

# 基于光子计数技术的远程测距激光雷达

罗 远<sup>1,2</sup> 贺 岩<sup>1\*</sup> 耿立明<sup>1</sup> 王明建<sup>1</sup> 雷琳君<sup>1</sup> 吴姚芳<sup>1</sup> 胡善江<sup>1</sup> 侯 霞<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 100 km 远距离测距的激光雷达, 由于作用距离远, 多采用低重复频率、高能量激光器配合大口径望远镜实现远程激光测距, 导致系统存在体积大、重量大、功耗高等缺点。基于光子计数技术的激光测距雷达具有灵敏度高的特点, 有效降低了系统的激光能量和望远镜的接收口径, 降低了系统的体积、重量和功耗。设计了一种应用于远距离小目标探测的测距激光雷达, 采用盖格模式的雪崩光电二极管实现光子计数, 实现了系统的小型化。详细介绍了该系统的设计原理、组成部分和实验结果。实验结果表明, 在双程大气透射率为 0.25 的大气环境下, 对于有效反射面积为  $6 \text{ m}^2$ 、反射率为 0.1 的小目标, 该系统的最远测距能力达到 100 km, 距离分辨率为 6 m。

**关键词** 激光技术; 激光雷达; 激光测距; 光子计数; 小型化

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0514001

## Long-Distance Laser Ranging Lidar Based on Photon Counting Technology

Luo Yuan<sup>1,2</sup> He Yan<sup>1</sup> Geng Liming<sup>1</sup> Wang Mingjian<sup>1</sup> Lei Linjun<sup>1</sup>

Wu Yaofang<sup>1</sup> Hu Shanjiang<sup>1</sup> Hou Xia<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** For the application of laser detection over a long distance of 100 km, to achieve the long-distance detection, the system mostly uses low repetition frequency, high pulse energy laser and large diameter telescope, which leads the shortcomings of large volume, heavy weight and high power consumption. The lidar based on photon counting technology has the characteristic of high sensitivity. It greatly reduces the laser energy and receiving telescope aperture of the system. The volume, weight and power consumption of the system are reduced. A kind of laser ranging lidar applied in high-altitude remote detection of small target is designed, which adopts Geiger-mode avalanche photo diode achieving photon counting, and realizes the miniaturization of the system. The system design principle, component, and the experiment result are introduced in detail. The results show that when the round-trip atmospheric transmittance is 0.25, the maximum detection range can reach 100 km for the small target with  $6 \text{ m}^2$  effective reflection area and 0.1 reflectivity, and the range resolution is 6 m.

**Key words** laser technique; lidar; laser ranging; photon counting; miniaturization

**OCIS codes** 140.3460; 230.5160; 140.3538; 040.1880; 280.3400; 280.3640

收稿日期: 2015-12-01; 收到修改稿日期: 2016-01-11

作者简介: 罗 远(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事新型三维成像激光雷达技术和激光测距技术方面的研究。

E-mail: luoyuanhrbeu@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及先进激光雷达系统等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: heyang@siom.ac.cn

# 1 引 言

自第一台激光器出现不久,科学家便提出了激光测距、激光雷达和激光制导的设想,最简单的激光雷达就是激光测距仪。对于高空机载和星载激光雷达而言,由于作用距离远,目前多采用低重复频率、高脉冲能量的激光器,为了实现更高的探测灵敏度、更远的探测距离和更大的数据采样率,国际上纷纷展开了各种新型激光测距技术的研究工作,光子计数激光测距技术便是其中之一。

以美国 NASA<sup>[1]</sup>、MIT 林肯实验室<sup>[2]</sup>为代表的国外多家研究机构已经在光子计数激光测距领域展开了多年的研究工作,研制出了一系列演示验证系统,展示了光子计数激光测距的技术优势和应用潜力。光子计数激光测距采用了直接脉冲探测的方法,通过记录发射激光脉冲和回波光子信号的时间来实现目标距离信息的获取。光子计数激光测距技术采用高重复频率、低脉冲能量的激光器和灵敏度极高的单光子探测器[光电倍增管(PMT)或盖格模式的雪崩光电二极管(GM-APD)],将线性探测体制下包含大量光子的回波波形探测转换为针对单个回波光子事件的“计数”,充分利用了回波信号中的能量(单光子级别),利用目标距离信息的相关性和光子事件累积计数,在背景噪声和暗计数中将真实的距离数据提取出来,提高探测概率,最大限度提高系统探测灵敏度和探测效率<sup>[3]</sup>。光子计数激光测距技术的优点是能够以较低的激光脉冲能量获取远距离目标的距离信息,大大简化了激光雷达系统,降低了系统对于功耗、望远镜口径等的要求<sup>[4]</sup>。

