

文章编号: 1001-3806(2018)03-0374-05

雪崩管最佳倍增因子线性化温控技术研究

阎得科^{1,2}, 敬嘉雷^{1,2}, 霍晶^{1,2}, 郝培育^{1,2}

(1. 中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所, 洛阳 471023; 2. 光电控制技术重点实验室, 洛阳 471009)

摘要: 为了进一步增强机载激光测距机在全温范围内的环境适应性, 分析了温度与探测器模块输出功率信噪比的关系, 推导了最佳倍增因子与温度的方程式, 阐述了温度变化引起倍增因子对最佳雪崩倍增因子偏离的原因。根据雪崩管探测器雪崩击穿电压的线性温度特性, 设计了机载温度范围为 $-55^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 的基于自然对数法的最佳倍增因子雪崩偏压线性化温控电路, 用于补偿因温度变化所引起的倍增因子对最佳雪崩倍增因子的偏离。结果表明, 实测雪崩偏压温控系数为 $2.29\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 与理论分析值误差仅为 4%。该技术用于新型机载激光测距系统中, 获得了良好的试验数据, 满足机载环境的特殊需求。

关键词: 激光技术; 最佳倍增因子; 线性化温控; 雪崩管; 信噪比; 激光测距

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.016

Study on linear temperature control for the optimal multiplication factor of avalanche photodiodes

YAN Deke^{1,2}, JING Jialei^{1,2}, HUO Jing^{1,2}, HAO Peiyu^{1,2}

(1. Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471023, China; 2. Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to further enhance the environmental adaptability of an airborne laser rangefinder in the full temperature range, the relationship between temperature and output power signal-to-noise ratio of a detector module was analyzed. The equation for the optimum multiplier factor and temperature was derived. The reasons for the deviation of the best avalanche multiplier factor caused by temperature change were expounded. According to linear temperature characteristics of the breakdown voltage of an avalanche detector, based on natural logarithm method, a linear temperature controlled circuit of the avalanche bias voltage was designed to compensate the multiplication factor due to temperature in the range of $-55^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$. Good test results were obtained with this method used in new airborne laser rangefinders. The experimental results show the measured temperature control coefficient of the avalanche bias voltage is $2.29\text{V}/^{\circ}\text{C}$ with an error of less than 4% relative to the theoretical coefficient. This method meets the special requirement for airborne environment.

Key words: laser technique; optimal multiplication factor; linear temperature control; avalanche photodiode detector; signal-to-noise ratio; laser range finding

引言

受体积和重量的限制, 优化接收单元是提高机载远程激光测距机性能最经济有效的途径。目前, 在激光测距接收单元中, “达通型”雪崩管因其响应速度快、增益高、工作偏压小、噪声相对低等特点而作为光电转换接收器被广泛应用于机载激光测距系统中。由

于机载环境的特殊要求, 机载光电设备必须保证其性能在工作温度范围 $-55^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 内不下降。

倍增因子是雪崩管探测器的一个重要参量, 倍增因子随温度和雪崩偏压而变化, 不同的温度对应不同的倍增因子-雪崩偏压曲线。为了得到最大信噪比, 必须补偿因温度变化引起倍增因子对最佳倍增因子的偏离。为此, 需设计雪崩管探测器雪崩偏压线性化温控电路。

目前, 关于雪崩管探测器的雪崩偏压线性化温度补偿方法较多, 总的来说, 分为模拟温控法^[1-3]和数字温控法^[4-5]。参考文献[1]中采用电流型温度传感器 AD590。参考文献[2]中采用电阻型温度传感器

作者简介: 阎得科(1982-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事机载激光测距、光电探测方面的研究。

