

## 椭圆高斯足印对星载激光测高仪测距值及其误差的影响

杨 驰<sup>1</sup>, 胡文怡<sup>1</sup>, 罗 敏<sup>1</sup>, 孙莹莹<sup>1</sup>, 周 辉<sup>1,2</sup>

(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:** 光束空间分布是影响星载激光测高仪测距指标的重要因素。根据星载激光测高仪接收脉冲回波分布特点, 通过对椭圆高斯足印及线性目标的理论建模, 基于接收脉冲回波信号时间重心及其方差的基本定义, 构建了椭圆高斯足印对星载激光测高仪测距值及其误差的影响模型。以 GLAS 星载激光测高仪为输入条件, 利用数值仿真分析的方法, 针对倾斜度和粗糙度分别为 ( $3^\circ, 1.7\text{ m}$ )、( $12.5^\circ, 8.9\text{ m}$ ) 和 ( $28.2^\circ, 14.5\text{ m}$ ) 的三种典型观测目标, 系统论述了椭圆高斯足印的椭圆率与方位角对测距值及其误差的影响规律。结果表明, 激光测距值基本与椭圆高斯足印的椭圆率和方位角无关, 其测距值余量最大值不超过 1 mm, 但是, 激光测距误差会随着椭圆高斯足印的椭圆率和方位角的增加产生起伏变化, 其测距误差余量最大值达到了 47.04 cm。所得结论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; 椭圆高斯足印; 激光测距值; 测距误差

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0717003

## Effect of elliptic Gaussian footprint on range and range error for satellite laser altimeter

Yang Chi<sup>1</sup>, Hu Wenyi<sup>1</sup>, Luo Min<sup>1</sup>, Sun Yingying<sup>1</sup>, Zhou Hui<sup>1, 2</sup>

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Geospatial Information Collaborative Innovation Center, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Spatial distribution of the beam is an important factor of affecting range indicators for satellite laser altimeter. According to the distribution characteristic of received pulse signal and definition of the received pulse signal's time-centroid and its variance, the influence models of elliptic Gaussian footprint on range and range error for satellite laser altimeter were built, by modeling theoretically the elliptical Gaussian footprint and the linear target. Based on parameters of Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), as for three typical observation target with slope degree and roughness ( $3^\circ, 1.7\text{ m}$ ), ( $12.5^\circ, 8.9\text{ m}$ ) and ( $28.2^\circ, 14.5\text{ m}$ ), the influences of the elliptical Gaussian footprint's ellipticity and azimuth on the range and range error were discussed systematically with the ways of numerical simulation. The results

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 基础测绘科技计划(212000169); 测绘地理信息公益性行业专项(201412007, 201512016); 上海航天科技创新基金(SAST201422); 民用航天科研工程项目子课题(240100040)

作者简介: 杨驰(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光测高仪数据处理方面的研究。Email: 529146376@qq.com

通信作者: 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

show that laser range almost has no relation with the elliptical Gaussian footprint's ellipticity and azimuth, its maximal difference is less than 1 mm. However, laser range error will fluctuate markedly with the elliptical Gaussian footprint's ellipticity and azimuth, corresponding maximal difference reaches 47.04 cm. The conclusions provide practical application values for hardware design and performance assessment of satellite laser altimeter.

**Key words:** satellite laser altimeter; received pulse signal; elliptical Gaussian footprint; range; range error

## 0 引言

具备波形记录功能的星载激光测高仪是一种主动式的激光测距设备。接收脉冲回波是星载激光测高仪的主要观测数据,是发射激光脉冲经过大气传输、目标散射和系统接收所采集得到的时域脉冲,与激光测高仪系统参数、大气参数和目标参数有关<sup>[1-3]</sup>。其中,发射激光脉冲的空间分布是影响其形态分布的重要因素。通过分析接收脉冲回波数据可以有效获取目标与激光测高仪之间的准确距离。

