

GM-APD 激光雷达距离像邻域 KDE 重构

刘迪¹, 孙剑峰¹, 姜鹏², 高尚¹, 周鑫¹, 王鹏辉³, 王骐¹

- (1. 哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室, 北京 100074;
3. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 对盖革模式 APD 激光雷达系统的距离像重构算法进行了研究, 设计了一种基于像素邻域核密度估计的重构算法。从系统原理出发, 结合探测概率模型研究了距离像重构算法的理论基础。根据系统特点提出了一种基于像素邻域核密度估计的改进算法, 并对其原理进行了分析。通过仿真数据对直方图算法和邻域核密度估计算法进行了验证, 以距离重构准确率曲线进行了定量评价对比, 并进一步将算法应用到真实盖革模式 APD 激光雷达数据中进行了距离像重构实验。实验结果表明, 在低帧数时, 基于像素邻域统计核密度估计的重构算法可有效提高距离像重构的效果。

关键词: 距离像重构; 激光雷达; GM-APD; 像素邻域; 核密度估计

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0630001

GM-APD lidar range image reconstruction based on neighborhood KDE

Liu Di¹, Sun Jianfeng¹, Jiang Peng², Gao Shang¹, Zhou Xin¹, Wang Penghui³, Wang Qi¹

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing 1000074, China; 3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: The range image reconstruction algorithm of Geiger-mode APD laser radar system was studied, and a reconstruction algorithm based on pixel neighborhood kernel density estimation was designed. Starting from the system principle, the theoretical basis of the reconstruction algorithm of range image was studied with the detection probability model. According to the characteristics of the system, an improved algorithm based on pixel neighborhood kernel density estimation was proposed and its principle was analyzed. The histogram algorithm and the neighborhood kernel density estimation algorithm were verified by simulation data, and the range reconstruction accuracy rate curve was used for quantitative evaluation and comparison. The algorithm was further applied to real Geiger mode APD lidar data to

收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-02-13

基金项目: 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室开放基金(181001); 可调谐(气体)激光技术重点实验室基金一般项目(61424060304)

作者简介: 刘迪(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达数据处理和三维重构等方面的研究。Email: liudi_hit@163.com

导师简介: 孙剑峰(1978-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事激光图像处理及目标识别方面的研究。Email: sjf@hit.edu.cn

通讯作者: 姜鹏(1982-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光技术、光电导引总体技术方面的研究。Email: 51531150@qq.com

reconstruct range image. The experimental results show that the reconstruction algorithm based on the statistical neighborhood kernel density estimation can effectively improve the reconstruction effect of the range image at low frame counts.

Key words: range image reconstruction; lidar; GM-APD; pixel neighborhood; kernel density estimation

0 引言

盖革模式雪崩光电二极管^[1](Geiger-mode Avalanche Photo Diode, GM-APD)具有单光子探测能力,基于该原理研制的 GM-APD 激光雷达^[2]具有高灵敏度、响应速度快、探测器集成度高的特点^[3-7]。在激光能量较强、目标对激光的反射特性较好、雷达与目标间的光噪声和雷达系统噪声相对较弱时,GM-APD 激光雷达可仅由单次激光脉冲采集获得效果较好的目标距离像^[8]。在实际应用当中,由于受到成像原理、激光雷达系统各项指标、目标特性和成像环境等因素的限制,需要应用算法对多次脉冲采集的数据进行处理,重构距离像。

在 GM-APD 单光子探测和激光雷达距离像重构算法方面,美国 MIT 起步较早,并公布了大量成果。其中 Dongeek Shin 等人首先提出了一种基于最大似然估计的距离估计算法^[8],利用逐像素的参数估计实现距离像重构;随后 Ahmed Kirmani 等人发表了利用首达光子进行距离像重构的算法^[9],考虑了目标在空间邻域内的关联,但重构时对采集数据量要求很大;近年,Dongeek Shin 等人又提出了基于凸优化的贪婪算法对距离像进行重构^[10],该算法核心为对优化方程的求解,具有一定复杂度。

