

文章编号 1004-924X(2013)03-0813-08

系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响

马 跃, 李 松*, 周 辉, 易 洪

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430060)

摘要: 星载激光测高仪的回波时间重心和脉冲宽度等系统参数对常见海态条件下的测距和反演精度有重要影响。本文根据菲涅尔衍射理论、海洋表面镜面反射理论、海洋波高和斜率统计特性以及激光测高仪回波误差理论, 推导并更正了激光测高仪海洋回波光子数表达式。首次完整推导出了影响海洋回波重心和脉宽因素的表达式, 证明了回波参数主要受发射脉冲宽度、测量天底角、指向角抖动和海洋表面上方风速的影响。除风速为表面特性影响外, 其余为系统参数影响。结合地球科学激光测高系统(GLAS)参数对其海洋回波的测距和脉宽精度做了定量分析, 得出不同风速 GLAS 的海洋表面单回波测距误差为 2~15 cm, 脉宽标准差为 0.5~3.5 ns。推导结果对优化设计用于海洋表面测量的星载激光测高仪系统参数、提高回波反演目标特性精度很有意义。

关键词: 激光遥感; 激光测高仪; 激光测距; 回波脉宽; 海洋表面模型; 地球科学激光测高系统

中图分类号: P237; TH761.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0813

Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system

MA Yue, LI Song*, ZHOU Hui, YI Hong

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

* Corresponding author, E-mail: wuhanpeople@126.com

Abstract: The system parameters such as the centroid and pulse width of a laser altimeter system have great effects on its accuracy in ranging and inversion under the condition of a common sea state. Therefore, this paper deduces the functions referred to influencing factors of centroid and pulse width and corrects the received photon function of ocean surface according to the theory of Fresnel diffraction, the character of specular reflection, the statistical regularity of ocean surface profile and the error theory of laser altimeter systems. It gives complete influencing factors on the centroid and pulse width, which include the transmitted and received instruments, nadir angles, pointing jitters and wind speeds. Among them, the first three factors are all system parameters, and the wind speed is a surface characteristic. Combined with the parameters of Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), the error of range and the accuracy of pulse width are calculated and analyzed. The results show that the ranging error of GLAS is from 2 to 15 cm, and that of the pulse width is from 0.5 to 3.5 ns under different wind speeds. The obtained conclusion is significant for the design and accuracy analysis of ocean

收稿日期: 2012-11-16; **修订日期:** 2013-01-08.

基金项目: 国家“十二五”民用航天预先研究资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (No. 40901165); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 274805, No. 274470, No. 274473)

laser altimeter systems.

Key words: laser remote sensing; laser altimeter system; laser ranging; pulse width; ocean surface profile; Geoscience Laser Altimeter system(GLAS)

1 引言

星载激光测高仪是一种用于接收和处理卫星发射脉冲经大气传输后在目标表面反射的波形数据,具备测距和反演目标表面特性功能的遥感系统^[1-2]。具备全波形记录功能的激光测高仪通过发射和接收脉冲重心的时间差值计算不同地表与卫星之间距离;通过回波脉宽反演被测陆地和冰盖表面斜率和粗糙度,以及被测海洋表面的平均斜率和风速^[3-5],其中回波重心法计算的海洋表面距离值为当前回波的瞬时平均海平面高度。一些重复频率较高的激光测高系统,可以使用连续测量的瞬时平均海平面高度来计算当前海域的平均海平面。

在计算距离值和反演地表信息之前,需要对回波波形重心和脉宽的影响因素做推导和分析。Gardner 推导并定量分析了影响用于陆地和冰盖表面测量的激光测高仪的回波重心和脉宽的一些因素,指出这些因素主要由表面斜率,表面粗糙度,测量天底角,指向角抖动和发射脉冲宽度性能决定^[6];而影响海洋激光测高仪回波重心和脉宽的因素目前尚未有完整的推导和分析,仅有 Tsai 在忽略发射脉冲宽度影响和仅限天底入射条件下得出的简单推导,且没有定量分析。由于计算回波重心误差和脉宽方差需要使用测高仪回波光子数,而 Tsai 对海洋测高仪回波光子数的推导结论有局限性。

本文根据菲涅尔衍射理论,海洋表面镜面反射性质和海洋表面波高和斜率的统计规律^[7-11],修正了海洋激光测高仪的回波光子数公式;并根据 Gardner 测高仪回波误差理论,推导出适用于激光测高仪海洋表面测量的重心和脉宽影响因素的结论,即重心和脉宽既与目标参数有关,也是系统参数的函数。结合由 ICESat 卫星搭载的 GLAS 测高系统的系统参数在不同海洋表面上方风速的条件下对测距精度和脉宽标准差做了定量分析,对用于海洋表面测量的星载激光测高仪的系统参数优化设计有重要意义。

