



## 基于全光纤光子计数激光雷达的高分辨率三维成像

郭静菁 费晓燕 葛鹏 周安然 王磊 李正琦 盛磊

### High-resolution three-dimensional imaging based on all-fiber photon-counting Lidar system

Guo Jingjing, Fei Xiaoyan, Ge Peng, Zhou Anran, Wang Lei, Li Zhengqi, Sheng Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210162>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于深度学习的压缩光子计数激光雷达

Compressed photon-counting laser radar based on deep learning

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200380–20200380 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200380>

#### 基于像素复用的SPAD阵列连续扫描三维成像

Continuous scanning 3D imaging with SPAD array based on pixel multiplexing

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200375–20200375 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200375>

#### 距离漂移误差抑制获取Gm-APD激光雷达高精度三维像

Restrain range walk error of Gm-APD lidar to acquire high-precision 3D image

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200218–1–20200218–8 <https://doi.org/10.3788/IRLA.20200218>

#### APD三维成像激光雷达研究进展

Research progress of APD three-dimensional imaging lidar

红外与激光工程. 2020, 49(9): 20190549–1–20190549–10 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190549>

#### 基于光学相控阵的提高APD阵列三维成像分辨率方法

Method of improving 3D imaging resolution of APD array based on optical phased array

红外与激光工程. 2019, 48(4): 406003–0406003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0406003>

#### 使用液晶微透镜的高分辨率三维重建双模相机

Dual-mode camera using liquid-crystal microlens for high-resolution three-dimensional reconstruction

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20190540–1–20190540–9 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190540>

## 基于全光纤光子计数激光雷达的高分辨率三维成像

郭静菁<sup>1,2</sup>, 费晓燕<sup>3</sup>, 葛鹏<sup>1,2\*</sup>, 周安然<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 李正琦<sup>1,2</sup>, 盛磊<sup>1,2</sup>

- (1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;
2. 孔径阵列与空间应用安徽省重点实验室, 安徽合肥 230088;
3. 中国人民解放军 93209 部队)

**摘要:** 为了实现全天时、高分辨率三维成像探测, 文中提出了一种工作波长为 1064 nm 的光子计数激光雷达系统。其中, 光学系统采用全光纤结构, 增强了系统稳定性。雷达通过整机扫描方式对远距离目标进行成像探测, 扩大扫描视场, 水平方向达到 360°, 俯仰方向达到±30°, 同时避免了由摆镜扫描引起的几何畸变; 结合亚像素扫描方法, 提高空间分辨率。最后通过自适应噪声阈值的多距离重建算法实现了目标的三维重建。实验结果表明, 此系统在白天成功实现了 3.1 km 以外目标的三维重建, 重建图像目标特征清晰, 距离精度为 0.11 m, 空间分辨率为 0.11 m, 超过光学系统衍射极限。

**关键词:** 激光雷达; 光子计数; 三维成像; 全光纤; 高分辨率

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210162

## High-resolution three-dimensional imaging based on all-fiber photon-counting Lidar system

Guo Jingjing<sup>1,2</sup>, Fei Xiaoyan<sup>3</sup>, Ge Peng<sup>1,2\*</sup>, Zhou Anran<sup>1,2</sup>, Wang Lei<sup>1,2</sup>, Li Zhengqi<sup>1,2</sup>, Sheng Lei<sup>1,2</sup>

- (1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
2. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China;
3. No. 93209, People's Liberation Army of China, China)

**Abstract:** A 1064 nm photon-counting Lidar system was experimentally demonstrated to realize high-resolution three-dimensional(3D) imaging all day. Herein, the optical system was composed of all-fiber components, which improved the system stability. Objects in long distance could be detected by Lidar system through whole machine scanning and the scanning view reached 360° in horizon and ±30° in azimuth direction. Also, the geometry distortion was avoided compared to swing mirror scanning. Additionally, the spatial resolution was increased by using a sub-pixel scanning method. Finally, 3D images could be reconstructed by a multi-range reconstruction algorithm with self-adaptive noise threshold. Results showed that a 3D object 3.1 km away was successfully reconstructed in daytime with clear features. The ranging accuracy was 0.11 m. The spatial resolution was about 0.11 m, beyond the diffraction limit of the optical system.

**Key words:** Lidar; photon-counting; 3D imaging; all-fiber; high-resolution

收稿日期:2021-03-13; 修订日期:2021-04-08

基金项目:军队后勤开放研究科研项目(BY119C009);安徽省自然科学基金(2008085QF315)

作者简介:郭静菁,女,工程师,博士,主要从事单光子三维成像方面的研究。

通讯作者:葛鹏,男,高级工程师,博士,主要从事单光子三维成像方面的研究。

## 0 引言

光子计数激光雷达系统 (Lidar) 可以实现光子量级的高灵敏度探测、 $\mu\text{rad}$  级的高空间分辨率, 近年来受到广泛关注<sup>[1]</sup>。激光能量在远距离大气传输过程中衰减严重, 回波信号甚至达到光子量级, 传统探测方式难以识别。光子计数激光雷达发射高重频、窄脉宽的脉冲激光, 利用单光子探测方式响应光子能量级别的微弱信号, 通过计算激光飞行时间, 获得几百甚至几十公里外的目标距离信息, 进而重建三维图像<sup>[2-3]</sup>。目前, 其应用已覆盖远距离成像<sup>[4-5]</sup>、大气探测<sup>[6]</sup>、地形测绘<sup>[7-8]</sup>等领域。

在光子计数激光雷达远距离成像领域, 林肯实验室自 2001 年开展了大量研究工作, 先后研制了多型机载激光雷达原理样机<sup>[9]</sup>, 在 2~9 km 空域完成飞行试验, 验证了全天时三维成像能力<sup>[10-11]</sup>。2015 年, Harris 公司推出了世界上第一款商用盖革模式激光雷达系统, 探测距离达到 6 km<sup>[12]</sup>。这些研究均是基于盖革模式单光子雪崩二极管 (GM-APD) 阵列, 受到阵列规模、暗计数、视场角等性能制约, 难以进一步提升视场。2011 年, NASA 验证了基于 4×4 光纤阵列的机载测绘激光雷达, 工作波长为 1030 nm, 探测距离达到 10 km<sup>[13]</sup>。国内在远距离成像方面的起步较晚, 中国科学院上海技术物理研究所搭建的基于 51 波束光纤阵列的 1064 nm 光子计数激光雷达, 可实现 3 km 以内的机载三维测绘<sup>[14]</sup>。华东师范大学搭建的 1550 nm 收发一体式光子计数激光雷达, 可以实现 21 km 的测距<sup>[4]</sup>。中国科学技术大学搭建的 1550 nm 光子计数激光雷达系统, 实现了 45 km 远距离成像<sup>[15]</sup>。在这些已