E-mail: eoei@vip.sina.com

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-10-16

DS3501, 虽然都实现了探测器雪崩偏压的线性化温控, 但是, 上述两型温度传感器均为探测器外置温度传感器, 所采集的温度不能真实反映探测器内部 P-N 结的真实温度。针对上述不足, 参考文献[3]中将温度传感器 MAX6605 与探测器置于一个恒温阱中, 降低了温度传感器采集温度与探测器内部 P-N 结真实温度的偏差, 但是, 具体实施时存在对恒温阱设计要求较高且增大了结构空间的问题。参考文献[4]中采用数字温控法, 利用模/数(analog/digital, A/D)、单片机和数/模等数字芯片, 实现了 $-30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内的雪崩管探测器雪崩偏压线性化温控。参考文献[5]中也是数字温控法, 利用 A/D、现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)和 D/A 等数字芯片, 实现了 $-25^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内的雪崩管探测器雪崩偏压线性化温控, 但是, 与模拟温控法相比, 数字温控法电路复杂, 且存在温控范围较窄的问题。

为了避免上述不足, 作者分析了雪崩管探测器内置负指数温度电阻的温度特性, 采用模拟温控法, 设计了基于自然对数法的最佳倍增因子雪崩偏压线性化温控电路。通过电路系统联试、性能测试, 获得了较好的试验数据。为工程化应用奠定了良好的基础, 增强了激光测距系统的环境适应性, 具有广阔的军事应用前景。

1 理论分析

使用雪崩光电二极管的要点是根据实际情况, 选择最佳偏置电压, 使其工作在最佳倍增因子状态。所谓最佳倍增因子就是系统得到最大信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)时所对应的倍增因子^[6-15]。

1.1 最佳倍增因子分析

将雪崩管与前置放大器视为一体, 其噪声模型如图 1 所示^[7-8]。图中, APD 为雪崩光电二极管(avalanche photodiode), OPA 为光电放大器(optical photonic amplifier)。 I_{R_a} 为跨阻电流, I_{APD} 为雪崩常电流。据此噪声模型, 光电转换之后的信号-噪声对应的功率信噪比 R_{SNR} 可表示为^[7-8]:

$$R_{SNR} = \frac{(MRP_s)^2}{N_r^2 B} \quad (1)$$

$$I_{PD} = (P_s + P_b)R \quad (2)$$

$$N_r^2 = 2q[I_d + (I_b + I_{PD})M^2 F] + 2qI_a + (V_a \omega C)^2 + \frac{4kT}{R_a} \quad (3)$$

式中, M 是雪崩倍增因子, P_s 是入射信号光功率, P_b 是

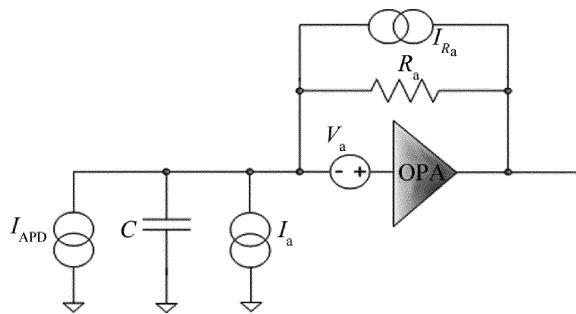


Fig. 1 Noise model of optical receiver unit

入射背景光功率, B 为光接收单元带宽, N_r 为光接收单元总噪声, R 是单位倍增因子条件下光谱响应度, I_d 是面暗电流, I_b 是体暗电流, I_{PD} 是光电流, F 是过剩噪声因子, q 是电子电荷, ω 是前置放大器的截止带宽, C 是总等效输入电容, R_a 是前置放大器的跨阻, I_a 是前置放大器等效输入噪声电流, V_a 是前置放大器等效输入噪声电压, k 是玻尔兹曼常数, T 是温度。

载流子在碰撞电离倍增过程中, 信号光电流平均增加 M 倍, 而载流子的倍增有起伏, 导致了噪声功率的倍增因子大于 M^2 , 一般用 $M^2 F$ 来表示, F 与倍增因子 M 有关, 为便于计算, 将 $M^2 F$ 记为 M^n , $n > 2$, n 值的大小与探测器材料、结构有密切关系^[6]。则光接收单元总噪声可表示为:

$$N_r^2 = 2q[I_d + (I_b + I_{PD})M^n] + 2qI_a + (V_a \omega C)^2 + \frac{4kT}{R_a} \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式, 对功率信噪比求 1 阶导数, 令其为零, 进而求得最佳倍增因子:

$$M_{opt} = \left[\frac{2qI_d + 2qI_a + (V_a \omega C)^2 + \frac{4kT}{R_a}}{(n-2)q(I_b + I_{PD})} \right]^{1/n} \quad (5)$$

