

基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验

丁宇星^{1,2}, 李永富³, 刘鸿彬^{1,2}, 黄庚华¹, 王建宇^{1*}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³山东大学, 山东 济南 250100

摘要 介绍了基于 InGaAs 单光子探测器的日光条件测距实验,通过压缩激光接收视场、使用超窄带滤光片、结合超快主动淬灭电路等降低 InGaAs 单光子探测器死时间的方法,成功地进行了基于 InGaAs 单光子探测器的日光条件光子计数测距实验。分析实验数据,分别获取基于 InGaAs 探测器和 Si 基探测器的系统探测灵敏度、系统测距精度等参数,并进行比较。实验结果表明:经过高速主动淬灭电路优化后的 InGaAs 探测器,其死时间与 Si 基探测器的死时间相当;在背景光噪声一定的情况下,使用 InGaAs 探测器可以提高系统的探测灵敏度,从而增加系统的最大测程;得益于 InGaAs 探测器的低抖动时间,在提高系统最大测程的同时,系统的测距精度不受影响。

关键词 测量; 激光测距; InGaAs 探测器; 光子计数; 日照条件

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1104003

Photon Counting Experiment Based on InGaAs Detector in Daylight

Ding Yuxing^{1,2}, Li Yongfu³, Liu Hongbin^{1,2}, Huang Genghua¹, Wang Jianyu^{1*}

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract The photon counting experiment based on the InGaAs single photon avalanche diode in daylight is introduced. The dead time of the InGaAs single photon detector is reduced by ultra-fast active quenching circuits, and thus the photon counting experiment based on the InGaAs single photon detector in daylight is successfully conducted via the compression of field of view, the usage of ultra-narrow band filters and the reduction of dead time. The acquired experimental data are analyzed. The InGaAs-based system parameters such as detection sensitivity and ranging accuracy are also analyzed and compared with the parameters for the system based on Si-based single photon detectors. The experimental results show that the InGaAs detector after optimization by the high-speed active quenching circuit has a dead time comparable to that of the Si-based detector. In the case of a certain background light noise, the InGaAs detector can be used to increase the detection sensitivity and the maximum detection range of the system. Thanks to the low jitter time of InGaAs detectors, the ranging accuracy of the system is not affected while increasing its maximum detection range.

Key words measurement; laser ranging; InGaAs detector; photon counting; daylight condition

OCIS codes 280.3400; 040.1345; 250.1345

1 引 言

对于星载脉冲式激光雷达系统,为了获得较远的探测器距离,一般选用 532 nm 波段或 1064 nm 波段激光器,因为这两个波段的激光器具有技术成熟、峰值功率高等特点^[1-3]。在 1064 nm 波段, Si 基

单光子探测器的量子效率较低,限制了系统探测灵敏度的提升,而 InGaAs 探测器则具有较高的量子效率,这有利于进一步提高系统的探测灵敏度。但是,由于 InGaAs 单光子探测器技术目前还不够成熟,其探测器的后脉冲概率较高,死时间较长,从而限制了其在日照条件光子计数测距系统中的应用。

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-06; 录用日期: 2018-05-13

* E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

在前期的项目研究过程中发现,通过高速主动淬灭电路可以将 InGaAs 探测器的死时间降至 100 ns^[4]。但是这一死时间仍较长,故而将实验设定在黑夜背景条件下进行。实验结果表明:在低照度背景光条件下,使用 InGaAs 探测器的激光雷达系统比使用 Si 单光子探测器的系统在探测灵敏度方面具有更大优势。在背景光噪声较强的情况下,较长的探测器死时间会降低系统的探测效率;在背景光极强的情况下,较长的探测器死时间叠加上 InGaAs 探测器的后脉冲效应之后,就会使探测器的计数率饱和,从而导致 InGaAs 探测器的应用条件受到限制。

对探测器淬灭电路进行优化设计可使 InGaAs 探测器的死时间降至 40 ns。在测距实验系统设计时,在接收光学系统中使用超窄带宽滤光片,可以降低系统的接收视场,从而进一步降低背景光噪声的影响,使得基于 InGaAs 探测器的激光雷达系统能够在日照背景光条件下工作。本文利用 InGaAs 探测器以及 Si 探测器分别获取了日照条件下的测距实验数据,将实验获取的系统探测概率与理论设计值进行对比,验证了 InGaAs 探测器用于星载激光测距系统的可行性。

2 基本原理

2.1 探测器灵敏度比较

本次实验对固定距离的面目标进行测距,激光雷达方程采用面目标的形式,同时将方程转换为光子数形式:

$$N_s = \rho T_a^2 \eta_t \eta_r \frac{A_r E_t \cos \theta_t}{\pi R^2} \frac{\eta_q}{h\nu}, \quad (1)$$

