

噪声对星载激光测高仪测距误差的影响

周 辉^{1,2}, 李 松^{1,2}, 王良训¹, 郑国兴^{1,2}

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072;
2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

摘要: 噪声是影响星载激光测高仪测距误差的重要因素。根据星载激光测高仪接收脉冲回波和噪声的分布特点, 推导出接收脉冲回波信号时间重心的方差的理论表达形式, 建立了噪声对激光测距误差的影响模型。基于激光测距误差最小化的原则, 提出了一种星载激光测高仪低通滤波器的优化设计方法。以 Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) 激光测高仪基本测量参数为输入条件, 仿真分析了激光测距误差和低通滤波器均方根脉宽的优化结果的分布规律。对于倾斜度为 0° ~ 40° 且粗糙度为 0~15 m 范围内的目标而言, 噪声所导致的激光测距误差范围为 0.28~32.49 cm, 相应地, 低通滤波器均方根脉宽优化值的范围为 1.4~57.4 ns。针对倾斜度在 1° 范围内的目标, 解算得到 GLAS 星载激光测高仪低通滤波器均方根脉宽为 2.2 ns, 这与其实际公布的 2 ns 很接近。同时, 低通滤波器的优化结果所对应的激光测距误差发生大幅减小, 其最大值减小至 10.93 cm, 减小幅度接近 3 倍。结果表明, 噪声是影响星载激光测高仪测距误差的重要因素, 合理设计低通滤波器的参数可以消除其部分影响, 这对于星载激光测高仪的硬件设计和性能评估具有一定实际应用价值。

关键词: 星载激光测高仪; 接收脉冲回波信号; 噪声; 测距误差; 低通滤波器

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2256-06

Influence of noise on range error for satellite laser altimeter

Zhou Hui^{1,2}, Li Song^{1,2}, Wang Liangxun¹, Zheng Guoxing^{1,2}

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Geospatial Information Collaborative Innovation Center, Wuhan 430079, China)

Abstract: Noise is an important factor of affecting range error for satellite laser altimeter with recording waveform. According to the distribution characteristic of received pulse signal and noise, the theoretical expression form about variance of time-centroid for received pulse signal was deduced. Thereby, the impact model of noise on range error was built-up. Base on the principle of minimizing range error, an optimization design method for low-pass filter was put forward. In terms of basic measurement parameters for Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), the distribution regularities of range error and RMS pulse width for low-pass filter were simulated. As for linear target of geometrical parameters within 40° slope angle and 15 m roughness, the extent of range error is 0.28~32.49 cm. Correspondingly, the scope of RMS pulse width for low-pass filter is 1.4~57.4 ns. Aimed at targets with scope of 1° slope angle, the

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-08

基金项目: 基础测绘科技计划; 测绘地理信息公益性行业专项(201412007); 上海航天科技创新基金项目(SAST201422)

作者简介: 周辉(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光遥感、激光测距和激光合作目标技术等方面的研究。

Email: abidingmyself@163.com

computed value of low-pass filter for GLAS is 2.2 ns, which is close approximate to 2 ns as published practically value. Meanwhile, on basis of optimizational results for low-pass filter, the range errors decrease significantly. The maximum of range error is decreased to 10.93 cm and corresponding reduction level gets 3 times. All the results show that impact model of noise on range error and optimization design method for low-pass filter is correct. They provide practical application values for hardware design and performance assessment of satellite laser altimeter.

Key words: satellite laser altimeter; received pulse signal; noise; range error; low-filter pass

0 引言

具备回波记录功能的星载激光测高仪是一种以激光作为测量光源的主动式遥感设备,它主要由发射子系统和接收子系统两部分组成。通过对接收子系统所收集和记录的接收脉冲回波数据的处理和分析,可以计算出接收脉冲回波的时间重心,以获取高精度的激光测距值^[1]。星载激光测高仪在测量过程中受到大气延迟和散射效应、目标展宽和噪声等多种因素的影响^[2-3],因此,其激光测距误差水平受到一定程度的制约。

噪声是影响星载激光测高仪测距误差的重要因素之一,它对激光测距误差的影响规律与接收脉冲回波形态和噪声分布特性有关。国内外部分学者已开展过星载激光测高仪测距误差模型的研究,其中,绝大多数研究提出了相关的假设和近似条件并且仅考虑了部分噪声的影响^[4-7]。以 Gardner 和 Harding 为典型代表,他们在假定低通滤波器脉宽要远小于接收脉冲回波信号脉宽时,提出了噪声对接收脉冲时间重心方差的影响。然而,在实际的星载激光测高仪硬件系统中,低通滤波器的脉宽可能会超出回波信号的脉宽,这与星载激光测高仪实际测量过程存在差异,导致其结论具有一定的局限性。