2 测高仪海洋回波光子数

根据 Gardner 的理论,发射激光脉冲经过一次菲涅尔衍射,入射到地球表面经过目标反射,再经过一次菲涅尔衍射,到达接收望远镜视场,望远镜接收到回波功率 $P(t)$ 由(1)式表示^[3]:

$$P(t) = \frac{A_R T_a^2}{z^2} \iint_{\Sigma} \beta(\rho) \cdot |a(\rho, z)|^2 \cdot \left| f \left[t - \frac{2z}{c} - \frac{\rho^2}{cz} + \frac{2\xi(\rho)}{c} \right] \right|^2 d^2\rho, \quad (1)$$

式中: ρ 为反射目标横截面坐标矢量, $\beta(\rho)$ 光斑内目标反射率, $\xi(\rho)$ 为目标表面高程轮廓, T_a 为大气透过率, A_R 为接收望远镜面积, z 为测高仪轨道高度, c 为真空光速, Σ 为光斑照射区域, $a(\rho, z)$ 和 $f(t)$ 分别为激光脉冲在空域和时域分布函数。

通常情况下,激光发射脉冲在空域横截面和时域波形都近似为高斯函数,由式(2)和式(3)表示, Q 为激光脉冲能量, θ_T 为光束发散角:

$$|a(\rho, z)|^2 = \frac{Q}{2\pi(z \tan \theta_T)^2} \exp(-\rho^2/2z^2 \tan^2 \theta_T), \quad (2)$$

$$|f(t)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_f^2}\right). \quad (3)$$

按照 Kodis 理论^[4],在近天顶入射的条件下,海洋表面反射率由表面随机分布镜面点的后向散射决定,散射功率正比于被照亮的镜面点个数 n 。每个镜面点散射可以看作是一个正切球,球半径等于镜面点表面的长短轴半径 r_a 和 r_b 的几何平均。在光学领域散射截面 $\sigma = \pi \delta \langle |r_a r_b| \rangle$,归一化到 $\Omega = 4\pi$ 的球面度,并代入 Barrick 结论后,海洋表面反射率 β 由式(4)表示^[8-9]:

$$\beta(\rho) = \frac{\delta n \langle |r_a r_b| \rangle}{4} = \delta \left(1 + \frac{\rho^2}{z^2}\right)^2 p[\xi_x, \xi_y | \xi(\rho)]/4, \quad (4)$$

式中: δ 是海水与大气之间镜面反射率,与入射激光波长 λ 有关; $p[\xi_x, \xi_y | \xi(\rho)]$ 为海面斜率在波高为 ξ 时的条件概率密度, ξ_x 和 ξ_y 分别表示光斑照明区域海水表面横截面 x 和 y 方向波浪斜率。

根据 Cox-Munk 经验公式,在忽略波浪毛细波和地球自转等影响的理想情况下波高 $p(\xi)$ 和波浪表面轮廓 $p(\xi_x, \xi_y)$ 满足高斯分布,且仅与风速有关;由于波浪同一点处的高度和斜率不相关,则波高和波浪斜率的联合概率密度函数由(5)式表示^[4]:

$$p[\xi_x, \xi_y | \xi(\rho)] = p(\xi) p(\xi_x, \xi_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right) \cdot \frac{1}{\pi s^2} \exp\left(-\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{s^2}\right), \quad (5)$$

其中: $\sigma_\xi = 0.016 \omega^2$ 为 Phillips 的风浪波高谱, $s^2 = 0.003 + 0.005 12\omega$ 为 Cox-Munk 海面均方斜率, ω 为在海平面上方 12.5 m 处的平均风速。将式(2)~(5)代入(1)式,得出测高仪探测器输出光子数随时间变化 $S(t)$, 其中 $\psi = 2z/c + \rho^2/cz - 2\xi/c$, η 为接收系统效率, $h \cdot v$ 为单光子能量。

$$S(t) = \frac{\eta}{hv} \cdot \frac{\delta A_R T_a^2}{4z^2} \iint_{\Sigma} |a(\rho, z)|^2 \left(1 + \frac{\rho^2}{z^2}\right)^2 p(\xi_x, \xi_y) \int \xi d\xi [f(t - \psi)]^2 * h(t) d^2\rho. \quad (6)$$

对(6)式的时间积分可以得出总回波光子数 N , 即探测器接收能量,为了积分(6)式,需要将所有变量转换为与 ρ 和 t 相关的形式。对海洋表面高程分布 ξ 的积分可以表示为海面目标响应与发射脉冲的卷积;接收系统脉冲函数 $h(t)$ 通常为高斯型,且对时间积分结果为 1 或探测器增益;这三

