

## 基于单光子线性 APD 的信息提取算法研究

陶洪宇<sup>1,2</sup>, 贾青松<sup>1,2</sup>, 逢浩君<sup>1,2</sup>, 吴建东<sup>1,2</sup>

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

**摘要:**针对新型单光子线性 APD 器件获得信息维度多、灵敏度高的特点,提出了一种基于单光子线性 APD 的微弱回波信号距离信息提取算法。首先利用微弱信号的泊松分布特性对回波信号进行建模,随后对每纳秒内的回波光子数进行统计,利用与脉宽等宽的距离窗进行滑动求和,将最大值位置作为信号脉冲接收时刻,进而反算距离信息。设计了跟踪前的目标搜索策略和稳定跟踪后的距离门匹配算法,有效降低了背景光干扰和计算资源消耗,在回波光子数分别为 200、10、5 个时分别获得了 100%、99.93%、96.58% 的计算正确率。对单光子量级信号设计了脉冲积累算法,单个光子信号回波的计算正确率为 99.5%。同时对静止目标通过算法迭代实现了信噪比为 0 dB 甚至负 dB 的信息提取,对 0.03 个光子信号回波探测的计算正确率为 96.1%。仿真结果表明该算法可以综合应用单光子线性 APD 的强度信息以及单光子灵敏度,实现了在极限灵敏域下的距离信息提取。

**关键词:**激光雷达探测系统;单光子线性 APD;弱信号探测;信息提取算法;蒙特卡洛实验

**中图分类号:**TN958.98;TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.008

## Research on information extraction algorithm based on single photon linear APD

TAO Hong-yu<sup>1,2</sup>, JIA Qing-song<sup>1,2</sup>, PANG Hao-jun<sup>1,2</sup>, WU Jian-dong<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Infrared Detection Technology Research and Development Center, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of multi-dimension and high sensitivity obtained by new single-photon linear APD devices, an algorithm based on single-photon linear APD is proposed to extract the distance information of weak echo signal. Firstly, the echo signal is modeled using the Poisson distribution property of the weak signal, followed by counting the number of echo photons per nanosecond, performing a sliding-window summation using a distance window of equal width to the pulse width. The position of the maximum value is used as the moment of reception of the signal pulse, which in turn back-calculates the distance information. In addition, the target search strategy before tracking and the range gate matching algorithm after stable tracking are designed to effectively reduce the background light interference and computational resource consumption. And the calculation accuracy rates of 100%, 99.93%, and 96.58% are obtained when the number of echo photons is 200, 10 and 5, respectively. The pulse accumulation algorithm is designed for the single photon signal, and the computational correctness of a single photon signal echo is 99.5%. Besides, the information extraction with a signal-to-noise ratio of 0 dB or even negative dB is realized through algorithm iteration for stationary targets, and the calculation accuracy of 0.03 photon signal echo detection is 96.1%. The simulation results show that the proposed algorithm can comprehensively apply the intensity information of single-photon linear APD and single-photon sensitivity to realize the distance information extraction under the limit sensitivity domain.

**Keywords:** LiDAR detection system; single photon linear APD; weak signal detection; information extraction algorithm; Monte Carlo experiment

## 1 引言

近年来,激光雷达探测技术蓬勃发展,在精准制导系统中,激光雷达系统可以探测到目标的反射能量、距离、速度等信息,在自动驾驶、航空航天、国防等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。激光雷达探测系统借助雪崩光电二极管(APD)进行光电转换,将回波光信号转化为电信号。对于弱信号,目前采用的多为光子计数技术。光子计数技术能将光子信号充分放大以克服电子器件的读出噪声,利用弱光照射下探测器输出电信号自然离散的特点,记录一定时间内探测器输出的光子数,根据光子计数值推算出被测目标的信息<sup>[6-7]</sup>。现今 APD 器件有盖革模式(Geiger Mode, GM)和线性模式(Linear Mode, LM)两种工作方式。目前 APD 光子计数技术多用盖革模式 APD 器件,盖革模式 APD 器件具备单光子级的高灵敏度,高响应速度,可以获得高时间精度。但盖革 APD 存在探测器死时间、探测效率低、光串音大、空间分辨率不高等问题,很难优化折中高探测率和低虚警率的矛盾。而传统的线性模式 APD 由于底噪较高,对回波能量要求较高,很难实现光子计数级能量的精确探测<sup>[8-17]</sup>。近年来,美国雷神公司和 DRS 公司、法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司研究出了近无噪声的高增益 TeCdHg APD 器件,该器件可工作于线性单光子模式,没有死时间和光串音限制,不需要淬灭电路,具有高灵敏度和高动态范围<sup>[18]</sup>。这种新型的 APD 器件体制,对激光雷达探测系统的设计有了新的要求,同时由于该器件可以测得盖革器件无法探测的强度信息,对单光子线性 APD 的信息提取算法也有了优化设计的必要。

