

## 基于星载激光测高仪多模式回波的激光测距修正值分析

李少辉<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>3</sup>, 倪国强<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;  
3. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 星载激光测高仪多模式回波是由多个目标产生的子脉冲组合而成。根据多模式目标的空间分布特点, 采用倾斜角、区域面积、中心位置和高度等参数实现其子目标的几何化建模, 结合目标响应函数的基本定义, 利用线积分的方式构建了子目标响应函数的表达形式。同时, 基于一阶矩理论推导出子目标激光测距真值及其修正值的数学模型。以星载激光测高仪 GLAS 系统参数为输入, 利用数值分析的方法, 模拟出子目标倾斜角、面积和位置对接收脉冲回波形态和激光测距修正值的影响。结果表明, 随着子目标倾斜角、区域面积和子目标偏离光斑中心距离的增加, 激光测距修正值也逐渐增大。针对平坦目标、缓坡目标和陡坡目标, 其激光测距修正值分别达到 1.33 m、4.98 m 和 12.07 m, 其影响程度非常大。基于激光测距修正值的分布规律, 以子目标倾斜角、面积和中心偏距为变量, 采用线性函数描述了激光测距修正值的理论表达形式, 所得结论对于提升多模式激光测距值的测量精度具有重要的指导作用。

**关键词:** 星载激光测高仪; 多模式接收回波信号; 时间重心; 激光测距修正值

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1006001

## Analysis on corrected value of laser ranging based on multiple mode waveform of satellite laser altimeter

Li Shaohui<sup>1,2</sup>, Zhou Hui<sup>3</sup>, Ni Guoqiang<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;  
3. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Satellite Laser Altimeter multiple mode waveforms are composed of sub-pulses generated from several targets. According to the spatial distribution characteristics of multiple mode targets, the geometric modeling of the sub-target was realized by using the parameters such as the slope angle, the area, the center position and the height. Combined with the basic definition of the target response function, the expression of the sub-target response function was built up by using the line integral method. Meanwhile, the mathematical models of laser ranging and its corrected value for sub-target were derived on the basis of the first order moment theory. Using some parameters of Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 测绘地理信息公益性行业专项(201412007, 201512016); 民用航天预先研究激光测量系统总体技术(ZTBYY8.1.2); 陆地生态系统碳监测卫星先期攻关(CM-1)

作者简介: 李少辉(1974-), 女, 高级工程师, 长期从事遥感卫星总体技术以及光学和激光有效载荷技术方面的研究。

Email: 30085543@qq.com

as input, the influence of slope angle, area and the center position on the shape of received pulse waveforms and the corrected value of laser ranging was simulated by numerical simulation method. The results show that the corrected value of laser ranging becomes larger with the increase of the slope angle, the area and the center position of sub-target. As for the sub-target with low relief, moderate relief and high relief, the corrected value of laser ranging can be reached at 1.33 m, 4.98 m and 12.07 m, respectively, which exerts a tremendous influence. In term of the regularities distribution of the corrected value of laser ranging, its theoretical expression is described with linear functions by using slope angle, area and the center deviation distance as variables. The conclusion has important guiding effect for the improvement of laser ranging accuracy for multiple mode targets.

**Key words:** satellite laser altimeter; multiple mode received waveform signal; time centroid; corrected value of laser ranging

## 0 引言

星载激光测高仪是一种以激光作为光源的主动式遥感设备,通过对接收脉冲回波的采集、处理与分析,提取得到接收脉冲回波的时间重心,从而准确地反演出激光测高仪与目标之间的距离<sup>[1]</sup>。激光测距值的反演误差与激光测高仪硬件系统、大气传输环境和目标空间几何分布等诸多条件有关,其中的目标空间分布直接决定接收脉冲回波形态,是影响激光测距误差的重要因素<sup>[2]</sup>。

地球上陆地目标的分布存在多样性和复杂性,使得星载激光测高仪接收脉冲回波的形态分布也较为复杂。通常情况下,对于冰川、海洋和贫瘠山脉等线性目标,其回波是高斯形态的单模式回波,而对于海岸边界、极地海冰、山地和人文建筑、森林等复杂目标,其回波是由多个子脉冲组成的多模式回波<sup>[3]</sup>。美国国家航空航天局(NASA)研制的地球科学激光测高仪(GLAS)采集了大量的回波数据<sup>[4]</sup>,很多科学家都利用这些回波数据实现了对线性目标的平均高度、倾斜角和粗糙度等信息的反演<sup>[5-10]</sup>。然而,在利用多模式回波反演目标信息时,通常仅基于各子脉冲的时间重心来解算对应的激光测距值,而忽略了目标几何位置、大小和倾斜角等空间分布的影响,从而使得激光测距值的反演结果出现了一定误差。

