

文章编号:1001-9014(2009)01-0058-04

背景辐射功率对星载激光高度计信噪比的影响研究

黄庚华, 欧阳俊华, 舒嵘, 王建宇, 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:“嫦娥一号”卫星的有效载荷激光高度计通过测量发射与接收信号之间的时间间隔, 获得星—月距离数据. 本文分析了背景辐射功率、倍增因子与激光高度计最佳信噪比之间的关系, 并利用积分球进行了不同背景辐射功率下的信噪比试验, 验证了背景辐射功率以及雪崩二极管倍增因子对接收系统信噪比的影响. 结果表明, 在不同的背景辐射功率条件下, 存在不同的最佳倍增因子, 使接收系统获得最大信噪比.

关键词:星载激光高度计; 背景辐射功率; 雪崩二极管; 倍增因子; 信噪比

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

INFLUENCE OF BACKGROUND RADIANT POWER ON THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO OF SPACE-BORNE LASER ALTIMETER

HUANG Geng-Hua, OUYANG Jun-Hua, SHU Rong, WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The Chang'E lunar observation laser altimeter was designed to provide precise altimeter data to accurately map the lunar surface by measuring the time interval between the emission and receiving signal. The relationships of the background radiant power, the multiplication factor, and the optimum signal-to-noise ratio of the receiving system were analyzed. The signal-to-noise ratio experiment for different background radiant power was conducted by using the integrating sphere. The influences of background radiant power and APD multiplication factor on the signal-to-noise ratio of the receiving system were validated. The integrating sphere's simulation test shows that there are variant optimum multiplication factors to achieve the maximum signal-to-noise ratio under variant background radiant power conditions.

Key words: space-borne laser altimeter; background radiant power; avalanche photo diode (APD); multiplication factor; signal-to-noise ratio

引言

“嫦娥一号”月球探测卫星的有效载荷激光高度计主要服务于获取卫星星下点月表面的高度数据、绘制月球表面三维影像图的科学任务. 激光高度计的工作原理基于成熟的激光测距技术, 通过测量发射的激光主波脉冲信号与接收到的激光回波脉冲信号之间的时间间隔获得月球表面与卫星平台之间的精确距离.

根据激光对漫反射面目标的探测方程, 激光高度计接收到的回波信号功率由功率测距方程给出为^[1]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot S_r \cdot T_r \cdot \rho_1 \cdot \tau_{at}^2 \cdot \cos^2 \theta}{\pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

式中, P_t 为激光发射功率, S_r 为有效接收口径面积, T_r 为接收系统光学透过率, ρ_1 为月面反射率, τ_{at}^2 为月面大气双程传输透过率, θ 为激光束与月面之间的夹角, R 为激光高度计与月面距离.

激光高度计的发射功率由式(2)给出

$$P_t = \frac{W_t}{\tau}, \quad (2)$$

其中, W_t 为激光发射能量, τ 为激光发射脉冲的半脉宽.

激光高度计的工作轨道高度距离月面约为 200km, 考虑回波展宽变形以及最大测程的系统设计余量, 根据式(1), 激光高度计接收系统接收到的回波功率在 20nW 左右. 一般认为, 窄带滤光片可以

收稿日期: 2008-01-21, 修回日期: 2008-12-18

基金项目: 上海市科技发展基金月球探测三维数据处理关键技术研究 (045115018)

作者简介: 黄庚华 (1980-), 男, 广西靖西人, 博士研究生, 主要研究方向为激光遥感与应用.

