

# 基于 SNSPD 与 SPAD 探测器的激光测距系统的比较研究

张晓英<sup>1\*</sup>, 贾磊<sup>1</sup>, 朱江<sup>2</sup>, 闫夏超<sup>2</sup>, 张蜡宝<sup>2\*</sup>, 康琳<sup>2</sup>, 吴培亨<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 通过实验比较研究了基于 SNSPD 与 SPAD 探测器的激光测距系统. 实验中, 当接收回波端衰减 120 dB 时, 天空光背景可忽略, 基于 SPAD 的激光测距系统探测概率低于 0.2%, 而基于 SNSPD 的激光测距系统探测概率达 35%; 当激光发射频率低于 1 kHz, 基于 SNSPD 的激光测距系统探测概率比 SPAD 高 60% 以上. 研究表明: 在探测弱信号回波光光子时, SNSPD 的探测性能远远优于 SPAD, 其原因是 SNSPD 具有较低的暗计数和高探测概率. 与此同时, 在接收端无衰减情况下, 天空光背景会带来暗计数, 影响测距系统信噪比. 通过仿真分析表明, 当背景亮度  $L_0$  高于  $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  时, 该基于 SNSPD 的激光测距系统的信噪比低于 6, 可能影响测距系统稳定探测.

**关键词:** 超导纳米线单光子探测器; 激光测距; 光子计数; 暗计数; 天光背景

中图分类号: O641-O649 文献标识码: A

## Comparison of laser ranging system based on SNSPD and SPAD detectors

ZHANG Xiao-Ying<sup>1\*</sup>, JIA Lei<sup>1</sup>, ZHU Jiang<sup>2</sup>, YAN Xia-Chao<sup>2</sup>,  
ZHANG La-Bao<sup>2\*</sup>, KANG Lin<sup>2</sup>, WU Pei-Heng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Superconducting Electronics Research Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The laser ranging systems based on SNSPD and SPAD detectors are compared by experiments. In the experiments, the sky light background can be ignored when the receive echo is attenuated to 120 dB, the detection probability of SPAD is less than 0.2%, while the detection probability of SNSPD is 35%. When the laser emission frequency is below 1 kHz, the detection probability of SNSPD is more than 60% higher than that of SPAD. The study shows that the detection performance of SNSPD is much better than that of SPAD when detecting the weak signal echo photons. The reason is that SNSPD has lower dark counts and higher detection probability. At the same time, with no attenuation at the receiving end, the sky light background will bring dark counts, affecting the signal-to-noise ratio of the ranging system. Simulation analysis shows that the signal-to-noise ratio of the SNSPD-based laser ranging system is lower than 6 when the background luminance is higher than  $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ , which may affect the stability detection of the laser ranging system.

**Key words:** superconducting nanowire single photon detector, laser ranging, photon counting, dark count, skylight background

**PACS:** 32.80.Wr 03.75.Pp 42.62.Eh 85.25.j 78.67.Qa

收稿日期: 2017-08-02, 修回日期: 2018-01-31

Received date: 2017-08-02, revised date: 2018-01-31

基金项目: 国家重点研发计划(2017Y7-A030400), 国家自然科学基金(11227904, 61471189, 61571217 和 61521001)

**Foundation items:** Supported by National key R&D Program of China (2017Y7-A030400), National Natural Science Foundation of China (11227904, 61471189, 61571217, 61521001)

作者简介 (Biography): 张晓英 (1973-) 女, 四川仁寿人, 教授, 主要从事超导单光子新能源发电方面研究.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: 245659219@qq.com, lzhang@nju.edu.cn