文中以多模式目标为分析对象,从其空间几何分布模型入手,利用目标等高线分布和目标响应函数的定义,构建得到子脉冲回波的分布形态。通过分

析子脉冲时间重心的理论模型,剖析其与激光测距真值之间的定量关系,进而推导得到多模式目标的激光测距值修正表达式,并采用仿真方法定量分析出激光测距值修正结果与目标空间参数之间的分布规律。

## 1 多模式陆地目标回波理论模型

星载激光测高仪接收脉冲回波是发射激光脉冲经由大气传输、目标反射和系统接收后形成的时域脉冲信号,在仅考虑大气衰减效应的条件下,接收脉冲回波  $p(t)$  可以表示为发射激光脉冲  $f(t)$  与目标响应函数  $m(t)$  和系统响应函数  $h(t)$  的卷积<sup>[11]</sup>,即:

$$p(t) = \gamma f(t) * h(t) * m(t) = \gamma f(t) * h(t) * \sum_{i=1}^N m_i(t) \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  是与激光测高仪硬件参数和大气衰减系数有关的常量因子;  $m(t)$  为目标响应函数,直接反映目标对接收脉冲回波的影响,是  $t$  时刻目标等高线上不同点反射的激光能量之和。考虑到多模式陆地目标是由若干在空间上相互分离的子目标组成的,则目标响应函数可以表示为多个子目标响应函数  $m_i(t)$  的叠加。

以第  $i$  个子目标作为分析对象,若发射激光以指向角  $\Phi$  入射至目标表面时,建立如图 1 所示的测量框架。定义目标参考坐标系  $o-x'y'z'$  和激光测量坐标系  $o-xyz$ ,其中,  $o$  为激光足印的中心,  $x'$  轴和  $z'$  轴分别沿卫星的飞行方向和天顶方向,  $y'$ 、 $x'$  和  $z'$  轴构成右手螺旋法则,  $o-xyz$  坐标系是由  $o-x'y'z'$  坐标系绕  $y'$  轴旋转  $\Phi$  角得到的。

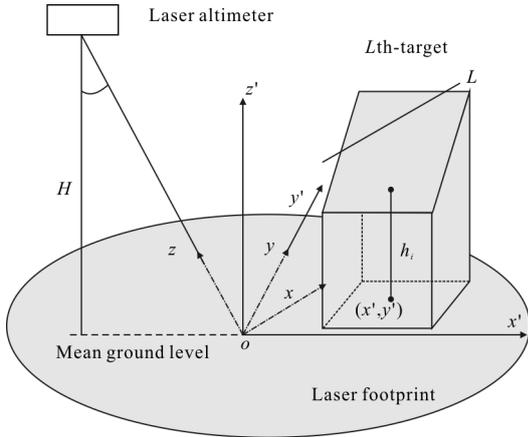


图 1 多模式目标的测量框架

Fig.1 Measurement framework of multiple mode targets

通常情况下，激光光斑内的多模式目标可以抽象成由若干线性平面组成的漫反射体，对于单个子目标而言，可以表示为<sup>[12]</sup>：

$$z'=(x'-x'_i)\tan s_{//}+(y'-y'_i)\tan s_{\perp}+h \quad (2)$$

式中： $(x'_i, y'_i)$  是第  $i$  个子目标的几何中心； $s_{//}$  和  $s_{\perp}$  分别是子目标在平行和垂直于卫星飞行方向的倾斜角， $h_i$  为子目标的中心高度，也即其区域范围的平均高度。

假设在  $t$  时刻激光光斑与第  $i$  个子目标相交所形成的等高线为  $L$ ，则可以采用线积分的方式来描述子目标响应函数为<sup>[13]</sup>：

$$m_i(t)=\int_L I(x, y, z)\beta(x, y, z)dl \quad (3)$$

式中： $z$  为  $t$  时刻所对应的目标高度； $I(x, y, z)$  和  $\beta(x, y, z)$  分别为激光光斑的空间强度分布和子目标的反射率分布。对于标准的高斯光束和漫反射体而言，它们满足以下关系式：

$$I(x, y, z)=\frac{1}{2\pi\sigma_z^2}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_z^2}\right), \beta(x, y, z)=\beta_0\cos\phi \quad (4)$$

式中： $\sigma_z=(R+z)\tan\theta$  为激光足印的半径， $R=ct/2$ ， $\theta$  为激光束的半均方根发散角； $c$  为光速，通常情况

$$\begin{cases} x_{\min}=\min\left[\frac{u-b(y_i-W_b/2)}{a}, \frac{u-b(y_i+W_b/2)}{a}, x_i-\frac{\cos(s_{//}-\phi)}{\cos s_{//}}\frac{W_a}{2}\right] \\ x_{\max}=\max\left[\frac{u-b(y_i-W_b/2)}{a}, \frac{u-b(y_i+W_b/2)}{a}, x_i+\frac{\cos(s_{//}-\phi)}{\cos s_{//}}\frac{W_a}{2}\right] \end{cases} \quad (8)$$

式中： $W_a$  和  $W_b$  分别为其在  $x'$  和  $y'$  方向上的长度。特殊地，若整个光斑内只存在单个子目标，即子目标的区

下，卫星的轨道高度  $H$  在数百公里以上，则目标的高度起伏对激光光斑大小的贡献可以忽略不计，则  $\beta_0$  为子目标的光学反射率。

很显然，子目标响应函数的解算关键在于分析出等高线  $L$  的分布形式。利用目标参考坐标系和激光测量坐标系的定义，可以得到激光测量坐标系下的子目标方程为：

$$z=a(x-x_i)+b(y-y_i)+d=$$

$$\tan(\phi+s_{//})(x-x_i)+\frac{\tan s_{\perp}\cos s_{//}}{\cos(\phi+s_{//})}(y-y_i)+h_i\sec\phi$$

$$\sigma_z=H\sec\phi\tan\theta, \quad (5)$$

式中： $a=\tan(\phi+s_{//})$  和  $b=\frac{\tan s_{\perp}\cos s_{//}}{\cos(\phi+s_{//})}$  分别为激光测量

坐标系下子目标的斜率； $x_i=x'_i\cos\phi$  和  $y_i=y'_i$  分别为子目标几何中心在激光测量坐标系下的横坐标和纵坐标，常量  $d=h_i\sec\phi$ 。

根据子目标的空间方程以及  $t$  时刻激光光斑的几何高度，则可以联合解算得到  $t$  时刻子目标的等高线  $L$  分布为：

$$y=-\frac{a}{b}x+\frac{u}{b} \quad (6)$$

式中： $u=H\sec\phi-ct/2-z_i$ ， $z_i=-ax_i-by_i+d$  为子目标在零点位置处的高度。

将等高线的公式(6)代入子目标响应公式(2)，根据线积分换算到一重积分的转换模型，可以解算得到第  $i$  个子目标响应函数为：

$$m_i(t)=\eta g(u)=$$

$$\eta\left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_{\max}-\Delta}{\sqrt{2}\sigma_0}\right)-\operatorname{erf}\left(\frac{x_{\min}-\Delta}{\sqrt{2}\sigma_0}\right)\right]\exp\left[-\frac{u^2}{2\sigma_z^2(a+b)}\right] \quad (7)$$

式中： $\eta$  是与时间无关的常量； $\sigma_0^2=\frac{b^2\sigma_z^2}{a+b}$ ； $\Delta=\frac{au}{a+b}$ ；

$x_{\max}$  和  $x_{\min}$  表示等高线与子目标区域边界交点横坐标的最大值和最小值，若假定子目标区域为标准的矩形结构，则它们满足以下形式：

域充满整个激光光斑范围，则  $x_{\min}\approx-\infty$ ， $x_{\max}\approx+\infty$ ，此时目标响应函数简化为：

$$m(t)=2\eta\exp\left\{-\frac{[t-2(H-h)]\sec\phi/c]^2}{2\times 4/c^2\times\sigma_x^2(a+b^2)}\right\} \quad (9)$$

式中： $h$  为激光光斑中心点处的目标高度。公式(9)表明，平面目标的响应函数满足理想的高斯形式，其特征参数与 Gardner 所推导的结果完全吻合<sup>[12]</sup>。然而，对于由多个平面目标组成的多模式目标而言，子目标的响应函数区别于理想的高斯分布，其表达式中包括误差函数项，它受到子目标的位置、高度、区域大小和倾斜角等多种因素的影响。

### 2 多模式陆地目标的激光测距模型

根据多模式目标响应函数的分布形式可知，星载激光测高仪的接收脉冲回波将是由若干时域上分离的子脉冲信号组成，每个子脉冲的时间重心反映了激光脉冲的渡越时间，其原理如图 2 所示。

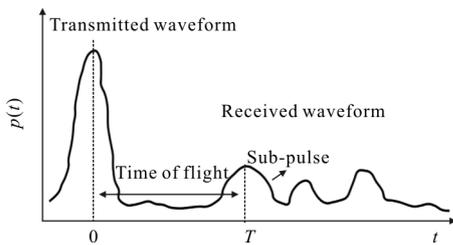


图 2 激光脉冲的渡越时间  
Fig.2 Time of flight of laser sub-pulse

基于接收脉冲回波的表达形式和卷积运算法则，可以解算得到子脉冲  $p_i(t)$  的时间重心的关系式为：

$$T = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} tp_i(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} p_i(t)dt} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} tm_i(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} m_i(t)dt} = T_h + \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (10)$$

式中： $T_h = \frac{2(H-h_i)}{c\cos\phi}$  为子目标中心位置处对应的激光渡越时间； $\Delta T_1 = \frac{2}{c}(ax_0+by_0)$  为由目标中心偏移引起的激光渡越时间； $\Delta T_2 = \frac{2}{c} \int_{-\infty}^{\infty} -ug(u)du / \int_{-\infty}^{\infty} g(u)du$  为子脉冲的非高斯特性引起的激光渡越时间。特殊地，对于平面目标而言，由目标中心偏移和非高斯特性引入的时间重心分量为 0，因此，其时间重心与目

标位置、高度、区域大小和倾斜角等因素无关。

根据子脉冲的时间重心公式(10)，可以解算出对应的激光测距值为：

$$\rho = \frac{2}{c} T = \rho_1 + \rho_2 = (H-h_i)\sec\phi + \left[ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} -ug(u)du}{\int_{-\infty}^{\infty} g(u)du} + (ax_0+by_0) \right] \quad (11)$$

式中： $\rho_1$  为目标区域范围内的平均激光测距值； $\rho_2$  为激光测距值的修正项。很显然，由子脉冲时间重心解算得到的激光测距值受到子目标的几何空间分布参数的制约，必须综合利用该分布参数对激光测距值进行修正。

### 3 基于多模式回波的激光测距值仿真分析

以 GLAS 星载激光测高仪系统的硬件参数<sup>[14]</sup>和子目标的初始空间参数作为仿真输入条件，仿真模拟出接收脉冲回波的形态分布及其时间重心的分布规律，具体的输入条件见表 1 所示。

表 1 星载激光测高仪和子目标的初始输入条件  
Tab.1 Initial input conditions of satellite laser altimeter and sub-target

Type of parameters	Name of parameters	Symbol of parameters	Value
Satellite orbit	Orbital height	$H$	600 km
	Divergence angle	$\theta$	29 $\mu$ rad(RMS)
Laser altimeter	Laser pointing angle	$\Phi$	1°
	Laser pulse width	$\delta_f$	1 ns(RMS)
	Area	$M$	0.5 $A_f$
Sub-target	Central height	$h_i$	5 m
	Central position	$(x_i', y_i')$	(0.5 $r$ , 0.5 $r$ )
	Slope angle	$s$	3°

表 1 中假定发射激光脉冲为标准的高斯子脉冲，其均方根脉宽为  $\delta_f$ ，在均方根位置处的激光光斑面积和半径分别为  $A_f$  和  $r$ ， $r = \sigma_z$ ， $A_f = \pi r^2$ ；子目标的区域为方形，其范围采用面积  $M$  来表示， $M = W_a W_b$ ，子目标的倾斜角  $s_{//}$  和  $s_{\perp}$  取值相同，均为倾斜角  $s$ 。

利用表 1 中的初始参数，结合数值仿真方法，模拟出子目标面积、中心高度、中心位置和倾斜角变化

时,接收子脉冲回波的分布规律,如图 3 所示。图 3 中接收子回波均以最大值进行归一化处理。

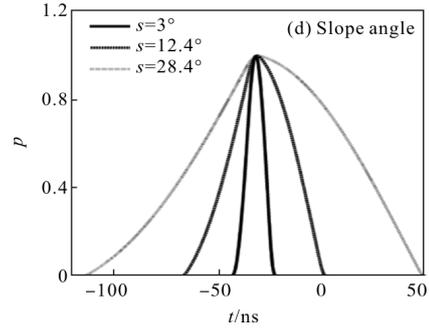
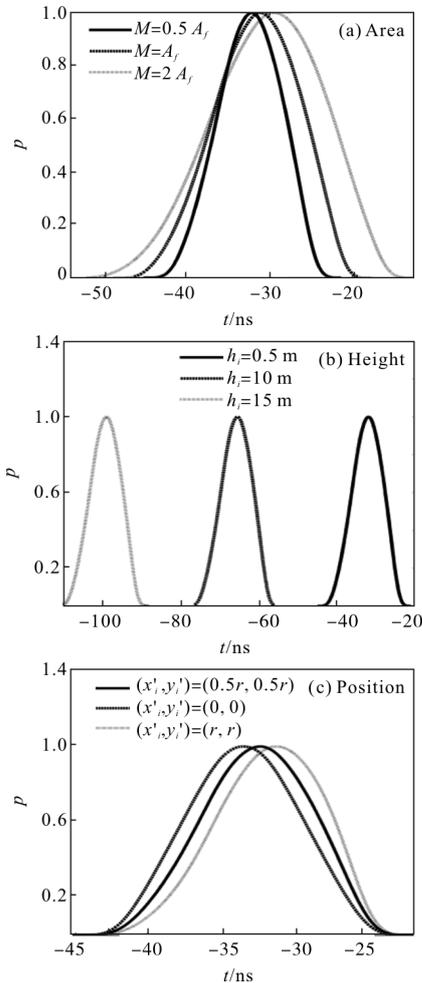


图 3 接收子脉冲回波形态随子目标空间参数的变化  
Fig.3 Distribution of received sub-pulse waveform with the variety of spatial parameters of sub-target

图 3 显示,随着子目标空间参数的变化,接收子脉冲回波的形态会发生不同程度的改变。其中,随着子目标面积、中心位置偏离光斑中心的距离以及倾斜角的增加,接收子脉冲的形态与高斯波形的差异也越大,而子目标高度的增加不改变接收子脉冲的形态。同时,接收子脉冲的时间重心会随着子目标的空间参数的改变而改变,图 3 中的接收子脉冲时间重心的变化结果如表 2 所示。

表 2 结果表明,子目标高度的变化仅反映出其中心位置处对应的激光渡越时间的变化,而与目标中心偏移和非高斯特性引入的激光渡越时间无关,也就是说,子目标高度的变化不会影响激光测距修正值及其激光测距精度。

表 2 不同子目标空间参数对应的接收子脉冲时间重心值(单位: ns)

Tab.2 Time-centroid of received sub-pulse for different spatial parameters of sub-target(Unit: ns)

Simulated condition	Original value	Changing factor							
		Area		Height		Position		Slope angle	
Time-centroid	-32.46	$M=A_f$	-31.68	$h_i=10\text{ m}$	-65.80	$(x'_i, y'_i)=(0,0)$	-33.33	$s=12.4^\circ$	-30.04
		$M=2A_f$	-30.38	$h_i=15\text{ m}$	-99.14	$(x'_i, y'_i)=(r,r)$	-31.61	$s=28.4^\circ$	-25.32

因此,以子目标的面积、位置和倾斜角为变量,分析出激光测距的修正值的变化规律,如图 4 所示。图 4 中目标倾斜角选取 Harding 规定的平坦、缓坡和陡坡倾斜角<sup>[15]</sup>,其数值分别为 3°、12.4°和 28.4°。

图 4 中,子目标面积采用  $M=\varepsilon A_f$  形式来表示,其中,  $\varepsilon$  表示面积比例系数。从图 4 中可以看出,随着子目标面积、偏离光斑中心的程度和倾斜角的增

加,激光测距修正值也增加。若子目标中心位置与光斑中心重合,则激光测距修正值近似为 0,即子目标面积和倾斜角对激光测距修正值的影响可以忽略不计。然而,若子目标中心位置偏离光斑中心值达到  $(r,r)$  时,则激光测距修正值迅速增大,对于平坦、缓坡和陡坡目标而言,其激光测距修正值分别达到了 1.33、4.98、12.07 m,对激光测距值的贡献不能忽略。

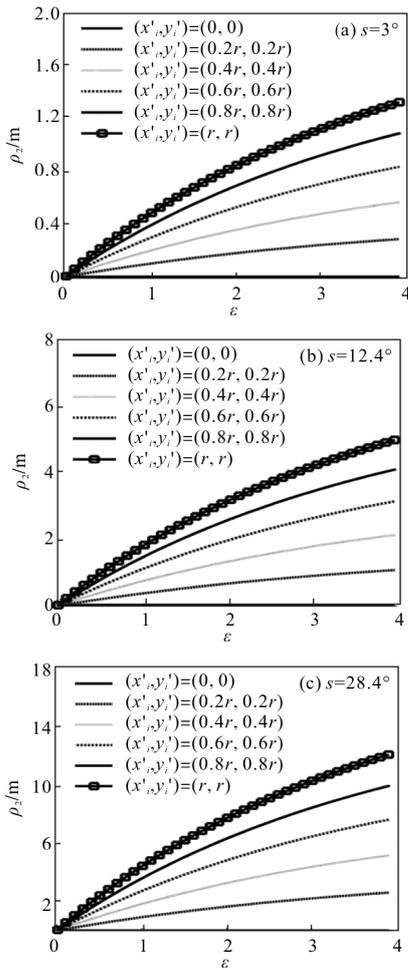


图 4 激光测距修正值随子目标面积、位置和倾斜角的变化规律  
Fig.4 Regularity of corrected range value with the area, position and slope angle of sub-target

基于图 4 的仿真结果并考虑到激光测距修正值近似与子面积比例系数成正比,因此,激光测距修正值可以表示为  $\rho_2 \approx \omega \varepsilon$ , 其中,  $\omega$  为图 4 中激光测距修正曲线的平均斜率,它与子目标位置和倾斜角有关。对于平坦、缓坡和陡坡子目标而言,  $\omega$  随子目标位置的分布规律如图 5 所示。

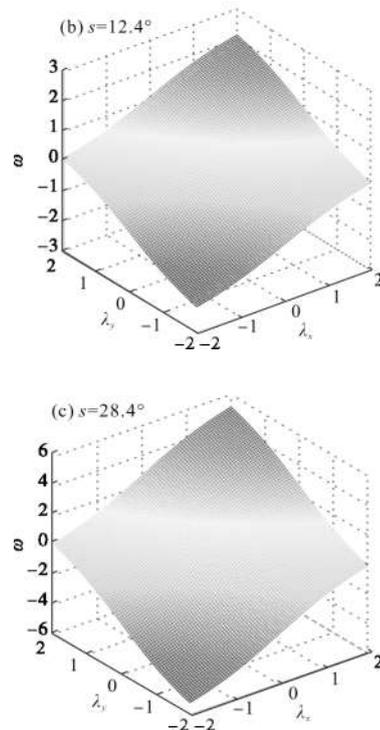
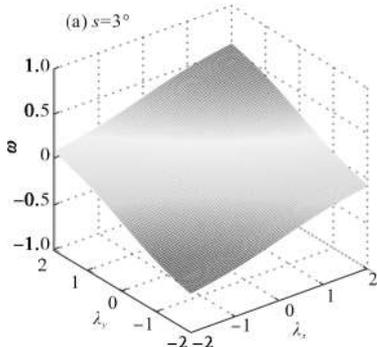


图 5 不同子目标倾斜角对应的  $\omega$  系数随子目标位置的变化规律  
Fig.5 Regularity of  $\omega$  coefficient with the position for different slope angle of sub-target

图 5 中,子目标的中心位置被设置为  $x' = \lambda_x r$ ,  $y' = \lambda_y r$ , 其中,  $\lambda_x$  和  $\lambda_y$  分别表示子目标的横纵坐标系数。图 5 显示,对于不同倾斜角的子目标而言,其中心位置对  $\omega$  系数的影响近似呈线性规律,子目标中心位置越偏离光斑中心,则  $\omega$  系数的绝对值也越大。通过对图 5 中的  $\omega$  数据进行平面拟合,假定  $\omega$  系数在  $\lambda_x$  轴和  $\lambda_y$  轴上的斜率值用  $\tau_x$  和  $\tau_y$  来描述,则当子目标倾斜角为  $3^\circ$ 、 $12.4^\circ$  和  $28.4^\circ$  时,  $(\tau_x, \tau_y)$  取值分别为  $(0.13, 0.18)$ 、 $(0.56, 0.60)$  和  $(1.38, 1.43)$ 。因此,  $\omega$  系数可以采用  $\lambda_x$  和  $\lambda_y$  来表示:  $\omega = \tau_x \lambda_x + \tau_y \lambda_y$ 。

