

基于超导探测器的激光测距系统作用距离分析

薛 莉¹ 翟东升² 李语强² 张蜡宝³ 李祝莲² 康 琳³ 吴培亨³ 李 明¹ 熊耀恒^{2*}

¹北京跟踪与通信技术研究所空间目标测量重点实验室, 北京 100094

²中国科学院云南天文台应用天文研究组, 云南 昆明 650011

³南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 江苏 南京 210093

摘要 提出了将超导纳米线单光子探测器(SSPD)应用于空间碎片激光测距的构想,并通过理论分析和等效外场实验进行了可行性论证。根据SSPD在门控时间内允许多次测量的特性,建立了信噪比随回波光子数的变化模型,并考察了激光器发射重复频率、天光背景噪声强度、探测器暗计数率等参数对信噪比的影响,结合回波光子数方程和噪声强度,以云南天文台激光测距系统为例,推算出该系统具备探测830 km处米级大小空间碎片的能力。结合光纤耦合条件,设计了以太阳光板为目标的外场实验,通过改变光学系统透过率,获得了信噪比随回波光子数变化的实验曲线,验证了利用信噪比变化推测系统作用距离方法的有效性,理论和等效实验结果均表明超导纳米线探测器有望实现空间碎片激光测距。

关键词 探测器; 激光测距; 超导纳米线单光子探测器; 信噪比; 回波光子数; 空间碎片

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0304001

Ranging Capability Analysis for Laser Ranging System Using Superconducting Nanowire Detectors

Xue Li¹ Zhai Dongsheng² Li Yuqiang² Zhang Labao³ Li Zhulian² Kang Lin³ Wu Peiheng³ Li Ming¹ Xiong Yaoheng²

¹Key Laboratory for Space Object Measurements, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

²Group of Applied Astronomy Research, Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China

³Research Institute of Superconductor Electronics, Department of Electronics Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract Space debris detection using superconducting nanowire single-photon detector (SSPD) as detectors is proposed and both theoretically and equivalent experimentally verified. The multi-detection characteristic of SSPD during gating period is analyzed, and the signal noise ratio (SNR) model with echo photon number is established. Effects of laser repetition rate, sky background noise rate and dark count rate of SSPD on SNR are discussed. Taking the kHz laser ranging system of Yunnan Observatories as an example, combined with the echo photon number equation, it implies that the kHz laser ranging system at Yunnan Observatories has the capability for 1 m² space debris detection from 830 km away. Considering the fiber coupling requirement, an experimental curve of SNR versus echo number is obtained, which verifies the proposed method. Both theoretical and experimental results show that SSPD has the potential for space debris laser ranging.

Key words detectors; laser ranging; superconducting nanowire single photon detector; signal-to-noise ratio;

收稿日期: 2015-08-25; 收到修改稿日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116)