## 引言

单光子探测是一种新式光电探测技术<sup>[1]</sup>,在超灵敏激光雷达<sup>[2]</sup>、空对地通信<sup>[3]</sup>、精密光谱测量<sup>[4-5]</sup>、分子荧光检测<sup>[6]</sup>等众多科学研究和应用需求方面具有重要应用.常用的单光子探测器有:光电倍增管(PMT)、工作在盖革模式下基于 Si 材料或基于铟镓砷/铟磷材料的雪崩光电二极管(InGaAs/InP APD)<sup>[7-9]</sup>,通常又称作单光子雪崩二极管(Single Photo Avalanche Diode, SPAD).但随着量子密钥分配(QKD)、线性量子计算(LOQC)等量子信息技术和激光测距及跟踪的应用需求不断提高<sup>[10]</sup>,由于材料本征物理性质的限制,常用的具有单光子灵敏度探测器的 SPAD,已经无法满足近红外波段单光子探测的应用需求,因此亟需发展新型近红外波段高性能单光子探测技术.在此背景下,基于超导效应和光致发热的超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD),现已成为近红外波段单光子探测器(Single Photon Detector, SPD)在激光测距应用方面的重要技术之一<sup>[11-16]</sup>,因兼具有灵敏度高和低噪声的优点<sup>[17]</sup>,其工作波段几乎可以涵盖甚至超越传统半导体 SPD 应用的所有范围.

传统的激光雷达在测距中主要采用线性探测技术,激光回波脉冲中包含数百上千份光子能量,通过较高的信噪比将回波信号从背景噪声中鉴别出来.在远距离非合作目标测距中,随着距离的增加反射回的光信号极其微弱,由离散光子组成的能量团随机分布,此时就不再适合用宏观脉冲测距方法分析返回信号.为了达到更远的探测距离、更高的探测灵敏度和更大的数据采样率,国外众多研究机构已经在光子计数激光测距领域展开多年的研究工作,以美国 NASA、MIT 林肯实验室为代表的科研团队取得了显著成果<sup>[18-20]</sup>.

本文针对超导单光子探测器在激光雷达的应用,建立了光子计数技术数学模型、天光背景噪声以及信噪比模型.对 SNSPD 和 SPAD 探测器的激光测距系统进行比较,分析了探测器自身暗计数以及天光背景变化对信噪比影响,进而比较研究了激光测距系统的回波光子数和探测概率等.

## 1 激光雷达测距理论分析

### 1.1 光子计数技术模型

根据统计光学理论,当激光脉冲照射到朗伯目

标时,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<sup>[21]</sup>,而单光子探测器吸收入射光子产生光电子的过程应当服从负二项分布. Fouche 等人证明了,当负二项分布中的  $d/M \gg 1$  ( $d$  为信号自由度,  $M$  为测量时间内主电子平均数)时,负二项式简化为泊松分布,即  $k$  个光子事件在  $\Delta t$  时间间隔内被单光子探测器探测到的概率  $P(k, \Delta t)$  可由下式表示:

$$P(k, \Delta t) = \frac{N_{sn}^k \exp(-N_{sn})}{k!} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中  $N_{sn}$  是探测周期内的平均光子数.由于研究的对象是大量微观粒子组成的光子团,把激光发射看成发射光子团,接收回波信号视为光子噪声或背景光子噪声限工作时的光子数.根据大气回波的激光雷达方程,激光测距同样可用激光雷达方程表述:

$$p(h) = E_0 \frac{c A_c}{2h^2} U(h) \exp[-2 \int_0^h W(z) dz] \quad (2)$$

式中  $p(h)$  是探测器接收到的回波功率,  $E_0$  是激光脉冲能量,  $c$  是光速,  $A_c$  是接收端面积,  $h$  是探测距离,  $U(h)$  是  $h$  处的后向散射系数,  $U(h) = kW(h)$ ,  $k$  是雷达系数,  $\exp[-2 \int_0^h W(z) dz]$  是激光在传输途径中受到大气分子和气溶胶的衰减率.单位时间内接收的光子数可由光子能量  $x = hf$  除以式(1),得到:

$$\frac{dN_r}{dt} = E_0 \frac{c}{2hf} \frac{A_c}{z^2} U(z) \exp[-2 \int_0^h W(z) dz] \quad (3)$$

因此,观测间隔时间  $\Delta t$  内理论接收的光子数是:

$$N_r = \int_0^{\Delta t} E_0 \frac{c}{2hf} \frac{A_c}{z^2} U(z) \exp[-2 \int_0^h W(z) dz] dt \quad (4)$$

光子计数是在有限时间范围内光子计数的累积效应,通过统计大量光子的规律性,将激光雷达方程转变为光子计数形式,在某一段时间内接收光子信号由光子计数累积表述为:

$$N_r(z) = \frac{\left\{ \left[ \frac{V_c(z) A E_0 U(z) f_a^2}{z^2} \right] + n_b(z) + n_{ap}(z) \right\}}{DTC[n(z)]} \quad (5)$$