考虑到斜率  $\tau_x$  和  $\tau_y$  与子目标倾斜角有关,则以子目标倾斜角为变量,模拟出  $\tau_x$  和  $\tau_y$  的变化趋势,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,斜率  $\tau_x$  和  $\tau_y$  与子目标倾斜角近似成线性关系,其变化规律基本保持一致。通过对图 6 的  $\tau_x$  和  $\tau_y$  数据进行直线拟合,得到它们与子目标倾斜角满足以下关系:

$$\tau_x = 0.0488s - 0.0285, \tau_y = 0.0494s - 0.0135 \quad (12)$$

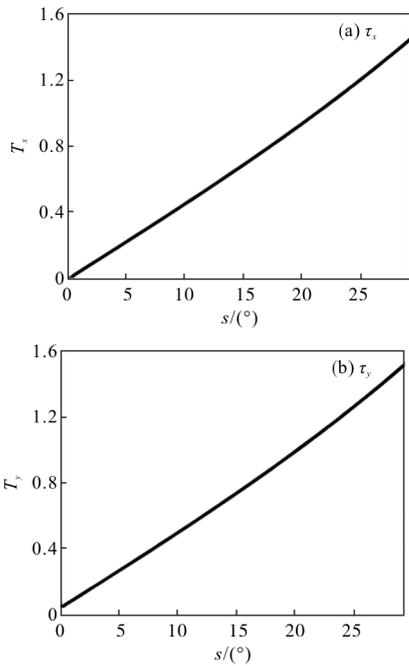


图 6  $\tau_x$  和  $\tau_y$  随子目标倾斜角的变化趋势  
Fig.6 Variety trend of  $\tau_x$  and  $\tau_y$  for different slope angle of sub-target

由于激光测距修正值与子目标中心位置、倾斜角和面积等诸多因素有关，因此，综合图 4~6 的仿真结果，近似采用线性函数来描述激光测距修正值，即：

$$\rho_2 \approx [(0.0488s - 0.0285)\lambda_x + (0.0494s - 0.0135)\lambda_y]\varepsilon \quad (13)$$

基于公式(13)结合子目标的几何特征信息，可以快速地计算出激光测距修正值，从而有效地提高多模式目标的激光测距精度。

以 2004 年 5 月 25 日 GLAS 星载激光测高仪所采集的某个多模式数据作为分析对象，其激光光斑所处的经纬度为(83.29°, -47.83°)，光斑范围内的目标数字高程模型采用丹麦机载激光雷达的点云数据来描述，如图 7 所示。

图 7 显示，激光光斑内的目标由两个不同高度起伏的目标组成，其中，高度较高的目标近似为一个斜面，通过对其高程数据进行拟合得到该斜面的倾斜角  $s$  约为 1.55°。同时，斜面区域面积约占图中光斑面积的 30%，并且斜面的区域中心坐标为 (15.58 m, 20.14 m)，区域范围内目标的平均高度约为 25.52 m。

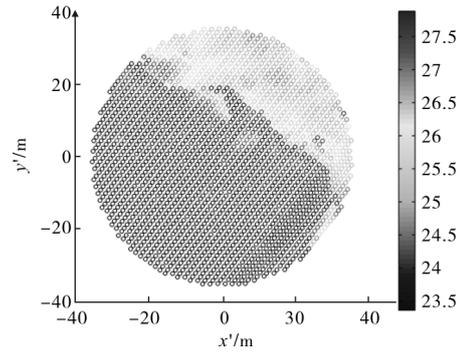


图 7 GLAS 某个激光光斑内的目标数字高程模型  
Fig.7 Digital elevation model within the certain laser footprint of GLAS

根据表 1 中 GLAS 的系统参数和卫星轨道高度，计算得到均方根位置处的激光光斑半径  $r$  和面积  $A_f$  为 17.40 m 和 951.15 m<sup>2</sup>，因此， $\lambda_x$  和  $\lambda_y$  分别为 0.90 和 1.16， $\varepsilon$  为 1.2，将其代入公式(13)计算得到激光测距修正值为 0.14 m。