Received date: 2008-01-21, revised date: 2008-12-18

抑制绝大部分背景辐射噪声,在这个前提下,背景辐射噪声对系统信噪比的影响可以忽略不计。但根据国外已公布的星载激光高度计系统设计参数,并结合我国月球探测卫星激光高度计的实际研制情况后,可以发现,在使用了窄带滤光片的接收系统中,带内背景辐射噪声仍是影响系统信噪比的重要因素。

本文对激光高度计接收系统噪声的主要来源展开了分析,围绕月面背景辐射功率与雪崩二极管倍增因子的变化,对激光高度计接收系统的信噪比变化趋势展开了研究,最后通过积分球模拟月面背景辐射功率对接收系统的信噪比变化趋势进行了试验验证。

1 激光高度计接收系统工作原理

图 1 显示了激光高度计的测量原理,激光器向月球表面发射一束功率为 P ,脉宽为 τ 的脉冲激光,主波探测器将发射脉冲的一小部分能量转变为主波信号,触发时间测量计数器开始计时。当从月球表面返回的激光回波脉冲进入光学接收系统后,回波接收电路将探测到的激光回波脉冲转变为回波电信号,触发时间测量计数器停止计时。由此获得光脉冲飞行时间,经数据计算得到距离值 $z = c\Delta T/2$,其中 c 表示真空中的光速, ΔT 表示激光往返时间。

激光高度计的回波接收电路的工作原理如图 2 所示,雪崩二极管将回波脉冲光信号转化为电信号,经匹配放大器进行放大后,由阈值检波比较器检出回波 TTL 信号,触发时间计数器停止计时^[2,3]。

雪崩二极管(APD)具有体积小、响应速度快、可靠性高等优点,是目前可见光、近红外区域激光信号探测的主要探测器之一,其具有的内增益(倍增因子)可将光电信号倍增上百倍,极大地提高了接收系统的信噪比。信号电流在流过雪崩二极管的过程中,由于自身起伏会引起散粒噪声(量子噪声);同时,雪崩二极管在倍增过程中,不但放大了散粒噪

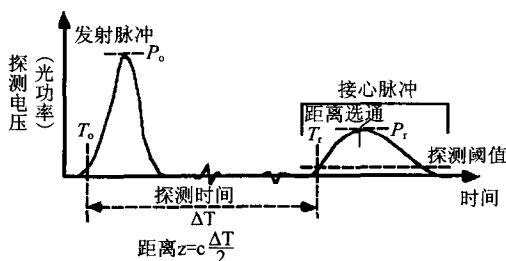


图 1 激光高度计测量原理图

Fig. 1 Rationale of the laser altimeter

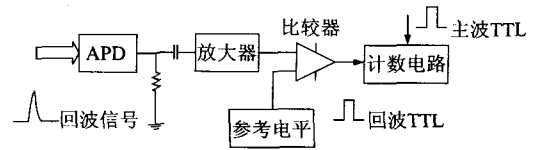


图 2 激光高度计回波接收电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the receiving system of the laser altimeter

声,而且也放大了因倍增因子的起伏而产生的新的噪声(过剩噪声),即雪崩光电二极管是一个具有过剩噪声系数的放大元件,此过剩噪声系数 F 是倍增因子 M 的函数,表示为^[4]

$$F = M \left[1 - (1 - a) \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, a 与倍增因子 M 及空穴和电子两种载流子的离化率比 α/β 有关,对于硅管, $k \approx 0.02$ 。

2 背景辐射功率对信噪比的影响分析

2.1 接收系统噪声组成

接收系统的噪声电流主要由雪崩二极管的散粒噪声 i_{nF} 、热噪声 i_{nt} 、放大器噪声 i_{nA} 组成^[3],由于三类噪声电流互不相关,总噪声电流的平方值可以表示为:

$$i_n^2 = i_{nF}^2 + i_{nt}^2 + i_{nA}^2 \quad (4)$$

(1) 散粒噪声

雪崩二极管的总散粒噪声平方值可以表示为:

$$i_{nF}^2 = i_{ns}^2 + i_{ndb}^2 + i_{nds}^2 \quad (5)$$

其中, i_{ns} 、 i_{ndb} 、 i_{nds} 分别为流过雪崩二极管的信号电流 i_s 、体漏电流 i_{db} 、面漏电流 i_{ds} 所产生的散粒噪声电流。

