

文章编号 1004-924X(2013)10-2488-07

光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正

何伟基^{1,2*}, 司马博羽¹, 苗 壮², 陈云飞¹, 陈 钱¹, 顾国华¹

(1. 南京理工大学 江苏省微光成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710005)

摘要: 实施光子飞行时间测量法时, 光子飞行时间测量值受激光回波信号能量的影响会出现测量反转误差, 从而影响系统三维成像的精度。本文描述了一种光子计数三维成像激光雷达系统反转误差的校正方法及其实验。提出的反转误差校正方法包含先验模型标定和反转误差校正两个步骤。首先, 通过标定法得到系统反转误差相对于激光脉冲响应率的函数关系, 建立系统的反转误差预测函数。然后, 由系统反转误差函数预测出原始三维图像的反转误差图像并实现原始三维图像的反转误差校正。实验搭建了光子计数三维成像激光雷达系统, 采用盖格-雪崩光电二极管(Gm-APD)作为光子探测器, 由高速扫描振镜二维扫描获取三维图像。通过时间相关记录仪获取光子到达时间分布, 分别得到原始三维图像和激光脉冲响应率。在反转误差校正的测试实验中, 系统的测量均方差由校正前的 33.2 mm 提高至 8.1 mm。实验结果表明, 该反转误差校正方法可以有效降低光子计数三维成像激光雷达的反转误差。

关键词: 激光雷达; 光子计数; 三维成像; 反转误差; 误差校正

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2488

Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar

HE Wei-ji^{1,2*}, SIMA Bo-yu¹, MIAO Zhuang², CHEN Yun-fei¹, CHEN Qian¹, GU Guo-hua¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense (SIIS),
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Science & Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710005, China)

* Corresponding author, E-mail: njusthewei@163.com

Abstract: When photon time-of-flight measurement is used, the measurement accuracy will decrease due to the reversal error of time-of-flight measurement. In this paper, a method to correct the reversal error is described in detail. The correction method proposed here included two steps: prior modeling calibration and reversal error correction. Firstly, the function relationship between laser pulse response rate and reversal error was obtained by the calibration method and the reversal error prediction function was established. Then, the reversal error of an original 3D image was calculated by the reversal error prediction function and the 3D image was corrected. Finally, a photon counting 3D imaging lidar system was constructed, in which the Geiger mode Avalanche Photodiode(Gm-APD) was used as a photon detector and the high-speed galvanometer as a scanner. A Time Correlation Single Photon Counting (TCSPC) module was used to mark the arrival time of each photon event. The original 3D

收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-05-17.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室开放基金资助项目(No. J20130501); 国家自然科学基金资助项目(No. 61101196, No. 61271332); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M521085)

image and laser pulse response rate were acquired by the arrival time distribution of photon events. In performance evaluation test, the mean square error of ranging results is improved from 33.2 mm to 8.1mm after correction. The reversal error correction method proposed in this paper effectively reduces the reversal error caused by the energy fluctuation of laser echo pulse in the photon counting 3D imaging lidar.

Key words: lidar; photon counting; 3D imaging; reversal error; error correction

1 引言

三维成像激光雷达可以获取目标区域的三维影像数据,其成像数据的几何不变特性可以避免二维图像中的扭曲和混淆,已广泛应用于工业模具设计、军事目标自动识别等领域^[1]。其中,光子计数三维成像激光雷达系统采用盖革-雪崩光电二极管(Geiger Mode Avalanche Photo Diode, Gm-APD)作为激光脉冲回波的光子探测器,具有精度高、作用距离远等优势,因此有重要的军民应用价值^[2-5]。

光子计数三维成像激光雷达系统利用重复多激光脉冲直接探测方式来获取高精度的三维图像。系统的测量精确度是最为重要的参数之一,它受到光子探测器响应特性和目标激光回波信号能量的影响^[6-7]。其中,探测器响应特性引起的测量误差属于系统的固有误差;激光脉冲回波信号能量的差异会引入额外的测量误差,例如:相同距离的两个目标,高反射率目标测量得到的距离值比实际距离近,而低反射率目标测量得到的距离值比实际距离远。这种由激光脉冲回波信号能量差异引入的测量误差称之为反转误差。由于系统获取的三维图像中必然包含多个具有不同反射率的区域,所以反转误差不可避免。因此,校正反转误差对于提高系统的测量精确度有重要意义。

