

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

闫夏超 朱江 张蜡宝 邢强林 陈亚军 朱宏权 李舰艇 康琳 陈健 吴培亨

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

Yan Xia-Chao Zhu Jiang Zhang La-Bao Xing Qiang-Lin Chen Ya-Jun Zhu Hong-Quan Li Jian-Ting Kang Lin Chen Jian Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 198501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.198501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.198501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响

[Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate](#)

物理学报.2016, 65(18): 188501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.188501>

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>

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究*

闫夏超¹⁾ 朱江¹⁾ 张蜡宝^{1)†} 邢强林²⁾ 陈亚军¹⁾ 朱宏权²⁾ 李舰艇²⁾
康琳¹⁾ 陈健¹⁾ 吴培亨¹⁾

1)(南京大学超导电子学研究所, 南京 210093)

2)(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(2017年5月9日收到; 2017年6月5日收到修改稿)

高速深空通信是深空探测的关键技术之一, 具备单光子灵敏度的激光通信系统将大大提高现有的深空通信速度. 然而, 单光子条件下的激光通信不仅需要考虑传输环境的影响, 还需要考虑实际单光子探测器性能和光子数量子态的分布. 本文在不考虑大气湍流影响的情况下, 以光电探测模型为基础, 引入超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 系统的探测效率和暗计数, 建立了反应系统差错性能的数学模型, 提出了系统误码率的计算公式. 先对公式中的光强和激光脉冲重复频率对误码率的影响进行仿真, 再通过实验结果验证仿真模型. 结果表明, 光强对误码率的影响最明显, 随着光强从 0.01 光子/脉冲到 1000 光子/脉冲的增加, 误码率从 10^{-1} 到 10^{-7} 量级明显下降; 激光脉冲重复频率对误码率的影响受到不同光强的制约, 但都随着脉冲重复频率的增加呈下降趋势. 与此同时, 当增加光强或者提高速度时, 误码率高于仿真结果, 约在 10^{-4} 量级, 其原因可能是实际通信中调制光信号的消光比不足和光纤引入背景噪声提高了系统暗计数. 以上模型和实验结果为进一步开展基于 SNSPD 的月球-地球、火星-地球等高速深空激光通信奠定了基础.

关键词: 激光通信, 光电探测, 超导纳米线单光子探测器, 误码率

PACS: 85.25.P6

DOI: 10.7498/aps.66.198501

1 引言

空间激光通信是指利用空间传输的激光束作为信息载体的一种通信方式, 该技术由于具有成本低、组网灵活、安装方便、无需频率许可等优点, 已成为当今信息技术的一大热点^[1]. 特别是在深空探测领域, 传统无线电通信受能量发散的影响, 传输速率大大受限. 目前, 中国在人造地球卫星空间激光通信领域已经取得了大量标志性成果^[2,3]. 随着深空探测任务的展开, 激光通信将是深空探索的关键技术.

激光信号经过大气湍流信道传输后被接收天线汇聚到光电探测器上, 经过光电转换与放大后产

生电信号, 并由系统对电信号进行阈值判决. 光检测器是大气激光通信接收系统的关键部件, 提高光检测器对接收信号的灵敏度和提高光源的发射功率可提高激光通信系统的传输速度和通信距离. 然而, 受体积、重量和功耗等限制, 空间载荷发射功率大大受限. 因此, 提高光检测器的灵敏度是提高深空激光通信距离的重要途径^[4].

超导纳米线单光子探测器 (superconductor nanowire single photon detector, SNSPD)^[5-7] 是一种可高效、快速、准确地探测单光子的新型光探测器. 该探测器工作时被偏置在稍低于超导临界电流的位置. 当纳米线吸收光子后, 吸收区域的超导态被破坏, 产生热岛, 热岛区域在电流焦耳

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304002) 和国家自然科学基金 (批准号: 11227904, 61471189) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhang@nju.edu.cn

热的协助下增长到一定范围, 随后经过纳米线自身和衬底的冷却, 热岛区域消失, 纳米线恢复到初始状态^[8,9]. 探测器吸收光子的过程在电路上表现为快速上升、随后指数衰减的电脉冲. 通过将此脉冲信号放大, 我们就可以鉴别单光子的到达情况. SNSPD表现出比光电倍增管和盖革模式的雪崩二极管等现有单光子探测器更优异的性能, 在众多领域有潜在应用. 比如, 在空间科学领域, SNSPD非常适合超长距离激光通信和激光测距应用. 美国航空航天局在2013年基于SNSPD实现了人类历史上首次月地激光通信^[10-12], 通信速度高达622 MHz. 与此同时, 结合阵列SNSPD技术, 通过选择合适的调制方式可实现最高Gbps量级超长距离激光通信. 2015和2016年期间, 南京大学与云南天文台和北京跟踪与通信技术研究所合作, 将SNSPD首次应用到1064 nm波段万公里级卫星激光测距^[13-15].

