

基于盖革 APD 阵列的光子计数三维成像

葛 鹏^{1,2}, 郭静菁^{1,2}, 陈 丛^{1,2}, 尚 震^{1,2}, 樊彦恩^{1,2}, 盛 磊^{1,2}

(1. 华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031;
2. 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽合肥 230088)

摘要: 基于盖革 APD 阵列的激光主动探测系统具有较高的灵敏度、空间分辨率和测距精度, 在遥感探测、目标识别等领域具有广泛的应用前景。受探测模式、噪声等因素影响, 盖革 APD 阵列需要大量累积光子探测来实现高精度成像。针对该问题, 基于目前国内规模最大的 InGaAs 盖革 APD 阵列, 搭建了 1 064 nm 激光探测实验装置, 对室外 600 m 外目标进行了成像。通过分析光子计数物理过程, 建立了目标反射率与距离的极大似然估计。结合自然图像稀疏的先验知识, 采用正则化图像重构方法, 改善了累积光子数较少情况下的成像精度。通过对比, 验证了正则化图像重构方法能够抑制光子数涨落引起的参数估计偏差, 提升了成像质量。

关键词: 激光三维成像; 盖革 APD 阵列; 极大似然估计; 正则化方法

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0305007

Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array

Ge Peng^{1,2}, Guo Jingjing^{1,2}, Chen Cong^{1,2}, Shang Zhen^{1,2}, Fan Yanen^{1,2}, Sheng Lei^{1,2}

(1. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China)

Abstract: Laser detection and ranging system based on Geiger-mode APD (GM-APD) array can achieve very high sensitivity, spatial resolution and ranging precision, which has wide applications in remote sensing, target recognition and so on. Limited by the factors of detection mode and noises, GM-APD usually requires large number of photon detections to carry out high imaging precise. For this problem, firstly a ladar system based on national state-of-the-art InGaAs GM-APD array was set up at a wavelength of 1 064 nm. The system was then used for imaging of a building about 600 m away. The photon detection process on GM-APD was analyzed for the reflection and ranging information extractions with maximum likelihood estimation method. For the condition that only a few photons were detected on a pixel, the prior of natural scene's spare property was used to improve the imaging precise based on regularized image reconstruction method. Through comparison, it was verified that the regularized method can reduce the estimation error due to photon detection fluctuation, and improve the imaging quality.

Key words: 3D laser imaging; GM-APD array; maximum likelihood estimation; regularized method

收稿日期:2019-11-01; 修订日期:2019-12-20

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U1433202)

作者简介:葛鹏(1986-),男,高级工程师,博士,主要从事单光子三维成像方面的研究工作。Email: gepeng_cas@qq.com

0 引言

激光主动探测系统的发射波长短,能够实现高分辨率、高精度目标探测。然而随着探测距离的增加,激光回波能量衰减严重,甚至仅有光子量级,传统光电探测手段难以有效检测微弱激光回波信号^[1]。近年来,高灵敏度单光子探测技术成为远距离激光探测的重要手段,主要通过单点、线阵或面阵探测器,结合光束扫描实现探测与成像^[2]。面阵单光子探测器的通道数多,系统发射一个激光脉冲能够同时采集视场的高分辨率三维信息,可进行扫描、凝视等模式工作,实现目标的精确探测、跟踪与识别等目的,是一种高效的探测手段,成为目前国际上的研究热点^[3-5]。

基于半导体技术的盖革 APD 阵列具有较高集成度,是常用的面阵单光子探测器^[6]。采用盖革 APD 阵列的激光三维成像系统体积小、功耗低,在三维地形测绘、目标侦察与监视、激光主动成像精确制导等领域展现出了极大的应用前景。美国麻省理工学院林肯实验室自 2001 年提出了基于盖革 APD 阵列的激光三维成像雷达,并先后研制了 Gen 系列三代系统^[7]、Jigsaw^[8]、ALIRT^[9]、HALOE、MACHETE、AOSTB^[10]等样机,实现了机载高分辨三维地形测绘、穿过遮挡物缝隙成像等试验,将传统激光雷达的探测区域覆盖率提高了 10 倍以上,验证了全天时成像能力。Harris 公司在林肯实验室的技术基础上,基于 128×32 规模 InGaAs 盖革 APD 阵列发展了 IntelliEarth 系统,探测距离大于 6 km,空间分辨率优于 25 cm,实现了大视场机载三维地形测绘^[11]。近年来国内在盖革 APD 阵列方面取得了突破,促进了激光单光子三维成像研究^[12-13]。孙剑锋等人基于 32×32 面阵盖革 APD,搭建了 1 570 nm 激光主动成像系统,最远获得了外场 3.9 km 处的目标轮廓^[14]。谢绍禹等人使用 32×32 盖革 APD 探测器对室外 1 km 楼房进行了成像,并将空间分辨率提高了 4 倍^[4]。

