

星载激光测距仪 APD 最佳雪崩增益控制技术研究

李 旭, 彭 欢, 王春辉

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对激光测距仪星载应用环境的特殊性, 研究了星载激光测距仪 APD 最佳增益控制技术。通过引入星载激光测距仪 APD 电流信噪比模型, 分析了影响星载激光测距仪 APD 信噪比的关键因素。针对某星载激光测距仪的具体应用, 展开了 APD 最佳增益控制技术研究, 设计了温度增益反馈控制电路, 并推导建立了温度增益数字反馈控制算法, 实验验证了控制电路及算法的正确性和良好的温度适应性。实验结果表明, 该控制电路和算法能够使得 APD 在 $-25\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围下保持恒定增益, 适用于星载激光测距仪 APD 最佳增益控制。

关键词: 星载激光测距仪; APD; 温度补偿; 增益控制

中图分类号: TP212.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520001

APD optimal gain control investigation for spaceborne laser range finder

Li Xu, Peng Huan, Wang Chunhui

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on space applications, avalanche photodiode (APD) optimal gain control was investigated in terms of space borne laser range finder. By introducing current SNR (signal to noise ratio) model, the key factors were analyzed which mainly affects SNR of APD in space borne laser range finder. According to special application of space borne laser range finder, optimal gain control of APD was studied. Temperature feedback control circuit for APD optimal gain was designed, temperature digital feedback control algorithm for APD optimal gain was deduced, and the validity and temperature adaptability of the control circuit and the algorithm were demonstrated. It is shown from the experiment that, because of the designed control circuit and algorithm, the gain factor of APD maintains is constant in the temperature range from $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, which meets the requirement for space borne applications.

Key words: space borne laser range finder; avalanche photodiode (APD); temperature compensation; gain control

收稿日期: 2015-09-10; 修订日期: 2015-10-13

基金项目: 中国空间技术研究院 CAST 基金

作者简介: 李旭(1979-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光总体技术相关方面的研究。Email: 10557314@qq.com

通讯作者: 彭欢(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从光电检测相关方面的研究。Email: penghuan622@163.com

0 引言

作为天基测绘系统的重要组成部分,星载激光测距仪用于获取星下点到地表的倾斜距离,配合线阵测距相机系统提高立体测绘精度,满足大比例尺测绘需求。星载激光测距仪一般采用时间飞行法脉冲测距体制,通过测量激光发射光脉冲与激光接收光脉冲的相对时间间隔,得到星下点地物距离信息。为满足大测绘幅宽的需求,星载激光测距仪一般工作在数百公里轨道,由大目标激光雷达方程可知,其数 MW 量级的激光发射功率经过 R^2 的距离衰减和大气双程衰减后,激光回波光功率一般仅为数十 nW 量级,如何有效地检测并提取如此微弱的激光回波信号是激光测距系统的关键。雪崩光电二极管(APD)量子效率高,具有极高的灵敏度和极短响应时间,成为星载激光测距仪微弱信号探测的首选探测器^[1]。为了降低激光探测系统噪声水平,提高激光探测系统信噪比,以满足测绘系统对测距精度的要求,国内外学者做了大量的研究工作。吕华等^[2]研究了激光成像系统中 APD 恒虚警控制技术,通过对 APD 工作温度和探测通道噪声水平的监测结果自动调整 APD 增益,获得最佳增益控制,此类控制方法在高重频地面测距应用中使用广泛。Frederic Laforce^[3]从原理上重点研究了 APD 增益、偏压与工作温度的关系,给出了不同温度环境下的增益调整技术途径,以获得不同温度下的最佳增益。赵希等^[4]根据 APD 在敌我识别系统中的具体应用,设计了可控高压源,用以实现不同温度和制造工艺下的 APD 最佳增益控制。黄庚华等^[5]研究了远距离、复杂背景辐射条件下的 APD 倍增因子控制方法,以获得最佳信噪比。欧阳俊华^[6]研究了激光雷达系统中的 APD 恒虚警控制技术,提出了一种基于 FPGA 的恒虚警控制电路,通过噪声监测有效地根据背景辐射进行自适应调整,保持恒定的虚警率。不过以上研究大都适用于地面或弹载高重频激光雷达应用,针对星载低重频对地测绘的应用研究鲜见报道。