从最佳倍增因子等式可以看出, 当探测器、前置放大器、负载电阻以及入射光功率确定后, 影响最佳倍增因子的主要参量是温度 T , 其中 $I_d, \omega, I_{PD}, I_b, 4kT/R_a$ 均受温度的影响。试验表明, 最大功率信噪比对应的最佳倍增因子受温度的影响不大, 如图 2 所示^[7]。但温

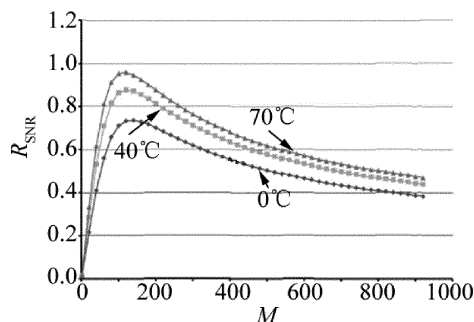


Fig. 2 Relationship between SNR and APD gain at $0^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}$

度的变化会引起倍增因子偏离最佳倍增因子 M_{opt} 。为了补偿这一变化,需设计最佳倍增因子线性化温控电路。

1.2 最佳倍增因子温度补偿分析

倍增因子不仅与探测器的结构和材质有关,还随温度和雪崩偏压的改变而变化。倍增因子 M 可表示为^[7-8]:

$$M = \frac{K}{(V_{break} - V_{bias})^m} \quad (6)$$

式中,系数 K, m 仅与探测器的结构、材质有关,当探测器确定时,其值为常数; V_{bias} 是雪崩管工作偏压, V_{break} 表示一定温度下探测器对应的雪崩击穿电压,其值与温度呈线性关系。倍增因子恒定时,雪崩管探测器的温度,即雪崩击穿电压系数的典型值是 $2.2V/^\circ C$ 。采用温度补偿措施,调节探测器雪崩工作偏压以 $2.2V/^\circ C$ 的变化率变化,即可补偿温度变化引起倍增因子对最佳倍增因子的偏离。

2 设计分析及测试验证

2.1 设计分析

雪崩管偏压线性化温控电路由以下单元组成:负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻/电压转换单元、自然对数放大器单元、温漂抑制单元、加法器、跟随器、高压转换单元,如图3所示。

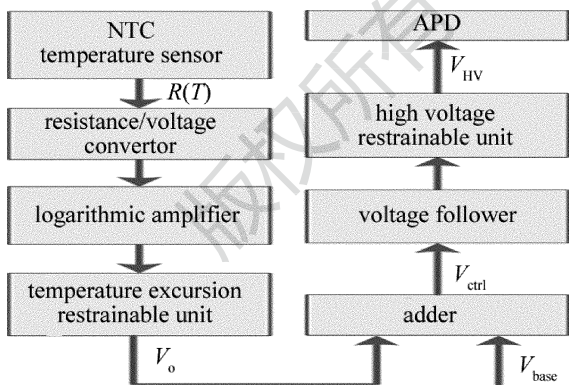


Fig. 3 Schematic diagram of linear temperature-controlling circuit

制冷型雪崩管探测器内置负温度系数热敏电阻,其阻值 $R(T)$ 与温度关系如下:

$$R(T) = 5.1 \times \exp\left[3200 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right] \quad (7)$$