在激光探测系统中,面阵单光子探测器单像元单脉冲平均接收的光子数通常小于 1,像元对回波信号进行概率性探测,记录离散的光子计数,因此与传统的回波能量测量方式具有较大的差异^[15-16]。文中基于目前国内规模最大的面阵单光子探测器,搭建 1 064 nm 激光主动探测实验装置,对室外目标进行凝视探测,

采集回波光子数据。单光子探测器受噪声影响较大,存在死时间、非线性响应等问题,需要大量累积回波脉冲来提高信号探测概率,但耗时较多。为此,除了发展高性能的单光子探测器外,光子计数图像信号处理方法对于实现高质量成像也具有重要作用^[17-18]。文中针对累积光子数较少情况下成像精度低的问题,分析单光子探测过程,通过正则化方法来提升图像重构质量。

1 实验装置

文中基于面阵单光子探测器搭建了激光探测实验装置,通过脉冲法测距原理来实现三维成像。该实验装置的成像原理如图 1 所示,激光发射和接收采用了分离的光学孔径,接收光学系统将回波信号投影在面阵探测器上,不同像元测量不同方向回波到达时间,转换为角度-角度-距离信息。

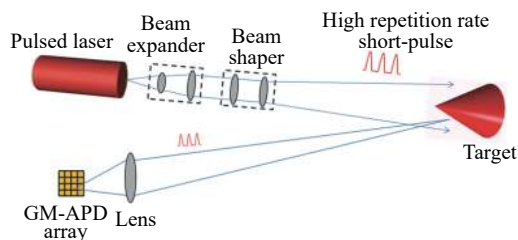


图 1 基于面阵探测器的激光脉冲三维成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of 3D imaging using laser pulses and array detector

该装置采用 Nd:YAG 微片激光器产生中心波长 1 064 nm 的高重复激光脉冲,实现与高帧频单光子探测器同步工作,来测量脉冲飞行时间 (ToF)。该激光器在外部时序驱动下,内部通过被动调 Q 技术产生重复频率 1 kHz、脉冲能量 80 μJ 高峰值功率激光。激光器谐振腔被动调 Q 过程具有较大的不稳定性,脉冲出射时间抖动约为 200 ns,为此利用高速 APD 测量激光脉冲出射信号,用于触发单光子探测器开启一帧探测。

与面阵探测器匹配的激光照明方式主要包括泛光照明与分束照明两种^[19]。为了降低照明光场与接收视场的配准难度,该装置采用了单束激光的泛光照明。原始激光束在横截面上具有不均匀的光强空间分布,呈现高斯分布,如图 2(a) 所示。为了提高照明效率,该装置采用非球面镜光束整形器 piShaper,对光

束轮廓进行了整形, 获得了如图 2(b) 所示的均匀分布平顶光束。整形后输出为准直平顶光束, 光束尺寸为 6 mm, 转化效率几乎为 100%。

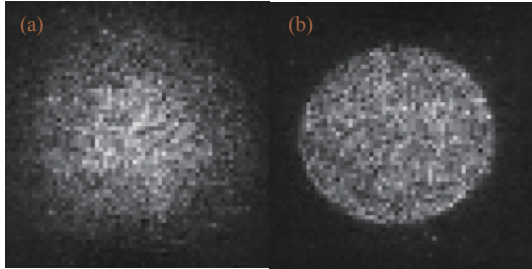


图 2 (a) 原始激光束的光强空间分布, (b) 整形后光束的光强空间分布
Fig.2 (a) Spatial intensity distribution of original laser beam, (b) spatial intensity distribution of laser beam after reshaping