影响星载激光测距系统信噪比的主要噪声来源为云、气溶胶及目标对太阳的反射和散射引起的背景辐射噪声^[7-8],而背景辐射的大小与目标的反射特性直接相关;由于卫星较快飞行速度(7.8 km/s)且星

载激光测距系统重复频率(2~10 Hz)较低,相邻激光足印跨度较大,如 2 Hz 重频下激光足印跨度约为 3.4 km,如此大跨度的激光足印下的背景辐射特性变化巨大,当前测量噪声统计特性无法准确反映下次测量噪声特性,给噪声的实时反馈控制带来极大困难和不确定性,针对星载应用,噪声的处理一般通过设置多阈值比较器或高速采集系统完成对激光探测系统噪声的统计工作,并通过恒比定时或者全波形采样技术获得较高的测距精度。

此外星载激光测距系统电子学产品工作环境复杂,不仅要受到空间粒子辐射的影响,最重要的是工作环境温度变化巨大,如某型号产品电子学工作温度范围-25℃~60℃,而主动热控又面临巨大的功耗开销,因此需要设计温度反馈控制回路,以实现不同温度下的最佳信噪比探测。

文中分析了星载激光测距系统应用环境的特殊性,通过引入 APD 电流信噪比模型,分析了影响 APD 信噪比的关键因素,研究了 APD 最佳雪崩增益控制技术,并实验验证了控制技术的有效性和正确性。

1 APD 最佳雪崩增益分析

作为星载激光测距仪光电探测的核心器件,APD 的工作特性直接影响激光测距仪的核心指标参数,突出表现在系统的信噪比上,而系统信噪比又直接影响系统的测距精度,此为测绘系统的最重要指标。APD 电流信噪比定义为信号光电流与噪声电流之比,在特定信号光下,APD 电流信噪比和 APD 探测器噪声信号负相关,APD 探测器主要噪声信号包括信号光散粒噪声、背景光噪声、背景光散粒噪声、暗电流噪声及热噪声等^[9-12]。APD 探测器的输出电流信噪比由下式表示:

$$SNR = \frac{i_{so}}{I_n} = \frac{i_s M}{\left[2qR_i(P_s + P_b)BMF_m + 2qi_{db}B + 2q(i_{db} + i_n)M^2F_mB + \frac{4KTB}{R_i} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中: i_s 为 $M=1$ 时的光电流,与输入信号光功率成正比; M 为 APD 探测器倍增因子; q 为电子电荷; R_i 为 APD 探测器响应度; P_s 为信号光功率; P_b 为背景光功率; B 为噪声频谱带宽; F_m 为 APD 探测器噪声系数; i_{db} 为 APD 探测器表面漏电流; i_n 为 APD 探测器

体漏电流; i_n 为背景光电流; K 为玻耳兹曼常量; T 为绝对温度; R_1 为 APD 探测器负载电阻。

信号光、背景光散粒噪声的产生是由入射光子的粒子性造成的,星载激光测距系统中 APD 电流倍增因子一般选在 100 左右,因此信号光、背景光散粒噪声与背景光噪声和探测器的暗电流噪声相比可以忽略不计,因此 APD 输出电流信噪比可以表示为:

$$SNR = \frac{i_{so}}{I_n} = \frac{i_s M}{\left[2q i_{db} B + 2q (i_{db} + i_n) M^2 FB + \frac{4KT B}{R_1} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

由公式(2)可知,APD 探测器输出电流信噪比与输入光功率、电流倍增因子、温度、暗电流、器件结构参数、等效噪声带宽及负载电阻大小等有关,其中在其他特性参数一定的情况下,存在一个最佳增益 M_{opt} 使得 APD 输出的电流信噪比达到最大,对应此最佳增益的偏压为 APD 最佳工作偏压。研究发现,APD 增益与温度线性相关,图 1 描述了文中实验得出的 APD 增益-偏压-温度的关系曲线,由图可知,欲使 APD 保持在某一恒定增益,必须对 APD 的偏压进行调整以补偿温度所造成的影响。星载激光测距系统无温控条件下的电子产品工作温度范围 $-25\text{ }^\circ\text{C} \sim +60\text{ }^\circ\text{C}$, 必须设置高精度的温度偏压反馈模块,以满足全工作温度范围内的最佳信噪比探测和高精度测距需求。