文中从星载激光测高仪接收脉冲回波的建立过程出发,剖析接收脉冲回波形态和噪声的分布特点,通过推导接收脉冲回波信号时间重心方差的表达形式,构建了噪声对激光测距误差影响的数学模型,并基于该模型提出了低通滤波器的优化方法,从而为星载激光测高仪的设计和性能指标的评估提供了直接的理论依据。

1 接收脉冲回波形态与噪声特性分布

星载激光测高仪接收脉冲回波是发射子系统所

发射的激光脉冲经过大气传输和目标反射后,由接收子系统的接收望远镜采集、光电探测器转换、低通滤波器滤波和数字仪采样所得到的时域信号^[8],具体的建立过程如图 1 所示。

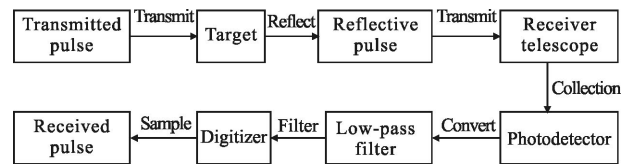


图 1 星载激光测高仪接收脉冲回波信号的建立过程

Fig.1 Establishment process of received pulse signal for satellite laser altimeter

考虑到星载激光测高仪在工作过程中存在环境噪声和系统噪声,因此,接收脉冲回波信号是有效脉冲回波信号与噪声之和,它可以表示为:

$$v(t)=y(t)+n(t) \tag{1}$$

式中: $y(t)$ 表示有效脉冲回波信号; $n(t)$ 表示噪声。

1.1 有效脉冲回波信号的特征参数

在仅考虑大气衰减效应的情况下,对于典型的平面漫反射体目标而言,其有效脉冲回波信号可以采用单高斯模型及其特征参数来描述,即^[11]:

$$y(t)=\frac{N_s}{\sqrt{2\pi} \kappa_s} \exp\left[-\frac{(t-T_s)^2}{2\kappa_s^2}\right] \tag{2}$$

其中,总能量 N_s 、时间重心 T_s 和均方根脉宽 κ_s 为有效脉冲回波信号的特征参数,它们的数学关系式为^[15]:

$$N_s=GeR_L \cdot Np_s=GeR_L \cdot \frac{\eta_t E_t}{hu_0} \cdot \eta_a \eta_r \cdot (\beta \cos \alpha) \cdot \frac{A_r}{\pi \rho^2};$$

$$T_s \approx \frac{2\rho}{c}; \kappa_s^2 \approx (\kappa_i^2 + \kappa_f^2) + \frac{4r^2 \cos^2 s_{//}}{c^2 \cos^2(\phi + s_{//})} + \frac{4\rho^2 \tan^2 \theta_i}{c^2} \left[\tan^2(\phi + s_{//}) + \frac{\tan^2 s_{\perp} \cos^2 s_{//}}{\cos^2(\phi + s_{//})} \right] \tag{3}$$

式中: Np_s 为入射至光电探测器表面的激光回波信号总能量; E_t 和 κ_i 分别为发射激光的单脉冲能量和均方根脉宽; θ_i 为发射激光光斑中心能量 $e^{-1/2}$ 处的光

束发散角, hu_0 为发射激光的单光子能量; η_a 为大气的单程透过率; β 为目标表面反射率; α 为激光指向与目标法线之间的夹角; $s_{//}$ 和 s_{\perp} 分别为目标在平行和垂直于飞行轨迹方向的倾斜角; r 为目标粗糙度的标准差; η_r 为接收光学系统的透过率; A_r 为接收望远镜的有效面积; G 和 η_d 分别为光电探测器的增益系数和量子效率; R_L 为接收系统的负载电阻; κ_f 为低通滤波器的均方根脉宽; c 为光速; e 为电子电量; Φ 为激光指向角; ρ 为激光测高仪与目标之间的距离, $\rho \approx H/\cos\phi$, H 为卫星的轨道高度。