在一些实际应用条件中,如制导目标识别与跟踪、无人载具动态避障等,对激光雷达成像的实时性具有较高要求,这就对距离像重构算法的复杂度、数据需求量产生了限制。因此,需要设计更有效的重构算法,以实现在采集数据量较少时提供快速的、效果较好的距离像重构。

考虑大多数的自然或人造目标具有各向的空间相关性^[11],在面阵 GM-APD 成像中体现为相邻探元对应目标距离的相互关联,即距离像中除少数边界位置外,相邻像素的距离值多为相同或相近。除此之

外,面阵 GM-APD 器件相邻探元间的电路串扰,以及大气造成的光学散射、光学系统造成的衍射退化等因素都会增强相邻像素间的相关性。因此,针对面阵式的 GM-APD 激光雷达,文中设计了一种基于像素邻域核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)的距离像重构算法,并在其中引入像素邻域的方案,利用空间邻域相关性提升重构效果。

1 系统原理

面阵式 GM-APD 激光雷达为直接测距型激光雷达^[12-13],每个探元均具有独立计时器,利用时间飞行法实现距离探测。各探元可被单个光子触发雪崩并控制计时结束,这种触发过程是一种服从泊松分布的概率事件^[14],即在时间 $t_1 \sim t_2$ 之间,发生触发事件的概率可由公式(1)确定:

$$P(m; t_1, t_2) = \frac{1}{m!} [M(t_1, t_2)]^m \exp[-M(t_1, t_2)] \quad (1)$$

式中: m 表示发生触发事件的次数; $M(t_1, t_2)$ 为在时间 $t_1 \sim t_2$ 之间探测器接收到的光子数量。由此可知在时间 $t_1 \sim t_2$ 之间没有发生触发事件的概率为 $\exp[-M(t_1, t_2)]$,而相应发生触发的概率为 $1 - \exp[-M(t_1, t_2)]$ 。因此,对于 GM-APD 激光雷达的单个探元,在计时器的某个计时周期 j 内,发生雪崩光电二极管触发的概率 P_j 可由公式(2)确定:

$$P_j = \exp\left(-\sum_{i=1}^{j-1} M_i\right) [1 - \exp(-M_j)] \quad (2)$$

在第 j 个计时周期内发生触发的概率由该周期内的光子数 M_j 和该周期之前接收到的所有光子数 $\sum_{i=1}^{j-1} M_i$ 共同决定,若发生触发,则 j 被记作该探元对应的距离值。

为了减小背景光噪声的干扰,GM-APD 激光雷达一般工作在距离选通门模式^[15],此时,选通门内的信号强度分布和探测概率密度分布关系如图 1 所示。

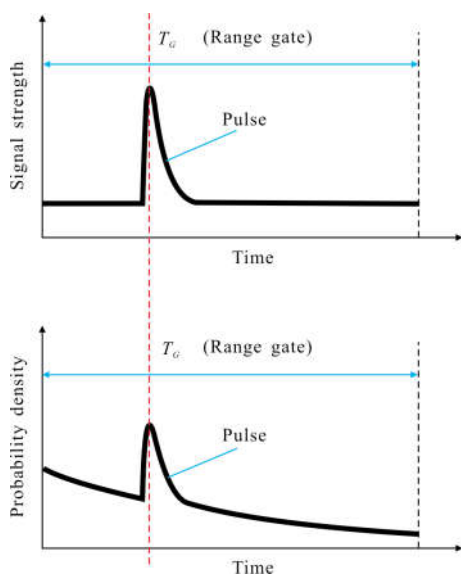


图 1 信号强度分布与探测概率密度

Fig.1 Signal intensity distribution and detection probability density

脉冲信号对应的峰值位置在信号强度分布曲线和探测概率密度曲线中的位置基本相同，脉冲信号出现的时间可以通过该探元探测概率密度的峰值确定。因此，对目标距离的获取问题可转化为应用多次脉冲成像数据进行对探测概率密度的估计问题。

2 重构算法设计

对探测概率密度的估计可分为参数估计和非参数估计。参数估计方法一般都需要进行迭代搜索，算法耗时较长，并且在采集到的数据较少时参数估计方法会难以收敛至实际值。直方图算法是非参数估计中最简单的一种，但在数据量较少时其效果较差，因此，选择非参数估计中的核密度估计(KDE)算法为基础进行改进。