针对远距离小目标测距的应用,设计了基于光子计数技术的小型化的远程测距激光雷达,其中探测器采用 GM-APD,激光波段为 526.5 nm,激光重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 15 mJ。本文详细介绍了激光雷达系统的设计原理、组成部分以及实验结果,实验结果表明,在双程大气透射率为 0.25 的大气环境下,对于有效反射面积为 6 m<sup>2</sup>、反射率为 0.1 的小目标,最大测距能力达到 100 km,激光雷达的距离分辨率为 6 m。

# 2 远程激光测距机的系统组成

远距离激光测距系统采用光子计数测距方案,主要技术包括高重复频率激光器技术、单光子探测技术、光子计数技术和距离提取算法,主要功能包括以下 7 个模块:激光器模块、激光器驱动控制模块、接收光学模块、单光子探测模块(SPDM)、总控模块、电源模块、温控模块。电源模块将外部输入的 28 V 直流电滤波后,统一转换成二次电供给需要的模块。总控模块通过 422 接口接收到上位机发出的启动指令,通过时序和参数设置控制激光驱动模块工作,激光驱动模块驱动激光器发光。接收光学模块接收目标的回波光信号,经过滤波后输出到 SPDM。总控模块通过时序同步控制 SPDM 的启动时间,启动后的 SPDM 将光信号转变成电信号,再经过采集变成包含距离信息的计数值,通过内嵌软件计算出目标的绝对距离。距离数据通过 422 接口传给总控模块,由总控模块按照数据格式打包后上传给上位机。总控模块的另一个 422 接口为地检接口,用于检测内部模块的参数和状态。系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达的技术参数  
Table 1 Specifications of lidar

Item	Specification
Data updating rate	5 Hz
Wavelength	526.5 nm
Divergence angle	0.35 mrad
Maximum measured distance	100 km
Minimum measured distance	500 m
Ranging accuracy	±6 m
False alarm rate	≤10 <sup>-2</sup>
Detection probability	≥95%
Receiver aperture	150 mm
Weight	5 kg
Volume	39.4 L

系统的组成框图如图 1 所示,激光器每 200 ms 发射一个激光脉冲串,即脉冲串的频率为 5 Hz,而每个脉冲串包含 40 个激光脉冲,激光脉冲间隔为 1 ms,对应激光的重复频率为 1 kHz,满足 150 km 测距的模糊

距离限制。对每个脉冲串中的 40 个回波的测量结果进行累加,输出 1 个距离值,即 1 个激光脉冲串获得 1 个距离值,系统以 5 Hz 的速率输出距离值,光子数累计最大的位置为真实测距值。接下来将主要介绍系统的激光器模块、接收光学模块和单光子探测模块。