项高斯函数卷积结果 $p(\xi) * |f(t - 2z/c + \rho^2/cz - 2\xi/c)|^2 * h(t)$ 仍为高斯函数,且只会影响回波光光子数的峰值和光子数波形的展宽,不会影响总回波光光子数量。而(6)式中对 ρ 的积分仍然有波浪斜率分布 $p(\xi_x, \xi_y)$, 需要转换为与 ρ 有关的函数,因此建立天顶方向入射的激光测高仪坐标系(如图 1 所示),以入射光轴方向(天底方向)为 z 轴,与天底方向垂直的平均海平面为目标表面 xy 横截面,其中 x 轴与卫星飞行方向平行, y 轴与卫星飞行方向垂直, $\rho(x, y)$ 表示海洋表面波高起伏。假设海面斜率分布为 1 维形式,海面镜面点只有当该点斜率等于天顶角正切值情况下产生的后向散射才能被望远镜接收,即斜率 $\tan \theta = \rho/z$, 则 $p(\xi_x, \xi_y) = \exp[-(\rho/zs)^2]$ 。再将(6)式分别对 t 和 ρ 积分结果由(7)式所示。

$$N = \int_0^\infty S(t) dt = \frac{\eta \delta Q A_R T_a^2}{4\pi h v z^2 (s^2 + 2\tan^2 \theta_T)}. \quad (7)$$

3 海洋测高仪误差模型

根据 Gardner 理论,激光测高仪的回波重心方差和脉冲宽度方差分别由(8)式和(9)式表示^[6],式中第一项为在弱信号条件下占主导作用的光子噪声,第二项为在强信号条件下占主导作用的散斑噪声,其中 F 为过量噪声因数,对 PMT 接收器件值为 1,而 APD 接收器件值在 3 到 7 之间; σ_h 为接收器件的展宽, K_s 为接收孔径面积与散斑相关面积的比值, $K_s = \pi A_R (2\tan \theta_T/\lambda)^2$; 由于光束指向角抖动造成对回波重心方差影响由(10)式给出, $\Delta\varphi$ 为抖动角, s 为目标斜率;其中与海洋测高仪相符的过渡积分式 $b_n(\rho, z)$ 、回波重心 T_s 和脉宽 σ_s^2 已由 Tsai 推导,由(11)~(13)式表示^[4]。

$$\text{Var}(T_s) = F/N \cdot \iint_{-\infty}^\infty (t - T_s)^2 |f(t - \psi)|^2 dt \cdot b_2(\rho, z) d^2\rho + K_s^{-1} \int (\psi - T_s)^2 \cdot b_4(\rho, z) d^2\rho, \quad (8)$$

$$\text{Var}(\sigma_s^2) = F/N \cdot \iint_{-\infty}^\infty [(t - T_s)^2 - (\sigma_s^2 - \sigma_h^2)]^2 |f(t - \psi)|^2 dt \cdot b_2(\rho, z) d^2\rho + K_s^{-1} \int [(\psi - T_s)^2 - (\sigma_s^2 - \sigma_h^2 - \sigma_f^2)]^2 \cdot b_4(\rho, z) d^2\rho. \quad (9)$$

$$\text{Var}(T_s | \Delta\varphi) = T_s^2 [s^2 \text{Var}(\Delta\varphi)], \quad (10)$$

$$T_s = \frac{2z}{c} + \frac{2z}{c} (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1}, \quad (11)$$

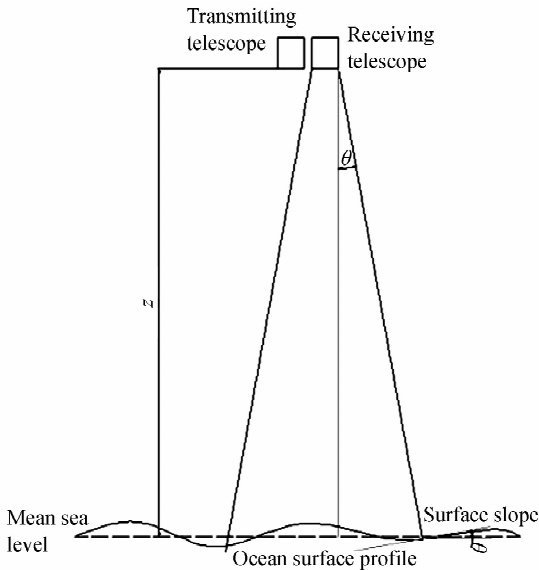


图 1 天顶方向入射的海洋测高仪

Fig. 1 Geometry of altimeter and ocean surface for normal incidence

$$\sigma_s^2 = \sigma_h^2 + \sigma_f^2 + \frac{4}{c^2} \sigma_\xi^2 + \frac{4z^2}{c^2} (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-2}, \quad (12)$$

$$b_n(\rho, z) = \frac{|a(\rho, z)|^n \left(1 + \frac{\rho^2}{z^2}\right)^n p^{n/2}(\xi_x, \xi_y)}{\int |a(\rho, z)|^n \left(1 + \frac{\rho^2}{z^2}\right)^n p^{n/2}(\xi_x, \xi_y) d^2 \rho} \quad (13)$$

