

雪崩光电二极管探测性能的分析与仿真

范新坤^{1,2}, 张磊^{1*}, 宋延嵩¹, 江伦¹

¹长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了合理设置雪崩光电二极管(APD)探测器的偏压,在恒定温度下实现倍增因子可调,分析了 APD 探测器的工作原理及影响其探测灵敏度的因素,并在室内对 APD 探测器的探测灵敏度进行测试。实验结果表明:当通信速率为 $10\sim 2000\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,探测灵敏度可达 $-47\sim -34\text{ dBm}$;当偏压为 $55.0\sim 70.0\text{ V}$ 时, $10,100,1000\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 通信速率下的探测灵敏度分别提高了 $5.7,6.5,7.8\text{ dB}$ 。实验结果很好地验证了理论分析的正确性,这为空间激光通信系统接收性能的提高提供了技术支持。

关键词 光通信;雪崩光电二极管;探测灵敏度;偏压;信噪比

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100610

Analysis and Simulation of Detection Performance of Avalanche Photodiode

Fan Xinkun^{1,2}, Zhang Lei¹, Song Yansong¹, Jiang Lun¹

¹*Institute of Space Opto-Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;*

²*Defence Key Subject Laboratory of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In order to reasonably set the bias voltage of an avalanche photodiode (APD) detector and thus to achieve the adjustable multiplier factor at a constant temperature, we analyse the working principle of the APD detector and factors of influencing its detection sensitivity, and measure the detection sensitivity of the APD detector in laboratory. The experimental results show that the APD detection sensitivity ranges from -47 dBm to -34 dBm when the communication rate changes from $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ to $2000\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. When the bias voltage changes from 55.0 V to 70.0 V , the detection sensitivities at communication rates of $10,100,1000\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ increase by $5.7,6.5,7.8\text{ dB}$, respectively. The experimental results well validate the theoretical analysis, which provides technical support for improving the receptivity of space laser communication system.

Key words optical communications; avalanche photodiode; detection sensitivity; bias voltage; signal noise ratio

OCIS codes 060.4510; 060.2605

1 引言

雪崩光电二极管(APD)具有响应快、检测灵敏度高、增益高、噪声小、质量小等优点,广泛应用于激光通信和激光测距中^[1-2]。在空间激光通信系统中,APD 探测器常作为通信接收单元,实现链路数据的传输。典型空间激光通信系统在建立通信链路前,需要控制光端机完成信标光的捕获、瞄准和跟踪任务^[3]。为了实现远距离通信链路的建立,需要对不同速率下 APD 的探测性能进行分析,在低误码率下实现高速率通信。李

收稿日期: 2017-05-11; **收到修改稿日期:** 2017-07-06

作者简介: 范新坤(1990—),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信技术方面的研究。E-mail: fxxk0823@163.com

导师简介: 江伦(1984—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事光学系统设计、空间激光通信方面的研究。

E-mail: jlciomp@163.com

* **通信联系人.** E-mail: zhanglei004171@163.com

旭等^[4]通过分析星载环境提出利用雪崩增益控制来实现不同温度下的最佳信噪比探测,并进行了实验验证。徐伟等^[5]设计的 APD 前置放大器电路能有效抑制噪声信号,提高了探测系统的信噪比。

本文首先详细推导了探测灵敏度的计算公式,在此基础上进行仿真,并分析了通信速率和偏压对探测灵敏度的影响;最后通过室内实验在恒定温度下得到了不同通信速率和偏压下的 APD 探测灵敏度,为提高空间激光通信系统的接收性能提供了技术支持。

2 探测性能分析

2.1 基本原理

响应度 R_0 是衡量光电探测器的重要指标,直接影响探测灵敏度,可表示为

$$R_0 = \frac{\eta e \lambda}{hc}, \quad (1)$$

式中 η 为光电探测器的量子效率, e 为元电荷, λ 为入射光的波长, h 为普朗克常数, c 为光速。根据响应度的定义,可得到:

$$I_s = R_0 P, \quad (2)$$

式中 P 为入射光功率, I_s 为雪崩倍增因子 $M=1$ 时产生的光电流。

在 APD 探测器接收过程中,雪崩倍增因子 M 在信号放大中起着重要作用,影响系统的信噪比。通过控制 APD 探测器的反向偏压,选择最佳倍增因子,以提高探测器的灵敏度。对于开关键控(OOK)调制通信系统,信噪比 R_{SN} 的表达式为

$$R_{SN} = \frac{I_s^2 M^2}{2e(I_s + I_D)M^2 F(M)B + 4kTB/R_L}, \quad (3)$$

式中 I_s 为 $M=1$ 时的光电流, I_D 为 APD 探测器的暗电流, $F(M) = (1-a)(2-1/M) + aM$ 为附加噪声因子(a 为常数), B 为接收系统的带宽, k 为玻尔兹曼常数, T 为 APD 的热力学温度, R_L 为等效负载电阻。

信噪比与误码率 R_{BER} 的关系为

$$R_{BER} = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{R_{SN}}}{2\sqrt{2}} \right) \right], \quad (4)$$

式中 R_{BER} 为系统的误码率, erf 为误差函数。当误码率为 10^{-9} 时,信噪比为 144。

根据(2)、(3)式可得到探测器的灵敏度:

$$s_{\min} = \frac{1}{MR_0} \sqrt{R_{SN,\min} [2e(I_s + I_D)M^2 F(M)B + 4kTB/R_L]}, \quad (5)$$

式中 $R_{SN,\min}$ 为最小信噪比。

2.2 影响因素分析

2.2.1 通信速率

在通信过程中,如果通信光功率较小而无法被 APD 探测器探测到,就会造成通信中断。因此,探测器灵敏度的理论推导有助于分析影响探测性能的因素,从而提高系统的信噪比,降低通信误码率^[6-7]。

利用(4)式计算出不同通信误码率下的信噪比,然后根据(3)式得到光电流 I_s ,最后根据响应度的定义就可以得到最小探测光功率。将 APD 参数($R_0 = 1.01 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $M = 19$ 、 $F(M) = 2.5$ 、 $I_D = 23 \text{ nA}$ 、 $T = 290 \text{ K}$ 、 $R_L = 3.3 \text{ k}\Omega$)代入(3)式和(4)式,通过改变通信速率得到相应的探测灵敏度,仿真曲线如图 1 所示。

2.2.2 温度与偏压控制

在 APD 探测器工作过程时,偏压将影响倍增因子的大小,而温度的变化也会导致偏压发生变化,进而影响增益的稳定。为了保证 APD 增益的稳定,常见的处理方法有温度控制法和温度补偿法。为了实现恒定温度下的倍增因子可调,采用模拟电路负反馈结合半导体制冷器(TEC)实现闭环温度控制^[8]。利用温度传感器将当前温度转换为相应的电压,然后与设定的电压进行差分放大,驱动 TEC 工作,使 APD 工作在恒定温度下。

图 2 所示为 APD 在恒定温度(290 K)下的偏压与探测灵敏度仿真曲线。从图 2 可以看出,当偏压大于

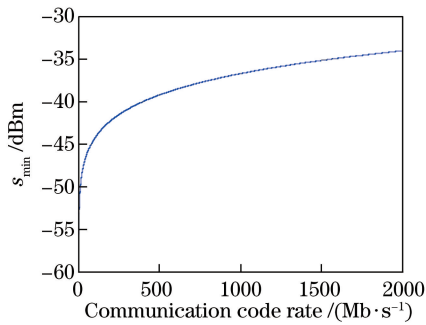


图1 通信速率与探测灵敏度的仿真曲线
Fig. 1 Simulated curve of communication rate and detection sensitivity

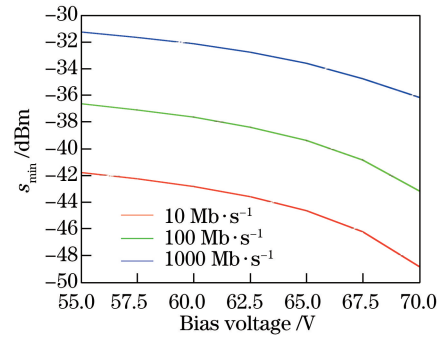


图2 不同通信速率下偏压与探测灵敏度的仿真曲线
Fig. 2 Simulated curves of bias voltage and detection sensitivity at different communication rates