本文仿真研究了以线性单光子器件作为探测方式的微弱回波信号信息提取算法,建立了激光雷达探测系统模型,信息提取算法模型,并分析了不同回波光光子数下的探测虚警率。

## 2 系统模型

激光雷达探测系统模型如图 1 所示。激光器发射高频脉冲信号经发射光学系统准直后发射至目标,目标反射回的信号由接收光学系统接收,经过窄带滤光片滤除背景光噪声干扰后达到线性单光子 APD 上触发雪崩,APD 产生光电流输出至跨阻放大电路(TIA),跨阻放大电路的输出经过多级放大至高频 AD 采样电路,采样完成后输入算法模块运行

目标距离探测算法。其中激光器发射脉宽 10 ns,重频 10 kHz 的脉冲序列,在接收端采用距离门跟踪算法,距离门宽度 1  $\mu$ s。

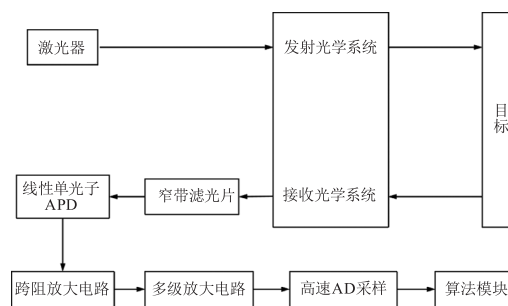


图 1 激光雷达探测模型

Fig. 1 LiDAR detection model

当目标距离较远时,回波能量较弱。由于光的最小能量单位是光子,在百光子量级的情况下,用回波平均功率来计算 APD 响应电流就不太准确了,因此需要建立光子的离散化模型。一般线性 APD 对单个光子信号的响应时间为 700 ps ~ 2 ns,在本文中取 1 ns,将回波能量从连续到离散的分界点定义为每纳秒 1000 个光子,当回波能量小于平均每纳秒 1000 个光子时,我们认为光子是在信号脉宽内呈泊松分布的,其期望  $\lambda$  为平均每纳秒的光子数。

探测器上单个光子在 1 ns 内产生的平均电流为:

$$I_s = M \cdot \frac{P \cdot e}{h\nu} = M \cdot \frac{N_s \cdot e}{\Delta t} \quad (1)$$

其中,  $M$  为 APD 增益;  $e$  为电子电量;  $h$  为普朗克常量;  $\nu$  为光子频率;  $P$  为引发雪崩效应的平均功率,在计算单光子响应电流时用单光子能量与线性 APD 对单个光子信号的响应时间( $\Delta t$ )的比值作为进行了等效;  $N_s$  为该纳秒内的光子个数;  $\Delta t$  为 1 ns。其中  $M$  取 100,则单光子响应的平均电流为 16 nA。APD 的输出模型如图 2 所示,为信号出现在 10 ~ 20 ns 位置,平均每纳秒 1 个光子的一种 APD 输出波形。