Kirchner G 等人采用多阈值比较电路进行了反转误差校正实验^[8],但该实验需要额外增加多个高速模拟比较器,结构复杂,集成难度高,应用价值有限。Min S 等人提出了基于查找表的反转误差校正方法^[9]。本论文提出了一种光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正方法。该校正方法的原理类似于红外焦平面阵列非均匀性校正方法,包含先验标定和校正两个步骤:首先,通过标定法得到系统反转误差相对于激光脉冲响应率

的函数关系,建立系统的反转误差预测函数;然后,由系统反转误差预测函数得到原始三维图像的反转误差补偿图像,从而实现反转误差的校正。最后,通过搭建的光子计数三维成像激光雷达实验系统对反转误差校正方法进行了实验验证。

2 反转误差分析

假定光子计数三维成像激光雷达系统与目标间的距离为 L ,则光子的飞行时间为 $t_{\text{tof}} = 2L/C$ 。其中, C 为光子飞行速度。

光子计数三维成像激光雷达采用重复直接探测的方式来获取光子飞行时间。假定光子飞行时间的判定采用均值判别法(质心法),则光子飞行时间的测量误差为:

$$t_{\text{error}} = \overline{t_{\text{me}}} - t_{\text{tof}}, \quad (1)$$

式中: $\overline{t_{\text{me}}}$ 表示光子飞行时间的测量均值; t_{tof} 表示光子飞行时间的实际值。反转误差表现为光子飞行时间的测量值与实际值存在的差异,它表示为:

$$L_{\text{error}} = \frac{C}{2} \times t_{\text{error}}. \quad (2)$$

光子计数三维成像激光雷达所使用的光子探测器是一类工作电压高于器件击穿电压的 Gm-APD。这类光电二极管的光敏面吸收激光回波信号光子产生初级载流子,载流子注入到探测器的倍增区域,启动探测器内部倍增机制,从而使 Gm-APD 的输出电流迅速增加并在短时间内形成有效的脉冲信号。

然而,由于初级载流子的注入数量不同,即激光回波信号光子数量的差异,使得 Gm-APD 输出的电流脉冲在强度、相位上有所差异,从而导致后续时刻鉴别电路的检出时刻存在时间延迟,这种现象称为光子探测器的脉冲输出延迟效应。

当初级载流子的注入数量为 n 时,令 Gm-APD 的脉冲延迟时间均值为 T_n ,则 T_n 服从泊松

分布。此时, Gm-APD 的脉冲输出延迟特性与初级载流子的注入数量的关系可以表示为:

$$p(t_{\text{delay}}=t) = \frac{1}{t!} [T(n)^t \exp(-T(n))]. \quad (3)$$

Gm-APD 的脉冲输出延迟时间与初级载流子注入数量相关。通常, Gm-APD 的脉冲输出延迟时间反比于初级载流子的注入数量, 即: 初级载流子的注入数量越多, Gm-APD 的脉冲输出延迟时间越小; 反之, Gm-APD 的脉冲输出延迟时间越大。由于系统获取的三维图像中必然包含多个具有不同反射率的区域, Gm-APD 的脉冲输出延迟效应将导致系统输出的三维图像存在反转误差。

通过对系统反转误差的建模, 即建立反转误差与激光回波信号光子数量(即激光回波信号能量)的关联, 为反转误差的校正提供支撑。

理论上, 反转误差模型可以表示为:

$$t_{\text{error}} = f(n), \quad (4)$$

式中: n 表示激光回波信号的光子数量。然而, 由于 Gm-APD 存在死时间效应, 在单次探测过程中最多只能响应一个光子, 直接测量激光回波信号光子数量存在困难。因此, 本论文提出了一种新的反转误差建模方法。

考虑到 Gm-APD 的激光脉冲响应概率正比于激光回波信号中的光子数量, 本文定义了激光脉冲响应率 $R(n)$, 并以此来间接反映激光回波信号的光子数量, 从而解决了反转误差建模中的难题。