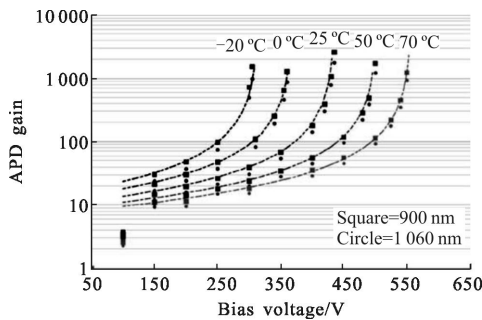


图 1 某型号 APD 增益-偏压-温度曲线

Fig.1 Experiment APD gain curve based on HV and temperature

2 APD 最佳增益控制技术

某型号星载激光测距系统选用的 APD 的型号为 C30659-1060-R8BH, 为 Perkinelmer 公司生产的以 C30954EH 为管芯的带有集成前置放大器的新产品,其内部封装有温度补偿二极管 D1N914,用以监测 APD 工作环境温度变化用以温度补偿。APD 探测器在响应度一定的情况下保持恒定增益时偏压温

度反馈系数为 $2.2\text{ V}/^\circ\text{C}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下 APD 增益为 100 时偏压为 321 V。激光测距系统在轨工作温度范围为 $-25\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$, 保持恒定增益为 100 时偏压变化范围为 211~398 V,如图 2 所示。

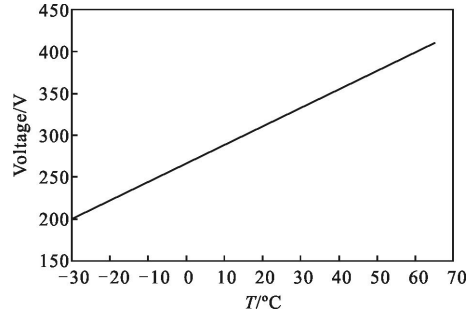


图 2 恒定增益下偏压温度曲线

Fig.2 Temperature vs HV curve for constant gain

通过实时采集 APD 工作环境温度动态调整其反向工作偏压以获得最佳增益控制,激光测距系统温度偏压反馈控制方案如图 3 所示。

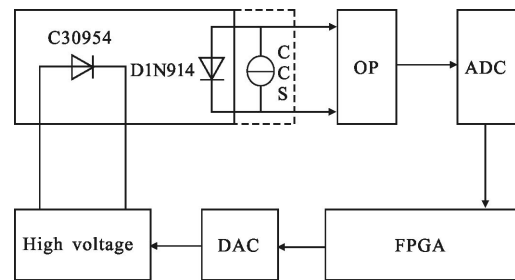


图 3 高压温度反馈控制框图

Fig.3 Feedback control block diagram of HV vs temperature

D1N914 温度补偿二极管工作在恒流状态下,其两端压降和温度具有良好的线性关系和较高的灵敏度 $-2.1\text{ mV}/^\circ\text{C}$, 采用三端稳压器 LM117 构成的恒流源电路示意图如图 4 所示,通过温度补偿二极管

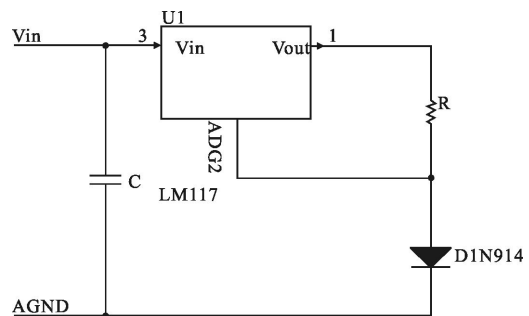


图 4 恒流源电路示意图

Fig.4 Frame for CCS circuit

D1N914 的电流为 V_{REF}/R , $V_{REF}=1.25\text{ V}$ 为 LM117 内部基准电压。为保证全温度范围内的测温精度,电阻 R 选用低温漂高精度的金属膜电阻。

