

# 无线光通信中基于光子计数的接收误码性能分析

汪 琛 徐智勇 汪井源\* 赵继勇 韦毅梅

中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 为了实现强衰减条件下的无线光通信,研究利用单光子探测器检测接收端光信号。在分析门控模式盖革雪崩光电二极管(Gm-APD)工作原理的基础上,基于泊松分布,对单个门内Gm-APD的触发概率进行研究。根据二项分布,建立了基于单个Gm-APD的误码率模型,研究了单个门内的信号光子数、背景光子数与信号周期内开门次数对误码率的影响。理论分析与数值仿真结果表明,信号周期内开门次数决定了系统可能达到的最低误码率;误码率随信号周期内开门次数增加呈指数下降;将误码率控制在 $10^{-3}$ 相比于 $10^{-9}$ ,接收灵敏度将至少提高3 dB。最后通过实验测量了给定条件下的误码率,并与模型仿真结果进行对比,验证了模型的正确性。

**关键词** 光通信; 光子计数; 盖革雪崩光电二极管; 二项分布; 误码率

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0305002

## Error Performance Analysis of Photon-Counting Based Receiving for Optical Wireless Communication

Wang Chen Xu Zhiyong Wang Jingyuan Zhao Jiyong Wei Yimei

*Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210007, China*

**Abstract** In order to achieve optical wireless communication in condition of strong attenuation, the signal photons which arrive at receiver are detected by single photon avalanche detector. The principle of Geiger-mode avalanche photodiode detector (Gm-APD) operating in gated mode is analyzed. Based on the Poisson distribution, the trigger probability of Gm-APD in a gate is researched. According to the binomial distribution, the bit error rate (BER) model of single Gm-APD is built. It is researched that how BER varies with signal photons per gate, background photons per gate and the number of gates per bit. Theory and simulation results show that the best BER performance is determined by the number of gates per bit; the BER decreases exponentially with the increase of gates per bit, and the receiving sensitivity can be improved at least 3 dB under BER of  $10^{-3}$  compared to BER of  $10^{-9}$ . Finally, the BER obtained by experiment under the given conditions is compared with simulation results, which shows the validity of the BER model.

**Key words** optical communications; photon-counting; Geiger-mode avalanche photodiode detector; binomial distribution; bit error rate

**OCIS codes** 060.2605; 030.5260; 250.1345; 200.3050

## 1 引 言

复杂恶劣天气下,大气信道表现为低能见度、强衰减<sup>[1-2]</sup>,所以提高接收端探测器的灵敏度是实现复杂恶劣天气条件下可靠通信的理想解决方案。近年来光电器件的不断发展,出现了具备单光子灵敏度的探测器,使探测光子级别的信号成为可能。其中,工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(Gm-APD)<sup>[3]</sup>由于其在近

收稿日期: 2015-10-23; 收到修改稿日期: 2015-11-09

基金项目: 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2013GZKF031304)

作者简介: 汪琛(1991—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: m15850530784@163.com

导师简介: 徐智勇(1972—),男,副教授,硕士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 13914753638@163.com

\*通信联系人。E-mail: wjywjy2011@163.com

红外波段的良好性能,受到广泛应用。

2004年,美国宇航局(NASA)的火星激光通信验证项目中,美国麻省理工林肯实验室与加州理工喷气推进实验室进行了基于Gm-APD探测器阵列的地面接收终端的设计和论证,理论上可实现全天候10~30 Mb/s的高速率通信<sup>[4-6]</sup>。2012年,Hiskett等<sup>[7-8]</sup>研究了水下基于单个Gm-APD的光子计数检测方案,此方案采用重复发送与检测信号的方式,并通过实验说明:提高信号重发次数可将系统的误码率(BER,  $R_{BE}$ )降低到 $10^{-3}$ 以下。2014年,Chitnis等<sup>[9]</sup>基于泊松分布,建立了Gm-APD探测器阵列检测方案的误码率模型,并实验验证了Gm-APD探测器阵列的探测性能优于单个Gm-APD的探测性能。