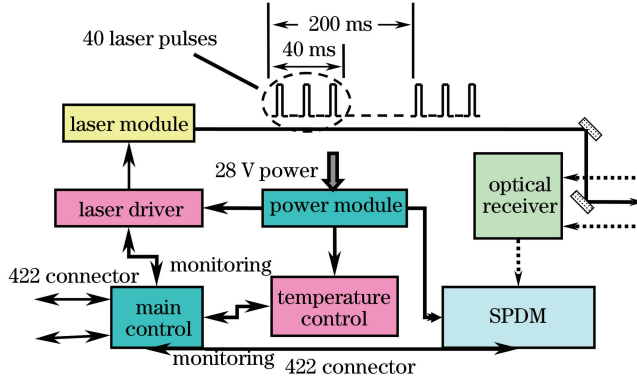


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram

### 2.1 激光器模块

激光器每 200 ms 发射一个激光脉冲串,即脉冲串的频率为 5 Hz,而每个脉冲串包含 40 个激光脉冲,激光脉冲间隔为 1 ms,对应激光的重复频率为 1 kHz,激光器输出单脉冲能量为 15 mJ/10 ns(526.5 nm)(两台激光器偏振合束后输出,单台能量为 7.5 mJ),激光发散角为 0.3~0.35 mrad。激光器采用激光二极管(LD)双端面抽运腔内倍频的 Nd:YLF 调 Q 激光器。图 2 为单台激光器光路图。两台激光器经过偏振合束后,输出约 15 mJ 的激光。

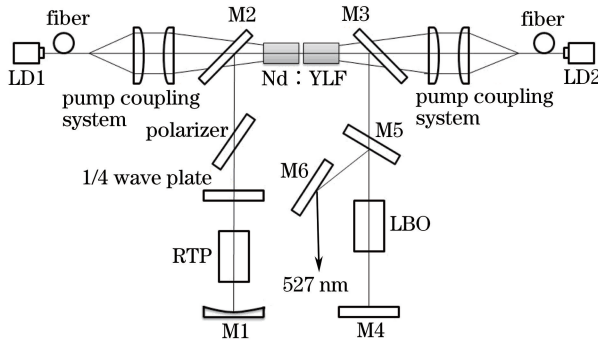


图 2 单台激光器光路图

Fig. 2 Light path diagram of single laser

### 2.2 接收光学模块

接收光学模块采用远近场双通道的方式,近远场通道的分光比为 2/998,可以有效压缩大距离范围回波信号的动态范围。如图 3 所示,光学发射和接收采用同轴方式,考虑到与其他光学系统的复合,采用卡式接收望远镜设计,激光从望远镜次镜前方的 45°反射镜反射出去,利用次镜的面积一定程度上可以抑制近场的

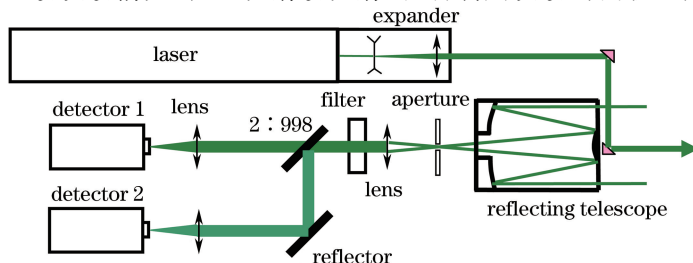


图 3 总体光路图

Fig. 3 Diagram of overall light path

杂散光干扰。接收望远镜后面的光阑限制接收视场到 0.35 mrad, 后继光路进行了准直和滤光, 通过分束片将光信号分到近场和远场探测器。接收口径  $\phi$  是 150 mm, 卡塞格林反射式系统后焦距为 1400 mm。卡塞格林系统后加入准直、分光及聚焦后续光学元件, 最后的接收视场为 0.2 mrad。

系统的工作时序关系如图 4 所示, 激光器发光的主波信号作为 SPDM 光子计数卡的触发, 在调 Q 后的 3.3  $\mu\text{s}$  时间(500 m 距离)内, 两个单光子探测器的门控均为关闭状态, 抑制近场的散光。大于 3.3  $\mu\text{s}$  后, 近场通道的单光子探测器门控打开, 获取近距离回波信号。在 20  $\mu\text{s}$  时(3 km 距离), 远场通道的单光子探测器门控打开, 获取远距离回波信号。在 1000  $\mu\text{s}$  时(150 km 距离), 将两路探测器的门控信号复位到零, 完成一次测量。