作者简介: 薛 莉(1990—),女,硕士研究生,主要从事漫反射激光测距方面的研究。E-mail: xuelishirley@sjtu.edu.cn

导师简介: 李 明(1964—),男,博士,研究员,主要从事光电探测、激光测距方面的研究。E-mail: limingbitt@163.com

*通信联系人。E-mail: xyh@ynao.ac.cn

1 引 言

激光测距能够实现空间目标高精度测距,在空间目标和空间环境监测等领域发挥着重要作用。日益增多的空间碎片严重威胁着航天器运行安全,需及时对其进行定轨及清除。然而与合作式卫星不同,空间碎片的全空间反射特性导致其回波光子数往往处于单光子水平^[1],增加了探测的难度。目前常用的雪崩单光子探测器(SPAD)存在暗计数较高($10^3 \sim 10^6$ counts/s)以及对光子能量承受力较低的问题,在一个脉冲周期内,仅完成一次测量就停止工作,若不幸被噪声关门,则无法探测回波光子,SPAD这种“关门”特性降低了有效回波光子的探测概率^[2]。2001年,Gol'tsman等^[3]提出利用超导纳米线单光子探测器(SSPD)实现单光子探测的新技术,该探测器具有灵敏度高(小于单光子水平)、暗计数率低(小于100 counts/s)、恢复时间短(小于20 ns)、工作重复频率高(大于100 MHz)以及光子能量饱和阈值高等优点^[4-7],允许一个脉冲周期内进行多次光子探测。目前,莫斯科师范大学Gol'tsman团队、英国格拉斯哥大学Hadfield团队、英国赫瑞瓦特大学Buller团队、我国上海微系统与信息技术研究所尤立星团队、南京大学张蜡宝团队研制的超导探测器已处于国际领先地位,SSPD也被广泛应用于量子密钥分配^[8-10]、光子计算^[11-13]、天地激光通信^[14-15]等领域,并在激光测距领域露出良好的应用前景。2007年,Wartburton等^[16]首次在实验上利用平均功率为5 μW 、系统时间抖动为70 ps的SSPD测距系统实现了对距离为330 m处角反射器的激光测距,其测距分辨力为1 cm。随后,Chen等^[17]在2013年将系统时间抖动优化为26.8 ps实现了115 m处合作目标测距,将测距分辨力提高到4 mm,而McCarthy等^[18]则进一步使用发射激光平均功率250 μW 的SSPD测距系统实现了白天环境下910 m处非合作目标毫米级分辨力激光测距。然而受到激光器平均功率较低、SSPD探测面积有限(10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$)、远距离水平大气抖动和衰减剧烈、缺乏针对运动目标的跟踪系统等因素的限制,目前利用SSPD进行激光测距的作用距离仍为百米量级,且对于更远距离空间目标探测的激光测距系统作用距离的研究尚未有过报道。

本文基于SSPD在一个脉冲周期内允许多次测量的特性,考虑探测器本身死时间限制,建立了信噪比随回波光子数的变化模型,并分析了激光重复频率、天光背景噪声强度、探测器暗计数对信噪比的影响,以云南天文台激光测距系统为例,结合回波光子数方程推算了系统的作用距离,并设计了实验予以验证。结果表明,基于SSPD的千赫兹激光测距系统对米级大小的空间碎片作用距离可达830 km,SSPD具有进行空间碎片探测的可行性。

2 系统作用距离分析

2.1 非合作目标回波光子数方程

对空间碎片等非合作目标,经其反射的激光分布在全空间,到达探测面的回波光子数为^[19-21]

$$n_0 = \frac{\lambda}{hc} E_i T^2 K_t K_r \frac{D^2 \rho \sigma}{8\pi R^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{R\theta_t}{2} \right)^2}, \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, h 和 c 分别为普朗克常数和真空中光速, E_i 为激光单脉冲能量, $T = \exp\left[-2 \int_0^R \delta(\lambda, r) dr\right]$ 为大气透过率,以云南天文台激光测距系统为例,其取值为0.5, $\delta(\lambda, r)$ 为大气消光系数, K_t 和 K_r 分别为发射系统和接收系统效率,大致为0.8和0.5, σ 为目标等效截面积, ρ 为目标反射率,对于典型的空间碎片可取为0.16, D 为望远镜接收口径, d 和 θ_t 分别为激光经望远镜发射时直径和发散角,分别为0.24 m和12", n_0 为平均回波光子数,为一个统计物理量,服从泊松分布^[22]。经过扩束准直后光束直径为 $d=0.24$ m、束散角全角约为 $\theta_t=12''$ 的激光光束,其在距离为 R 处光斑直径为 $d_{\text{spot}} = [d/2 + R \cdot (\theta_t/2)]$,当 R 取830 km时,光斑直径约为25 m,对应的光斑面积为 $A_{\text{spot}}=490$ m^2 ,光斑远大于一般的空间碎片大小。与此同时,跟踪系统的跟踪精度会引起目标所在位置光斑的漂移。对于目前复合跟踪系统的跟踪水平,其跟踪精度可以做到 $\theta_p < 2''$ ^[23],对应830 km引起的光斑漂移为5 m左右。所以考虑了光束发散角和跟踪精度后,尺寸小于7.5 m的空间碎片均能够被光斑完全覆

盖。因此,以云南天文台激光测距系统为例,对于利用 SSPD 改造后的 532 nm 波段、单脉冲能量为 0.8 mJ、激光重复频率为 1 kHz、跟踪精度可优于 2" 的云南天文台半口径发射 1.2 m 接收激光测距系统,对面积为 1 m² 的典型空间碎片进行测量时,接收的回波光子数随目标测量距离的变化关系如图 1 所示。对于 830 km 处米级大小的典型空间碎片,其平均回波光子数仅为 0.0015 个,远低于单光子水平,在统计上意味着每 10000 个脉冲得到的回波光子数平均值仅为 15 个左右。

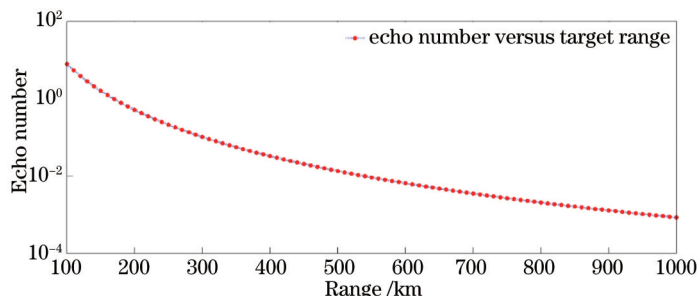


图 1 回波光子数随目标距离的变化曲线

Fig.1 Echo photon number versus target range

2.2 噪声分析

激光测距主要受 SSPD 本身暗计数、天光背景噪声、大气后向散射、光学元件散射等影响。SSPD 暗计数很小(小于 100 counts/s),在 10 μs 门控时长内,平均暗计数仅为 0.001 个,但对于测量远距离空间碎片等目标而言仍不可忽略。天光背景噪声受到太阳光、星光、月光等影响,对于激光测距中通常选取的无月夜,估计的天光背景噪声为^[24]

$$v_{\text{noi_sky}} = \frac{N_{\text{zero}}}{2.512^G} K_r A_{\text{SSPD}} \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \frac{\Delta\lambda}{0.3}, \quad (2)$$

式中 N_{zero} 为天光背景强度为零星等时在可见光范围的光通量, G 为天光背景星等, A_{SSPD} 和 $\Delta\lambda$ 分别为 SSPD 等效探测面积和滤光片带宽。对云南天文台背景星等为 16 星等的观测夜晚,其天光背景噪声速率为 45 counts/s,在空间碎片观测中不可忽略。大气后向散射由米散射和瑞利散射引起^[25-27],可由后向散射理论进行估算:

$$p(\lambda, r) = p_0 \frac{c\Delta t A}{2r^2} \beta(\lambda, r, \phi) \exp\left[-2 \int_0^r \delta(\lambda, r) dr\right], \quad (3)$$

式中 $p(\lambda, r)$ 为距离 r 处后向散射强度, p_0 为出射激光强度, Δt 为激光脉宽, A 为接收望远镜面积, $\beta(\lambda, r, \phi)$ 为该处大气后向散射系数, $\delta(\lambda, r)$ 为大气消光系数。对于单脉冲能量为 0.8 mJ,脉宽为 100 ps 的激光脉冲,望远镜接收到整层大气的后向散射光子数约为 10^7 个。测量空间目标时,通过对 SSPD 或事件计时器施加门控信号^[28],让探测器在激光回波脉冲即将到达的范围内允许工作,可将大气散射光子有效滤除。光学元件散射噪声由共光路系统中光学元件引起。假设光学元件表面增透膜透过率为 99.3%,则对于 0.8 mJ 的激光脉冲,会产生约 1.3×10^4 个光学元件散射光子。因为光学元件散射噪声主要存在于近距离范围内,亦可通过对 SSPD 或事件计时器施加门控信号予以滤除。

在空间目标测距中,通过门控信号可有效避免大气后向散射和光学元件后向散射噪声对探测的影响,从而只需考虑探测器暗计数率和天光背景噪声的影响。

2.3 探测信噪比模型

探测信噪比可用来表示回波从噪声中被识别的能力,可通过数据统计直方图中回波光子数和噪声光子数来定义^[29]

$$f_{\text{SNR}} = \frac{n_{\text{echo}}}{\sqrt{n_{\text{echo}} + n_{\text{noise}}}}, \quad (4)$$

式中 n_{echo} 表示统计直方图中峰值所在区间记录的回波光子数, n_{noise} 表示该区间记录的噪声光子数。为考察基于 SSPD 的激光测距系统作用距离,下面分析系统探测信噪比与回波光子数 n_0 的变化关系。与 SPAD 不同,

SSPD在一次脉冲周期内允许多次探测,其极限探测能力由其死时间来确定,即SSPD在探测到一个光子后,不再对死时间范围到达的其他光子进行响应。通常SSPD不具有光子数分辨能力,即便在一次探测时间内探测到大量光子,也只能获得一个光子的响应,获得该响应的概率服从泊松分布,即若在一次探测时间内到达光敏面的光子数为 n ,则SSPD得到一个脉冲响应的概率为 $P=1-P_0(n)$,其中 $P_0(n)$ 表示没有探测到光子的概率。对于回波所在区间,仍然存在噪声影响,共同促使探测器发生光子响应,在该区间探测到的回波光子总数为

$$n_{\text{echo}} = f_{\text{rep}} t_{\text{mea}} \frac{n_0}{n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}})} \left\{ 1 - P_0 \left[n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \right\}, \quad (5)$$

式中 f_{rep} 为激光器发射频率, t_{mea} 为探测时长, t_{dead} 为探测器死时间, t_{broad} 为回波展宽时长, v_{noi} 和 v_{dark} 分别表示外部噪声速率和探测器本身暗计数速率。

假设噪声均匀分布,考虑到SSPD允许多次探测的特性,系统探测到的噪声光子数分为两部分,分别是回波所在区间的噪声数以及其他区间噪声数

$$\begin{cases} N_{\text{noise}_1} = f_{\text{rep}} t_{\text{mea}} \frac{v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}}{\frac{n_0}{t_{\text{broad}}} + v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}} \left\{ 1 - P_0 \left[n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \right\} \\ N_{\text{noise}_2} = f_{\text{rep}} t_{\text{mea}} \left(\frac{t_{\text{gate}}}{t_{\text{dead}}} - 1 \right) \left[1 - P_0 + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \\ N_{\text{noise}} = N_{\text{noise}_1} + N_{\text{noise}_2} \end{cases}, \quad (6)$$

回波所在区间内的噪声数为

$$\begin{cases} n_{\text{noise}} = \frac{N_{\text{noise}}}{n_{\text{bin}}} \\ n_{\text{bin}} = \frac{t_{\text{gate}}}{t_{\text{broad}}} \end{cases}, \quad (7)$$

n_{bin} 表示统计图中区间个数, t_{gate} 和 t_{broad} 分别表示门控时长和回波展宽时长。为此可以获得信噪比(f_{SNR})随 n_0 的变化关系:

$$f_{\text{SNR}} = \frac{\sqrt{f_{\text{rep}} t_{\text{mea}} \frac{n_0}{n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}})} \left\{ 1 - P_0 \left[n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \right\}}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{t_{\text{broad}}}{t_{\text{dead}}} - 1 \right) \left[1 - P_0 + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] + \frac{v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}}{\frac{n_0}{t_{\text{broad}}} + v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}} \left\{ 1 - P_0 \left[n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \right\}}}{\frac{n_0}{n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}})} \left\{ 1 - P_0 \left[n_0 \frac{t_{\text{dead}}}{t_{\text{broad}}} + t_{\text{dead}}(v_{\text{noi}} + v_{\text{dark}}) \right] \right\}}}}, \quad (8)$$

式中激光发射重复频率 f_{rep} 主要对回波光子数产生影响,如图2所示, f_{SNR} 随 f_{rep} 增大而增大,表明在保证激光发射能量的前提下,提高激光发射重复频率有利于增加回波和噪声光子数,从而有利于从分布无规律的噪声中提取出相关性较高的回波,提高探测信噪比,这也是目前发展高重频激光测距的重要原因之一。天光背景噪声、探测器暗计数率以及探测器死时间主要影响探测到的噪声个数,图3~5分别展示了其影响。在天光背景强度较低的夜晚,获得的探测信噪比明显高于背景噪声较强的白天,因此目前对于空间目标的探测主要集中在夜晚,实现白天测距仍是一项挑战。图4表明探测器本身较低的暗计数率有利于从探测数据中识别回波,尤其在回波水平低于 10^{-3} 水平时,对比尤为明显。为此在进行探测远距离空间目标甚至月球激光测距时,降低探测器暗计数率尤为重要。而探测器死时间长短表示其在一个脉冲周期内允许的探测次数,图5表明SSPD死时间越短,越有利于信噪比提升。

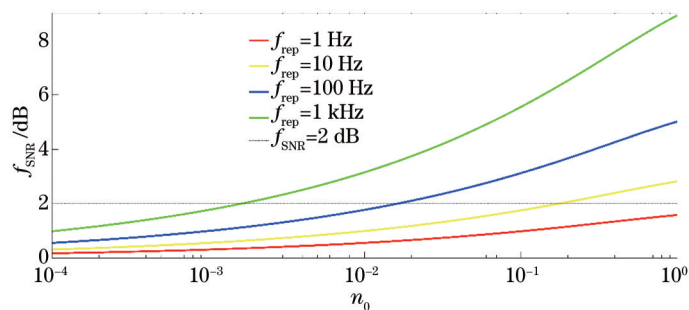


图 2 f_{SNR} 随激光发射重复频率的变化关系 ($t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

Fig.2 f_{SNR} versus laser repetition ($t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

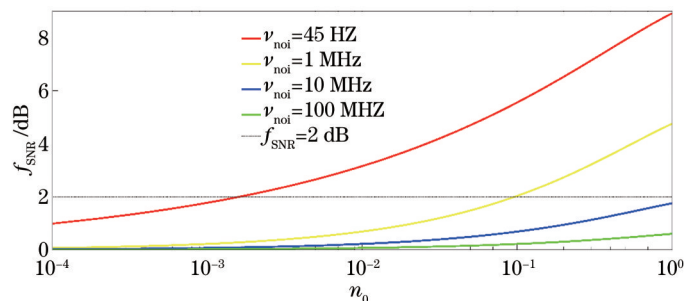


图 3 f_{SNR} 随天光背景噪声强度的变化关系 ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

Fig.3 f_{SNR} versus sky background noise ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

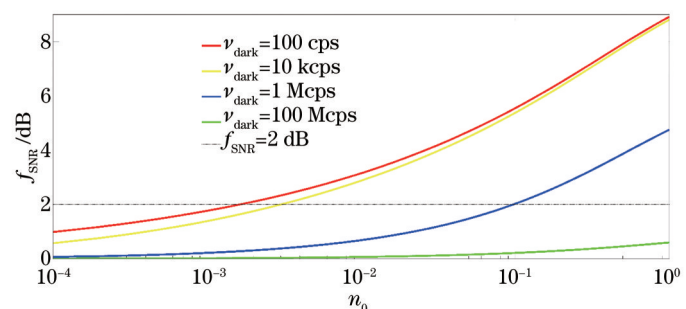


图 4 f_{SNR} 随探测器暗计数率的变化关系 ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

Fig.4 f_{SNR} versus the dark count rate of detector ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns, $t_{\text{dead}}=20$ ns)

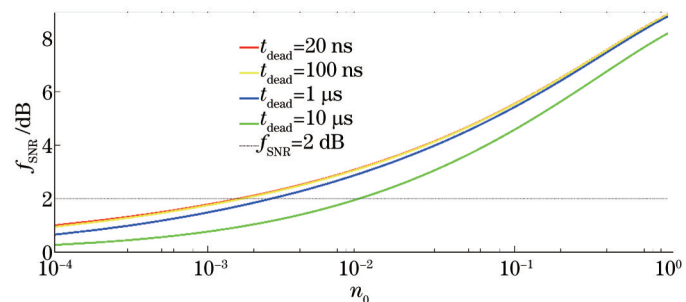


图 5 f_{SNR} 和探测器死时间的变化关系 ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns)

Fig.5 f_{SNR} versus dead time of the detector ($f_{\text{rep}}=1$ kHz, $t_{\text{mea}}=10$ s, $v_{\text{noi}}=45$ Hz, $v_{\text{dark}}=100$ counts/s, $t_{\text{gate}}=10$ μ s, $t_{\text{broad}}=6.7$ ns)

数据处理方法对回波的辨别能力影响系统能够探测的最远距离。表 1 展示了信噪比阈值为 2 dB^[30]的情况下,不同参数对系统作用距离的影响。以云南天文台激光测距系统为例,对于以暗计数率为 100 counts/s 的 SSPD 为光子探测器的云南天文台千赫兹的激光测距系统,在夜晚天光背景为 16 星等时,系统能够探测到最小平均回波光光子数为 0.0015 个。系统最小可探测回波光光子数的提高主要得益于超导探测器极低的暗计数和单个测量周期内允许多光子响应的探测特性,这有效解决了 SPAD 遇到光子随即“关门”的问题,大大降低了因噪声光子引起的回波光光子湮没。结合回波光光子数方程,可推算 SSPD 激光测距系统对米级大小空间

碎片作用距离可达 830 km。

表 1 不同参数对达到信噪比阈值时回波光子数及作用距离的影响
Table 1 Effects of different parameters on the echo number and target range

Parameters	Value	Minimum n_0	Maximum R /km
f_{rep}	1 Hz	-	-
	10 Hz	0.2	250
	100 Hz	0.015	480
	1 kHz	0.0015	830
	45 Hz	0.0015	830
ν_{noi}	1 MHz	0.1	300
	10 MHz	-	-
	100 MHz	-	-
ν_{dark}	100 counts/s	0.0015	830
	10 kcounts/s	0.003	730
	1 Mcounts/s	0.1	300
	100 Mcounts/s	-	-
t_{dead}	20 ns	0.0015	830
	100 ns	0.0021	790
	1 μ s	0.0025	760
	10 μ s	0.01	560

3 基于 SSPD 的千赫兹激光测距系统作用距离等效实验验证

实验中使用的 SSPD 在偏置电流为 14.7 μ A 时量子效率为 40%，暗计数率仅为 100 counts/s，时间抖动和死时间分别为 100 ps 和 10 ns。受纳米线材料及制作工艺限制，SSPD 本身探测面积仅为 10 μ m \times 10 μ m，远小于半导体探测器。为此，将其用于激光测距系统中时，需要考虑其探测面积对视场角的限制。利用多模光纤-微透镜耦合技术^[31]将入射光聚焦到 SSPD 上面，将 SSPD 有效探测面积增大为 62.5 μ m。

为实现激光测距系统中空间光-光纤光能量转换时较高的耦合效率，需考虑激光与多模光纤的耦合条件

$$\begin{cases} d_{spot} < d_{core} \\ NA > n \sin \theta_{spot} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 d_{spot} 为光斑直径， d_{core} 为光纤芯径， NA 为光纤数值孔径， n 为传播介质折射率， θ_{spot} 为形成光斑的激光束发散半角。数值孔径为 0.22 的多模光纤允许的激光发散半角为 12.7°，要求接收口径为 1.06 m 的系统其等效焦距不低于 2.35 m。设计如图 6 所示的收发共光路光学系统，在缩束倍率为 7.5 的无焦望远镜系统中增加了一组缩束倍率为 8.4 的透镜，经焦距 40 mm 的透镜聚焦，整个系统等效焦距为 7.5 \times 8.4 \times 40 mm=2.52 m，满足激光发散角要求。

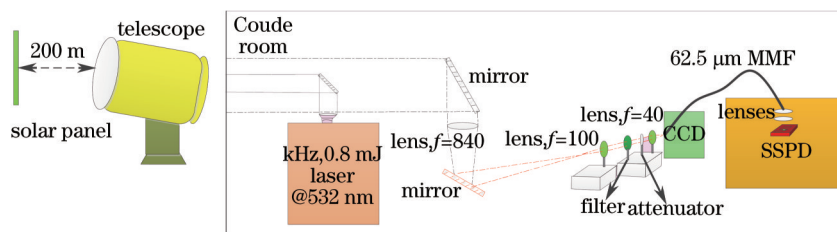


图 6 收发共光路光学系统设计，等效焦距为 2.52 m。经目标反射后的激光经望远镜接收收缩束后，被 SSPD 单元探测

Fig.6 Scheme of the coaxial optical system design, the efficient focal length is 2.52 m. The reflected laser is received by the telescope and reduced to a small beam and then detected by the SSPD module

对于空间目标，望远镜接收到反射光线近似为平行光。为此，利用一束平行参考光经过相同接收光学系统，将 CCD 放置于接收光路焦点处进行成像，成像光斑如图 7 所示，光斑直径约为 30 μ m，小于多模光纤芯

径,满足激光与光纤耦合中光斑大小要求。图7中次亮光斑由反射镜后表面引起,实验中将多模光纤放置于光斑最亮即能量最大处。首先调整光路中衰减片组合的衰减倍率,控制事件计时器记录的光子数水平处于较弱量级。选取事件计时器记录的数据时长为 t_{mea} ,门控长度 t_{gate} ,记录的光子总数为 N 。经过多项式拟合和 3σ 迭代处理后的数据个数为 N_1 ,其分布的长度范围为 t_{broad} ,其中回波个数为 $N_{echo}=N_1-t_{broad}\cdot[(N-N_1)/(t_{gate}-t_{broad})]$,其中 $N_{noise}=t_{broad}\cdot[(N-N_1)/(t_{gate}-t_{broad})]$ 为处理后剩余数据中的噪声个数。那么单个脉冲内记录的回波光子数为 $N_{echo}/(t_{mea}\cdot f)$,噪声个数为 $N_{noise}/(t_{mea}\cdot f)$ 。因此可由事件计时器记录的光子数据结合多项式拟合和 3σ 迭代反算到达光敏面的回波和噪声强度。

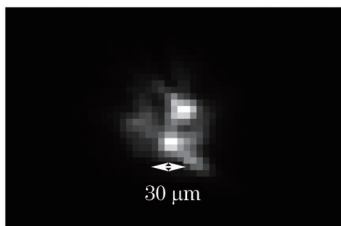


图7 远场CCD成像光斑

Fig.7 CCD picture of far field laser spot

据此系统设计了信噪比随回波光光子数变化的实验,如图6所示。通过千赫兹激光器发射激光脉冲照射在200 m处水塔上的太阳能板,经由接收光路获得回波信号,通过在接收光路中放置不同倍率衰减片,降低到达SSPD探测面的光子数水平。探测过程受到SSPD暗计数率、天光背景噪声以及大气后向散射噪声的影响,光学元件散射通过门控信号予以滤除。实验中通过调整衰减片倍率,将事件计时器记录的数据按照反算方法得到初始回波光光子数为0.015个。使用透过率分别为0.7、0.5、0.3、0.13、0.1的衰减片对入射光进行衰减的过程中,探测器外部噪声水平始终大于250 counts/s,即大于空间碎片探测中外部噪声(45 counts/s)。调整衰减片透过率,降低到达SSPD探测面的光子数水平,并按照上述过程反算到达光敏面的回波光光子数和噪声光子数,获得信噪比随回波光光子数变化的实验曲线,如图8所示,探测信噪比随回波光光子数降低而降低,在回波光光子数为0.001个时,探测信噪比达到阈值。实验结果表明SSPD能够探测并可从噪声中识别的最小平均回波光光子数为0.001个,结合(1)式,推算出系统对米级大小典型空间碎片的作用距离可达880 km,等效实验推算值与理论推算值830 km基本相符。

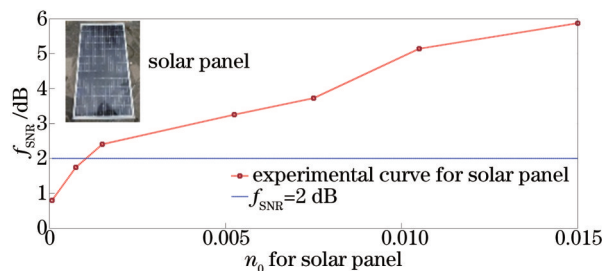


图8 太阳能板测量数据的 f_{SNR} 变化实验曲线

Fig.8 Experimental f_{SNR} curve for solar panel data

4 结 论

受远距离水平传输大气抖动和衰减严重、SSPD本身视场角有限而无法满足望远镜跟踪误差引起光斑漂移等问题的影响,目前基于SSPD进行激光测距的实验作用距离有限、主要集中在百米或者千米量级的问题,为解决更远距离目标的激光测距需求,利用多模光纤耦合的等效探测直径为 $62.5\ \mu m$ 的SSPD,结合其在一个脉冲周期内允许多次探测的特性,分别计算了SSPD响应的回波光光子数和噪声数,建立了信噪比随回波光光子数的变化模型,并考察了激光发射重复频率、探测器暗计数率、天光背景噪声强度等参数对信噪比的影响,以云南天文台激光测距系统为例,结合回波光光子数方程和噪声强度推算出系统具备探测830 km大小为 $1\ m^2$ 空间碎片的能力。并根据SSPD单元的光纤耦合要求设计了光学系统,以外场太阳能板为目标,通过衰