对式(5)逆运算便可计算出所测距离  $z_0$ .其中  $N_r$  是接收光子数 ( $ph/\mu s$ ),  $V_c(z)$  是光学迭加改正系数,  $A$  是空间定标系数,  $E_0$  是激光脉冲能量 ( $\mu J$ ),  $U(z)$  是

后向散射系数(气溶胶和大气分子); $f_a$  是大气传输系数  $z$  是所测距离(km)  $n_b$  是背景信号光子计数 ( $\text{phe}/\mu\text{s}$ )  $n_{ap}(z)$  是探测器残余脉冲修正光子数 ( $\text{phe}/\mu\text{s}$ ) 通常是背景信号光子计数的 0.35%;  $DTC[n(z)]$  是探测器的空载修正系数.

### 1.2 强光背景噪声模型

将探测器视场内的背景光噪声和探测器本征暗计数的产生认为是相互独立的随机分布,互不干涉.光子计数工作记录过程中,探测器总噪声光子数可叠加表述:

$$N_n = N_b + N_d \quad (6)$$

式中  $N_n$  是单位时间内探测器接受的噪声光子数平均值  $N_b$  是背景光噪声的光子数平均值  $N_d$  是探测器本征暗计数平均值,系统本征暗计数在实验室可以有效测量.任何物体的温度在绝对零度之上均可认为背景辐射源,对应波长  $\lambda$  的辐射能力  $\omega(\lambda)$  可用黑体辐射模型描述<sup>[22]</sup>:

$$\omega(\lambda) = \frac{c^2 h}{\lambda^5} \left\{ \frac{1}{\exp[hc/(k\lambda T)] - 1} \right\} \quad (7)$$

其中  $c$  是光速大小  $h$  是普朗克常数  $k$  是玻尔兹曼常数  $T$  是辐射的开氏温度.对某一特定波段内的辐射能量可表示为:

$$\Delta E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

对于日间室外测距系统的敏感波段在 400 ~ 760 nm 之间,最主要的辐射干扰源为太阳,表面温度约为 6 000 K,因此进入接收端视场内的背景光噪声光子数为:

$$N_b = \frac{F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} \pi \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 L_0 \theta_r \Delta t}{h\nu} \quad (9)$$

式中  $\pi(D_r/2)^2$  是直径为  $D_r$  的接收镜面积  $L_0$  是近地天空光亮度  $\theta_r$  是接收端探测视场角  $F_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$  是波段区间内的辐射能力多对应的黑体辐射力的百分数,记为:

$$\begin{aligned} F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\infty} \omega(\lambda) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) d\lambda \\ &= \frac{1}{\sigma T^4} \left[ \int_0^{\lambda_2} \omega(\lambda) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} \omega(\lambda) d\lambda \right] \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\sigma$  是斯忒藩—玻尔兹曼定律常量,也称为黑体辐射常数.通过对接收端敏感波段的限制,确定黑体辐射力的百分数,改变参数  $L_0$  从而探究背景光噪声

光子数对探测器的影响.

### 1.3 探测信噪比模型

探测信噪比用来表示回波从噪声中被识别的能力,通过统计分析回波光子和噪声光子来定义信噪比模型:

$$\text{SNR} = \frac{N \times N_r}{\sqrt{N \times (N_r + N_b) + (N_d \Delta t)^2}} \quad (11)$$

$N$  指脉冲积累次数  $\Delta t$  指单次测量时间.

## 2 激光测距系统构成

### 2.1 SNSPD 原理及构造

实验采用的 SNSPD 的核心结构<sup>[23-24]</sup> 是基于 NbN 超薄超导材料制备的呈蜿蜒状的纳米线.实验中,使用的是南京大学超导电子学研究所自行研制的 SNSPD 探测系统, NbN 薄膜采用直流反应磁控溅射技术生长,利用电子束光刻结合反应离子刻蚀制备 NbN 纳米线,通过磁控溅射在 NbN 薄膜上生长电极完成器件工艺制备<sup>[25-26]</sup>,如图 1 和图 2 所示.探测基本原理是:当处于超导态的纳米线吸收光子后,库伦对的破坏会导致有阻的局域非平衡热点“hot-spot”的出现.通过加载偏置电流  $I_b$  (略小于纳米线临界电流  $I_c$ ) 纳米线吸收单个光子能量后局部会产生非超导的热点区域.但对于超薄纳米材料的特殊属性,有阻区产生的热量能够迅速地利用衬底弛豫掉,瞬间恢复超导态.通过监测纳米线两端出现脉冲电压,从而实现单光子探测.