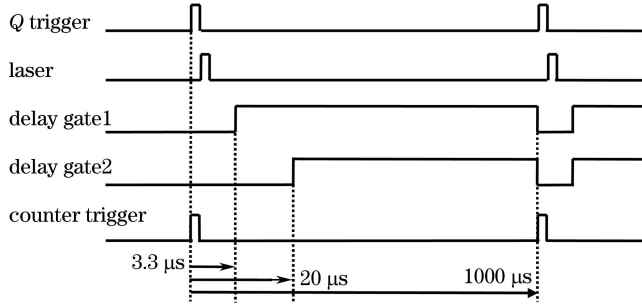


图 4 双通道触发控制时序图

Fig. 4 Trigger control sequence diagram of two channels

## 2.3 SPDM

### 2.3.1 单光子探测器

为与激光发射波长 526.5 nm 匹配, 探测器采用 PerkinElmer 公司的集成单光子计数模块 (SPCM-AQRH-13), 该模块在 526.5 nm 波长的光子探测概率达到 55%。该模块集成了温度控制芯片、电源模块、门控、放大、甄别和整形模块, 直接接收晶体管晶体管逻辑电路 (TTL) 门控信号, 能将单光子脉冲整形形成 TTL 脉冲输出, 直接连接光子计数系统, 具体的指标如表 2 所示。

表 2 探测器的技术参数

Table 2 Specifications of detector

Item	Specification
Surface diameter	180 $\mu\text{m}$
Dark count rate	250 counts/s
Maximum count rate	$2.5 \times 10^7$ counts/s
Output pulse width	15 ns

### 2.3.2 光子计数系统

测距最大距离为 150 km, 光传输时间约为 1 ms。距离测量分辨率为 6 m, 因此总共需要测量  $2.5 \times 10^4$  个点, 每两点时间间隔为 40 ns (对应单光子计数模块的输出频率为  $2.5 \times 10^7$  counts/s)。根据双通道设计, 每次测量分为 500 m~22 km 和 3~150 km 两部分, 每次测量光子计数分为近距离通道和远距离通道。为了测量地准确, 每组测量由 40 次测量构成。将 40 次测量的光子计数结果累加, 求得峰值数据。峰值数据在数据队列中的位置, 就对应于目标的距离。

## 3 远程激光测距机的理论分析

当激光脉冲照射到朗伯目标时, 单光子探测器能够对回波光子进行响应, 产生的平均光电子数可由激光雷达方程计算<sup>[5]</sup>, 在远处激光光斑的面积大于目标的面积, 此处采用了小目标激光雷达方程计算 40 次累加后的平均光子计数值  $N_{\text{sig}}$  为

$$N_{\text{sig}} = \sum_{n=1}^{40} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} N_T(n) \frac{(\rho A_T)}{\Omega_T R^2} \frac{A_R}{\pi R^2} \eta_d, \quad (1)$$

式中  $\eta_{\text{atm}}$ 、 $\eta_{\text{sys}}$  分别为大气和雷达系统光学透射率, 双程大气透射率为 0.25,  $N_T(n)$  为第  $n$  次激光发射光子

数,  $\rho$  为目标反射率,  $A_T$  为目标面积,  $A_R$  为望远镜接收面积,  $\Omega_T$  为激光发射立体角,  $R$  为目标距离,  $\eta_d$  为光子探测器光子探测概率。

光子计数激光雷达的噪声主要源自探测器视场内的背景光噪声和单光子探测器本身的暗计数, 两种噪声的产生是相互独立的两个随机过程<sup>[6]</sup>。因此, 系统总的噪声光电子数可由两者的叠加表示, 平均噪声计数  $N_{nos}$  可表示为

$$N_{nos} = N_b + N_{dk} \Delta T, \quad (2)$$

式中  $N_{dk}$  为探测器的暗计数,  $N_b$  为背景噪声计数, 按照背景光强计算 40 次累加后的平均背景噪声计数值  $N_b$  为<sup>[7]</sup>

$$N_b = \sum_{n=1}^{40} R_{N_b}(n) \eta_{sys} \eta_d \Delta \lambda \Delta T, \quad (3)$$

式中  $R_{N_b}(n)$  为第  $n$  次单位波长的背景光子数率, 在 526.5 nm 波段, 背景光子数率为  $4 \times 10^7 (\text{s}^{-1} \cdot \text{nm})$ ,  $\Delta T$  为时域门宽,  $\Delta \lambda$  为光学带宽。

探测系统的信噪比  $R_{SN}$  为

$$R_{SN} = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_b + (R_{N_{dk}} \Delta T)^2}}, \quad (4)$$