不过由于Gm-APD探测器阵列成本高,且Gm-APD的暗计数率会随着阵列的增大而累积,从而造成误码性能恶化,所以无法通过无限增大探测器阵列来降低系统误码率;而在采用单个Gm-APD重发信号的方案中,每次重发信号都必须进行同步,同步序列会极大占用系统带宽,限制其通信速率。针对这些问题,为了降低系统成本,提高系统通信速率,本文提出基于单个Gm-APD在信号周期内多次开门的检测方案,建立误码率模型并进行数值仿真,最后通过实验验证模型仿真的正确性。研究结果显示,信号周期内开门次数决定了系统可能达到的最低误码率;误码率随信号周期内开门次数增加呈指数下降;将误码率控制在 $10^{-3}$ 相比于 $10^{-9}$ ,接收灵敏度将至少提高3 dB。基于单个Gm-APD在信号周期内多次开门的检测方案,可在单个Gm-APD、无需多次重发与同步的条件下,提高Gm-APD探测器的使用效率,实现可靠通信。

## 2 探测原理

当APD两端加上大于雪崩电压的反向偏压时,称APD工作在盖革模式下<sup>[10]</sup>。此时其增益系数趋于无穷大,只要接收到一个光子并触发就会发生雪崩现象,产生能被外部电路检测到的雪崩电流。但是雪崩若不加以抑制会一直进行,探测器持续处于击穿状态,最终会击穿探测器。所以需要在Gm-APD上外加雪崩抑制电路,使APD在发生雪崩事件后及时降低两端偏压抑制雪崩现象;在间隔一段时间之后加上反向偏压,使探测器重新处于响应状态。从Gm-APD被外部电路淬灭到其重新处于响应状态的时间,称为探测器的死时间<sup>[11]</sup>。在死时间内,探测器无法对任何入射光子产生响应。

实际应用中通常有3种抑制雪崩的方法:被动抑制电路、主动抑制电路、门控电路。由于Gm-APD工作在门控模式下,具有较短的死时间、较低的暗计数率和后脉冲率,所以采用门控模式。Gm-APD工作在门控模式下,会在外部输入的触发信号控制下在内部产生一个宽度可调的门控信号,使APD在短暂的门控时间内处于盖革模式,以探测可能会在该时段内到达的光子。如果在一个门内检测到雪崩信号,则会在输出端产生一个雪崩脉冲输出,并在此后的死时间内不再产生内部的门控信号。

由于探测器产生光电子过程服从泊松分布<sup>[10,12]</sup>,所以在 $t_1 \sim t_2$ 产生 $k$ 个光电子的概率为<sup>[13]</sup>

$$P_k(t_1, t_2) = \frac{[K(t_1, t_2)]^k}{k!} \exp[-K(t_1, t_2)], \quad (1)$$

式中 $K(t_1, t_2)$ 代表 $t_1 \sim t_2$ 探测器产生的平均初始光电子数。初始光电子有3种来源:1)信号光子;2)背景光子;3)内部暗计数<sup>[14]</sup>。定义单位时间内的信号光子到达速率为 $s(t)$ 、背景光子到达速率为 $b(t)$ 、暗计数率为 $a(t)$ 、探测器量子效率为 $\eta$ ,可得

$$K(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} [\eta s(t) + \eta b(t) + a(t)] dt. \quad (2)$$

假设每个单独的门控时间 $t_w$ 内,只要探测器内部产生至少一个光电子就会产生雪崩脉冲,并最终产生一个计数值<sup>[15-16]</sup>。由于门控时间 $t_w$ 很短,一般为几个纳秒,为了简化计算,假设门控时间 $t_w$ 内信号光子到达速率、背景光子到达速率、暗计数率分别为定值 $s$ 、 $b$ 、 $a$ ,可得单个门内没有雪崩脉冲产生的概率为

$$P_0 = \exp\left\{-\int_{t_1}^{t_1+t_w} [\eta s(t) + \eta b(t) + a(t)] dt\right\} = \exp[-(\eta s + \eta b + a)t_w]. \quad (3)$$

