

doi:10.3788/gzxb20184710.1004003

# 背景辐射对恒虚警补偿下 APD 倍增因子的影响

周冰<sup>1</sup>, 刘贺雄<sup>1</sup>, 贺宣<sup>1</sup>, 高宇辰<sup>2</sup>, 范磊<sup>3</sup>

(1 陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

(2 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

(3 解放军 31648 部队, 广西 崇左 532200)

**摘要:** 针对恒虚警下雪崩光电二极管输出信号、噪声与倍增因子相互影响的问题, 分析了雪崩光电二极管自身噪声、背景辐射对其探测性能的影响及恒虚警补偿方式的原理, 建立了背景辐射与恒虚警下倍增因子的关系模型, 对模型进行了实验验证, 并通过仿真分析了不同虚警概率、阈值电流、噪声电流下背景辐射与倍增因子的关系。结果表明: 倍增因子会随背景辐射的增大而减小, 且减小速率逐渐减缓; 当背景辐射不变时, 虚警概率或阈值电流的增大都会使倍增因子增大; 热噪声与放大器噪声有效值之和对倍增因子影响较大, 而暗电流对倍增因子的影响较小。

**关键词:** 光电子; 探测器; 雪崩光电二极管; 背景辐射; 恒虚警概率; 探测能力; 雪崩增益

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)10-1004003-7

## Effect of Background Radiation on APD Multiplication Factor under the Compensation of Constant False Alarm Rate

ZHOU Bing<sup>1</sup>, LIU He-xiong<sup>1</sup>, HE Xuan<sup>1</sup>, GAO Yu-chen<sup>2</sup>, FAN Lei<sup>3</sup>

(1 Department of Electronic & Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

(2 Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan, Gansu 732750 China)

(3 PLA 31648 Troops, Chongzuo, Guangxi 532200, China)

**Abstract:** Aiming at the mutual influence of signal, noise and multiplication factors of the avalanche photodiode under constant false alarm, the effects of the avalanche photodiode's own noise and background radiation on the detection performance and the principle of constant false alarm noise compensation were analyzed. The relationship model of background radiation with the constant false alarm multiplication factor were established. The model was verified by experiments, and the relationship between background radiation and multiplication factors under different false alarm probability, threshold current, and noise current was simulated and analyzed. It is found that the multiplication factor would decrease with the increase of background radiation, and the decreasing rate gradually slows down. When the background radiation is constant, the increase of the false alarm probability or the threshold current will increase the multiplication factor. The sum of effective value of the thermal noise and the amplifier noise has a greater influence on the multiplication factor, while the dark current has less influence on the multiplication factor.

**Key words:** Optoelectronics; Detectors; Avalanche photodiode; Background radiation; Constant false alarm probability; Detectivity; Avalanche gain

**OCIS Codes:** 040.1345; 280.3400; 350.5610

基金项目: 河北省自然科学基金(No.F2016506014)资助

第一作者: 周冰(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电对抗. Email: zhbngxgc@163.com

通讯作者: 刘贺雄(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电对抗. Email: liuhexiongoc@126.com

收稿日期: 2018-06-06; 录用日期: 2018-07-18

## 0 引言

雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)因其重量轻、体积小、能耗低、灵敏度高、响应速度快等优点在光纤通信、激光测距、微弱光信号检测等领域被广泛应用. APD 输出的信号和噪声会随倍增因子的增大而增大. 为抑制噪声对探测性能的影响<sup>[1-2]</sup>, 采用恒虚警补偿方式时, APD 的倍增因子会根据噪声大小进行调节<sup>[3]</sup>. 在白天工作状态下, 背景辐射作为 APD 最主要的噪声来源, 会对恒虚警补偿下 APD 倍增因子的调节造成较大影响<sup>[4]</sup>.

RAVIL A 以信噪比(Signal-to-Noise Ration, SNR)公式为基础, 研究了背景光对 APD 探测性能的影响, 得出在白天工作状态下, 背景光对 APD 性能的影响远大于其他影响因素的结论, 给出了背景光对 APD 性能影响的评估方法, 但该评估方法不适用于恒虚警下的 APD<sup>[4]</sup>. 黄庚华分析了背景光、倍增因子及信噪比的关系, 通过实验验证了背景光对雪崩二极管信噪比的影响, 得出了信噪比随背景光的变化规律, 但没有深入研究最佳倍增因子随背景光的变化规律<sup>[5]</sup>. 吕华将恒虚警补偿用于激光成像系统, 在变化的环境下通过恒虚警电路对增益进行自动调节, 获得最佳偏置电压, 但此方法仅可应用于高重频探测中<sup>[6]</sup>.