报道的光子计数激光雷达系统中, 收发光学系统大多采用空间光传输方式, 或空间光与光纤组合传输方式, 增加了系统不稳定性。此外, 扫描方式大多为摆镜扫描。为实现大范围扫描, 摆镜口径通常较大, 增大了系统尺寸; 另一方面, 摆镜旋转会导致反射图像发生几何畸变, 影响成像质量。

文中设计了一种工作波长为 1064 nm 的全光纤光子计数激光成像雷达系统, 通过整机扫描方式和亚像素扫描方法对 3 km 以上目标进行成像探测, 空间分辨率超越衍射极限, 并通过噪声阈值自适应的图像重建算法, 重建多距离目标信息。该系统适用于远距离探测、地形测绘等领域。

## 1 工作原理

### 1.1 飞行时间测距原理

文中设计的光子计数激光雷达系统, 通过发射脉冲激光, 记录脉冲飞行时间来探测目标距离, 通过二维扫描来实现大视场成像。系统工作原理见图 1, 激光器在内部电路驱动下产生高重频、窄脉宽的脉冲激光, 经准直扩束后出射。发射激光被目标反射后, 进入接收望远镜。最终回波信号进入硅基单光子探测器, 完成光电转换。时间相关单光子计数 (TCSPC) 模块记录激光发射时刻  $t_0$  和回波到达时刻  $t_1$ , 则目标距离  $R$  为:

$$R = (t_1 - t_0)c/2 \quad (1)$$

式中:  $c$  为光速。

利用 TCSPC 技术对单光子信号进行探测, 并且记录光子响应的时间, 具有极高的时间分辨率。该技术将时间轴分为离散的时间区间, 时间区间的大小决

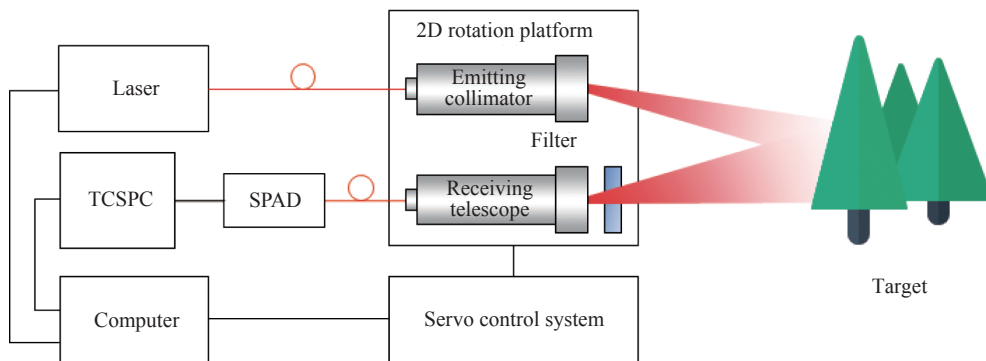


图 1 光子计数激光雷达系统原理图

Fig.1 Block diagram of photon-counting Lidar system

定了系统的精度。当探测器探测到一个或多个光子,产生一个响应输出,记录下该次响应发生的时间,并对该时间区间内的光子计数值加 1。当进行大量重复脉冲探测后,可以统计得到响应时间对应光子计数数目的统计直方图,直方图峰值表征回波幅度,峰值所在的时刻表征回波到达时间。直方图波形存在着一定的波形宽度,对应的是一定的时间跨度,即距离误差,所以需要选取一定的算法来得到最准确的距离信息。

### 1.2 高分辨率成像原理

#### (1) 静态视场角

通常,静止状态下光纤光学系统的空间分辨率由发射视场角 FOV 决定,可近似表达为:

$$FOV \approx \frac{MFD}{f} \quad (2)$$

式中: MFD 为光纤模场直径;  $f$  为望远镜焦距。

#### (2) 亚像素扫描成像

在远距离成像条件下,即使是很小的发散角也会在目标位置产生较大的光斑。为提高空间分辨率,文中采用如图 2 所示的亚像素扫描方法<sup>[16]</sup>。利用高精度转台,控制扫描角度步进小于 FOV,对静态视场覆盖区域进行  $n(n>1)$  次采样。整个场景扫描完成后,通过图像重建算法实现三维成像,分辨率为静态视场角的  $1/n$ 。

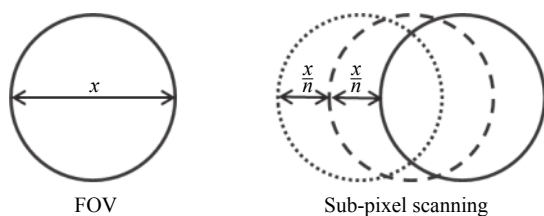


图 2 亚像素扫描方法

Fig.2 Sub-pixel scanning method

## 2 实验装置

文中设计的光子计数激光雷达系统主要由发射光学系统、接收光学系统、时间相关单光子计数模块、扫描系统和上位机组成。如图 1 所示,发射和接收光学系统为全光纤结构。发射光学系统由光纤激光器、准直镜构成。接收光学系统由滤波器、接收望远镜和单光子探测器组成。伺服系统由二维转台、

伺服控制系统、角度传感器、支架等构成。上位机负责控制激光器的脉宽、重频、泵浦功率、TCSPC 采集时间和采集模式,以及二维转台的转速和步进,并记录角度传感器的实时角度,完成数据采集和图像重建。