式中: N_s 为单次激光探测过程中探测器产生的平均光电子数; ρ 为目标表面的反射率; T_a 为激光雷达与目标之间的单程大气透过率; η_t 为激光发射系统的光学效率; η_r 为激光接收系统的光学效率; A_r 为接收望远镜有效口径面积; E_t 为激光发射单脉冲的能量; θ_t 为激光发射系统光轴与目标法向的夹角; R 为激光雷达和目标之间的距离; η_q 为单光子探测器的量子效率; $h\nu$ 为相应激光波长的单光子能量。

实验分别选用 Si 基探测器和 InGaAs 探测器。Si 基探测器选用 Excelatas 公司的单光子探测器模块,该公司生产的 Si 基探测器性能处于同类产品中的领先水平^[5],能够代表 Si 单光子探测器目前的性能水平。本次实验使用的 Si 基探测器、InGaAs 探测器以及前期实验使用的 InGaAs 探测器的参数如表 1 所示。

将以上探测器参数以及系统参数代入(1)式所示的激光雷达方程中进行计算。系统参数设置如下:系统口径为 25 mm,目标表面反射率为 0.2,大气单程透过率为 0.8,激光发射系统效率为 0.7。由于激光接收系统采用的是多模光纤先接收再耦合至单模光纤中的方案,因此系统的探测效率按照 0.008 计算,激光单脉冲能量为 1 μ J,目标距离为 280 m。计算后可知:该系统单次激光发射能够获得 7.6 个光子,采用 Si 基单光子探测器能够产生 0.15 个光电子,采用 InGaAs 探测器可以获得 1.1 个光电子。

表 1 不同探测器的参数

Table 1 Parameters of different detectors

Parameter	Si detector	InGaAs detector (old quenching circuit)	InGaAs detector (new quenching circuit)
Quantum efficiency / %	1.8	15	15
Dead time / ns	32	100	40
Timing jitter / ps	350	100	100
Detector size / μ m	180	80	80
Dark count	2000	6000	6000

单从探测器的量子效率来看,InGaAs 探测器的量子效率比 Si 探测器高一个数量级。量子效率越高,系统接收到的光电子数越多,从而系统的探测效率就越高。

2.2 光子计数激光测距理论

在光子计数激光测距中,目标表面散射回来的激光回波信号,在强度分布上是一个被伽马分布的激光散斑噪声调制后的泊松分布。因此,单光子探

测器产生的信号光电子应当服从负二项分布^[6]。

Δt 时间间隔内 k 个光电子事件被单光子探测器探测到的概率^[7-9]为

$$P_{sn}(k, \Delta t) = \frac{N_{sn}^k \exp(-N_{sn})}{k!}, \quad (2)$$

式中: $N_{sn} = N_s + N_n$ 为信号光电子和噪声光电子的平均数, N_n 为平均噪声光电子数。(2)式描述了光子计数激光雷达在采样时间 Δt 内探测到的光电子事件的分布情况。

探测器一般都具有一定的死时间。根据光子探测多回波探测理论可知,在背景光噪声以及回波信号强度一定的条件下,探测器的死时间越长,真实的回波信号就越容易被随机出现的噪声光子事件淹没,造成真实回波信号丢失,从而降低系统的整体探测概率。

在综合考虑死时间效应后,信号的探测概率可表述为^[10]

$$P_d(\Delta t) = \exp(-N_n t_{\text{dead}})[1 - \exp(-N_{\text{sn}})], \quad (3)$$

式中: t_{dead} 为探测器的死时间。

根据以上理论分析可知,在日照背景光噪声较强的情况下,探测器死时间会严重影响使用 InGaAs 探测器的光子计数系统。若探测器的死时间过长(饱和计数率低),就可能会出现探测器的背景光噪声计数率达到 InGaAs 探测器饱和计数率的情况,使探测器无法响应任何回波信号,从而限制了基于 InGaAs 探测器的光子技术系统在日照条件下的应用。因此,InGaAs 探测器的死时间就成为了制约激光雷达系统探测效率的一个重要因素。

针对 InGaAs 探测器死时间过长的问題,本课题组对 InGaAs 探测器主动淬灭电路的淬灭速度进行了优化,使得 InGaAs 探测器的死时间降低至 40 ns,与 Si 基探测器 32 ns 的死时间相当;同时,本次实验还对光学系统窄带滤光片进行了优化设计,加入了自行研制的带宽为 0.2 nm 的窄带滤光片,同时对系统的接收视场进行限制,用以抑制背景光噪声,进一步降低探测器死时间的影响。