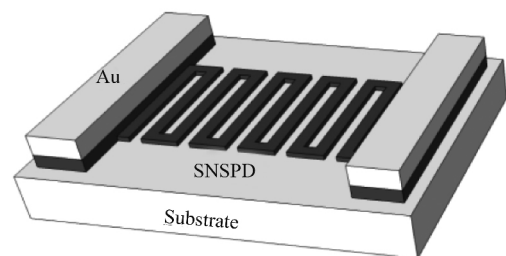


图 1 SNSPD 核心结构  
Fig. 1 SNSPD core structure

为了提高光子吸收概率,该 SNSPD 采用了光学腔体结构提高 SNSPD 光耦合的办法<sup>[27]</sup>.本课题实验采用的 SNSPD 探测面积是  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,中心波长为 1064 nm,超导临界电流  $12.5 \mu\text{A}$ ,如图 3(a) 所示.在偏置电流为  $10 \mu\text{A}$  时,暗计数(dark count rate, DCR) = 6 cps,死时间 6 ns,器件量子效率超过 80%,系统效率超过 40%,时间抖动为 140 ps,如图

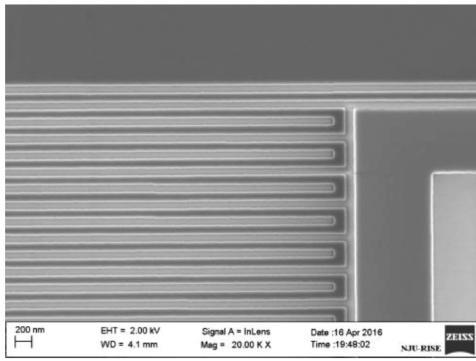


图 2 芯片扫描电镜照片  
Fig. 2 Scanning Electron Microscope Photo

3(b) 所示.

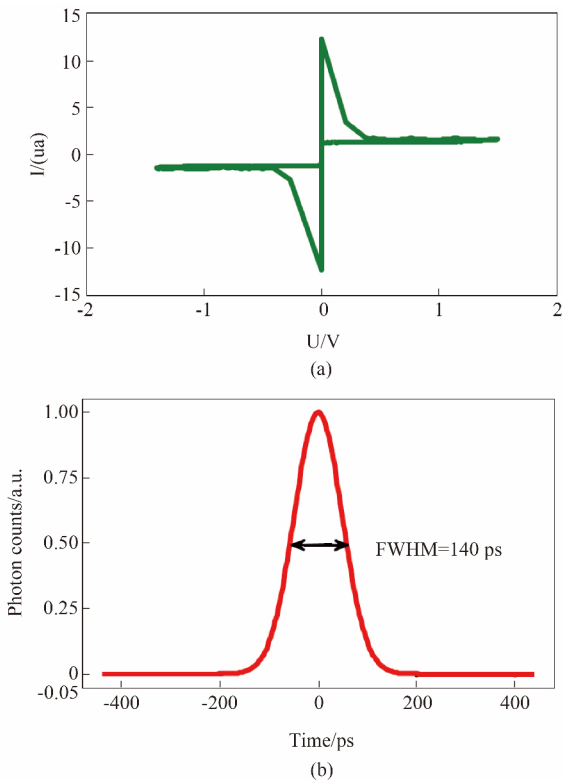


图 3 器件性能表征 (a) 器件电流电压曲线, (b) 器件单光子响应信号时间抖动曲线  
Fig. 3 Device performance characterization (a) current-voltage curve, (b) time jitter for photon detection

### 2.2 测距系统构成和工作过程

为了分析不同探测器基于光子计数技术在激光测距的应用, 设计了实验系统, 其原理结构如图 4 所示. 激光发射脉冲信号经过发射光学系统照射到目标表面, 目标散射回来的激光信号由望远镜的透镜接收器耦合至多模光纤 (Multimode fiber, MMF), 再通过 62.5 μm 的 MMF 和非球面透镜压缩耦合至