### 2.1 光学系统

光子计数激光成像雷达的典型工作波长包括 532 nm、1064 nm、1030 nm 和 1550 nm 等。波长对系统性能起到关键作用,例如太阳在 532 nm 的辐射量是 1064 nm 的三倍以上,因此大多数光子计数激光成像雷达工作于近红外波段。综合考虑太阳背景辐射、单光子探测器的光谱响应效率和技术成熟度,文中系统采用工作波长 1064.4 nm 的脉冲光纤激光器,重频为 40 kHz。激光器采用主振荡器加功率放大器(MOPA)结构设计,经过优化设计的多级光放大,实现峰值功率 6  $\mu$ J,脉宽 5 ns 的激光输出,线宽约为 0.04 nm。激光器输出尾纤为芯径 9/125  $\mu$ m 的 SMF-28e 光纤。发射准直镜焦距 80 mm。根据公式(2)计算可得,系统的静态视场角 FOV 约为 131  $\mu$ rad。

接收光学系统中,设计接收视场角为发射光束发散角的两倍。接收望远镜焦距为 40 mm,孔径为 20.5 mm。为了降低背景辐射噪声,接收准直镜前安装了带宽 1 nm 的滤光片,通过螺纹固紧于接收望远镜的前端。接收信号直接耦合进 SMF-28e 光纤,进入探测器,完成光电转换。

目前,能实现光子量级响应的探测器主要包括光电倍增管(PMT)、盖革模式单光子雪崩二极管(GM-APD)和超导探测器。其中,PMT 对近红外响应较低,体积较大,不适用于光子计数激光雷达。盖革模式单光子雪崩二极管(SPADs)是一种概率器件,可以一定的概率对单个光子发生雪崩。现有 SPAD 单光子探测器的货架产品主要采用 Si 基或 InGaAs 探测器<sup>[17]</sup>。InGaAs 探测器的死时间和暗计数都较大。Si 基探测器较为成熟,响应波段主要为可见光,对 1064 nm 波长的探测效率为 2%,对 1550 nm 波长几乎无响应。其他报道的提高探测效率的方法包括超导探测器和上转换技术等<sup>[18]</sup>,但仍处于实验室研究阶段,尚不成熟。因此,文中采用 Si 基单光子探测器,暗计数为 100 cps,死时间为 22 ns。

光学系统主要参数见表 1。

表 1 光学系统主要器件参数

Tab.1 Key parameters of the optical system

Devices	Parameters	Value
Laser	Wavelength/nm	1 064
	Pulse repetition frequency/kHz	40
	Peak energy/ $\mu$ J	6
	Pulse width/ns	5
Emitting collimator	Focus length/mm	80
Receiving telescope	Diameter/mm	20.5
	Focus length/mm	40
Fiber	Fiber diameter/ $\mu$ m	9/125
Filter	Band width/nm	1
	Dark count/cps	100
SPAD	Dead time/ns	22
	Detection efficiency	2%@1 064 nm

2.2 伺服系统

为扩大成像视场, 现有光子计数激光雷达系统基本采用摆镜扫描方法: 在出射/接收光路中加入反射镜, 通过旋转反射镜, 实现水平和俯仰方向的光束扫描。该方法存在以下两个问题: 一是反射镜口径较大, 二是反射图像存在几何畸变。反射镜示意图见图 3, 对于收发同轴光学系统, 设收发望远镜直径为  $w_1$ , 反射镜与激光发射光路的夹角为  $\theta$ ; 对于收发分置系统,  $w_1$  为发射和接收望远镜的最大包络距离, 其他与收发同轴光学系统相同。则反射镜直径  $w_2$  应大于  $w_1/\sin\theta$ , 以避免边缘能量损失。因此, 望远镜口径越大, 扫描角度越大, 需要的反射镜口径越大。

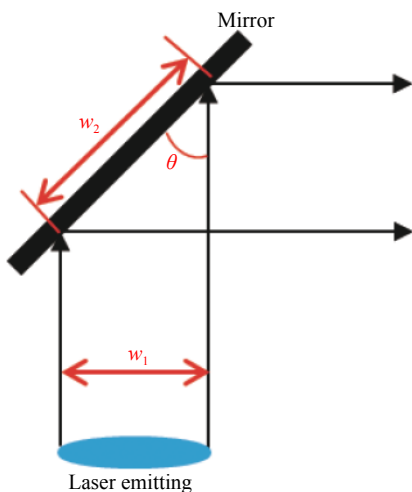


图 3 摆镜反射原理

Fig.3 Beam reflection by a mirror

此外, 摆镜引起的几何畸变如图 4 所示, 摆镜的两个相互垂直的旋转轴为  $r$  轴和  $p$  轴,  $p$  轴在  $xy$  平面内, 目标在  $xz$  平面内。如图 4(a) 所示, 当  $r$  轴与  $z$  轴平行,  $p$  轴与  $x$  轴呈  $45^\circ$  时, 目标经摆镜反射后, 反射像上下不变, 左右翻转, 与目标镜像对称。当  $r$  轴保持与  $z$  轴平行, 摆镜围绕  $r$  轴转动时, 如图 4(b) 所示, 与  $z$  轴平行的目标的反射像在  $z$  轴上的投影长度不变; 但与  $x$  轴平行的目标反射后长度发生拉伸或收缩。当  $p$  轴保持与  $x$  轴呈  $45^\circ$  时, 摆镜围绕  $p$  轴转动, 如图 4(c) 所示, 与  $x$  轴平行的目标的反射像在  $y$  轴上的投影长度不变; 与  $z$  轴平行的目标经反射镜反射后, 在  $yz$  平面内发生旋转。

为了避免反射像的几何畸变, 系统采用整机扫描方案, 即光学系统发射的激光直接照射目标, 通过将光学系统整体旋转, 实现水平和俯仰方向的扫描。如图 5 所示, 将一个一维转台水平放置, 以实现水平方向扫描; 将另一个一维转台垂直安装于水平转台上, 以实现俯仰方向扫描。光学系统中, 发射准直镜、接