该装置采用口径 25.4 mm、焦距 75 mm 的小口径镜头将激光回波成像在面阵单光子探测器上。为了降低背景光噪声, 镜头前放置了 3 nm 窄带滤波片, 透过率为 80%。面阵单光子探测器及相机实物如图 3 所示, 其基于 InGaAs 材料 APD, 对 0.9~1.6 μm 近红外波段具有较高的量子效率 (>20%@1 064 nm); APD 像元为背照式设计, 像元敏感区域直径 10 μm 和像元间距 50 μm。APD 阵列前方安装了微透镜阵列, 将光学填充因子提高到 60%。探测过程中, 设置 APD 反向偏压 58.5 V, 使其工作在盖革模式; 通过半导体制冷器 (TEC) 将芯片制冷至 -15 °C, 相应暗计数率约为 20 kHz。

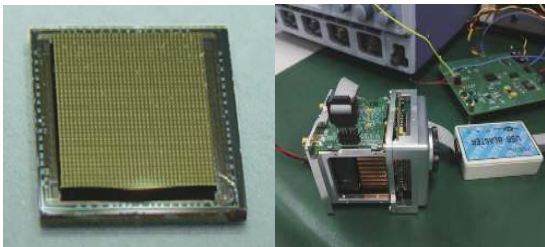


图 3 面阵单光子探测器及相机实物图

Fig.3 Single-photon APD detector array and integrated camera

面阵单光子探测器所有像元工作在帧同步模式, 通过阵列集成读出电路 (ROIC) 采集探测器雪崩时刻, 计时精度 2 ns, 数据读出率最大 20 kHz。计时电路设计的读出位数 12bit, 对应最大门控时间 4 μs。在一次门控时间内, 计时电路不具有多脉冲计数能力, 像元只能记录最早产生原初电子的信号或噪声, 后续

的雪崩事件将被无法被记录。另外, 盖革模式下雪崩过程将很快饱和, 探测器无法分辨入射光子数, 仅能探测光子的有无。

2 单光子探测成像模型

如上所述, 单光子探测器无法直接测量回波信号能量, 而是测量信号到达时间, 其响应灵敏度接近光子散粒噪声, 适合于极微弱光条件下的信号探测。文中开展较远距离三维成像实验, 使得单像元单脉冲平均探测光子数远小于 1 (~0.1 光子/像元/脉冲), 充分利用单光子探测器高灵敏度光子计数的特性。根据光的量子性质, 单光子探测为泊松过程, 单位时间内测量的光子数目服从泊松分布, 均值由光子入射率决定。像元 i 接收的激光脉冲回波光强为^[20-21]:

$$r_i(t) = a_i s(t - 2z_i/c) + b \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为激光脉冲强度在时间上的分布, 即激光脉冲形状; a_i 为像元 i 收集的脉冲能量份额, 由接收光学口径、大气衰减、目标反射率等因素决定, 由于系统的接收光学口径、大气衰减等因素相对固定, 测定 a_i 既能获得目标反射率信息; z_i 为像元 i 到对应目标区域 i 的距离; c 为光速; b 为背景光系数。

光在 APD 上产生光电子的过程具有随机性, 其概率由对应波长的量子效率决定。考虑到盖革 APD 自身暗计数, 其响应效率为:

$$\lambda_i(t) = \eta r_i(t) + d = \eta a_i s(t - 2z_i/c) + \eta b_i + d \quad (2)$$

式中: η 为对应波长在 APD 上的量子效率; d 为像元的暗计数率, 这里将面阵 APD 阵列上像元的 η 和 d 取为相同的值。

从公式 (2) 可以看出, 信号在时间上为脉冲式分布, 取决于脉冲到达时间与形状, 而背景光和暗计数在时间上为均匀分布。为了有效控制噪声, 探测器通常在信号到达前开启较短的门控时间 (μs 量级) 来接收信号。通过对公式 (2) 积分, 可以得到门控时间内平均的光子计数。利用滤光片和衰减片控制平均光子计数数目, 使其在一次门控时间内小于 0.1。实际的光子数为离散值, 服从相应均值的泊松分布。根据泊松分布, 由于均值远小于 1, 大大减小了一次门控时间内出现多光子事件的概率, 避免盖革 APD 对入射光子数无法分辨的问题。为了提高信号探测概率, 并有效区分信号与噪声, 通常大量累积回波脉冲, 来

