

文章编号: 1001-3806(2018)06-0862-06

## APD 探测系统的噪声特性及其影响因素研究

刘贺雄, 周冰\*, 高宇辰

(陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了研究噪声对雪崩二极管(APD)探测能力的影响,采用高光谱图像计算辐射功率的方法,对 APD 探测系统的各类噪声的成因及特点进行了分析,在此基础上归纳了影响系统探测能力的因素,并对白天状态下背景光功率与信噪比关系、倍增因子与温度关系进行了仿真,利用高光谱图像的光谱曲线计算背景辐射经大气湍流、大气分子和气溶胶影响后的功率,进而得到经大气传输后的背景辐射与 APD 噪声关系。结果表明,偏置电压为 340V,背景光由 0.07mW 增强到 0.35mW 时,噪声有效值由 108mW 增强到 150mW,表明同一偏压下,APD 噪声有效值会随着自然背景光功率的增强而增强;背景光为 0.35mW、偏置电压由 320V 增强到 340V 时,噪声有效值由 23mW 增强到 150mW,表明同一背景光下,噪声有效值会随偏置电压升高而升高,且增长速率逐渐加快。此研究表明通过高光谱图像可得到特定区域的背景辐射功率,并明确了背景辐射对 APD 噪声特性造成的影响。

**关键词:** 探测器;噪声特性;高光谱;雪崩光电二极管;背景辐射

中图分类号: TN215

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.026

## Research of noise characteristics and influence factors of APD detection systems

LIU Hexiong, ZHOU Bing, GAO Yuchen

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

**Abstract:** In order to study the influence of noise on detection capability of an avalanche photodiode (APD), hyperspectral images were used to calculate radiation power and the causes and characteristics of all kinds of noise in an APD detection system were analyzed. On this basis, the factors affecting the detection capability of the system were summarized. The relationship between signal-to-noise ratio and background light power in daytime and the relationship between multiplier factor and temperature were simulated. The spectral curves of hyperspectral images were used to calculate the power of background after atmospheric turbulence, atmospheric molecules and aerosol, and then the relationship between background radiation and APD noise after atmospheric transmission was obtained. The results show that when the bias voltage is 340V and background light is enhanced from 0.07mW to 0.35mW, the effective value of noise is enhanced from 108mW to 150mW. The effective value of APD noise will be enhanced with the enhancement of the power of natural background light under the same bias voltage. When background light is 0.35mW and bias voltage is enhanced from 320V to 340V, the effective value of noise is enhanced from 23mW to 150mW. Under the same background, the effective value of noise will increase with the increase of the bias voltage, and the growth rate will gradually accelerate. Background power in a specific region can be obtained from hyperspectral images. The influence of background radiation on the APD noise characteristics is also clarified.

**Key words:** detector; noise characteristic; hyperspectral; avalanche photodiode; background radiation

### 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 探测系统主要包括:接收瞄准光学系统、滤波片、雪崩管、偏压控制电路和信号放大电路。APD 探测系统在光电转换过程中产生的随机噪声是影响 APD 性能的重要因素,噪声水平越低的 APD,性能越优良。因此研究 APD 噪声特性及其影响因素显得十分必要。SUN<sup>[1]</sup>对 APD 噪声的统计特性及不同光源下 APD 的噪声特性进行了研究。SHANG<sup>[2]</sup>通过

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2016506014)

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。

\* 通讯联系人。E-mail: zhbngxgc@163.com

收稿日期:2017-12-18;收到修改稿日期:2018-01-15

对 APD 噪声特性的分析,建立了 APD 噪声仿真模型,并对 APD 的自动增益进行了研究。RAVIL<sup>[3]</sup>等人从信噪比公式出发,研究了背景光对 APD 探测性能的影响,并利用无量纲参量建立了 APD 在背景光下的性能评估模型。然而,以上研究都是基于实验室的理想条件,至今未见自然状态下、经大气传输的背景光对 APD 噪声特性影响的研究。

为此,本文中深入分析了 APD 探测系统噪声来源以及 APD 性能的影响因素,并利用高光谱相机计算背景辐射经大气传输后功率的方法,研究了自然条件下背景光对 APD 探测系统噪声特性的影响。