激光脉冲响应率定义为:

$$R(n) = \frac{N_{\text{pulse}}}{N_{\text{total}}}, \quad (5)$$

式中: N_{pulse} 表示在测量过程中 Gm-APD 输出的有效脉冲数量; N_{total} 表示在测量过程中系统输出的激光脉冲数量。

在本文建立的反转误差模型中, 输入变量由激光脉冲回波信号的光子数量转变为激光脉冲响应率。因此, 系统的反转误差模型可进一步转化为:

$$t_{\text{error}} \propto R(n). \quad (6)$$

式(6)中, 激光脉冲响应率 $R(n)$ 正比于激光脉冲回波光子数 n 。由于激光脉冲响应率是实验中的可测变量, 因此可以获取反转误差与激光脉

冲响应率的函数关系, 从而建立反转误差模型。

3 实验装置

实验系统原理如图 1 所示。光学系统为发射/接收同光轴光路^[10], 采用偏振分束棱镜作为收发光路中的传输/接收开关, 并由两轴振镜实现二维扫描。在激光脉冲输出前端增加了一个半波片, 用于调节激光脉冲的输出能量, 从而使回波信号的光子数发生变化。

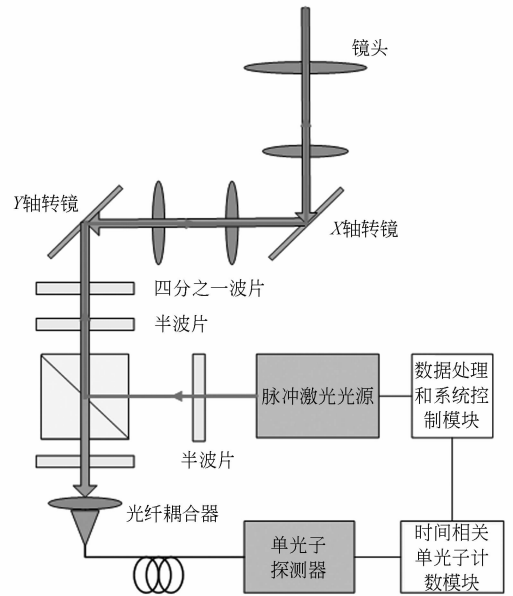


图 1 实验系统总体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

脉冲激光器为被动调 Q 半导体激光光源, 波长为 830 nm, 频率为 2.5 MHz, 半波宽为 50 ps。单光子探测器采用铂金埃尔默公司的商用 Gm-APD, 暗计数小于 100 Hz, 死时间在 50 ns 左右, 带有数字电平门控功能, 时间抖动在 500 ps 左右。时间相关记录仪使用的是 PicoHarp 300, 用来记录光子到达时间的分布, 具有 4 ps 的时间分辨率。

系统控制器用于同时输出激光器的激发信号和时间相关仪的同步起始信号。Gm-APD 收到回波信号后产生光子到达时间标志, 并给时间相关记录仪提供截止信号。

3.1 反转误差标定

采用图 1 所示的实验装置,本文首先通过标定方法确立了反转误差模型的相关参数。对同一目标的相同位置进行多组测量,通过旋转半波片改变半波片的晶轴方向,使得激光脉冲的输出能量从强到弱逐步减小,即激光脉冲回波信号的光子数量逐步减少,得到不同激光脉冲响应率下对应的光子飞行时间的测量值,进而得到与之相对应的反转误差。

本文总共进行了 8 组测量试验,8 组测量数据的激光脉冲能量为 $E_i (1 \leq i \leq 8)$ 。每次测量过程中,激光脉冲的重复次数设定为 N_{total} 。将实验结果用二维数组来表示,记录为 $t_{tof}(i, j) (1 \leq i \leq 8, 1 \leq j \leq N_{total})$ 。其中, i 和 j 是实验测量结果的索引。

激光脉冲能量 $E_i (1 \leq i \leq 8)$ 对应的激光脉冲响应率为:

$$R(i) = \frac{N_{pulse}(i)}{N_{total}(i)}, \quad (7)$$

其中: $N_{pulse}(i)$ 表示在测量持续时间内,探测器响应的脉冲总数; $N_{total}(i)$ 表示在测量持续时间内激光脉冲总数。

计算每组光子飞行时间测量值的均值,得到与激光脉冲响应率 $R(i)$ 对应的光子飞行时间的测量均值 $\overline{t_{me}}(i)$, 有:

$$\overline{t_{me}}(i) = \frac{1}{N_{total}} \sum_{j=1}^{N_{total}} t_{tof}(i, j). \quad (8)$$

定义激光脉冲响应率最小时的光子飞行时间标准值为 t_{tof} , 得到反转误差 $t_{error}(i) = \overline{t_{me}}(i) - t_{tof}$ 。实验结果如图 2 所示。