式中  $R_{N_{dk}}$  为平均探测器暗计数率。

根据上述公式和表 3 所示的系统参数, 40 个激光脉冲回波信号叠加后, 对于有效反射面积为  $6 \text{ m}^2$ 、反射率为 0.1 的小目标, 在 100 km 处, 系统的信噪比为 5, 因此可以实现 100 km 远距离的探测。

表 3 系统的技术参数

Table 3 System specifications of the system

Composition	Item	Specification
Laser	Wavelength	526.5 nm
	Repetition frequency	1 kHz
	Pulse width	10 ns
	Laser pulse energy	15 mJ
	Divergence angle	0.35 mrad
	Spot diameter	30 mm
Receiving optical system	Receiver aperture	150 mm
	Optical efficiency	50%
	Optical bandwidth	0.2 nm
	Field of view	0.2 mrad
Photon counting	Detection probability	55%
	Photon counting rate	25 MHz
	Dark count rate	250 Hz
	Exposure time	8 ns
	Range resolution	6 m
	Cumulative frequency	40

## 4 实验结果

在实验中, 主要对系统三方面的性能做了测试, 主要包括大气后向散射激光的测量、太阳背景噪声的测量和最远作用距离的测量。

### 4.1 大气后向散射激光的测量实验

由于探测器的灵敏度极高, 可测量单光子量级, 因此, 大气后向散射的激光信号足以引起探测器的响应, 从而干扰系统的测量。大气后向散射激光信号的强弱受大气环境的影响较大, 如能见度低时, 大气后向散射强, 能见度好时, 大气后向散射弱。为测量大气后向散射对该系统的影响, 对该系统的大气后向散射信号进行了实验测试, 实验时间选定在夜晚, 因此无太阳背景光的干扰。测试时, 大气能见度为中等能见度 (8

km),激光单脉冲能量为 15 mJ,激光重复频率为 1 kHz,接收口径为 150 mm,接收视场角为 0.2 mrad,接收系统的光学效率为 50%,探测器的光子探测效率为 55%。实验时,分别读取测距机近场和远场探测器经过 40 次累计光子计数值的原始数据。近场通道探测器光子计数值随距离的变化关系如图 5 所示,远场通道探测器光子计数值随距离的变化关系如图 6 所示。

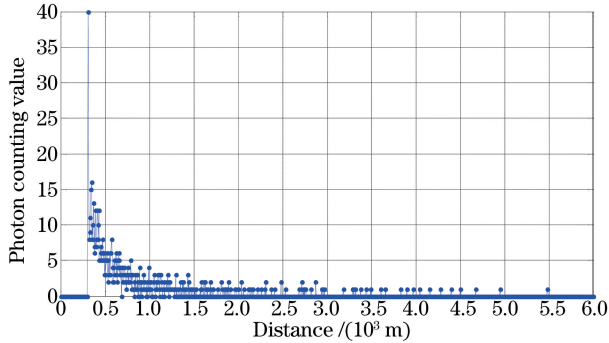


图 5 近场通道探测器光子计数值随距离的变化关系

Fig. 5 Detector photon counting value of near-field channel changes with distance

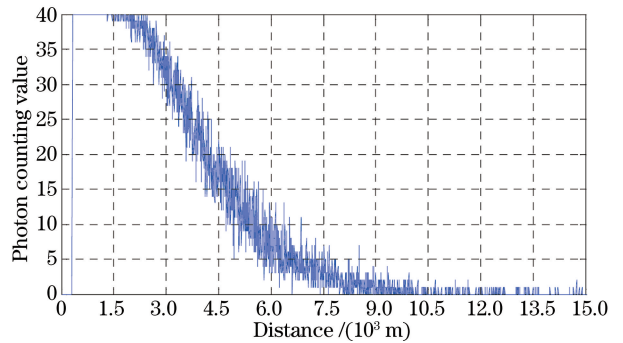


图 6 远场通道探测器光子计数值随距离的变化关系

Fig. 6 Detector photon counting value of far-field channel changes with distance

从图中可以看出,后向散射激光随着距离的增加逐渐减小,而且光子计数值的变化范围覆盖 0~40,因此,当天气条件不好时,测距的虚警概率很高,需要改进探测器原始数据的处理算法。对测量原始数据处理的算法为

$$N'_i = N_i - \frac{N_{i-15} + N_{i-14} + \dots + N_i + \dots + N_{i+16}}{32}, \quad (5)$$