Tsai 在对上述公式推导过程中直接忽略了

$$\text{Var}(T_s) = F/N \cdot (\sigma_s^2 - \sigma_h^2) + K_s^{-1} \int (\psi - T_s)^2 \cdot b_4(\rho, z) d^2 \rho, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(\sigma_s^2) = F/N \cdot \left\{ \int [3\sigma_f^2 + 6\sigma_f^2(\psi - T_s)^2 + (\psi - T_s)^4] \cdot b_2(\rho, z) d^2 \rho - (\sigma_s^2 - \sigma_h^2)^2 \right\} + \\ K_s^{-1} \int [(\psi - T_s)^2 - (\sigma_s^2 - \sigma_h^2 - \sigma_f^2)]^2 \cdot b_4(\rho, z) d^2 \rho \\ \int (\psi - T_s)^4 \cdot b_2(\rho, z) d^2 \rho = \frac{\int_0^\infty \left[\frac{16}{c^4} \sigma_\xi^4 + \frac{1}{(cz)^4} (\rho^2 - \sigma_r^2)^4 + \frac{24}{c^4 z^2} \sigma_\xi^2 (\rho^2 - \sigma_r^2)^2 \right] \exp\left(\frac{-\rho^2}{2z^2 \tan^2 \theta_T}\right) \exp\left(\frac{-\rho^2}{z^2 s^2}\right) \rho^2 d\rho}{\int_0^\infty \exp\left(\frac{-\rho^2}{2z^2 \tan^2 \theta_T}\right) \exp\left(\frac{-\rho^2}{z^2 s^2}\right) \rho d\rho} = \\ \frac{16}{c^4} \sigma_\xi^4 \xi + \frac{9\sigma_r^8}{(cz)^4} + \frac{24}{c^4 z^2} \sigma_\xi^2 \sigma_r^4, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{Var}(T_s) = F/N \cdot \left[(\sigma_f^2 + \sigma_h^2) + \frac{4\sigma_\xi^2}{c^2} + \frac{\sigma_r^4}{(cz)^2} \right] + K_s^{-1} \left[\frac{4\sigma_\xi^2}{c^2} + \frac{\sigma_r^4}{2(cz)^2} \right], \quad (17)$$

$$\text{Var}(\sigma_s^2) = F/N \cdot \left[2\sigma_f^4 + \frac{4\sigma_f^2 \sigma_r^4}{(cz)^2} + \frac{16\sigma_f^2 \sigma_\xi^2}{c^2} + \frac{8\sigma_r^8}{(cz)^4} + \frac{16\sigma_\xi^2 \sigma_r^4}{c^2 z^2} \right] + K_s^{-1} \left[\frac{8\sigma_\xi^2 \sigma_r^4}{c^4 z^2} + \frac{\sigma_r^8}{2(cz)^4} \right]. \quad (18)$$

对于非天顶方向入射的激光测高仪系统,如图 2 所示重新建立坐标系,以入射光轴方向为 z' 轴,此时与天底方向 z 轴夹角为 φ ,光轴与平均海平面交点为 $x'y'$ 原点, y' 与 y 轴平行, x' 轴垂直于 $y'z'$ 平面与卫星飞行方向夹角为 φ 。其坐标转换关系为 $z' = z/\cos \varphi$, $\xi'(\rho) = \rho_x \tan \varphi + \xi(\rho)/\cos \varphi$, 将 (17) 和 (18) 式中天顶方向入射时的 z 与 ξ 替换为 z' 与 ξ' 并简化解出; 并加入 (10) 式, 在用于海洋表面的测高仪中, 使用平均斜率替代了陆地和冰盖的表面斜率, 最终得出非天顶方向入射时激光测高仪的回波重心方差和脉冲宽度方差由 (19) 式和 (20) 式表示。