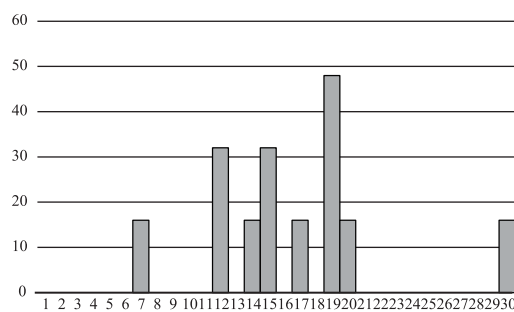


图 2 线性单光子 APD 输出示意图

Fig. 2 Schematic of linear single-photon APD output

为实现以 1 ns 作为时间片宽度的回波能量响应,放大电路的带宽也应达到 1 GHz 以上,同时满足信噪比要求。根据中北大学杜以恒团队以及复旦大学王方林团队的研究,1 GHz 多级放大电路输出信噪比取经验值  $2.5^{[19-20]}$ 。

### 3 算法介绍

针对线性单光子 APD 的输出特性,设计如下算法:

首先对回波信号进行搜索,在目标未被跟踪之前,APD 器件会对每个时刻的回波信号进行检测,并利用高速 AD 采样电路对 APD 的响应结果进行采样,得到每个 ns 内的光子个数。设定 10 ns 的距离框,对 AD 采样后的回波信号进行以 1 ns 为步进的滑窗处理,计算每个框内的光子总数以及光子数较大位置的中央时刻,若连续 3 次回波信息对应的距离误差小于等于 2 m,则认为目标搜索成功,根据前一次回波信息建立距离门跟踪算法,并根据前次回波能量设定距离门内的检测阈值,降低虚警率。

目标搜索成功后,在跟踪距离门内以 1 ns 为步进进行 10 ns 宽度的滑窗处理,在滑完整个距离门后,对光子数的最大值与检测阈值比较,若信号光子数大于检测阈值则输出信号位置,若信号光子数小于检测阈值,则认为距离门内没有探测到信号,做距离预推处理,在下一个距离门内继续检测信号,如三次距离门内均未检测到信号或连续 3 次检测到信号的探测误差均大于 3 m,则认为目标丢失,启动信号重新检测流程。输出算法的流程图如图 3 所示,滑窗算法示意图如图 4 所示。

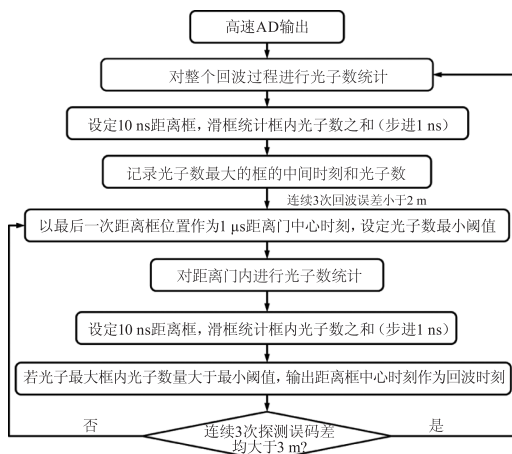


图 3 滑窗算法流程图

Fig. 3 Sliding window algorithm flowchart

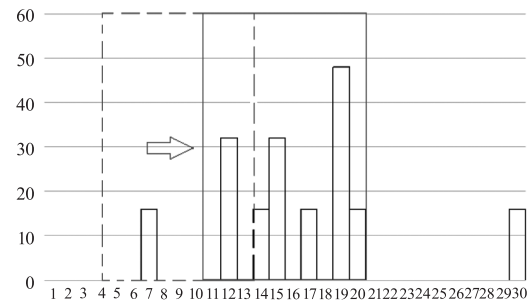
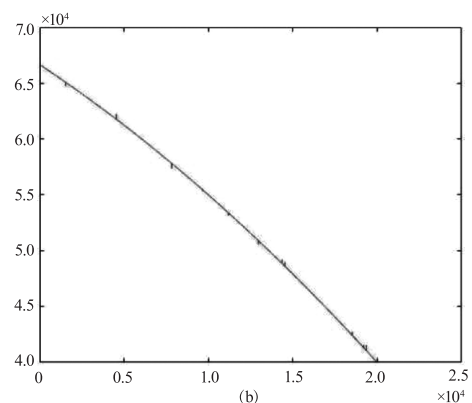
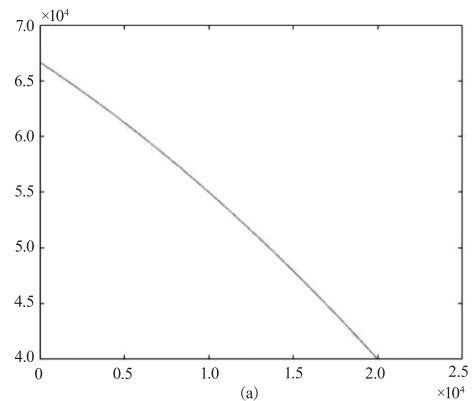