其中,由信号电流 i_s 产生的散粒噪声电流表示为^[5]

$$i_{ns}^2 = 2eB(P_r \times R_A)M^2F \quad (6)$$

式中, e 为电荷常数, B 为系统带宽(Hz), P_r 为雪崩二极管接收到的光功率(W), R_A 为雪崩二极管单位倍增因子的响应率(A/W), M 为雪崩二极管的倍增因子。

由体漏电流 i_{db} 引起的散粒噪声电流表示为^[5]

$$i_{ndb}^2 = 2eBi_{db}M^2F \quad (7)$$

面漏电流 i_{ds} 不参与倍增过程,引起的散粒噪声电流表示为^[5]

$$i_{nds}^2 = 2eBi_{ds} \quad (8)$$

(2) 热噪声

热噪声是指在阻值为 R 的电阻体内部,由于载流子无规则散射而引起的噪声。热噪声是一种与频率无关的白噪声,其电流平方值为^[5]

$$i_{ni}^2 = \frac{4kTB}{R}, \quad (9)$$

式中, k 为波尔兹曼常数; T 为热力学温度(K).

(3) 放大器噪声电流

放大器噪声电流指的是在信号放大过程中, 由于放大器自身原因引入的噪声量, 其电流值为

$$i_{na} = NEP \cdot \sqrt{B}, \quad (10)$$

式中, NEP 为放大器等效噪声系数.

由于散粒噪声与热噪声、放大器噪声为独立不相关的变量, 雪崩二极管总噪声电流的平方值可以表示为

$$\begin{aligned} i_n^2 &= i_{nf}^2 + i_{ni}^2 + i_{na}^2 \\ &= 2eB(P_s \times R_A)M^2F + 2eBi_{db}M^2F + 2eBi_{ds} \\ &\quad + \frac{4kTB}{R} + B \cdot NEP^2. \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 接收系统信噪比计算

对于光脉冲探测, 入射光在时域上表现为间断的脉冲信号, 表示为

$$I_s = R_A MP_r. \quad (12)$$

由入射光引起的过剩噪声也相应表现为间断的噪声信号. 由于总的信噪比为入射信号与噪声信号的均方根之比, 对于存在背景光条件下的光脉冲信号探测, 由于背景光信号的直流分量被交流耦合电容隔离, 影响系统噪声的因素为背景光信号的散粒噪声电流. 由式(11)、(12), 信噪比表达式可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{i_s}{i_n} \\ &= \frac{R_A MP_r}{\sqrt{2eB(P_s \times R_A)M^2F + 2eBi_{db}M^2F + 2eBi_{ds} + \frac{4kTB}{R} + B \cdot NEP^2}}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中, P_s 为雪崩二极管接收到的背景辐射功率.

2.3 背景辐射功率对系统信噪比的影响分析

在带外背景光被充分抑制的前提下, 进入雪崩二极管的背景光噪声主要为太阳光照射在月球表面后, 进入雪崩二极管的带内背景光噪声, 在太阳高度角为 90° 的条件下, 可表示为^[6]

$$P_s = E_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \eta_r \cdot \pi \cdot \left(\frac{\theta_{FOV} \cdot R}{2}\right)^2 \cdot \frac{r_{diff}}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\phi_{tel}^2}{R^2}, \quad (14)$$

式中, P_s 为接收到的带内背景光功率(W), E_λ 为窄带滤光片中心波长附近, 太阳在目标表面产生的光谱辐照度 ($W/m^2/nm$), $\Delta\lambda$ 为窄带滤光片带宽 (nm), η_r 为接收光学效率, θ_{FOV} 为接收视场角 (rad), R 为目标到激光高度计的距离(m), r_{diff} 为窄

带滤光片中心波长附近的月面反射率, ϕ_{tel} 为接收望远镜有效口径(m).

垂直入射的太阳在月球表面产生的光谱辐照度可以表示为

$$E_\lambda = M_\lambda \times \frac{r_{solar}^2}{d^2}, \quad (15)$$

式中, M_λ 为太阳在 λ 处出射的光谱辐出度 ($W/m^2/nm$), r_{solar} 为太阳半径 (m), $r_{solar} = 6.69 \times 10^8 m$, d 为太阳到月球的距离 (m).