SNSPD 器件的光敏面, 光纤到器件耦合效率为 95% [28-30]. SNSPD 产生响应后, 经读出电路放大后接入光子计数模块 (Photon counting card), 并将采集到的数据传输至数据处理模块. 系统其他参数如下: 激光工作波段 1064 nm, 重复频率 5 Hz, 脉冲峰值能量 12 MW, 脉宽 10 ns, 发射和接收光学效率分别为 0.85 和 0.95, 激光发散角 0.2 mrad, 接收视场为 0.3 mrad, 接收口径为 120 mm, 收发光路加入可衰减, 以便调节收发光信号强度. 激光脉冲发生器通过时序同步控制激光和计数器的启动时间, 采集得到包含距离信息的光子计数值, 并由内嵌软件计算出目标的绝对距离. 与此同时, 为了对比研究, 选用 Excelitas 公司加强型 Si 基材料的单光子探测模块 (Single Photon Counting Module, SPCM) CD3565, 在 1064 nm 波段处单光子探测效率约 2%, 死时间 30 ns, 暗计数 2000 cps.

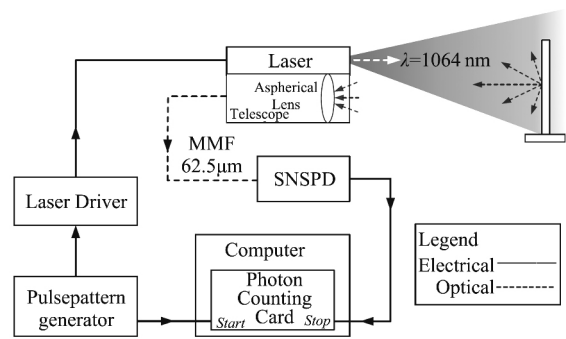


图 4 激光测距系统  
Fig. 4 Laser ranging system

## 3 实验结果及分析

### 3.1 回波率分析

在白天日照条件下, 利用设计的光子计数激光雷达系统对 10.5 km 外的固定目标 (铁塔) 进行室外测距实验, 铁塔反射率  $\rho = 0.35$ , 大气透过率  $T_a = 0.99$ , 接收系统光学效率  $\eta_r = 90\%$ . 依据激光雷达方程估算回波光光子数约 68 个. 为了研究测距系统的性能极限, 确保接收端能量接近单光子量级, 对光子计数过程充分记录, 可利用衰减器调整探测器接收到的返回激光能量, 使回波光光子数在个位数波动. 激光回波信号强度衰减至约为 2~3 个光子时, 随着脉冲积累次数增加, 得到的 SNSPD 探测器光子事件空间点云分布情况实验结果如图 5 所示. 其中, 10.5 km 处光子事件发生密度明显高于其他距离, 有着极高的探测概率. 利用光子计数累积和目标距离的统

计处理,将噪声信号有效滤除,提取目标的真实距离,以验证光子计数激光雷达系统的可行性。

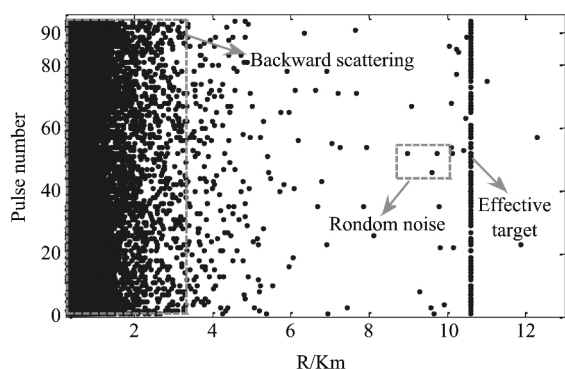


图5 10.5 km 目标测距结果  
Fig.5 Results of 10.5 km target ranging

在相同测距系统和天光背景噪声下,比较 SNSPD 和 SPAD 探测器基于本征暗计数对信噪比的影响,进而分析对实验探测概率的干扰.依据公式(2)~(6)通过对回波光信号采用不同衰减率进行数据统计,得到实验结果如表1所示。

表1 不同回波强度下激光测距实验结果  
Table 1 Experimental results of laser ranging under different echo intensities