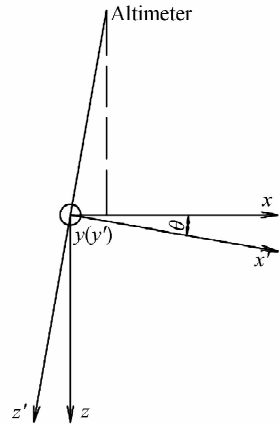


图 2 非天顶方向测高仪坐标轴

Fig. 2 Coordinates of non-nadir direction altimeter

$$\begin{aligned} \text{Var}(T_s) = F/N \cdot \left\{ (\sigma_f^2 + \sigma_h^2) + \frac{4\sigma_\xi^2 \xi}{c^2 \cos^2 \varphi} + \frac{4z^2}{c^2 \cos^2 \varphi} [\tan^2 \varphi + (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1}] \cdot \right. \\ \left. (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1} \right\} + K_s^{-1} \left\{ \frac{4\sigma_\xi^2 \xi}{c^2 \cos^2 \varphi} + \frac{2z^2}{c^2 \tan^2 \varphi} [\tan^2 \varphi + (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1}] \cdot \right. \\ \left. (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1} \right\} + \frac{4z^2 s^2 [1 + (\tan^{-2} \theta_T + 2S^{-2})^{-1}]^2}{c^2 \cos^2 \varphi} \text{Var}(\Delta\varphi), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Var}(\sigma_s^2) = F/N \cdot \left[2\sigma_f^4 + \frac{4\sigma_r^2\sigma_r^4}{(cz \cos \varphi)^2} + \frac{16\sigma_r^2\sigma_r^2}{(c \cos \varphi)^2} + \frac{8\sigma_r^2\sigma_r^2 \tan^2 \varphi}{(c \cos \varphi)^2} + \frac{8\sigma_r^8}{(cz \cos \varphi)^4} + \frac{16\sigma_r^2\sigma_r^4}{c^4 (z \cos \varphi)^2} + \frac{8\sigma_r^6 \tan^2 \varphi}{z^2 (c \cos \varphi)^4} \right] + K_s^{-1} \left[\frac{8\sigma_r^2\sigma_r^4}{c^4 (z \cos \varphi)^2} + \frac{4\sigma_r^6 \tan^2 \varphi}{z^2 (c \cos \varphi)^4} + \frac{\sigma_r^8}{2(cz \cos \varphi)^4} \right]. \quad (20)$$

4 GLAS 系统误差分析

GLAS 系统轨道高度 $z=600$ km,接收望远镜口径 $d=1$ m,激光波长 $\lambda=1\,064$ nm,光束发散角 $\theta_T=110$ μrad ,发射能量 $Q=75$ mJ,发射脉宽 $\sigma_f=$

4 ns,测量天底角 $0\sim 4^\circ$,接收数字化仪采样间隔 $\Delta t=1$ ns^[12];则 $\sigma_h^2=\Delta t^2/12\ll\sigma_f^2$, $\sigma_r^4\approx 4z^2\theta_T^2/c^2\ll\sigma_f^2$, $\sigma_r^4\ll\sigma_r^2$; $K_s=105\,488\gg F/N$,即 GLAS 系统噪声主要由光子噪声影响;(19)和(20)简化后得出适用于 GLAS 系统的测高仪回波重心方差和脉冲宽度方差表达式。

$$\text{Var}(T_s) \approx F/N \cdot \left[\sigma_f^2 + \frac{4(0.016w^2)^2}{c^2 \cos^2 \varphi} + \frac{4(z\theta_T)^2}{c^2 \cos^2 \varphi} \tan^2 \varphi \right] + \frac{4z^2s^2(1+\theta_T^2)^2}{c^2 \cos^2 \varphi} \text{Var}(\Delta\varphi), \quad (21)$$

$$\text{Var}(\sigma_s^2) \approx F/N \cdot \left[2\sigma_f^4 + \frac{16\sigma_r^2(0.016w^2)^2}{c^2 \cos^2 \varphi} + \frac{16z^2\sigma_r^2\theta_T^2 \tan^2 \varphi}{c^2 \cos^2 \varphi} \right]. \quad (22)$$

根据(7)式结论,回波光子数仍与大气透过率,反射率有关,假设大气透过率 $T_a=0.7$,系统能量利用率 $\eta=0.5$,根据不同波长条件下的空气与水折射率^[13]和科希公式计算 1 064 nm 光波的海水反射率约为 $\delta=1.5\%$,则回波光子数随风速变化的由图 3 所示。图 3 表明回波光子数随风速增大而迅速减小,对于回波激光信号衰减严重的星载激光测高系统,风速过大时可能将无法收到有效信号。

GLAS 的 APD 器件过量噪声因数 $F=5$,指向角抖动为 1 μrad ;通常情况下海洋表面上方风速在 $0\sim 15$ m/s 之间,图 4 描绘了 GLAS 系统在测量天底角 φ 为 1° 时不同风速 w 条件下的测距误差。

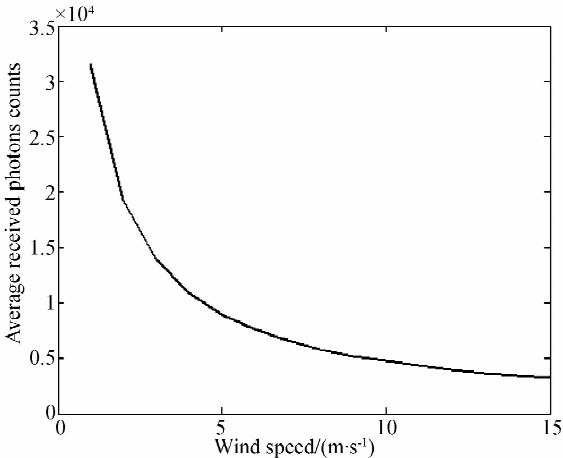


图 3 GLAS 平均回波光子数

Fig. 3 Average received photons of GLAS

通过(21)式可以看出测高仪接收脉冲重心方差主要受系统发射脉冲宽度,测量天底角,指向角抖动和海平面上方风速影响,除最后一项为目标参数或称为测量条件影响,其余都为系统参数影响;这些都将导致接收脉冲重心提取误差,并导致系统测距误差 $\text{RMS range error}=\text{std}(T_s) * c/2$ 。假设