相反地,单个门内有雪崩脉冲产生的概率为

$$P_1 = 1 - P_0 = 1 - \exp[-(\eta s + \eta b + a)t_w]. \quad (4)$$

### 3 误码率分析

#### 3.1 光子计数理论模型

由于单个门输出的计数值,可能由信号光子、背景光子或暗计数造成,所以无法根据单个门的输出判别是否检测到信号光子。因此采用一个信号周期内多次开门的方法,根据信号周期内的总计数值,选取最佳判决门限进行判决,可有效降低系统误码率。

由(3)式和(4)式可得,探测器探测“0”信号时单个门输出计数值为0和1的概率分别为

$$P_{00} = \exp[-(\eta b + a)t_w], \quad (5)$$

$$P_{01} = 1 - \exp[-(\eta b + a)t_w]. \quad (6)$$

同理探测“1”信号时单个门输出计数值为0和1的概率分别为

$$P_{10} = \exp[-(\eta s + \eta b + a)t_w], \quad (7)$$

$$P_{11} = 1 - \exp[-(\eta s + \eta b + a)t_w]. \quad (8)$$

定义信号周期内探测器开门次数为 $n$ 。信号周期内所有门的输出可以看成是 $n$ 次独立重复实验<sup>[17]</sup>,单个信号周期内所有门的总计数值服从二项分布 $B \sim (n, p)$ ,其中, $p$ 对应于探测“0”信号与“1”信号时的 $P_{01}$ 和 $P_{11}$ 。由以上分析可得探测“0”信号时总计数值的概率密度函数为

$$P_a(m) = C_n^m P_{01}^m P_{00}^{(n-m)}. \quad (9)$$

同理探测“1”信号时总计数值的概率密度函数为

$$P_b(m) = C_n^m P_{11}^m P_{10}^{(n-m)}. \quad (10)$$

选取最佳判决门限 $k_{th}$ 后,可根据总计数值概率密度函数(9)式和(10)式,得到探测“0”信号时误判为“1”的概率、探测“1”信号时误判为“0”的概率分别为

$$P_{\epsilon_{01}} = \sum_{m=k_{th}}^n P_a(m) = \sum_{m=k_{th}}^n [C_n^m P_{01}^m P_{00}^{(n-m)}], \quad (11)$$

$$P_{\epsilon_{10}} = \sum_{m=0}^{k_{th}} P_b(m) = \sum_{m=0}^{k_{th}} [C_n^m P_{11}^m P_{10}^{(n-m)}]. \quad (12)$$

由(11)式和(12)式可得系统的平均误码率为

$$R_{BE} = \frac{1}{2}(P_{\epsilon_{01}} + P_{\epsilon_{10}}) = \frac{1}{2} \left[ \sum_{m=k_{th}}^n (C_n^m P_{01}^m P_{00}^{(n-m)}) + \sum_{m=0}^{k_{th}} (C_n^m P_{11}^m P_{10}^{(n-m)}) \right]. \quad (13)$$

#### 3.2 仿真分析

根据(13)式,主要研究单个门内平均信号光子数 $s \times t_w$ 、背景光子数 $b \times t_w$ 、信号周期内开门次数 $n$ 的变化对误码率的影响。

图1为在不同信号周期内开门次数 $n$ 的情况下误码率随平均信号光子数 $s \times t_w$ 的变化曲线。计算时平均背景光子数 $b \times t_w = 0$  count/gate (count/gate为每个门控时间内的光子或电子个数),门控时间 $t_w = 1$  ns,暗计数率 $a = 8 \times 10^{-6}$  count/ns (count/ns为每纳秒内的光子或电子个数),量子效率 $\eta = 10\%$ 。由图1可得,随着平均信号