将图 7 中激光光斑所对应的回波数据进行处理分析，以验证激光测距修正值的准确性，原始回波波形及处理结果如图 8 所示。

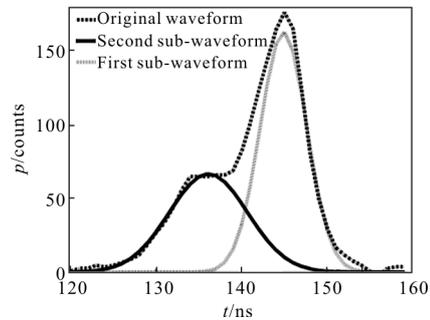


图 8 GLAS 原始回波和拟合结果  
Fig.8 Original waveforms and fitted results for GLAS

从图 8 可以看出，鉴于激光光斑内的目标是由两个不同高度分布的子目标组成，则其回波是由两个子脉冲叠加而成，其中第二个子脉冲对应于高度较高的目标，其时间重心为 136.11 ns。由 GLAS 星载激光测高仪技术文献<sup>[16]</sup>可知，图 8 中波形时间起点对应的激光测距值为 606 705.96 m，则由子脉冲时间重心解算得到的平均距离值为 606 726.38 m。结合大气延迟修正值 2.34 m，即激光测距值  $\rho$  为 606 724.04 m。考虑到 GLAS 激光指向角和轨道参数等信息均定义在国际地球坐标系下，根据参考文献[16]

可以得到, 卫星质心点和高度较高的子目标中心点坐标分别为(650 175.02 m, 506 561.07 m, 6 914 841.58 m)和(592 620.60 m, 459 893.02 m, 6 312 659.37 m), 则两点之间的距离值  $\rho_1$  为 606723.86 m。因此, 激光测距修正值  $\rho_2$  为 0.18 m, 将其与计算得到激光测距修正值 0.14 m 进行比较, 两者仅相差 0.04 m, 这表明修正模型和修正算法的正确性。

#### 4 结 论

多模式目标的接收脉冲回波形态分布与子目标的倾斜角、中心位置、高度和面积等多种几何因素有关。子目标几何参数的改变会导致接收脉冲回波时间重心发生改变, 从而导致激光测距值出现较大偏差, 这种偏差对于高精度星载激光测量而言不能忽略。通过总结分析激光测距修正值的变化规律, 可以采用线性函数来描述激光测距修正值, 因此, 基于子目标的几何先验知识, 可以有效对地激光测距结果进行改正, 所得结论对于提升多模式目标激光测距值具有重要的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on-orbit measurement performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 1-4.
- [2] Filin S, Csatho B. An efficient algorithm for the Synthesis of Laser Altimetry Waveforms, BPRC Technical Report 2000-02[R]. Columbus: The Ohio State University, 2000: 6-26.
- [3] Brenner A C, Zwally H J, Bentley C R, et al. The algorithm theoretical basis document for the derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights, NASA Technical Report NASA/TM-2012-208641/7, GSFC.TM.7299 [R]. Greenbelt, Maryland NASA Goddard Space Flight Center; 2012: 31-32.
- [4] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3): 405-445.
- [5] Huang C, Zhang S, Chen X. A topographic parameter inversion method based on laser altimetry [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(5): 1273-1280.
- [6] Li X, Xu L, Tian X, et al. Terrain slope estimation within footprint from ICESat/GLAS waveform: model and method [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063534-1-063534-24.
- [7] Poole W D B. Deriving planetary surface characteristics from orbiting laser altimeter pulse-widths on: mars, the moon, and earth[D]. London: University College London, 2015: 52.
- [8] Shi J, Menenti M, Lindenbergh R. Parameterization of surface roughness based on ICESat/GLAS full waveforms: a case study on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(4): 1278-1292.
- [9] Carabajal C C, Harding D J. SRTM C-band and ICESat laser altimetry elevation comparisons as a function of tree cover and relief [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(3): 287-298.
- [10] Wang C, Tang F, Li L, et al. Wavelet analysis for ICESat/GLAS waveform decomposition and its application in average tree height estimation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 115-119.
- [11] Zhou Hui, Li Song, Wang Liangxun, et al. Influence of single atmospheric scattering effect on received pulse waveform of satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106002. (in Chinese)  
周辉, 李松, 王良训, 等. 单次大气散射效应对星载激光测高仪接收脉冲回波的影响 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0106002.
- [12] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [13] Jiang Haijiao. Statistical properties of high repetition rate pulse laser radar range and its image quality evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)  
姜海娇. 高重复脉冲激光雷达测距系统统计特性及其像质评价[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [14] Sun X, 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.
- [15] David J Harding, Jack L Bufton, James J Frawley. 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.
- [16] Zwally H J, Schutz B E, Hancock D W. GLAS standard data products specification—Level 1/2 Version 8.0: ICESat (GLAS) science processing software document series volume [R]. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2005.