本文通过研究 APD 倍增因子与噪声的关系以及恒虚警补偿原理, 建立起背景辐射与倍增因子关系模型, 通过该模型分析了不同虚警概率、阈值电流、系统噪声电流下背景辐射对倍增因子的影响.

## 1 APD 探测性能分析

### 1.1 APD 探测系统噪声组成

在实际应用中, APD 因具有优良的增益特性, 在对被测微弱信号进行倍增的同时也对噪声进行了倍增, 而噪声过大将严重影响 APD 探测系统的探测性能<sup>[7]</sup>, 因此, 为抑制噪声, 需对 APD 噪声的特性进行研究.

APD 探测系统输出的噪声主要有背景光散粒噪声、信号光散粒噪声、暗电流噪声、热噪声、放大器噪声, 其中暗电流噪声又分为经过倍增的体漏电流散粒噪声和未经过倍增的表漏电流噪声<sup>[8]</sup>. APD 探测系统的各项噪声之间是相互独立的, 所以其接收到的总噪声电流均方值为各噪声电流均方值之和, 即

$$i_n^2 = 2eM^2 F_m B \left( \frac{\eta e}{h\nu} P_s + \frac{\eta e}{h\nu} P_b + i_d \right) + 2ei_L B + \left( \frac{4KTB}{R} \right) + i_A \quad (1)$$

式中,  $e$  为电子电荷;  $M$  为 APD 的倍增因子;  $F_m$  为噪声因子;  $P_s$  为探测器接收的信号功率;  $B$  为接收系统带宽;  $P_b$  为入射背景光功率;  $\eta$  为 APD 的量子效率;  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为光波频率;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $R$  为等效负载电阻;  $i_d$  为体漏电流;  $i_L$  为表面漏电流;  $i_A$  为放大器噪声.

### 1.2 APD 的增益特性

信噪比可以直接体现出噪声对 APD 探测性能的影响, APD 探测器的信噪比定义为信号光电流与噪声电流之比<sup>[9-10]</sup>, 即

$$R_{SN} = \frac{MP_s \eta e / h\nu}{\left[ 2eM^2 F_m B \left( \frac{\eta e}{h\nu} P_s + \frac{\eta e}{h\nu} P_b + i_d \right) + 2ei_L B + \left( \frac{4KTB}{R} \right) + i_A \right]^{1/2}} \quad (2)$$

通过式(2)可以看出, 信号光电流、噪声电流及 SNR 的大小均与倍增因子  $M$  有关<sup>[11]</sup>. 图 1 为 APD 探测系统输出噪声和信号随倍增因子变化的曲线. 在倍增因子较小时, 噪声大小主要由与倍增因子无关的热噪声、放大器噪声决定, 此时噪声增长速度缓慢. 散粒噪声的增长速度正比于倍增因子的二次方, 因此随着  $M$  逐渐增大, 散粒噪声迅速变大, APD 的总噪声也迅速变大. 信号电流的大小则与  $M$  成正比. 在某一时刻, 信号电流增长速率与噪声增长速率一致, 此时的 SNR 则为最大的  $SNR_{MAX}$ , 对应的倍增因子即为最佳倍增因子  $M_{opt}$ .

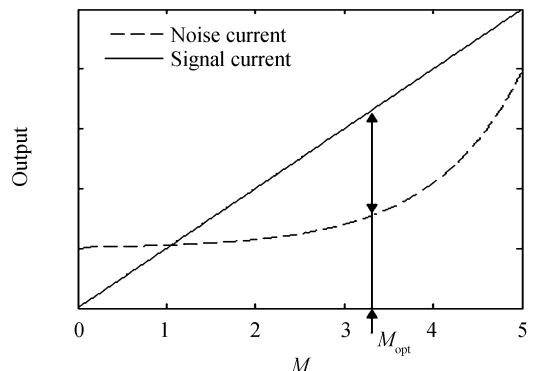


图 1 信号和噪声电流随倍增因子的变化曲线  
Fig.1 Curves of signal and noise currents with multiplication factor