将改进后的 InGaAs 探测器死时间参数以及窄带滤光片带宽等系统参数代入(3)式,基于 InGaAs 探测器的系统参数对系统的探测概率进行计算,得到回波光电子数为 1.1,噪声计数率为 36800 count/s,死时间为 40 ns,单次探测概率为 68.14%;基于 Si 探测器的系统参数进行计算,得到回波光电子数为 0.15,噪声计数率为 5000 count/s,死时间为 32 ns,单次探测概率为 14.18%。

由此可见,当 InGaAs 探测器死时间达到与 Si 基探测器相同的水平时,在目前系统的日照背景光噪声条件下,使用 InGaAs 探测器的系统的探测概率仍明显高于使用 Si 探测器的系统。

3 实验系统搭建

搭建如图 1 所示的激光测距平台,测距平台采用基于光纤的收发光学系统,激光发射光源采用一

台波长为 1064 nm 的固体激光器。激光经光纤耦合后输出,光纤芯径为 20 μm /125 μm ,光纤耦合后激光器输出的单脉冲能量为 1 μJ ,激光器的重复频率为 10 kHz,脉宽为 1 ns。通过一个光纤准直器进行光束准直,准直器的焦距为 30 mm,最终实现的激光发散角为 666 μrad 。

激光接收系统使用近红外相机镜头,其焦距为 100 mm。采用光纤接收耦合的方案,在镜头焦面处放置接收光纤,以方便更换各种探测器,对使用不同探测器时的系统探测效率进行比较。

接收光纤芯径为 100 μm /125 μm ,接收视场为 1 mrad。考虑到 InGaAs 探测器在设计时采用的是单模光纤耦合封装的形式,在利用 Si 基探测器进行实验时,首先将多模光纤耦合至单模光纤中,再耦合至探测器光敏面,使得分别采用两套探测器进行实验时的系统的光学耦合效率一致。

接收光学镜头在入瞳处加装孔径光阑,将接收系统的接收口径限制在 25 mm,滤光片采用超窄带光纤滤光片,光纤滤光片的带宽为 0.2 nm,中心波长为 1064.4 nm,与激光器的中心波长相匹配。搭建完成的实验平台如图 1 所示。

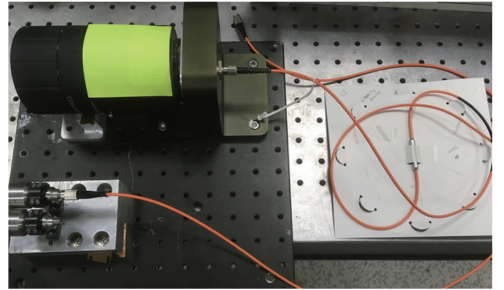


图 1 激光测距平台照片

Fig. 1 Photograph of laser ranging platform

使用搭建好的系统对 270 m 左右远处的目标进行测距实验,目标照片如图 2 所示。

激光器发射 10000 次,对每次激光发射后获取



图 2 目标照片

Fig. 2 Photograph of target

的光子事件进行采集,通过安捷伦 U1242 时间测量板卡对每个光子事件的时刻进行测量。对于同一目标,分别采用 Si 基探测器和 InGaAs 探测器进行测量,获取光子事件后进行直方图统计分析。

4 实验结果分析

使用 Si 基探测器以及 InGaAs 探测器分别获取了目标的对外测距结果,对数据按照直方图统计结果进行分析。根据概率最大的距离提取原理,将直方图中累积数值最大的栅格作为真实距离的栅格;在选定栅格后,对落入真实距离栅格内的数据进行统计比较。

4.1 探测能力分析

对两种探测器的探测概率进行统计,将最大探测概率下的距离作为真实信号的探测距离,统计真实距离包络所包含的所有光子事件的个数,并将其作为有效回波信号的个数,直方图提取后的结果如图 3~4 所示。