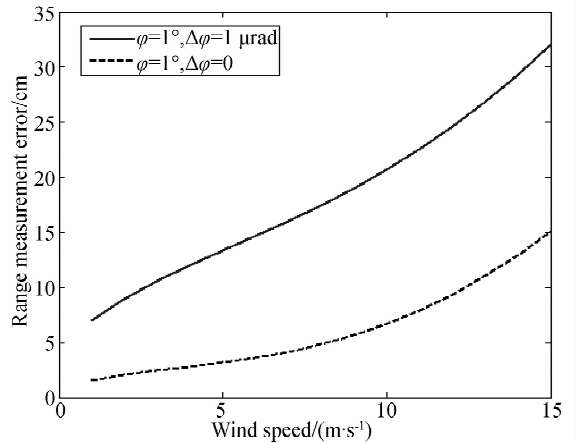


图 4 GLAS 整体测距误差模拟

Fig. 4 Simulated GLAS range measurement errors

表 1 中将上述 4 种因素引起测距误差的简化表达形式列出,并给出了不同测量条件和系统参数下的误差典型值。通过表 1 模拟数据,指向角抖动在 1 μrad 时对测距精度影响就达到 ~ 10 cm 量级,这一推论与文献[6][14][15]中的陆地模型计算结果基本一致,为测高仪系统测距误差影响最严重的因素,因此文献[14]和[15]对 GLAS 系统和 VCL 系统(Vegetation Canopy Lidar)中包括指向角抖动在内的指向角偏差使用测距残差方法进行在轨标定和校正。

表 1 测距误差

Tab. 1 Range measurement errors

影响因素	简化表达式	典型值
发射脉宽	$c\sigma_f(F/N)^{1/2}/2$	1.28 cm@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=4$ ns 2.13 cm@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=4$ ns
		0.32 cm@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=4$ ns 0.53 cm@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=4$ ns
风速	$0.016w^2(F/N)^{1/2}$	0.55 cm@ $w=4$ m/s, $\varphi=0^\circ$ 8.17 cm@ $w=12$ m/s, $\varphi=0^\circ$
天底角	$z\theta_T \tan \varphi(F/N)^{1/2}/\cos \varphi$	2.47 cm@ $w=4$ m/s, $\varphi=1^\circ$ 4.09 cm@ $w=12$ m/s, $\varphi=1^\circ$
		9.91 cm@ $w=4$ m/s, $\varphi=4^\circ$ 16.41 cm@ $w=12$ m/s, $\varphi=4^\circ$
指向角抖动	$z((0.003+0.005\ 12w)F/N)^{1/2}$ $\text{std}(\Delta\varphi)$	9.19 cm@ $w=4$ m/s, $\varphi=0^\circ$ 15.23 cm@ $w=12$ m/s, $\varphi=0^\circ$

表 2 接收脉冲宽度标准差

Tab. 2 Standard deviation of pulse width

影响因素	简化表达式	典型值
发射脉宽	$\sigma_f(2F/N)^{1/4}$	0.17 ns@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=1$ ns 0.22 ns@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=1$ ns
		0.70 ns@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=4$ ns 0.90 ns@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=4$ ns
风速	$2w(0.016\sigma_f/c)^{1/2}(F/N)^{1/4}$	0.27 ns@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=1$ ns 1.04 ns@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=1$ ns
		0.54 ns@ $w=4$ m/s, $\sigma_f=4$ ns 2.09 ns@ $w=12$ m/s, $\sigma_f=4$ ns
天底角	$2(z\sigma_f\theta_T \tan \varphi/\cos \varphi)^{1/2}(F/N)^{1/4}$	1.15 ns@ $w=4$ m/s, $\varphi=4^\circ$ 1.48 ns@ $w=12$ m/s, $\varphi=4^\circ$
		0.57 ns@ $w=4$ m/s, $\varphi=1^\circ$ 0.74 ns@ $w=12$ m/s, $\varphi=1^\circ$

通过(22)式可以看出测高仪脉冲宽度方差主要由系统发射脉冲宽度,海平面上方风速,测量天底角引起;这些都将引起系统回波脉宽的变化,对反演海洋表面平均斜率和风速构成影响,回波脉宽标准差 $\text{std}(\sigma_r)$ 的简化表达形式由表 2 列出,并给出了不同测量条件下标准差典型值;图 5 描绘了 GLAS 系统在不同测量条件下回波脉宽总体标准差曲线。

通过图 4,图 5 和表 1,表 2 的模拟结果可以看出,测距误差随风速和天底角的增加大幅增加,由于 GLAS 系统主要测量为南北极冰盖,其中低纬度天底角很小,通常小于 1° ,因此图 5 中在忽略指向角抖动时 GLAS 整体测距误差为 cm 量级,随风速影响在 2~15 cm 之间变化。脉冲宽度标准差为 ns 量级,随风速和天底角增加整体标准差为 0.5~3.5 ns。

