

首光子成像技术原理与研究进展

王翔 吴清源 俞文凯 张安宁

Principle and research progress of first-photon imaging

WANG Xiang, WU Qingyuan, YU Wenkai, ZHANG Anning

引用本文:

王翔, 吴清源, 俞文凯, 等. 首光子成像技术原理与研究进展[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1242–1252. DOI: 10.5768/JAO202546.0612006

WANG Xiang, WU Qingyuan, YU Wenkai, et al. Principle and research progress of first-photon imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1242–1252. DOI: 10.5768/JAO202546.0612006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全国产化公里级单光子测距系统

Domestic kilometer-level single photon ranging system

应用光学. 2025, 46(3): 522–529 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311006>

旋转物体的单光子三维重建技术

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

应用光学. 2024, 45(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501001>

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

应用光学. 2025, 46(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

光子计数集成成像的压缩与重构

Compression and reconstruction of photon counting integral imaging

应用光学. 2023, 44(2): 295–306 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1242-11

引用格式: 王翔, 吴清源, 俞文凯, 等. 首光子成像技术原理与研究进展 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1242-1252.

WANG Xiang, WU Qingyuan, YU Wenkai, et al. Principle and research progress of first-photon imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1242-1252.



在线阅读

首光子成像技术原理与研究进展

王翔¹, 吴清源¹, 俞文凯^{1,2}, 张安宁¹

(1. 北京理工大学物理学院, 北京 100081; 2. 空基信息感知与融合全国重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 首光子成像作为低光子成像领域的革命性技术, 通过捕捉各像素首个光子的时间统计特性, 突破了传统成像对多光子积累的依赖, 实现了每像素一个光子的超高效重建, 为极弱光成像、远距离遥感等极端场景提供了关键解决方案。本文系统综述了首光子成像的原理与研究进展。首先, 介绍单光子探测技术的硬件基础, 包括单光子雪崩二极管及时间相关单光子计数模块的核心作用。其次, 阐述首光子成像的基本原理, 包括首光子信号的统计建模、目标反射率及深度信息重建方法, 重点梳理了该领域的研究进展, 涵盖目标检测、首光子鬼成像、非视域成像等应用方向, 以及算法优化和量子成像方面的关键突破。最后, 总结了首光子成像技术的优势与现存挑战, 并对其未来发展方向进行展望。

关键词: 首光子成像; 激光雷达; 最大似然估计; 单光子探测

中图分类号: TN209

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0612006

Principle and research progress of first-photon imaging

WANG Xiang¹, WU Qingyuan¹, YU Wenkai^{1,2}, ZHANG Anning¹

(1. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion, Luoyang 471009, China)

Abstract: As a revolutionary technology in low-photon imaging, first-photon imaging overcomes the reliance of traditional imaging on multi-photon accumulation by capturing the temporal statistical characteristics of the first photon of each pixel, realizes the ultra-efficient image reconstruction of one photon per pixel and provides a key solution for extreme scenarios such as ultra-low-light imaging and long-range remote sensing. This paper systematically reviewed the principles and research progress in first-photon imaging. Firstly, the hardware foundation of single-photon detection technology was introduced, including the core role of single-photon avalanche diode and time-dependent single-photon counting modules. Secondly, the fundamental principles of first-photon imaging were elaborated, covering the statistical modeling of first-photon signals and reconstruction methods of object reflectance and depth information. Then reviewed the research progress in this field including applications in target detection, first-photon ghost imaging, non-line-of-sight imaging and other related fields, as well as key breakthroughs in algorithm optimization and quantum imaging. Finally, the advantages and existing challenges of first-photon imaging technology were summarized, and the future development directions were prospected.

收稿日期: 2025-09-15; 修回日期: 2025-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (92365115, 12474480, 62571047); 航空科学基金联合资助项目 (20240001072001)

第一作者: 王翔, E-mail: wangxiang9190@163.com

通信作者: 张安宁, E-mail: anningzhang@bit.edu.cn

Key words: first-photon imaging; LiDAR; maximum likelihood estimation; single-photon detection

引言

在现代成像技术和量子科技的发展进程中,低光子成像技术因其在极端弱光条件下具有关键作用,始终是研究人员重点关注的领域之一^[1]。随着工业检测、生物医学成像及遥感探测等应用场景对成像性能的要求不断提升^[2],该技术正朝着高灵敏度^[3]、高低照度适应性^[4]以及远距离强探测能力^[5]等方向迅速发展。例如,在生物荧光显微成像^[6]中,为避免强光对活体细胞的光毒性损伤,需要在纳瓦级甚至皮瓦级的极低光通量下实现清晰成像;在深空探测^[7]中,遥远天体反射的光子信号极其微弱,且常伴随复杂的背景噪声,传统成像系统难以捕捉有效信息。这些实际需求推动着成像技术从依赖充足光照的传统模式,向适应光子数稀缺环境的新型范式转变。

然而,传统成像系统的探测灵敏度受限于读出噪声和暗电流,在入射光强极低时,图像会被严重的噪声淹没。单光子雪崩二极管(single-photon avalanche diode, SPAD)的出现为突破这一局限提供了关键支撑^[8-9],其能够以数十皮秒的精度实现对单个光子的时间分辨探测,使成像系统对微弱光信号的捕捉能力达到了量子水平。基于 SPAD 的功能,首先发展出了光子计数成像技术^[10],其核心思路是通过积累大量光子事件来降低统计噪声。例如,传统激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)系统^[11]通过构建光子到达时间直方图,利用峰值检测确定目标距离,同时通过光子计数估算反射率。但这种方法的性能高度依赖光子数量^[12],距离测量需要至少数十个光子才能抑制背景噪声干扰,而反射率的准确重建往往需要数百个光子,这直接导致成像效率低下或误差显著。

首光子成像(first-photon imaging, FPI)^[13]的提出革新了传统单光子计数成像的框架。与依赖多光子积累的传统方案不同,FPI 仅利用每个像素探测到的首个光子进行成像,其核心创新体现在两个方面:一是首次将探测到首光子前的激光脉冲发射次数作为反射率估计的关键依据,通过统计建模将离散光子事件与场景特性建立关联;二是实现了每像素最多一个光子的超高效成像,彻底摆脱了对大量光子积累的依赖。通过对首光子信号的精准时间测量和物理建模,结合场景的空间相关性约束,FPI 能够在极端低光环境下实现高质