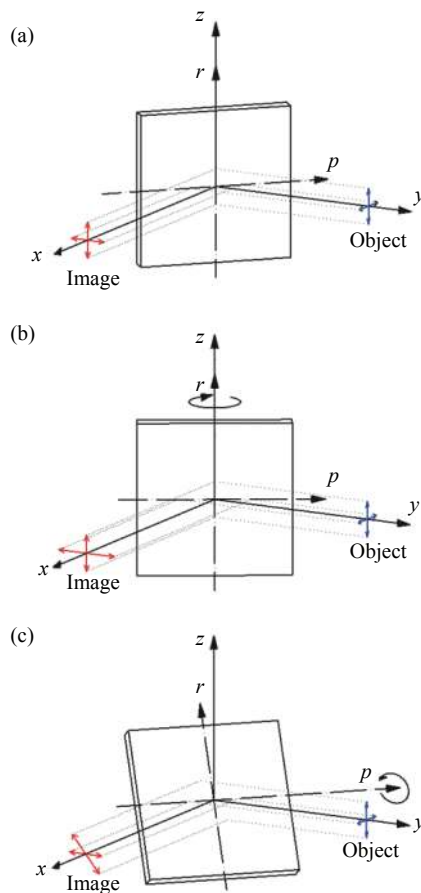


图 4 摆镜引起的几何畸变

Fig.4 Geometry distortion caused by a swing mirror

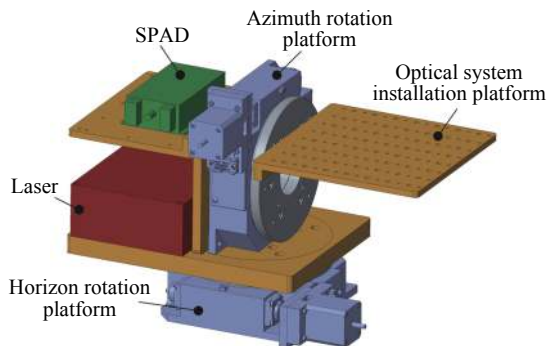


图 5 整机扫描转台设计

Fig.5 Design of the rotation platform

收望远镜、滤波片及其调整、夹持结构件安装于俯仰转台转动面的转接板上, 激光器和单光子探测器安装于俯仰转台底座的转接板上。转台水平扫描范围为 360°, 俯仰扫描范围为 ±30°。俯仰和水平方向的角度分辨率均为 0.002°(约等于 35 μrad)。因此, 扫描模式的空间分辨率理论上小于凝视模式的 1/3。

伺服控制过程如下: 第一步, 开启激光器和 TCSPC, 将激光器内部时钟作为 TCSPC 同步时钟; 第二步, 转台开始转动, 当按照设定角度步进值转动一定角度后, 转台停止转动; 第三步, TCSPC 按照设定的采集时间采集回波光子数据; 第四步, 判断转动角度是否达到设定转动范围, 若达到, 则扫描结束, 关闭激光器、TCSPC 和转台, 若未达到, 则跳转至第二步, 继续扫描。

### 3 图像重建算法

#### 3.1 单个像素的观测模型

为了精确提取距离信息, 系统采用多距离图像重建算法<sup>[19]</sup>。对于某一像素, 在连续时间域上的光子探测率函数  $\lambda(t)$  可以表达为:

$$\lambda(t) = \eta[h(t) * s(t)] + b \quad (3)$$

式中: \*表示卷积;  $h(t)$  为目标的响应函数;  $s(t)$  为探测器对发射脉冲的归一化响应函数;  $\eta$  为量子效率;  $b$  为噪声常数, 是背景辐射噪声和暗计数的总和。

对于真实场景来说, 若在一个脉冲周期  $T$  内接收到  $K$  个不同距离的回波信号, 则在光子计数直方图中将出现多个峰值<sup>[20]</sup>。该像素点接收的目标的脉冲响应函数  $h(t)$  可以表达为:

$$h(t) = \sum_{i=1}^K r_i \delta(t - 2d_i/c), \quad t \in [0, T] \quad (4)$$

式中:  $\delta(\cdot)$  为冲激函数;  $r_i$  和  $d_i$  分别为第  $i$  个反射体的反射率和距离;  $t$  为时间。

当探测器接收信号之后, 以一定的时间分辨率对接收到的信号离散采样, 经过  $N$  个脉冲周期的积累, 光子计数直方图中第  $k$  个时间单元的光子数  $y_k$  服从泊松分布, 即

$$y_k \sim \text{Poisson}((\mathbf{S}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{I}_n)_k), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x}$  表示连续函数  $h(t)$  采样后的离散形式, 是一个  $n \times 1$  向量;  $\mathbf{S}\mathbf{x}$  表示  $s(t)$  离散采样后与  $\mathbf{x}$  的卷积,  $\mathbf{S}$  为一个  $n \times n$  矩阵;  $\mathbf{b}$  为常数;  $\mathbf{I}_n$  为常数 1 组成的  $n \times 1$  向量。

#### 3.2 图像重建算法

目标图像重建问题即从光子直方图数据  $\mathbf{y}$  求解目标响应  $\mathbf{x}$  的问题。为了方便计算, 可以将  $\mathbf{y}$  的概率分布函数写成关于  $\mathbf{x}$  的负对数似然函数  $L(\mathbf{x}; \mathbf{y}, \mathbf{S}, \mathbf{b})$ 。因此, 多距离图像重建问题可以转化成在  $\mathbf{x}$  的非零元素等于  $K$  的条件下, 最小化负对数似然函数的问题:

$$\min_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}; \mathbf{y}, \mathbf{S}, \mathbf{b}) + \tau \|\mathbf{x}\|_1 \quad \mathbf{x}_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中:  $\tau > 0$ ;  $L(\mathbf{x}; \mathbf{y}, \mathbf{S}, \mathbf{b})$  和  $l_1$  范数为关于  $\mathbf{x}$  的凸函数, 所以, 最小化负对数似然函数也是一个凸优化问题。公式 (6) 中, 各输入变量如下:

- (1)  $\mathbf{y}$  为测量目标物获得的光子直方图数据。
- (2)  $\mathbf{S}$  为先通过测量获得探测器对发射脉冲的响应直方图, 再根据直方图拟合成归一化响应函数  $s(t)$ , 最终建立的  $\mathbf{S}$  矩阵。文中拟合的归一化响应函数为:

$$s(t) = \exp\left(-\frac{x^2}{\mu^2}\right) \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为发射激光脉宽。

(3)  $\mathbf{b}$  为根据  $\mathbf{y}$  计算的噪声常数。对于全天时、大幅宽的单光子成像场景, 背景噪声会随着扫描时长的增加而变化。定义系统盲区距离  $L_b$  内的光子直方图数据矩阵  $\mathbf{y}_b$  为:

$$\mathbf{y}_b = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}, \quad m = \frac{2L_b}{\Delta c} \quad (8)$$