Attenuation factor/dB	Echo photon number/cps	SPAD	SNSPD	SPAD	SNSPD
		Average range of detection /km		Experimental detection probability	
10	120	10.52	10.51	80%	95%
30	42	10.56	10.53	35%	75%
60	20	11.25	10.52	20%	60%
120	8	12.47	10.52	0.2%	35%

当回波光光子数较多时, SNSPD 和 SPAD 探测概率较高,暗计数对探测概率影响较小;随着衰减率的增加,回波光光子数低于 100 cps 时,基于 SPAD 的测距系统探测概率急剧下降,但基于 SNSPD 的测距系统仍可以保持 60% 以上的探测概率;在回波光光子数减至 10 cps 以下,由于 SPAD 高暗计数导致距离信号被湮没,几乎探测不到有效光子数,而基于 SNSPD 的测距系统探测概率可达 35%。这主要得益于 SNSPD 极低的暗计数和单个测量周期内允许多个有效光子响应的探测特性.因此,在进行探测远距离空间目标时,探测器本身较低的暗计数率尤为重要.即使接收到极弱的光信号,较低的暗计数使得信噪比高,有利于从探测数据中有效识别回波信号.随着信号的衰减,基于 SPAD 的测距系统的精准度也在明显下降,即有效距离测量的结果较实际距离之

差的波动范围较大.主要原因是 SPAD 盖革模式下暗计数和背景噪声影响回波有效光子的响应,导致信噪比下降。

为了进一步探究在相同采样时间内,随着脉冲积累,暗计数的累积对探测概率的影响.选取不同暗计数的 SNSPD 和 SPAD 在相同背景噪声下,改变激光频率,得到测距系统单次探测概率随激光频率的变化,如图6所示。

实验表明:因 SPAD 材料本征物理性质的限制,在接收一个激光脉冲周期中仅完成一次有效测量就停止工作,而 SNSPD 相比较 SPAD 死时间较短,单个激光脉冲周期内允许多个有效光子响应.同时,由于噪声(背景噪声或暗噪声)极有可能先于回波光光子引发探测器响应,SPAD “关门”特性限制了有效回波光子的探测.结合信噪比公式(11),相同测量时间内,随着脉冲积累次数的增加,由于 SNSPD 的有效接收光子数  $N_r$  远远多于 SPAD,且探测器本征暗计数平均值  $N_d$  也远远低于 SPAD,因此, SNSPD 在信噪比上有明显优势,测距系统探测概率也往往较高.而随着 SNSPD 探测器工艺及材料的改善,死时间越短,暗计数越少,越有利于信噪比提升。

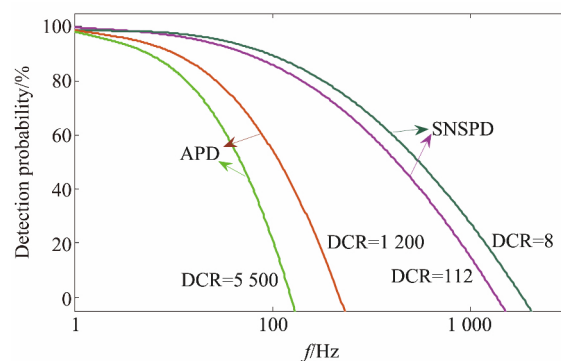


图6 单次探测概率随激光频率的变化  
Fig.6 The single detection probability varies with the laser frequency

### 3.2 天空背景影响

为了提高测距系统实际探测能力,根据系统探测能力表征的信噪比模型,结合噪声和信号的分布规律,采用 Matlab 仿真探究不同背景噪声对信噪比的影响,以便获取日间激光探测最佳的接收信噪比.依据公式(6)~(11),测距系统其他参数保持不变时,改变天光背景参数  $L_0$ ,得到如图7所示 SNSPD 探测系统在不同亮度条件下,光电系统探测信噪比值随天光背景强度的变化曲线。