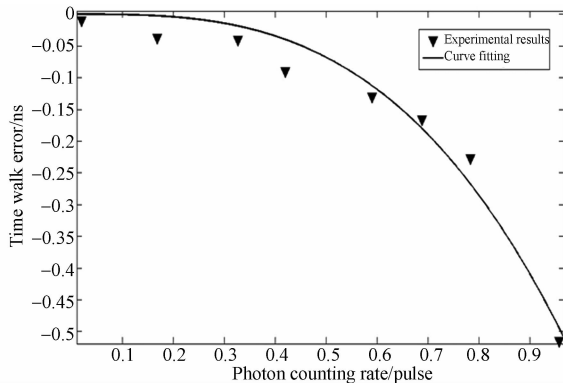


图 2 反转误差测试结果

Fig. 2 Experimental result of reversal error with different laser pulse response rates

采用 $t_{error}(R) = a * R^b$ 对测试结果进行拟合,如图 2 所示。 t_{error} 表示距离行走误差; R 表示脉冲响应率,数值变化范围为 $0 \sim 1$ 。最终得到 $a = -0.5659, b = 3.06$, 即距离行走误差与脉冲响应率的关系为:

$$t_{error}(R) = -0.5659 * R^{3.06}. \quad (9)$$

通过标定方法,本论文首先确定了反转误差模型的相关参数,建立了反转误差与激光脉冲响应率之间的关系,得到了反转误差的定量预测模型,如式(9)所示。

3.2 校正算法原理与实施

本文设计的校正算法原理与实施方案如图 3 所示。

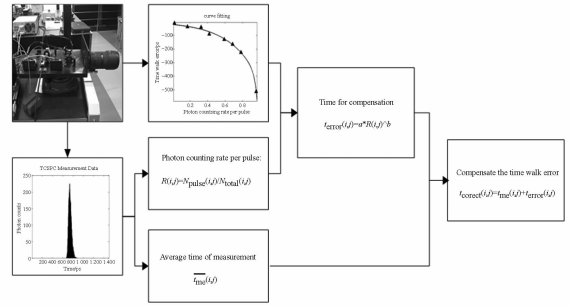


图 3 反转误差校正算法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reversal error correction method

实验采用的光子计数三维成像激光雷达系统如图 1 所示。与传统光子计数三维成像激光雷达^[11]直接统计光子飞行时间测量值不同,该校正算法增加了脉冲响应率计算和反转误差预测两个步骤。

算法实施步骤如下:

(1)统计像素位置为 (x, y) 的光子飞行时间测量值,得到位置 (x, y) 对应的光子飞行时间测量均值,组成原始三维距离图像 $\overline{t_{me}}(x, y)$;

(2)统计像素位置为 (x, y) 的光子脉冲响应率,得到激光脉冲响应率图像 $R(x, y)$, 为:

$$R(x, y) = N_{pulse}(x, y) / N_{total}(x, y), \quad (10)$$

式中: $N_{pulse}(x, y)$ 表示在像素位置 (x, y) 处探测器的输出脉冲总数; $N_{total}(x, y)$ 表示在像素位置 (x, y) 处的激光脉冲总数。

(3)预测像素位置为 (x, y) 的反转误差,得到反转误差预测图像 $t_{error}(x, y)$, 为:

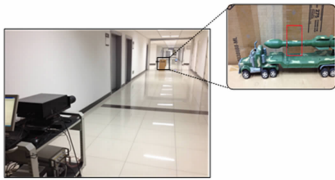
$$t_{\text{error}}(x, y) = a * R(x, y) \wedge b. \quad (11)$$

(4) 由步骤(3)得到的反转误差预测图像 $t_{\text{error}}(x, y)$ 对原始三维距离图像进行补偿, 得到校正后的三维距离图像 $t_{\text{correct}}(x, y)$, 为:

$$t_{\text{correct}}(x, y) = \overline{t_{\text{me}}}(x, y) + t_{\text{error}}(x, y). \quad (12)$$