在评价噪声水平时, 需要计算系统盲区接收光子数的平均值  $E_{y_b}$ , 用于表征噪声均值; 计算系统盲区接收光子数方差  $\sigma_{y_b}$ , 用于表征噪声波动情况。实际上, 由于接收噪声光子数也服从泊松分布,  $E_{y_b}$  近似等于  $\sigma_{y_b}$ , 为了节约计算资源, 可以只计算  $E_{y_b}$ 。根据噪声均值的高低, 文中对噪声常数  $\mathbf{b}$  采取分段赋值的方法:

$$b = \begin{cases} 3.5E_{y_b}, & E_{y_b} \leq 0.1 \\ 2.5E_{y_b}, & 0.1 < E_{y_b} \leq 0.2 \\ 1.5E_{y_b}, & 0.2 < E_{y_b} \leq 0.3 \end{cases} \quad (9)$$

(4)  $\tau = 3b$ ;

利用增加非零限制的迭代收缩阈值算法<sup>[19]</sup>, 可以求解该问题。文中对单个像素最多提取 2 个距离信息, 即  $K = 2$ 。对所有  $M \times N$  个像素运行迭代收缩阈值算法, 若存在目标, 则将最大响应幅度存入原始幅度像矩阵  $E_1$ , 对应的目标距离存入原始距离像矩阵  $L_1$ ; 若存在 2 个目标, 则将次级响应幅度存入原始幅度像矩阵  $E_2$ , 对应的目标距离存入原始距离像矩阵  $L_2$ 。

在获得原始距离像  $L_1$ 、 $L_2$  和原始幅度像  $E_1$ 、 $E_2$  后, 文中根据相邻像素的关联性进一步剔除图像噪声, 算法流程如下:

(1) 将所有  $E_1$  中的非零像素按照幅值从小到大排列, 定义排在前  $1/q$  的像素的最大幅值为噪声幅度阈值; 将  $E_1$  中所有小于噪声幅度阈值的像素赋值为 0;

(2) 以  $E_1$  中任一非零像素为中心, 若至少有 7 个相邻像素为 0, 则将该像素赋值为 0,

(3) 若  $E_1$  中某个像素的值为 0, 则将  $E_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  中对应像素赋值为 0;

(4) 输出优化后的  $L_{opt1}$ 、 $L_{opt2}$ 、 $E_{opt1}$  和  $E_{opt2}$ 。

根据优化后的距离像  $L_{opt1}$ 、 $L_{opt2}$  和转台扫描的相对角度信息, 即可重建激光三维点云。

#### 4 实验结果与讨论

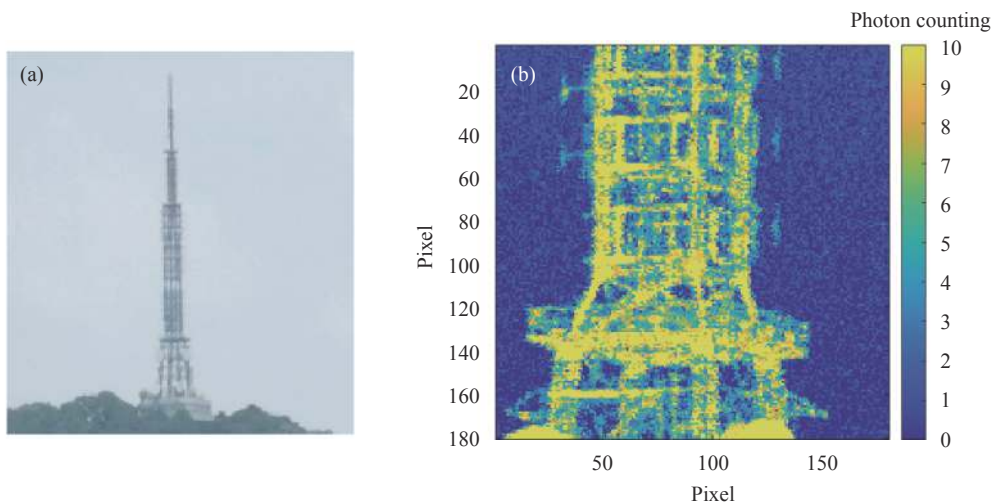
实验采用逐行扫描模式, 某一行水平扫描结束后, 俯仰方向步进  $0.002^\circ$ , 水平方向回到初始角度, 开

始下一行扫描。扫描按照从左到右, 从上到下的顺序进行, 每个像素的采集时间为 100 ms。整个过程由角度传感器记录实时角度信息。

实验被测目标为 2.1 km 以外某山顶天线塔和 3.1 km 以外某大楼。扫描天线塔当日天气为晴天, 能见度 8 km; 扫描大楼当日天气为晴天, 能见度 14 km。实验装置安装在实验室内。

图 6 给出了天线塔塔底部分的幅度像成像结果。图 6(a) 为可见光相机拍摄的目标照片。作为对比, 首先将噪声常数  $b$  设为噪声均值的固定倍数, 即  $b = 2.5E_{y_b}$ , 原始幅度像重建结果见图 6(b)。分析每个像素的光子直方图数据可得, 从第一行像素至最后一行, 噪声均值从 0.28 逐渐降低至 0.09。这是因为随着扫描时间的增加, 太阳逐渐落山, 导致背景辐射强度逐渐降低。图 6(b) 中, 在绝大部分没有目标存在的天空区域, 噪声依然作为目标被提取了出来, 在空间上呈连续分布, 塔身的爬架几乎湮没在噪声中, 图像质量较差。图 6(c) 为采用文中的噪声自适应方法获得的原始幅度像, 天空区域的噪声大幅下降, 目标和噪声的幅度对比度增大。进一步剔除图像噪声, 设置幅度阈值为 1, 大部分噪点被剔除, 但尚有少数离散的噪点存在。根据相邻像素的关联性, 可以将离散分布的噪点剔除, 最终获得的幅度像如图 6(d) 所示, 可以较为清晰地辨认包括攀爬架在内的天线塔结构, 噪点抑制效果明显。