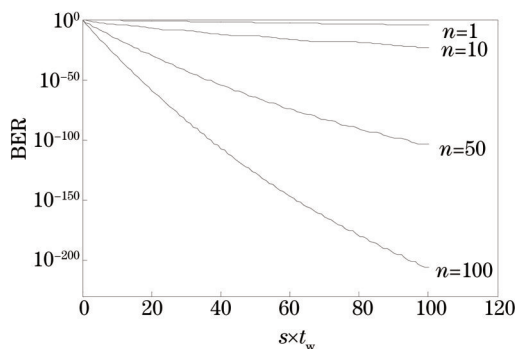


图1 信号周期内开门次数 $n$ 不同时,误码率随单个门内平均信号光子数 $s \times t_w$ 的变化  
Fig.1 BER versus average signal photons per gate  $s \times t_w$  for different number of gates per bit  $n$

光子数  $s \times t_w$  的增加误码率逐渐下降,并且信号周期内开门次数越多误码率下降速度越快。这是由于随着平均信号光子数的增大,探测“1”信号时门的触发概率变大,导致“1”信号内的总计数值变大,更容易判决“1”信号与“0”信号。此外,图中每条曲线所能达到的最小误码率随  $n$  的增大而降低,表明信号周期内开门次数  $n$  决定了系统可能达到的最小误码率。在实际应用中,选择足够的信号周期内开门次数  $n$  可以有效降低系统对信号发送功率的要求;同时达到特定误码率存在一个最少的信号周期内开门次数  $n$ 。

图2为在信号周期内开门次数  $n$  与平均信号光子数  $s \times t_w$  不同的情况下,误码率随平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化曲线。计算时门控时间  $t_w=1$  ns,暗计数率  $a=8 \times 10^{-6}$  count/ns,量子效率  $\eta=10\%$ 。由图2可得:随着平均背景光子数  $b \times t_w$  的增大,误码率迅速恶化。比较图中4条曲线可得,信号周期内开门次数  $n$  与平均信号光子数  $s \times t_w$  变化时,误码率均随平均背景光子数增大迅速恶化。故在实际应用中应首先考虑最大限度抑制背景光噪声来提高系统误码性能。

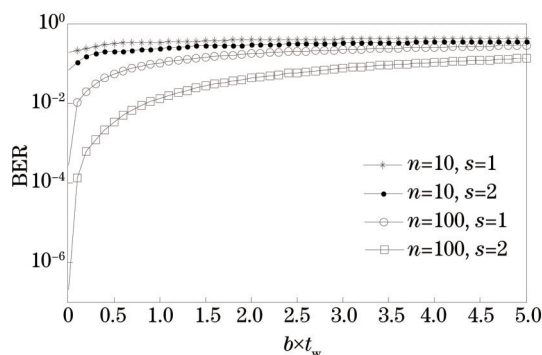


图2 信号周期内开门次数  $n$  与平均信号光子数  $s \times t_w$  不同时,误码率随单个门内平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化

Fig.2 BER versus background photons per gate  $b \times t_w$  for different number of gates per bit  $n$  and average signal photons per gate  $s \times t_w$

图3为在平均信号光子数  $s \times t_w$  与平均背景光子数  $b \times t_w$  不同的情况下,误码率随信号周期内开门次数  $n$  的变化曲线。计算时门控时间  $t_w=1$  ns,暗计数率  $a=8 \times 10^{-6}$  count/ns,量子效率  $\eta=10\%$ 。由图3可得,随着信号周期内开门次数  $n$  的增大,误码率呈指数下降。这是由于单个比特的总计数值由每个门的计数相加得到,当  $n$  增大时可以有效克服因单个门输出随机性而造成的误码。由图中6条曲线可得:当平均信号光子数  $s \times t_w$  与平均背景光子数  $b \times t_w$  不同时,误码率均随信号周期内开门次数  $n$  呈指数下降,只是其下降速度不同。这是因为信号周期内开门次数  $n$  的增加相当于比特时间内信号采样次数的增加,只是其采样的结果只能用“1”或者“0”表示,然后根据其比特时间内所有计数值相加得到总的计数值代表其比特信息,开门次数越多对比特信息的还原就越准确。由以上结论可得,增加信号周期内开门次数能有效降低系统误码率。