## 1 APD 探测系统的噪声特性

APD 探测系统的噪声来源有 APD 探测器噪声、背景噪声、量子噪声。APD 探测器的噪声来源于 APD 自身的电子噪声及其带有的前置放大器噪声。雪崩光电二极管所产生的噪声是由其载体电荷的随机波动而引起的,包括:热噪声、散粒噪声、 $1/f$  噪声和产生-复合噪声等<sup>[3]</sup>。由环境引起的背景噪声是 APD 探测器最主要的噪声来源<sup>[3]</sup>,一般需要使用滤波片加以抑制。量子噪声是由于信号辐射本身的量子性产生的,在正常工作情况下因其影响较小,通常可忽略不计<sup>[4]</sup>。

### 1.1 APD 探测器噪声

#### 1.1.1 APD 内部噪声

##### (1) 暗电流散粒噪声。

凡是存在 P-N 结结构的半导体器件,都会因为载流子的产生及载流子穿过结区的不确定性而产生散粒噪声。

假设流经 P-N 结的总电流为  $i$ , 则:

$$i = i_p + i_s \quad (1)$$

式中,  $i_s$  为散粒噪声电流,  $i_p$  为流经 P-N 结的平均电流。对于接收带宽为  $B$  的系统,其散粒噪声的有效值可表示为:

$$i_s = \sqrt{2ei_p B} \quad (2)$$

式中,  $e$  为电子电荷。在无光环境下, APD 探测器由于载流子的存在而产生的电流被称之为探测器暗电流。探测器的暗电流由表面漏电流以及体漏电流两部分组成<sup>[5]</sup>。表面漏电流一般情况下与表面缺陷、清洁度、偏置电压有关,它因不通过二极管的雪崩倍增区而不产生倍增<sup>[6]</sup>,对 APD 产生的影响相对较小。体漏电流参与倍增,对 APD 的影响相对较大,不可忽视<sup>[7]</sup>。

因此,对于倍增因子为  $M$  的 APD 探测器,其暗电流为:

$$i_d = i_b + Mi_t \quad (3)$$

式中,  $i_b$  为表面漏电流,  $i_t$  为体漏电流。

由探测器的暗电流引起的散粒噪声电流有效值可以表示为:

$$i_s' = \sqrt{2ei_t BM^2 + 2ei_b B} \quad (4)$$

##### (2) 热噪声。

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<sup>[8]</sup>。这种噪声和普通电阻热噪声没有区别,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:

$$i_r = \sqrt{\frac{4k^2 T F_n}{R}} \quad (5)$$

式中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $F_n$  为噪声频谱带宽;  $T$  为绝对温度;  $R$  为等效负载电阻。

对于含有电容、电感、电阻的电路网络来说,只有电阻(包括电感导线及绕组的电阻)产生热噪声,且这种热噪声是一种白噪声<sup>[9]</sup>。因其由大量粒子随热运动产生,所以符合高斯分布型概率密度函数。APD 探测器产生的热噪声不参与倍增,  $M$  的变化对其没有影响。

##### (3) 产生-复合噪声。

由于半导体器件中各种杂质的存在,使得载流子的产生、复合、陷俘有很大不确定性,进而引起电流的瞬时波动,由此产生的噪声被称之为产生-复合噪声。因其与载流子数目有关,常被归入散粒噪声。该噪声在光电导探测器件中作用明显,而在 APD 这类光伏型探测器件中作用很小。

##### (4) $1/f$ 噪声。

因导体接触点电导率起伏的不确定性引起的噪声被称为  $1/f$  噪声。由于绝大多数激光主动侦察系统使用的都是短脉冲激光,回波脉冲持续时间短,所以接收电路往往工作在较高频段,  $1/f$  噪声可以忽略不计。

1.1.2 前置放大器噪声 APD 探测系统一般使用级联放大器对 APD 输出的微弱信号进行放大,这样满足了高增益的要求,但同时也极易引入较高的噪声。参考文献[10]中给出了各级放大器噪声系数、增益与总的噪声系数的关系:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_{p,1}} + \frac{F_3 - 1}{K_{p,1}K_{p,2}} + \dots + \frac{F_n - 1}{K_{p,1}K_{p,2}\dots K_{p,(n-1)}} \quad (6)$$