目前,星载激光测高仪测距值解算及误差分析理论主要是在假设激光足印的空间分布满足圆形高斯基模条件下得到的<sup>[4-8]</sup>。然而,在实际工作过程中,星载激光测高仪激光足印的空间分布形态与理论的圆形高斯分布之间会存在一定的差异。全球首颗对地观测星载激光测高仪 GLAS (Geosience Laser Altimeter System) 采集了其实际的激光足印轮廓<sup>[9]</sup>。由于受到泵浦源空间分布等多种因素的影响,在大多数情况下激光足印轮廓都服从椭圆高斯分布。因此,传统的激光测距值及其误差的分析理论将不再适用,必须构建面向椭圆高斯足印的激光测距值及其误差的理论模型。

文中将从星载激光测高仪接收脉冲回波的分布模型出发,系统分析时间重心及其方差与光束空间分布的关系,以椭圆形高斯足印和圆形高斯足印作为分析对象,建立它们对激光测距值与误差的影响模型。同时,采用数值仿真方法定量描述出椭圆高斯足印的空间参数与星载激光测高仪测距值及误差的内在关联,从而为评价椭圆高斯模式下星载激光测高仪的使用性能提供直接的理论依据。

## 1 椭圆高斯足印条件下接收脉冲回波的表达形式

通常情况下,若仅考虑大气衰减效应,对于典型的漫反射体目标而言,星载激光测高仪采用 APD 探测器所接收到的接收脉冲回波可以描述为<sup>[1]</sup>

$$p(t) = N_p \iint_{\Sigma} I(x, y) f \left[ t - \frac{2R}{c} + \frac{2h(x, y)}{c} + \frac{x^2 + y^2}{cR} \right] dx dy \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为激光足印强度的归一化空间分布; $f(t)$ 为发射激光脉冲在时域上的归一化分布; $\Sigma$ 为发射激光在目标上的光斑范围; $N$ 为接收脉冲回波的光电子数, $N = E_i T_a \rho_s \cos \alpha A_r \eta_r R^{-2} \eta (h\nu)^{-1}$ ,其中, $E_i$ 为发射激光的单脉冲能量, $T_a$ 为大气的单程透过率, $\rho_s$ 为目标表面的漫反射率, $\alpha$ 是发射激光中心方向与目标法线之间的夹角, $A_r$ 和 $\eta_r$ 分别为接收望远镜的有效面积和透过率, $\eta$ 为探测器量子效率, $h\nu$ 为单光子能量; $c$ 为光速; $R$ 为发射激光中心与目标之间的斜距, $R \approx H / \cos \phi$ ,其中, $H$ 为卫星轨道高度; $\phi$ 为激光指向角; $h(x, y)$ 为目标的几何高度分布。

在星载激光测高仪系统参数和观测条件已知的前提下,接收脉冲回波主要与激光足印的空间分布和目标的几何分布有关,因此,根据星载激光测高仪的工作过程和椭圆高斯激光足印的空间分布特点,定义目标参考坐标系 $o_t - x_t y_t z_t$ 、激光指向坐标系 $o_p - x_p y_p z_p$ 和激光光束坐标系 $o - xyz$ ,如图 1 所示,描述发射激光和目标的分布模型,以解算接收脉冲回波形态的理论表达形式。

目标参考坐标系是以激光束中心与被测目标的交点为坐标原点 $o_t$ ,以卫星的飞行方向作为 $x_t$ 轴方向,以天顶方向作为 $z_t$ 轴方向, $y_t$ 轴方向根据右手螺旋法则确定;激光指向坐标系是以激光束中心的反方向作为 $z_p$ 轴方向, $y_p$ 轴和坐标原点 $o_p$ 分别与 $y_t$ 轴

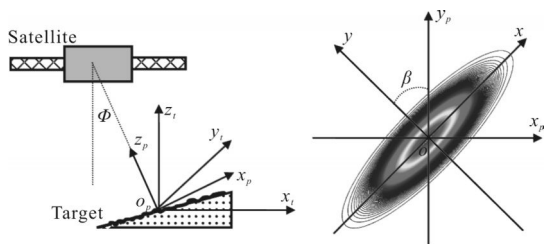


图 1 星载激光测高仪测量过程中的几个坐标系

Fig.1 Several coordinate systems during satellite laser altimeter measurement

和  $o_i$  点重合,  $x_p$  轴同样根据右手螺旋法则确定; 激光光束坐标系是以椭圆足印的长轴和短轴方向分别作为  $x$  轴和  $y$  轴,  $z$  轴和坐标原点  $o$  分别与  $z_p$  轴和  $o_p$  点重合。