对于单个 GM-APD 探元，在采集得到 k 个距离值数据 $j_i(i=1, 2, \dots, k)$ 后，KDE 算法估计得到概率密度如公式(3)所示：

$$\hat{p}_j = \frac{1}{kh} \sum_{i=1}^k K\left(\frac{j-j_i}{h}\right) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K_h(j-j_i) \quad (3)$$

式中： $K(\cdot)$ 为核函数； h 为带宽； $K_h(\cdot)$ 为平滑核函数。在此选择高斯核作为平滑核函数，并进行归一化，形如公式(4)所示：

$$K_h(z) = \frac{1}{h\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{h^2}\right) \quad (4)$$

为信号激光脉冲范围内的数据经过核函数变换后能够实现有效叠加，可令高斯核脉宽等于激光脉宽，即带宽 $h = \frac{\tau}{2}$ ， τ 为激光脉宽。

上述 KDE 算法解决了逐探元的探测概率密度估计，但在采集数据量较少时同样存在对目标距离估计失准问题。为此，进一步引入邻域的方案对 KDE 算法进行改进。参考公式(4)高斯核的设计，引入空间邻域的二维平滑核函数，并进行归一化，形如公式(5)所示：

$$K_{hp}(x, y) = \frac{1}{h_p^2 \pi} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{h_p^2}\right) \quad (5)$$

当前 GM-APD 激光雷达面阵探测器分辨率较低，如 32×32 、 64×64 像元等，因此像素邻域的选取不宜过大。同时，过大的带宽也会造成平滑核过渡平滑，产生严重模糊效应。经计算，当带宽取 $h_p = 1$ 时， 3×3 像素邻域对应平滑核函数 $K_{hp}(\cdot)$ 的积分面积为 0.93，即选择 3×3 像素邻域可覆盖二维平滑核函数的 93%。

为减小算法的计算量，可将空间邻域的二维平滑核函数简化为像素邻域的权重矩阵，记为 W ，若取 3×3 邻域，则权重矩阵可表示为如公式(6)所示：

$$W = \begin{bmatrix} w_3 & w_2 & w_3 \\ w_2 & w_1 & w_2 \\ w_3 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中各权重值可对公式(5)按像素积分并归一化后计算得到，过程如公式(7)所示：

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{\int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} K_{hp}(x, y) dx dy}{\int_{-1.5}^{1.5} \int_{-1.5}^{1.5} K_{hp}(x, y) dx dy} \\ w_2 &= \frac{\int_{-0.5}^{0.5} \int_{0.5}^{1.5} K_{hp}(x, y) dx dy}{\int_{-1.5}^{1.5} \int_{-1.5}^{1.5} K_{hp}(x, y) dx dy} \\ w_3 &= \frac{\int_{0.5}^{1.5} \int_{0.5}^{1.5} K_{hp}(x, y) dx dy}{\int_{-1.5}^{1.5} \int_{-1.5}^{1.5} K_{hp}(x, y) dx dy} \end{aligned} \quad (7)$$

当取 $h_p = 1$ 时，分别有 $w_1 \approx 0.3$ 、 $w_2 \approx 0.125$ 、 $w_3 \approx 0.05$ ，则权重矩阵有：

$$W = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.125 & 0.05 \\ 0.125 & 0.3 & 0.125 \\ 0.05 & 0.125 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时对任意探元的探测概率密度的估计见公式(9)。

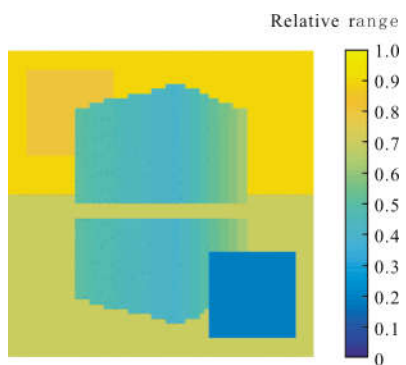
代入取 $h = \frac{\tau}{2}$ 时的公式(4), 并对估计得到的探