### 1.3 背景光对信噪比的影响

APD 探测系统在对目标进行探测时,除了接收到目标反射的信号光,还会接收到落在视场范围和光谱范围内的各类背景光<sup>[12-13]</sup>。如图 2,以激光主动探测系统为例,即使减小视场角,仍有一部分目标反射的太阳光以及大气散射的太阳光会落在探测器接收视场,使 APD 所接收的背景光功率上升,进而使 APD 的噪声水平上升,对目标探测产生明显影响。

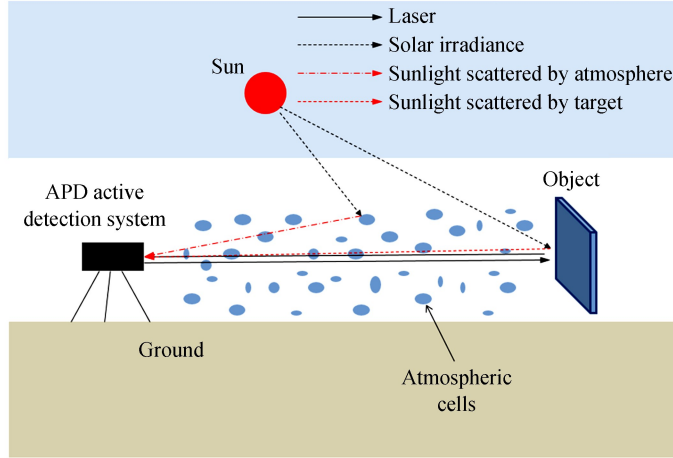


图 2 背景辐射对 APD 探测系统的影响

Fig.2 Effect of background radiation on APD detection system

式(2)中,APD 的表面漏电流较小,且不参与雪崩倍增,因此可以忽略不计<sup>[14-15]</sup>;APD 探测系统在白天状态下工作时,随着  $M$  的增大,热噪声和放大器噪声的影响逐渐变小,因此背景噪声对 APD 探测器产生的影响最为显著。对于带宽 50 MHz 的探测系统,信号光功率为 3 mW,信噪比随背景光功率的改变规律如图 3 所示。由图可知,在一定范围内 SNR 会随背景光功率的变大而迅速变小,当背景光功率较大时,SNR 保持在较低水平,且随背景光功率的变化速率减缓。

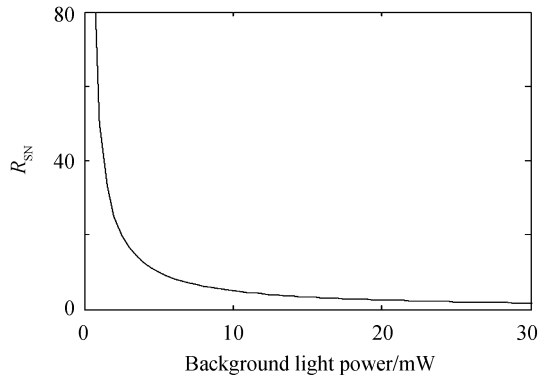


图 3 背景光功率与信噪比关系曲线

Fig.3 Curve of relation between background light power and SNR

## 2 恒虚警率补偿方式

APD 在工作时产生的噪声会对微弱信号的探测产生很大影响,因此通常配合噪声补偿电路使用。噪声补偿电路通过控制 APD 的偏置电压进而控制 APD 的倍增因子,以实现虚警率恒定的目的<sup>[3]</sup>。目前常用的补偿方式有温度补偿、实时噪声补偿以及恒虚警率补偿。相对于其他补偿方式,恒虚警率补偿更加适合于 APD 激光主动探测装备。

APD 输出的噪声服从高斯分布,其噪声幅度的概率密度可表示为

$$\rho(I_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} I_n} \exp\left(-\frac{I_n^2}{2I_n^2}\right) \quad (3)$$

式中,  $I_n$  为输出噪声电流,  $\bar{I}_n$  为输出噪声电流的均方根。

根据定义, 虚警概率  $P_{fa}$  为噪声的幅度大于预置的探测阈值的概率, 即

$$P_{fa} = \int_{I_T}^{\infty} \rho(I_n) dI_n = \int_{I_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{I}_n} \exp\left(-\frac{I_n^2}{2\bar{I}_n^2}\right) dI_n \quad (4)$$

通过牛顿-莱布尼兹公式对式(4)进一步化简得

$$P_{fa} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{I_T}{\sqrt{2} \bar{I}_n}\right] \quad (5)$$

