

星载激光测高仪系统接收滤波器的带宽优化设计

周 辉¹ 李 松¹ 郑国兴¹ 涂兰芬² 张 强²

(¹武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)
²中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要 星载激光测高仪(SLA)接收滤波器带宽(RFB)直接决定系统的使用性能。根据星载激光测高仪的工作原理,建立了激光测高仪回波信号及输出信噪比(SNR)的简化模型,并推导了测距误差、探测概率和虚警概率的数学表达式。在探测概率和虚警概率满足阈值要求的前提下,提出了一种以测距误差最小化为依据的滤波器带宽优化设计方法。以 MOLA-2 星载激光测高仪系统为例,仿真计算出不同目标倾角对应的滤波器带宽值及其测距误差的分布规律。结果表明,在 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 目标倾角范围,滤波器带宽优化设计值比传统方法设计的结果要大,其差异达到 $0.7\sim 58.7$ MHz,而对应的测距误差要小于传统方法解算的数值,其差异为 $0.2\sim 16.2$ m。受测量对象多样性和复杂性的限制,无法使每个探测目标对应一个滤波器,则采用多个通道的滤波器分段式地对优化的测距误差分布曲线进行拟合,以获取到每个通道的滤波器带宽及对应的探测目标倾角范围。滤波器带宽优化设计方法为其实际制造提供了一种更为优越和可行的方案。

关键词 遥感;星载激光测高仪;滤波器带宽;信噪比;测距误差;多通道

中图分类号 TN249;P216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0908002

Optimizational Design Method for Receiver Filter Bandwidth of Satellite Laser Altimeter

Zhou Hui¹ Li Song¹ Zheng Guoxing¹ Tu Lanfen² Zhang Qiang²

(¹School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)
²China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract Receiver filter bandwidth (RFB) of satellite laser altimeter (SLA) resolves the key performances of SLA. According to the operational principle of SLA, the theoretical models of received signal and receiver signal-to-noise ratio (SNR) are established, and the mathematical expressions about range error, probability of detection and false alarm are deduced. Under the condition that probability of detection and false alarm can satisfy the threshold, an optimizational design method for RFB on the basis of minimizing the range error is put forward. As an example of MOLA-2, the distributions of RFB and range error related with different target slope angles are simulated. The results show that the optimizational design values of RFB are larger than values given by conventional method within 40° target slope angle, whose difference limits the scope from 0.7 MHz to 58.7 MHz. However, corresponding range errors are less than them obtained by conventional method, the extent of their difference is $0.2\sim 16.2$ m. With the restrictions of target variety and complexity, it is difficult to make every target correspond with a receiver filter during its manufacture, so multiple receiver filter channels are set up to piecewise fit the distribution curve of range errors, the RFB and corresponding scope of target slope angle for each channel are achieved. The optimizational method of designing the RFB provide a superior and practicable scheme for manufacturing receiver filter.

Key words remote sensing; satellite laser altimeter; receiver filter bandwidth; signal-to-noise ratio; range error; multiple channels

OCIS codes 120.0280; 120.1880; 350.6090

收稿日期: 2012-04-25; **收到修改稿日期**: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(40901165)、民用航天“十二五”预先研究项目和中央高校基本科研业务费专项资金(274805)资助课题。

作者简介: 周 辉(1979—),男,博士,副教授,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。

E-mail: abidingrnyself@163.com

1 引 言

星载激光测高仪(SLA)是一种利用激光回波信号的时间分布来获取其与目标之间的距离的遥感设备^[1,2]。接收机滤波器是星载激光测高仪系统中的关键硬件设备,通过合理设计滤波器带宽(RFB)可以有效地减小噪声对回波信号的影响,提高激光测高仪系统的测距精度^[3,4]。针对星载激光测高仪滤波器带宽设计方法,国内外公开报道的文献很少。其中,Sun等^[5~7]提出以系统输出信噪比(SNR)最大化为依据进行滤波器带宽的设计。事实上,若探测目标、传输环境和其他系统参数不变的情况下,信噪比的增加会改变滤波器的带宽,使得回波信号的脉宽发生变化,直接影响系统测距精度。