65.0 V 后, 曲线变得更陡, 表明雪崩增益起到了作用。在系统工作时, 通过提高偏压可使 APD 工作于雪崩增益区域, 从而获得更高的探测灵敏度。

3 实验测试与结果分析

3.1 测试系统的组成

为了测试 APD 探测器的灵敏度, 在实验室搭建如图 3 所示的实验平台。调制器调制产生 1550 nm 波长的光, 通过衰减器控制输出光的功率。调制光经过准直器后成为近似平行的光。接收系统接收到光信号后通过误码仪测试通信系统的误码率, 通过衰减器不断地调整输出光的功率, 当误码率为 10^{-9} 时停止衰减, 此时的光功率就是 APD 探测器在当前通信速率下的探测灵敏度。然后改变通信速率, 测试不同通信速率下 APD 的接收灵敏度。在上述实验步骤不变的情况下, 改变 APD 的偏压值, 分别测试不同通信速率下偏压与探测灵敏度的关系。

实验中探测器选用美国 Voxel 公司的 VFP1-JAZA 型 APD 探测器, 其靶面直径为 $75 \mu\text{m}$, 在波长为 1550 nm 处的光谱响应度为 $1.01 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。探测器的反向偏压由 ADL5317 模块提供, 控制输出电压为 72 V, 此时探测器倍增因子 M 可达到 20。APD 接收到的光信号十分微弱, 输出响应光电流较小, 不利于后续电路处理。为了实现光电流的放大, 互阻放大器连接在 APD 的阳极, 设置跨阻增益为 $3.3 \text{ k}\Omega$ ^[9]。光电流经互阻放大器放大后的电压信号进入到时钟与数据恢复电路 ADN2817 中, 实现时钟的恢复和数据的重新采样。将温度敏感二极管置于 TEC 的冷端, 通过温度的变化输出相应的电压, 通过运算放大器实现温度的检测。通过比较设定温度与实测温度的误差实现温度的闭环控制。

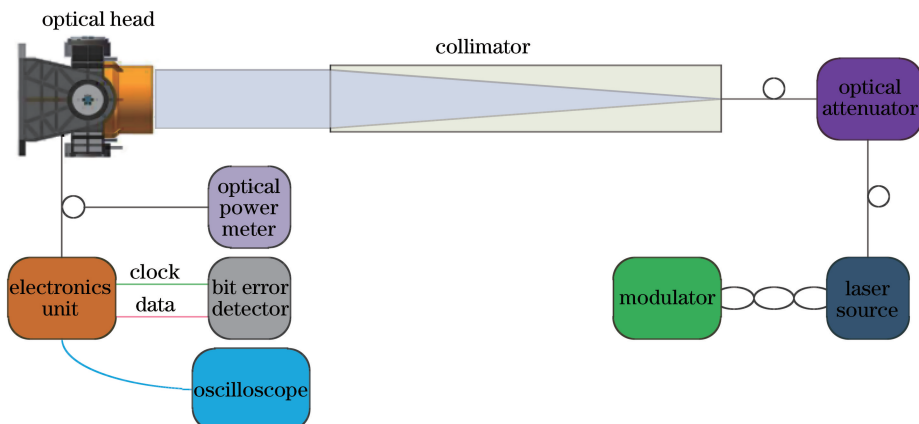


图3 测试系统示意图
Fig. 3 Schematic of testing system

3.2 测试结果分析

实验在室内进行,忽略大气信道和背景光的影响,分别在不同通信速率和偏压下对 APD 的探测灵敏度进行测试。根据 3.1 节中的测试步骤,在 72 V 偏压下改变通信速率得到了相应的探测灵敏度曲线,如图 4 所示。

比较图 1 和图 4 可以发现,实测与仿真得到的灵敏度相差 1~2 dB。进一步分析后发现,光纤耦合损耗和温度升高是造成这一结果的原因。因此,需要提高光纤的耦合效率和温度控制精度来解决该问题。

图 5 所示为在不同偏压下得到的通信速率为 10,100,1000 Mb·s⁻¹时的探测灵敏度曲线。从图 5 可以看出,随着偏压由 55.0 V 升高到 70.0 V,上述 3 条曲线的探测灵敏度分别增加了 5.7,6.5,7.8 dB。与图 2 的仿真曲线相似,当偏压超过 65.0 V 后,雪崩效应使曲线变得更陡了,从而验证了偏压对提高探测灵敏度的显著作用^[10]。