运算放大器电路将温度补偿二极管输出反映 APD 工作环境温度的直流电压信号放大至合适电压幅度送入 ADC 采集,运算放大器应选用低温漂、低噪声、低带宽和高共模抑制比运算放大器以降低电路噪声对温度信号的干扰。

高压电路选用高精度低温漂低纹波的可控高压电源模块 521A-5,该高压模块输入输出满足 $y=ax+b$ 的线性关系,其中 a, b 为和电路有关系的常数, x 为高压模块控制端输入电压。实验标定高压模块输入控制电压与 APD 工作偏压如表 1 和图 5 所示,由图 5 可知,APD 工作偏压与高压模块输入控制电压满足 $y=121.9x+0.52$ 线性关系。控制电压采用 DAC 编程输出,输出控制电压范围 0~4.096 V,对应 APD 工作偏压 0~500 V,纹波系数<0.006%,温度系数<0.05%,满足 APD 在轨使用要求。

表 1 控制电压和 APD 偏压实测数据表

Tab.1 APD HV output experiment results vs control voltage

Control voltage/mV	HV output/V
427	52.41
847	103.8
1 266	154.9
1 686	206
2 105	257.2
2 522	308
2 942	359
3 361	410.1
3 644	444.4

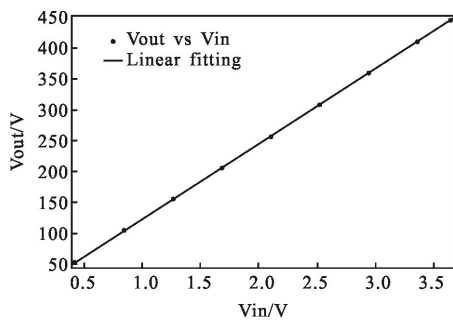


图 5 偏压与高压模块控制电压关系曲线

Fig.5 HV output experiment curve vs control voltage

温度偏压反馈控制电路在 FPGA 的统一调度下工作,控制算法如图 6 所示,反映 APD 工作环境温度的输出电压信号通过高精度 12 bit ADC 实现模数转换记录,经过补偿算法处理后 FPGA 输出编码驱动高精度 12 bits DAC 产生控制电压控制高压模块输出满足与温度适应的最佳偏压,ADC 和 DAC 参考电压均为 4.096 V。DAC 输出编码与 ADC 采集量化编码之间换算关系计算过程如下:

保持最佳增益 APD 偏压和温度满足:

$$HV_T=HV_{T_0}+K_1\times(T-T_0) \quad (3)$$

式中: HV_T 为温度为 T 时 APD 最佳偏压; HV_{T_0} 为温度为 T_0 时 APD 最佳工作偏压; K_1 为 APD 探测器响应度一定的情况下保持恒定增益时偏压温度反馈系数: $K_1=2.2\text{ V}/^\circ\text{C}$ 。

恒定驱动电流作用下,温度补偿二极管 D1N914 输出电压和温度满足:

$$DV_T=DV_{T_0}+K_2\times(T-T_0) \quad (4)$$

式中: DV_T 为温度为 T 时 D1N914 输出电压; DV_{T_0} 为温度为 T_0 时 D1N914 输出电压; K_2 为 D1N914 输出电压与温度反馈系数: $K_2=-2.1\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。

APD 工作偏压与高压模块输入控制电压满足:

$$HV_T=K_3\times V_C+K_4 \quad (5)$$

由图 5 可知, $K_3=121.9, K_4=0.52$ 。

ADC 采样量化编码 M 满足:

$$M=DV_T\times K_5\times 1\ 000 \quad (6)$$

式中: K_5 为运算放大器电路放大器增益, $K_5=5.2$ 。

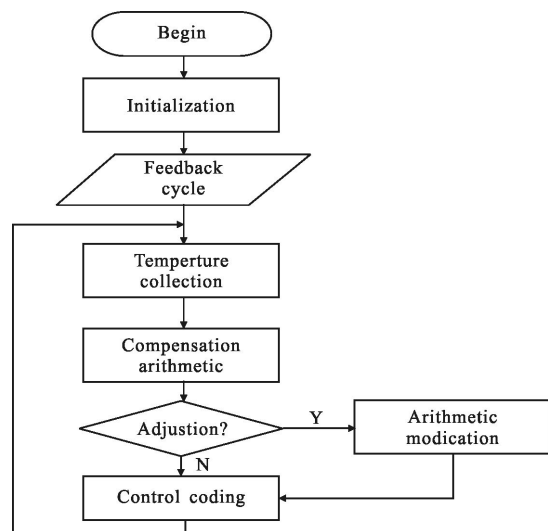


图 6 FPGA 控制流程图

Fig.6 FPGA control flow chart

高压模块控制电压与 FPGA 输出 DAC 编码 N 满足:

$$N = V_C \times 1000 \quad (7)$$

由公式(4)、(5)、(6)、(7)可以得出:

$$N = \frac{K_1}{K_2 \times K_3 \times K_5} \times M \left(\frac{HV_T0}{K_3} - \frac{K_4}{K_3} - \frac{K_1 \times DV_T0}{K_2 K_3} \right) \times 1000 \quad (8)$$

3 实验结果与分析

25℃时 APD 保持最佳增益时偏压 $HV_T0=321V$, 25℃时在 10mA 恒定驱动电流作用下温度补偿二极管 D1N914 标定输出电压 $DV_T0=521mV$, APD 偏压与高压模块输入控制电压满足高压模块输出满足 $HV_T=121.9 \times V_C + 0.52$, 带入公式(8)可以得出 FPGA 输出 DAC 控制编码 N 和 ADC 采样输入编码 M 满足 $N=6897-8.1967 \times M$ 。

设计时通过在测温回路增加多重低通滤波器, 并在反馈控制周期内对温度信号多次采样, 降低电路噪声对温度采样电路的影响, 提高温度偏压反馈控制准确度与精度。

针对激光测距系统在轨使用环境, 将激光探测系统放入空间环境模拟器内进行真空环境下的高低温循环实验, 实验过程中通过地面检测设备对激光探测系统关键参数进行监测, 表 2 为 APD 探测器工

表 2 不同 APD 温度下高压输出实验结果

Tab.2 HV output experiment results based on different APD temperature

Temperature /°C	Volt/V	Temperature /°C	Volt/V	Temperature /°C	Volt/V
-25.7	209.3	10.4	289.7	46.5	368.1
-23.8	213.3	12.3	293.6	48.4	372.0
-21.9	217.2	14.2	297.5	50.3	375.9
-20.0	221.1	16.1	301.4	52.2	381.8
-18.1	227.0	18.0	305.4	54.1	385.7
-16.2	230.9	19.9	309.3	56.0	389.6
-14.3	234.8	21.8	313.2	57.9	393.6
-12.4	238.7	23.7	319.1	59.8	397.5
-10.5	242.6	25.6	323.0	61.7	401.4
-8.6	246.6	27.5	326.9	-	-
-6.7	250.5	29.4	330.8	-	-
-4.8	256.4	31.3	334.8	-	-
-2.9	260.3	33.2	338.7	-	-
-1.0	264.2	35.1	342.6	-	-
0.9	268.1	37.0	347.4	-	-
2.8	272.0	38.9	352.4	-	-
4.7	276.0	40.8	356.3	-	-
6.6	279.9	42.7	360.2	-	-
8.5	283.8	44.6	364.2	-	-

作环境温度与 APD 工作偏压实验记录数据, 图 7 为 APD 工作环境温度与偏压实验关系曲线以及与仿真结果的对比, 从图 7 可以看出, 实验结果与仿真结果具有良好的一致性, 实验数据分析结果表明, -25℃~+60℃温度下 APD 控制偏压误差标准差为 0.5446V, 证明了激光探测系统 APD 探测器最佳增益控制技术的正确性与良好的温度适应性。

此外激光探测系统设计时预留 APD 偏压调整功能, 即根据激光测距系统在轨性能通过地面注入在轨调整 APD 工作偏压, 调整范围±16V, 配合其它调整手段, 以适应在轨应用状态与地面实验状态的不同。