基于卫星飞行坐标、激光指向坐标系和激光光束坐标系的定义可知, 它们之间的转换关系满足以下关系式:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为椭圆高斯足印的方位角。

通常情况下, 激光光斑内的被测目标可描述为平面漫反射体, 它在目标参考坐标系下可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$z_i = x_i \tan s_{//} + y_i \tan s_{\perp} + \Delta h \quad (3)$$

式中:  $s_{//}$  和  $s_{\perp}$  分别为目标在平行和垂直于卫星飞行方向的倾斜角;  $\Delta h$  为目标的粗糙度分布。因此, 利用目标参考坐标系、激光指向坐标系和激光光束坐标系之间的转换关系, 可以得到在激光光束坐标系下的目标几何高度分布为:

$$h(x, y) = \frac{\tan s_{\perp} \cos s_{//} \sin\beta - \cos\beta \sin(\phi + s_{//})}{\cos(\phi + s_{//})} x + \frac{\sin\beta \sin(\phi + s_{//}) + \tan s_{\perp} \cos s_{//} \cos\beta}{\cos(\phi + s_{//})} y + \frac{\Delta h \cos(s_{//})}{\cos(\phi + s_{//})} \quad (4)$$

在激光光束坐标系下, 定义椭圆高斯足印在长轴和短轴方向上的发散角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 则椭圆高斯足印的空间分布可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$I(x, y, \theta_1, \theta_2) = (\sqrt{2\pi} R \tan \theta_1)^{-1} (\sqrt{2\pi} R \tan \theta_2)^{-1} \times$$

$$\exp\left(-\frac{x^2}{2R^2 \tan^2 \theta_1} - \frac{y^2}{2R^2 \tan^2 \theta_2}\right) \quad (5)$$

将关系式(4)和(5)分别代入关系式(1), 可以得到椭圆高斯足印条件下接收脉冲回波的表达形式。特殊地, 当  $\beta=0$  且  $\theta_1=\theta_2$  时, 则关系式(1)演变为圆形高斯激光足印条件下的接收脉冲回波形式。

## 2 椭圆高斯足印模式对激光测距值及其误差的影响模型

### 2.1 椭圆高斯足印对激光测距值的影响

星载激光测高仪通常是利用其接收脉冲回波信号的时间重心来计算激光测距值<sup>[4]</sup>, 基于接收脉冲回波信号的一阶矩可以描述其时间重心的表达式, 激光测距值的数学表达式为:

$$\rho(I) = \frac{c}{2} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} tp(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) dt} = R + \frac{1}{R} \iint_{\Sigma} (x^2 + y^2) I(x, y, \theta_1, \theta_2) dx dy - \overline{\Delta h} \quad (6)$$

式中:  $\overline{\Delta h}(I) = \iint_{\Sigma} \frac{\Delta h \cos(s_{//})}{\cos(\phi + s_{//})} I(x, y, \theta_1, \theta_2)$  表示受光束空间分布所调制的目标粗糙度均值, 通常情况下, 由于激光光斑大小远大于目标轮廓的相干长度, 因此, 目标粗糙度的均值可以近似为零<sup>[11]</sup>。

若定义激光测距值余量  $\Delta\rho$  为椭圆形高斯足印与圆形高斯足印所对应的激光测距值的差值, 则根据激光测距值的关系式(6)和光束空间分布的关系式(5), 可以解算得到激光测距值余量为:

$$\Delta\rho = \rho(I_e) - \rho(I_c) = \frac{R}{2} (\tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2 - 2 \tan^2 \theta_T) \quad (7)$$

式中:  $I_e$  和  $I_c$  分别表示椭圆形和圆形高斯足印的光强分布,  $I_e = I(x, y, \theta_1, \theta_2)$ ,  $I_c = I(x, y, \theta_T, \theta_T)$ ,  $\theta_T$  为圆形高斯足印的发散角。很显然, 椭圆高斯足印的长轴和短轴上的发散角数值是决定激光测距值余量大小的关键。