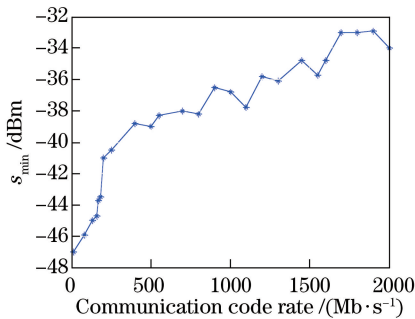


图 4 通信速率与探测灵敏度实测曲线

Fig. 4 Measured curve of communication rate and detection sensitivity

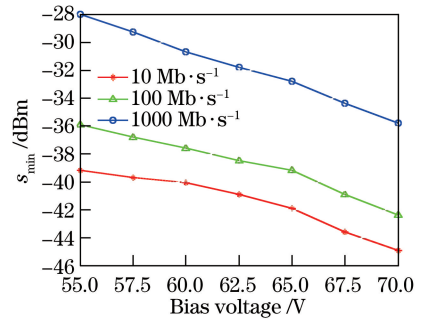


图 5 不同通信速率下偏压与探测灵敏度的实测曲线

Fig. 5 Measured curves of bias voltage and detection sensitivity at different communication rates

4 结 论

根据 APD 光电转换理论的原理建立了探测灵敏度模型,通过仿真分析了通信速率和偏压对探测灵敏度的影响。设计了实验方案并进行了实验验证,结果表明:当通信速率为 10~2000 Mb·s⁻¹时,探测灵敏度为 -47~-34 dBm;当偏压在 55.0~70.0 V 范围内变化时,10,100,1000 Mb·s⁻¹通信速率下的探测灵敏度分别提高了 5.7,6.5,7.8 dB。虽然没有进行野外通信性能试验,但初步验证了该方案对提高 APD 探测灵敏度的可行性。

参 考 文 献

- [1] Song Yansong, Chang Shuai, Tong Shoufeng, *et al.* Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信试验[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206004.
- [2] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- [3] Fan Xinkun, Zhang Lei, Tong Shoufeng, *et al.* Influence of sky background light on space laser communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070601.
范新坤, 张磊, 佟首峰, 等. 天空背景光对空间激光通信系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070601.
- [4] Li Xu, Peng Huan, Wang Chunhui. APD optical gain control investigation for spaceborne laser range finder [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0520001.
李旭, 彭欢, 王春辉. 星载激光测距仪 APD 最佳雪崩增益控制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5):

0520001.

- [5] Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua, *et al.* Charge sensitive preamplifier design for APD detection system of laser pulse [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(1): 27-30.
徐伟, 陈钱, 顾国华, 等. 用于 APD 激光探测的电荷灵敏前置放大器设计 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(1): 27-30.
- [6] Yu Lintao, Song Lu, Han Cheng, *et al.* Analysis and simulation of link power and communication performance in space ground optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 543-547.
于林韬, 宋路, 韩成, 等. 空地激光通信链路功率与通信性能分析与仿真 [J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 543-547.
- [7] Lu Qiang, Zeng Fei, Zhang Yuliang, *et al.* Influence of sky background radiation on bit error rate of atmospheric laser communication system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070103.
鲁强, 曾飞, 张玉良, 等. 天空背景辐射对大气激光通信系统误码率的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070103.
- [8] Guo Qian, Lan Tian, Zhu Qi, *et al.* Design and implementation of indoor visible light communication avalanche photodiode detecting circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 731-735.
郭倩, 蓝天, 朱祺, 等. 室内可见光通信 APD 探测电路的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 731-735.
- [9] Fan Xinkun, Zhang Lei, Song Yansong, *et al.* Simultaneous detection technology of tracking and communication base on the four-quadrant detector [J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(9): 0906009.
范新坤, 张磊, 宋延嵩, 等. 四象限探测器的跟踪与通信复合探测技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0906009.
- [10] Zhang Liang, Li Simin, Zhang Wentao, *et al.* Design of automatic APD bias voltage compensation circuit based on ADL5317 and LM35 [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(12): 52-54.
张良, 李思敏, 张文涛, 等. 基于 ADL5317 和 LM35 的 APD 偏压温度补偿电路设计 [J]. *光通信技术*, 2014, 38(12): 52-54.