式中  $N_i$  为第  $i$  点的光子计数值。

图 7 为经滤波处理后的近场通道探测器光子计数值,当距离大于 500 m 时,光子计数值基本上在 5 以内波动;图 8 为经滤波处理后的远场通道探测器光子计数值,光子计数值基本上在 8 以内波动。因此,经过该滤波处理后,光子计数阈值判别的可靠性大大提高。

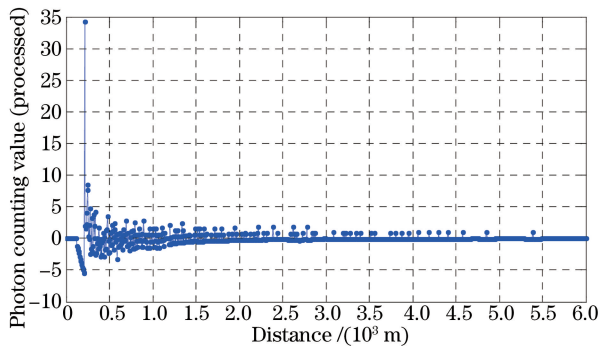


图 7 经算法处理后的近场通道探测器光子计数值

Fig. 7 Detector photon counting value of near-field channel after processing

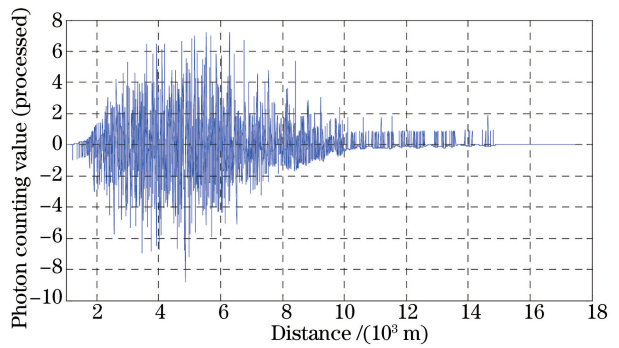


图 8 经算法处理后的远场通道探测器光子计数值

Fig. 8 Detector photon counting value of far-field channel after processing

#### 4.2 太阳背景光测量和光子计数阈值的设定

因为在一个测量周期内,太阳的背景光基本上是恒定不变的,因此,太阳背景光造成的光子计数值不随距离的变化而减小。测试实验时间选定在 14 点,测试时,天气晴朗,大气条件良好,大气能见度为 20 km,因此,后向散射激光微弱,分别读取经过上述算法[(5)式]处理过的近场和远场探测器输出的光子计数值的数据。图 9 为近场通道探测器输出的太阳背景光的光子计数值,图 10 为远场通道探测器输出的太阳背景光的光子计数值。

从图 9 中可以看出,在距离大于 500 m 时,近场通道的光子计数值基本上在 5 以内波动,因此近场的光子计数阈值设定为 10;从图 10 中可以看出,远场通道的光子计数值基本上在 11 以内波动,因此远场的光子

计数阈值设定为 15。

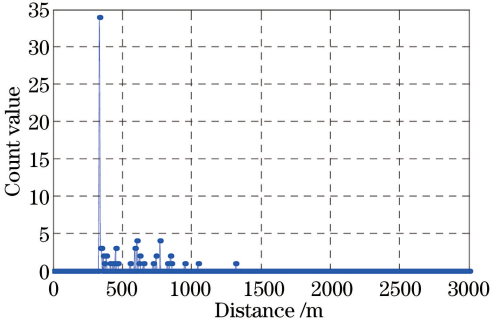


图 9 近场通道探测器输出的太阳背景光的光子计数值  
Fig. 9 Near-field channel's photon counting value of background light