测概率密度 \hat{p}_j 取最大值, 得到像素 (m, n) 的基于邻域

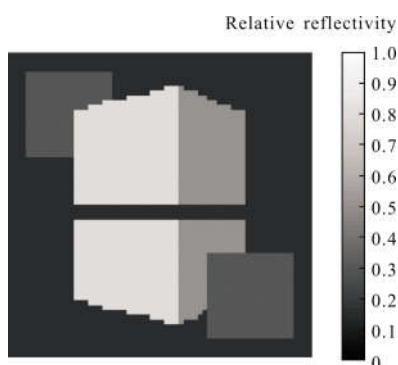
$$\hat{j}(m, n) = \operatorname{argmax}_{j \in [1, k]} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{i_m=-1}^1 \sum_{i_n=-1}^1 \left\{ \frac{2}{\tau\sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{4(j-j_i)[(m+i_m, n+i_n)^2]}{\tau^2} \right] \cdot W(m+i_m, n+i_n) \right\} \quad (10)$$

3 仿真验证实验

为验证邻域 KDE 距离像重构算法的效果, 依照 GM-APD 激光雷达成像原理, 采用蒙特卡洛法仿真^[16] 进行对同一场景的多次探测的仿真。仿真输入的归一化距离信息、反射率信息如图 2 所示。仿真设置 GM-APD 面阵探元为 64×64 像元, 成像距离选通门宽为 250 个计时周期。得到的仿真采集数据中, 对应单次探测的数据成为 1 帧数据。



(a) 距离信息
(a) Range information



(b) 反射率信息
(b) Reflectivity information

图 2 仿真实验输入归一化距离信息、反射率信息

Fig.2 Normalized range information and reflectivity information for simulation

分别采用直方图算法和邻域 KDE 算法对仿真采集数据进行处理, 重构得到距离像。为定量评价算

KDE 算法的距离值估计公式, 如公式(10)所示, 其中 W 按公式(8)取值。

$$\hat{p}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{i_m=-1}^1 \sum_{i_n=-1}^1 [K_h(j-j_i) \cdot W(m+i_m, n+i_n)] \quad (9)$$

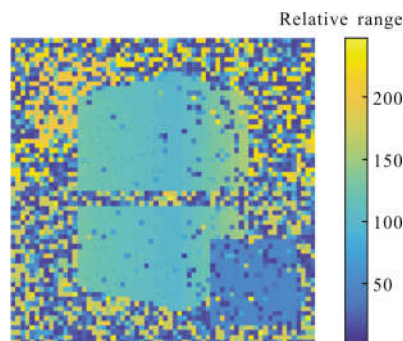
法的效果, 定义评价参数距离重构准确率 $R(r)$ 为重构结果距离像中距离值重构误差不大于阈值 r 的像素点所占的比率, 如公式(11)所示:

$$R(r) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_r[\hat{j}(m, n) - j(m, n)] \quad (11)$$

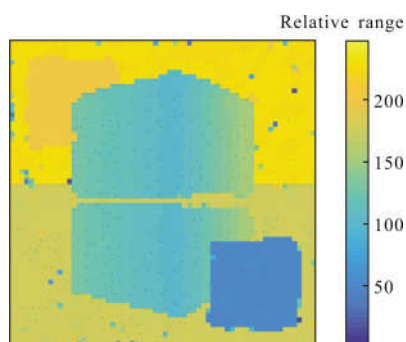
式中: M, N 为 GM-APD 面阵探元尺度; $f_r(\cdot)$ 为准确率判断函数, 采用形式如公式(12)所示:

$$f_r(x) = \begin{cases} \frac{1}{2r} & |x| \leq r \\ 0 & |x| > r \end{cases} \quad (12)$$

式中: r 为准确率判断函数的阈值。应用两种算法对 50 帧仿真数据进行处理重构得到场景距离像如图 3 所示。



(a) 直方图算法
(a) Histogram algorithm



(b) 邻域 KDE 算法
(b) Neighborhood KDE algorithm

图 3 10 帧数据距离像重构结果

Fig.3 Reconstruction results with 10 frames

对比处理结果与作为输入的距离信息图像, 可见

采用邻域 KDE 算法可以提高距离像的重构效果,具有距离像滤噪功能。对于反射率较低的区域,邻域统计算法可以提供较直方图方法更好的重构能力。通过对不同帧数数据多次仿真实验计算平均距离重构准确率,并绘制曲线进行进一步分析,取 $r=3$,结果见图 4。