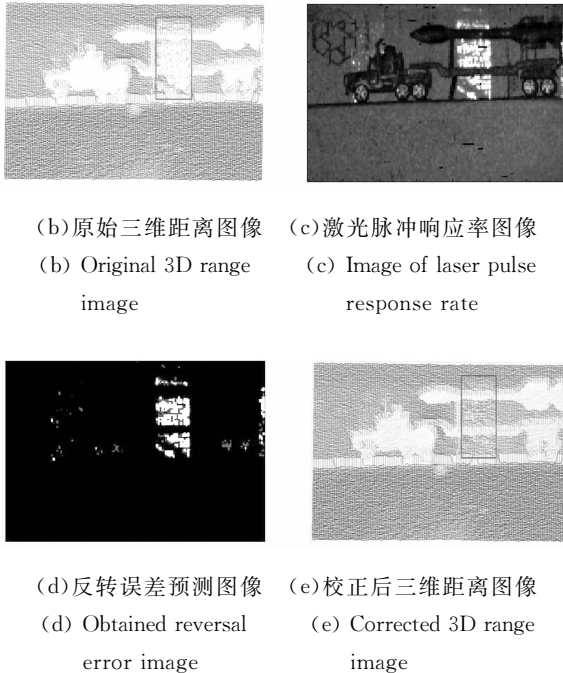
3.3 校正实验与结果

实验采用了典型车辆作为目标。实验背景选择了低反射率的均匀漫反射体, 但背景中间插入一块高反射率平板, 如图 4(a) 中红色方框区域所示(彩图见期刊电子版)。背景中的高反射率平板对光子计数三维成像激光雷达的测量造成了明显干扰, 使得到的原始三维距离图像出现了明显的测量误差, 如图 4(b) 所示。



(a) 实验场景及小车模型实物图

(a) Experimental scene and vehicle model



(b) 原始三维距离图像
(b) Original 3D range image

(c) 激光脉冲响应率图像
(c) Image of laser pulse response rate

(d) 反转误差预测图像
(d) Obtained reversal error image

(e) 校正后三维距离图像
(e) Corrected 3D range image

图 4 反转误差校正实验及其结果

Fig. 4 Experiment and obtained results for reversal error correction

统计原始三维距离图像的激光脉冲响应率分布, 如图 4(c) 所示。原始三维距离图像中出现测量误差的区域与激光脉冲响应率图像中高反射率区域相对应。对原始三维距离图像应用补偿算法进行校正。采用标定得到的反转误差模型对原始三维距离图像中的反转误差进行预测, 得到反转误差预测图像, 如图 4(d) 所示。最终, 由原始三维距离图像 4(b) 和反转误差预测图像 4(d), 得到校正后的三维距离图像, 如图 4(e) 所示。

由图可知, 校正后的三维距离图像明显地消除了背景中高反射率平板的干扰。由此可知, 原始三维距离图像中的测量误差已被消除, 避免了对后续应用的干扰。

3.4 校正算法评估实验与结果

校正算法评估实验采用一个由黑白两部分构成的平板作为标准靶标, 如图 5(a) 所示。标准靶标由黑色和白色两个区域组成, 黑色部分为粗糙绒布, 具有低反射特性; 白色区域部分表面粘贴了一层透明胶带, 具有高反射特性。采用光子计数三维成像激光雷达得到目标的原始三维距离图像, 如图 5(b) 所示。由于目标两个区域具有截然不同的反射率, 图 5(b) 的结果呈现出明显的阶梯状。采用本论文提出的反转误差校正算法对原始三维距离图像进行校正, 得到校正后的三维距离图像, 如图 5(c) 所示。

分别计算图 5(b) 和图 5(c) 的均方差, 得到原始的和校正后的三维距离图像的计算结果分别为 33.2 mm 和 8.1 mm。计算结果表明, 使用校正算法可以明显降低反转误差。

实验证明, 通过对系统反转误差进行先验标定并依此设计校正算法, 可以消除原始三维图像中因目标(或场景)表面激光脉冲反射率差异导致的反转误差, 降低了反转误差对测量精确度的干扰。实验结果表明, 在不增加系统复杂度的前提下, 因目标(背景)反射能量差异造成的反转误差是可以有效避免的。