如果假定,信噪比低于 6 将不利于探测器有效

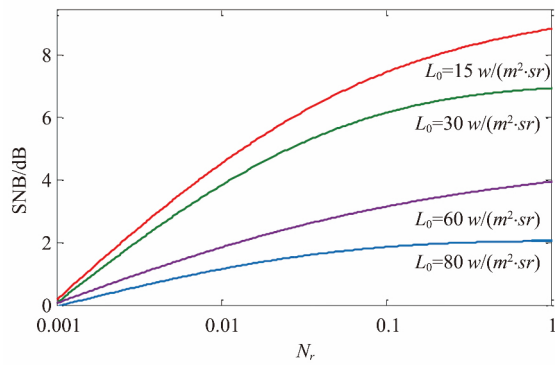


图7 不同天空背景强度下 SNR 随回波光光子数的变化  
Fig.7 SNR changes with the background intensity of sky-light

探测信号. 在相同的光学系统和背景亮度相同情况下, 系统探测信噪比随系统接收端的光子计数量减少呈指数下降. 当背景亮度  $L_0$  高于  $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  时, 信噪比低于 6, 低于稳定探测信噪比要求, 即在强光背景亮度下很难稳定进行目标探测. 在回波光光子数相同的情况下, 降低背景噪声亮度是显著提高信噪比的有效方法. 因此, 仿真结果表明, 背景噪声是影响光子计数技术有效测距的重要因素, 不同背景亮度对探测信噪比的影响呈非线性变化. 在强光背景下测距需要考虑增加滤光片或光谱滤波设备以提高系统的实际探测能力.

#### 4 结论

根据光子计数测距原理, 设计了基于 SNSPD 探测器的光子计数激光测距系统, 在相同日光背景噪声条件下, 结合激光测距方程、信噪比计算模型, 与常用的 SPAD 性能作对比. 在实验中探究了暗计数对信噪比的干扰以及激光频率对探测概率的影响, 当回波信号较弱、探测器暗计数较大、激光频率较高时, 信噪比较低, 回波信号容易被噪声湮没, 无法进行有效测量, 降低了探测概率. 进一步建立背景噪声模型, 通过强背景噪声减弱光敏面对回波信号的接收能力, 在相同天光背景亮度下, 系统探测信噪比随光子计数量减少呈指数下降; 在不同天光背景亮度下, 信噪比变化较大. 因此, 在回波光光子数相同的情况下, 降低背景噪声亮度是显著提高信噪比的有效方法.

#### References

[1] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S. Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures

- [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, **87**(2): 347.
- [2] Haiyun Xia, Guoliang Shentu, Mingjia Shanguan, et al. Long-range micro-pulse aerosol lidar at  $1.5 \mu\text{m}$  with an up-conversion single-photon detector [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7): 1579-1582.
- [3] Jianyong Hu, Bo Yu, Mingyong Jing, et al. Experimental quantum secure direct communication with single photons [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, **5**(9): e16144.
- [4] Eisaman M D, André A, Massou F, et al. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses [J]. *Nature*, 2005, **438**(7069): 837-841.
- [5] YUAN Shuai-ying, YANG Yi, DONG Tao, et al. Simulation of Key Technologies of Single Photon Detection for Airborne Long-Distance Ranging [J]. *Electronics Optics & Control*. (袁帅映, 羊毅, 董涛, 等. 用于机载远程测距的单光子探测关键技术仿真研究. *电光与测量*) 2015, **22**(2): 80-84.
- [6] Michalet X, Colyer R A, Scalia G, et al. Development of new photon-counting detectors for single-molecule fluorescence microscopy [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2013, **368**(1611): 20120035.
- [7] Jun Zhang, Itzler M A, Zbinden Hugo, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**(5): e286.
- [8] Huang Jianhua, Wu Guang, Zeng Heping. Study of 1.5 GHz Harmonics Ultra short Pulse Gated InGaAs/Inp Avalanche Photodiode Single-photon Detection [J]. *Acta Optica Sinica*. (黄建华, 吴光, 曾和平. 基于 1.5GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究. *光学学报*) 2014, **34**(02): 29-33.
- [9] Comandar L C, Fröhlich B, Dynes J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(8): 083109.
- [10] Takesue H, Nam S W, Zhang Q, et al. Quantum key distribution over a 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors [J]. *Nature photonics*, 2007, **1**(6): 343-348.
- [11] Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency [J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(3): 210-214.
- [12] Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu, et al. Theoretical Analysis of Influence of Laser Signal Strength on Range Precision in Single Photon Ranging [J]. *Acta Optica Sinica*. (王飞, 赵远, 张宇, 等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究. *光学学报*) 2010, **30**(10): 2771-2775.
- [13] Li Xue, Zhulian Li, Labao Zhang, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**, 3848-3851.
- [14] Hao Li, Lu Zhang, Lixing You, et al. Large-sensitive-area superconducting nanowire single-photon detector at 850 nm with high detection efficiency, *Optics Express*, 2015(23), 17301-17308.
- [15] Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Li Zhulian, et al. A study into laser pulse's impact on the precision and accuracy of the diffuse laser ranging system [J]. *Astronomical Research and Technology* (翟东升, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 激光脉冲特性对漫反射激光测距系统精度的影响研究.