### 2.2 椭圆高斯足印对激光测距误差的影响

接收脉冲回波时间重心的方差反映了激光测距误差的大小<sup>[4]</sup>, 根据接收脉冲回波时间重心的定义以及概率统计中方差的运算法则, 在仅考虑椭圆高斯光斑和目标空间分布对激光测距误差影响的条件, 可以得到激光测距误差  $e$  的关系形式为:

$$e^2(I) = \frac{c^2}{4} \left[ \frac{F}{N} \sigma_s^2 + \frac{F}{K_S} \int_{\Sigma} (x^2+y^2) \left[ \frac{2R}{c} + \frac{2h(x,y)}{c} + \frac{x^2+y^2}{cR} - T \right]^2 \times P^2(x,y) dx dy \right] \quad (8)$$

式中： $\sigma_s$  和  $T$  分别表示接收脉冲回波的均方根脉宽和时间重心<sup>[6]</sup>； $F$  为星载激光测高仪光电探测器的噪声系数； $K_S$  为散斑因子， $K_S=4\pi A_r \tan^2 \theta_r \lambda^{-2}$ ， $\lambda$  为发射激光的波长。

同理，若定义激光测距误差值余量  $\Delta e$  为椭圆形高斯足印与圆形高斯足印所对应的激光测距误差值的差异，则根据激光测距误差值的关系式(8)和光束空间分布的关系式(5)，激光测距误差余量可以描述为：

$$\Delta e = e^2(I_e) - e^2(I_c) = \left( \frac{F}{N} + \frac{1}{K_S} \right) \frac{\Delta r \cos^2 S}{\cos^2(\phi+S)} + \left[ \left( \frac{F}{2N} + \frac{3}{16K_S} \right) (\tan^4 \theta_1 + \tan^4 \theta_2 - 2 \tan^4 \theta_T) + \frac{1}{8K_S} (\tan^4 \theta_1 \tan^4 \theta_2 - \tan^4 \theta_T) \right] R^2 + \left( \frac{F}{N} + \frac{1}{2K_S} \right) \times \left[ \tan^2 \theta_1 \left[ \tan(\phi+S) \cos \beta + \frac{\tan S_{\perp} \cos S}{\cos(\phi+S)} \sin \beta \right]^2 + \tan^2 \theta_2 \left[ -\tan(\phi+S) \sin \beta + \frac{\tan S_{\perp} \cos S}{\cos(\phi+S)} \cos \beta \right]^2 - \tan^2 \theta_T \left[ \tan^2(\phi+S) + \frac{\tan^2 S_{\perp} \cos^2 S}{\cos^2(\phi+S)} \right] \right] \quad (9)$$

式中： $\Delta r = \int_{\Sigma} \Delta h^2(I_e - I_c) dx dy$  为椭圆形和圆形高斯足印条件下目标粗糙度的差值。激光测距误差余量不仅与椭圆高斯足印长轴和短轴上的发散角有关，而且与其方位角有关。

### 3 仿真结果分析

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 GLAS 地球科学星载激光测高仪系统，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数据<sup>[12]</sup>。GLAS 系统的主要观测参数如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

星载激光测高仪实际运行过程中，激光足印的平均大小(能量中心  $e^{-2}$  位置处)为  $52 \text{ m} \times 95 \text{ m}$ <sup>[7]</sup>，对应的长轴和短轴上的激光发散角分别为  $21.75 \mu\text{rad}$  和  $39.15 \mu\text{rad}$ ，其分布如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 GLAS 星载激光测高仪基本测量参数  
Tab.1 Basic measurement parameters for geoscience laser altimeter system

Name and signal of parameters	Value
Wavelength of laser( $\lambda$ )	1 064 nm
Photon energy( $h\nu$ )	$1.87 \times 10^{-19}$ J
Energy of transmitted laser pulse( $E_t$ )	75 mJ
Laser beam divergence( $\theta_r$ )	29 $\mu\text{rad}$
Area of receiver telescope( $A_r$ )	0.638 $\text{m}^2$
Transmittance of receiver telescope( $\eta_r$ )	0.5
Quantum efficiency of APD( $\eta$ )	0.35
Noise factor of APD( $F$ )	3.24
One-way atmospheric transmittance( $T_a$ )	0.5
Satellite orbital altitude( $H$ )	600 km
Laser pointing angle( $\Phi$ )	$0^\circ$
Reflectance of measured target( $\rho_s$ )	0.35