图 4 滑窗算法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sliding window algorithm

### 4 算法仿真

回波信号光子数越多,距离信息提取正确率越高,为研究距离信息提取对最小回波光子数的需求,展开对不同信号回波光子数对距离信息提取准确度的算法研究,本文距离信息提取过程中采用的算法主要包括滑窗算法和脉冲积累,首先仿真滑窗算法的距离提取信息结果,基于中国科学院大学李铭博士的计算结果,在  $1 \mu\text{s}$  距离门内的背景杂散光噪声为 4 个<sup>[8]</sup>,分别对回波信号光子数为 200 个、10 个、5 个、2 个(脉宽为 10 ns,计算可得信号的泊松分布的  $\lambda$  值分别为 20、1、0.5、0.1)进行滑窗算法的距离信息提取验证,仿真结果如图 5 所示。仿真中目标做匀加速运动,初始距离 10 km,相对初速度为 1500 m/s,加速度为  $500 \text{ m/s}^2$ 。



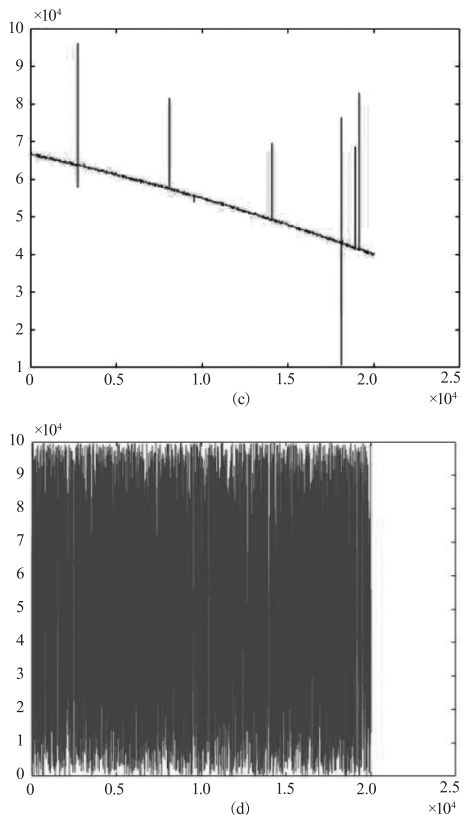


图5 不同回波光子数下的滑窗算法结果，依次对应 200、10、5、2 个光子回波

Fig.5 The results of the sliding window algorithm under different echo photon numbers correspond to 200,10,5, and 2 photon echoes in turn

若定义距离误差的可接受范围为  $\pm 2$  m,由仿真结果可知,200 个回波光子信号滑窗距离解算的正确率为 100 %。10 个光子回波信号滑窗距离解算的正确率为 99.93 %;5 个光子回波信号滑窗距离解算的正确率为 96.58 %;2 个光子回波信号滑窗距离解算的正确率为 41.17 %。由仿真结果可见,该算法在回波信号较强的情况下,可以较好的完成距离信息提取,得到较为准确的目标位置信息。当回波能量接近于单光子时,效果较差。

对于较低能量回波信号,对上述滑窗算法进行改进,增加多回波累计算法。以回波 1 个光子为例,算法如下:

确定回波累计个数,累计 10 个回波提取一次距离信息;

将 10 个回波位置内的所有光子出现时刻进行记录;