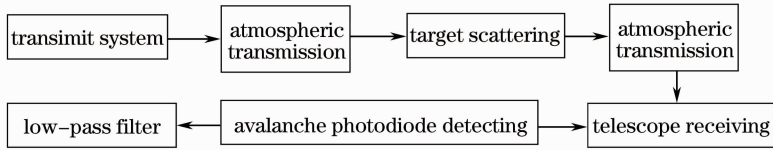


图 1 激光测高仪测量方法示意图

Fig. 1 Measurement method diagram for laser altimeter

在仅考虑大气衰减效应并忽略目标粗糙度影响的条件下,对于具有一定倾斜度的平面目标而言,激光测高仪回波信号可近似描述为高斯函数形式。若将激光测高仪回波信号的时间重心平移至零点以便数据的分析处理,则其数学表达式为

$$s(t) = S + f(t) = S + N_r \exp[-t^2 / (2\delta_r^2)] / (\sqrt{2\pi}\delta_r), \quad (1)$$

式中 S 和 $f(t)$ 分别为回波信号的直流分量和交变分量, N_r 和 δ_r 分别为交变分量的总能量和均方根脉宽,它们满足^[9]:

$$N_r = \frac{E_i A_r}{\pi R^2} \eta_r \rho \sigma_a^2 \frac{G \eta_d q}{h\nu_0} \cos \sigma, \quad (2)$$

$$\delta_r^2 = \delta_i^2 + \delta_t^2 + \frac{4R^2 \tan^2 \theta_T}{c^2} (\tan^2 \theta_T + \tan^2 \sigma),$$

式中 E_i 为发射激光的单脉冲能量, A_r 为接收望远镜口径, ρ 为表面漫反射系数, η_r 为接收光学系统的透射率, τ_a 为单程大气衰减系数, η_d 为雪崩光电二极管(APD)的量子效率, q 为电子电量, $h\nu_0$ 为光子能量, R 为激光测高仪与目标之间的斜距, θ_T 为光斑中心能量 $\exp(-1/2)$ 处的光束发散角, δ_i 为发射激光脉冲的均方根脉宽, δ_t 为高斯带通滤波器的均方根脉宽, c 为光速, σ 为平面目标的倾角,它通常维持在 40° 范围以内^[10]。

事实上,在激光测高仪回波信号的建立过程中,各种噪声会叠加在回波信号上,导致接收系统输出

考虑到绝大多数星载激光测高仪最核心的性能指标为测距误差,因此本文提出一种以测距误差最小化为依据并且使系统探测概率和虚警概率均满足规定要求的滤波器带宽优化设计方法。同时,考虑到滤波器在研制过程中无法保证每个目标与滤波器相对应,则设置多通道的滤波器并分配合理的带宽值,使得每个通道滤波器对应于不同的目标测量范围。

2 激光测高仪输出信噪比的理论模型

激光测高仪回波信号是其发射激光脉冲信号经大气传输和目标散射后^[8],由其接收系统采集并处理得到的时域信号。激光测高仪的测量方法如图 1 所示。

信噪比发生降低。通常情况下,噪声主要包括量子噪声、背景噪声和探测器的暗电流噪声、前置放大噪声以及热噪声^[11]。所有噪声的方差可以表示为

$$I_n^2 = 2q(P_r + P_b + I_{dk})G^2FB + I_{amp}^2B + \frac{4KTFB}{R_l}, \quad (3)$$

式中 I_{dk} 为 APD 探测器的暗电流, G 为 APD 探测器的增益, F 为 APD 探测器的噪声系数, I_{amp} 为前置放大器的等效噪声电流谱密度, K 为波尔兹曼常数, T 为 APD 探测器的等效噪声温度, R_l 为等效负载电阻, B 为带通滤波器的带宽。 P_r 和 P_b 分别为回波信号和背景噪声的平均功率,它们可以表示为

$$P_r = N_r / T_r, \quad P_b = rF_B \theta_{FOV}^2 A_r \eta_r \rho \sigma_a^2 \frac{\eta_d q}{h\nu_0} \cos \sigma, \quad (4)$$

式中 T_r 为回波信号的全脉宽, T_r 通常取值为 4 倍的回波信号的均方根脉宽 δ_r ,这样可以保证回波信号能够被完整地采集。 r 为背景辐射的光谱辐射亮度, F_B 为空间滤波器的带宽; θ_{FOV} 为接收系统的半视场角。对于常见的高斯带通滤波器而言,其滤波函数 h_f 及带宽 B 可描述成

$$h_f = \frac{\exp\left(-\frac{t^2}{2\delta_f^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\delta_f}, B = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} h_f^2(t) dt}{2} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}\delta_f}. \quad (5)$$

基于激光测高仪回波信号和噪声的数学模型,可以

得到接收系统输出信噪比的表达式为

$$S_{NR} = I_r / I_n = \frac{GP_r}{\sqrt{2q(P_r + P_b + I_{dk})G^2FB + N_{amp}^2B + \frac{4KTFB}{R_1}}} \quad (6)$$