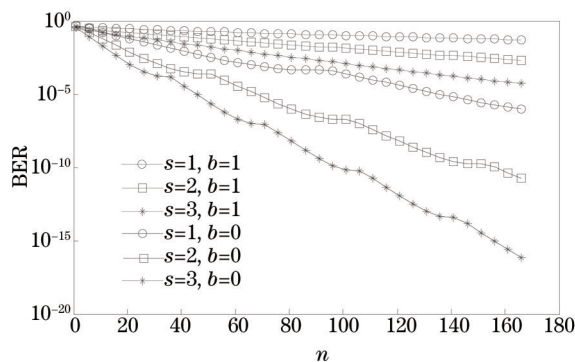


图3 单个门内平均信号光子数  $s \times t_w$  与平均背景光子数  $b \times t_w$  不同情况下,误码率随信号周期内开门次数  $n$  的变化

Fig.3 BER versus the number of gates per bit  $n$  for different average signal photons per gate  $s \times t_w$  and background photons per gate  $b \times t_w$

图4为在达到特定误码率的条件下,单个门内平均信号光子数  $s \times t_w$  随平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化曲线。计算时信号周期内开门次数  $n=100$ ,暗计数率  $a=8 \times 10^{-6}$  count/ns,量子效率  $\eta=10\%$ 。由图4可得:在特定误码率条件下,单个门内最低平均信号光子数随平均背景光子数增加而增加。比较2条曲线,相同平均背景光子数情况下误码率为  $10^{-3}$  相比  $10^{-9}$ ,对最低平均信号光子数的需求将减少至少3 dB,并随平均背景光子数的



增加逐渐变大。所以为了进一步提高系统的灵敏度,可以将误码率控制在  $10^{-3}$  以下后再利用纠错码进一步改善误码率。

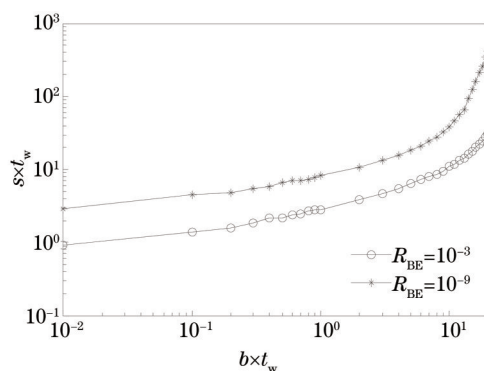


图4 信号周期内开门次数  $n=100$ 、使系统误码率达到  $10^{-3}$  与  $10^{-9}$  时,单个门内平均信号光子数  $s \times t_w$  随平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化

Fig.4 Average signal photons per gate  $s \times t_w$  versus background photons per gate  $b \times t_w$  for the number of gates per bit  $n=100$ , BERs of  $10^{-3}$  and  $10^{-9}$

图5为在不同信号周期内开门次数  $n$  情况下使误码率达到  $10^{-3}$ , 单个门内平均信号光子数  $s \times t_w$  随平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化曲线。计算时暗计数率  $a=8 \times 10^{-6}$  count/ns, 量子效率  $\eta=10\%$ 。由图5可得,在达到特定误码率条件下,信号周期内开门次数  $n$  的增大可以降低系统对平均信号光子数的需求。对比  $n=10$ 、50、100 这3条曲线,  $n$  从10增加到50对最低平均信号光子数的需求减少6 dB,明显大于  $n$  从50增加到100的1 dB,表明随着  $n$  的增大,由  $n$  带来的对最低平均信号光子数需求的程度逐渐减小。这是由于  $n$  达到一定次数时已经能较准确反映“0”信号与“1”信号的计数变化,如果再增大  $n$ ,由  $n$  带来的误码率改善会非常有限。在实际应用中,选取合适的信号周期内开门次数  $n$  非常关键,  $n$  过小时系统的误码率会比较大,  $n$  过大时系统通信速率会降低。

