

引用本文:孙明伟,赵文嵩,姜子健,等.一种改进的GM-APD阵列BER模型及其验证[J].光通信技术,2025,49(5):40-44.

一种改进的GM-APD阵列BER模型及其验证

孙明伟¹,赵文嵩^{1*},姜子健¹,高嵩¹,董鑫浓¹,刘旭¹,蔡官行²

(1.中国人民解放军31401部队,沈阳;2.中国人民解放军32091部队,北京)

摘要:为提高基于盖革模式雪崩光电二极管(GM-APD)阵列的无线光通信系统误码性能分析的准确性,提出一种融合计数率约束与多载流子单计数机制的改进型误码率(BER)模型,并基于二项分布推导出BER表达式。仿真与实验数据对比验证结果表明:改进的BER模型在较高背景光条件下显著优于传统泊松模型,更贴近实际系统表现;当阵列规模大于20、背景噪声低于信号功率时,系统可在较低复杂度下实现 10^{-3} 量级BER,结合纠错编码可提升接收灵敏度5~8 dB。

关键词:盖革模式雪崩光电二极管探测器;光子计数;无线光通信;误码率

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0040-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.007

Improved BER model for GM-APD arrays and its validation

SUN Mingwei¹, ZHAO Wensong^{1*}, JIANG Zijian¹, GAO Song¹, DONG Xinnong¹, LIU Xu¹, CAI Guanhang²

(1. Unit 31401 of PLA, Shenyang, China; 2. Unit 32091 of PLA, Beijing, China)

Abstract: To improve the accuracy of bit error performance analysis in wireless optical communication systems based on Geiger-mode avalanche photodiode (GM-APD) arrays, an improved bit error rate (BER) model integrating count rate constraints and multi-carrier single-count mechanisms is proposed. The BER expression is derived based on the binomial distribution. Simulation and experimental validation results demonstrate that the improved BER model significantly outperforms the conventional Poisson model under high background light conditions and aligns more closely with actual system behavior. When the array size exceeds 20 and background noise is lower than the signal power, the system achieves a BER on the order of 10^{-3} with low complexity. Combined with error-correcting codes, receiver sensitivity can be enhanced by 5~8 dB.

Key words: Geiger-mode avalanche photodiode detector, photon counting, wireless optical communication, bit error rate

0 引言

在无线光通信系统中,拓展通信距离面临核心挑战:传统光电探测器在远距离弱光条件下存在灵敏度不足、噪声影响明显等固有局限。近年来,单光子探测器——特别是盖革模式雪崩光电二极管(GM-APD)在探测灵敏度方面取得显著进展^[1],其阵列化集成进一步提升了探测效率与信噪比^[2]。得益于单光子级超高灵敏度,GM-APD阵列已在深空光通信^[3-6]、量子密钥分发^[7]、水下光通信^[8]及自由空间光通信^[9]等多个领

域获得广泛应用。

在光子计数系统的建模与性能分析方面,已有诸多研究奠定了重要基础。2012年,HISKETT P A等人^[10]通过水下光子计数通信实验证实,增加信号重传次数有效降低了系统误码率(BER)。2014年,CHITNIS D等人^[11]基于入射光子的泊松分布假设,建立了GM-APD阵列的光子探测模型,指出BER受平均信号光子数、平均背景光子数及阵列规模共同影响。

然而,现有研究大多基于理想的泊松分布假设构建BER模型,未能充分反映实际GM-APD阵列系统中的非理想特性。具体而言,实际系统存在两方面显著偏差:一是计数率受限问题,即受限于符号周期内的总门数,实际计数率有限,无法满足理想泊松模型所要求的高计数率条件;二是多载流子单计数效应,即在一个门宽时间内多个光子事件仅触发一次雪崩计

收稿日期:2025-06-10。

作者简介:孙明伟(1985—),男,吉林白山人,博士,工程师,主要研究方向为通信技术应用。

***通信作者:**赵文嵩(1987—),男,本科,助理工程师,主要研究企业级计算机网络的基础运维和优化。



数,导致实际输出统计特性明显偏离理想泊松分布。因此,构建更精确的BER模型必须同时考虑计数率约束与多载流子单计数机制的影响。

针对上述问题,本文提出一种改进的GM-APD阵列BER模型(下文简称改进的BER模型),融合计数率约束与多载流子单计数机制,并对其进行验证。

1 GM-APD工作原理与改进的BER模型建立

1.1 GM-APD工作原理

由于暗计数率(DCR)低且死时间短,门控模式下的GM-APD是光子计数通信的理想选择。在该模式下,GM-APD以周期性方式工作,仅在设定的工作窗口(门控时间)内探测光子。其完整的探测过程包括3个阶段:

1)工作阶段:将反向偏置电压提升至击穿电压以上(此时GM-APD处于工作状态),在工作窗口内可识别由单光子触发的雪崩;

2)雪崩触发阶段:当发生雪崩事件时,生成记录脉冲,表明当前门控时段内至少有一个光子到达;

3)淬灭与重置阶段:通过附加电路淬灭雪崩,并在延迟时间(死时间)后重新恢复工作^[12-13]。任何在死时间内到达的光子均无法被探测。

基于上述特性,光子计数过程将连续信号转换为离散的二值计数脉冲序列,每个脉冲代表门控时间内发生的雪崩事件。受死时间限制,APD仅能捕获部分信号信息。为解调比特信息,需已知信号脉冲波形的先验特征。本文假设接收信号为理想方波,可通过统计比特时间内的计数脉冲数量来获取比特信息。

在无线光通信中还需考虑背景辐射噪声。由于APD无法区分计数来源(信号光子或背景噪声),可通过在比特时间内开启多个门控窗口,并将总计数与设定阈值进行比较,从而实现比特判决。理论上,比特时间内开启的门控窗口越多,BER越低。然而,受GM-APD重复频率的限制,增加门控窗口会降低通信速率。为在维持通信速率的前提下增加有效门控数量,可采用GM-APD阵列进行光子探测。

1.2 改进的BER建模

1.2.1 GM-APD的触发概率

由于弱光光子的数量服从泊松分布,因此 k 个光子到达平均光子数区间的概率为 $P(k)^{[14]}$ 。

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (1)$$

其中, λ 为每个门每个APD的平均载流子数量。

假设APD的量子效率为 η ,每个门每个APD的平均信号光子数为 λ_s 、平均背景光子数为 λ_b 、平均暗载流子数为 λ_d ,这些值在门宽上都是统一的。因此,每个门每个APD的平均载流子数量为

$$\lambda = \eta\lambda_s + \eta\lambda_b + \lambda_d \quad (2)$$

在给定时间窗口内,光阴极发射的光电子数量服从泊松分布^[15],APD产生的暗计数事件数量同样服从泊松分布^[16]。当GM-APD在黑暗中运行时,在门中输出计数的概率称为 P_d 。本文假设一个门中至少产生了一个载流子,雪崩过程将是自我维持的^[17]。因此,每个门的平均暗载流子数可以通过以下方式计算。

$$\lambda_d = -\ln(1 - P_d) \quad (3)$$

由于产生的光电子和暗载流子的过程是独立的^[18],因此在栅极中不发生雪崩的概率(栅极状态为“0”)为

$$P_0 = \exp(-\lambda) \quad (4)$$

相反,门中发生雪崩的概率(门的状态为“1”)为

$$P_1 = 1 - \exp(-\lambda) \quad (5)$$

1.2.2 改进的BER模型

在GM-APD检测“0”比特时,存在背景光子和暗载流子的影响。根据式(4)和式(5),一个门在“0”比特期间处于状态“0”或“1”的概率分别为

$$P_{00} = \exp(-\eta\lambda_b - \lambda_d) \quad (6)$$

$$P_{01} = 1 - \exp(-\eta\lambda_b - \lambda_d) \quad (7)$$

类似地,在“1”比特期间,还存在信号光子的影响,因此一个门处于状态“0”或“1”的概率分别为

$$P_{10} = \exp(-\eta\lambda_s - \eta\lambda_b - \lambda_d) \quad (8)$$

$$P_{11} = 1 - \exp(-\eta\lambda_s - \eta\lambda_b - \lambda_d) \quad (9)$$

设 n 为单个GM-APD在一个符号周期内的门控次数,即其可进行 n 次独立的探测尝试;阵列中GM-APD的数量(阵列规模)为 m 。因此,GM-APD阵列在一个符号时间内的总门控数为 nm ,这也是该符号周期内所能进行的最大探测尝试次数。假设每个门控事件相互独立,则符号时间内的总计数 n' 可视为伯努利试验的结果^[19]。基于二项分布公式,“0”比特条件下 n' 的概率质量函数(PMF)为

$$P_0(n') = C_{nm}^{n'} P_{01}^{n'} P_{00}^{(nm-n')} \quad (10)$$

类似地,“1”比特条件下 n' 的PMF为

$$P_1(n') = C_{nm}^{n'} P_{11}^{n'} P_{10}^{(nm-n')} \quad (11)$$

判决阈值是影响误码性能的关键参数。本文以最小化检测误差概率为准则选择最优阈值。当满足 $P_0(n')=P_1(n')$ 时,BER达到最小,最优阈值表达式可以表示为

$$k_{th} = \frac{nm \ln(P_{00}/P_{10})}{\ln(P_{00}P_{11}/P_{01}P_{10})} \quad (12)$$

根据式(10)~式(12),分别对“0”比特在 $k_{th} \sim nm$ 区间和“1”比特在 $0 \sim k_{th}$ 区间的 PMF 进行累积,可得“0”和“1”比特的 BER 分别为

$$P_{e01} = \sum_{n'=k_{th}}^{nm} P_0(n') = \sum_{n'=k_{th}}^{nm} (C_{nm}^{n'} P_{01}^{n'} P_{00}^{(nm-n')}) \quad (13)$$

$$P_{e10} = \sum_{n'=0}^{k_{th}} P_1(n') = \sum_{n'=0}^{k_{th}} (C_{nm}^{n'} P_{11}^{n'} P_{10}^{(nm-n')}) \quad (14)$$

假设发射端发送“0”和“1”的概率相等,则平均 BER 为

$$B_1 = \frac{1}{2}(P_{e01} + P_{e10}) \quad (15)$$

将改进的 BER 模型计算的 BER 与基于泊松分布的模型以及文献[11]中的实测 BER 进行比较。泊松模型的 BER 表达式为

$$B_2 = \frac{1}{2} \sum_{n'=0}^{k_{th}} \left\{ \frac{[m(\eta\lambda_s + \eta\lambda_b + \lambda_d)]^{n'}}{n'!} e^{-m(\eta\lambda_s + \eta\lambda_b + \lambda_d)} \right\} + \sum_{n'=k_{th}}^{\infty} \left\{ \frac{[m(\eta\lambda_b + \lambda_d)]^{n'}}{n'!} e^{-m(\eta\lambda_b + \lambda_d)} \right\} \quad (16)$$

其最优阈值为

$$k_{th}' = \frac{m\eta\lambda_s}{\ln[(\eta\lambda_s + \eta\lambda_b + \lambda_d)/(\eta\lambda_b + \lambda_d)]} \quad (17)$$

该表达式显示,泊松模型仅适用于理想的光子计数阵列接收机,即能够分辨每次雪崩事件中的载流子数量的接收机。仿真参数取自文献[11]的实验条件:符号时间内的门控次数 $n=1$,阵列规模 $m=64$,每个 APD 每个门吸收的平均背景光子数与暗载流子数之和 $\eta\lambda_b + \lambda_d = 0.003125$ 。将实验参数代入式(15)和式(16),可分别得到改进的 BER 模型与泊松模型的 BER 随每个门平均吸收信号光子数 $\eta m\lambda_s$ 变化的曲线,结果如图1所示。可以看出,改进的 BER 模型的仿真结果比泊松模型更接近实测 BER(文献[11]模型)。但是,随着 $\eta m\lambda_s$ 增大,实测 BER 与改进的 BER 模型、泊松模型的偏差逐渐增大。这主要是由于触发概率随 $\eta m\lambda_s$ 增加,导致后脉冲计数增多。当“0”比特期间出现后脉冲时,大量后脉冲计数叠加在暗计数上,导致 P_{e01} 增大。

在不同背景光水平 $m\lambda_b$ 下,当量子效率 $\eta=6.9\%$,符号时间门数 $n=1$,阵列规模 $m=60$,每个 APD 每个门的平均暗载流子数 $\lambda_d=9 \times 10^{-4}[20]$ 时,改进的 BER 模型、泊松模型以及文献[20]模型的 $m\lambda_s$ 与 $m\lambda_b$ 关系对比情况

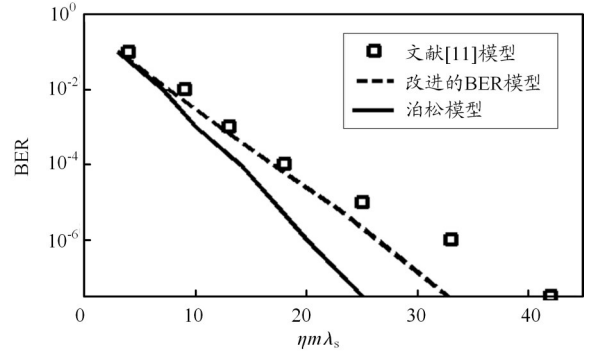


图1 3种模型BER与 $\eta m\lambda_s$ 的关系对比

如图2所示。可以看出,在较低背景光水平 ($m\lambda_b \approx 0.8$) 下,改进的 BER 模型更接近实测数据。 $m\lambda_b=0.9$ 是一个分界点:当 $m\lambda_b < 0.9$ 时,当泊松模型与改进的 BER 模型趋于一致;当 $m\lambda_b > 0.9$ 时,两模型差异略增大。理论上,总光子数减少时,一个探测器发生多光子到达的概率降低,导致多载流子合并为一个计数的情况减少,从而部分消除了泊松模型的非理想因素。因此,在低光照条件下泊松模型与改进的 BER 模型更为接近。

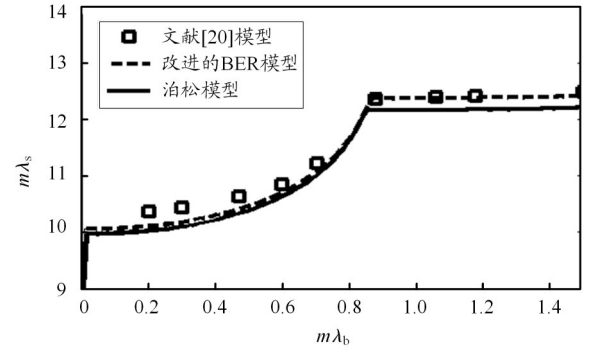


图2 3种模型的 $m\lambda_s$ 与 $m\lambda_b$ 关系对比

2 模型验证与特性分析

2.1 仿真参数设置与假设条件

GM-APD 的关键参数如表1所示,该表数据来源于对安徽量子通信技术有限公司开发的 QC-300 红外单光子探测器的测试。实际中,总死时间由最小死时间和死时间周期共同决定。死时间周期可在 $0 \sim 65535$ 倍触发周期(触发频率的倒数)范围内调节。本文中 GM-APD 的检测周期设为 $10 \mu s$ 。由于后脉冲概率低于 0.05% ,在比特时间尺度上可忽略其后脉冲计数的影响。符号周期与 GM-APD 的检测周期相等,因此每个 APD 在一个符号时间内开启一个门($n=1$)。每个门的平均暗载流子数可通过式(3)计算。

表1 GM-APD关键参数表

参数	值
量子效率(1 550 nm)/%	10
门宽/ns	5
最小死时间/ns	45
死时间周期/个	0~65 535
触发频率/MHz	20
暗计数率/gate	8×10^{-4}
工作温度/℃	0~25

2.2 BER影响因素研究

2.2.1 阵列规模对BER的影响

$\lambda_b=1$ 时,每个门每个APD的不同信号光子数 λ_s 下BER随阵列规模 m 的变化关系如图3所示。可以看出,随着 m 增大,BER呈指数下降; λ_s 越大,BER下降越显著。由于雪崩事件不仅可由信号光子触发,也可由背景光子或暗载流子触发,在单个APD检测周期固定的情况下,采用更大规模的GM-APD阵列是提高比特时间内最大门控计数的唯一途径。若信号功率过低($m\lambda_s < 1$),扩大阵列规模对改善BER效果甚微。因此,仅当信号光子与背景光子比值大于1时,扩大阵列规模才具有实际意义。

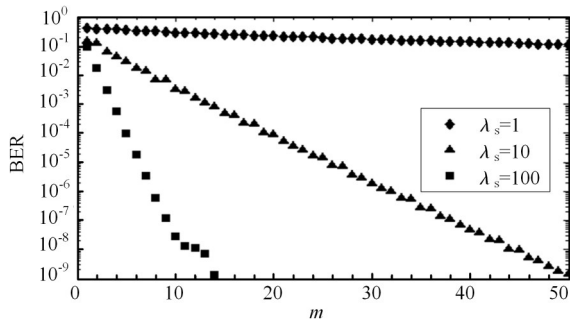


图3 BER与 m 值的关系

2.2.2 信号与背景光子数对BER的共同影响

相对BER与每个门每个APD的 λ_s 、 λ_b 的关系如图4所示。可以看出,随着 λ_s 呈指数增长、 λ_b 减小,BER在初始阶段迅速下降,随后逐渐趋于稳定。

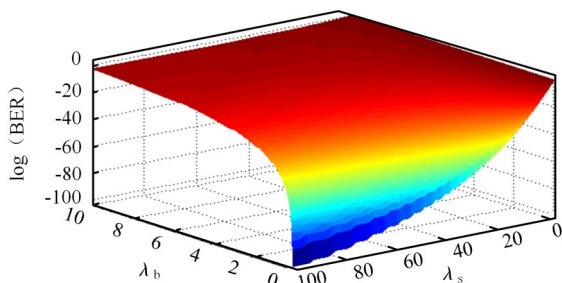


图4 相对BER与每个门每个APD的 λ_s 、 λ_b 的关系

2.2.3 不同BER要求下的信号与背景光子数关系

阵列规模 $m=50$ 时,不同BER情况下 λ_s 与 λ_b 的关系如图5所示。可以看出,当 λ_b 增大时, λ_s 起初保持稳定,但随着 λ_b 继续增加, λ_s 逐渐上升;当 λ_b 超过 10^{-3} (称为突变背景光子)时, λ_s 急剧增加。实验结果表明,BER维持 10^{-3} 时可带来10~20 dB的背景辐射容忍优势。

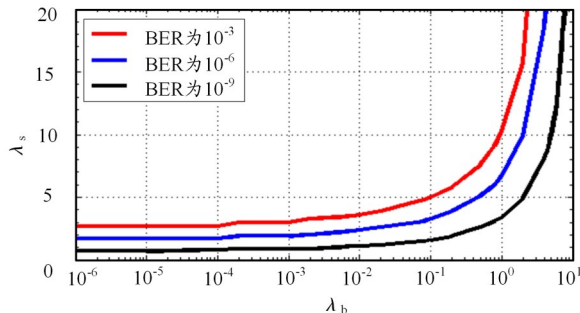


图5 不同BER情况下 λ_s 与 λ_b 的关系

2.2.4 阵列规模与信号光子数的权衡关系

不同BER情况下 λ_s 与 m 的关系如图6所示。可以看出,当 $m < 20$ 时, λ_s 随着 m 的减小而迅速增加。这是因为 m 决定了GM-APD阵列的最大计数能力。如果 m 太低($m < 20$),泊松过程的随机性将显著影响计数,导致比特时间内计数波动剧烈。极端情况下,当 $m < 5$ 时,即使 λ_s 很大,BER也难以达到 10^{-3} 。因此,将阵列中GM-APD的数量保持在20以上可显著降低对信号光子数的需求。当 $m > 20$ 时,随着 m 继续增加, λ_s 逐渐趋于稳定。因此,将阵列规模维持在20以上但不宜过大,可在低信号功率和低系统复杂度之间取得平衡;在相同 m 的情况下,与BER为 10^{-6} 和 10^{-9} 相比,BER为 10^{-3} 时的 λ_s 较大。实验结果表明,在维持 10^{-3} BER的条件下,结合前向纠错编码,可将接收灵敏度提升约5~8 dB。

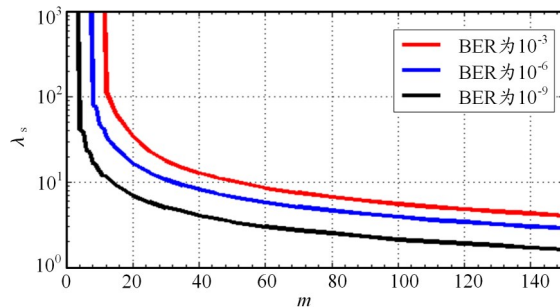


图6 不同BER情况下 λ_s 与 m 的关系

2.2.5 背景光子容忍度与阵列规模的关系

固定发射功率($\lambda_s=1$),通过扩大GM-APD阵列规模以提高对背景光子的容忍度,得到不同BER情况下

孙明伟, 赵文嵩, 姜子健, 等: 一种改进的 GM-APD 阵列 BER 模型及其验证

λ_b 与 m 的关系如图 7 所示。可以看出, 当 $\lambda_b > 1$ 时, 维持目标 BER (分别为 10^{-3} 、 10^{-6} 、 10^{-9}) 的 m 分别约为 20、40、60。

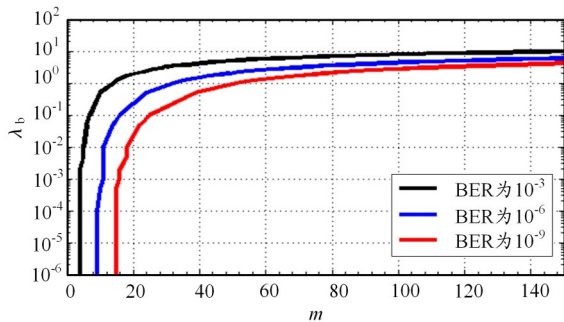


图 7 不同 BER 情况下 λ_b 与 m 的关系

3 结束语

本文建立并验证了一种更为精确的 BER 模型, 推导出了相应的 BER 表达式。基于 BER 表达式, 本文研究了信号光子数、背景光子数、目标 BER 以及阵列中 GM-APD 数量之间的关系。仿真结果表明, 当信号光子与背景光子之比大于 1 时, 通过增加阵列中 GM-APD 的数量可有效降低 BER。GM-APD 阵列的规模是光子计数阵列接收器系统的另一关键参数。将阵列规模保持在 20 以上但不宜过大, 可在实现低信号功率需求的同时维持较低的系统复杂度。

在背景噪声和 GM-APD 阵列规模固定的条件下, 与实现 10^{-6} 和 10^{-9} 量级的目标 BER 相比, 将 BER 维持在 10^{-3} 并结合纠错编码, 可进一步提高接收灵敏度约 5~8 dB。该模型可为未来 GM-APD 阵列无线光通信系统的设计与优化提供更可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] ZHANG J, THEW R, GAUTIER J D, et al. Comprehensive characterization of InGaAs-InP avalanche photodiodes at 1 550 nm with an active quenching ASIC[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(7): 792-799.
- [2] ZAPPA F, TISA S, TOSI A, et al. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2007, 140(1): 103-112.
- [3] CESARONE R J, ABRAHAM D S, SHAMBAYATI S, et al. Deep-space optical communications[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Space Optical Systems and Applications. New York: IEEE, 2011: 410-423.
- [4] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, et al. The lunar laser communications demonstration[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Space Optical Systems and Applications. New York: IEEE, 2011: 54-57.
- [5] BOROSON D M, BISWAS A, EDWARDS B L. MLCD: overview of

NASA's Mars laser communications demonstration system[C]//SPIE. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Diego: SPIE, 2004: 5338-16-5338-28.

- [6] MENDENHALL J A, CANDELL L M, HOPMAN P I, et al. Design of an optical photon counting array receiver system for deep-space communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 2059-2069.
- [7] HADFIELD R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics, 2009, 3: 696-705.
- [8] HISKETT P A, LAMB R A. Underwater optical communications with a single photon-counting system[C]//SPIE. Proceedings of Advanced Photon Counting Techniques VIII. Bellingham: SPIE, 2014: 91140P-1-91140P-12.
- [9] HOPMAN P I, BOETTCHER P W, CANDELL L M, et al. An end-to-end demonstration of a receiver array based free-space photon counting communications link[C]//SPIE. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Francisco: SPIE, 2006: 63040H-1-63040H-13.
- [10] HISKETT P A, STRUTHERS R, TATTON R, et al. A photon-counting optical communication system for underwater data transfer[C]//SPIE. Proceedings of Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI. Bellingham: SPIE, 2012: 14-14.
- [11] CHITNIS D, COLLINS S. A SPAD-based photon detecting system for optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(10): 2028-2034.
- [12] DIXON A R, DYNES J F, YUAN Z L, et al. Ultrashort dead time of photon-counting InGaAs avalanche photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231109-1-231109-11.
- [13] NAKATA T, MIZUKI E, TAKAHASHI S, et al. Gated Geiger mode operation and after pulse probability measurement of the InAlAs APD[C]//IEEE. Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics. New York: IEEE, 2008: 228-229.
- [14] GAGLIARDI R, KARP S. Optical communications[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [15] TEICH M C, SALEH B E A. Effects of random deletion and additive noise on bunched and antibunched photon-counting statistics[J]. Optics Letters, 1982, 7(8): 365-367.
- [16] KANG Y, LU H X, LO Y H, et al. Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(14): 2955-2957.
- [17] FOUICHE D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Applied Optics, 2003, 42(27): 5388-5398.
- [18] GATT P, JOHNSON S, NICHOLS T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. Applied Optics, 2009, 48(17): 3261-3276.
- [19] KOLB K E. Signal-to-noise ratio of Geiger-mode avalanche photodiode single-photon counting detectors[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 081904-1-081904-12.
- [20] ZHANG L, CHITNIS D, CHUN H, et al. A comparison of APD and SPAD based receivers for visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2435-2442.