将所有的光子出现时刻在时间轴上铺开,由于信号总是集中在回波时刻附近而噪声是随机分布

的,此时对 10 次回波信号进行积累,可以得到一个信号较为集中的探测波形;

对新的波形进行滑窗算法,此时应根据目标速度拓宽滑窗宽度,确保滑窗宽度覆盖因目标位置变化在时间轴上造成的回波信号扩散;

根据滑窗最大值位置对目标位置进行确定。

对 1 个回波光子的 10 次仿真结果如图 6 所示。

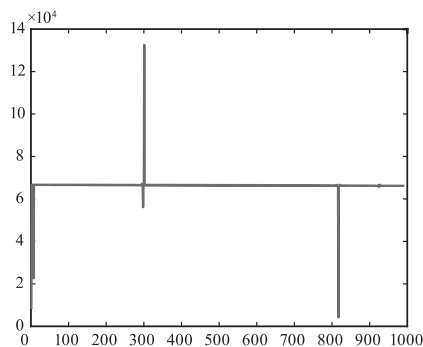


图6 1 个光子回波积累 10 次滑窗算法结果  
Fig.6 1 photon echo accumulates the results of 10 window sliding algorithms

回波信号为 1 个光子时 10 次回波累计正确探测的概率为 99.5 %,但由于滑窗宽度要随速度大小变化,因此若需要较长时间探测,则需要添加滑窗宽度自适应算法。

若目标与探测器相对静止,则距离门宽度不变,以上算法可以进行迭代,实现信噪比 0 dB 甚至负 dB 的信息提取。

图 7 为回波信号 0.03 个时的仿真结果,首先为保证信噪比,需要一定积累次数,根据上文单次滑窗所需信噪比,第一次滑窗累积次数定为 200 次,得到探测正确率较低但正确分布较为集中的结果,再将第一次滑窗结果累积 20 次,提取出集中的正确分布,算法设定目标信号在 505 ns 位置处出现,仿真结果可得探测正确率为 96.1 %。

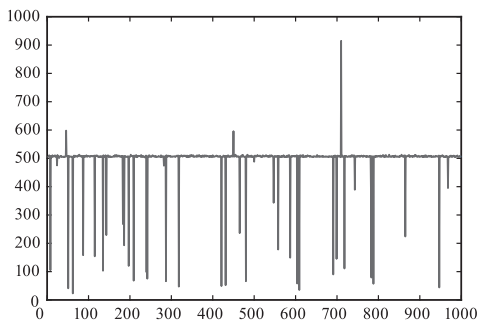


图7 多次迭代滑窗算法仿真结果  
Fig.7 Simulate the simulation results of the window sliding algorithm many times

## 5 结 论

本文研究了极限背景限下的目标回波信息提取算法,分析了不同回波信号光子数滑窗算法处理的效果,并提出在滑窗算法基础上利用脉冲积累可有效提升目标检测正确率,当目标静止不动时,可实现信噪比负 dB 的回波信息提取。

## 参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. LiDAR technology (Volume I) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)  
戴永江. 激光雷达技术(上册)[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] Lai Xudong. Basic principles and applications of airborne lidar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)  
赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [3] Hu Chunsheng. Research on pulsed semiconductor laser high-speed three-dimensional imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)  
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [4] Zhou Yongjun, Qiang Li, Li Yuanxiang. Status and development trends of foreign space-borne high-resolution imaging remote sensing systems[J]. Flight Control & Detection, 2021, (5): 1~8. (in Chinese)  
周拥军, 羌丽, 李元祥. 国外高分辨率对地成像观测系统现状与发展趋势[J]. 飞控与探测, 2021, (5): 1~8.
- [5] Yang Junyan, Gong Faquan, Liu Rui, et al. Application and progress of mid-infrared laser in optoelectronic countermeasure field [J]. Flight Control & Detection, 2020, (6): 34~43. (in Chinese)  
杨俊彦, 公发全, 刘锐, 等. 中红外激光在光电对抗领域的应用及进展[J]. 飞控与探测, 2020, (6): 34~43.
- [6] Zheng Yongchao, Zhao Mingjun, Zhang Wenping, et al. Trend of laser radar technology development [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (Z3): 240~246. (in Chinese)  
郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(Z3): 240~246.
- [7] W Abdalati, H J Zwally, R Bindschadler, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 735~751.
- [8] Li Ming. Research on photon counting lidar technology based on fiber optics [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)  
李铭. 基于光纤光学的光子计数激光雷达技术研究[D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [9] Du Xiaoping, Zhao Jiguang, Zeng Zhaoyang, et al. Frequency modulation continuous wave laser detection technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)  
杜小平, 赵继广, 曾朝阳, 等. 调频连续波激光探测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
- [10] Sun Xiaoquan, Lv Yueguang. Drumming countermeasures principles and techniques [M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 2000. (in Chinese)  
孙晓泉, 吕跃广. 击鼓对抗原理与技术[M]. 北京:解放军出版社, 2000.
- [11] Ma Chao. Monte carlo simulation study of carrier modulated lidar [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)  
马超. 载波调制激光雷达的蒙特卡罗仿真研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- [12] Xu Fei. Study on the scattering characteristics of atmospheric particles based on the near-infrared band [D]. Nanjing: Nanjing institute of Meteorology, 2004. (in Chinese)  
徐飞. 基于近红外波段的大气粒子散射特性研究[D]. 南京:南京气象学院, 2004.
- [13] Wang Peiyao. Design of multi-channel lidar readout circuit based on linear mode APD [D]. Tianjin: School of Microelectronics, Tianjin University, 2019. (in Chinese)  
王佩瑶. 基于线性模式 APD 的多通道激光雷达读出电路设计[D]. 天津:天津大学微电子学院, 2019.
- [14] Brunt K M, Neumann T A, Walsh K M, et al. Determination of local slope on the greenland Ice sheet using a multibeam photon-counting lidar in preparation for the ICESat-2 mission [J]. Geoscience & Remote Sensing Letters IEEE, 2014, 11(5): 935~939.
- [15] Herzfeld U C, McDonald B W, Wallin B F, et al. 2013. Algorithm for detection of ground and canopy cover in micropulse photon-counting lidar altimeter data in preparation for the ICESat-2 mission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(4): 2109~2125.
- [16] Hu Yilin, Liu Ming, Wang Chenggang, et al. Research and

- application progress of HgCdTe avalanche photodiodes in recent years[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 314 - 320. (in Chinese)
- 胡易林,刘铭,王成刚,等. 碲镉汞雪崩光电二极管近年研究及应用进展[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 314 - 320.
- [17] Zeng Huafeng, Wang Shuai, Kang Lihua, et al. Development and status of pulsed airborne laser 3D imaging radar[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(7): 771 - 780. (in Chinese)
- 曾华锋,王帅,康丽华,等. 脉冲式机载激光三维成像雷达发展与现状[J]. *激光与红外*, 2020, 50(7): 771 - 780.
- [18] Guo Huijun, Chen Lu, Yang Liao, et al. Chromium tellurium mercury photon counting linear avalanche detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20230036. (in Chinese)
- 郭慧君,陈路,杨辽,等. 碲镉汞光子计数型线性雪崩探测器(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 20230036.
- [19] Du Yiheng, He Changde, Zhang Wendong. A High gain low noise transimpedance amplifier for CMUT[J]. *Microelectronics*, 2019, 49(4): 457 - 461. (in Chinese)
- 杜以恒,何常德,张文栋. 一种应用于CMUT的高增益低噪声跨阻放大器[J]. *微电子学*, 2019, 49(4): 457 - 461.
- [20] Wang Fanglin, Wang Tao, Zhu Zhen, et al. A trans-impedance amplifier in adaptive light transmitter system [J]. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2004, 43(1): 34 - 39, 44. (in Chinese)
- 王方林,王涛,朱臻,等. 光发射功率自适应控制系统中CMOS低噪声跨阻放大器设计[J]. *复旦学报:自然科学版*, 2004, 43(1): 34 - 39, 44.