消除图像噪点后的天线塔重建图像见图 7, 天线塔框架结构清晰, 背景噪声抑制效果较好。该实验证明了文中提出的噪声常数自适应的图像重建算法可



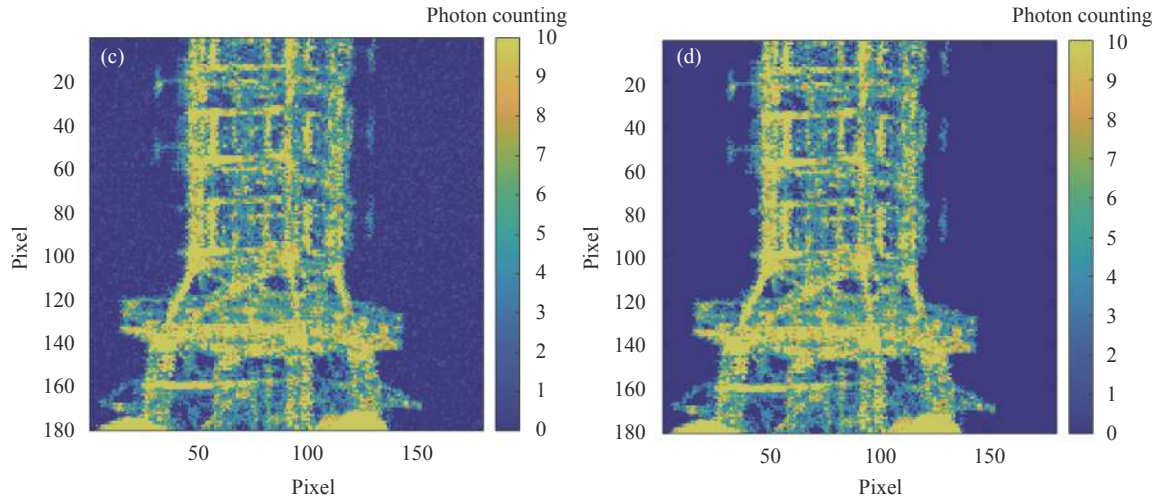


图 6 塔底幅度像成像结果。(a) 可见光相机拍摄的被测目标照片；(b) 噪声常数  $b = 2.5 E_{yb}$ ；(c) 噪声常数根据噪声均值分段赋值；(d) 噪声抑制结果

Fig.6 Intensity image of the bottom of the poly. (a) Photo of the target taken by a visible-band camera; (b) Noise threshold  $b = 2.5 E_{yb}$ ; (c) Self-adaptive noise threshold; (d) Noise censoring results

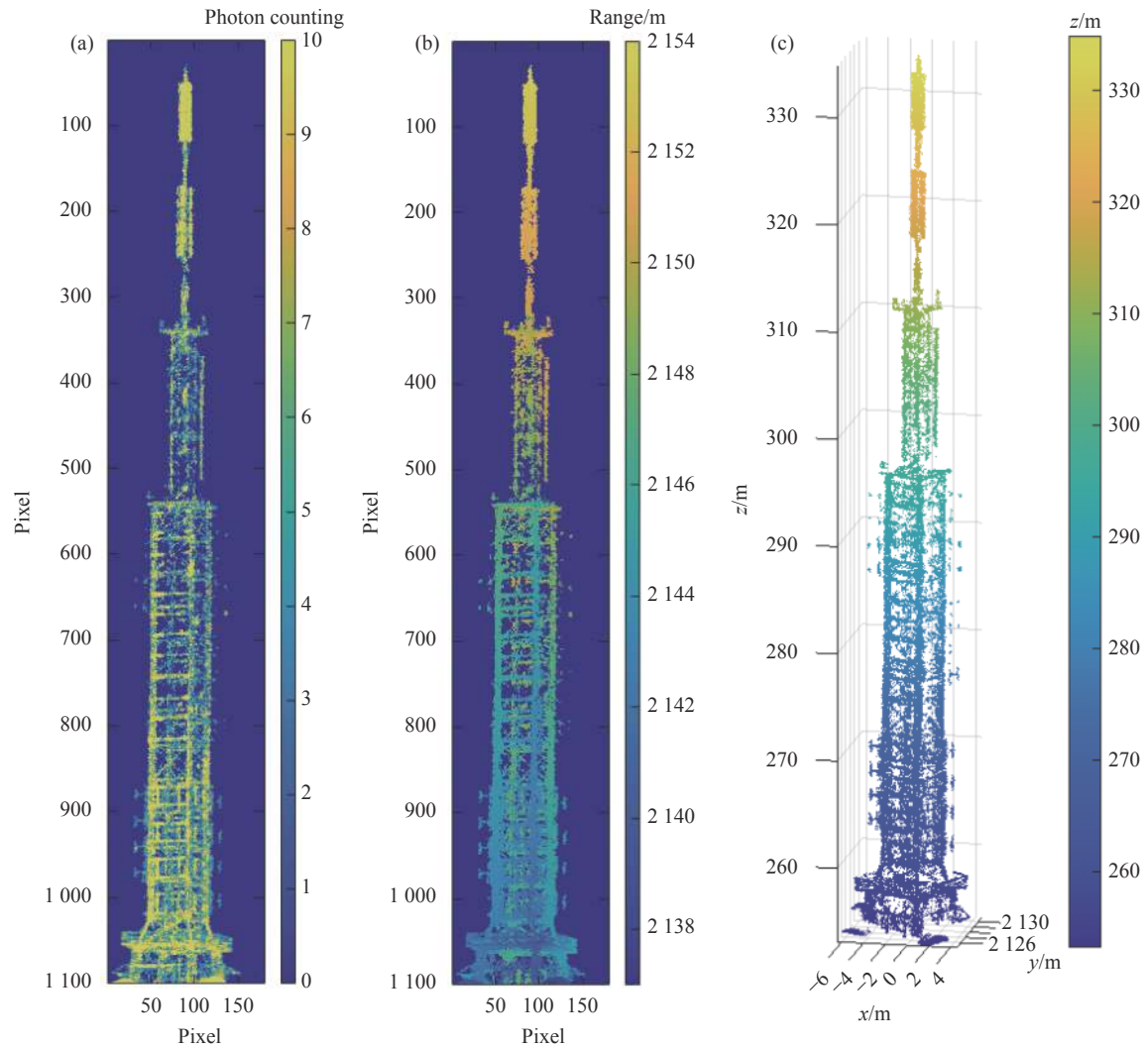


图 7 天线塔重建成像结果。(a) 幅度像；(b) 距离像；(c) 三维点云重建

Fig.7 Image reconstruction of the poly. (a) Intensity image; (b) Range image; (c) 3D point cloud reconstruction