误码率是衡量激光通信系统性能的重要指标. 由于大气湍流等引入的光强起伏噪声和探测器固有噪声的影响, 阈值判断提取出的数据就可能含有误码. 因此, SNSPD探测器的性能指标和光子数的量子态分布对误码率等均有影响. 本文在暂不考虑大气湍流影响的情况下, 将超导纳米线单光子探测器作为探测器, 从光电探测过程入手, 构建了激光通信的误码率理论模型, 改变激光脉冲的工作条件, 根据获得的实验数据计算误码率, 研究误码率受到的影响.

2 误码率模型构建

从输入端光源考虑, 激光脉冲中含有的光子数分布情况服从参数为 μ (每脉冲的平均光子数)的泊松分布. 那么激光器发出的每个激光脉冲中含有光子数 n 的概率分布为

$$P(n, \mu) = \frac{\mu^n}{n!} \exp(-\mu). \quad (1)$$

假设光子沿光链路的传输或反射服从二项分布, 则接收机至少探测到一个光子的概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{n \geq 1} &= \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (\eta)^k (1-\eta)^{n-k} \\ &= 1 - \binom{n}{0} \eta^0 (1-\eta)^n \end{aligned}$$

$$= 1 - (1-\eta)^n, \quad (2)$$

式中, η 是探测器的探测效率.

则原始正确“1”码的比特率为

$$R_{\text{cor1}} = R \times \sum_{n=1}^{\infty} P(n, \mu) \times P_{n \geq 1}, \quad (3)$$

式中, R 是激光脉冲重复频率.

那么可以得到正确“1”码的概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{cor1}} &= R_{\text{cor1}}/R = \sum_{n=1}^{\infty} P(n, \mu) \times P_{n \geq 1} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu^n}{n!} \exp(-\mu) \times [1 - (1-\eta)^n] \\ &= 1 - \exp(-\mu\eta). \end{aligned} \quad (4)$$

由于探测器存在暗计数, 这将引起误码. SNSPD所测量到的暗计数中包括探测器本征暗噪声和自由空间光学环境引入的背景光子. 暗计数引起探测器响应的错误“1”码概率为

$$P_{\text{fall1}} = \frac{\alpha}{R}, \quad (5)$$

式中, α 是探测器的暗计数, 单位是cps.

则探测器输出正确“0”码的概率为

$$P_{\text{cor0}} = 1 - \frac{\alpha}{R}. \quad (6)$$

为了便于分析, 本文假设经过调制的码元信息中, “1”码出现的概率和“0”码出现的概率相等, 都是50%. 则正确码元的概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{cor}} &= P_{\text{cor“1”}} + P_{\text{cor“0”}} \\ &= 50\% \times [1 - \exp(-\mu\eta)] + 50\% \times (1 - \alpha/R). \end{aligned} \quad (7)$$

误码率表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{error}} &= 1 - P_{\text{cor}} \\ &= 50\% \times \exp(-\mu\eta) + 50\% \times (\alpha/R). \end{aligned} \quad (8)$$

3 误码率模型分析和MATLAB仿真

为了从原理上探究各因素对误码率的不同影响, 先研究评价SNSPD的重要性能指标-探测效率SDE (system detector efficiency). 系统探测效率可表示为

$$\eta_{\text{SDE}} = \eta_{\text{coupling}} \times \eta_{\text{absorption}} \times \eta_{\text{registering}}, \quad (9)$$

这里, η_{coupling} 表示从光天线到器件表面的过程中由于实际环境中光的吸收、损失、散射等造成光子丢失的光耦合效率, 在该实验中把这个光耦合效率

做了简化; $\eta_{\text{absorption}}$ 表示到达器件表面的光子由于器件纳米线排列方式的改变、薄膜材料和衬底材料的不同、占空比等因素的限制造成的光子吸收的效率; $\eta_{\text{registering}}$ 表示当光子被器件吸收后产生电阻区实现光电转换产生电压脉冲信号的响应效率. 这就意味着光子入射时, 探测器可能响应, 输出为“1”的电压脉冲信号, 或者由于器件本身的限制输出为“0”.

在误码率中提到系统探测效率, 是想通过整个微观的实验过程来更好地理解误码在哪些过程中产生, 又是如何产生的. 背景光的加入、电路引入的电磁干扰、背景的热辐射也都会使器件产生暗计数从而产生误码; 另外, 光子到达器件表面却没有被吸收来成功产生电阻区实现光电转换也会产生误码; 光子被吸收了器件本身却没有响应也会产生误码. 因此, 误码率的计算包含整个光电转换过程.

在输出端, 电压脉冲信号不包含光子能量的信息, 只能得到探测光子或暗噪声的有无, 即不具备光子数分辨能力. 因此从结果看, 当有“1”输出时只知道有光子成功实现了光电转换并产生电脉冲, 但并不知道光子的个数, 此时光子数可能为一个, 也可能为多个.

对于影响误码率的四个因素, 探测器的探测效率 η 和暗计数 α , 脉冲光源的重复频率 R 和光强 μ , 由以上公式的推导过程可以看出, 它们对于误码率的影响, 从成“0”码和成“1”码上各自做了不同的贡献. 接下来讨论输出信号成“1”码和成“0”码的可能性以及各因素对误码率的影响.

将光源作为输入端, 有光时(光源入射 n 个光子, $n = 1, 2, 3, \dots$) 记为信号“1”, 它在探测器的输出端有两种可能, 正确时输出为“1”, 而由于探测器的限制造成系统无响应时输出“0”, 即为多“0”情况; 光源关闭时无光输入, 记为信号“0”, 它也有两种可能的输出, 正确时输出为“0”, 而由于噪声造成系统响应时输出“1”, 即为多“1”情况. 多“0”和多“1”的情况产生误码, 即公式中的 $e^{-\mu\eta}$ 和 α/R 项, 两种情况出现的概率各为50%.

光强 μ 和探测器的探测效率 η 是影响成“1”码的关键因素, 而它们的乘积作为指数项, 就可以在效率不足的情况下, 通过增加光强来保证一定水平的误码率指标, 因此, 在探测器性能(探测器的探测效率 η 和暗计数 α) 确定的情况下, 先研究光强 μ 对误码率的影响.

目前, 我们研制的氟化镁基 SNSPD 器件^[16,17] 探测效率达到80%, 暗计数10 cps左右. 考虑到上述的耦合损耗等, 假定系统效率 $\eta = 20\%$ (下同). 当系统效率 $\eta = 20\%$, 暗计数 $\alpha = 10$ cps, 激光脉冲重复频率 $R = 10$ MHz时, 误码率可表示为 $P(\mu) = e^{-0.2\mu}/2 + 5 \times 10^{-7}$. 图1所示为10 MHz脉冲重复频率时误码率与光强的关系, 可以看出, 随着光强从平均0.01光子/脉冲增加到1000光子/脉冲, 误码率逐渐减小, 范围从-1次方量级到-7次方量级明显下降; 但在光强达到约100光子/脉冲后, 误码率趋于平稳, 不再明显下降, 这主要是由于探测器的效率一定, 光强足够大, 这两项共同作用影响“1”码误码的概率已经足够小, 而探测器暗计数的影响对误码率的进一步降低产生制约.

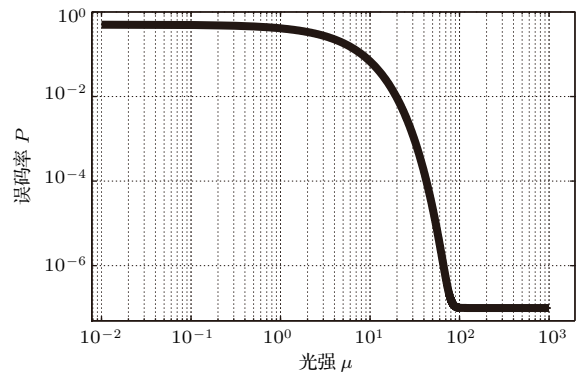


图1 10 MHz时误码率和光强的关系

Fig. 1. Bit error rate vs light intensity at pulse repetition frequency of 10 MHz.

脉冲光源的重复频率 R 和探测器的暗计数 α 共同影响成“0”码的概率. 由于光强对误码率的影响范围比较明显, 研究不同光强时脉冲重复频率对误码率的影响. 由图1 10 MHz脉冲重复频率时误码率与光强的关系曲线可以看到, 光强较弱时, 误码率偏高, 不具有实际应用价值, 因此选择光强较强时研究误码率和脉冲重复频率的关系. 图2所示光强分别为 $\mu = 1, 10, 100$ 时误码率与脉冲重复频率的关系. 可以看到, 误码率随脉冲重复频率的增加而降低, 但受到光强的制约, 下降速度明显不同. 当光强稍弱 $\mu = 1$ 时, 误码率在-1次方量级缓慢下降; 而随着光强的增加, 误码率随着脉冲重复频率的增加下降速度升高; 当光强较强 $\mu = 100$ 时, 随着脉冲重复频率从1 kHz到10 MHz的增加, 误码率从-3次方量级到-7次方量级明显下降.

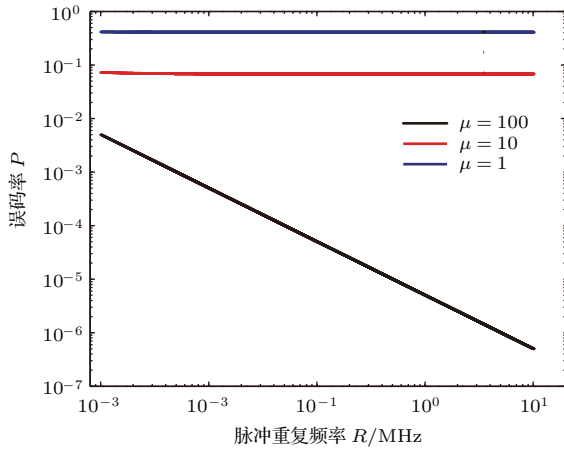


图2 (网刊彩色) 不同光强时误码率和脉冲重复频率的关系
Fig. 2. (color online) Bit error rate vs pulse repetition frequency at different light intensity.

4 实验验证

下面针对上述讨论进行实验验证. 实验中采用的SNSPD器件, 其单像元输出电脉冲幅值约100 mV, 宽度约为40 ns, 如图3所示. 光源采用波段为1550 nm, 重复频率从1 kHz至10 MHz可调的脉冲模式激光器.

误码率可定义为接收到的误码比特数与总比特数的比率, 记为

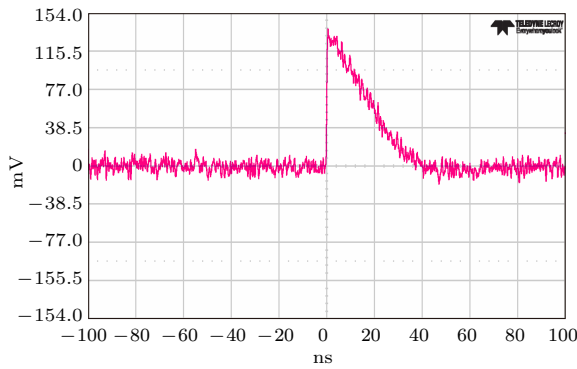


图3 探测器的输出波形

Fig. 3. A typical output pulse of SNSPD.

表1 获得不同光强的设置

Table 1. Settings for different light intensity.

| 序号 | 重复频率/MHz | 输入功率/nW | 衰减倍数/dB | 光子数/s | 光子数/pulse |
|----|----------|---------|---------|------------------------|-----------|
| 1 | 10 | 13 | 60 | 0.101436×10^6 | 0.0101436 |
| 2 | 10 | 13 | 50 | 1.01436×10^6 | 0.101436 |
| 3 | 10 | 13 | 40 | 10.1436×10^6 | 1.01436 |
| 4 | 10 | 13 | 30 | 101.436×10^6 | 10.1436 |
| 5 | 10 | 13 | 20 | 1014.36×10^6 | 101.436 |
| 6 | 10 | 13 | 10 | 10143.6×10^6 | 1014.36 |

$$QBER = \frac{R_{error}}{R_{all}}, \quad (10)$$

R_{error} 为误码的比特率, R_{all} 为总比特率 (包括正码和误码). 将 $1/R$ 作为一个最小单位, 记为

$$\tau = 1/R. \quad (11)$$

在一个单位时间里, 有脉冲输出时记为“1”, 没有脉冲输出时记为“0”.

4.1 10 MHz 时误码率和光强的关系

光源固定脉冲重复频率 $R = 10$ MHz, 则最小单位时间 $\tau = 100$ ns. 通过调节衰减器控制进入探测器的光强. 调节示波器时基为最小单位时间, 即 100 ns/格, 每屏幕可采集十格信息, 选择示波器的“边沿-计数”功能采集 10000 屏的脉冲信息, 以计算误码率.

实验过程中的条件设定如表 1 所列.

当光强较强 $\mu = 1000$, 即每脉冲的平均光子数达到 1000 时, 从输出波形中观察到每个最小单元内二次响应的现象, 如图 4(a) 所示. 这种情况一方面是由于光强太强的原因, 另一方面可能是噪声造成的响应. 此时该单元只记为响应“1”的情况, 不重复计数. 图 4(b) 所示为少“1”, 即多“0”的情况.

对获得的 10000 屏边沿脉冲数目信息进行统计, 可计算出多“0”的比率. 再将光源关闭, 采集暗计数信息. 示波器采用同样的时基设定, 获得的信息即是多“1”的情况, 可计算出多“1”的比率. 最终的误码率是多“1”和多“0”各占 50%. 图 5 所示为经过计算得到的从光强 $\mu = 0.01$ —1000 的误码率曲线, 该曲线和仿真曲线在趋势上相互符合; 但在 $\mu = 100$ 和 $\mu = 1000$ 时, 误码率实验结果的数量级高于仿真值. 其原因可能是实验过程中输入信号 (脉冲光源) 的消光比不足和光纤引入背景噪声增加了系统的暗计数^[18], 引起探测器对码元的误判.

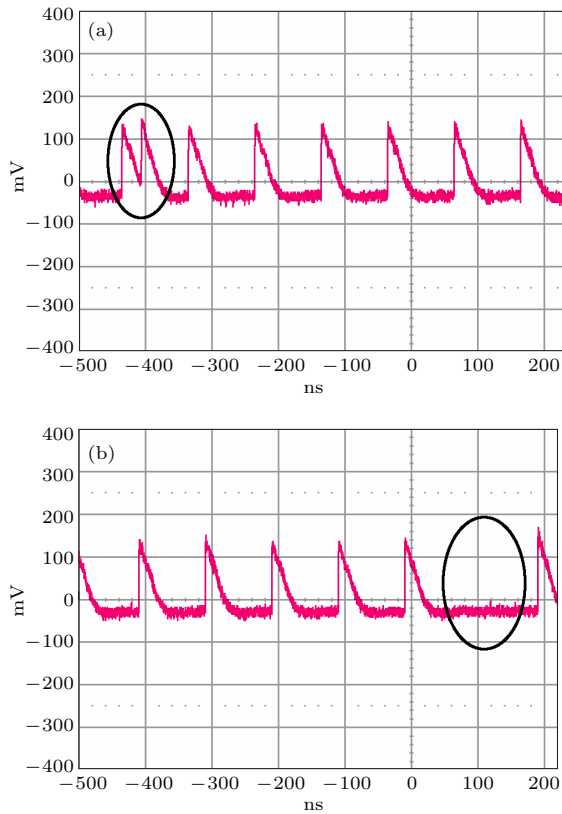


图4 探测器输出信号

Fig. 4. Output signals of SNSPD.

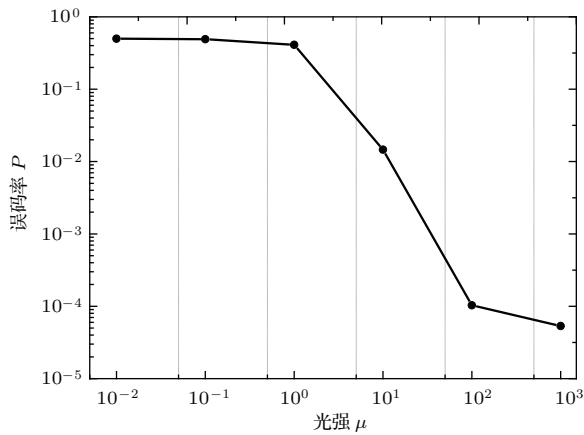


图5 10 MHz 时误码率和光强曲线的实验结果

Fig. 5. Experimental result of bit error rate with light intensity at pulse repetition frequency of 10 MHz.

4.2 不同光强时误码率和脉冲重复频率的关系

接下来研究脉冲重复频率对误码率的影响. 改变脉冲重复频率, 响应的最小单位时间有变化, 示波器采集波形的时基变化, 而随着脉冲重复频率的降低, 最小单位时间增加, 示波器时基增加, 相应的采集速度降低, 减少了记录屏数, 但实验过程和误

码率计算方法不变. 图6所示为实验结果, 与仿真结果在趋势上相互符合, 但在光强较强、脉冲重复频率偏高时, 仍存在误码率高于仿真结果的问题, 这一现象与图5实验结果符合. 其原因可能是光强较强、脉冲重复频率偏高时, 光强和探测器探测效率共同影响“1”码误码的概率足够低, 而引入额外的背景噪声会大大提高“0”码误码的概率, 使获得的实验结果大于仿真值; 同时, 脉冲激光器的消光比不足, 也会提高“1”码误码的概率, 而影响最终的实验结果.

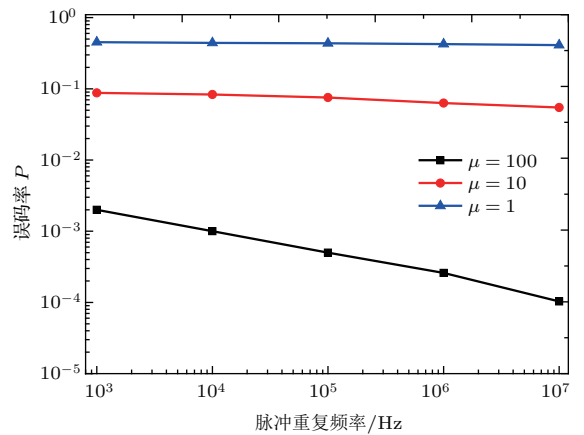


图6 (网刊彩色) 不同光强时误码率和脉冲重复频率曲线
Fig. 6. (color online) Experimental signal of bit error rate with pulse repetition frequency at different light intensity.

5 结 论

通过引入探测器探测效率和暗计数, 建立了反应系统差错性能的数学模型和误码率公式. 对引起误码率的主要因素进行了分析和讨论. 结果表明, 限制误码率的主要因素是激光脉冲重复频率和光强. 实验过程中, 改变不同光强和脉冲重复频率, 计算得到的误码率结果和仿真结果能够相互符合, 这也证明了理论模型的正确性. 与此同时, 当增加光强或者提高速度时, 误码率高于仿真结果, 其原因可能是实际通信中调制光信号的消光比和光纤引入背景噪声提高了系统的暗计数. 本文模型和实验结果为进一步开展基于SNSPD的深空激光通信模型提供了参考.

参考文献

[1] Kaushal H, Kaddoum G 2017 *IEEE Commun. Surv. Tut.* **19** 57

- [2] Hu Q L, Li Z H, Yang L, Qiao K, Zhang X J 2015 *Iaeds15: International Conference in Applied Engineering and Management* Beijing, Sep. 11–14 2015 p1015
- [3] Liu X M, Liu L R, Sun J F, Lang H T, Pan W Q, Zhao D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5149 (in Chinese) [刘锡民, 刘立人, 孙建锋, 郎海涛, 潘卫清, 赵栋 2005 物理学报 **54** 5149]
- [4] Ren M, Gu X R, Liang Y, Kong W B, Wu E, Wu G, Zeng H P 2011 *Opt. Express* **19** 13497
- [5] Zhang L B, Gu M, Jia T, Xu R Y, Wan C, Kang L, Chen J, Wu P H 2014 *IEEE Photon. J.* **6**
- [6] Marsili F, Verma V B, Stern J A, Harrington S, Lita A E, Gerrits T, Vayshenker I, Baek B, Shaw M D, Mirin R P, Nam S W 2013 *Nat. Photon.* **7** 210
- [7] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardanov A, Williams C, Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 705
- [8] Akhlaghi M K, Majedi A H 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 361
- [9] Zhang L B, Yan X C, Jia X Q, Chen J, Kang L, Wu P H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110**
- [10] Biswas A, Kovalik J M, Wright M W, Roberts W T, Cheng M K, Quirk K J, Srinivasan M, Shaw M D, Birnbaum K M 2014 *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation Xxvi* San Francisco, Feb. 2–4 2014
- [11] Policastri L, Carrico J P, Nickel C, Kam A, Lebois R, Sherman R 2015 *Spaceflight Mechanics 2015 Pts I-III* 155 2875
- [12] Murphy D V, Kinsky J E, Grein M E, Schulein R T, Willis M M, Lafon R E 2014 *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation Xxvi* San Francisco, Feb. 2–4 2014
- [13] Xue L, Li Z L, Zhang L B, Zhai D S, Li Y Q, Zhang S, Li M, Kang L, Chen J, Wu P H, Xiong Y H 2016 *Opt. Lett.* **41** 3848
- [14] Zhang L B, Zhang S, Tao X, Zhu G H, Kang L, Chen J, Wu P H 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**
- [15] Zhang S, Tao X, Feng Z J, Wu G H, Xue L, Yan X C, Zhang L B, Jia X Q, Wang Z Z, Sun J, Dong G Y, Kang L, Wu P H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 188501 (in Chinese) [张森, 陶旭, 冯志军, 吴淦华, 薛莉, 闫夏超, 张蜡宝, 贾小氢, 王治中, 孙俊, 董光焰, 康琳, 吴培亨 2016 物理学报 **65** 188501]
- [16] Zhang L B, Yan X C, Jiang C T, Zhang S, Chen Y J, Chen J, Kang L, Wu P H 2016 *IEEE Photon. Tech. L.* **28** 2522
- [17] 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 Phys. Sin.* **60** 038501 (in Chinese) [张蜡宝, 康琳, 陈健, 赵清源, 郑涛, 许伟伟, 曹春海, 金飏兵, 吴培亨 2011 物理学报 **60** 038501]
- [18] Ding J C, Li M, Tang M H, Li Y, Song Y J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3488 s

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector*

Yan Xia-Chao¹⁾ Zhu Jiang¹⁾ Zhang La-Bao^{1)†} Xing Qiang-Lin²⁾ Chen Ya-Jun¹⁾
 Zhu Hong-Quan²⁾ Li Jian-Ting²⁾ Kang Lin¹⁾ Chen Jian¹⁾ Wu Pei-Heng¹⁾

1) (Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

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

(Received 9 May 2017; revised manuscript received 5 June 2017)

Abstract

The high-speed deep space communication is one of the key technologies for deep space exploration. Laser communication system equipped with sensitivity of single photon will improve existing deep space communication speed. However, laser communication at single photon level needs to consider not only the effect of transmission environment, but also the performance of used single photon detector and the photon number distribution. As a new single photon detector, superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) outperforms the traditional semiconducting SPDs at near infrared wavelengths, and has high detection efficiency, low dark count rate, low timing jitter, high counting rate, etc. The SNSPD can be used for detecting single photons efficiently, rapidly and accurately. In this paper, we introduce the system detection efficiency and dark count rate of SNSPD based on the photoelectric detecting model without considering the effect of atmospheric turbulence, establish the mathematical model of bit error, and put forward the formula of system bit error rate. What should be emphasized is that the bit error rate is an important parameter for measuring the performance of laser communication system. Error is partly from background thermal radiation and circuit electromagnetic interference; in addition, error appears when photons reach the surface of device without being absorbed to successfully produce resistance area or photons are absorbed but there occurs no response. As a result, the calculation of bit error rate includes the whole process of photoelectric conversion. In order to analyze how to affect the size of system bit error rate, first we simulate two factors of the formula, i.e., light intensity and laser pulse repetition frequency. The results show that the light intensity has the greatest influence on error bit rate. With the light intensity increasing from 0.01 to 1000 photon/pulse, the error bit rate significantly decreases from 10^{-1} to 10^{-7} level. The influence of laser pulse repetition frequency is restricted by the light intensity, which declines with the increase of pulse repetition frequency. Then we measure the error bit rate experimentally, which validates the simulation model. However, when increasing light intensity or speed, experimental bit error rate is about 10^{-4} times higher than simulation result. The reason may be that the insufficiency of actual communication modulation extinction ratio of optical signal to the background noise through optical fiber increases the dark count rate. The above model and experimental results could be the foundation of high-speed deep space laser communication such as moon-earth and Mars-earth based on SNSPD.

Keywords: laser communication, photoelectric detection, superconducting nanowire single photon detector, bit error rate

PACS: 85.25.P6

DOI: 10.7498/aps.66.198501

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No.2017YFA0304002) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.11227904, 61471189).

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