量重建,大幅提升了成像效率。在低信噪比条件下^[14],该技术通过计算方法抑制噪声,可重建出传统单光子成像无法分辨的细节。在遥感和安防领域^[15],首光子成像还能够降低对激光功率的需求,延长探测距离,同时缩短数据采集时间,适用于无人机巡检、夜间安防监控等场景。

本文将系统回顾 FPI 的发展历程、核心原理与技术进展,总结现有代表性成果与典型应用场景,分析该技术当前面临的挑战与未来发展趋势,旨在为相关领域的科研人员和工程应用提供参考和借鉴。

1 单光子探测技术

单光子探测器是 FPI 的硬件基础,本章将简要介绍 FPI 中的单光子探测技术。其中,SPAD 作为核心器件,能够实现对单个光子的时间标记^[16]。其基本结构基于反向偏置的 PN 结,当反向电压超过击穿电压时,SPAD 进入盖革模式。在该模式下,单个光子在耗尽区激发的电子-空穴对会触发雪崩倍增效应,产生可探测的电流脉冲,从而实现对单光子事件的识别。与传统光电探测器不同,商用 SPAD 无法直接区分入射光子的数量,仅能记录光子的有无^[17],因此需工作在光子计数模式,即通过脉冲信号的数量间接反映入射光子的统计特性。常规单光子成像通过对所有探测到的光子进行计数来最大化信息完整性,而 FPI 是在此基础上,为满足高速、低功耗需求发展出的一个分支,其通过仅处理首个光子事件,以牺牲部分信息为代价换取了极高的探测效率。

为实现光子到达时间的高精度测量,FPI 系统通常集成有时间相关单光子计数(time-correlated single-photon counting, TCSPC)模块^[18]。该模块以皮秒级分辨率记录激光脉冲发射与光子探测之间的时间间隔,可构建光子到达时间的直方图。在 FPI 中,TCSPC 不仅记录每个像素 (x, y) 的光子到达时间 $t(x, y)$,还同步统计激光脉冲发射次数 $n(x, y)$,这两类参数共同构成场景重建的原始观测数据。

单光子探测的统计特性对成像质量有直接影响,主要噪声和误差来源包括:1) 暗计数,是由热激发或隧道效应产生的虚假触发事件,其典型值低于每秒 2×10^4 个;2) 死时间,即探测器在雪崩后的淬灭与恢复阶段无法响应新光子事件的时间;3) 后脉冲效应,是由雪崩过程中陷阱电荷延迟释

放引起的虚假脉冲现象。这些因素会引入统计偏差,因此 FPI 相关算法需通过概率建模方法对其影响进行定量补偿,以提升成像精度。

2 首光子成像的基本原理

传统的自由运转模式在每个激光脉冲周期内持续探测并记录所有光子,能捕获完整的光子信息实现高精度成像,但面临数据量大、处理复杂的挑战,而 FPI 作为一种效率权衡策略,仅记录首个到达光子的数据,以牺牲信息完整性为代价,显著降低了数据量与处理负担。FPI 的实现依赖于单光子级探测精度与先进的统计建模,其核心是通过捕捉每个像素的首达光子携带的信息,反演场景的三维结构与反射特征。本章从 FPI 的实验装置和场景重建算法出发,介绍其基本原理。

2.1 首光子成像的实验设置与统计建模

FPI 是一种仅利用每个像素的首个探测光子实现场景重建的计算成像方法,其核心创新在于对光子到达过程的统计建模。实验平台如图 1 所示,由激光器、扫描振镜、成像单元、TCSPC 模块以及数据处理单元构成。为模拟复杂光照背景,系统还可引入白炽灯作为外加背景光源,调整其强度使每个首光子事件来自信号光与背景光的概率大致相当,以验证算法在高背景噪声条件下的鲁棒性。

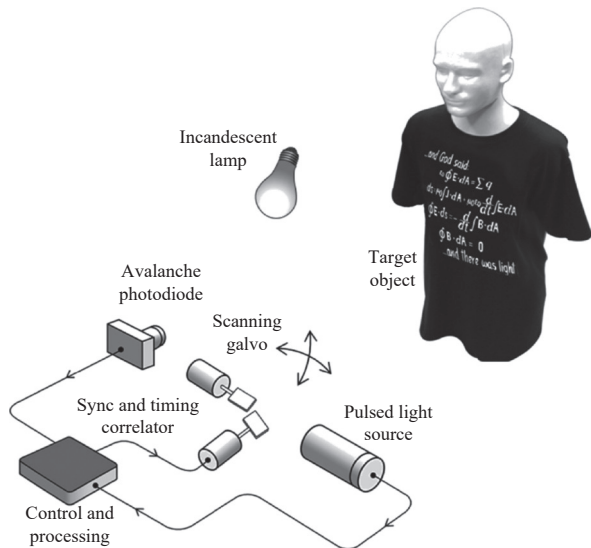


图 1 首光子成像实验设置^[13]

Fig. 1 Experimental setup of first-photon imaging^[13]

在低光子通量条件 $\gamma(S + BT_r) \ll 1$ 时,光子到达事件可近似为泊松过程^[19],其中, γ 为探测效率, S 为单位反射率的信号光子数, B 为背景光子率,

T_r 为脉冲周期。单像素首次探测到光子的脉冲数 $n(x,y)$ 服从几何分布^[20],其表达式为

$$P_r[n(x,y) = k] = P_0(x,y)^{k-1} \cdot [1 - P_0(x,y)], \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: $P_0(x,y) = \exp\{-\gamma[\alpha(x,y)S + BT_r]\}$, 为单次脉冲未探测到光子的概率^[20], $\alpha(x,y)$ 为目标反射率。这一模型揭示了低通量成像中反射率、背景噪声与探测概率之间的指数关系,反射率越高,首光子出现所需的平均脉冲数越少。上述“仅记录首个光子”的工作机制,定义了 FPI 的特性,也揭示了其核心技术权衡。与能够记录所有光子的自由运转模式相比, FPI 实质上是以放弃信息深度为代价,换取数据采集效率的提升。自由运转模式虽信息维度丰富,但其系统复杂度与数据处理负担是其在实时应用中的主要瓶颈。首光子模式正是针对此瓶颈的优化,但其代价是受死时间和噪声影响显著,需在算法和处理上进行研究开发以弥补该缺陷。为了实现高精度的深度与反射率重建,需在建模中引入空间先验,利用场景在几何与光学属性上的空间相关性,对单像素高方差的点式估计进行全局优化与正则化处理。

2.2 深度与反射率信息的估计方法

深度与反射率信息重建算法由三个主要步骤组成,每一步均结合空间稀疏性先验,通过严格凸优化实现高效、高质量的求解。下面分别介绍这三步重建算法。

1) 反射率估计。在无背景光条件下,最大似然 (maximum likelihood, ML) 反射率估计值为: $\hat{\alpha}_{ML}(x,y) \approx 1/\{\gamma S[n(x,y) - 1]\}$, 其在 $n(x,y) \gg 1$ 时近似成立。然而在背景光存在时,该估计会严重偏离真实值,因此需要联合空间先验进行全局优化。具体可构造负对数似然函数:

$$L(\alpha(x,y)|n(x,y)) = \gamma[\alpha(x,y)S + BT_r][n(x,y) - 1] - \ln\{\gamma[\alpha(x,y)S + BT_r]\} \quad (2)$$

并在小波域施加稀疏性正则化:

$$\min_{\alpha(x,y) \geq 0} (1 - \beta) \sum_{x,y} L(\alpha(x,y)|n(x,y)) + \beta \|\Phi[\alpha(x,y)]\|_1 \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 代表小波变换; $\beta \in [0, 1]$ 用于控制数据一致性与先验约束的平衡。式 (3) 属于严格的凸优化问题,可利用 SPIRAL-TAP 等快速迭代法求解。

2) 背景噪声剔除。在高背景噪声条件下,部分首光子事件来源于背景光,其到达时间均匀分布于 $[0, T_r]$, 与真实信号光子 (到达时间集中分布) 形成显著统计差异。FPI 利用邻域时延统计量

(rank-ordered absolute differences, ROAD)进行剔除:

$$f_{\text{ROAD}}(x, y) = \sum_{i=1}^4 \min_i \{|t(x_i, y_i) - t(x, y)|\} \quad (4)$$

式中, (x_i, y_i) 为 (x, y) 的 8 个邻域像素点。如式(5)所示, 结合第一步反射率 $\alpha(x, y)$ 及泊松过程概率, 设定阈值进行二元假设检验, 将高概率为背景光子的到达时间剔除。

$$\begin{cases} P_{\text{bg}} = \frac{BT_r}{\alpha(x, y)S + BT_r} \\ P_{\text{sig}} = \frac{\alpha(x, y)S}{\alpha(x, y)S + BT_r} \end{cases} \quad (5)$$

3) 三维形貌重建。对剩余的信号光子, 基于其到达时间 $t(x, y)$ 构建距离估计: $Z(x, y) = c \cdot t(x, y)/2$, 其中 c 为光速。由于信号光子到达时间概率密度近似为 $s(t - 2Z/c)$, 可将三维重建表述为优化问题:

$$\min_{Z(x, y) \geq 0} (1 - \beta) \sum_{x, y} L(Z(x, y) | t(x, y)) + \beta \|\Phi[Z(x, y)]\|_1 \quad (6)$$

式中: $L(\cdot)$ 为基于实测脉冲形状的负对数似然函数。该优化同样通过稀疏性正则化利用场景的空间相关性, 并对剔除像素进行几何补全。经过各步骤处理后的结果如图 2 所示。

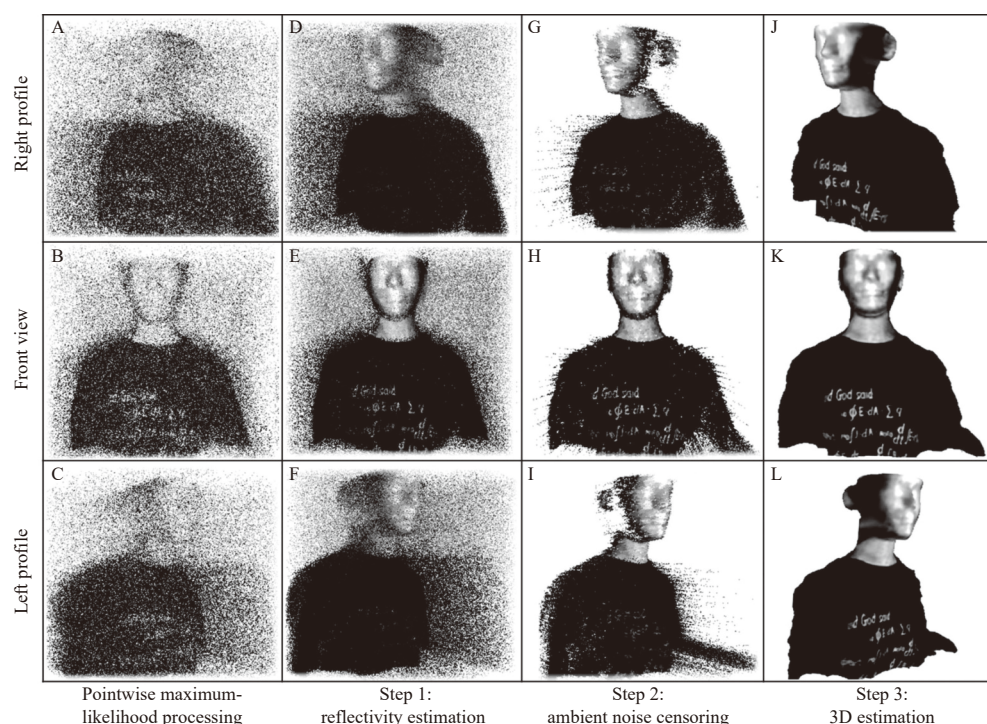


图 2 深度和反射率的重建结果^[13]

Fig. 2 Reconstruction results of depth and reflectivity^[13]

3 首光子成像领域的研究进展

自 2014 年 KIRMANI A 等人首次提出 FPI 方法以来^[13], 该领域迅速成为低光子成像与计算成像研究的热点。国际上, 来自麻省理工大学和斯坦福大学的团队在算法优化、硬件改进及跨领域应用等方面取得重要进展。国内方面, 中国科学技术大学徐飞虎团队基于首光子成像算法发展出的“光子效率”算法, 利用 SPAD 阵列实现远距离单光子成像^[5]、非视域成像^[21]与 SPAD 阵列化^[22]; 北京航空航天大学孙鸣捷团队致力于传统 FPI 算法的改进^[23]; 上海交通大学石剑虹团队则将 FPI 应用于鬼成像领域^[24-25]。当前, FPI 已从原理验证阶段

逐步走向工程化与多场景应用, 呈现出算法与硬件协同发展的趋势, 下面将重点介绍该领域的若干关键研究进展。

3.1 光子效率算法

基于 SPAD 阵列的“光子效率”算法是由 FPI 发展出的一种高效成像方法。该方法通过设定固定采集时间, 显著降低了时间成本。近年来, 国内外多个研究团队围绕其统计建模、噪声抑制与光子堆积校正等技术方向持续推进算法创新, 有效提升了低光子通量条件下的成像性能。在该领域中, 提出“首光子算法”的团队同时也是光子效率算法的主要推动者, 这类方法在更广义层面上常

被界定为广义光子算法。SHIND 等人^[26]针对 FPI 随机驻留时间无法适配阵列的缺陷,提出固定驻留时间框架:通过泊松过程建模光子探测统计,结合总变分正则化约束场景的横向平滑性,在 32×32 像素 SPAD 阵列上实现了 384×384 像素复合成像,实验装置与结果如图 3 所示。该算法通过邻域秩排序均值滤波剔除背景噪声,深度误差低至 2 cm,较传统对数匹配滤波提升了两个量级,在相同总采集时间下性能与 FPI 相当,且兼容阵列并行探测。此外,团队还通过纵向稀疏约束^[27]对 SPAD 阵列纳秒级时间戳的粗分辨率问题进行处理,使信号光子筛选效率提升了 40%。

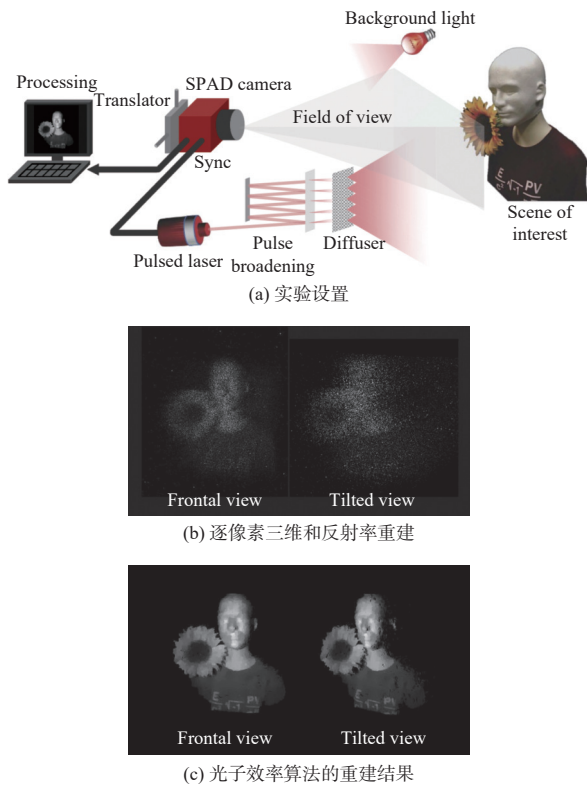


图 3 基于 SPAD 阵列的“光子效率”算法^[26]

Fig. 3 Photon efficiency algorithm based on SPAD array^[26]

针对 SPAD 在高光子通量下的堆积效应,斯坦福 HEIDE 团队^[28]提出概率堆积校正模型:将 SPAD 的死时间纳入观测模型,用多项式分布替代传统泊松假设,联合估计深度与反射率。该算法突破低通量局限,在 1 光子/脉冲的最优通量区实现了亚皮秒级时间精度,较 Coates 传统校正方法,深度误差降低了一个量级,且兼容 450 nm/670 nm 多波长场景,为高动态范围成像提供了技术方案。由于光子效率算法的数据格式为三维光子数据立方体,所以很容易利用深度神经网络强大的

表现能力重建数据,国内外相关工作包括:残差网络重建^[29]、非局域特征重建^[30]、域对抗自适应^[31]、多重频拓展成像距离^[32]等。国内方面,徐飞虎团队在 2021 年分别实现了 201.5 km 的远距成像和 1.43 km 的非视域成像,在成像距离上实现重大突破^[5,22]。

3.2 算法优化

FPI 算法的核心在于从稀疏且含噪的单光子数据中精准反演场景信息^[33],其优化主要围绕改进实验设置^[34]、提升重建精度^[35]、增强抗噪能力和实现反射率与深度的解耦重建展开。在反射率与深度的联合重建框架中,传统方法依赖 ML 估计与空间正则化的结合。2020 年,北京航空航天大学孙鸣捷团队^[36]提出了融合 l_1 范数和全变分正则化的混合惩罚模型:

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha} \sum_{x,y} L(\alpha(x,y)|n(x,y)) + \tau(\|\theta\|_1 + \mu\|\alpha\|_{TV}) \quad (7)$$

式中: $\theta = W^T \alpha$ 为小波系数; μ 为平衡参数; τ 为权重系数。实验表明,该方法对测试图像的平均均方根误差 (root mean square error, RMSE) 较单一 l_1 范数降低了 12.83%, 较全变分正则化降低了 5.68%, 在保留边缘的同时有效抑制了阶梯效应。

2022 年,该团队又在深度重建的独立性优化方面取得重要突破^[23]。传统方法中,深度估计依赖反射率重建结果,导致低信噪比场景下性能骤降。基于此该团队提出了 K-奇异值分解 (KSVD) 的深度去噪模块,如图 4 所示,通过求解如式(8)所示的优化问题,从原始时间戳数据中分离信号与噪声。与 ROAD 滤波相比,该方法在信背比 (signal to background ratio, SBR) 为 1.0 时使深度重建的 RMSE 降低了 36.2%, 尤其在深度突变区域,其表现更优,最低可分辨 3 mm 高度差,分辨率较传统方法提升了一倍。

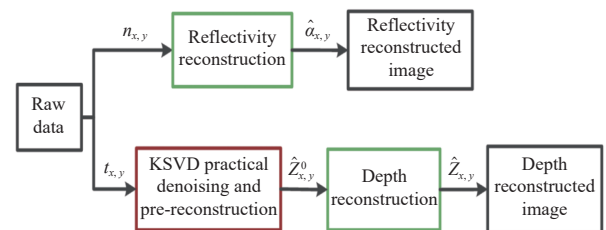


图 4 基于 KSVD 的独立深度重建流程^[23]

Fig. 4 Independent deep reconstruction process based on KSVD^[23]

$$\min_{D,X} \{\|Y - DX\|_2^2\} \quad \text{s.t. } \forall i, \|x_i\|_0 \leq T_0 \quad (8)$$

式中: Y 为收集到含有噪声的原始数据; D 为一组完备的基函数, 用于稀疏表示图像中的局部结构; X 为在此系数基下的系数。

3.3 目标检测

FPI 在目标检测领域的核心价值在于通过单光子级时间分辨与统计建模实现高效信号提取。徐飞虎团队研发的 8.2 km 超分辨率单光子成像系统^[37]与刘雪峰团队提出的基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 的被动点目标检测方案^[38], 为该领域重要突破的代表。

在远距离目标检测^[39]中, 8.2 km 成像系统采用 1550 nm 波长激光与基于 InGaAs/InP 的 SPAD, 结合亚像素扫描与 3D 反卷积算法突破衍射极限。该系统通过压电倾斜平台实现 1/8 视场间隔的精细扫描, 将空间分辨率提升至 5.5 cm, 是系统衍射极限的 2 倍。该系统在昼夜环境下均能识别 8.2 km 外人体模型的不同姿势, 实验结果如图 5 所示, 信号光子数约 1 个/像素, SBR 低至 0.16~0.24。其技术关键在于 3D 反卷积算法对多脉冲返回信号的处理, 通过构建时空核函数 $g = g_{xy} \otimes g_t$ (g_{xy} 为空间高斯分布, g_t 为时间抖动分布), 结合泊松过程建模 $Y \sim \text{Poisson}(g * R_D + B)$ (R_D 为目标场景的反射率、深度形成的三维数据立方体; B 为背景噪声矩阵),

实现低光子条件下的超分辨率重建。

基于 DMD 的被动单光子检测方案则通过压缩感知与首光子时间分析实现高效点目标识别。系统采用 DMD 生成二进制随机调制矩阵, 对场景进行空间光调制, 配合 TCSPC 模块记录首光子到达时间。通过阈值法将时间序列转化为二值检测结果, 结合压缩感知算法 $\min_x (\|y - Ax\|_2^2 + \tau \|x\|_1) / 2$, 在 2.2% 采样率下即可实现 64×64 像素点目标的准确检测。针对运动目标, 相邻帧差分算法通过计算邻域强度和差值 $\Delta O_{k \pm 1}$, 有效滤除随机噪声, 结果如图 6 所示, 该算法可以保留目标运动轨迹的连续性, 检测准确率达 99% 以上。

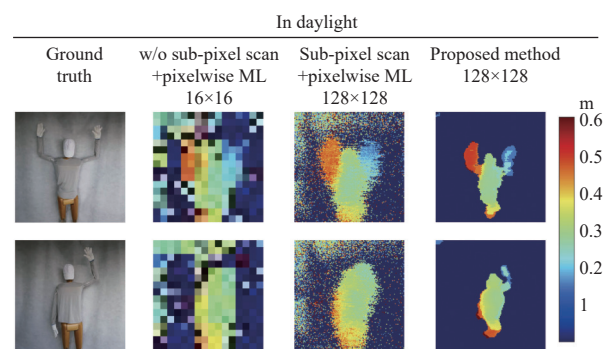


图 5 基于首光子信息的远距离目标识别^[37]

Fig. 5 Long-range target recognition based on first-photon information^[37]

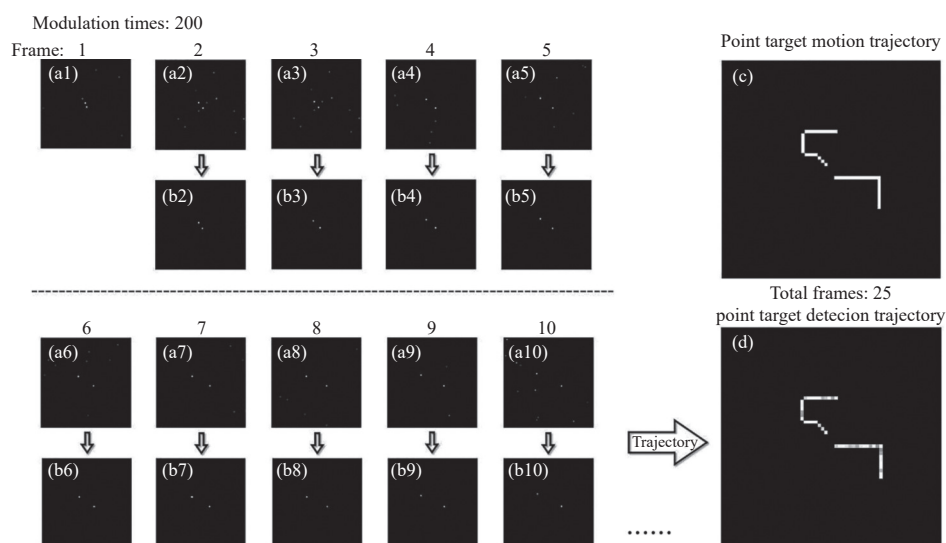


图 6 基于首光子信息的动态多目标检测^[38]

Fig. 6 Dynamic multi-object detection based on first-photon information^[38]

3.4 首光子鬼成像

首光子鬼成像 (first-photon ghost imaging, FPGI) 将鬼成像^[40]的空间调制框架与首光子探测的时间

统计特性相结合, 在极端低光条件下实现了超高效成像^[41]。其核心突破在于利用每个调制图案对应的首个光子信号反演目标信息^[42], 将成像所需光

子数进一步降至每像素 0.1 个以下, 较传统鬼成像效率提升了 3 个数量级。

传统鬼成像依赖多光子累积的强度关联运算, 而 FPGI 通过单光子探测器记录首个光子到达前的脉冲数 n_i , 建立其与目标反射率的统计映射^[43], 在低光通量下, 首光子探测前的脉冲数服从几何分布, 通过最大似然估计可得信号光子数与脉冲数的反比关系 $\hat{S}_{ML} \propto 1/n_i$, 再结合预调制图案 R_i 的关联运算实现图像重建:

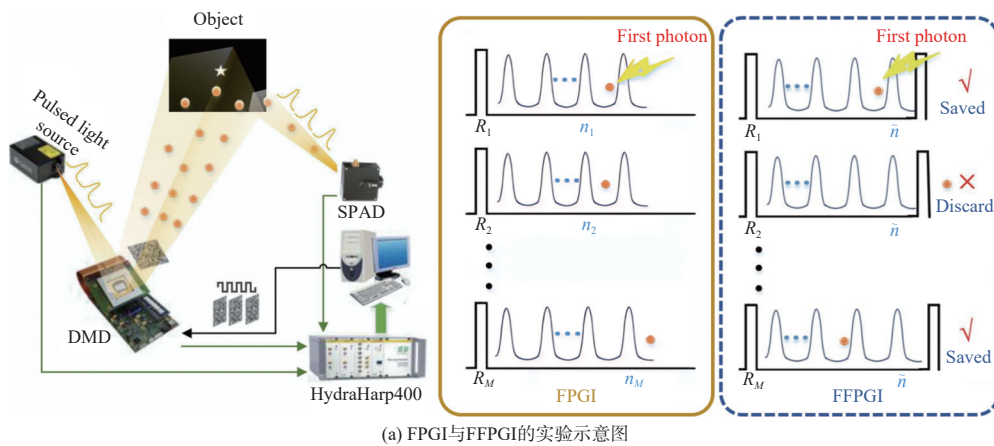
$$O_{FPGI}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{n_i} (R_i(x, y) - \overline{R_i(x, y)}) \quad (9)$$

实验中, 该方法在 96×128 像素分辨率下, 仅

需 835 个光子 (0.068 光子/像素) 即可获得峰值信噪比为 8 dB 的图像, 验证了其超高效特性。快速首光子鬼成像 (fast first-photon ghost imaging, FFPGI)^[25] 如图 7 所示, 其通过设定阈值, 保留首光子在 $\bar{n}$ 脉冲内到达的 K 个有效图案, 重建公式可简化为

$$O_{FFPGI}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (R_j(x, y) - \overline{R_j(x, y)}) \quad (10)$$

FFPGI 因无需等待低反射区域的首光子探测, 将成像时间压缩至 0.1 秒, 仅为 FPGI 的 1/10。在噪声抑制方面, ROAD 滤波算法通过计算像素与其 8 邻域的强度差异识别噪声, 迭代后可消除 90% 以上的背景干扰。



Time/s	0.05	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0
FPGI						
PPP	0.041	0.081	0.16	0.41	0.65	0.81
PSNR	2.3	2.6	3.6	6.3	8.1	9.1
FFPGI						
PPP	0.018	0.068	0.12	0.31	0.43	0.49
PSNR	6.5	8.5	9.0	9.7	9.4	8.2

(b) FPGI与FFPGI的实验结果

图 7 FPGI 和 FFPGI 的实验过程和结果^[25]

Fig. 7 Experimental processes and results of FPGI and FFPGI^[25]

3.5 非视域成像

FPI 技术还为非视域 (non-line-of-sight, NLOS) 成像提供了全新解决方案^[44], 突破了传统视距限制, 尤其在光子稀缺与高实时性需求场景中展现出显著优势^[45]。清华大学团队提出的时间序列首光子成像方法, 是该领域的代表性成果^[46], 有效解决了传统光子事件直方图方法固定积分时间长、光子效率低的核心问题。该方法的核心创新在于重构 NLOS 检测流程: 摒弃固定测量时间模式, 采

用时间标记-时间分辨模式运行 TCSPC 设备, 连续记录多个时间戳的首光子到达事件, 当获取足够重建信息后自适应停止测量, 大幅缩短数据采集周期。其物理建模基于光锥变换框架, 将可见墙探测点与隐藏场景的光子散射关系建模为

$$I(z, t, \alpha) = b + \int_{\Omega} \frac{\alpha(x)}{\|x - z\|^4} \delta(ct - 2\|x - z\|) dx \quad (11)$$

式中: I 为探测光子强度; z 为墙面上点的位置; α 为隐藏目标反射率; b 为缓慢变化的背景噪声, 可视

为常数; Ω 为待重建的目标区域; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。为解决 NLOS 成像的病态性与噪声干扰, 团队将首光子统计特性融入最大似然估计, 引入 L_1 稀疏正则化与总变分正则化, 通过梯度下降与分裂 Bregman 算法求解, 平衡数据保真度与场景空间连续性。实验对三角形与字母“H”隐藏目标重建时, 采用 515 nm 脉冲激光与 4 ps 分辨率 TCSPC 模块, 结果如图 8 所示, 结构相似性 (structure similarity index measure, SSIM) 可达 0.65, 显著优于相量场方法 (SSIM<0.1), 且成像时间最短可压缩至 0.8 s。

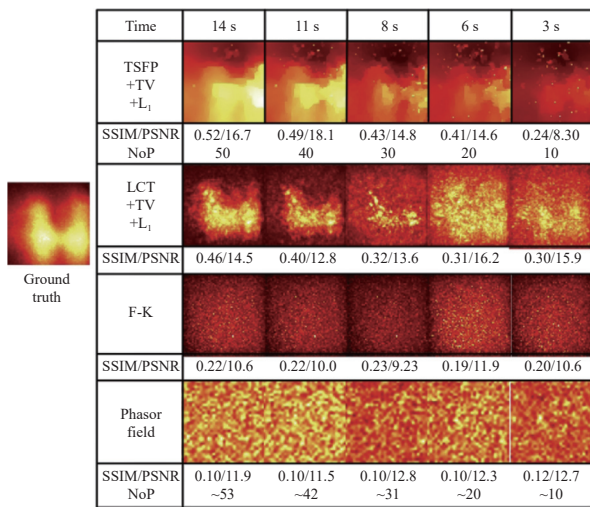


图 8 基于时间序列首光子方法的 NLOS 成像结果^[46]

Fig. 8 Experimental results of NLOS imaging based on time-sequential first photon method^[46]

3.6 高光子效率的量子成像

首光子成像技术在量子光学领域的拓展, 为量

子现象可视化提供了低光子解决方案。北京理工大学的张安宁团队通过构建如图 9 所示的偏振-轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 双光子混合纠缠系统, 结合首光子成像与深度学习, 实现了量子擦除效应的高效观测, 无需穷举 OAM 模式且每像素光子数低于 1 个^[47]。

该研究的核心是偏振-OAM 双光子混合纠缠态设计与量子擦除调控。实验首先构建国际首创的双光子干涉纠缠光源和高维纠缠态, 再通过两探测臂放置线偏器 (θ_1, θ_2) 实现路径信息擦除: 当 $\theta_2=0^\circ/90^\circ$ 时, 光子 1 的 OAM 信息可确定, 无干涉; 当 $\theta_2=45^\circ/135^\circ$ 且 $\theta_1=45^\circ/135^\circ$ 时, OAM 路径信息被完全擦除, 此时花瓣状干涉图样重现。验证了量子擦除的可控性。针对连续波纠缠光源无脉冲触发的难题, 团队创新数据采集方式: 以光子 2 为触发信号, 以光子 1 的首光子到达时间为停止信号, 构建包含时空信息的 4D 数据立方体。同时设计首光子物理增强双分支残差注意力网络, 损失函数融合均方误差 (mean squared error, MSE)、SSIM 与 Kullback-Leibler (KL) 散度, 保证重建精度与光子统计一致性。实验结果显示, 该方案在 64×64 分辨率、全部像素不超过 1 光子/像素的光能条件下, SSIM 达 0.861 0、MSE 低至 0.001 6, 显著优于传统 SPIRAL-TAP 算法, 成功实现可视化干涉图样的消失与重现。该工作不仅深化了对量子路径信息的理解, 更将首光子成像拓展应用至量子纠缠领域, 为低光子量子现象观测提供了新范式。

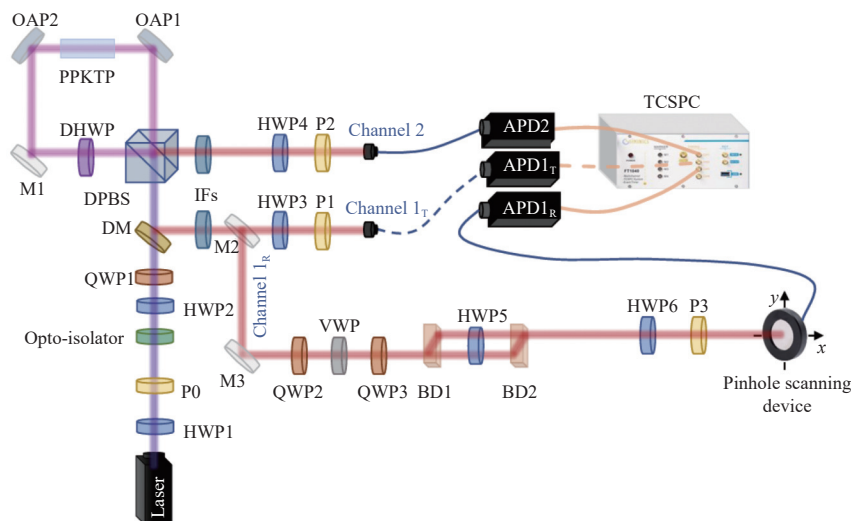


图 9 混合纠缠量子擦除的实验装置^[47]

Fig. 9 Experimental setup for hybrid entanglement quantum erasure^[47]

2020 年,北京理工大学团队还在实验室利用自发参量下转换产生的光子作为单光子源,采用 DMD 对单光子波包进行调制,分别实现了单光子光源的单像素成像和计算鬼成像^[48]。实验方案如图 10 所示,结果表明,在光照强度相同的情况下,单光子作为光源的成像质量优于激光光源,验证了单光子成像雷达的量子优势。

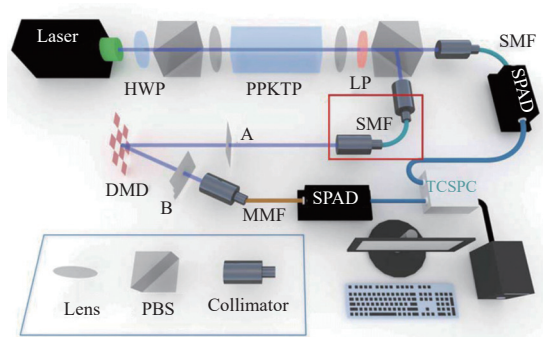


图 10 单光子光源的单像素成像和计算鬼成像实验方案^[48]

Fig. 10 Experimental scheme for single-pixel imaging and computational ghost imaging via single-photon illumination^[48]

4 总结和展望

FPI 作为低光子成像领域的革命性技术,凭借其独特优势为极端光照条件下的成像需求提供了全新解决方案:一方面,其通过各像素首个光子的时间统计特性,实现每像素 1 个光子的高质量重建,突破了传统成像对多光子积累的依赖;另一方面,通过结合物理建模与空间先验正则化,即使在信背比极低的复杂环境中,仍能有效区分信号与噪声。然而,FPI 的发展仍面临多重挑战:在探测器层面,SPAD 的暗计数、后脉冲效应及时间抖动会引入虚假光子事件,限制低背景噪声场景下的成像精度;在复杂非视域场景或动态目标检测中,光子散射路径复杂,现有统计模型难以精准描述多路径干扰,算法的鲁棒性与泛化能力不足,不同场景下需手动调整正则化参数,制约了该技术的工程化推广。

未来,FPI 的发展将聚焦于多维度突破。在技术拓展方面,向动态场景和复杂散射介质方向延伸,结合非视域成像与超分辨率算法,突破传统视距与衍射极限。在多模态融合方面,与光谱成像、偏振成像结合,通过首个光子的时间-光谱-偏振多维信息提升场景解析能力。在算法革新方面,引入

深度学习实现端到端重建,利用神经网络强大的特征提取能力优化噪声抑制与动态建模,减少对人工参数的依赖。在硬件方面,开发高时间分辨、低噪声的 SPAD 器件,提升时间分辨率与光子计数效率。最终推动 FPI 从实验室研究走向工业化应用,在生物医学、遥感、安防等领域实现规模化应用,真正成为极端环境下的核心成像技术。

参考文献:

- [1] PU Y Y, ZHU C Y, YAO G X, et al. Computational imaging based on single-photon detection: a survey[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2025, 58(8): 251.
- [2] BRUSCHINI C, HOMULLE H, ANTOLOVIC I M, et al. Single-photon avalanche diode imagers in biophotonics: review and outlook[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 87.
- [3] GUAN Y Q, LI H C, ZHANG Y, et al. Photon-efficient camera with in-sensor computing[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3201.
- [4] LIU X L, SHI J H, SUN L, et al. Photon-limited single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [5] LI Z P, YE J T, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [6] LAISSUE P P, ALGHAMDI R A, TOMANCAK P, et al. Assessing phototoxicity in live fluorescence imaging[J]. *Nature Methods*, 2017, 14(7): 657-661.
- [7] NATARAJAN C M, TANNER M G, HADFIELD R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(6): 063001.
- [8] WANG F, ZHAO Y, ZHANG Y, et al. Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single-photon detectors[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(29): 5561-5566.
- [9] CECCARELLI F, ACCONCIA G, GULINATTI A, et al. Recent advances and future perspectives of single-photon avalanche diodes for quantum photonics applications[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2021, 4(2): 2000102.
- [10] SHIN D, XU F H, WONG F N C, et al. Computational multi-depth single-photon imaging[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 1873-1888.
- [11] RAJ T, HASHIM F H, HUDDIN A B, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. *Electronics*, 2020, 9(5):

- 741.
- [12] PAWLIKOWSKA A M, HALIMI A, LAMB R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919-11931.
 - [13] KIRMANI A, VENKATRAMAN D, SHIN D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
 - [14] HUA K J, LIU B, CHEN Z, et al. Efficient and noise robust photon-counting imaging with first signal photon unit method[J]. *Photonics*, 2021, 8(6): 229.
 - [15] 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.
 - [16] OH M S, KONG H J, KIM T H, et al. Time-of-flight analysis of three-dimensional imaging laser radar using a geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(2R): 026601.
 - [17] BEER M, HAASE J F, RUSKOWSKI J, et al. Background light rejection in SPAD-based LiDAR sensors by adaptive photon coincidence detection[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4338.
 - [18] BULLER G, WALLACE A. Ranging and three-dimensional imaging using time-correlated single-photon counting and point-by-point acquisition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 1006-1015.
 - [19] 涂敏, 鄢秋荣, 郑勇健, 等. 基于深度学习的单光子非视域成像泊松降噪[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(20): 86-93.
TU Min, YAN Qiurong, ZHENG Yongjian, et al. Poisson denoising of single photon non-visual imaging based on deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 86-93.
 - [20] 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.
 - [21] WU C, LIU J J, HUANG X, et al. Non-line-of-sight imaging over 1.43 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(10): e2024468118.
 - [22] SHIN D, XU F H, VENKATRAMAN D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.
 - [23] CHENG A Y, XIN-YU ZHAO B, LI-JING LI C, et al. First-photon imaging with independent depth reconstruction[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(3): 036103.
 - [24] 刘夏林. 单光子探测下少光子鬼成像[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
LIU Xialin. Photon-limited ghost imaging under single photon detection[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
 - [25] LIU X L, SHI J H, WU X Y, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5012.
 - [26] 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.
 - [27] KITICHOTKUL R, RAPP J, GOYAL V K. The role of detection times in reflectivity estimation with single-photon lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2024, 30(1): 8800114.
 - [28] HEIDE F, DIAMOND S, LINDELL D B, et al. Sub-picosecond photon-efficient 3D imaging using single-photon sensors[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17726.
 - [29] YANG X, TONG Z Y, JIANG P F, et al. Deep-learning based photon-efficient 3D and reflectivity imaging with a 64×64 single-photon avalanche detector array[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32948-32964.
 - [30] PENG J Y, XIONG Z W, TAN H, et al. Boosting photon-efficient image reconstruction with a unified deep neural network[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, 45(4): 4180-4197.
 - [31] CHEN Y W, YAO G X, LIU Y, et al. Deep domain adversarial adaptation for photon-efficient imaging[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(5): 054048.
 - [32] DAI C, YE W L, YU C, et al. Long-range photon-efficient 3D imaging without range ambiguity[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(6): 1542-1545.
 - [33] ALTMANN Y, REN X M, MCCARTHY A, et al. Lidar waveform-based analysis of depth images constructed using sparse single-photon data[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(5): 1935-1946.
 - [34] HALIMI A, CIUCIU P, MCCARTHY A, et al. Fast adaptive scene sampling for single-photon 3D lidar images[C]//2019 IEEE 8th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP). Le Gosier, Guadeloupe: IEEE, 2019: 196-200.
 - [35] YANG X, XIAO S J, ZHANG H C, et al. PE-RASP:

- range image stitching of photon-efficient imaging through reconstruction, alignment, stitching integration network based on intensity image priors[J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 2817-2838.
- [36] PENG X, ZHAO X Y, LI L J, et al. First-photon imaging via a hybrid penalty[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 325.
- [37] LI Z P, HUANG X, JIANG P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4076-4087.
- [38] 李昌恒, 刘璠, 王小庆, 等. 基于首光子时间的被动单光子点目标检测[J]. *光学学报*, 2024, 44(9): 0911002.
LI Changheng, LIU Fan, WANG Xiaoqing, et al. Passive single photon point target detection based on first photon time[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 0911002.
- [39] SHAPIRO J H. First-photon target detection: Beating Nair's pure-loss performance limit[J]. *Physical Review A*, 2022, 106(3): 032415.
- [40] SHAPIRO J H, BOYD R W. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 949-993.
- [41] LIU X L, SHI J H, CHEN H C, et al. First-photon ghost imaging at low light level[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California, USA: IEEE, 2017: AM4B. 6.
- [42] EDGAR M, SUN M J, SPALDING G, et al. First-photon 3D imaging with a single-pixel camera[C]//Frontiers in Optics 2016. Rochester, New York, USA: APS, 2016: FF1D. 2.
- [43] LIU X L, SHI J H, CHEN H C, et al. First-Photon Ghost Imaging[J]. arXiv, 2017, 1706.06741.
- [44] LIU J J, ZHOU Y J, HUANG X, et al. Photon-efficient non-line-of-sight imaging[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2022, 8: 639-650.
- [45] XU F H, SHULKIND G, THRAMPOULIDIS C, et al. Revealing hidden scenes by photon-efficient occlusion-based opportunistic active imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9945-9962.
- [46] LI Z P, LIU X T, WANG J Y, et al. Fast non-line-of-sight imaging based on first photon event stamping[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(8): 1928-1931.
- [47] YU W K, WU Q Y, CHEN X X, et al. Experimental first-photon visualization of quantum erasure with hybrid entanglement[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025: e01816.
- [48] YANG J Z, LI M F, CHEN X X, et al. Single-photon quantum imaging via single-photon illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(21): 214001.