以有效提取目标特征,抑制背景噪声。

为了进一步验证多距离图像的重建效果,笔者对存在前后遮挡关系的目标进行了成像实验。如图 8 所示,视场范围内 1.1 km 处的电线对 3.1 km 处的某建筑存在部分遮挡。

重建结果见图 9,  $E_1$  为提取最大幅值信号重建的



图 8 可见光相机拍摄的被测场景照片

Fig.8 Photo of the target scene taken by a visible-band camera

图像,对应的目标像为  $L_1$ ;  $E_2$  为提取次级幅值信号重建的图像,对应的距离像为  $L_2$ 。点云重建结果见图 10。从重建结果可以看出,位于前景的电线和被电线遮挡的建筑物能够同时被提取出来,实验结果验证了文中的图像重建算法可以重建多距离目标。

进一步对建筑物进行 5 次重复测距,每次累计时间均为 100 ms。5 次测距结果为 3 135.05 m、3 134.82 m、3 134.90 m、3 134.98 m 和 3 135.12 m。根据均方根误差公式

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n}} \quad (10)$$

式中:  $n$  为测量次数;  $R_i$  为每次距离测量值;  $\bar{R}$  为测量平均值。计算可得 5 次测量的均方根误差约为 0.11 m。因此,文中系统的测距精度为 0.11 m。

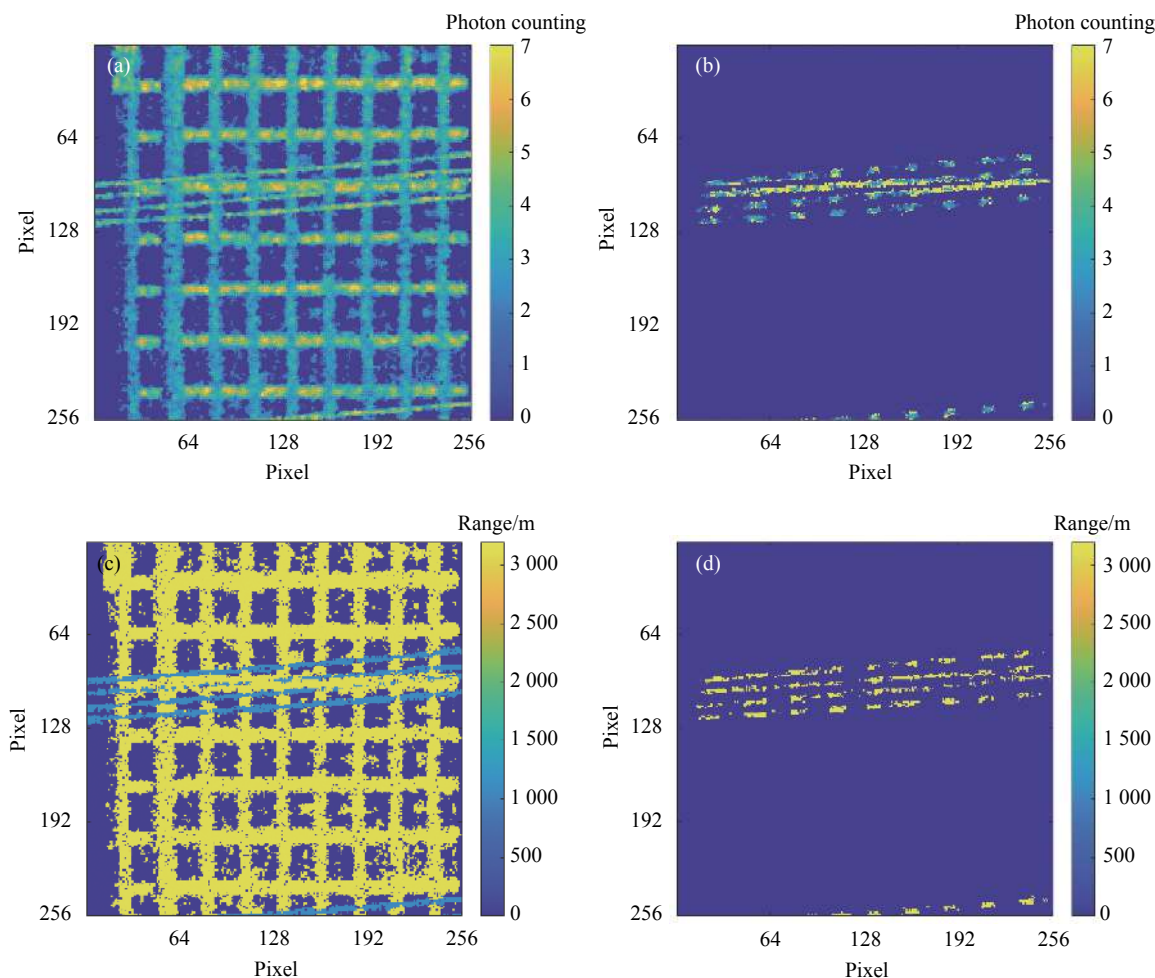


图 9 多距离目标重建结果。(a) 幅度像  $E_1$ ; (b) 幅度像  $E_2$ ; (c) 距离像  $L_1$ ; (d) 距离像  $L_2$

Fig.9 Multi-range image reconstruction results. (a) Intensity image  $E_1$ ; (b) Intensity image  $E_2$ ; (c) Depth image  $L_1$ ; (d) Depth Estimation  $L_2$