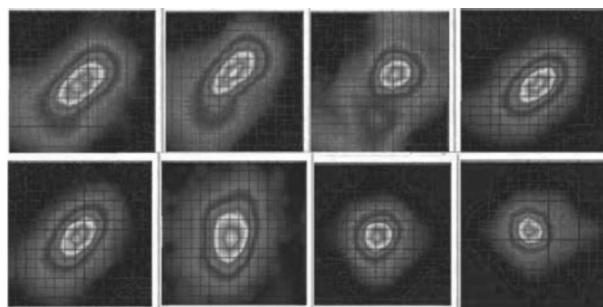


图 2 不同运行阶段 GLAS 激光远场衍射光斑的采样图

Fig.2 Sample GLAS images of the laser far field patterns measured during different campaigns

定义椭圆高斯足印在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的椭圆率分别为  $\gamma_x = \theta_1/\theta_T$  和  $\gamma_y = \theta_2/\theta_T$ ，则 GLAS 星载激光测高仪椭圆高斯足印的椭圆率分别为 0.75 和 1.35。选取平坦、缓坡和陡坡三种观测目标作为分析对象<sup>[4]</sup>，对应的倾斜度和粗糙度分别为  $(3^\circ, 1.7 \text{ m})$ 、 $(12.5^\circ, 8.9 \text{ m})$  和  $(28.2^\circ, 14.5 \text{ m})$ ，仿真分析了椭圆高斯足印模式参数对星载激光测高仪激光测距值及其误差的影响规律。图 3 仿真出激光测距值余量  $\Delta \rho$  椭圆高斯足印椭圆率的变化分布，图 4 模拟出椭圆高斯足印方位角为  $0$  时激光测距误差余量  $\Delta e$  与其椭圆率之间的关系曲线。

从图 3 中可以看出，随着椭圆高斯足印的椭圆率的变化，激光测距值余量也相应地发生改变。当椭圆率偏离 1 的程度越大时，激光测距值余量的绝对值越大；当椭圆率越接近 1 时，激光测距值余量的绝

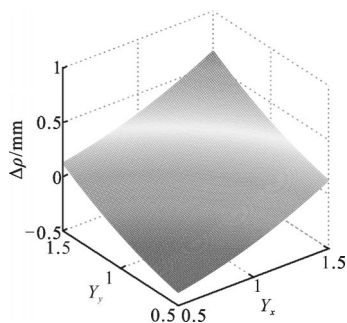
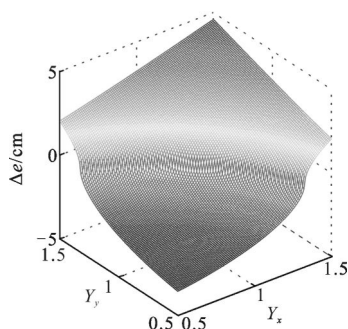


图 3 椭圆高斯足印的椭圆率对激光测距值余量的影响

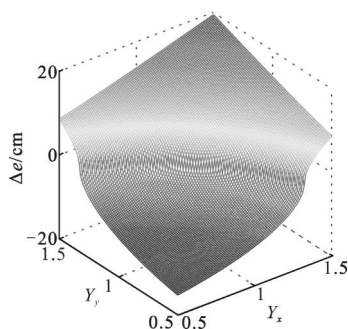
Fig.3 Influence of elliptical Gaussian footprint ellipticity on difference of range

对值越小。在椭圆率为 0.5~1.5 范围内,激光测距值余量的绝对值不超过 1 mm,即椭圆高斯足印对激光测距值的影响几乎可以忽略不计。特殊地,对于 GLAS 实测椭圆高斯足印的椭圆率,其激光测距值余量仅为 0.1 mm。