由于海面上方风速无法预先获知,仅能得到通常情况下的风速范围;因此对设计测高仪系统有关的重要参数,即测量天底角和发射激光脉宽在海洋

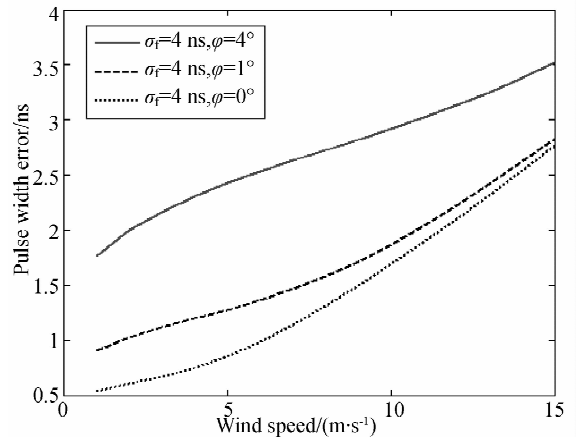


图 5 GLAS 接收脉宽标准差

Fig. 5 Standard deviation of GLAS received pulse width

表面常见风速 $w=6$ m/s 时的对测距误差和回波脉宽标准差进行了模拟,分别由图 6 和图 7 显示。

通过图 6 和图 7 的模拟,测距误差主要受测量天底角影响,发射脉宽仅在测量天底角小于 1° 时

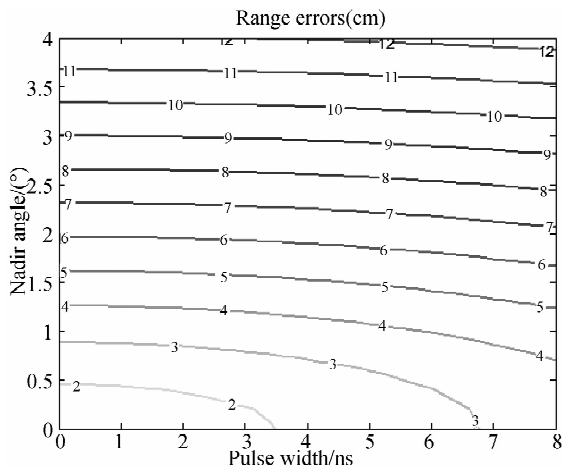


图 6 天底角和发射脉宽对测距误差的影响

Fig. 6 Effects of nadir angle and transmitted width on range errors

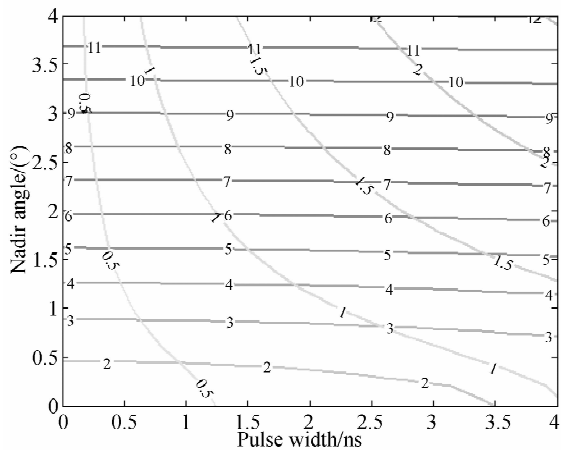


图 8 天底角和发射脉宽对测量精度的影响

Fig. 8 Effects of nadir angle and transmitted width on measuring accuracy

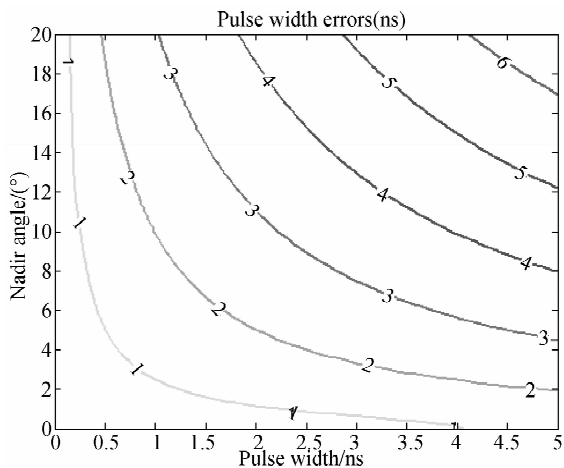


图 7 天底角和发射脉宽对回波脉宽标准差影响

Fig. 7 Effects of nadir angle and transmitted width on standard deviation of received width