获得回波光子在时间上的分布。基于公式 (2) 中盖革 APD 响应模型, 结合光子计数数据, 可以逐像素估计出目标反射率和距离信息, 实现三维成像。

为了验证单光子探测成像模型, 文中基于盖革 APD 响应特征, 利用 ROOT/C++ 工具开展了蒙特卡罗仿真, 并将仿真结果用于后面的成像方法研究。采用如下模型描述激光脉冲在时间上的分布, 其形状如图 4 所示。

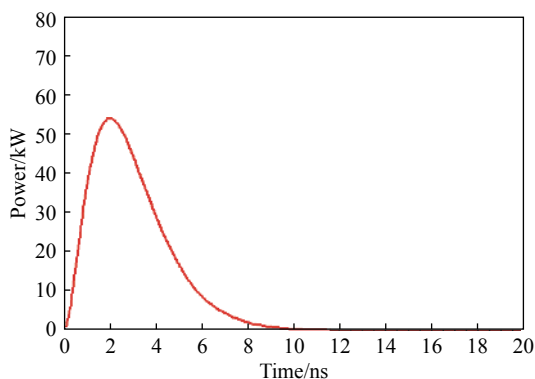


图 4 激光脉冲在时间上的分布

Fig.4 Temporal distribution of a laser pulse

$$s(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 e^{-\frac{t}{\tau}}, & t \geq 0, \tau = \frac{\text{FWHM}}{3.5} \end{cases} \quad (3)$$

图 5 给出了蒙特卡罗模拟探测 20 000 个回波脉冲的光子计数结果, 其中使用的激光脉冲参数与实验装置一致, 单像素单脉冲平均光子数 0.03, 暗计数率 20 kHz, 背景噪声 80 kHz; 门控开启时间 2 μs, 信号出现在 0.5 μs 处。由图 4 可知, 激光回波脉冲式集中在少数相邻区间内, 而噪声在整个门控区间内为均匀分布。

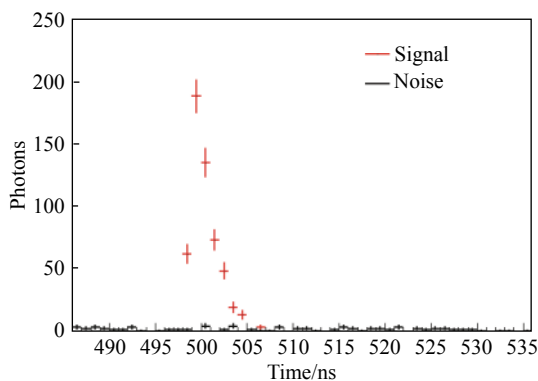


图 5 蒙特卡罗仿真 20 000 激光脉冲的光子计数结果

Fig.5 Photon-counting result of 20 000 laser pulses with Monte Carlo simulation

3 极大似然估计成像

基于搭建的 1 064 nm 激光探测实验装置, 对室外 600 m 处建筑物进行了凝视探测, 发射的激光脉冲重复频率 PRF=1 kHz。为了降低背景光与暗计数噪声, 在每次探测回波前施加了时间延迟 2.5 μs, 再开启探测门控 4 μs, 面阵单光子探测器共采集了 20 000 帧光子探测数据, 用时 20 s。

从蒙特卡罗仿真结果可以看出, 激光回波信号呈现集中分布, 占据的时间区间宽度在 10 ns 以内, 相对于门控时间宽度较短。为此, 文中在信号区间估计回波参数, 而不在整个门控区间进行全局估计, 降低参数估计的复杂度。为了降低噪声的影响, 将信号区间扩展至 30 ns 作为控制区间, 从而在回波参数估计中精确估计噪声的贡献。为了避免光子计数起伏引起的虚警事件, 以单像素单脉冲单时间区间光子数 0.01 为阈值, 判断门控范围内是否存在回波信号, 并将峰值位置附近 [-10 ns, 20 ns] 区间作为参数估计区间。

文中根据公式 (2) 的响应模型及公式 (3) 的激光脉冲形状, 采用极大似然函数估计方法, 逐像素提取目标的反射率与距离信息。单像素上的似然函数可以表示为:

$$\mathcal{L}(T|a_i, z_i, \tau_i) = \prod_{k=1}^N \lambda_i(t_k) \quad (4)$$

式中: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 表示像素 i 测量的光子到达时间; N 表示信号区间探测的光子数。

从公式 (4) 可以看出, 进行一次极大似然函数估计可以同时提取出目标反射率、距离、脉冲宽度等信息, 中 ROOT/C++ 工具进行似然函数的最小化求解。图 6(a) 为目标的照片, 图中白线方框标出了成像区域; 图 6(b) 和 (c) 分别为采用 1 000 帧和 20 000 帧数据估计的目标反射率图像, 图像分辨率与面阵单光子探测器规模相同。其中 1 000 帧和 20 000 帧数据中每个像素平均累积的光子数分别为 30.8 和 601.6, 可以看出数据量较少情况下, 反射率估计结果的像素间起伏较大; 图 6(d) 和 (e) 分别为采用 1 000 帧和 20 000 帧数据估计的目标距离图像, 同样数据量较小的情况下像素间的起伏较大, 测距精度较差。

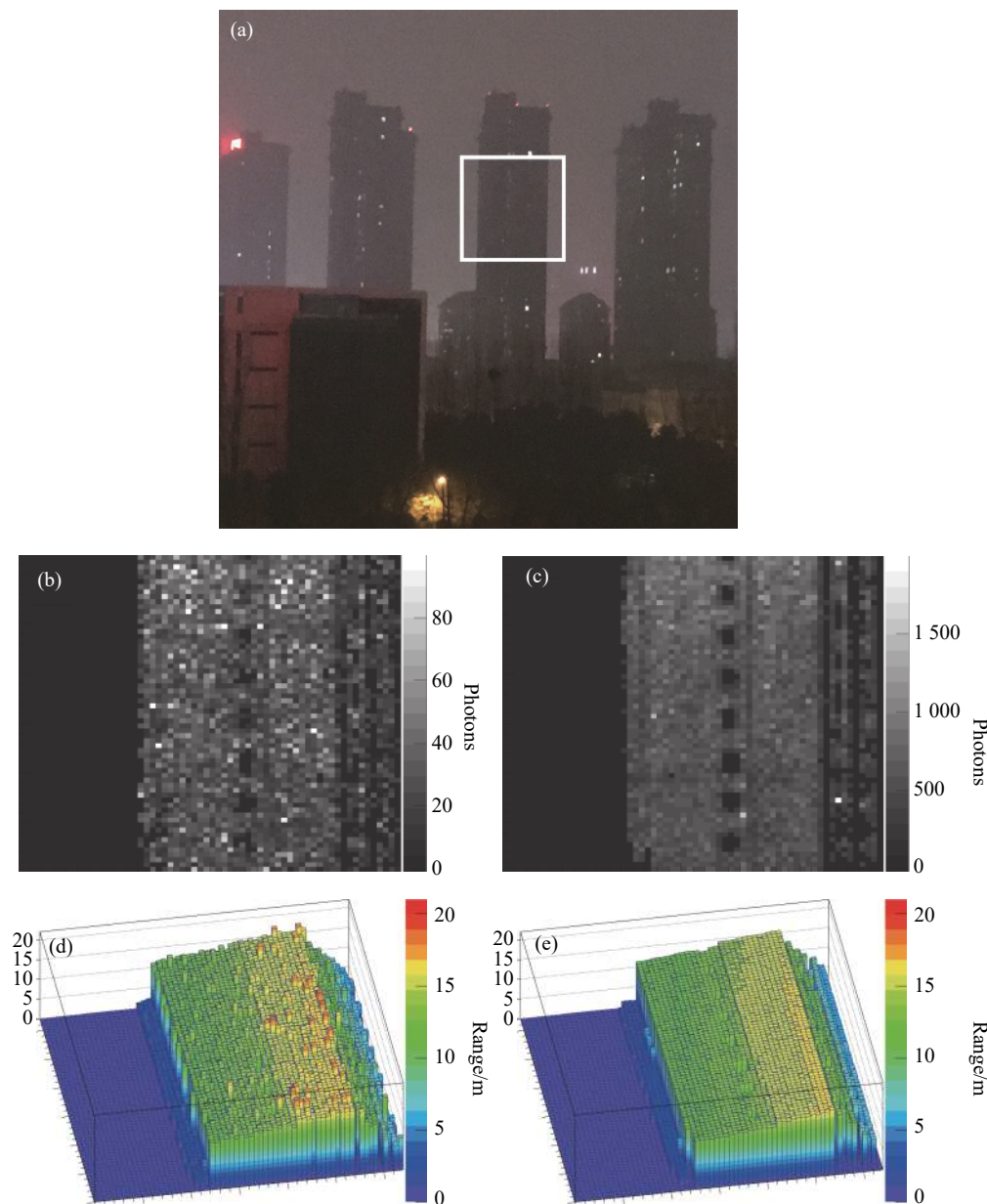


图 6 (a) 600 m 外目标照片, (b) 1 000 帧数据反射率图像, (c) 20 000 帧数据反射率图像, (d) 1 000 帧数据距离图像, (e) 20 000 帧数据距离图像
 Fig.6 (a) Object photograph with 600 m away, (b) Intensity image with 1 000 frame data, (c) Intensity image with 20 000 frame data, (d) Range image with 1 000 frame data, (e) Range image with 20 000 frame data

4 正则化图像重构

在对高速运动目标探测或进行大视场成像时,脉冲累积时间往往有限,导致回波光子的采样数不足。在这种情况下,利用少量光子实现精确图像重构变的较为重要。从逐像素极大似然估计的成像结果可以看出,累积光子数较少时成像精度较低。通常自然图像的像素间具有一定的空间关联,在某种变换下能够进行稀疏表示。文中将利用自然图像的稀疏特性来

提升累积光子数较少情况下的成像精度。

文中采用正则化方法,将图像似然函数与空间关联约束函数结合起来,建立代价函数进行图像重构,代价函数的形式为:

$$C(\mathbf{x}) = -\ln \mathcal{L}(\mathbf{s}|\mathbf{x}) + \lambda R(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中: \mathbf{s} 和 \mathbf{x} 分别为原始图像信号和拟重构的图像信号; $\mathcal{L}(\mathbf{s}|\mathbf{x})$ 为图像的似然函数项; $R(\mathbf{x})$ 为空间关联约束函数项; λ 为正则化系数,用于平衡似然函数项和约束函数项的贡献。

通过公式 (5), 图像重构问题即转化为代价函数的最小化问题, 通过代价函数的最小化求解来实现图像重构。累积光子数较少的情况下, 其服从泊松分布, 因此采用泊松似然函数作为反射率图像重构的似然函数项。泊松概率密度函数的期望值与方差相同, 通过观测的光子数即可建立泊松似然函数。像元测量的光子到达时间主要受发射脉冲抖动、计时精度等因素影响, 服从正态分布。为此, 采用高斯似然函数作为距离图像估计的似然函数项, 高斯分布的均值和方差来自于上节中极大似然估计的结果。为了更好的描述图像的稀疏特性, 首先对图像信号进行离散小波变换 (DWT), 然后计算全变分 (TV) 作为约束函数^[22-23], 代价函数进一步可以表示为:

$$C(\mathbf{x}) = -\ln \mathcal{L}(s|\mathbf{x}) + \lambda \|\mathbf{W}^T \mathbf{x}\|_{TV} \quad (6)$$

式中: \mathbf{W} 为离散小波变换。Harmany 等人证明该问题在数学上是凸问题, 具有严格解。文中采用 SPRIAL-TAP 工具包^[17] 进行公式 (6) 中代价函数的最小化求解。由于该图像信号值服从泊松分布, 具有非负约束条件, SPRIAL-TAP 通过可分离二次规划方法实现了该约束条件下最优化问题的求解。

文中利用 1 000 帧数据的反射率图像和距离图像分别进行正则化图像重构, 采用了 0.05、0.10、0.15、0.2, 4 个不同的正则化系数, 图 7 给出了相应的反射率图像重建结果。可以看出, 随着 λ 的增大, 约束函数的贡献也变大, 图像变得更为平滑; 重构图像相对于

原始图像 (图 6(b)) 更加清晰, 像素间的起伏甚至小于 20 000 帧数据图像 (图 6(c))。

图 8 给出了正则化系数 λ 分别为 0.05、0.10、

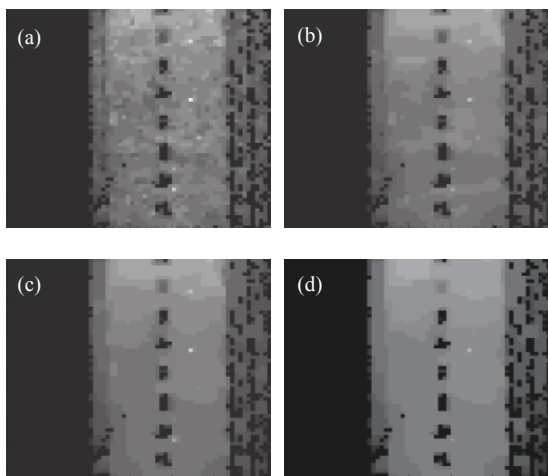


图 7 基于 1 000 帧数据重构的反射率图像。(a) $\lambda=0.05$, (b) $\lambda=0.10$, (c) $\lambda=0.15$, (d) $\lambda=0.20$

Fig.7 Intensity images reconstructed with 1 000 frame data.(a) $\lambda=0.05$, (b) $\lambda=0.10$, (c) $\lambda=0.15$, (d) $\lambda=0.20$

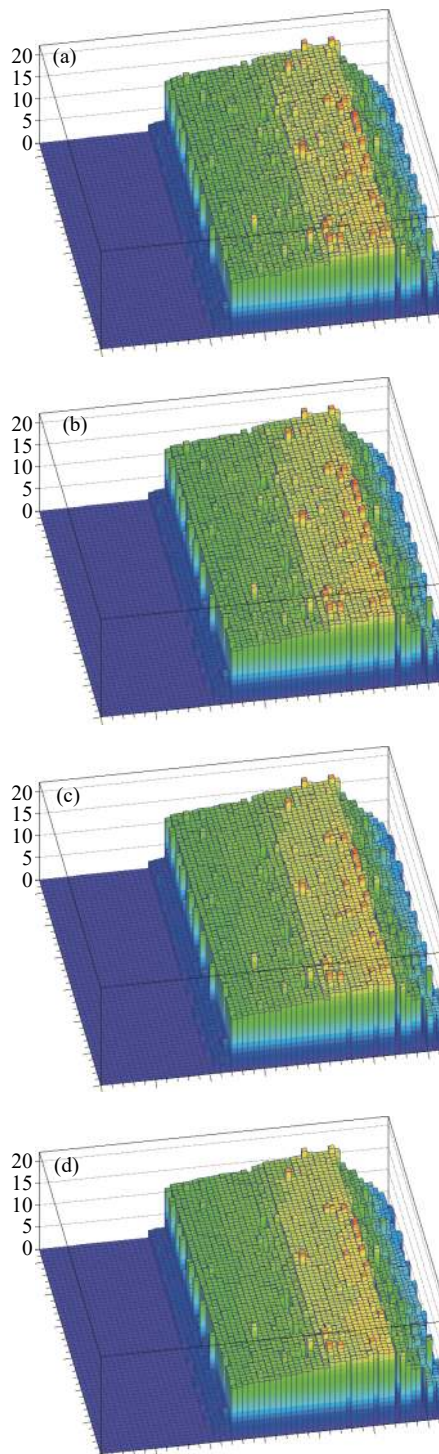


图 8 基于 1 000 帧数据重构的距离图像。(a) $\lambda=0.05$, (b) $\lambda=0.10$, (c) $\lambda=0.15$, (d) $\lambda=0.20$

Fig.8 Range images reconstructed with 1 000 frame data. (a) $\lambda=0.05$, (b) $\lambda=0.10$, (c) $\lambda=0.15$, (d) $\lambda=0.20$

0.15、0.20 的距离图像重建结果,由此可以看出像素间起伏逐渐变小,但相对于 20 000 帧数据距离图像仍存在一定起伏。为了计算正则化方法的距离图像重构精度,以图 6(e)为参考分别计算图 8 中每个距离图像的偏差。

$$RMS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_1 - z_2)^2 \quad (7)$$

式中: z_1 和 z_2 分别为重建图像和参考图像每个像素的距离值。图 8 中各图像的 RMS 分别为 0.31、0.31、0.32、0.34,原始图 6(d)图像相对于图 6(e)的 RMS 为 0.36,因此正则化方法将三维图像的整体成像精度从 0.36 m 提升至 0.31 m。

5 结 论

文中利用 64×64 规模的 InGaAs 盖革雪崩焦平面阵列作为面阵单光子探测器,搭建了 1 064 nm 激光主动探测三维成像实验装置,实现了 600 m 外目标散射回波信号的高灵敏度探测。文中重点讨论了单光子探测成像模型与方法,分析了累积光子数不足情况下的成像精度问题。采用正则化方法进行图像重构,结合了光子探测物理模型及自然图像稀疏先验假设。通过对比表明,正则化方法能够提升反射率与距离图像的重构精度,改善累积光子数不足情况下的图像质量。笔者下一步将开展基于面阵单光子探测器的快速扫描成像研究,从而适应于高速运动目标探测与跟踪、大视场成像等应用。

参考文献:

[1] McManamon P. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 060901.

[2] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6241-6251.

[3] Heinrichs R, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays[C]// SPIE, 2001, 4377: 106-118.

[4] Xie Shaoyu, Zhao Yiqiang, Wang Yongle, et al. Microscanning laser imaging technology based on Geiger-mode APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1206010. (in Chinese)

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.

[5] Wang Shuai, Sun Huayan, Zhao Yanzhong, et al. Method of improving 3D imaging resolution of APD array based on optical phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406003. (in Chinese)

王帅, 孙华燕, 赵延仲, 等. 基于光学相控阵的提高 APD 阵列三维成像分辨率方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0406003.

[6] Itzler M A, Jiang X, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(3-4): 174-200.

[7] Marino R M, Davis W R, Rich G C, et al. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments[C]//SPIE, 2005, 5791: 138-152.

[8] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Lab J*, 2005, 15(1): 23-36.

[9] Knowlton R. Airborne lidar imaging research testbed[D]. US: MIT Lincoln Laboratory Lexington United States, 2011.

[10] Albota M A, Gurjar R S, Mangogna A V D, et al. The airborne optical systems testbed (AOSTB)[R]. US: MIT Lincoln Laboratory Lexington United States, 2017.

[11] Clifton W E, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system[C]//SPIE, 2015, 9465: 946506.

[12] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yuan, et al. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 251-259. (in Chinese)

徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 251-259.

[13] Xu Zhengping, Xu Yongsan, Yao Yuan, et al. Performance verification of staring laser active imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1441-1448. (in Chinese)

徐正平, 许永森, 姚园, 等. 凝视型激光主动成像系统性能验证[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1441-1448.

[14] Sun Jianfeng, Jiang Peng, Zhang Xiuchuan, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206006. (in Chinese)

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.

[15] 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.
- [16] McManamon P F, Banks P S, Beck J D, et al. Comparison of flash lidar detector options [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 031223.
- [17] 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.
- [18] Mertens L, Sonleitner M, Leach J, et al. Image reconstruction from photon sparse data [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42164.
- [19] Richmond R, Cain S. Direct-detection LADAR systems[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010.
- [20] Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(27): 5388–5398.
- [21] Kim S, Lee I, Kwon Y. Simulation of a Geiger-mode imaging lidar system for performance assessment [J]. *Sensors*, 2013, 13(7): 8461–8489.
- [22] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging [J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58–61.
- [23] Shin D, Xu F, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.