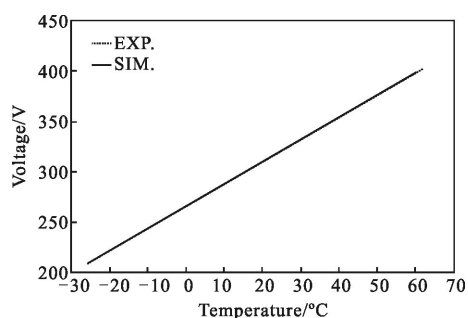


图 7 APD 工作环境温度与工作偏压实验曲线

Fig.7 Experiment curve of HV output vs APD temperature

4 结论

雪崩光电二极管(APD)具有量子效率高、灵敏度高和响应速度高等特点, 广泛用于激光测距系统, APD 电流增益随温度变化而不同, 严重影响了星载激光测距系统无温控条件下的在轨应用。利用温度补偿二极管 D1N914 良好的温度特性以及其在结构上、功能上的优势, 结合星载激光探测系统需求, 设计了数字化温度偏压反馈控制模块并实验验证了该系统在实际温度条件下的工作特性, 实验结果表明该模块电路对-25℃~+60℃的在轨工作环境输入具有良好的反馈补偿效果, 温度偏压控制误差为 0.5446V, 通过监测回波信号发现-25℃~+60℃温度范围 APD 工作增益稳定, 激光探测系统输出信噪比始终满足高精度测距需求, 满足设计指标。该电路模块结构简单、工作可靠, 适用于星载激光探测系统。

参考文献:

[1] He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Temperature compensation circuit design of laser diode ceilomerer's APD

- Receiver[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(3): 254–257. (in Chinese)
何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 半导体激光云高仪接收 APD 温度补偿电路设计和应用 [J]. *应用激光*, 2011, 31(3): 254–257.
- [2] Lv Hua, Wang Ri. Application of constant false alarm rate of APD 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.
- [3] Frederic Laforce. Low noise optical receiver using Si APD [C]//SPIE, 2009, 7212: 721210.
- [4] Zhao Xi, Di Jiajun. One kind applies to DC/DC that the APD opposite direction bias voltage controls shift circuit realization [J]. *Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology*, 2008, 24(1): 67–68. (in Chinese)
赵希, 狄甲军. 一种高性能 APD 反向偏压控制电路的实现 [J]. *吉林工程技术师范学院学报*, 2008, 24(1): 67–68.
- [5] Huang Genghua, Ouyang Junhua, Shu Rong, et al. Influence of background radiant power on the signal-to-noise ratio of space-borne laser altimeter [J]. *Infrared Millim Waves*, 2009, 28(1): 58–61. (in Chinese)
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] Ouyang Junhua, Huang Genghua, Cheng Pengfei, et al. Study of constant false alarm rate controlling technique based on FPGA in lidar [J]. *Infrared Millim 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.
- [7] Zhu Jin, Sun Shijun. Simulation Analysis of spaceborne Laser Altimeter Echo Signal [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(1): 67–78. (in Chinese)
朱近, 孙世军. 星载激光测距仪回波信号仿真分析 [J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(1): 67–78.
- [8] Wu Nan, Sun Shijun, Li Xu. Space-borne laser full-waveform ranging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(3): 68–75. (in Chinese)
吴南, 孙世军, 李旭. 星载激光测距仪全波形测距技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(3): 68–75.
- [9] Rong TaiPing Miao lin. Temperature compensation of APD optimal bias by MAX6605 [J]. *Huazhong Univ of Sci & Tech (Nature Science Edition)*, 2004, 32(4): 16–18. (in Chinese)
容太平, 苗林. 采用 MAX6605 实现 APD 最佳偏压温度补偿 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(4): 16–18.
- [10] Wang Dong, Zhang Fan, Huang Guangming, et al. The design of the circuit for APD bias control base on FPGA [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(6): 1219–1222. (in Chinese)
王东, 张凡, 黄光明, 等. 基于 FPGA 的光电倍增管 APD 偏压控制电路设计 [J]. *核电子学与探测技术*, 2008, 28(6): 1219–1222.
- [11] Feng Ying, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Real time compensation of laser detection system APD [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2010, 34(6): 787–791. (in Chinese)
冯颖, 张合, 张祥金, 等. 激光探测系统雪崩管实时补偿研究 [J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(6): 787–791.
- [12] Song Jianhua. Digital control bias circuit of APD with temperature compensation [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(2): 12–15. (in Chinese)
宋建华. 具有温度补偿的 APD 数控偏压电路 [J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(2): 12–15.