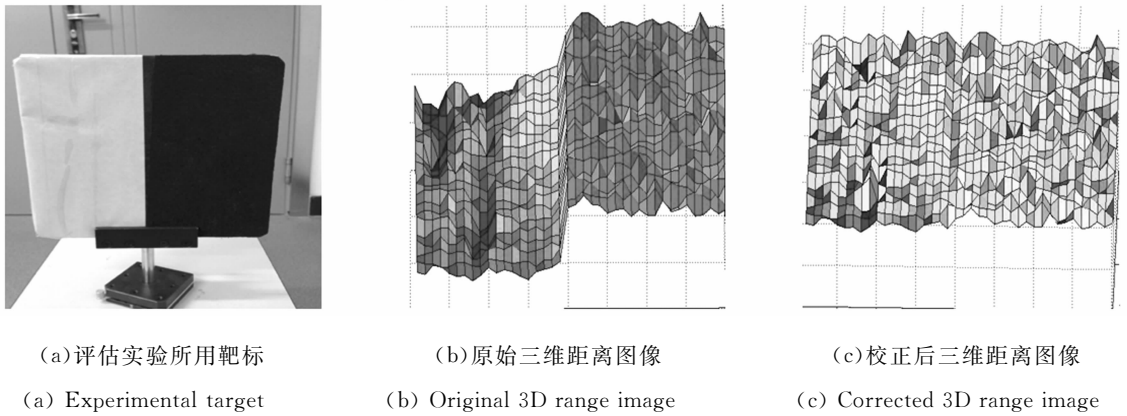


图5 反转误差校正算法性能评估实验及其结果

Fig. 5 Evaluation results for reversal error correction algorithm

4 结 论

反转误差是光子计数三维成像激光雷达不可避免的问题之一。本文通过实验证明了反转误差与激光脉冲响应率有直接关联,并以此为基础,设计了光子计数三维成像激光雷达的反转误差校正算法。该算法通过激光脉冲响应率图像来逐点预测原始三维距离图像的反转误差并实施校正。验证实验表明,该算法可以有效降低目标(背景)因反射能量差异造成的反转误差,避免了系统测量

误差的干扰。

论文提出的反转误差校正方法具有简单、易于实现且实用性突出的特点。该方法借鉴了红外焦平面阵列成像中的非均匀性校正算法的原理,在没有增加系统复杂程度的前提下,仅仅通过统计激光脉冲响应率图像即可实现反转误差的校正。

本文将反转误差校正的概念引入到光子计数三维成像激光雷达成像,并对点像素扫描成像雷达进行了实验验证。所提出的原理和方法完全适用于其它面阵类型的三维成像激光雷达。

参考文献:

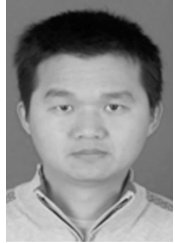
- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39:10-22.
- [2] MASSA J S, WALLACE A M, BULLER G S, *et al.*. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22:543-545.
- [3] MARINO R M, DAVIS W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Lab. J.*, 2005, 15: 23-36.
- [4] WARBURTON R E, MCCARTHY A, WALLACE A M, *et al.*. Sub-centimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32: 2266-2268.
- [5] 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: 026601-1-026601-6.
- [6] GATT P, JOHNSON S, NICHOLS T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. *Appl. Optics*, 2009, 48(17): 3261-3276.
- [7] WANG F, ZHAO Y, ZHANG Y, *et al.*. Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single-photon detectors [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49: 5561-5566.
- [8] KIRCHNER G, KOIDL F. Time walk compensated SPAD: multiple photon versus single photon operation [J]. *SPIE*, 1997, 3218: 106-112.
- [9] OH M S, KONG H J, KIM T H, *et al.*. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 304-308.
- [10] 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]. *Appl. Optics*, 2009, 48 (32): 6241-6251.

[11] OH M S, KONG H J, KIM T H, *et al.*. Develop-

ment and analysis of a photon-counting three-dimensional imaging laser detection and ranging (LADAR) system [J]. *Opt. Soc. Am*, 2011, 28: 759-765.

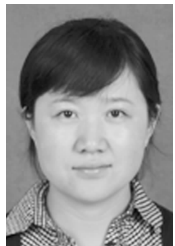
作者简介:



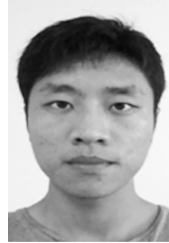
何伟基(1981—),男,广东韶关人,博士,讲师,2004年、2010年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究工作。E-mail: njstheweiji@163.com



司马博羽(1987—),男,江苏南京人,硕士研究生,2010年于南京理工大学获得学士学位,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究工作。E-mail: njstxiaosi@yeah.net



苗 壮(1981—),女,陕西西安人,硕士研究生,2004年于西北工业大学获得学士学位,主要从事微光夜视技术方面的研究工作。Email: mm_sky1015@163.com



陈云飞(1989—),男,江苏泰州人,硕士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究工作。E-mail: cyfnjust@126.com



陈 钱(1964—),男,江苏无锡人,博士,教授,长江学者,1987年、1996年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电探测与光电成像技术等研究工作。E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn



顾国华(1966—),男,江苏无锡人,博士,研究员,1989年、2001年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电探测与光电成像技术等研究工作。E-mail: gghnjust@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)