的影响较为明显;而用于反演风速和平均斜率的回波脉宽,其标准差在 ps 量级发射脉宽时受测量天底角影响很小,ns 量级时发射脉宽和测量天底角两者影响程度相当。因此对于不同测量目的激光测高仪系统,设计测量天底角和发射脉宽应有所侧重。图 8 将测距误差和回波脉宽标准差曲线结合在一起,当测量天底角小于 0.5° 时,且发射脉宽小于 3.5 ns ,可以达到 2 cm 测距精度,对应回波脉宽标准差小于 1 ns ;如果此时发射脉宽小于 1 ns ,则回波脉宽标准差将小于 0.5 ns 。

结合上述公式和图表,比 GLAS 系统具有更高精度的星载激光测高仪,需要更小的光束发散角 ($<110\ \mu\text{rad}$),根据式(7)这将呈指数性的增大回波光子数,减小测距误差和脉宽标准差;同时提高单次脉冲能量 Q ,降低轨道高度 z ,减小回波接收器件采样间隔 Δt 和增大接收望远镜口径 d 都将提高回波光子数,进而减小测量误差;对于测距精度要求高的测高系统,应设计在测量天底角很小的近天顶入射条件下工作;而用于反演海洋表面风速和平均斜率的测高系统,使用 ps 量级发射脉宽的激光器可以达到很高的精度。

5 结 论

以 GLAS 系统为例模拟了星载激光测高仪对海洋表面测量的测距误差和回波脉宽标准差。结果表明,该系统在设计系统参数和不同测量条件下的测距误差约为 $2\sim 15\text{ cm}$,回波脉宽误差约为 $0.5\sim 3.5\text{ ns}$ 。系统设计较好的星载激光测高仪用于海洋表面测量时其测距精度可以达到几个厘米,测距和回波脉宽精度主要受系统发射脉冲宽度、测量天底角和海洋表面上方风速影响。这些结论和模拟方法对于星载海洋激光测高仪的系统参数设计和测量误差的评判具有重要意义。

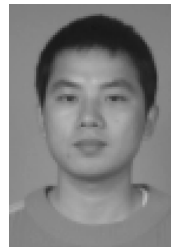
参考文献:

- [1] EERO R, ANDREW S, ALAN M, *et al.*. A comparison of recent elevation change estimates of the devon ice cap as measured by the ICESat and Envisat satellite altimeters [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 1902-1910.
- [2] 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.
LI S, ZHOU H, SHI Y, *et al.*. Theoretical model for return signal of laser altimeter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 33-39. (in Chinese)
- [3] GARDNER C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(3): 448-453.
- [4] TSAI B M, GARDNER C S. Remote sensing of sea state using laser altimeters [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(21): 3932-3940.
- [5] ANITA C B, ZWALLY H J, CHARLES R B, *et al.*. Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights [R]. *GLAS Algorithm Theoretical Basis Document Version 4.1*, 2003.
- [6] CHESTER S G. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [7] JACK L B, FRANK E H, ROBERT N S. Airborne measurement of laser backscatter from the ocean surface [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(17): 2603-2618.
- [8] JOSSET D, PELON J, PROTAT A, *et al.*. New approach to determine aerosol optical depth from combined CALIPSO and CloudSat ocean surface echoes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(5): 1-5.
- [9] LIU Y G, SU M Y, YAN X H, *et al.*. The mean square slope of ocean surface waves and its effects on radar backscatter [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(5): 1092-1105.
- [10] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the optical society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [11] PHILLIPS O M. *The Dynamics of the Upper Ocean* [M]. Cambridge U. P., London, 1977.
- [12] SCHUTZ B E. Laser footprint location and surface profiles [R]. *GLAS Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0*, 2002, 10.
- [13] GEORGE M H, MARVIN R Q. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555-563.
- [14] ROWLANDS D D, CARABAJAL C C, LUTHCKE S B, *et al.*. Satellite laser altimeter: on-orbit calibration techniques for precise geolocation [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2000, 12: 796-803.
- [15] LUTHCKE S B, ROWLANDS D D, STONEKING E. Space laser altimeter pointing bias calibration from range residual analysis [J]. *Journal of spacecraft and rockets*, 2000(37): 374-384.

作者简介:



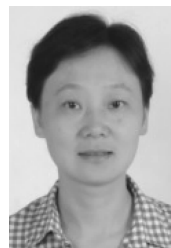
马跃(1986—),男,山东青岛人,博士研究生,2008年于武汉理工大学获得学士学位,2010年于武汉大学获得硕士学位,主要从事激光遥感与激光测量技术等方面的研究。E-mail: mayue19860103@163.com



易洪(1987—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,2010年于武汉大学获得学士学位,主要从事激光遥感和图像处理方面的研究。E-mail: yi_hong0605@qq.com



周辉(1979—),男,江西抚州人,博士,副教授,2001年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2003年于武汉大学获得硕士学位,2007年于武汉大学获得博士学位,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



李松(1965—),女,江苏镇江人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年分别于武汉测绘科技大学获得学士、硕士学位,2002年于武汉大学获得博士学位,主要从事激光遥感、角反射器和激光测高等方面的研究。E-mail: wuhanpeople@126.com

导师简介: