

超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响

张森 陶旭 冯志军 吴淦华 薛莉 闫夏超 张蜡宝 贾小氩 王治中 孙俊 董光焰 康琳 吴培亨

Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate

Zhang Sen Tao Xu Feng Zhi-Jun Wu Gan-Hua Xue Li Yan Xia-Chao Zhang La-Bao Jia Xiao-Qing Wang Zhi-Zhong Sun Jun Dong Guang-Yan Kang Lin Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 188501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.188501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.188501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高灵敏度太赫兹超导探测器

Terahertz high-sensitivity superconducting detectors

物理学报.2015, 64(22): 228501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228501>

超导纳米线多光子响应特性研究

Response properties of NbN superconductor nanowire for multi-photon

物理学报.2012, 61(20): 208501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.208501>

128?128 InSb 探测器结构模型研究

Structural modeling of 128?128 InSb focal plane array detector

物理学报.2012, 61(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.190701>

超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响*

张森¹⁾ 陶旭¹⁾ 冯志军²⁾ 吴淦华³⁾ 薛莉⁴⁾ 闫夏超¹⁾ 张蜡宝^{1)†}
贾小氢¹⁾ 王治中³⁾ 孙俊²⁾ 董光焰³⁾ 康琳¹⁾ 吴培亨¹⁾

1)(南京大学超导电子学研究所, 南京 210093)

2)(南京电子技术研究所, 智能感知技术重点实验室, 南京 210039)

3)(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

4)(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(2016年4月7日收到; 2016年6月17日收到修改稿)

超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 是一种新型单光子探测器, 具有灵敏度高、时间精度高、探测速度快和暗计数低等特点, 在激光测距等领域具有重要应用前景. 本文将 SNSPD 应用到 1064 nm 波段激光测距系统, 研究了其暗计数和信噪比对激光测距的影响. 基于实验获得的回波数据, 结合激光雷达理论, 研究了系统信噪比与脉冲积累次数的关系. 分析表明, SNSPD 暗计数是影响测距距离的关键因素之一. 结合仿真, 进一步探究了基于 SNSPD 的激光测距系统信噪比与回波率、暗计数的关系, 暗计数较大时, 信噪比随脉冲积累次数增加出现波动现象, 回波信号湮没. 由于 SNSPD 暗计数极低, 本基于 SNSPD 的测距系统最远测距可达 280 km, 较同样条件下基于 APD 探测器的测距系统最远探测距离远 40 km, 在军事侦查、探测和制导等领域具有重要应用前景.

关键词: 单光子, 超导纳米线, 暗计数, 激光测距

PACS: 85.25.Pb, 85.60.Gz, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.65.188501

1 引言

脉冲激光测距主要应用在军事领域, 包括侦查、探测、制导等, 是通过激光发射光路向目标发射脉冲激光, 探测到回波光光子后, 通过时间相关计数器 (time-correlated single-photon counting, TC-SPC) 记录其数目、时间信息, 进而计算出目标位置信息. 光电探测器是激光测距系统核心部件之一. 传统激光测距属于弱光测距, 激光单脉冲发射能量高, 激光器的重复频率较低, 限制了数据采样率、探测距离的提高. 单光子测距具有更高的数据采样率、更远的测距距离, 以 NASA^[1] 为代表的国外研究机构已经在这方面做了多年的研究工作.

由于大功率激光器等技术最为成熟, 1064 nm 波段是当前最主要激光测距波段. 然而, 常规

1064 nm 单光子激光测距中多使用 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (InGaAs/InP avalanche photodiode, InGaAs/InP APD)^[2], 效率小于 30%, 暗计数高达几十 kHz^[3]. 超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 是一种新型单光子探测器, 具有灵敏度高、时间精度高、探测速度快和暗计数低^[4-6] 等特点, 在激光测距等领域具有重要应用前景^[7,8]. SNSPD 基本原理为光子诱发的超导材料电流密度的转变, 使超导纳米线从超导态转变为电阻态, 通过检测纳米线上的电阻变化即可检测入射光子^[9,10], 目前已被应用在量子密钥分发^[11]、量子通信^[12,13]、单光子源表征^[14]、激光测距^[15] 等方面.

本文将 SNSPD 应用到某激光测距系统中, 替换现有 InGaAs/InP APD 探测器, 展示 SNSPD 的实验结果, 分析信噪比 (signal-to-noise-ratio, SNR)

* 国家自然科学基金 (批准号: 11227904, 61471189) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: Lzhang@nju.edu.cn

模型, 讨论探测器暗计数与信噪比关系, 探讨 SNSPD 暗计数对测距系统的影响, 验证 SNSPD 的低暗计数对系统测距能力的影响, 最终论证了 SNSPD 测距能力.

2 系统简介

2.1 SNSPD 系统

SNSPD 系统包括光路系统、低温系统、读出电路、SNSPD. SNSPD 制备分为六步: NbN 薄膜溅射、电子阻挡层 (EBL) 纳米线制作、溅射电极、光学谐振腔生长、封装、测试. 我们在 Si 衬底溅射的 NbN 薄膜厚约 5 nm, 超导转变温度约为 7 K. 纳米线面积为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 线宽 100 nm, 占空比 50%, 超薄超细的纳米线具有很低的能隙, 使 SNSPD 在近红外波段仍具备较高的效率. 光子先后通过 $62.5 \mu\text{m}$ 多模光纤和非球面透镜耦合到器件光敏面, 从多模光纤出射的光束被透镜组压缩到约 $20 \mu\text{m}$ [16,17], 便于高效率光耦合. 光学谐振腔参数决定其中心波长, 在中心波长处纳米线吸收达到 90% 以上 [18,19], 提高了 SNSPD 的探测效率. 本次实验使用的 SNSPD, 谐振腔中心波长为 1064 nm, 器件量子效率超过 80%, 系统效率约 40%.

SNSPD 测试光路包括激光器、可调光纤衰减器、多模光纤等. 测试过程如下: 激光器发射脉冲激光 (关闭激光器), 通过光纤分束器后, 一路接到光功率计, 另一路接入光纤衰减器, 衰减至单光子水平, 最后通过光纤末端的微透镜耦合到 SNSPD 上, SNSPD 产生响应后, 经读出电路放大后接入计数器, 通过数据采集卡连接至电脑, 记录某一偏置电流下的 SNSPD 响应光子数, 计算后可得到 SNSPD 的探测效率 (暗计数).

SNSPD 的效率高、暗计数极低, 这在激光测距中具有很大的优势. 我们测量了本次激光测距实验所使用的 SNSPD, 超导临界电流为 $12.5 \mu\text{A}$, 在偏置电流为 $10 \mu\text{A}$ 时, 暗计数 (dark count rate, DCR) = 6.4 cps, 效率 $\gamma = 40\%$.

2.2 测距系统

图 1 为激光测距系统示意图. 激光器工作波段 1064 nm, 重复频率 5 Hz, 脉冲峰值能量为 12 MW, 脉宽 10 ns, 激光发散角为 0.2 mrad, 接收视场为 0.3 mrad, 接收口径为 120 mm, 发射接收光学效率

分别为 0.8, 0.9, 回波经透镜耦合到 SNSPD 的光纤接口, 损耗约为 3 dB, 接发光路均可实现衰减调节. 激光器发射激光的同时输出一个同步信号, 触发 Start 端, 计时开始; SNSPD 响应目标光子和杂散光子后, 触发 Stop 端, 计时停止, 每触发一次 Stop 端记录保存一次时间信息, 直到外加的时钟信号再次触发 Start 端来结束本次测量周期, 测量周期为 1 ms.

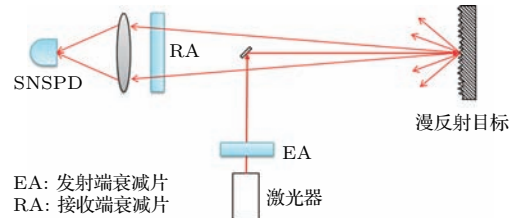


图 1 激光测距系统示意图 (EA, 发射端可调衰减片; RA, 接收端可调衰减片)

Fig. 1. Schematic diagram of laser ranging system (EA, tunable attenuator in the emission side; RA, tunable attenuator in the receiving side).

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

我们在能见度为 80 km 的夜间测量了 126 km 处漫反射拓展目标, 在激光发射端添加了 10 dB 的衰减, 实验结果如图 2, 其中图 2(a) 和图 2(b) 分别为回波数据和回波率处理结果, 图 2(a) 横轴为距离 (R), 纵轴为激光脉冲编号 (pulse number), 图 2(b) 横轴为距离 (R), 纵轴为回波率 (echo probability), 即 SNSPD 平均单脉冲响应的信号光子数. 如图 2(a), 激光后向散射 (back scattering) 较强, 天光背景、电路噪声及暗计数 (random noise) 较低, 回波信号较强, 目标距离为 126.025 km; 由图 2(b) 的回波率处理结果可知, 目标回波率为 96%.

回波信号中包含激光后向散射噪声, 服从指数衰减; 天光背景噪声和电路噪声, 高斯白噪声; 探测器暗计数噪声 (dark count rate, DCR), 均匀分布、回波信号, 高斯分布. 实验前噪声测试结果如下: SNSPD DCR ≈ 0.0064 Hz/pulse、电路噪声均值 (n_{circuit}) ≈ 0.5 Hz/pulse、天光背景噪声均值 (n_{sky}) ≈ 1.2 Hz/pulse. 根据上述实验数据, 计算噪声总数约为 8 Hz/pulse, 进而推算出激光后向散射噪声约为 6.3 Hz/pulse, 主要出现在 50 km 以内, 对于 126.025 km 处的目标影响不大.

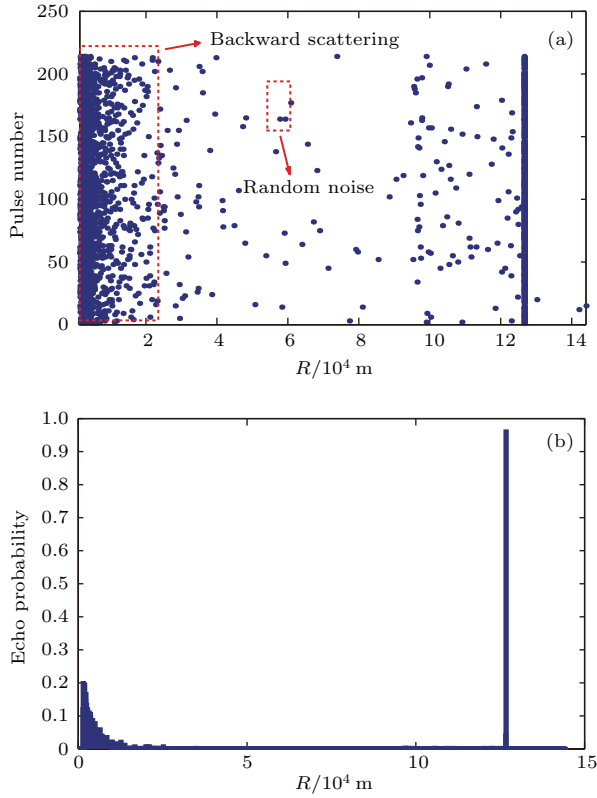


图2 126 km 目标测量结果 (a) 回波数据; (b) 回波率处理结果

Fig. 2. Measurement result of target at 126 km: (a) Experimental data of the echoes; (b) processing results of echo probability.

根据激光雷达测距方程推导本次实验测距方程 [20,21] 为

$$n_0 = \frac{\lambda}{hc} \times P_t \times \Delta t \times \frac{\tau_t \times \tau_r \times \rho \times D^2 \times \tau^2}{8R^2},$$

其中 n_0 是单脉冲回波光光子数, λ 为激光波长, h 为普朗克常数, c 为光速, P_t 为激光峰值功率, Δt 为激光脉冲宽度, τ_t 为发射光学效率, τ_r 为接收光学效率, ρ 为远处山体的反射率, 取 0.3, D 为系统接收孔径,

$$\tau^2 = \exp\left(-2 \int_0^R \delta(\lambda, r) dr\right)$$

为大气透过率, $\delta(\lambda, r)$ 为大气衰减系数. 计算得到该实验中 SNSPD 接收的信号光子 n_0 约为 6.2/pulse, 回波率 $n_{\text{echo}} = 1 - e^{-\gamma \times n_0} = 0.94$ ($\gamma = 0.4$, 为探测器效率), 与实验结果符合.

3.2 信噪比分析

理想情况下, 测距系统接收的光子全部为目标反射回来的, 单脉冲信号光子数可由测距方程计算得到, 但是实验中, 接收到的光子由目标光子和杂

散光子组成, 信噪比就关系到测距目标的分辨, 我们定义信噪比模型 [22]:

$$\text{SNR} = \frac{N \times n_{\text{echo}}}{\sqrt{N \times n_{\text{echo}} + n_{\text{noise}}}},$$

$$n_{\text{noise}} = N \times \frac{n_{\text{back}} + n_{\text{sky}} + n_{\text{circuit}} + \text{DCR}}{n_{\text{bin}}},$$

这里, N 为脉冲积累次数, n_{noise} 为发射 N 次脉冲后, 所有噪声的平均值, n_{back} 为激光后向散射噪声, n_{bin} 为响应噪声的时间通道数目, 可以看到影响 SNR 的有脉冲积累次数、回波率、噪声等因素.

根据信噪比模型, 我们计算了 126 km 目标测距的实验结果, 并结合各噪声和信号的分布规律, 采用 Matlab 仿真探究了各参数对信噪比的影响, 结果如图 3. 其中横轴为脉冲积累次数, 纵轴为信噪比.

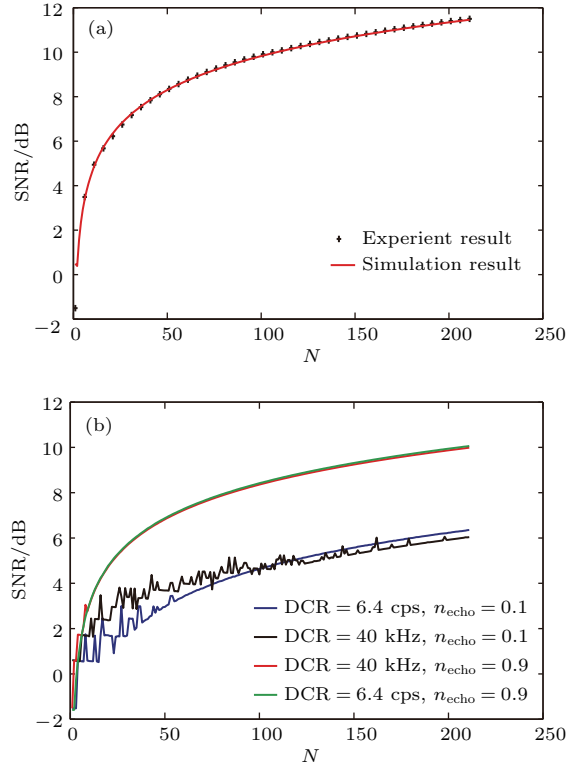


图3 (网刊彩色) 信噪比变化曲线 (a) 126 km 目标实验信噪比与仿真信噪比曲线; (b) 不同回波率 (0.1, 0.9) 下不同暗计数 (6.4 cps, 40 kHz) 仿真信噪比随积累次数的变化

Fig. 3. (color online) Curves of SNR: (a) Curves of experiment SNR and simulation SNR of target at 126 km; (b) simulation SNR under different echo probability (0.1, 0.9) and different dark counts (6.4 cps, 40 kHz).

图 3(a) 中黑点为实验数据, 红线为仿真结果, 两条曲线几近重合, 验证了仿真模型的准确性, 信噪比随着积累次数增加而平滑地增加. 在图 3(b) 中, 两组仿真曲线分别对应回波率和探测器暗计数对信噪比的影响. 可以看出, 当 $n_{\text{echo}} = 0.9$ 时, 暗

计数DCR= 6.4 cps和40 kHz的两条曲线几乎重合, 信噪比相差最大不到0.2 dB; 当 $n_{\text{echo}} = 0.1$ 时, DCR = 6.4 cps 和 40 kHz 的一组曲线出现波动现象. 由信噪比模型可得知, SNR随着 N 增加平缓增加, 当SNR曲线波动时, 意味着SNR公式中 n_{echo} 的值无法识别, 即信号被噪声湮没. 当 $n_{\text{echo}} = 0.1$ 时, 比较DCR=6.4 cps和40 kHz两种情况: 较低暗计数下, SNR曲线在积累次数较小时($N = 65$)恢复平缓, 之后无波动现象; 较高暗计数下, 信噪比曲线在积累次数较大时($N = 180$)仍有波动起伏, 信号被噪声湮没. 综上所述, 当回波率较高时, 探测器暗计数对信噪比影响可忽略不计; 当远距离测距时, 回波率较低, 高暗计数导致信号被湮没.

4 SNSPD暗计数对系统极限测距能力的影响

由信噪比分析结果可知, 在测量远距离目标时, 回波率较低, 高的探测器暗计数会造成目标湮没的现象. 针对新型低噪声探测器SNSPD, 我们仿真了不同暗计数下测距系统的信噪比曲线, 如图4所示, 横轴为脉冲积累次数, 纵轴为信噪比. 由于激光后向散射噪声出现在50 km内, 系统的极限测距能力远大于50 km, 对于我们仿真系统极限测距能力的影响不大, 所以不考虑激光后向散射因素.

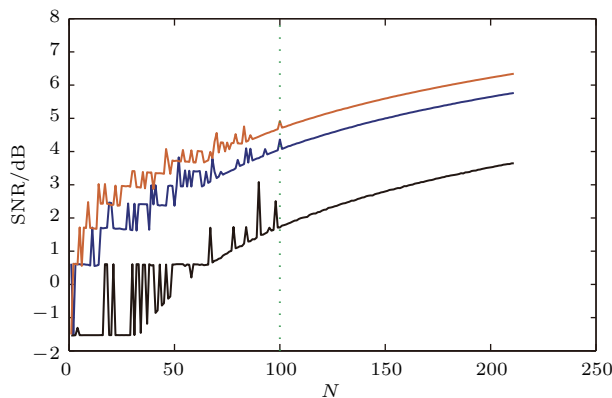


图4 (网刊彩色) 不同暗计数下信噪比随脉冲积累次数的变化情况

Fig. 4. (color online) Curves of SNR under different dark counts with the change of accumulation times.

图4中, 由上到下, 黑线、蓝线、红线对应了SNSPD暗计数为6.4 cps, 20 kHz, 40 kHz的信噪比仿真曲线, 绿线为 $N = 100$. 在积累次数较小时,

信噪比曲线出现波动; 积累次数较大时, 信噪比随积累次数平缓增加. 结合经验, 在探讨SNSPD测距能力时, 我们需固定积累次数来进一步分析暗计数的影响.

我们以 $N > 100$, 信噪比曲线无波动现象作为判断最远测距能力的依据, 计算得到对应6.4 cps, 20 kHz, 40 kHz暗计数下的回波率分别为当 $n_{\text{echo}} = 0.02, 0.08, 0.11$, 对应距离为280, 247, 240 km.

5 结 论

我们介绍了SNSPD的参数和优良特点, 并引入SNSPD测得了126 km目标, 实验回波率和信噪比较高. 结合实验结果验证了仿真模型, 并结合激光测距方程、信噪比计算模型仿真了探测器暗计数对测距信噪比的影响, 得出如下结论: 测距距离远, 回波率低, 探测器暗计数较大时, 信噪比曲线随积累次数增大出现起伏现象, 说明信号被噪声湮没. 根据信噪比分析的结论, 我们设定脉冲积累次数, 在此积累次数之后, 某距离上的信噪比曲线无波动现象, 作为系统最远测距距离的判据. 进一步探讨了SNSPD的暗计数对系统极限测距能力的影响, 本次实验所使用的SNSPD暗计数为6.4 cps, 最远测距可达280 km; 而文献报导的GHz正弦波驱动的近红外探测器InGaAs/InP APD同等效率下暗计数高达40 kHz, 对应着240 km的测距能力. 由于该SNSPD光接收口径为62.5 μm , 其视场小于光学系统视场, 光子耦合效率较低. 因此, 提高SNSPD接收口径是其在激光测距/雷达等应用的关键, 并有望进一步提高其最大探测距离.

参考文献

- [1] Degnan J J 2007 *International Workshop From Quantum to Cosmos-Fundamental Physics Research in Space* Warrenton, Virginia, May 21–24, 2007 p2137
- [2] Ren M, Gu X, Liang Y, Kong Y, Wu E, Wu G, Zeng H 2011 *Opt. Express* **19** 13497
- [3] Scarcella C, Boso G, Ruggeri A, Tosi A 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 17
- [4] Daulet E A, Kerman A J, Robinson B S, Yang J K, Voronov B, Gol'tsman G, tsmann G, Hamilton S A, Berggren K K 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 364
- [5] Zhang L B, Kang L, Chen J, Zhao Q Y, Jia T, Xu W W, Cao C H, Jin B B, Wu P H 2011 *Acta Phy. Sin.* **60**

- 038501 (in Chinese) [张腊宝, 康琳, 陈健, 赵清源, 郝涛, 许伟伟, 曹春海, 金飏兵, 吴培亨 2011 物理学报 **60** 038501]
- [6] Zhang L, Zhao Q, Zhong Y, Chen J, Cao C, Xu W, Kang L, Wu P, Shi W 2009 *Appl. Phys. B* **97** 187
- [7] Zhang L, Kang L, Chen J, Zhong Y, Zhao Q, Jia T, Cao C, Jin B, Xu W, Sun G, Wu P 2011 *Appl. Phys. B* **102** 867
- [8] Chen S, Liu D, Zhang W, You L, He Y, Zhang W, Yang X, Wu G, Ren M, Zeng H, Wang Z, Xie X, Jiang M 2013 *Appl. Opt.* **52** 3241
- [9] Vodolazov D Y, Korneeva Y P, Semenov A V, Korneev A A, Gol'tsman G N 2015 *Phys. Rev. B* **2** 9
- [10] Henrich D, Dorner S, Hofherr M, Il'in K, Semenov A, Heintze E, Scheffler M, Dressel M, Siegel M 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 8
- [11] Shibata H, Honjo T, Shimizu K 2014 *Opt. Lett.* **39** 5078
- [12] Wang Z, Miki S, Fujiwara M 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 1741
- [13] Natarajan C M, Haertig M M, Warburton R E, Buller G D, Hadfield R H, Baek B, Nam S W, Miki S, Fujiwara M, Sasaki M, Wang Z 2010 *1st International Conference of Quantum Communication and Quantum Networking* Naples, Italy October 26–30, 2010 p225
- [14] Fitzpatrick C R, Natarajan C M, Warburton R E, Buller G S, Baek B, Nam D, Miki D, Wang Z, Sasaki M, Sinclair A G, Hadfield R H 2010 *Conference on Advanced Photon Counting Techniques IV* Orlando, Florida, April 7–8, 2010 76810H
- [15] Li H, Chen S, You L, Meng W, Wu Z, Zhang Z, Tang K, Zhang L, Zhang W, Yang X, Liu X, Wang Z, Xie X 2016 *Opt. Express* **24** 3535
- [16] Zhang L, Wan C, Gu M, Xu R, Zhang S, Kang L, Chen J, Wu P 2015 *Sci. Bull.* **60** 1434
- [17] Zhang L, Gu M, Jia T, Qiu J, Kang L, Sun G, Chen J, Jin B, Xu W, Wu P 2014 *Appl. Phys. B* **115** 295
- [18] Miki S, Yamashita T, Fujiwara M, Sasaki M, Wang Z 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 332
- [19] Rosfjord K M, Yang J K W, Dauler E A, Kerman A J, Anant V, Voronov B M, Gol'tsman G N, Berggren K K 2006 *Opt. Express* **14** 527
- [20] Zhai D S, Fu H L, He S H, Zheng X M, Li Z L, Li Y Q, Xiong Y H 2009 *Astro. Res. Tech.* **6** 13 (in Chinese) [翟东升, 伏红林, 何少辉, 郑向明, 李祝莲, 李语强, 熊耀恒 2009 天文研究与技术 **6** 13]
- [21] Bao Z, Liang Y, Wang Z, Li Z, Wu E, Wu G, Zeng H 2014 *Appl. Opt.* **53** 3908
- [22] Pellegrini S, Buller G, Smith J M, Wallace A M, Cova S 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 712

Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate*

Zhang Sen¹⁾ Tao Xu¹⁾ Feng Zhi-Jun²⁾ Wu Gan-Hua³⁾ Xue Li⁴⁾ Yan Xia-Chao¹⁾
 Zhang La-Bao^{1)†} Jia Xiao-Qing¹⁾ Wang Zhi-Zhong³⁾ Sun Jun²⁾ Dong Guang-Yan³⁾
 Kang Lin¹⁾ Wu Pei-Heng¹⁾

1) (Superconducting Electronics Research Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2) (Key Laboratory of Intelligent Sensing Technology, Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)

3) (The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

4) (Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

(Received 7 April 2016; revised manuscript received 17 June 2016)

Abstract

Superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) is a competitive candidate in laser ranging at 1064 nm wavelength compared with other single photon detectors such as InGaAs/InP APD for its high sensitivity, high time precision and low dark counts. In this paper, we apply our SNSPD to a laser ranging system measuring target in Qinghai lake area with atmospheric scatter. The echo photons are received by telescope, and transport through the multimode fiber to the SNSPD photon-sensitive area. The SNSPD, integrated in an optical cavity with a resonant wavelength of 1064 nm, is fabricated on a MgF₂ substrate. The optical absorption of NbN film goes up to 98% according to FDTD simulation, and the system efficiency is measured to be about 40%. A pulsed laser at 1064 nm, featuring a peak power of 12 MW and a pulse width of 10 ns, is adopted in the laser ranging system. In this experiment, we first measure the system intrinsic noise and the environment noise introduced into the laser ranging system after turning off the laser. After that, we measure the echo rate for the target at 126 km, which increases up to 96% with an attenuator of 10 dB at the receiver side. The maximum distance of the laser ranging system is analyzed based on the experimental results of dark count and echo rate through a theoretical model of laser radar. The analysis indicates that signal-to-noise ratio (SNR) is increased smoothly with the accumulation of time. At the same time, we simulate how the dark counts influence the capability of laser ranging system based on SNSPD, the simulated SNR matches well with the experimental data of target at 126 km. Furthermore, the dark counts, accumulation of time and probability of echo photon affect the SNR according to the simulation results, showing that large dark counts would result in SNR fluctuation and signal annihilation when the probability of echo photon is low. Thus, the maximum distance of laser ranging under the assumption of integration time is estimated through the SNR simulated result, showing that a maximum distance is up to 280 km, 40 km far away from APD detector based system under the same conditions mainly due to the very low dark counts of SNSPD. It should be pointed out that the coupling efficiency between SNSPD and the receiving telescope is low for small view field limited by the 62.5 μm fiber of SNSPD. Thus, further work is to fabricate SNSPD with a larger coupling area which is possible to increase the maximum distance with improved coupling settings.

Keywords: single-photon, superconducting nanowire, dark counts, laser ranging

PACS: 85.25.Pb, 85.60.Gz, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.65.188501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11227904, 61471189).

† Corresponding author. E-mail: Lzhang@nju.edu.cn