- 天文研究与技术) 2016, **13**(03): 326-332.
- [16] Feng Baicheng, Li Zhaohui, Shi Yafan, *et al.* Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors [J]. *Acta Optica Sinica* (冯百成, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于双模式探测器的大动态范围激光测距. 光学学报) 2016, **36**(05): 16-21.
- [17] Xiaoyan Yang, Hao Li, Weijun Zhang, *et al.* Superconducting nanowire single photon detector with on-chip band-pass filter [J]. *Optics Express*, 2014(22), 16267-16272.
- [18] Wei Lu, Michael A. Krainak, Guangning Yang, *et al.* Low-Noise Free-Running High-Rate Photon-Counting for Space Communication and Ranging [J]. *Spie Commercial + Scientific Sensing & Imaging*, 2016, **9858**: 98580S.
- [19] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, *et al.* An optical receiver for the Lunar Laser Communication Demonstration based on photon-counting superconducting nanowires [C]. *Proc. SPIE*. 2015, **9492**: 949208.
- [20] Markman A, Javidi B, Tehranipoor M. Photon-counting security tagging and verification using optically encoded QR codes [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(1): 1-9.
- [21] Destrepes F, Cloutier G. A critical review and uniformized representation of statistical distributions modeling the ultrasound echo envelope [J]. *Ultrasound in medicine & biology*, 2010, **36**(7): 1037-1051.
- [22] Al-Habash M A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(8): 1554-1562.
- [23] Korneev A, Kouminov P, Matvienko V, *et al.* Sensitivity and gigahertz counting performance of NbN superconducting single-photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(26): 5338-5340.
- [24] Divochiy A, Marsili F, Bitauld D, *et al.* Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(5): 302-306.
- [25] Labao Zhang, Sen Zhang, Xu Tao, *et al.* Quasi-Gated Superconducting Nanowire Single-Photon Detector [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, **27**(2): 1-6.
- [26] Labao Zhang, Xiachao Yan, Chengtao Jiang, *et al.* SNSPDs on a magnesium fluoride substrate for high system efficiency and ultra-wide band [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(22): 2522-2525.
- [27] Rosfjord K M, Yang J K W, Dauler E A, *et al.* Nanowire single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(2): 527-534.
- [28] Labao Zhang, Cao Wan, Min Gu, *et al.* Dual-lens beam compression for optical coupling in superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Science bulletin*, 2015, **60**(16): 1434-1438.
- [29] Labao Zhang, Min Gu, Tao Jia, *et al.* Multimode fiber coupled superconductor nanowire single-photon detector [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(5): 1-8.
- [30] ZHANG Sen, TAO Xu, FENG Zhi-Jun, *et al.* Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate [J]. *Acta Physica Sinica*. (张森, 陶旭, 冯志军, 等. 超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响. 物理学报), 2016, **65**(18): 320-325.

(上接第 377 页)

- [7] Nannuru S, Coates M, Mahler R. Computationally-Tractable Approximate PHD and CPHD Filters for Superpositional Sensors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, **7**(3): 410-420.
- [8] Papi F, Kim D Y. A particle multi-target tracker for superpositional measurements using labeled random finite sets [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, **63**(16): 4348-4358.
- [9] Papi F, Ba-Ngu Vo, Ba-Tuong Vo, *et al.* Generalized Labeled Multi-Bernoulli Approximation of Multi-Object Densities [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, **63**(20): 5487-5497.
- [10] Clark D, Bell J. Multi-target state estimation and track continuity for the particle PHD filter [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, **43**(4): 1441-1453.
- [11] Mahler R. Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion [M]. BOSTON London: ARTECH HOUSE, INC. 2007: 371-372.