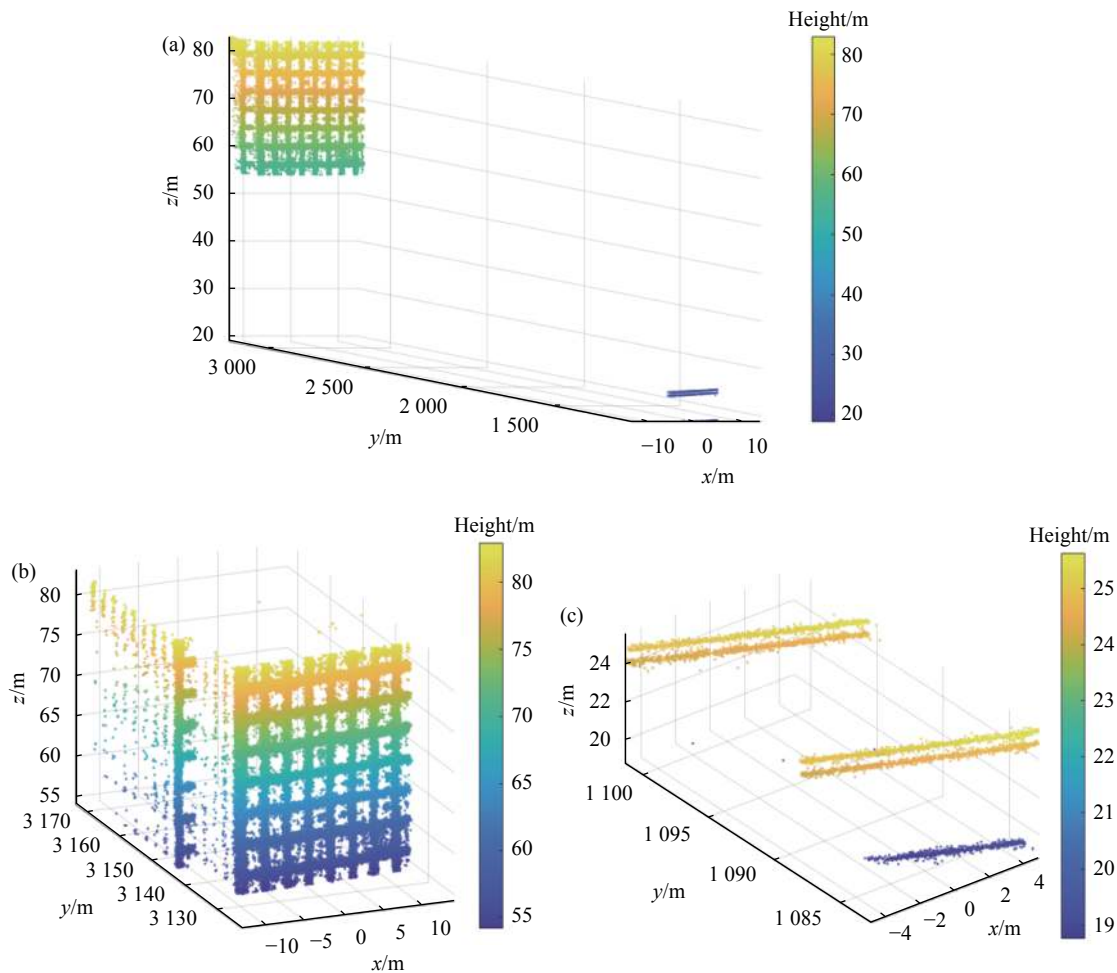


图 10 三维点云重建。(a) 多距离目标重建; (b) 3.1 km 处建筑物局部放大图; (c) 1.1 km 处电线的局部放大图

Fig.10 3D point cloud reconstruction. (a) Multi-range object reconstruction; (b) Enlarged image of the building 3.1 km away; (c) Enlarged image of the cables 1.1 km away

## 5 总结与展望

文中提出了一种 1064 nm 全光纤光子计数激光雷达系统,介绍了系统工作原理和硬件构成。然后研究了光子计数图像重建算法,给出了自适应噪声阈值的计算方法。实验结果证明:系统在白天成功重建了 3.1 km 以外的目标,空间分辨率为 0.11 m,超越衍射极限,成功提取多距离目标信息,测距精度为 0.11 m,最终重建的图像特征清晰,噪声抑制效果较好。该系统适用于地面固定式或车载式激光雷达,用于远距离目标探测。

但是,文中搭建的系统尚存在扫描成像时间较长、视场较小、探测距离较短等问题。在接下来的工作中,笔者将继续研究基于光纤阵列的光子计数激光雷达系统,进一步缩短成像时间、扩大静态视场范围

和提高探测距离,推动该项技术在机载测绘领域的发展。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Li Z H. Multi-beam photon-counting laser imaging [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. (in Chinese)
- [3] Ge Peng, Guo Jingjing, Chen Cong, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305007. (in Chinese)
- [4] 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): 10.1038/s41598-018-22675-1.
- [5] McCarthy A, Krichel N, Gemmell N, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904-8915.
- [6] Shangguan M J, Xia H Y, Wang C, et al. All-fiber upconversion high spectral resolution wind [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19322-19336.
- [7] Clifton W E, Steeleb B, Nelsonb G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping lidar system[C]//Laser Radar Technology and Applications XX; and Atmospheric Propagation XII. International Society for Optics and Photonics, 2015: 946506.
- [8] Degnan J J. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 958.
- [9] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [10] Dumanis D. Airborne Optical Systems Testbed(AOSTB)[R]. US: MIT Lincoln Laboratory, 2016.
- [11] Albota M A, Gurjar R, Mangogna A, et al. Contributed Review: Advanced three-dimensional laser radar imaging with the airborne optical systems testbed [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 101502.
- [12] Bahr T, Smith P. Airborne Geiger-mode lidar for large-scale, high-resolution wide-area mapping[C]//GI Forum, 2016, 1: 85-93.
- [13] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. A 16-beam non-scanning swath mapping laser altimeter instrument[C]//Proc SPIE, 2013, 8599: 85990P.
- [14] Li M. Research on technologies of photon counting Lidar based on fiber optics [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [15] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km [J]. *arXiv*, 2019: 1904.10341.
- [16] 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.
- [17] Qiu J. Airborne polarization lidar with 1.5  $\mu\text{m}$  single-photon detectors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [18] Shangguan M J. Laser remote sensing with 1.5  $\mu\text{m}$  single photon detectors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [19] Shin D, Xu F, Wong F N, et al. Computational multi-depth single-photon imaging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 253588.
- [20] Tobin R, Halimi A, McCarthy A, et al. Three-dimensional single-photon imaging through obscurants [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4590-4611.