式中 I_r 为回波信号的平均电流, I_n 为噪声方差。(6)式表明,在发射系统和探测器系统参数确定的情况下,对于不同的探测目标,改变滤波器带宽会使得接收系统输出信噪比发生变化,因此优化滤波器的宽度是改善接收系统输出信噪比的重要因素。

3 激光测高仪带通滤波器带宽优化设计的理论依据

激光测高仪带通滤波器带宽优化设计的目的是通过控制滤波器带宽的大小,合理分配回波信号的脉宽和信噪比的数值,使得激光测高仪测距误差尽可能地最小化,并保证接收系统的探测概率和虚警概率满足规定的指标要求。

基于激光测高仪回波信号脉宽和信噪比数学模型,激光测高仪测距误差可表达为^[12]

$$e(B) = \frac{cT_r}{2S_{NR}} \quad (7)$$

考虑到回波信号的全脉宽 T_r 和输出信噪比 S_{NR} 均与带通滤波器的带宽有关,因此激光测高仪测距误差 e 是滤波器带宽 B 的函数。激光测高仪接收系统探测概率 P_d 和虚警概率 P_f 满足^[12]

$$P_d(B) = \int_{s_{th}}^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{(x - \langle s \rangle)^2}{2I_n^2}\right]}{\sqrt{2\pi}I_n} dx, \quad (8)$$

$$P_f(B) = \int_{s_{th}}^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{(x - S)^2}{2I_n^2}\right]}{\sqrt{2\pi}I_n} dx.$$

同样,由于噪声方差 I_n 与滤波器带宽有关,则探测概率和虚警概率是滤波器带宽 B 的函数,(8)式中 s_{th} 和 $\langle s \rangle$ 分别为回波信号的探测阈值和均值,它们满足:

$$s_{th} = S + I_{th}, \quad \langle s \rangle = S + I_r, \quad (9)$$

式中 I_{th} 为回波信号交变分量的阈值, $I_{th} = \frac{\tau GN_r}{\sqrt{2\pi}\delta_r}$, τ

为激光测高仪恒定比阈值系数,该系数取值为 0.5 时可得激光测距误差尽可能地小^[13]。

将(9)式代入(8)式中,可以得到探测概率和虚警概率的表达形式为

$$P_d(B) = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{I_r - I_{th}}{\sqrt{2}I_n} \right) \right],$$

$$P_f(B) = 0.5 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{I_{th}}{\sqrt{2}I_n} \right) \right], \quad (10)$$

式中 $\operatorname{erf}(x)$ 为标准误差函数。

利用回波信号的平均电流 I_r 及其交变分量的阈值电流 I_{th} 的表达形式,结合系统信噪比 S_{NR} 的定义,可以解算出探测概率和虚警概率与 S_{NR} 之间的关系:

$$P_d(B) = 0.5 \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right) S_{NR} \right] \right\},$$

$$P_f(B) = 0.5 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{S_{NR}}{\sqrt{\pi}} \right) \right]. \quad (11)$$

因此若限定探测概率和虚警概率的数值范围,则实质上是对系统信噪比的取值增加了约束条件。

假定激光测高仪探测概率和虚警概率的指标要求分别为 P_{dp} 和 P_{fp} , 滤波器带宽的上限和下限分别为 B_1 和 B_2 , 则对于倾角为 σ 的探测目标而言,可以解算出满足探测概率和虚警概率指标要求的滤波器带宽集合:

$$\Theta = \{ B \mid P_d(B) \geq P_{dp} \& P_f(B) \leq P_{fp}, B_1 \leq B \leq B_2 \}. \quad (12)$$

在集合 Θ 内搜索测距误差最小值对应的滤波器带宽 B_p 即为滤波器的优化带宽,即

$$B_p = \{ B \mid e(B) = \min[e(B)] \}, B \in \Theta. \quad (13)$$

实际上,在激光测高仪带通滤波器制造过程中,受测量对象多样性和复杂性的限制,不计成本也无法做到。因此,通常情况激光测高仪系统仅仅设置若干通道的带通滤波器,使得不同通道的滤波器能够满足一定倾角范围目标的探测要求。考虑到滤波器带宽的重新选取会导致激光测距误差、探测概率和虚警概率发生变化,则在探测概率和虚警概率满足阈值的条件下,必须限定每个通道内激光测距误差的均方根偏差:

$$\delta e = \sqrt{\sum_{i=1}^M (e_i - e'_i)^2 / M}, \quad (14)$$

式中 M 和 e' 分别为每个通道内目标的倾角数目和激光测距误差的分布。若均方根偏差 δe 小于规定的阈值 ϵ , 则输出对应通道的带通滤波器的优化结果。

4 数值仿真实例

美国航空航天局(NASA)研制的火星观察者激光测高仪(MOLA-2)搭载在火星全球勘探者号卫星上,用于获取火星表面的数字高程模型。卫星的轨

道高度为 400 km,激光测高仪系统的主要参数如表 1 所示^[10]。

表 1 MOLA-2 激光测高仪系统参数
Table 1 MOLA-2 system parameters

| Parameter | Value |
|---|--------|
| Laser wavelength λ /nm | 1064 |
| Laser pulse width δ_t /ns | 3.397 |
| Laser pulse energy E_t /mJ | 42 |
| Laser divergence angle θ_T /mrad | 0.0925 |
| One way atmosphere transmission τ_a | 0.5 |
| Surface reflectivity ρ | 0.26 |
| Telescope Aperture area A_r /m ² | 0.17 |
| Receiver field of view θ_{FOV} /mrad | 0.850 |
| Receiver optics transmission η_r | 0.565 |
| Receiver optical bandwidth F_B /nm | 2 |
| APD quantum efficiency η_a | 0.35 |
| APD average gain G | 120 |
| APD excess noise factor F | 3 |
| APD bulk leadage current I_{dk} /pA | 50 |
| Preamplifier spectral density I_{amp} /($\mu\text{A}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$) | 2 |
| Equivalent noise temperature T /K | 300 |
| APD load resistance R_l /M Ω | 3.5 |

设定探测概率阈值 $P_{dp} = 90\%$,虚警概率阈值 $P_{fp} = 1\%$,滤波器带宽的上限和下限分别为 0.1 MHz 和 100 MHz,则要求系统信噪比不小于 8 dB。基于信噪比最大化和测距误差最小原则,并利用表 1 中的激光测高仪系统参数,解算出不同目标倾角对应的滤波器带宽值,具体如图 2 所示。

图 2 中,关系曲线 B1,B2 和 B3 分别表示基于本文和 Sun 等^[5~7]提出的方法得到滤波器设计结果。图 2 表明,随着目标倾角的增加,滤波器设计带宽值迅速减小。对于不同的探测目标而言,关系曲线 B1 始终位于关系曲线 B2 和 B3 之上,这表明基于本文优化得到的滤波器带宽值均大于利用另两种方法所得到的结果。它们之间的差异随着目标倾角的增加而逐渐减小,在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 探测目标倾角范围内,滤波器带宽值的差异达到 0.7~58.7 MHz。

根据滤波器带宽的设计结果,可以解算出回波信号的脉宽和信噪比的具体数值。利用激光测高仪

测距误差的数学表达式,以测试其对测距误差的影响规律,如图 3 所示。图 3 中关系曲线 e1,e2 和 e3 分别表示利用 B1,B2 和 B3 滤波器设计结果得到的测距误差分布。从图 3 可以看出,随着目标倾角的增加,测距误差迅速增加。对于不同的探测目标而言,关系曲线 e1 始终位于关系曲线 e2 和 e3 之下,即基于 B1 滤波器带宽曲线解算得到的测距误差均小于 B2 和 B3 对应的测距误差。在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 目标倾角范围内,它们的差异达到 0.2~16.2 m。

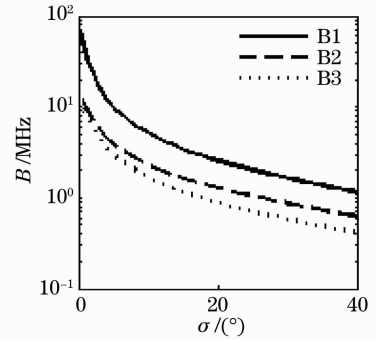


图 2 接收滤波器带宽与目标倾角的关系曲线
Fig. 2 Relationship between RFB and target slope

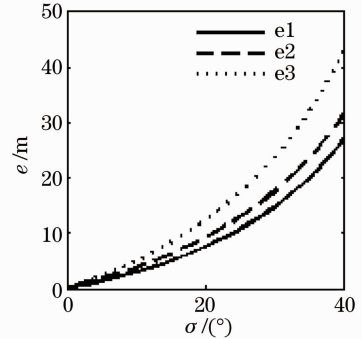


图 3 测距误差与目标倾角的关系曲线
Fig. 3 Relationship between range error and target slope

在激光测高仪滤波器的实际研制过程中,若设置测距误差的偏差阈值 ϵ 为 0.05 m,则可以得到多通道滤波器的数目及其对应的滤波器带宽值、目标倾角范围和探测概率、虚警概率等信息。具体的统计结果如表 2 所示。