减片调整到达 SSPD 单元的回波光子数, 获得了信噪比随回波光子数变化的实验曲线, 等效实验结果为 880 km, 有效验证了通过信噪比推测系统作用距离方法的可行性。理论分析和等效实验结果均表明超导纳米线探测器有望作为一种新型单光子探测器应用于空间碎片激光测距中。建立的信噪比变化模型, 能够根据激光测距系统参数有效推算基于超导探测器的激光测距系统作用距离, 对于激光测距系统测距能力评价具有重要意义。随着千赫兹激光器单脉冲能量的提升, 基于低暗计数率、允许多光子响应的超导探测器的激光测距系统有望实现空间碎片观测。

参 考 文 献

- 1 Degnan J J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review[J]. Contributions of space geodesy to geodynamics: technology, 1993, 25: 133-162.
- 2 Xue Li, Li Ming, Li Xiyu, *et al.*. Multi-photon time-of-flight resolution enhancement by deconvolution in laser ranging[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702007.
薛 莉, 李 明, 李希宇, 等. 激光测距多光子分立时刻的反卷积解算方法[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702007.
- 3 Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, *et al.*. Picosecond superconducting single-photon optical detector[J]. Appl Phys Lett, 2001, 79(6): 705-707.
- 4 Zinoni C, Alloing B, Li L H, *et al.*. Single-photon experiments at telecommunication wavelengths using nanowire superconducting detectors [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(3): 031106.
- 5 Buller G S, Collins R J. Single-photon generation and detection[J]. Meas Sci Technol, 2010, 21(1): 012002.
- 6 Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696-705.
- 7 Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications[J]. Superconductor Science and Technology, 2012, 25(6): 063001.
- 8 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.
- 9 Liu Y, Chen T Y, Wang J, *et al.*. Decoy-state quantum key distribution with polarized photons over 200 km[J]. Opt Express, 2010, 18(8): 8587-8594.
- 10 Sasaki M, Fujiwara M, Ishizuka H, *et al.*. Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network[J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10387-10409.
- 11 Jaspán M A, Habif J L, Hadfield R H, *et al.*. Heralding of telecommunication photon pairs with a superconducting single photon detector [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(3): 031112.
- 12 Chen J, Altepeter J B, Medic M, *et al.*. Demonstration of a quantum controlled-NOT gate in the telecommunications band[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(13): 133603.
- 13 Clausen C, Usmani I, Bussièrès F, *et al.*. Quantum storage of photonic entanglement in a crystal[J]. Nature, 2011, 469(7331): 508-511.
- 14 Robinson B S, Kerman A J, Dauler E A, *et al.*. 781 Mbit/s photon-counting optical communications using a superconducting nanowire detector[J]. Opt Lett, 2006, 31(4): 444-446.
- 15 Moision B, Farr W. Communication limits due to photon detector jitter[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(9): 715-717.
- 16 R E Warburton, McCarthy A, Wallace A M, *et al.*. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength[J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 2266-2268.
- 17 Chen S, Liu D, Zhang W, *et al.*. Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system[J]. Appl Opt, 2013, 52(14): 3241-3245.
- 18 McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, *et al.*. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection[J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8904-8915.
- 19 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108005.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108005.
- 20 Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.*. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0414001.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414001.

- 21 Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.*. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.
翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于G-APD阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608007.
- 22 Goodman J W, Haupt P L. Statistical Optics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015.
- 23 Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, *et al.*. The use of laser ranging to measure space debris[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(2): 212-218.
- 24 Schroeder D J. Astronomical Optics[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- 25 Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- 26 Xu Xiaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong, *et al.*. Back-scattering model and experiment of laser illuminating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 60-65.
许晓军, 陆启生, 舒柏宏, 等. 激光照明的大气后向散射理论模拟和试验研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 60-65.
- 27 Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, *et al.*. Fast radiance calibration for ground-based large-aperture infrared opto-electric equipment [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0301003.
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 地基大口径红外光电设备快速辐射定标[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301003.
- 28 Akhlaghi M K, Majedi A H. Gated mode superconducting nanowire single photon detectors[J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1608-1616.
- 29 Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, *et al.*. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11(6): 712-716.
- 30 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 Opt, 2009, 48(32): 6241-6251.
- 31 Zhang Labao, Wan Chao, Gu Min, *et al.*. Dual-lens beam compression for optical coupling in superconducting nanowire single-photon detectors[J]. Sci Bull, 2015, 60(16): 1434-1438.

栏目编辑: 何卓铭