可简化为:

$$R(T) = \alpha \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (8)$$

式中,系数 $\alpha = 0.0001111, \beta = 3200$ 。负温度系数热敏

电阻阻值-温度曲线见图4。

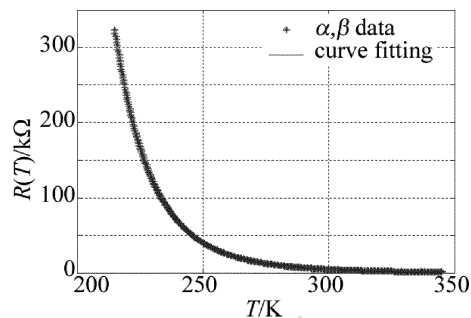


Fig. 4 Relationship between NTC resistance and temperature

负温度系数热敏电阻线性化温控电路设计见图5。输出电压 V_o 可表示为^[14]:

$$V_o = aT + b \quad (9)$$

$$a = -\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \times \frac{1}{11600} \times \ln\left(\frac{-\alpha \times R_2 \times V_8}{R_8 \times R_1 \times V_2}\right) \quad (10)$$

$$b = -\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \times \frac{\beta}{11600} \quad (11)$$

加法器输出的电压 V_{ctrl} 可表示为:

$$V_{ctrl} = \left(\frac{V_o}{R_5} + \frac{V_{base}}{R_6}\right) \times R_7 \quad (12)$$

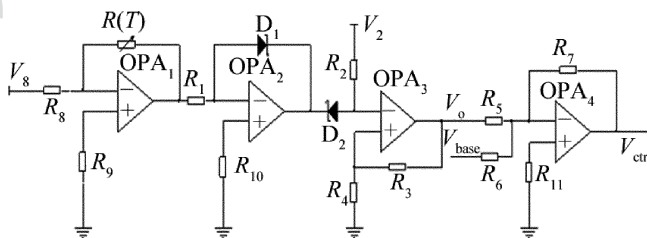


Fig. 5 Linear temperature-controlling circuit of NTC

设计高压转换电路单元,该电路是一种零伏起调促进升压变换单元,包含驱动部分、逆变部分、整流部分、滤波部分、采样部分、运算放大部分,克服了传统高压电源在起调时的电压过高或存在振荡的缺点,其功能框图见图6。该促进升压变换电路输入输出关系如

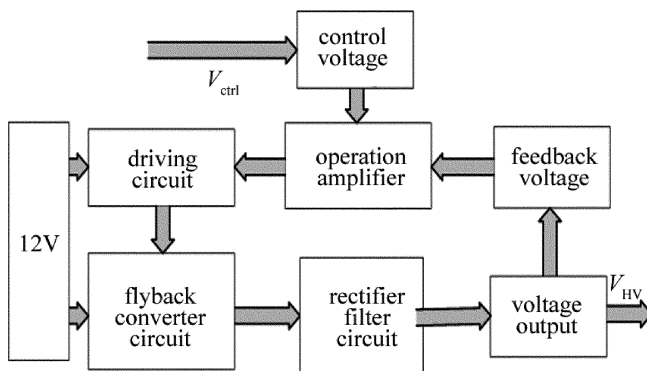


Fig. 6 Block diagram of boost high voltage conversion

图 7 所示,其中,离散点为测试值,直线为离散点的 1 阶拟合曲线,输出高压 V_{HV} 的 1 阶拟合曲线可表示为:

$$V_{HV} = 218.531V_{ctrl} + 7.717 \quad (13)$$

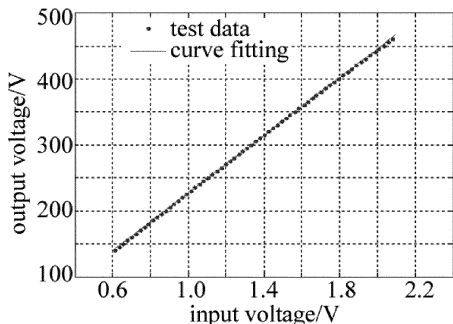


Fig. 7 Relationship between output voltage and input voltage

测试数据与拟合曲线的均方根值误差仅为 0.945。

将(9)式~(12)式带入(13)式,并(13)式求温度 T 的 1 阶导数,欲补偿温度变化导致的倍增因子对最佳倍增因子的偏离,则:

$$\frac{dV_{HV}}{dT} = 2.2 \quad (14)$$

令 $V_8 = -5V, V_2 = 5V$, 设置 $R_1, R_2, R_8, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ 适当阻值,根据雪崩管探测器常温实测最佳倍增效果,将 $T = 298K, V_{HV} = 350V$ 带入(13)式,求得 $V_{base} = 0.723V$,最终 V_{HV} 可简化为:

$$V_{HV} = 2.2T - 305.6 \quad (15)$$

V_{HV} 关系仿真曲线见图 8。由此可见,从理论上实现了由负温度系数热敏电阻到雪崩管偏压输出的线性化温控功能。

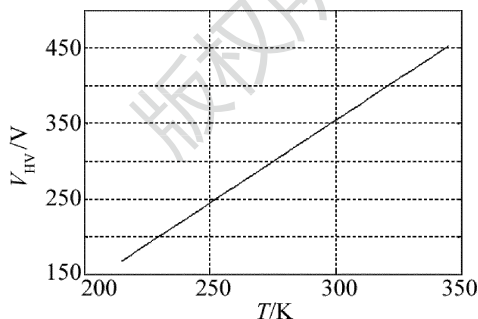


Fig. 8 Relationship between biased voltage and temperature

2.2 测试验证

在机载全温范围内 ($-55^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$), 测试探测器内置负指数电阻温度与雪崩偏压的关系, 测试结果见图 9。其中, 离散点为测试值, 直线为离散点的 1 阶拟合曲线, 1 阶拟合曲线可表示为: $V_{bias} = 2.29T + 305.6$, 测试数据与拟合曲线的均方根值误差为 1.019。试验表明, 最佳倍增因子线性化温控电路的温度系数为

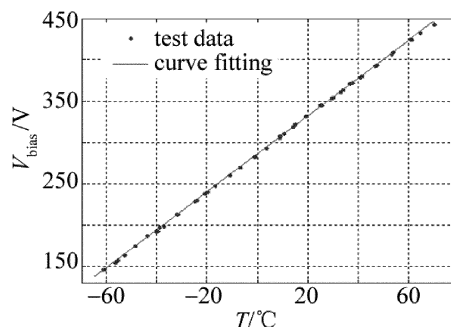


Fig. 9 Relationship between high voltage and temperature

$2.29V/^{\circ}C$, 与理论分析值 $2.2V/^{\circ}C$ 接近, 偏差仅为 4%。

将上述最佳倍增因子线性化温控电路应用于机载激光测距系统, 用激光二极管模拟激光回波, 雪崩管探测器将其转换成电信号, 主放大器对其进一步放大后, 输入到数字信号处理电路, 如图 10 所示。采集不同温度对应的回波波形, 如图 11 所示。回波信号幅值和反冲宽度间接反映了探测器倍增因子的大小。从测试波