表 2 多通道滤波器的统计结果

Table 2 Statistical results for multiple filter channels

| Channel | Filter bandwidth /MHz | Target slope /($^\circ$) | Probability of detection /% | Probability of false alarm /% | Range error /m |
|---------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | 23.5 | 0~3 | 98.5~99.9 | $0 \sim 0.3 \times 10^{-13}$ | 0.25~0.81 |
| 2 | 7.4 | 4~8 | 98.1~99.7 | $0 \sim 0.1 \times 10^{-11}$ | 1.14~2.31 |
| 3 | 4.0 | 9~15 | 96.2~99.0 | $0 \sim 0.1 \times 10^{-9}$ | 2.73~5.09 |
| 4 | 2.5 | 16~22 | 94.2~97.4 | $0 \sim 0.2 \times 10^{-7}$ | 5.59~8.78 |
| 5 | 1.8 | 23~29 | 91.4~95.1 | $0 \sim 0.3 \times 10^{-5}$ | 9.46~13.88 |

从表 2 的数据结果可以看出,通过设置 5 通道的滤波器并分配合适的带宽值可以分段式地对原测距误差曲线进行拟合。每个通道的滤波器均对应于一定的目标倾角范围,其探测概率和虚警概率均满足规定的要求。当目标倾角超过 29° 时,系统探测概率不满足大于 90% 的规定。因此,若要求激光测高仪系统能够探测到大倾角的目标,则必须减小探测概率的阈值,增加滤波器的通道并合理选取其带宽值。

5 结 论

基于激光测高仪回波信号及输出信噪比的理论模型,在探测概率和虚警概率满足规定指标要求的前提下,提出一种以测距误差为判定依据的滤波器带宽设计方法。利用美国 MOLA-2 激光测高仪的部分系统参数,对滤波器带宽设计方法进行了仿真分析,验证了设计方法的优越性和正确性。同时,以测距误差分布曲线为拟合对象,通过设置拟合偏差,采用数值仿真方法解算出滤波器的通道数目及带宽数值,为激光测高仪滤波器带宽设计提供了一种实际可行的方案。

参 考 文 献

- 1 Zhou Hui, Li Song. Waveform simulator of return signal for laser altimeter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1402~1406
周 辉, 李 松. 激光测高仪接收信号波形模拟器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1402~1406
- 2 Yao Pingping, Zhao Xin, Zhang Yi *et al.*. High-resolution measurement of flight time for laser altimeter based on field programmable gate array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 752~755
姚萍萍, 赵 欣, 张 毅等. 激光测高仪中基于现场可编程门阵列的高精度飞行时间测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 752~755
- 3 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of

- influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (10): 2771~2775
王 飞, 赵 远, 张 宇等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2771~2775
- 4 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting techniques [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38** (3): 0314003
杨 馥, 贺 岩, 陈卫标. 基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0314003
 - 5 X. Sun, J. B. Abshire, F. M. Davidson. Multishot laser altimeter: design and performance [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(24): 4578~4585
 - 6 Li Yang, Qi Jun, Zhang Yi *et al.*. Selection and design of filters for laser altimeters [J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(4): 29~33
李 洋, 戚 俊, 张 毅等. 激光测高系统中匹配滤波器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(4): 29~33
 - 7 J. B. Abshire, X. Sun, R. S. Afzal. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 2449~2460
 - 8 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31** (4): 0401004
袁宏武, 梅海平, 黄印博等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0401004
 - 9 C. S. Gardner. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, 1992, **30** (5): 1061~1071
 - 10 D. J. Harding, J. L. Bufton, J. J. Frawley. Satellite laser altimetry of terrestrial topography: vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover [J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, 1994, **32**(2): 329~339
 - 11 M. A. Krainaka, X. Sun, G. Yang *et al.*. Photon detectors with large dynamic range and at near infrared wavelength for direct detection space lidars [C]. *SPIE*, 2009, **7320**: 732005
 - 12 J. L. Bufton. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft [J]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(3): 463~477
 - 13 X. Sun, G. A. Neumann, J. B. Abshire *et al.*. Mars 1064 nm spectral radiance measurements determined from the receiver noise response of the Mars Orbiter Laser Altimeter [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(17): 3960~3971