对于月球探测激光高度计, 日月最近距离 $d = 1.5 \times 10^{11} m$, 在激光波长为 1064nm 附近, 太阳的光谱辐出度 $M_\lambda = 2.94 \times 10^4 W/m^2/nm$ ^[7]. 激光高度计的滤光片带宽 $\Delta\lambda = 5nm$, 接收光学效率 $\eta_r = 0.8$, 接收视场角 $\theta_{FOV} = 2.5mrad$, 轨道高度 $R = 200km$, 月面 1064nm 附近反射率 $r_{diff} \approx 0.15$, 接收望远镜有效孔径 $\phi_{tel} = 128mm$. 代入式(14)、(15), 激光高度计接收到的背景光功率 $P_s = 6.94nW$.

根据式(13), 当进入接收系统的背景光功率发生变化时, 假设雪崩二极管体漏电流保持不变, 接收到的信号功率 $P_s = 20nW$ 时, 激光高度计的输出信噪比曲线随倍增因子的变化曲线簇如图3所示.

由此可以看出, 背景光噪声功率对系统信噪比的影响随功率大小不同而不同. 在 $P_s = 0 \sim 1nW$ 区域, 由背景光噪声功率所贡献的接收系统电流噪声小于热噪声与放大器贡献的噪声, 对系统信噪比影响不大. 当背景噪声功率逐渐增大, 成为系统的主要噪声源后, 系统信噪比逐渐恶化.

同时, 倍增因子 M 也对系统最佳信噪比有较大影响. 由式(13), 接收背景光功率和信号功率为一定值时, 信号电流随倍增因子 M 增加. 但由于过剩

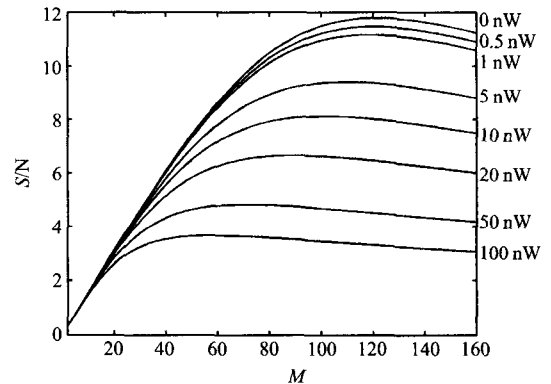


图3 倍增因子 M 、背景噪声功率与信噪比 S/N 的关系曲线
Fig. 3 The relationships between the signal-to-noise ratio and the multiplication factor (M) at different values of background noise power

噪声指数 F 与体漏电流 i_{ab} 也随 M 的增加而增加,在 M 较大的区间,分母中第一项、第二项的过剩噪声功率的增加率超过信号功率增加率,使 S/N 恶化. 倍增因子较小时,在 $M = 1$ 附近,过剩噪声比热噪声、放大器噪声小得多,总噪声表现为热噪声与放大器噪声,不随倍增因子的增加而增加.

因此,在不同背景光功率下的最佳倍增因子是不断变化的,随着进入接收系统的背景噪声功率的增加,获得最佳信噪比的倍增因子值相应降低.

3 试验设计及结果

背景辐射功率对信噪比影响试验的仪器组成框图如图 4 所示,采用积分球模拟不同强度的背景辐射亮度,由光学衰减器衰减至适当的量级. 背景光经接收光学系统会聚及窄带滤光片滤波后,被雪崩二极管接收. 通过对雪崩二极管的偏置电压调整控制其倍增因子,同时记录由放大电路输出的噪声情况.

通过调整积分球的光源组合,积分球在 1060nm 波段的输出的光谱辐亮度以及雪崩二极管接收到的背景辐射功率如表 1 所示.

在外围试验环境不变的条件下,将积分球光源更换为激光器脉冲光源,将激光发射功率衰减至合适的数量级,得到放大器输出的激光信号峰值与雪崩二极管偏置电压的关系曲线,如图 5 所示.