式中,  $F$  表示 APD 探测系统放大器总噪声系数;  $F_1, \dots, F_n$  为各级放大器噪声系数;  $K_{p,1}, \dots, K_{p,(n-1)}$  为各级

放大器增益。

通过(6)式可以看出,第1级放大器对噪声影响最为显著,可以通过提高第1级增益或降低第1级噪声系数的手段有效减小系统整体的噪声系数<sup>[10]</sup>。由于APD的内增益效应,APD的增益系数可看做 $K_{p,1}$ ,因此,选用高增益、低噪声系数的APD将有效降低系统的整体噪声。此外,前置放大器的噪声不通过APD,所以其对APD的影响随倍增因子的增大而逐渐变小。

### 1.2 背景噪声

太阳的辐射、地面背景辐射、天空和云块的背景辐射以及月亮和星体产生的辐射都会在探测器上产生散粒噪声。

太阳相当于6000K的黑体,其主要能量集中在可将光和红外,而APD敏感波长大多在 $0.4\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 内,所以相对于其它辐射,太阳辐射产生的散粒噪声对APD的影响最大,某型Si-APD光谱响应曲线如图1所示。由入射光子的粒子性造成的信号光噪声比较小,相对背景光噪声以及探测器散粒噪声而言可以忽略。

背景光散粒噪声的电流均方为:

$$i_g^2 = 2eR_i P_b B_w M F_m \quad (7)$$

式中, $R_i$ 是响应度; $P_b$ 是背景光功率; $B_w$ 是噪声频谱带宽; $F_m$ 为噪声因子。

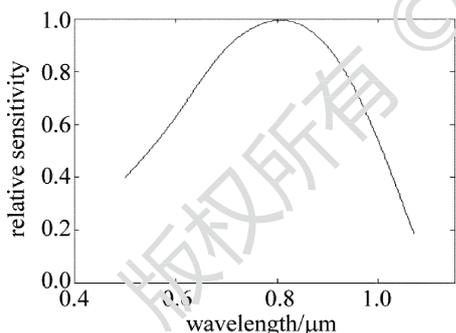


Fig. 1 Spectral response curve of a Si-APD

## 2 APD 探测性能及影响因素

### 2.1 APD 探测性能及影响因素

噪声对APD探测性能最直接的影响是通过信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)来体现的,APD探测器的信噪比定义为信号光电流与噪声电流之比。APD探测器上的各项噪声之间是相互独立的,所以APD探测器接收到信号后输出的噪声为各噪声功率之和,即:

$$i_n^2 = 2eM^2 F_m B \left( \frac{\eta_e P_s}{h\nu} + \frac{\eta_e P_b}{h\nu} + \right.$$

$$\left. i_t \right) + 2eBi_b + \left( \frac{4kTB}{R} \right) + i_a \quad (8)$$

信噪比为:

$$R_{SNR} = \frac{MP_s \eta_e / (h\nu)}{\left[ 2eM^2 F_m B \left( \frac{\eta_e P_s}{h\nu} + \frac{\eta_e P_b}{h\nu} + i_t \right) + 2eBi_b + \left( \frac{4kTB}{R} \right) + i_a \right]^{1/2}} \quad (9)$$

式中, $P_s$ 为探测器接收的信号功率; $\eta$ 为APD的量子效率; $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为光波频率; $i_t$ 为体漏电流; $i_b$ 为表面漏电流; $i_a$ 为前置放大器噪声电流。

信噪比公式中,表漏电流因不参与雪崩倍增故可以忽略;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也逐渐变小,背景噪声成为影响APD探测器探测性能的主要噪声,所以探测器在白天工作时的信噪比公式也可表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$R_{SNR} = \frac{P_s \eta / (h\nu)}{\left[ 2F_m B \eta P_b / (h\nu) \right]^{1/2}} \quad (10)$$

图2描述了白天状态下,信号光功率为3mW、系统带宽50MHz时信噪比 $R_{SNR}$ 随背景光功率的改变而变化的规律。由图可知,在一定范围内 $R_{SNR}$ 会随背景光功率的变大而迅速变小,当背景光功率较大时, $R_{SNR}$ 保持在较低水平,且随背景光功率的变化速率减缓。因此,要得到较大的信噪比,必须控制进入探测系统的背景光。