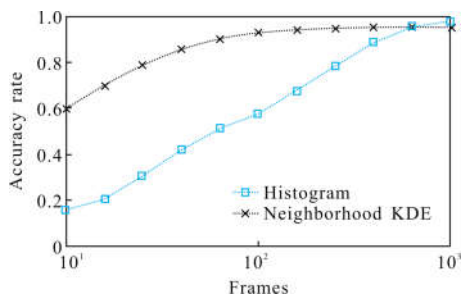


图 4 帧数-距离重构准确率曲线

Fig.4 Curve of frames-range reconstruction accuracy

帧数小于 200 帧时,两算法的距离重构准确率随帧数升高而升高,其中邻域 KDE 算法的距离像重构准确率明显优于直方图算法。说明在少帧数采集数据的条件下,邻域 KDE 算法能够更有效地利用目标的空间相关性大幅提高距离像重构效果。

当帧数由 200 继续增大后,邻域 KDE 算法的距离重构准确率逐渐趋平。而直方图算法的距离重构准确率则继续上升,并在 600 帧时超过邻域 KDE 算法后,才逐渐趋平。这是由于邻域 KDE 算法在利用空间相关性的同时,空间邻域的二维平滑核引起了距离像的平滑和模糊,使其重构效果更早地达到饱和。而两算法距离重构准确率曲线重合处对应的帧数与场景和实验条件有关。因此,在高帧数采集数据的条件下,直方图算法距离重构更具优势。

经统计,在该仿真实验条件下,当要求距离重构准确率优于 0.8 时,直方图算法需要约 269 帧数据,而邻域 KDE 算法只需要 28 帧。

4 实际成像实验

为进一步验证邻域 KDE 算法的有效性,以及仿真验证实验结论的准确性,应用两算法对一组 GM-APD 激光雷达实采数据进行了不同帧数的处理。

该组实验场景为楼内 45 m 纵深的走廊及距离 27.5 m 处的成人,选通门宽设置为 50 m。为了定量评价算法效果,通过 10000 帧数据进行算法重构、按场景实际测量值修正和主观去噪等操作得到的对应场景归

一化距离信息和反射率信息,作为评价参考标准,见图 5。

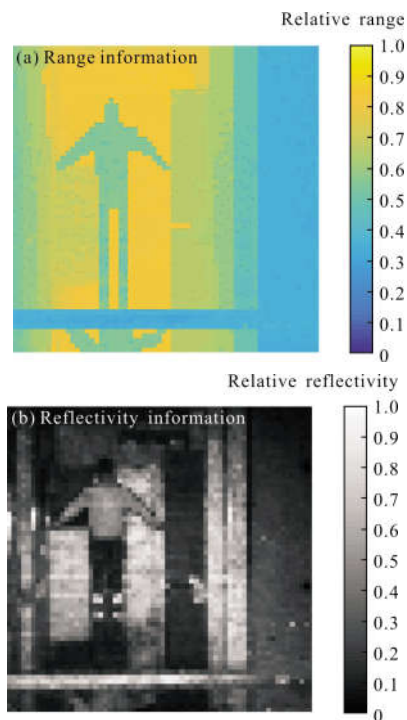


图 5 实验场景对应归一化距离信息、反射率信息

Fig.5 Normalized range information and reflectivity information of real experiment

分别采用直方图算法和邻域 KDE 算法对 10 帧实采数据进行处理,重构得到场景距离像,如图 6 所示。

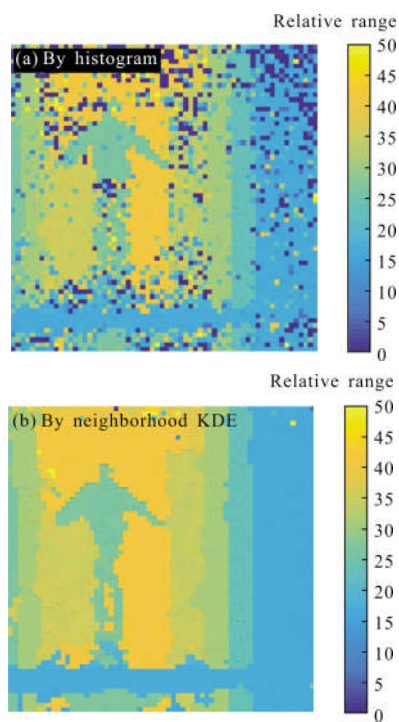


图 6 10 帧数据距离像重构结果

Fig.6 Reconstruction results with 10 frames

从主观上看,应用 10 帧该场景数据时,直方图算法重构得到距离像中噪点较多,而邻域 KDE 算法结果中较有效地滤除了这些噪点。进行两算法对不同帧数该场景的实验数据的距离像重构实验,统计距离重构准确率曲线,如图 7 所示。

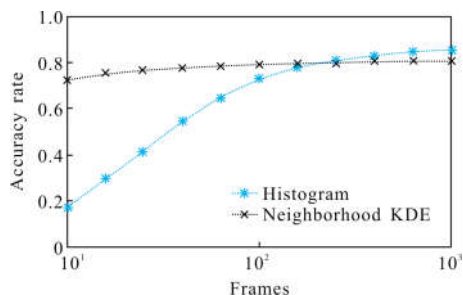


图 7 帧数-距离重构准确率曲线

Fig.7 Curve of frames-range reconstruction accuracy

由图 7 可见,两算法处理结果准确率随帧数变化曲线的规律与图 4 所呈现的相同,但由于场景和实验条件的差异,两曲线的变化速率、最终趋平值、重合位置有所不同。最终仍可由结果曲线得出邻域 KDE 算法能在少帧数采集数据的条件下能提升距离像重构效果的结论。

经统计,在该场景实验条件下,当要求距离重构准确率优于 0.8 时,直方图算法需要约 51 帧数据,而邻域 KDE 算法只需要 4 帧。

5 结论

文中分析了 GM-APD 激光雷达成像原理,根据实际应用需求,给出了一种基于像素邻域核密度估计的距离像重构算法,并详细介绍了算法原理及相关参数设计方法。通过仿真实验,验证了邻域 KDE 算法在少帧数时可以得到较直方图算法更高的距离重构准确率。最终结合 GM-APD 激光雷达实际实验数据,进一步验证了该改进算法可在少帧数时明显地提升距离像重构效果,并且具有较好的去噪能力。在采集数据帧数较高时,邻域 KDE 算法因其原理而引起的距离像的平滑和模糊会限制重构效果的提升,对此问题的解决方案还需进一步研究。

参考文献:

[1] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J].

Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 335-350.

- [2] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[C]//SPIE, 2003, 5086: 1-15.
- [3] Xue Li, Zhai Dongsheng, Li Zhulian, et al. Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0306001. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Wang Fei, Tang Wei, Wang Tingfeng, et al. Design of 3D laser imaging receiver based on 8×8 APD detector array [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(3): 422-427. (in Chinese)
- [6] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao, et al. Development and status of single pulse 3D imaging lidar based on APD array[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4): 389-398. (in Chinese)
- [7] Luo Le, Wu Changqiang, Lin Jie, et al. Time-domain denoising based on photon-counting LiDAR [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 177-182. (in Chinese)
- [8] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Information in a photon: Relating entropy and maximum-likelihood range estimation using single-photon counting detectors: IEEE International Conference on Image Processing[C]//IEEE, 2013.
- [9] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [10] Shin D, Shapiro J H, Goyal V K. Computational single-photon depth imaging without transverse regularization: IEEE International Conference on Image Processing[C]//IEEE, 2016.
- [11] Shin D, Xu F, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.
- [12] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsun, et al. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8 (1): 28-38. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] Henriksson M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(24): 5140-5146.
- [15] Li D, Yang H J, Zheng Q Z, et al. Application of range-gated technology in the three-dimensional imaging laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 85-88.
- [16] O'Brien E M, Fouché D G. Simulation of 3D laser radar systems[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 37-60.