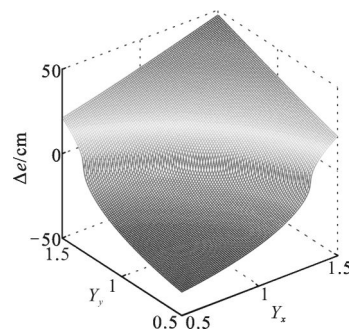
图 4 表明,目标空间参数和椭圆高斯足印的椭圆率都会对激光测距误差余量产生较大的影响。当目标空间参数不变的情况下,激光测距误差余量与椭圆率的大小成正比,椭圆率越大,则激光测距误差余量也越大,反之亦然。当椭圆高斯足印的椭圆率取值固定时,随着目标倾斜度和粗糙度的增加,激光测



(a) (3°, 1.7 m)



(b) (12.5°, 8.9 m)



(c) (28.2°, 14.5 m)

图 4 三种目标对应的激光测距误差余量随椭圆率变化的关系曲线

Fig.4 Relationship curve between difference of range error and elliptical

Gaussian footprint ellipticity for three ground targets  
距误差余量的绝对值增加。在椭圆率为 0.5~1.5 范围内,三种观测目标所对应的激光测距误差余量的最大值分别为 4.58 cm、19.46 cm 和 47.04 cm。

基于 GLAS 实测椭圆高斯足印的椭圆率和三种观测目标参数,其激光测距误差余量的数值解算结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,不同测量目标条件下激光测距误差余量存在差异,三种观测目标对应的测距误差余量分别为 1.81 cm、7.68 cm 和 18.48 cm。这种差异主要是由于目标倾斜度和粗糙度导致回波信号展宽的程度不同所造成的。图 5 给出了椭圆高斯足印条件下三种目标对应的回波信号的形态分布。

表 2 三种目标条件下的 GLAS 测距误差余量

Tab.2 Difference of range error with GLAS for three ground targets

Range error	Slope and roughness of target		
	(3°, 1.7 m)	(12.5°, 8.9 m)	(28.2°, 14.5 m)
$e^2(I_r)$	51.78 cm <sup>2</sup>	1 224.78 cm <sup>2</sup>	4 404.92 cm <sup>2</sup>
$e^2(I_e)$	48.50 cm <sup>2</sup>	1 165.83 cm <sup>2</sup>	4 063.43 cm <sup>2</sup>
$\Delta e^2$	3.28 cm <sup>2</sup>	58.95 cm <sup>2</sup>	341.49 cm <sup>2</sup>
$\Delta e$	1.81 cm	7.68 cm	18.48 cm

图 5 表明,回波信号的均方根脉宽随着目标倾斜度和粗糙度的增加而增加,同时,它与圆形高斯激光足印条件下回波信号的均方根脉宽差异也逐渐增加,其差异值分别为 0.49 ns、1.82 ns 和 5.61 ns。考虑到激光测距误差余量与回波信号的脉宽差异成正比,因此,激光测距误差余量也出现增加趋势。

事实上,椭圆高斯足印的方位角也会改变激光测距误差余量,以 GLAS 椭圆高斯足印的实际椭圆

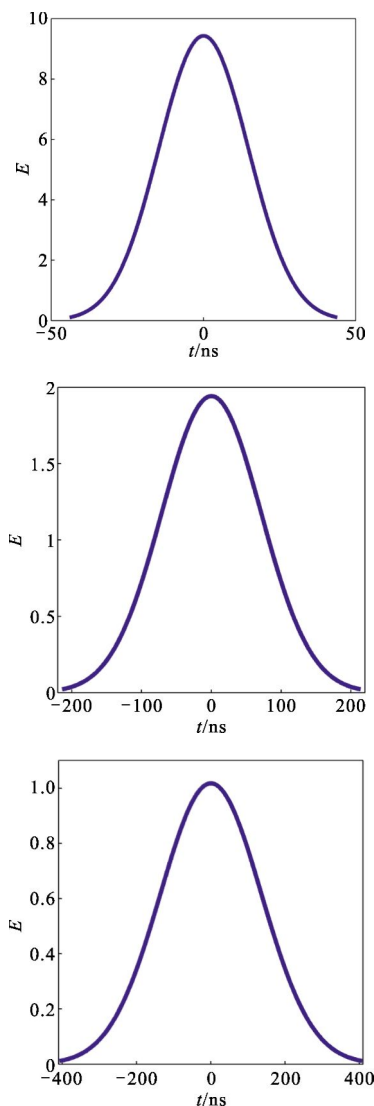


图 5 椭圆高斯足印条件下三种目标对应的回波信号形态分布  
Fig.5 Waveform distribution of received pulse signal with elliptical Gaussian footprint for three ground targets