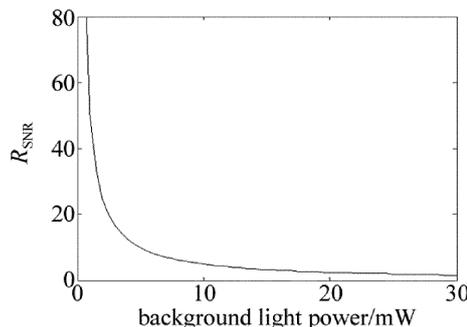


Fig. 2 Relationship between background power and SNR

### 2.2 探测性能的影响因素

在特定背景下,APD的探测性能主要受自身工作电压和温度的影响。而工作电压和温度的改变最终是通过散粒噪声、热噪声或倍增因子的改变对APD的性能造成影响的。

2.2.1 温度对暗电流影响 暗电流由体漏电流和表漏电流组成,因表漏电流不参与倍增,所以起主要作用的是体漏电流,而体漏电流主要由热噪声电流和隧穿电流组成<sup>[12]</sup>。随着APD工艺的进步,由隧穿效应引

起的透穿电流已经得到了有效控制,因此 APD 的暗电流主要是热激发的热噪声电流,而热噪声电流主要受温度影响。热噪声暗电流可表示为:

$$i_r = CT^2 \left( -\frac{E_\phi}{kT} \right) \quad (11)$$

式中,  $C$  是常数;  $E_\phi$  是功函数(对于硅半导体,  $E_\phi = 0.06$ )。

2.2.2 温度对热噪声的影响 通过热噪声电流公式(5)式可以看出热噪声电流会随温度变化。热噪声虽不参与倍增,但在倍增因子较低时,热噪声的浮动将严重影响 APD 性能的稳定性。

2.2.3 工作电压和温度对倍增因子的影响 温度可以通过影响暗电流噪声、热噪声等对 APD 的工作性能造成影响,但温度对于 APD 性能最主要的影响是通过影响倍增因子实现的。Si-APD 倍增因子随偏压与温度的变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出,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。

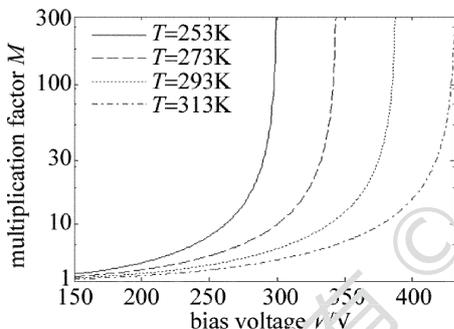


Fig. 3 Relationship between multiplication factor and bias voltage

APD 的倍增因子受击穿电压和 APD 偏压影响,其经验公式如下:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_b}\right)^n} \quad (12)$$

式中,  $V$  为偏置电压,  $V_b$  为击穿电压,  $n$  与器件结构常数有关。

依据半导体理论, APD 的禁带宽度随温度的改变而发生改变<sup>[13]</sup>,其规律如下:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (13)$$

式中,  $E_g(T)$  为不同温度下禁带宽度,  $E_g(0)$  为  $T = 0$  时禁带宽度,其值为  $1.17\text{eV}$ ,  $\alpha = 4.73 \times 10^{-4} \text{eV/K}$ ,  $\beta = 636\text{K}$ 。

APD 的禁带宽度受温度的影响而改变时, APD 的击穿电压也随之改变<sup>[2]</sup>:

$$V_b = 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{6/5} \left( \frac{\alpha_j}{3 \times 10^{20}} \right)^{-2/5} \quad (14)$$

式中,  $\alpha_j$  为杂质的浓度梯度,对于 Si-APD,取  $\alpha_j = 1019/\text{cm}^{-4}$ 。当 APD 工作于  $339\text{V}$  的电压时,其倍增因子与温度的关系如图 4 所示。由图可知,温度对于倍增因子的影响是显著的。

