

温度对恒虚警补偿下 APD 倍增因子的影响

刘贺雄, 周冰, 贺宣, 鲁军

(陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:雪崩光电二极管倍增因子、噪声都会受到温度影响,在恒虚警下 APD 倍增因子、噪声之间会相互作用,为了研究温度变化对 APD 性能造成的影响并对其进行评估,分析了温度对暗电流、热噪声、倍增因子的影响及恒虚警补偿方式工作原理。建立了恒虚警下温度与倍增因子的关系模型,对模型进行了实验验证,利用模型对不同背景光、不同虚警概率下温度对倍增因子的影响进行了分析,提出了温度对恒虚警下 APD 性能影响的评估方法。结果表明:恒虚警下,倍增因子随温度的升高而降低;同一温度下,背景光越强或倍增因子越小时,虚警概率低,倍增因子较小;且背景光越弱、虚警概率越低时,温度对倍增因子的影响越明显。

关键词:温度;雪崩光电二极管;恒虚警概率;倍增因子;探测能力

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.017

Influence of temperature on APD multiplication factor under constant false alarm compensation

LIU He-xiong, ZHOU Bing, HE Xuan, LU Jun

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

Abstract: Avalanche photodiode multiplication factor and noise are affected by temperature. In the constant false alarm, APD multiplication factor and noise will interact. In order to study the influence of temperature change on APD performance and evaluate it, the influence of temperature on dark current, thermal noise, multiplication factor and constant false alarm compensation working principle are analyzed. The relationship model between temperature and multiplication factor under constant false alarm is established. The model is verified by experiments. The influence of temperature on multiplication factor under different background light and different false alarm probability is analyzed. An evaluation method for the influence of temperature on the performance of APD under constant false alarm is proposed. The results show that under the constant false alarm, the multiplication factor decreases with the increase of temperature; at the same temperature, the stronger the background light or the smaller the multiplication factor, the lower the false alarm probability and the smaller the multiplication factor. The weaker the background light and the lower the false alarm rate, the more obvious the effect of temperature on the multiplication factor.

Key words: temperature; avalanche photodiode; constant false alarm probability; multiplication factor; detection ability

1 引言

雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)是对温度敏感的器件^[1],环境温度的变化会影响到

其暗电流噪声、热噪声、击穿电压等因素进而影响到其探测性能^[2]。当采用恒虚警补偿方式时,温度变化导致的噪声水平变化会直接影响到 APD 的倍增

基金项目:河北省自然科学基金项目(No. F2016506014)资助。

作者简介:刘贺雄(1993-),男,硕士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:liuhexiong@126.com

作者简介:周冰(1976-),男,副教授,硕士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:zhbgxgc@163.com

收稿日期:2018-08-13;修订日期:2018-09-13

因子,进而影响到 APD 的探测性能^[3]。

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,此方法在高重频探测中得到广泛应用^[4];李旭通过对 APD 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 的影响因素进行分析,推导出了温度数字增益反馈算法,并将该算法应用于星载测距仪的最佳增益控制,取得了较好的效果^[5];但截至目前,鲜有关于恒虚警补偿下温度对 APD 倍增因子影响的研究。

本文通过分析温度对倍增因子、暗电流、热噪声的影响及恒虚警补偿方式工作原理,建立了恒虚警工作方式下温度与倍增因子的关系模型,通过该模型对不同背景光、不同虚警概率下温度对倍增因子的影响进行了分析,提出了温度对恒虚警下 APD 性能影响的评估方法。

2 温度对 APD 特征参数的影响

2.1 温度对倍增因子的影响

温度对于 APD 性能最主要的影响是通过影响倍增因子实现的^[6]。根据半导体理论,APD 工作环境温度的改变会导致禁带宽度的改变,APD 的击穿电压又受到禁带宽度的影响^[7-8]。式(1)为 APD 倍增因子的经验公式:

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

其中, M 为倍增因子; V_B 为雪崩击穿电压; V 为偏置电压; n 为与结构相关的常数。由式(1)可知, APD 的倍增因子与偏置电压、雪崩击穿电压、器件结构常数相关,因此,在偏置电压不变的情况下,环境温度的改变会导致 APD 倍增因子的变化。图 1 所示为某型 Si-APD 倍增因子随偏压与温度的变化曲线,从图 1 中可以看出,不同温度下, APD 倍增因子随偏置电压变化的速率有很大差别。

当环境温度改变时,雪崩管击穿电压就会发生改变,此时为了保持倍增因子恒定,需要改变 APD 的偏置电压,图 2 所示,即为 C30950E 型 APD 在不同温度下保持某一固定增益系数时,偏置电压的变化规律。

由图 2 可知,倍增因子不变时,偏置电压需随温度按 2.3 V/K 变化。结合式(1)可知,倍增因子不变时雪崩管的击穿电压与偏置电压的变化规律一致,通过测量,可得 C30950E 在 293 K 时的击穿电压为 372 V。因此,该型 APD 温度 T 与击穿电压的

关系为:

$$V_B = 2.3T - 301.9 \quad (2)$$

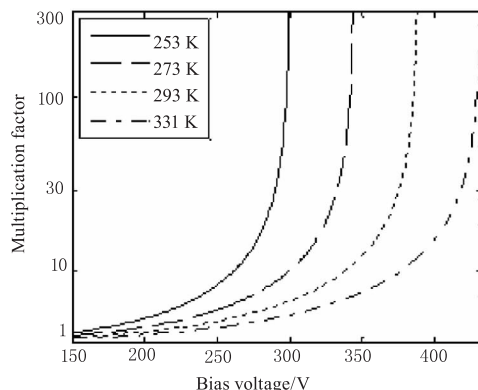


图 1 不同温度下倍增因子与偏压关系

Fig. 1 Relationship between multiplication factor and bias voltage at different temperatures

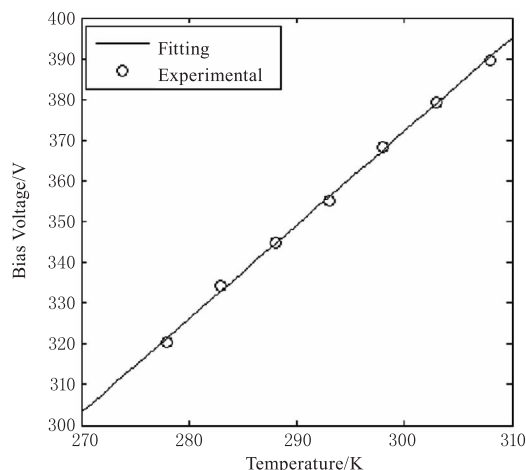


图 2 保持某一增益时偏压与温度的关系

Fig. 2 Relationship between bias voltage and temperature while maintaining a certain gain

2.2 温度对暗电流噪声、热噪声的影响

APD 的暗电流包括:体暗电流与表面暗电流。目前尚无统一的表达式对高反向偏压下的暗电流进行描述,可视具体情况选用:遂穿模型、扩散模型、热电子发射模型或复合模型^[9]。结合实验所选取 APD 暗电流的实际性质,我们利用理查森公式对施加高反向偏压时 C30950E 型 APD 的暗电流 i_d 进行描述^[10]:

$$i_d = \alpha A T^2 \exp\left(-\frac{E_\phi}{K_B T}\right) \quad (3)$$

其中, α 是与光电阴极相关的常数; A 是光电阴极面积; T 是热力学温度; E_ϕ 是功函数; K_B 是玻尔兹曼常数。

热噪声是由于阻抗元件中载流电荷热运动的不确定性引起的。奈奎斯特定理表明,处于热平衡状

态时,无论有无外加电压,其热噪声电流为:

$$i_r = \sqrt{\frac{4K_B TB}{R}} \quad (4)$$

式中, B 噪声频谱带宽; R 为等效负载电阻。

3 恒虚警工作原理

为了抑制 APD 的噪声,充分发挥 APD 探测性能,APD 激光主动探测装备常会采用恒虚警补偿电路^[11]。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:

$$\rho(I_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\bar{I}_n} \exp\left(-\frac{(I_n)^2}{2\bar{I}_n^2}\right) \quad (5)$$

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 I_T 的概率,即:

$$\begin{aligned} P_{fa} &= \int_{I_T}^{\infty} \rho(I_n) dI_n \\ &= \int_{I_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\bar{I}_n} \exp\left(-\frac{(I_n)^2}{2\bar{I}_n^2}\right) dI_n \end{aligned} \quad (6)$$

利用牛顿-莱布尼兹公式对式(6)进一步化简得:

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

式中, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数,其表达式为:

$$\operatorname{erf}(x) = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (8)$$

由式(7)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,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。

4 恒虚警下温度与倍增因子关系模型

4.1 模型建立

通过式(7)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:

$$\bar{I}_n = \frac{I_T}{\sqrt{2} \operatorname{erfinv}(1 - 2P_{fa})} \quad (9)$$

式中, $\operatorname{erfinv}(x)$ 为误差函数的反函数。

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:

$$\bar{I}_n = [2eM^2 F_m B \left(\frac{\eta_e}{h\nu} P_b + i_d \right) + 2e i_L B + i_r + i_A]^{1/2} \quad (10)$$

式中, e 为电子电荷; P_b 为入射背景光功率; η 为 APD 的量子效率; h 为普朗克常数; ν 为光波频率; i_L 为表面暗电流; i_A 为放大器噪声电流; F_m 为噪声因子。

将式(3)、式(4)代入式(10),并忽略影响作用较小的表面暗电流,可得到温度与噪声均方根的关系:

$$\bar{I}_n = [2eM^2 F_m B \left(\frac{\eta_e}{h\nu} P_b + \alpha A T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{K_B T}\right) \right) + \frac{4K_B TB}{R} + i_A]^{1/2} \quad (11)$$

在某一背景光下,APD 探测系统的带宽、放大器电流及等效电阻均为定值。因时,APD 的倍增因子仅与温度有关。将式(11)代入式(9),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,APD 探测系统倍增因子的模型:

$$M = H(T | P_{fa}, I_T, P_b, \nu) \quad (12)$$

4.2 模型的实验验证

APD 的倍增因子是描述输出电流与输入光电流比值的量,在实验中不容易直接进行测量。但将式(2)代入式(1)即可得到环境温度与倍增因子的关系式式(13),通过式(13)可知:在温度已知的情况下,测得偏置电压即可求得此时的倍增因子。

$$M = 1 / \left[1 - \left(\frac{V}{2.3T - 301.9} \right)^n \right] \quad (13)$$

为满足实验要求首先对将某型激光测距机进行改装,分别利用 SS4325 型可跟踪直流稳定电源、高压直流电源对 APD、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 1064 nm,光学接收系统视场角 0.95 mrad,有效孔径 42 mm,APD 光敏面积 0.8 mm,带宽 20 MHz。

实验装置如图 3 所示,在测距机接收标准漫反射靶板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 软件处理得出到该区域光谱曲线 $W(\lambda)$,通过分光光度计测得滤波片透过率曲线 $H(\lambda)$,利用式(14)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 偏置电压及环境温度,实验数据每隔半小时采集一次。为保证采集到同一背景光下不同温度时的实验数据,实验在多个月份进行数次。表 1 即为不

同温度下的偏置电压、倍增因子。

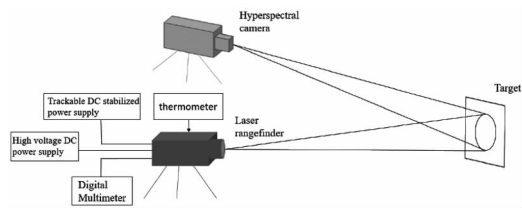


图 3 实验原理图

Fig. 3 Experimental schematic

$$P_b = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} W(\lambda) H(\lambda) (A_d/Z^2) A_s d\lambda \tag{14}$$

其中, Z 为观测距离; A_s 为观测区域面积; A_d 为 APD 光学系统有效接收面积。

表 1 温度与偏置电压、倍增因子之间的对应关系
Tab. 1 Correspondence between temperature, bias voltage and multiplication factor

Temperature/K	277	280	284	292	296	301
Bias voltage/V	334. 7	341. 6	350. 8	369. 2	378. 4	389. 9
Multiplication factor	385	380	377	374	373	369

经过前期测量、计算得到 $B = 30\text{ MHz}$ 、 $\alpha \times A = 0. 2375$ 、 $E_\varphi = 0. 78\text{ eV}$ 、 $R = 1\text{ k}\Omega$, 将所得数据带入模型公式(12), 得到温度与倍增因子的关系曲线, 如图 4 为实验测得数据与模型仿真曲线的对比。

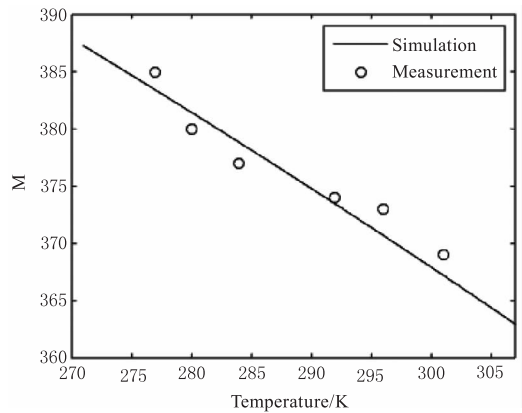
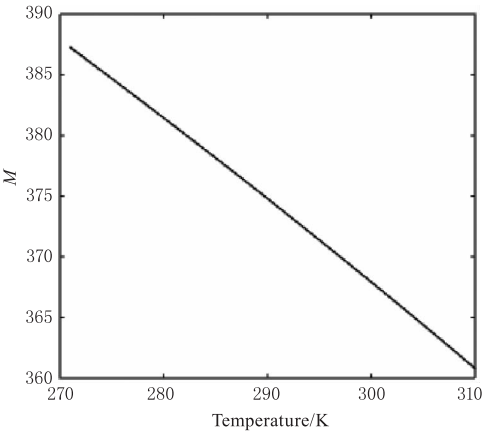


图 4 温度与倍增因子关系

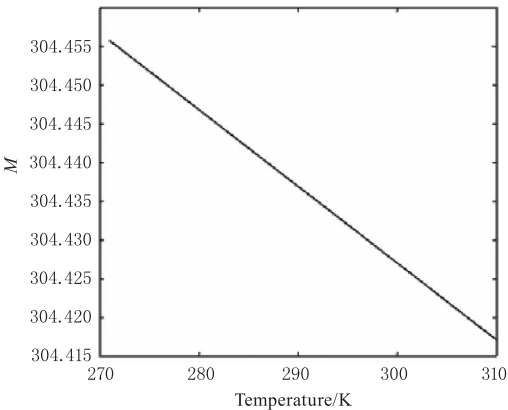
Fig. 4 Relationship between temperature and multiplication factor

由图 4 可知, 倍增因子随着温度的升高而降低, 并且近似呈线性。导致倍增因子随温度降低的主要原因是: 恒虚警工作方式下, 系统的电流判定阈值、虚警概率不变, 因而系统的噪声均方根不变, 当暗电流、热电流随温度升高时, 恒虚警补偿电路为保持系统总噪声均方根一定, 即会降低倍增因子以减小系统总噪声。因为热噪声不经过倍增对总噪声贡献较小, 而暗电流噪声正比于温度的 2 次方, 散粒噪声也

正比于倍增因子的 2 次方, 因此温度与倍增因子近似呈线性关系。同时实验数据与模型仿真结果具有较好一致性, 验证了温度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: 偏置电压与倍增因子换算误差、功函数与系统带宽等参数误差、背景光计算偏差。



(a) 弱背景辐射时温度与倍增因子



(b) 强背景辐射时温度与倍增因子

图 5 不同背景光下温度与倍增因子关系

Fig. 5 Relationship between temperature and multiplication factor under different background light

图 5 为通过温度与倍增因子模型仿真得到不同背景光下温度与倍增因子关系曲线, 仿真所用参数为: $\eta = 0. 3$ 、 $B = 30\text{ MHz}$ 、 $E_\varphi = 0. 78\text{ eV}$ 、 $R = 1\text{ k}\Omega$ 、 $i_A = 10^{-16}\text{ A}$ 。图 5(a)、图 5(b) 分别的是在背景光为 1 nW 、 120 nW 的条件下得到的。由图 5 可知, 在背景光不变时, 倍增因子在随温度的升高而减小; 当背景光为 1 nW 时倍增因子随温度的变化速率为 $0. 65/\text{K}$, 当背景光为 120 nW 时倍增因子随温度的变化速率为 $9. 2 \times 10^{-4}/\text{K}$, 当背景光较小时, 温度对倍增因子的影响较为明显, 而当背景光较强时, 温度的变化对倍增因子的影响极小。背景光散粒噪声、

暗电流噪声都经过了雪崩倍增区域,而当背景光较强时,背景光散粒噪声远大于暗电流噪声,因此此时温度的变化对倍增因子影响极小。

图6为虚警概率为1%、0.5%、0.1%时,通过模型仿真得到的温度与倍增因子关系曲线。由图6可知,同一虚警概率下,倍增因子随温度的升高而降低;同一温度下,倍增因子随虚警概率的升高而增大;虚警概率为1%、0.5%、0.1%时,倍增因子随温度的变化速率分别为0.45、0.63、1.25,由此可见虚警概率越小,倍增因子随温度的变化速率越快,温度对倍增因子的影响也越明显。

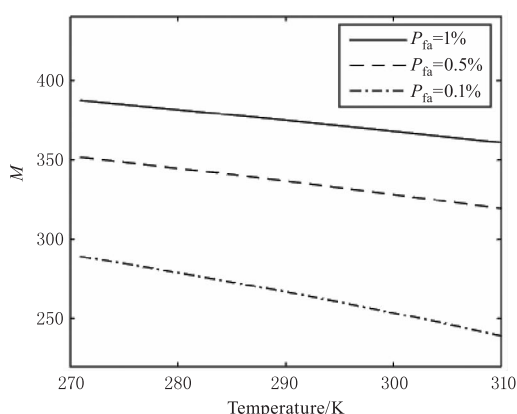


图6 不同虚警概率下温度与倍增因子关系

Fig. 6 Relationship between temperature and multiplication factor under different false alarm probability

5 温度对 APD 影响的评估方法

温度变化导致暗电流噪声、热噪声改变时,APD 探测系统的恒虚警补偿电路为保持系统总噪声均方根不变会对偏压进行调节,进而改变 APD 的倍增因子,最终使 APD 的探测性能发生改变。

APD 探测系统对进行信号探测时,有以下关系成立:

$$P_d = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{R_{\text{SN}} - R_{\text{TN}}}{\sqrt{2}}\right) \quad (15)$$

其中, P_d 为探测概率; R_{SN} 为信噪比; R_{TN} 为阈噪比; $R_{\text{TN}} = I_{\text{T}}/\bar{I}_n$ 。将式(7)带入(15)可得信噪比、阈噪比、探测概率之间的关系:

$$R_{\text{SN}} = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(2P_d - 1) + \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_{\text{fa}}) \quad (16)$$

根据 APD 探测系统噪声来源,APD 的信号进行探测时的信噪比为:

$$R_{\text{SN}} = \frac{MP_s \eta e / h\nu}{\left[2eM^2 F_m B \frac{\eta e}{h\nu} P_s + \bar{I}_n^2\right]^{1/2}} \quad (17)$$

式(17)也可表示为:

$$P_s^2 M^2 \left(\frac{\eta e}{h\nu}\right)^2 - P_s \times 2eM^2 F_m B \frac{\eta e}{h\nu} R_{\text{SN}}^2 -$$

$$R_{\text{SN}}^2 \bar{I}_n^2 = 0 \quad (18)$$

式(18)可看作关于 P_s 的一元二次方程,将式(9)、(12)、(16)代入式(18),并对式(18)进行求解,所求得的最小正数解的意义为:在某一温度下,恒虚警工作方式下的 APD 探测系统对信号进行探测时,达到某一探测概率,所能探测的最小信号功率。绝大多数 APD 激光主动探测装备工作的环境温度区间都在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$,分别求得某温度及 -40°C 时 APD 探测装备所能探测的最小信号功率,并求得其比值 U ,如式(19)。量纲一参数 U 即可表征 APD 激光主动探测装备在该温度下探测性能相对 -40°C 时的褪变量。

$$U = \frac{P_s}{P_s(T = -40^\circ\text{C})} \quad (18)$$

利用量纲一参数 U 即可对由温度升高导致的恒虚警下 APD 探测性能下降进行定量评估。

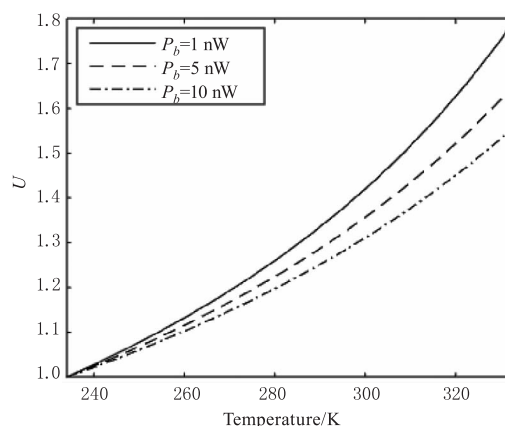


图7 不同背景光下参数 U 随温度的变化曲线

Fig. 7 Curve of parameter U with temperature under different background light

图7、图8分别为不同背景光、不同虚警概率下,参数 U 随温度的变化曲线。由图7可知,当背景光不变时,参数 U 随温度的升高而升高,表明随着温度的升高 APD 探测系统的探测性能逐渐下降。并且同一温度下背景光越强, U 参数的值也越小,当背景光较强时参数 U 随温度的变化速率也相对较小,说明当背景光较强时温度变化对 APD 探测性能的影响较小。由图8可知,同一温度下虚警概率越高, U 参数的值也越小,当虚警概率较大时参数 U 随温度的变化速率也相对较小。

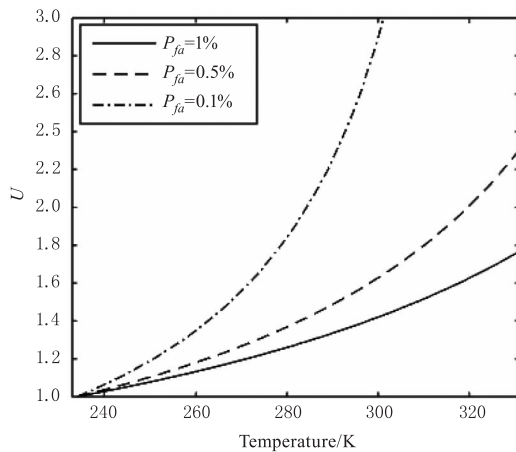


图8 不同虚警概率下参数 U 随温度的变化曲线

Fig. 8 Curve of parameter U with temperature under different false alarm probability

6 结论

本文分析了温度对暗电流、热噪声、倍增因子的影响,结合恒虚警补偿原理,建立了恒虚警下温度与倍增因子的关系模型。通过实验对模型进行了验证,并仿真分析了不同背景光、不同虚警概率下温度与倍增因子的关系,提出温度对 APD 性能影响的评估方法。结果表明:温度是影响 APD 性能的重要因素。恒虚警下,倍增因子会随温度的升高而降低,且背景光越小、虚警概率越低,温度对倍增因子的影响越明显;通过某一温度下 APD 可探测最小信号功率与 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 APD 可探测最小信号功率的比值,可对温度对恒虚警下 APD 探测性能的影响进行定量评估。

参考文献:

- [1] Nakanishi T, Suzuki K, Maeda Y. Multiplication factor control method for high-speed burst-mode APD receiver [J]. Ieice Technical Report Communication Systems, 2006, 106: 1–5.
- [2] Spanoudaki V C, McElroy D P, Torres-Espallardo I, et al. Effect of temperature on the performance of proportional APD-based modules for gamma ray detection in positron emission tomography [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(1): 469–480.
- [3] FAN Xinkun, ZHANG Lei, SONG Yanxi, et al. Analysis and simulation of avalanche photodiode detection performance [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2017, (10): 161–165. (in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
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.
- [5] LI Xu, PENG Huan, WANG Chunhui. Research on APD optimal avalanche gain control technology for spaceborne laser range finder [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 69–74. (in Chinese)
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): 69–74.
- [6] YANG Bin, YAN Wei, XI Gang, et al. Temperature compensation circuit for avalanche photodiodes: CN, CN 101593786 B [P]. 2013. (in Chinese)
杨斌,皋魏,席刚,等.用于雪崩光电二极管的温度补偿电路:CN,CN 101593786 B[P]. 2013.
- [7] Nouri M, Ghadimi A. Reduction of dark current and gain increase in InAs avalanche photodiode with AlGaAs blocking layer [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 148.
- [8] Yousefi A, Zavvari M, Abedi K. Design and analysis of quantum dot based avalanche photodiode with intersubband multiplication [J]. Majlesi Journal of Telecommunication Devices, 2014: 35.
- [9] 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. (in Chinese)
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.
- [10] GENG Jie, ZHAO Shanghong, ZHAN Shengbao, et al. Selection of laser guided four-quad photodiode [J]. Journal of Lasers, 2007, 28(3): 20–21. (in Chinese)
胥杰,赵尚弘,占生宝,等.激光制导四象限光电二极管的选择[J].激光杂志,2007,28(3): 20–21.
- [11] Ouyang Junhua, HUANG Genghua, CHENG Pengfei, 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. (in Chinese)
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.