率为输入，可以仿真得到激光测距误差余量与方位角之间的分布曲线，如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，随着椭圆方位角的变化，激光测距误差值的差异呈现周期性变化，其变化周期与目标分布无关，为  $360^\circ$ 。当椭圆方位角取值为  $45^\circ$  和  $225^\circ$  时，三种目标条件下的激光测距余量取值最小，其数值分别为  $-2.72\text{ cm}$ 、 $-11.50\text{ cm}$  和  $-27.84\text{ cm}$ ；当椭圆方位角取值为  $135^\circ$  和  $315^\circ$  时，三种目标条件下的激光测距误差余量取值最大，其数值分别为  $3.73\text{ cm}$ 、 $15.80\text{ cm}$  和  $38.19\text{ cm}$ 。因此，在椭圆高斯足印椭圆率固定的情况下，可以通过调整其方位角的数值来达到减小激光测距误差的目的。

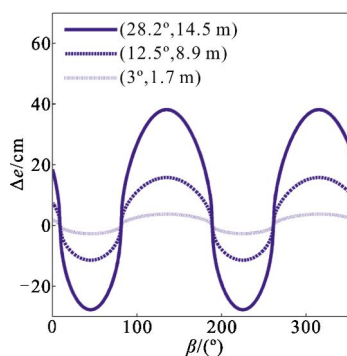


图 6 三种目标对应的激光测距误差余量椭圆方位角变化的分布曲线

Fig.6 Distribution curves of range error difference with azimuth of elliptical Gaussian footprint for three ground targets

### 4 结论

文中系统构建了椭圆高斯足印对星载激光测高仪测距值及其测距误差的影响模型，并定量仿真分析了它们之间的内在联系。通过对仿真结果的统计分析表明，椭圆高斯足印的椭圆率和方位角基本不会影响激光测距值，但是会使得激光测距误差的数值大小有显著变化。以 GLAS 星载激光测高仪为例，当目标倾斜度和粗糙度取值为  $28.2^\circ$  和  $14.5\text{ m}$  时，激光测距值余量最大值不超过  $1\text{ mm}$ ，但是其激光测距误差余量的最大值达到了  $47.04\text{ cm}$ 。所得结论对于星载激光测高仪的设计与指标评估具有一定的指导作用。

### 参考文献

[1] 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.

[2] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Noise suppression method for received waveform of satellite laser altimeter based on adaptive filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3263–3268. (in Chinese)  
马跃, 李松, 周辉, 等. 利用自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3263–3268.

- [3] Huang H, Wynne R H. Simulation of lidar waveforms with a time-dependent radiosity algorithm [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2013, 39(S1): S126–S138.
- [4] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061–1072
- [5] Dolan K A, Hurtt G C, Chambers J Q, et al. Using ICESat's geoscience laser altimeter system (GLAS) to assess large-scale forest disturbance caused by hurricane Katrina[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(1): 86–96.
- [6] 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 [R]. US: NASA Goddard Space Flight Center, 2012.
- [7] 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.
- [8] Ma Yue, Yang Fanlin, Lu Xiushan, et al. Elevation error analysis of spaceborne laser altimeter for earth observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1042–1047. (in Chinese)  
马跃, 阳凡林, 卢秀山, 等. 对地观测星载激光测高系统高程误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 1042–1047.
- [9] 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, L21S02–1–4.
- [10] 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.  
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.
- [11] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(3): 448–453.
- [12] 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.
- [13] Fowler D K, Haran T M, McAllister M, et al. Enhancements for the geoscience laser altimeter system (GLAS) data products and services[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2014, 1: 0290.