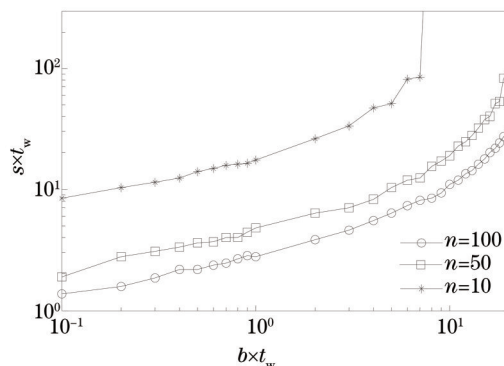


图5 不同信号周期内开门次数  $n$  下使系统误码率达到  $10^{-3}$  时,单个门内平均信号光子数  $s \times t_w$  随平均背景光子数  $b \times t_w$  的变化  
Fig.5 Average signal photons per gate  $s \times t_w$  versus background photons per gate  $b \times t_w$  for different number of gates per bit  $n$ , BER of  $10^{-3}$

## 4 实验验证

实验框图如图6所示,发送端光源为1550 nm的可调激光器,光源发出的光经发送天线发射,由接收天线接收送进接收端;然后经过1550 nm滤波器和可变衰减器进入单光子探测器。实验中将发送端的调制模块信号与接收端探测器输出的计数脉冲一起送入示波器进行采样,采样数据送入计算机进行信号的还原与判决,并与调制模块信号进行比对,最终得到系统的误码率。实验所采用的单光子探测器为QCD-300红外单光子探测器,在1550 nm的量子效率为10%,门宽为1 ns,门信号触发频率为20 MHz,暗计数率为  $8 \times 10^{-6}$  count/gate。实验中通过控制可变衰减器使进入探测器的光功率在安全工作范围内。

最终接收到的信号在示波器上显示的波形如图7(a)所示,其中的每个计数脉冲波形如图7(b)所示,对应比特时间内的计数脉冲个数进行统计,然后与判决门限比较得到当前比特的信息,最后将判决得到的信

息与发送信息比对得到系统的误码率。对实验环境中由接收天线接收之后经过滤波器与可变衰减器之后的背景光功率进行测量,光功率达-66 dBm左右,经过计算可得光子到达速率 $b=1$  count/ns。

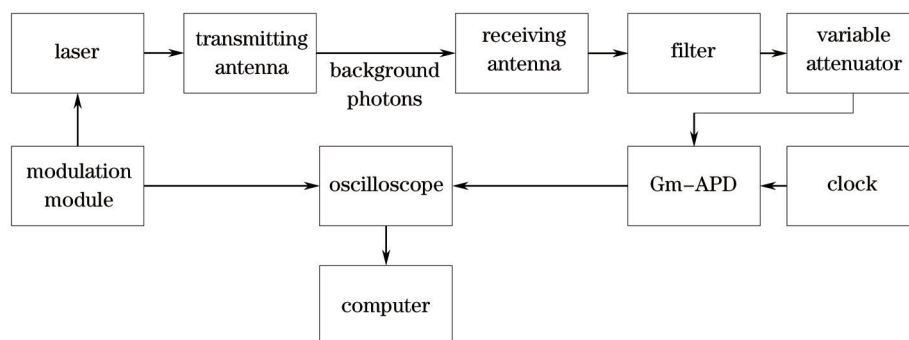


图6 实验系统框图

Fig.6 Schematic diagram for the equipment used to measure BER

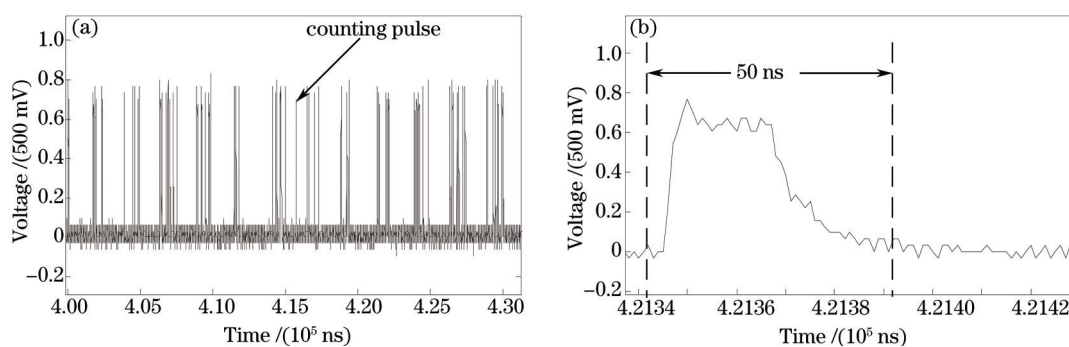


图7 (a) 接收到信号的波形; (b) 计数脉冲波形

Fig.7 (a) Waveform of received signal; (b) waveform of counting pulse

实验1,如图8所示,信号周期内Gm-APD开门次数 $n=100$ ,单个门内平均背景光子数 $s \times t_w = 1$  count/gate。实验中,激光器初始发送功率为6 dBm、调制频率为200 kHz,通过改变激光器发送功率与调制频率(2 MHz、200 kHz)可分别得到不同平均信号光子数与不同信号周期内开门次数下的系统误码率变化曲线。由图8可得,随着平均信号光子数的增加误码率下降,且随信号周期内开门次数增加误码率下降速度变快,实验数据与模型仿真结果相吻合。

实验2,如图9所示。单个门内平均信号光子数 $s \times t_w = 3.5$  count/gate、平均背景光子数 $b \times t_w = 1$  count/gate。实验中,激光器发送功率固定为6 dBm,通过改变激光器调制频率为2 MHz、1 MHz、500 kHz、400 kHz、250 kHz、200 kHz,得到不同信号周期内开门次数下的系统误码率变化曲线。由图9可得,随着信号周期内开门次数 $n$ 的增加误码率呈指数下降,实验数据变化趋势与仿真结果一致,进一步验证了模型的正确性。

由图8和图9可发现,实验测得的误码率比模型仿真结果偏大。这是因为仿真中未考虑信号的上升沿

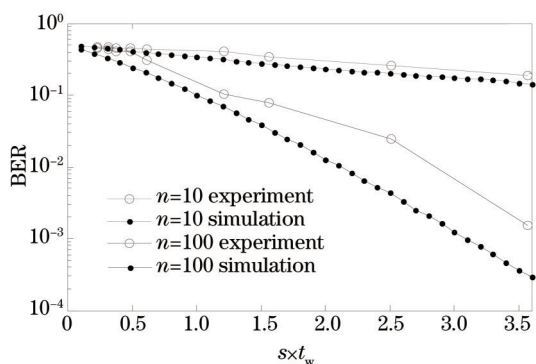


图8 误码率随单个门内平均信号光子数 $s \times t_w$ 的变化

Fig.8 BER versus average signal photons per gate  $s \times t_w$

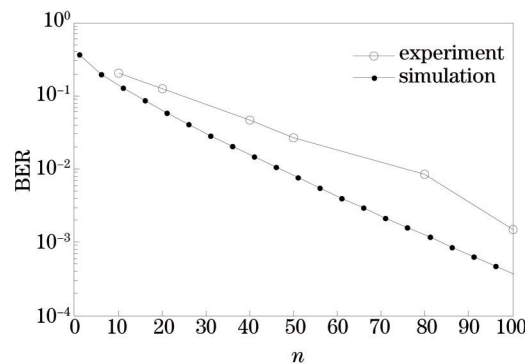


图9 误码率随信号周期内开门次数 $n$ 的变化

Fig.9 BER versus the number of gates per bit  $n$

与下降沿,脉冲上升下降沿上的实际计数值与仿真不一致,造成误码率升高。此外,由于Gm-APD自身材料缺陷而引发的后脉冲效应会产生额外的计数值,带来系统误码率的恶化。

## 5 结 论

对基于光子计数的无线光通信系统探测性能进行研究与分析,结果表明,在探测弱光信号时,采用信号周期内多次开门的探测方式可有效降低系统误码率。但信号周期内开门次数的增加是以降低系统通信速率为代价的,所以要根据实际对误码率与通信速率的需求选取合适的开门次数。由于Gm-APD的灵敏度高、对背景光噪声非常敏感,而且背景光噪声过大时易引起探测器的饱和,造成误码率的急剧恶化,所以要最大限度地抑制背景光噪声来降低系统误码率。为了进一步提高系统灵敏度,可将误码率控制在 $10^{-3}$ ,再通过纠错码改善系统误码率。实验结果验证了该模型在预测光子计数通信系统误码率的正确性。借助于该模型,可以预测在给定探测器量子效率与暗计数率、通信速率、背景光强度、信号光强度的条件下,系统所能达到的误码率。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Li Bifeng, *et al.*. Affect analysis of atmospheric turbulence on fading characteristics in free-space optical system over different environments[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0513001.  
吴晓军, 王红星, 李笔锋, 等. 不同传输环境下大气湍流对无线光通信衰落特性影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0513001.
- 2 Sun Haiyue, Wu Wuming, Jin Aijun, *et al.*. Propagation performance of supercontinuum source in non-Kolmogorov turbulence [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0413001.  
孙海跃, 吴武明, 靳爱军, 等. 非科尔莫哥罗夫湍流下超连续谱光源的传输特性[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0413001.
- 3 Huang Jianhua, Wu Guang, Zeng Heping. Study of 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gated in GaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0204001.  
黄建华, 吴光, 曾和平. 基于1.5 GHz多次谐波超短脉冲门控InGaAs/InP雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0204001.
- 4 Mendenhall J A, Candell L M, Hopman P I, *et al.*. Design of an optical photon counting array receiver system for deep-space communications[C]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 2059-2069.
- 5 Cesarone R J, Abraham D S, Shambayati S, *et al.*. Deep-space optical communications[C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), USA: Santa Monica, 2011: 410-423.
- 6 Robinson B S, Boroson D M, Buriak D A, *et al.*. The lunar laser communications demonstration[C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), USA: Santa Monica, 2011: 54-57.
- 7 Hiskett P A, Struthers R A, Tatton R, *et al.*. A photon-counting optical communication system for underwater data transfer [C]. SPIE, 2012, 8542: 854214.
- 8 Hiskett P A, Lamb R A. Underwater optical communications with a single photon-counting system[C]. SPIE, 2014, 9114: 91140P.
- 9 Chitnis D, Collins S. SPAD-based photon detecting system for optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(10): 2028-2034.
- 10 Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.*. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.  
翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于G-APD阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608007.
- 11 Hadfield R. Single-photon detectors for optical quantum information application[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696-705.
- 12 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.
- 13 Oh M S, Kong H J, Kim T H. Systematic experiments for proof of Poisson statistics on direct-detection laser radar using Geiger mode avalanche photodiode[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(4): 1041-1045.
- 14 Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Applied Optics,

- 2003, 42(27): 5388-5398.
- 15 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414003.  
徐 璐, 张 宇, 张 勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- 16 Gatt P, Johnson S, Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode ladar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. Applied Optics, 2009, 48(17): 3261-3275.
- 17 Kolb K. Signal-to-noise ratio of Geiger-mode avalanche photodiode single-photon counting detectors[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 0819041.

栏目编辑: 王晓琰