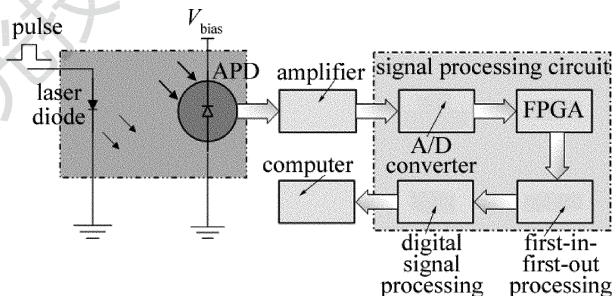


Fig. 10 System test

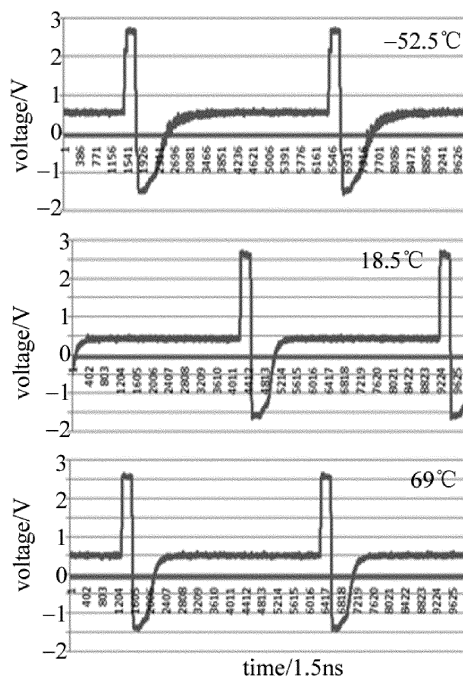


Fig. 11 The simulated echo waveform at $-52.5^{\circ}C, 18.5^{\circ}C, 69^{\circ}C$

形可以看出, -52.5°C , 18.5°C , 69°C 对应的波形接近一致, 也就是说, 其对应的倍增因子接近一致, 试验结果表明, 最佳倍增因子线性化温控电路在全温范围内具有良好的性能。

3 结 论

推导了最佳倍增因子公式, 分析了最佳倍增因子温度补偿措施, 设计了最佳倍增因子线性化温控电路。通过系统联试、性能测试, 给出了试验结果, 印证了理论分析。可以得出, 良好的雪崩偏压线性化温控电路能够增强机载激光测距系统的环境适应性。试验中, 发现雪崩偏压温控电路实测的温度系数为 $2.29\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 与理论分析值 $2.2\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 存在一定的偏差, 这主要是由高压转换电路的非线性引起的(高压电路的非线性度均方根值为 0.945), 在后续工作中, 建议应进一步改善高压转换电路的线性度。

参 考 文 献

- [1] LI G Y, CHEN D R. Research on a temperature compensation method of apd photo-electronic detector[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1998, 21(2): 49-52(in Chinese).
- [2] XU Zh P, SHEN H H, XU Y S. Signal-sampling circuit with temperature compensation for APD array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1500-1506(in Chinese).
- [3] RONG T P, MIAO L. Temperature compensation of APD optimal bias by MAX6605 [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2004, 32(5): 16-18(in Chinese).
- [4] SONG J H. Digital control bias circuit of APD with temperature compensation[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(2): 12-15(in Chinese).
- [5] LI X, PENG H, WANG Ch H. APD optimal gain control investigation for spaceborne laser range finder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 3041-3046(in Chinese).
- [6] JIANG Y S. Electrooptical technology and experiment[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Publishing House, 2000: 354-356(in Chinese).
- [7] FREDERIC L. Low noise optical receiver using Si APD[J]. SPIE, 2009, 7212: 523-534.
- [8] MA J L, FAN X T, YAN D K, et al. Design of laser range finding receiver circuit based on cooling-APD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2041-2044(in Chinese).
- [9] PRODUCT DATASHEET GROUP. A user guide—understanding avalanche photodiode for improving system performance [EB/OL]. (2017-12-11). http://www.excellitas.com/downloads/app_avalanchephotodiodesusersguide.pdf.
- [10] PROKE S. Influence of Temperature variation on optical receiver sensitivity and its compensation [J]. Radio Engineering, 2007, 16(3): 13-18.
- [11] PRODUCT DATASHEET GROUP. High-speed low-light analog APD receiver modules LLAM series [EB/OL]. (2017-12-11). http://www.excellitas.com/Downloads/DTS_LLAM.pdf.
- [12] XU Zh P, SHEN H H, XU Y S. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 8(1): 28-38(in Chinese).
- [13] WU D M. Linear compensation of thermistor temperature sensor[J]. Automation and Instrumentation, 2007, 12(2): 66-67(in Chinese).
- [14] SUN Zh W, LIU Y J. Design of a new performance testing instrument of laser rangefinders[J]. Laser Technology, 2011, 35(6): 792-794(in Chinese).
- [15] WU G X, DUAN F J, GUO H T. Optoelectronic heterodyne mixing and parameter optimization of avalanche photodiodes[J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 802-805(in Chinese).