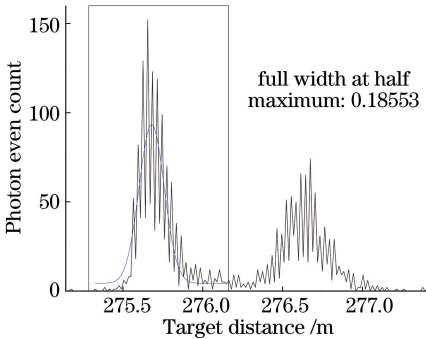


图 3 InGaAs 探测器回波光光子事件统计

Fig. 3 Photon event statistics of InGaAs detector

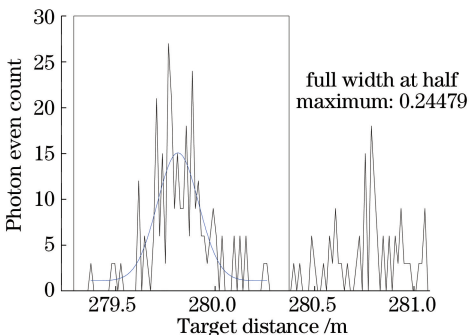


图 4 Si 探测器回波光光子事件统计

Fig. 4 Photon event statistics of Si detector

光子计数系统探测效率的估算公式为

$$P_d = n_s / n_1, \quad (4)$$

式中: n_s 为系统接收到的有效回波数量; n_1 为激光发射总次数。经过计算可知,使用 InGaAs 探测器的系统的探测效率为 14.29%,使用 Si 基探测器的系统的

探测效率为 3.09%。与 Si 基探测器相比,采用 InGaAs 探测器的系统的探测效率提高了 3.6 倍左右。

4.2 测距精度分析

除探测灵敏度外,测距精度也是衡量探测器性能的一个重要参数,光子计数测距系统的测距精度主要由探测器的输出抖动、时间测量电路的误差、激光器的脉宽等决定。根据表 1 所列的探测器参数,本次实验所用的 Si 基探测器及 InGaAs 探测器的输出信号抖动分别为 350 ps 和 100 ps,时间测量电路的测量精度为 50 ps,激光器输出脉冲的半峰全宽为 1 ns,由此可以获取该实验系统的各项误差分配:对于采用 Si 基探测器和 InGaAs 探测器的系统,总的测距误差分别为 0.21 m 和 0.1725 m。由图 3 和图 4 所示的测距精度分析结果可知,实际测得的基于两款探测器系统的 1σ 测距精度分别为 0.24479 m 和 0.18553 m,与计算结果相符。

5 结 论

本次实验利用 InGaAs 单光子探测器进行日照条件下的光子计数测距实验,使用同一系统更换 Si 基探测器进行了相同的实验,并对基于两种探测器的系统的探测效率进行了对比。实验结果表明,在目前 InGaAs 探测器的死时间优化至 40 ns 的情况下,采用 InGaAs 探测器的系统在日照背景光噪声下也能达到较高的探测效率,且明显高于使用 Si 基探测器的系统的探测效率。因此,使用 InGaAs 探测器有利于提高光子计数系统的探测灵敏度。

目前的 InGaAs 探测器模块由于光敏面较小,其直径仅为 80 μm ,所以采用单模光纤耦合的接口。为了配合前端光学系统的设计,本次实验的光学系统采用的激光接收光纤是直径为 50 μm 的多模光纤。从多模光纤到单模光纤存在较大的光纤耦合效率损失,会导致系统的整体光学接收效率不高,后续将继续进行探测器多模光纤的耦合设计,进一步提高 InGaAs 探测器的探测灵敏度。

探测器灵敏度提高后,由(3)式可以看出,如果单纯提高探测器的探测灵敏度,系统的背景光噪声也会同步增大,从而会限制系统探测灵敏度的提升。因此,在系统设计层面,还需要通过压缩激光收收视场,通过使用带宽更窄的光学滤光片等方法来降低系统的背景光噪声。在系统的激光发射功率、接收口径、接收视场等参数固定的情况下,(3)式中的系统探测灵敏度与探测器的灵敏度为非单调的关系,通过计算可以得出适用于特定系统的探测器的最优

探测灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Zhu L, Huang G H, Ouyang J H, *et al.* Study on time interval measurement system in photon counting imaging lidar[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(6): 461-464.
朱磊, 黄庚华, 欧阳俊华, 等. 光子计数成像激光雷达时间间隔测量系统研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 461-464.
- [2] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, *et al.* Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(36): 7671-7678.
- [3] Rochas A, Besse P A, Charbon E. A CMOS single photon avalanche diode array for 3D imaging [C]. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2004, 47: 120-121.
- [4] Liu J L, Zhang T F, Li Y F, *et al.* Design and characterization of free-running InGaAsP single-photon detector with active-quenching technique[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(1): 013104.
- [5] Krainak M A, Sun X L, Yang G N, *et al.* Comparison of linear-mode avalanche photodiode lidar receivers for use at one-micron wavelength [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7681: 76810Y.
- [6] Goodman J W. *Statistical Optics* [M]. [S. l.]: Wiley, 1985.
- [7] Milstein A B, Jiang L A, Luu J X, *et al.* Acquisition algorithm for direct-detection ladars with Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 296-311.
- [8] 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(2): 026601.
- [9] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [C]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5086: 359-368.
- [10] Hou L B, Huang G H, Kuang Y W, *et al.* Research of photon counting laser ranging technology [J]. *Science Technology 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.