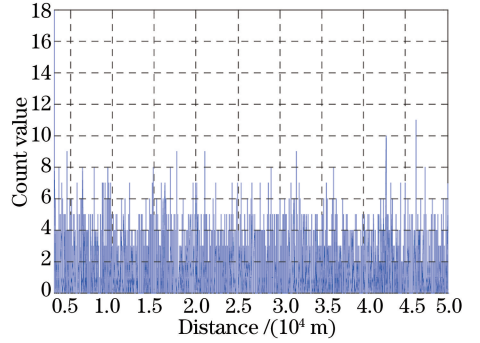


图 10 远场通道探测器输出的太阳背景光的光子计数值  
Fig. 10 Far-field channel's photon counting value of background light

### 4.3 小目标最大测距能力测量

由于地面测试环境有限,无法实现 100 km 距离、大气双程透射率为 0.25 的真实环境,因此采用在激光出射口逐渐增加衰减片,使测距机在达到测量固定距离标准目标的极限情况下,通过理论推算的方法来获取该测距机的最大测距能力。地面测试环境如图 11 所示,图 11(a)为激光测距机,在激光出射口增加衰减片,放置衰减片的位置可从图片中看到;图 11(b)显示了测距机的测试环境,其中远处山顶上的凸起建筑为标准测试目标,该目标距离测试点的距离为 4.2 km 左右,该标准测试目标在 526 nm 波段的反射率为 0.1,目标面积大于此处的光斑面积。在测试过程中,通过衰减出射激光的出射功率,对该固定目标测量,不断增加衰减片的衰减倍数,直至达到测距机的测量极限。

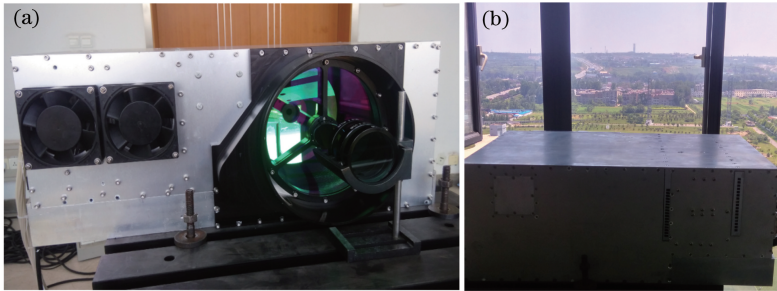


图 11 最大测距能力测试的实验环境。(a) 激光测距机; (b) 测试环境

Fig. 11 Experimental environment of maximum ranging ability test. (a) Laser ranging lidar; (b) experimental environment

通过激光雷达方程可推算出小目标的最大测距能力。在远程测量时,激光回波能量的计算参考小目标激光雷达方程:

$$N_{\text{sig}} = \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} N_{\text{T}} \frac{(\rho A_{\text{T}}) A_{\text{R}}}{\Omega_{\text{T}} R^2} \exp(-k \cdot 2R), \quad (6)$$

式中  $k$  为大气衰减系数。大气衰减系数  $k$  可根据如下经验公式推得<sup>[8]</sup>:

$$k = \frac{3.91}{D} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q}, \quad (7)$$

$$q = \begin{cases} 1.6, D \sim \infty \\ 1.3, D \text{ is middle} \\ 0.585D^{1/3}, D \leq 6 \text{ km} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\lambda/\mu\text{m}$  为入射激光波长,  $D/\text{km}$  为大气能见度。

在测量近距离的目标时,由于激光光斑小,设定目标较大,激光雷达方程可表示为:

$$N_{\text{sig1}} = \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} N_{\text{T}} \rho \frac{\Omega_{\text{R}} A_{\text{R}}}{\Omega_{\text{T}} R_1^2} \exp(-k \cdot 2R_1), \quad (9)$$