1.2 噪声的特性分布

星载激光测高仪在工作过程中主要存在五种噪声来源, 包括太阳背景噪声、光电探测器噪声、光子噪声、热噪声和量化噪声。其中, 光子噪声是有效脉冲回波信号在光电转换过程中的粒子性引起的, 它与有效脉冲回波信号的时域分布有关。其他几种噪声主要是由太阳背景光、探测器组件内部工作过程和量化过程等因素引起, 它们与有效脉冲回波信号的时域分布无关。

总噪声可以近似看作标准差为 $\delta_n(t)$ 的高斯白噪声, $\delta_n^2(t) = \delta_p^2(t) + \delta_{np}^2$, 其中, $\delta_p(t)$ 和 δ_{np} 分别为光子噪声和其他噪声的标准差, 它们满足以下关系式^[9]:

$$\delta_p^2(t) = Fe^2G^2R_L^2 \int_{-\infty}^{+\infty} h_f^2(\tau)p(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

$$\delta_{np}^2 = \left(2e^2G^2FB \frac{\eta_d}{hu_0} P_B + 2eG^2FBI_{dk} + I_{amp}^2 B + \frac{4KWFB}{R_L} \right) \cdot \left(R_L + \frac{\Delta A^2}{12} \right) \quad (5)$$

式中: F 为与光电探测器转换过程有关的噪声系数; $h_f(t)$ 为低通滤波器的脉冲响应函数, 它通常为高斯形式, $h_f(t) = \exp[-t^2/(2\kappa_f^2)]/(\sqrt{2\pi}\kappa_f)$; B 为低通滤波器的带宽, $B = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} h_f^2(\tau)d\tau = 1/(4\sqrt{\pi}\kappa_f)$; $p(t)$ 为入射至光电探测器表面的激光回波信号, 它仍满足单高斯模型, 对应的总能量、时间重心和均方根脉宽分别为 Np_s 、 T_s 和 κ_p , $\kappa_p^2 = \kappa_s^2 - \kappa_f^2$; P_B 为太阳背景噪声的功率, $P_B = \gamma F_B \theta_{FOV}^2 A_r \beta \eta_a \eta_r$, 其中, γ 为背景辐射的光谱辐射亮度, F_B 为空间滤波片的带宽, θ_{FOV} 为接收望远镜的半视场角; I_{dk} 和 I_{amp} 分别为光电探测器的体暗电流噪声和前置放大电流噪声的功率谱密度; K 为波耳兹曼常数; W 为探测器温度; ΔA 为数字的量化步长。

2 噪声对激光测距误差的影响模型

根据接收脉冲回波信号时间重心的定义, 并结合噪声的特性分布, 可以得到在存在噪声条件下接收脉冲回波的时间重心的关系式为:

$$T_{sn} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} tv(t)dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} v(t)dt} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} ty(t)dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)dt} + \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} tn(t)dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)dt} = T_s + T_n \quad (6)$$

式中: T_n 为噪声所引入的附加时间, 与噪声和有效脉冲回波信号的总能量有关。它们满足以下性质:

$$\langle T_{sn} \rangle = T_s + \langle T_n \rangle \approx T_s \quad (7)$$

式中: 符号“ $\langle \rangle$ ”表示均值运算。基于概率统计理论中方差的概念, 可以解算出接收脉冲回波信号时间重心的方差, 其表达式为:

$$\text{Var}(T_{sn}) = \langle (T_{sn} - T_s)^2 \rangle = \langle T_n^2 \rangle = \text{Var}(T_n) \quad (8)$$

式中: “ $\text{Var}(\)$ ”表示方差运算。

假定数字仪的采样时间间隔为 Δt , 同时设定激光回波信号 $p(t)$ 的时间重心为 0, 以方便模型的简化计算, 则可以构建出接收脉冲回波信号时间重心的方差模型, 其关系式为:

$$\text{Var}(T_{sn}) = \frac{\text{Var}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} tn(t)dt\right]}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)dt\right]^2} = \frac{\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} (t_i \Delta t)^2 \text{Var}[n(t_i)]}{\left[\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} y(t_i) \Delta t\right]^2} = \frac{\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} (t_i \Delta t)^2 \delta_n^2}{\left[\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} y(t_i) \Delta t\right]^2} \quad (9)$$

式中: m 为接收脉冲回波信号的采样总点数, $m = [T/\Delta t]_{\text{int}}$, 符号“ $[]_{\text{int}}$ ”表示取整运算, $t_i = i\Delta t$, 其中, T 为有效脉冲回波信号的时间宽度, 它通常取为 4 倍的均方根脉宽, 即 $T \approx 4\kappa_s$ 。