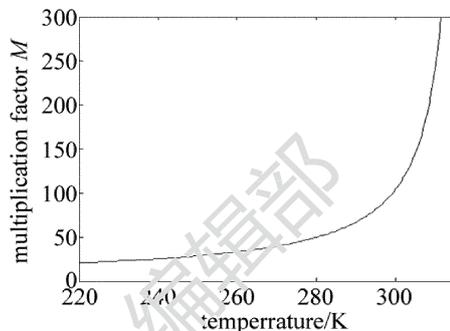


Fig. 4 Relationship between multiplication factor and temperature

此外,噪声因子、响应度会随倍增因子的改变而改变,影响探测器散粒噪声,进而影响 APD 探测器的信噪比。

### 背景光对噪声影响的实验验证

自然条件下,背景光因为在大气传输过程中受到大气湍流、大气分子和气溶胶的影响,所以其对 APD 输出噪声产生的影响不同于同功率实验室条件下理想光源<sup>[14-15]</sup>。通过高光谱相机采集的光谱图可以得到目标及大气散射的太阳辐射经大气传输后的实际功率。

如图 5 所示,利用高光谱相机对被测区域进行成像,成像波段与 APD 滤波片透过波段一致,中心波长  $980\text{nm}$ ,成像方位角  $30^\circ$ ,高角  $15^\circ$ ,太阳天顶角  $56^\circ$ ,能见度  $10\text{km}$ ,在光谱图像上依次选取同一距离上 5 个辐射亮度不同区域作为被观测目标。实验中所用某型 Si-APD 工作范围  $350\text{nm} \sim 1100\text{nm}$ 。光学接收系统视场角  $20\text{mrad}$ ,有效孔径  $42\text{mm}$ 。输出放大电路的放大器选用 OPA847 型低噪放大器,运放增益带宽为  $3.9\text{GHz}$ ,放大倍数设定为 25。

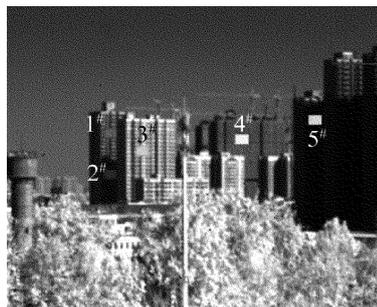


Fig. 5 Spectral image of 965nm ~ 995nm

利用高光谱处理软件 ENVI 分别求取观测区域辐射光谱曲线  $W(\lambda)$ , 图 6 为 4# 区域的光谱辐射曲线。利用下式分别求取其进入 APD 探测系统的背景光功率:

$$P_b = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} W(\lambda) \left( \frac{A}{Z^2} \right) A_s d\lambda \quad (15)$$

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。

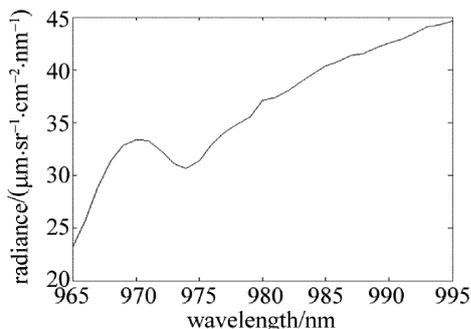


Fig. 6 Relationship between radiance and wavelength of the fourth area in 965nm ~ 995nm

在不同偏压下, 调整 APD 观测系统的光学系统, 对不同区域进行观测, 同时记录噪声电压。图 7 为背景光功率与噪声偏压的关系曲线。

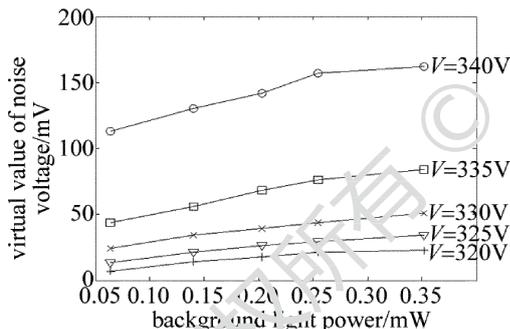


Fig. 7 Relationship between background power and virtual value of noise at different bias voltages

由图 7 可看出: 偏压为 340V、背景光由 0.07mW 增强到 0.35mW 时, 噪声有效值由 108mW 增强到 150mW, 表明同一偏压下, 随着背景光功率的提高, 噪声有效值逐渐提高, 并由于探测器饱和效应, 噪声有效值随背景光功率的增长速度逐渐减缓; 背景光为 0.35mW、偏压由 320V 增强到 340V 时, 噪声有效值由 23mW 增强到 150mW, 在背景光功率不变的情况下, 噪声有效值随偏压增长速率逐渐变快, 与图 3 中的结论一致。

在一天中不同时间段内对 2# 区域用高光谱相机进行成像, 计算该区域背景光功率, 并测量与之对应的 APD 噪声偏压, 得到不同时刻该区域背景光功率变化

情况, 以及不同时刻 APD 的噪声电压有效值, 如表 1 所示。

Table 1 Background power and virtual value of noise at different time

time	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
background power/mW	0.13	0.16	0.21	0.27	0.24	0.20
virtual value of noise/mV	120	133	151	159	153	145

由表 1 可知, 在一天的不同时间段内背景光变化十分明显, 大约在 13:00 达到峰值。受背景光功率变化的影响, APD 噪声电压有效值也发生较大变化, 且在 13:00 达到最大。

## 4 结 论

APD 探测系统的噪声包括: 暗噪声、背景光噪声、热噪声、 $1/f$  噪声、产生-复合噪声等, 但背景光造成的散粒噪声影响最为突出。温度对噪声特性的影响主要是通过暗电流、倍增因子、热噪声的影响体现出来。本文中通过高光谱图像的光谱曲线计算自然条件下特定区域特定波段的背景辐射功率, 并对不同偏压、不同自然背景光功率下以及一天内不同时间段内的 APD 的噪声有效值进行测量。由数据结果可知: 偏压为 340V、背景光由 0.07mW 增强到 0.35mW 时, 噪声有效值由 108mW 增强到 150mW, 可知同一偏压下, APD 噪声有效值会随着自然背景光功率的增强而增强; 背景光为 0.35mW、偏压由 320V 增强到 340V 时, 噪声有效值由 23mW 增强到 150mW, 可知同一背景光下, 噪声有效值会随偏压升高而升高, 且增长速率逐渐加快, 与分析结果相符。此研究证明了通过高光谱图像可得到特定区域的背景辐射功率, 并明确背景辐射对 APD 噪声特性造成的影响, 为研究复杂背景辐射提供了一种思路。

## 参 考 文 献

- [1] SUN Ch. Study on noise characteristics of Si-APD in laser radar under background light [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014:16-18 (in Chinese).
- [2] SHANG H B. Study on noise characteristics of lidar receiving system [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2008:32-33 (in Chinese).
- [3] 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.
- [4] ZHANG J H, ZHENG Y Ch, SHANG W D, *et al.* Research of space-based photon counting laser detection for space debris [J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 312-317 (in Chinese).

- [5] GEORGE M W, MADISON A C, ANDREW S H. Single-photon-sensitive linear-mode APD lidar receiver developments[J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 6950: 69500Q.
- [6] JU F. Study on the dynamic characteristics of Si-APD detector with preamplifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011: 21-23 (in Chinese).
- [7] YAO P P, ZHAO X, ZHANG Y, *et al.* Non-scanning active imaging lidar based on APD planar array detector[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 628-630 (in Chinese).
- [8] LÜ Y G, SUN X Q. Fundamentals and applications of laser countermeasures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 53-58 (in Chinese).
- [9] ZHANG Ch Q. Handbook of military laser instruments abroad[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1989: 125-127 (in Chinese).
- [10] ZENG Q Y. Weak signal detection[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 75-76 (in Chinese).
- [11] MEASURE R. Laser remote sensing: fundamentals and application [M]. New York, USA: Wiley, 1994: 114-116.
- [12] GU S, DING Q X, YANG Y. Noise suppression technologies used for avalanche photodiode[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(3): 69-73 (in Chinese).
- [13] RONG T P, MIAO L. Temperature compensation of APD optimal bias by MAX6605[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2004, 32(5): 16-18 (in Chinese).
- [14] DAI Y, CUI X S, WU Y M, *et al.* Theoretical calculation and experimental measurement on the properties of scattering irradiance in daytime[J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 39-41 (in Chinese).
- [15] ZHAO J Q, XU Y F, LI J H, *et al.* Turbulence channel modeling of visible light communication under strong background noise and diversity receiving technologies[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301001 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©