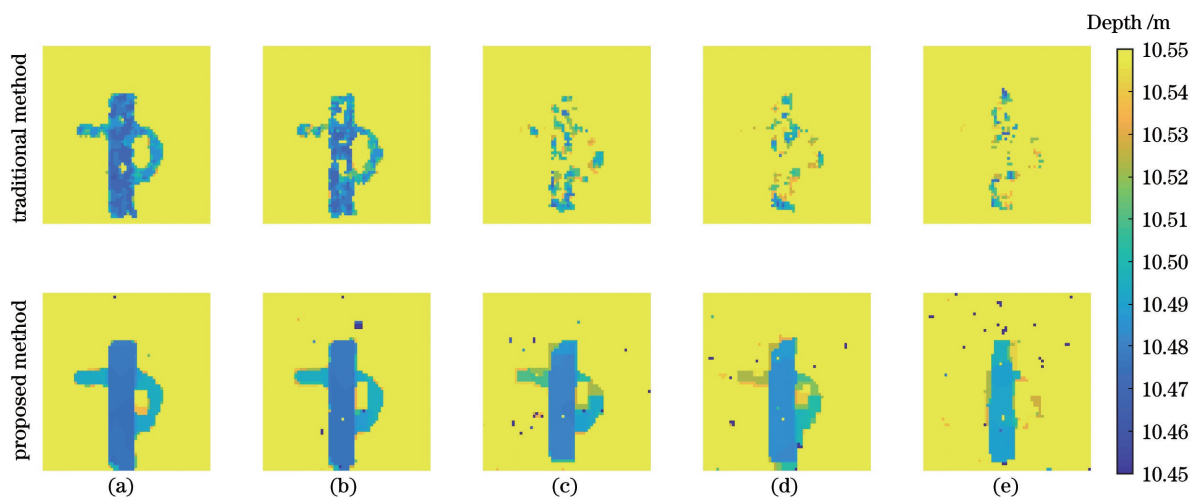


图 13 不同 SPP 条件下的成像结果。(a)8.49;(b)4.28;(c)1.23;(d)0.86;(e)0.44

Fig. 13 Imaging results under different SPP conditions. (a) 8.49; (b) 4.28; (c) 1.23; (d) 0.86; (e) 0.44

进一步,计算估计图像与参考真值图像之间的平均绝对误差(MAE),并用于量化评价成像结果。MAE 计算公式为

$$M_{\text{MAE}} = \frac{1}{x_p y_p} \sum_{i=1}^{x_p} \sum_{j=1}^{y_p} |\hat{z}_{(i,j)} - z_{(i,j)}|, \quad (5)$$

式中: x_p 和 y_p 分别为图像像素的总行数和总列数。不同 SPP 的条件下,成像结果的 MAE 值如表 2 所示。从表 2 可以看到,MAE 值与图 13 的视觉评价一致,随着信号光子数的减少,MAE 值增大;传统方法所得的 MAE 值普遍较大,这是由于其对热像素上距离值的重构精度较低,尤其是在光子稀少的情况下无法得到准确的估计值,而且出现目标结构缺失的情况;另外,传统方法对平面目标的重构结果起伏较大,而所提方法因考虑目标先验信息而能够得到准确的重构图像;所提方法在平均每像素 0.86 个信号光子上得到的 MAE 值达到 0.016 m,远优于传统方法。

从图 13 可以看到,当 SPP 值为 8.49 时,传统方法和所提方法均可重构出较为清晰的目标距离图像,并且可以分辨出中间平面和左右两侧“一”和“C”特征区域的距离差异,其中中间平面的深度为 10.48 m,左右两侧弧面深度值为 10.49 m;不过所提方法对目标的成像结果在视觉上更清晰且细节也更完整;随着信号光子数的逐渐减少,两种方法的成像质量均越来越差,当 SPP 值降至 1.23 个及以下时,传统方法所得到的结果图像已经很难呈现目标结构特征,而此时所提方法得到的结果图像依然清晰可见,甚至在 SPP 值为 0.86 的情况下还可以完整地呈现目标结构特征。

表 2 不同 SPP 条件下的 MAE 值

Table 2 MAE values under different SPP conditions

SPP	8.49	4.28	1.23	0.86	0.44
MAE of traditional method /m	0.096	0.197	0.325	0.402	0.605
MAE of proposed method /m	0.008	0.010	0.015	0.016	0.035

4 结 论

针对当前 SPAD 阵列存在像素填充率低、阵列规模小,以及难以满足高空间分辨的三维成像要求,提出基于 SPAD 阵列和 DOE 的共光路扫描三维成像方法。重点分析共光路扫描成像系统的构建、调试和存在的问题,通过以微小角度旋转 PBS 可以缓解后向反射的干扰,通过定时误差校正可以提高三维成像质量,设计噪声光子滤除和图像重构算法用以在弱回波的条件下抑制背景噪声光子和热像素对

成像结果的影响。最终基于分辨率为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的 SPAD 阵列和 DOE 分束器构建共光路扫描三维成像实验装置,并设计出自适应时间窗噪声光子滤除算法和正则化光子计数三维图像重构算法。使用构建的成像系统实现对 10 m 距离外目标成像的测试,可以获得分辨率为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的三维图像,空间分辨率提升 4 倍;在平均每像素 0.86 个信号光子的条件下实现清晰成像,成像结果的 MAE 值为 0.016 m,优于传统方法。本文下一步将在现有实验装置的基础上增加望远镜系统以拓展成像距离,同时优化扫描速度实现快速光子计数三维成像。

参 考 文 献

- [1] Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1004001.
刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1004001.
- [2] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 220001.
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 220001.
- [3] Aull B F, Duerr E K, Frechette J P, et al. Large-format image sensors based on custom Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10729: 107290B.
- [4] Shin D, Xu F, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.
- [5] Tachella J, Altmann Y, Mellado N, et al. Real-time 3D reconstruction from single-photon lidar data using plug-and-play point cloud denoisers [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4984.
- [6] Chan S S, Halimi A, Zhu F, et al. Long-range depth imaging using a single-photon detector array and non-local data fusion [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8075.
- [7] Mi X S, Zhao H, Fan X W, et al. Photon-counting laser altimetry based on microchannel plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1228001.
米小什, 赵惠, 樊学武, 等. 基于微通道板的单光子激光测高技术研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1228001.
- [8] Henriksson M. Photon-counting panoramic three-dimensional imaging using a Geiger-mode avalanche photodiode array [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(9): 093104.
- [9] Sun J F, Jiang P, Zhang X C, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206006.
孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等. 32×32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1206006.
- [10] Xie S Y, Zhao Y Q, Wang Y L, et al. Microscanning laser imaging technology based on Geiger-mode APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1206010.
谢绍禹, 赵毅强, 王永乐, 等. 基于盖革 APD 阵列的微扫描激光成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1206010.
- [11] Ge P, Guo J J, Chen C, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305007.
葛鹏, 郭静菁, 陈丛, 等. 基于盖革 APD 阵列的光子计数三维成像 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0305007.
- [12] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(36): 7671-7678.
- [13] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [14] Knowlton R. Airborne lidar imaging research testbed [EB/OL]. [2021-01-26]. <https://www.docin.com/p-1746917077.html>.
- [15] Clifton W E, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9465: 946506.
- [16] Stoker J, Abdullah Q, Nayegandhi A, et al. Evaluation of single photon and Geiger mode lidar for the 3D elevation program [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 767.
- [17] Lim H C, Kucharski D, Kim S, et al. Evaluation of a Geiger-mode imaging flash lidar in the approach phase for autonomous safe landing on the Moon [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(3): 1122-1132.
- [18] Xu L, Yang X, Wu L, et al. Dual Gm-APD polarization lidar to acquire the depth image of shallow semitransparent media with a wide laser pulse [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5):

- 6803310.
- [19] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [20] Yan Q R, Li D, Wang Y F, et al. Single-photon reflectivity and depth imaging by continuous measurement of arrival time of photons [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 6901914.
- [21] Du B C, Pang C K, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4198.
- [22] Ye L, Gu G H, He W J, et al. A reconstruction method for restraining range walk error in photon counting Lidar via dual detection [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(4): 045703.
- [23] Huang G H, Shu R, Hou L B, et al. Design and performance of a fiber array coupled multi-channel photon counting, 3D imaging, airborne lidar system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9080: 90800F.
- [24] Zhang X C, Jiang L Q, Gao X J, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 356-360, 391.
张秀川, 蒋利群, 高新江, 等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩焦平面阵列的研制 [J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 356-360, 391.
- [25] Connolly P W R, Ren X, Henderson R K, et al. Hot pixel classification of single-photon avalanche diode detector arrays using a log-normal statistical distribution [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(18): 1004-1006.
- [26] Kang Y. Research on single photon counting lidar 3D imaging technology with a few echo photons [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 64-69.
康岩. 基于少量回波光子的单光子计数雷达三维成像技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 64-69.
- [27] Shin D. Computational imaging with small numbers of photons [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2016: 31-36.
- [28] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, 1(2): 112-125.
- [29] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60: 259-268.
- [30] Harmany Z T, Marcia R F, Willett R M. This is SPIRAL-TAP: sparse poisson intensity reconstruction algorithms: theory and practice [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(3): 1084-1096.
- [31] Rapp J, Goyal V K. A few photons among many: unmixing signal and noise for photon-efficient active imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(3): 445-459.