根据噪声标准差 δ_n 的数学模型, 可以解算得到接收脉冲回波信号时间重心的方差, 其关系式为:

$$\text{Var}(T_{sn}) = \frac{\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} (t_i \Delta t)^2 [\delta_p^2(t_i) + \delta_{np}^2]}{\left[\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} y(t_i) \Delta t\right]^2} = \frac{\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} [t_i^2 \delta_p^2(t_i) \Delta t]}{\left[\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} y(t_i) \Delta t\right]^2} + \frac{\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} (t_i^2 \Delta t) \delta_{np}^2 \Delta t}{\left[\sum_{i=-m/2}^{i=m/2} y(t_i) \Delta t\right]^2} \quad (10)$$

若采用离散形式来描述关系公式(10),则通过展开可以得到其表达式为:

$$\text{Var}(T_{sn}) = \frac{F\Delta t \sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-M/2}^{j=M/2} [t_i^2 h_f^2(\tau_j) p(t_i - \tau_j)] \Delta\tau \Delta t}{[\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} p(t_i) \Delta t]^2} + \frac{(T^3 + 3T^2\Delta t + 2T\Delta t^2) \delta_{np}^2 \Delta t^2}{(12\Delta t) [\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} y(t_i) \Delta t]^2} \quad (11)$$

式中: M 为低通滤波器脉冲响应函数的离散总点数, $M = [T_f/\Delta\tau]_{int}$, $\tau_j = j\Delta\tau$, 其中, T_f 为低通滤波器脉冲响应函数的时间宽度, $\Delta\tau$ 为离散间隔。

通常情况下, 当时间间隔 Δt 足够小时, 关系公式(10)可以改写为积分形式, 通过简化可以得到其关系式为:

$$\text{Var}(T_{sn}) = \frac{\Delta t \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 \delta_p^2(t) dt}{[\int_{-\infty}^{+\infty} y(t) dt]^2} + \frac{\delta_{np}^2 \Delta t \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 dt}{[\int_{-\infty}^{+\infty} y(t) dt]^2} = \frac{2FB\Delta t (\kappa_p^2 + \kappa_f^2 / 2)}{Np_s} + \frac{T^3}{12\Delta t} \frac{\delta_{np}^2 \Delta t^2}{N_s^2} \quad (12)$$

由噪声特性所影响的激光测距误差可以表示为 $d\rho = c\sqrt{\text{Var}(T_{sn})}/2$ 。若激光回波信号的均方根脉宽 κ_p 远大于低通滤波器的均方根脉宽 κ_f , 定义接收脉冲回波信号的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{N_s}{\sqrt{2e^2 G^2 FBNp_s R_L^2 \Delta t + \frac{T^3}{12\kappa_s \Delta t} \delta_{np}^2 \Delta t^2}} \quad (13)$$

因此, 激光测距误差可以表示为 $d\rho = c\kappa_f/(2\text{SNR})^{[7]}$ 。显然, 采取减小有效脉冲回波信号的均方根脉宽和增加回波信号的信噪比, 可以减小星载激光测高仪的测距误差。

在星载激光测高仪其他系统参数不变的情况下, 往往可以通过优化设计低通滤波器的脉宽, 以达到增加信噪比与减小激光测距误差的目的。若以激光测距误差最小化为原则, 则可以解算出低通滤波器脉宽的优化值, 即

$$\kappa_0 = \{ \kappa_f | d\rho(\kappa_f) \} = \min [d\rho(\kappa_f)] \quad (14)$$

式中: κ_0 为低通滤波器的脉宽优化结果。对于不同的测量目标而言, 由于接收脉冲回波形态和噪声特性存在差异, 优化设计得到的低通滤波器的均方根脉宽数值不同。若被测目标的空间几何参数存在一定

的数值范围, 则可以采取一定的原则来设计低通滤波器。典型地, 当目标倾斜度或粗糙度数值范围较小时, 对应的低通滤波器均方根脉宽的优化值可以表示为:

$$\kappa_0' = (\kappa_{of} + \kappa_{or})/2 \quad (15)$$

式中: κ_{of} 和 κ_{or} 分别表示低通滤波器均方根脉宽的最小优化值和最大优化值。

3 噪声对激光测距误差影响的仿真分析

美国国家航空航天局(NASA)研制了多颗星载激光测高仪系统, 其中, 在 2003 年发射了全球首颗地球科学星载激光测高仪(GLAS), 主要用于监测极区冰层的消融情况, 获取了大量高精度的观测成果^[10], 其测量的基本参数如表1 所示。