式中,  $I_T$  为设定的探测阈值,  $\operatorname{erf}(x)$  为误差函数, 其表达式为

$$\operatorname{erf}(x) = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (6)$$

由式(5)可知, 虚警概率  $P_{fa}$  仅与阈值电流和噪声均方根的比值有关, 因此, 恒虚警控制电路有两种方式使检测电路的虚警率保持恒定, 一种方式为调节阈值电流, 另一种方式为调节雪崩管偏压从而改变探测系统的噪声均方根<sup>[6]</sup>。对于 APD 激光主动探测装备, 通常采用调节偏压的方式来控制虚警概率。

### 3 恒虚警下 APD 倍增因子模型

通过式(5)可知, 当 APD 探测系统的虚警概率及阈值电流被设定好后, 其噪声电流均方根是确定值, 即

$$\bar{I}_n = \frac{I_T}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1-2P_{fa})} \quad (7)$$

式中  $\operatorname{erf}^{-1}(x)$  为误差函数的反函数, 误差函数及其反函数都是单调连续函数, 代入数值可以得到唯一解。

图 4 为不同虚警概率下 APD 探测系统输出噪声电流与阈值电流之间的关系。由图可知, 在同一虚警概率下, 噪声均方根随着阈值电流的增大而单调增大; 并且随着虚警概率变大, 噪声均方根随着阈值电流的增长速度也会加快。

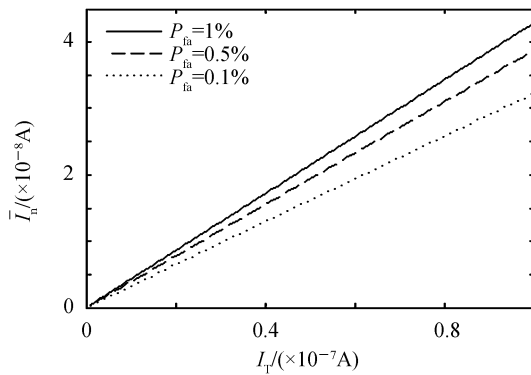


图 4 不同虚警概率下噪声均方根与电流阈值的关系

Fig.4 Relationship between noise RMS and current threshold under different false alarm probability

根据恒预警电路工作过程可知, 在信号脉冲到来之前, 电路已处于动态平衡状态, 其噪声电流均方根为

$$\bar{I}_n = \left[ 2eM^2 F_m B \left( \frac{\eta_e}{h\nu} P_b + i_d \right) + 2ei_L B + \left( \frac{4KT B}{R} \right) + i_A \right]^{1/2} \quad (8)$$

噪声因子  $F_m$  的表达式为

$$F_m = (1-k)(2-1/M) + kM \quad (9)$$

对于达通型 Si-APD,  $k$  可取经验值 0.02。

当温度不变时, APD 探测系统的带宽、暗电流、放大器电流及等效电阻均为定值。在这种情况下, APD 的倍增因子仅与背景辐射有关。将式(8)代入式(7), 可得关于  $M$  的一个三次方程, 求出该方程的实数解, 即可得到某一温度下, 某一确定 APD 探测系统对已知频率信号光进行探测时倍增因子的模型, 即

$$M = H(P_b | P_{fa}, I_T, T, n) \quad (10)$$

## 4 背景辐射与倍增因子关系模型的实验验证

将某型激光测距机进行改装,利用 SS4325 型可跟踪直流稳定电源对 APD 进行供电,高压直流电源对处理电路进行供电,将该型测距机的 C30950E 型 APD 的 4 号引脚即偏压控制引脚用引线引出,利用数字多用表对该引脚实时电压进行测量.该测距机滤波片中心波长为 1 064 nm,光学接收系统视场角为 0.95 mrad,有效孔径为 42 mm,APD 光敏面积为 0.8 mm,带宽为 20 MHz,电压响应比为  $7 \times 10^4$  V/W.

实验原理如图 5 所示,在测距机接收标准漫反射靶板上特定区域背景辐射的同时,利用德国 Inno-spec 公司生产的 The Redeye 型高光光谱相机对该区域进行成像,成像波段与测距机滤波片波段一致,并通过 ENVI 软件处理得出该区域光谱曲线  $W(\lambda)$ ,通过分光光度计测得滤波片透过率曲线  $H(\lambda)$ ,利用式(11)求取被测区域进入测距机 APD 探测系统的背景辐射功率,并记录此时与之对应的 APD 偏置电压,通过式(12)计算出 APD 此时的倍增因子.表 1 为不同辐射功率下的偏置电压、倍增因子.

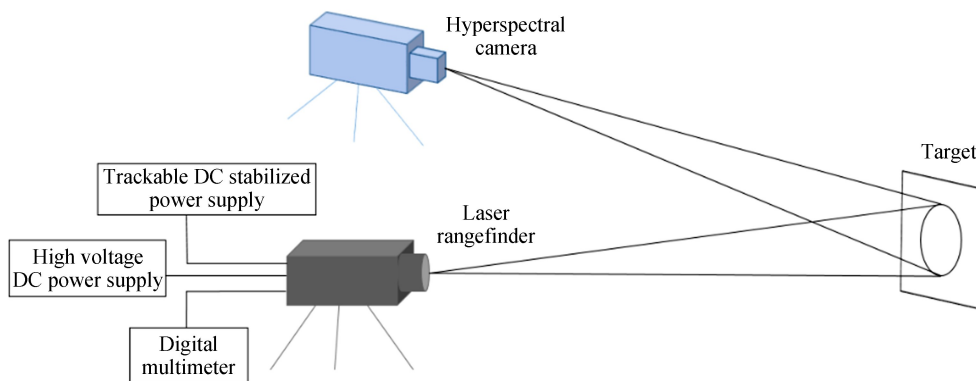


图 5 实验原理

Fig.5 Experimental schematic

$$P_b = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} W(\lambda) H(\lambda) (A/Z^2) A_s d\lambda \quad (11)$$

$$M = 1 / \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_B} \right)^n \right] \quad (12)$$

式中,  $Z$  为观测距离,  $A_s$  为观测区域面积,  $A$  为 APD 光学系统有效接收面积,  $V$  为偏置电压,  $V_B$  为击穿电压,  $n$  与器件结构常数有关.

表 1 背景光功率与偏置电压、倍增因子之间的对应关系

Table 1 Correspondence between background light power, bias voltage and multiplication factor

Background light power/mW	0.08	0.11	0.13	0.17	0.19	0.20	0.23	0.25
Bias voltage/V	373.2	372.3	371.7	370.4	370.6	370.3	370.1	369.2
Multiplication factor	584	523	476	422	424	410	408	372

经过前期测量、计算得到  $\bar{I}_n = 4.298 \times 10^{-5}$  A,

$B = 30$  MHz,  $i_d = 10 \times 10^{-10}$  A,  $2ei_L B + \left( \frac{4KTB}{R} \right) + i_A = 10 \times 10^{-9}$  A, 将所得数据带入模型式(10), 得到背景光与倍增因子关系曲线, 图 6 为模型仿真与实验测量结果.

由图 6 可知, 倍增因子会随背景辐射功率的增大而减小, 且减小速度逐渐减缓. 这是由于恒虚警补偿下, 虚警概率与阈值电流确定时, 系统总噪声均方根为定值, 背景噪声较小, 恒虚警补偿电路为保持系统总噪声均方根一定, 需增加倍增因子以增大噪声. 实验数据与仿真结果具有较好的一致性, 验证了

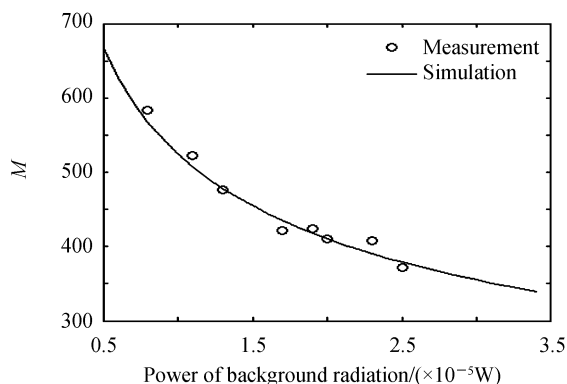


图 6 背景辐射功率与倍增因子关系

Fig.6 Relationship between background light power and multiplication factor

背景辐射与倍增因子关系模型的正确性.实验数据与仿真模型之间的误差来源主要有背景辐射功率计算误差、偏压与倍增因子换算误差.

## 5 背景光对倍增因子影响分析

假设被探测光信号波长为 1 064 nm, APD 探测系统的带宽为 30 MHz, 暗电流为 1 nA, 热电流及放大器电流之和为 10 nA. 图 7 是该探测系统阈值电流为 1 mA, 虚警概率分别为 0.1%、0.5%、1% 时, 背景辐射与倍增因子的关系曲线. 由图 7 可知, 在阈值电流、背景辐射确定的情况下, 倍增因子会随虚警概率的增大而增大, 在同一虚警概率下, 倍增因子随着背景辐射的增强而逐渐变小. 图 8 是该探测系统虚警概率为 1%, 阈值电流为  $5 \times 10^{-3}$  A、 $7 \times 10^{-3}$  A、 $9 \times 10^{-3}$  A 时, 背景辐射与倍增因子的关系曲线. 由图 8 可知, 在虚警概率、背景辐射不变的情况下, 倍增因子随阈值电流的增大而增大. 在同一阈值电流下, 倍增因子随着背景辐射的增强而逐渐变小.

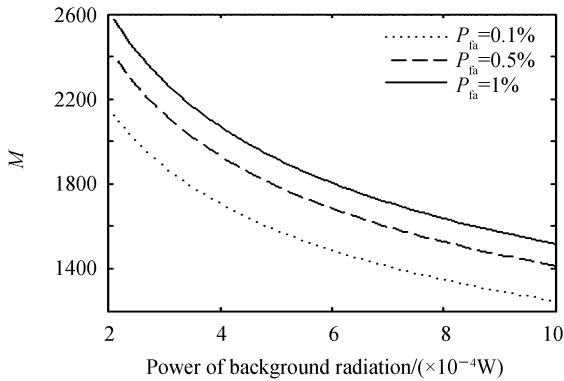


图 7 不同虚警下背景辐射与倍增因子关系

Fig.7 Relationship between background radiation and multiplication factor under different false alarms

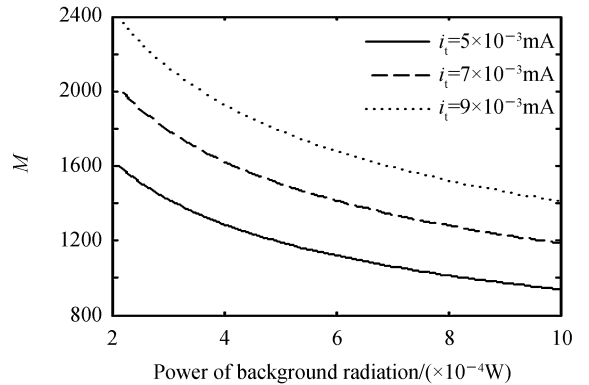


图 8 不同阈值电流下背景辐射与倍增因子关系

Fig.8 Relationship between background radiation and multiplication factor under different threshold currents

在实际工作过程中, 除背景辐射外, APD 探测系统本身的噪声水平也会对恒虚警补偿状态下的 ADP 倍增因子产生影响, 图 9 为热噪声与放大器电流噪声之和、暗电流噪声与倍增因子的关系曲线.

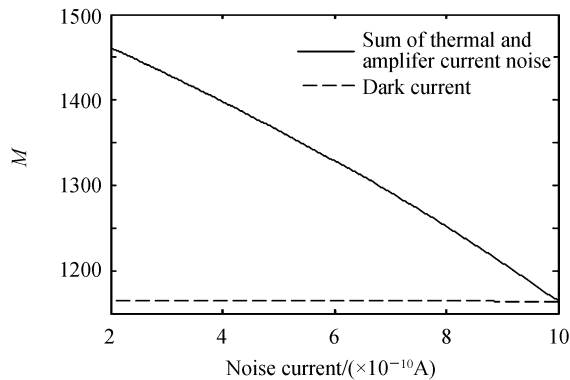


图 9 热噪声与放大器电流噪声、暗电流噪声与倍增因子关系

Fig.9 Relationship between thermal noise and amplifier current noise, dark current noise and multiplication factor

由图 9 可知, 倍增因子会随热噪声与放大器噪声之和的增大而减小, 而 APD 暗电流对于倍增因子的影响则较小, 倍增因子随暗电流的变化不明显.

## 6 结论

本文分析了 APD 自身噪声及背景辐射对 APD 探测性能的影响, 结合恒虚警噪声补偿原理, 建立了背景辐射与恒虚警下 APD 探测系统倍增因子的关系模型, 通过实验对模型进行了验证, 并分析了虚警概率、阈值电流、系统噪声电流对背景辐射与倍增因子关系的影响. 通过研究可知: 倍增因子会随背景辐射的增大而

减小,且减小速率逐渐减缓;当背景辐射不变时,虚警概率及阈值电流的增大都会使倍增因子增大;APD 探测系统的自身噪声中,不参与雪崩倍增的热噪声与放大器噪声之和对倍增因子影响较大,倍增因子随其增大而减小,而参与倍增的暗电流对倍增因子的影响较小。

## 参考文献

- [1] NAKANISHI T, SUZUKI K I, MAEDAY. Multiplication factor control method for high-speed burst-mode APD receiver [J]. *Ieice Technical Report Communication Systems*, 2006, **106**:1-5.
- [2] SU Bi-da, WANG Jing-feng, MA Xue-song, *et al.* Calculation of detection capability of geiger mode APD lidar under atmospheric background[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0125003.  
苏必达, 王景峰, 马雪松, 等. 大气背景下盖革模式 APD 激光雷达探测性能计算[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0125003.
- [3] OUYANG Jun-hua, HUANG Geng-hua, CHEGN Peng-fei, *et al.* Research on constant false alarm rate control of laser lidar based on FPGA[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(1):50-53.  
欧阳俊华, 黄庚华, 程鹏飞, 等. 基于 FPGA 的激光雷达恒虚警率控制技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(1): 50-53.
- [4] RAVIL A, BARRY G, FRED M, *et al.* Simple approach to predict APD/PMT lidar detector performance under sky background using dimensionless parametrization[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006,**44**(8):779-796.
- [5] HUANG Geng-hua, OUYANG Jun-hua, SHU Wei, *et al.* Effect of background radiative power on signal-to-noise ratio of spaceborne laser altimeter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(1):58-61.  
黄庚华, 欧阳俊华, 舒嵘, 等. 背景辐射功率对星载激光高度计信噪比的影响研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(1):58-61.
- [6] LV Hua, WANG Ri. Application of avalanche photodiode constant false alarm rate control in laser imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(1):44-47  
吕华, 王日. 雪崩光电二极管恒虚警率控制在激光成像系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(1):44-47.
- [7] LAFORCEF. Low noise optical receiver using Si-APD[C]. SPIE, 2009,**7212**:523-534.
- [8] GEORGE M W, MADISON A C, ANDREW S H. Single-photon-sensitive linear-mode APD lidar receiver developments [C]. SPIE 2008,**6950**: 69500Q.
- [9] MEASURE R. Laser remote sensing: fundamentals and application[M]. New York:Wiley,1994:114-116.
- [10] NI Nan, SU Guo-bin, LI Zheng, *et al.* Calculation of output signal-to-noise ratio of analog optical receiver[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, **28**(2): 144-148.  
倪楠, 苏国彬, 李铮, 等. 模拟光接收机输出信噪比的计算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, **28**(2):144-148.
- [11] LIANG X, SU Z, BIS. Research on the associated feature of APD sensor avalanche gain and photoelectric conversion SNR[C]. International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, IEEE, 2012:1913-1916.
- [12] SUN Chao. Simultaneous analysis of Si-APD noise in laser radar with background light[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014:16-18.  
孙超.背景光作用下激光雷达中 Si-APD 噪声特性研究[D].南京:南京理工大学,2014:16-18.
- [13] LÜ Yue-guang, SUN Xiao-quan. Principles and applications of laser antagonism[M].Beijing: National Defense Industry Press, 2015:53-58.  
吕跃光,孙晓泉.激光对抗原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2015:53-58.
- [14] JU Feng. Study on dynamic characteristics of Si-APD detector with front discharge[D].Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.  
居峰.带前放 Si-APD 探测器的动态特性研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [15] LIAO Ya-xiang, ZHANG Jun-ying, YU Kai, *et al.* SiGe/Si single photon avalanche photodiode simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5):86-89.  
廖雅香, 张均营, 余凯, 等. SiGe/Si 单光子雪崩光电二极管仿真[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(5):86-89.

**Foundation item:** The Nature Science Foundation of Hebei Province (No.F2016506014)

引用格式: ZHOU Bing, LIU He-xiong, HE Xuan, *et al.* Effect of Background Radiation on APD Multiplication Factor under the Compensation of Constant False Alarm Rate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10):1004003

周冰, 刘贺雄, 贺宣, 等. 背景辐射对恒虚警补偿下 APD 倍增因子的影响[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10):1004003