综合上述试验数据,得到在固定信号输入功率、变化背景辐射功率条件下,激光高度计信噪比随雪崩二极管偏置电压(倍增因子)变化的曲线,如图 6 所示.

与图 3 的计算结果相比,主要区别在于信噪比曲线在末端迅速下降,其原因为此时雪崩二极管的偏置电压已接近雪崩击穿电压区域,暗电流急剧增大,从而导致信噪比曲线的迅速下降.

表 1 积分球输出的光谱辐亮度

Table 1 The luminance of the integrating sphere

波 长	电流强度	积分球光谱辐亮度 ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)		
		辐亮度 1	辐亮度 2	辐亮度 3
1060nm	3.75A	80.36	160.72	241.08
APD 接收到的背景辐射功率		5nW	10nW	15nW

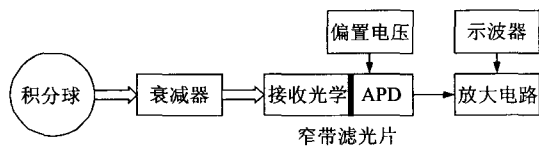


图 4 试验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the test

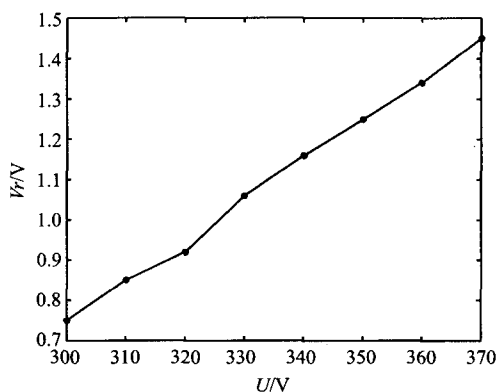


图 5 信号峰值 V_r 与雪崩二极管偏置电压 U 关系曲线
Fig. 5 Variation of the signal's peak values (V_r) and the APD backward voltages (U)

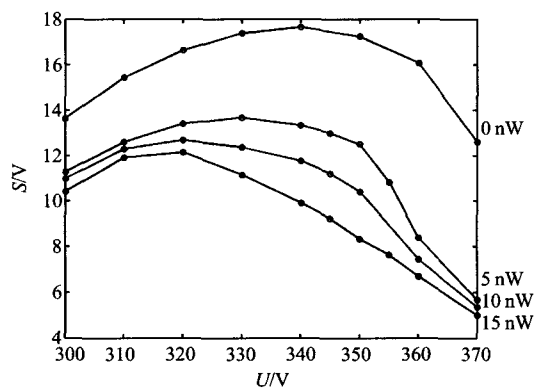


图 6 偏置电压 U 、背景噪声功率与信噪比 S/N 的变化曲线
Fig. 6 Variation of the signal-to-noise ratio with the APD backward voltages (U) at different values of the background noise power

4 结语

由以上分析计算以及系统试验结果,可以得出以下结论:

(1) 即使在接收光学系统内设计了窄带滤光片,进入激光高度计接收系统的背景辐射能量仍会对接收系统信噪比有较大的影响,信噪比曲线随背景辐射功率的增加而整体降低.

(2) 接收系统的信噪比随雪崩二极管偏置电压(倍增因子)变化而变化. 在接收信号功率和背景辐射功率一定的条件下,存在一个最佳的偏置电压(倍增因子),获得最大信噪比. 该偏置电压(倍增因子)为式(13)的极值点,此时背景光散粒噪声电流的平方约等于放大电路噪声和热噪声电流平方和.

(3) 不同背景噪声条件下存在不同的最佳偏置电压点.

(下转第 71 页)

由图 4 图 5 可以看出本文方法不但在斑点抑制上而且在方向信息保持上明显优于小波域方法。

4 结语

基于 SAR 图像统计特性和几何多尺度统计模型给出一种相干斑抑制方法. 该方法在 Contourlet 几何多尺度变换域分析了 SAR 图像统计特性, 与隐马尔可夫树模型相结合, 利用最小均方误差估计和 Bayes 估计给出一种有效的系数收缩算子. 在自然图像去噪和 SAR 图像斑点抑制实验中与小波域 HMT 算法进行了比较, 本文方法在相干斑抑制和方向信息保持上均有明显改进.

REFERENCES

- [1] Hua X, Pierce L E, Ulaby F T, Statistical properties of logarithmically transformed speckle[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(3):721—727.
- [2] Min D, Cheng P, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(8):1642—1648.
- [3] Foucher S, Benie G B, Boucher J M. Multiscale MAP filtering of SAR images [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001, **10**(1):49—60.
- [4] Argenti F, Alparone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(11):2363—2374.
- [5] ZHAO Xia, WANG Zheng-Ming. Adaptive regularization variation method for SAR image feature-enhancement and speckle-removal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵侠, 王正明. SAR 图像相干斑抑制和特征增强的自适应正则化变分方法. *红外毫米波学报*), 2007, **26**(2):112—116.
- [6] Achim A, Tsakalides P, Bezerianos A. SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(8):1773—1784.
- [7] JIAO Li-Cheng, TAN Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. *ACTA Electronica Sinica* (焦李成, 谭山. 图像多尺度几何分析: 回顾和展望. *电子学报*), 2003, **31**(12A):43—50.
- [8] YANG Shu-Yuan, WANG Min, JIAO Li-Cheng. High-ratio compression of remote sensing image based on ridgelet and neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨淑媛, 王敏, 焦李成, 基于脊波和神经网络的大压缩比遥感图像压缩. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4):297—301.
- [9] Do M N, Vetterli M. Contourlets: a new directional multi-resolution image representation [C]. *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference*, 2002, **1**, 3—6.
- [10] Po D D-Y, Do M N. Directional multiscale modeling of image using the contourlet transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(6):1610—1620.

(上接第 61 页)

因此,对于远距离、复杂背景辐射功率探测条件下的激光高度计接收系统设计,除采取减小接收视场、压低窄带滤光片带宽等光学系统设计措施外,还需根据背景辐射功率的情况,对雪崩二极管的倍增因子进行控制,保证接收系统的最佳信噪比。

REFERENCES

- [1] CHEN Yu-Wei, ZHANG Li, HU Yi-Hua, et al. Array detection technology of echo on earth observation laser imager [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈育伟, 张立, 胡以华, 等. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3):169—171.
- [2] CHEN Dianren, ZOU Chao. The research of APD laser echo - wave signal detect circuit system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (陈殿仁, 邹超. APD 激光回波信号探测电路系统研究. *长春理工大学学报*), 1999, **25**(2):16—17.
- [3] WU Gang, LI Chun-Lai, LIU Yin-Nian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴刚, 李春来, 刘银年, 等. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3):213—216.
- [4] QI Hong-Xing, SHU Rong, MA De-Min, et al. Elemental recognition method based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (齐洪兴, 舒嵘, 马德敏, 等. 基于激光诱导离解光谱技术的元素识别方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4):52—55.
- [5] LIANG Fang, SUN Xiao-Ming, QIANG Xi-Fu. Range estimation in phase-shift laser rangefinder with non-cooperative target [J]. *Optical Technique* (梁芳, 孙晓明, 强锡富. 非合作目标相位式激光测距系统的测程估计. *光学技术*), 1999, **5**:29—30.
- [6] Cole T D, Davidson F M. Performance evaluation of the near-earth asteroid rendezvous (NEAR) laser rangefinder [J]. *Proc. SPIE, Photonics for Space Environments IV*, 1996, **2811**:164—165.
- [7] ZHANG Hai-Hong, WANG Jian-Yu, SHU Rong, et al. Effects of solar radiation on the receiver of near infrared laser altimeter [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张海洪, 王建宇, 舒嵘, 等. 太阳辐照对近红外激光高度计接收系统的影响. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4):426—428.