表 1 星载激光测高仪基本测量参数

Tab.1 Basic measurement parameters for satellite laser altimeter

Name and signal of parameters		Value
	Photon energy($h\nu_0$)/J	1.87×10 ⁻¹⁹
Hardware parameters of laser	RMS width of transmitted laser pulse(κ_t)/ns	1
	Energy of transmitted laser pulse(E_t)/mJ	100
	Laser beam divergence(θ)/ μ rad	29
	Area of receiver telescope(A_r)/m ²	0.638
	Field-of-view of receiver telescope(θ_{fov})/mrad	0.25
	Transmittance of receiver telescope(η_r)	0.5
	Bandwidth of optical filter for receiver(F_B)/nm	2
	Quantum efficiency of APD(η_d)	0.35
Hardware parameters of receiver system	Gain coefficient of APD(G)	194
	Noise factor of APD(F)	3.24
	Bulk dark current of APD(I_{dk})/pA	50
	Equivalent noise current spectral density of preamplifier(I_{amp})/pA·Hz ^{-1/2}	2
	Equivalent noise temperature of APD(W)/K	300
	Equivalent load resistance of APD(R_L)/ Ω	22000
	RMS width of low-pass filter(κ_f)/ns	2
	Sampling time interval of digitizer(Δt)/ns	1
	Step size of digitizer(ΔA)/V	65.36/2 ¹⁶
Environmental parameters	Average solar spectral irradiance(γ)/W·(m ² ·nm) ⁻¹	0.66
	One-way atmospheric transmittance(η_a)	0.5
	Satellite orbital altitude(H)/km	600
	Laser pointing angle(Φ)/(°)	0

考虑到有效脉冲回波信号的均方根脉宽和时间宽度与平面目标的倾斜度和粗糙度有关,因此,基于表 1 中的测量参数模拟绘制了不同目标倾斜度和粗糙度条件下激光测距误差的分布规律,如图 2 所示。图 2 中假定目标倾斜度 $s_{//}$ 和 s_{\perp} 相等, 并采用符号 s 来表示。

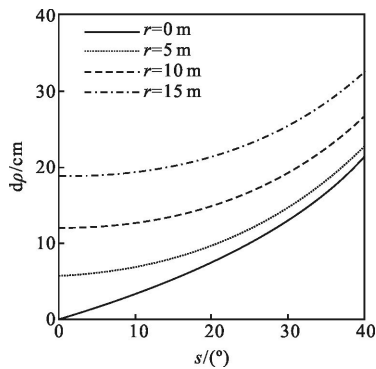


图 2 激光测距误差与目标倾斜角和粗糙度的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between laser range error and slope angle, roughness of target

从图 2 中可以看出,随着目标倾斜角或粗糙度的增加,激光测距误差迅速增加。当目标倾斜度和粗糙度均为 0 时,激光测距误差仅为 0.28 cm。当目标倾斜度和粗糙度分别为 40° 和 15 m 时,激光测距误差达到 32.49 cm,这主要是由于目标倾斜度和粗糙度增加导致回波信号的均方根脉宽增加所造成的。

基于星载激光测高仪低通滤波器优化设计的基本原则,仿真模拟出相应的低通滤波器均方根脉宽随目标参数的变化规律,如图 3 所示。

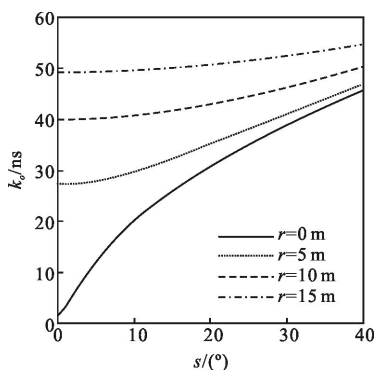


图 3 低通滤波器均方根脉宽的优化结果

Fig.3 Optimizational results of RMS pulse width of low-pass filter

图 3 显示,随着目标倾斜角和粗糙度的增加,低通滤波器的优化值有所增加,其增加幅度与目标倾

斜角和粗糙度大小有关。若目标粗糙度较小,则低通滤波器优化值会随着目标倾斜角的增加而迅速增加。相反,若目标粗糙度较大,则低通滤波器优化值随着目标倾斜角的增加而缓慢增加。典型地,当目标粗糙度分别为 0 m 和 15 m 时,低通滤波器的均方根脉宽的数值范围分别为 1.4~45.6 ns 和 49.3~57.4 ns。

典型地, GLAS 所测量的极区冰层目标的粗糙度近似为 0 m, 倾斜度绝大多数都在 1° 范围内,因此,可以设计得到低通滤波器均方根脉宽的优化值为 2.2 ns, 这与 GLAS 系统所提供的 2 ns 很接近,表明了激光测距误差模型和低通滤波器设计方法的正确性。

以低通滤波器均方根脉宽优化结果为依据,可以获取到相应的激光测距误差的分布规律,如图 4 所示。

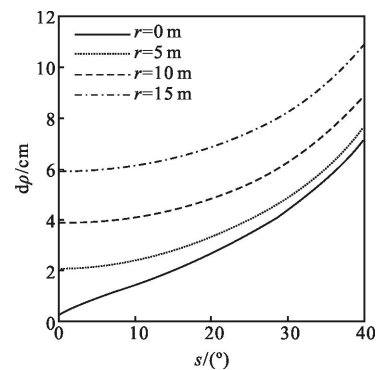


图 4 低通滤波器均方根脉宽优化结果对应的激光测距误差

Fig.4 Range error corresponding to optimizational results of RMS pulse width of low-pass filter

从图 4 中可以看出,利用优化得到的低通滤波器均方根脉宽可以有效地减小噪声对激光测距误差的影响,其减小程度与目标空间几何参数有关。特殊地,当目标倾斜度和粗糙度分别为 40° 和 15 m 时,激光测距误差从原来的 32.49 cm 减小为 10.93 cm,减小幅度接近 3 倍,表明了激光测距误差模型和低通滤波器设计方法的正确性。

4 结论

基于星载激光测高仪接收脉冲回波形态和噪声的特性分布,利用数值分析方法构建了噪声对激光测距误差的影响模型。同时,以该模型为理论基础,提出一种面向具有波形记录功能的星载激光测高仪

低通滤波器的优化设计方法。依据 GLAS 星载激光测高仪基本硬件参数, 仿真分析了噪声对激光测距误差的影响规律并给出低通滤波器均方根脉宽的优化值。结果表明: 对于倾斜度在 1° 范围内的目标所优化得到的低通滤波器均方根脉宽为 2.2 ns, 与实际公布的 2 ns 很接近; 对应的激光测距误差最大值从原来的 32.49 cm 减小为 10.93 cm, 验证了相应理论模型的正确性, 对于星载激光测高仪的硬件设计和性能评估具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Brenner A C, Zwally H J, Bentley C R, et al. The algorithm theoretical basis document for derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights [R]. USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2012.
- [2] Chen Shuhang, Li Zile, Chen Mengzhu, et al. Influence of atmospheric multiple scattering effects on the range bias for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2522–2526. (in Chinese)
陈舒杭, 李子乐, 陈梦竹, 等. 大气多次散射效应对星载激光测高仪测距偏差值的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2522–2526.
- [3] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 813–820. (in Chinese)
马跃, 李松, 周辉, 等. 系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 813–820.
- [4] Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing, et al. An optimizational design method for receiver filter bandwidth of satellite laser altimeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 136–140. (in Chinese)
周辉, 李松, 郑国兴, 等. 星载激光测高仪系统接收滤波器的带宽优化设计 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 136–140.
- [5] Garener C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30 (5): 1061–1071.
- [6] Harding D J, Bufton J L, Frawley J J. Satellite laser altimetry of terrestrial topography: vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32 (2): 329–339.
- [7] Santovito M R, Tommasib L, Sgarzic G, et al. A laser altimeter for BepiColombo mission: Instrument design and performance model [J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(7): 645–660.
- [8] Li Song, Zhou Hui, Shi Yan, et al. Theoretical model for return signal of laser altimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(1): 33–39. (in Chinese)
李松, 周辉, 石岩, 等. 激光测高仪的回波信号理论模型 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 33–39.
- [9] Abshire J B, Sun X L, Afzal R S. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(15): 2449–2460.
- [10] Sun X L, Abshire J B, McGarry J F, et al. Space lidar developed at the NASA goddard space flight center—the first 20 years [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1660–1675.