式中  $\Omega_R$  为望远镜接收立体角, 通过(6)、(9)式联立方程, 可以推算出对小目标的最大测距能力。

测试过程中, 增加了 4 片衰减片, 透射率分别为 0.115%、11%、60.26%、66.3%。测试目标的距离为 4.2 km, 测试塔在 526 nm 波段的反射率为 0.1。测试结果如图 12 所示, 图 12(a) 为测距机输出的测距值, 图 12(b) 为对应的光子计数值。图 12(a) 中可以看出在这种情况下, 测距值输出相对稳定, 但是受太阳背景光、大气湍流等因素的影响, 会出现测量值抖动的情况; 图 12(b) 中, 光子计数值已经接近光子计数阈值 15, 因此, 此时测距机接近于极限工作状态。在此状态下, 可推导测距机在双程大气透射率为 0.25, 目标为反射面积 6 m<sup>2</sup>、反射率 0.1 的小目标的情况下, 对应的最大测距能力。通过(7)式、(9)式可以计算得到, 此时, 理论上接收到的光子计数值为 16 个, 和实际测量结果比较吻合, 由于背景光子噪声的影响, 会造成实际测量结果的抖动。

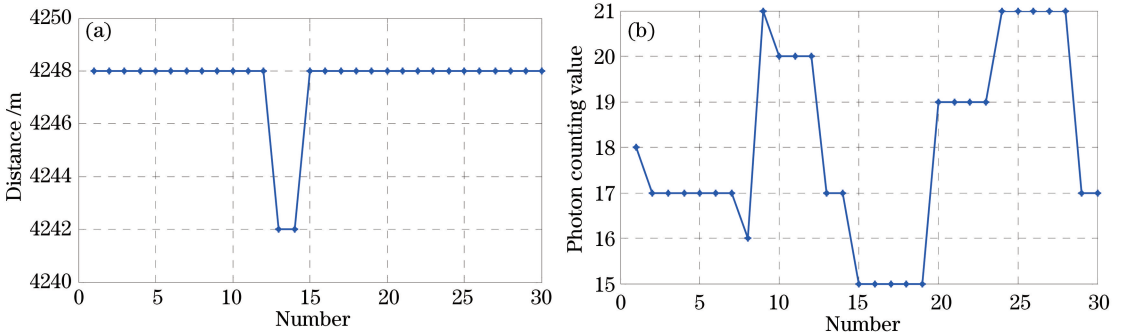


图 12 最大测距能力测试的实验。(a) 测距值; (b) 光子计数值

Fig. 12 Result of maximum ranging ability test. (a) Distance; (b) photon counting value

测量时通过能见度仪测得的平均大气能见度为 14.5 km, 大气的双程透射率按照 0.25 计算, 通过(6)、(9)式联立方程计算, 测距机对有效反射面积为 6 m<sup>2</sup>、反射率为 0.1 的小目标的最远测距能力为 100.08 km。

## 5 结 论

光子计数激光测距技术具有灵敏度高、功耗低、探测效率高以及探测距离远等优点, 是新型的激光测距技术。针对小目标远程探测的情况, 设计了小型化的光子计数激光雷达系统, 研究了大气后向散射和太阳光背景噪声对激光回波信号的影响, 以单光子灵敏度在日光背景噪声条件下实现了目标测距和数据提取。对有效反射面积为 6 m<sup>2</sup>、反射率为 0.1 的小目标, 实现了 100 km 的远程测距, 测距分辨率为 6 m, 测量速率为 5 Hz。

## 参 考 文 献

- 1 Degnan J J, McGarry J F, Zagwodzki T W, *et al.*. Design and performance of a 3D imaging, photon-counting, microlaser altimeter operating from aircraft cruise altitudes under day or night conditions[C]. SPIE, 2002, 4546: 1-10.
- 2 Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(1): 23-36.
- 3 Hou Libing, Huang Genghua, Kuang Yaowu, *et al.*. Research of photon counting laser ranging technology[J]. Science Tehnology and Engineering, 2013, 13(18): 5186-5190.  
侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5186-5190.
- 4 Degnan J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3-4): 503-549.
- 5 Dai Yongjiang. Laser radar technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 646-652, 179-183.  
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 646-652, 179-183.
- 6 Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, *et al.*. Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1012001.  
沈姗姗, 陈 钱, 何伟基, 等. 基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1012001.
- 7 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2584-2589.  
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅, 等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2584-2589.
- 8 M Toyoda, K Araki, Y Suzuki. Measurement of the characteristics of a quadrant avalanche photodiode and its application to a laser tracking system[J]. Opt Eng, 2002, 41(1): 145-149.