

文章编号: 1001-3806(2012)04-0490-03

## 自然地物对星载激光测高仪回波特性的影响

崔云霞, 牛燕雄, 颜国强, 冯丽爽, 王彩丽, 张鹏

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为了研究沙漠、草地等具有连续分布特点的自然地物对星载激光测高仪回波特性的影响, 以菲涅耳衍射理论为基础, 建立连续地面物理模型, 采用网格划分的方法, 对地面平均高度以及地面高度均方差对回波形状、功率和脉冲宽度等特性的影响进行了数值模拟研究。结果表明, 若地面高度均方差一定, 地面平均高度的变化不会引起脉冲回波信号的变化, 而地面高度均方差的变化会直接导致回波信号的变化。

**关键词:** 激光技术; 激光测高仪; 回波信号; 地面平均高度; 地面高度均方差

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.014

## Effect of natural terrain object on return signal of space based laser altimeter

CUI Yun-xia, NIU Yan-xiong, YAN Guo-qiang, FENG Li-shuang, WANG Cai-li, ZHANG Peng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** According to the theory of Fresnel diffraction, a continuous land model was established for natural terrain like desert and grass land, a method of gridding partition was developed to simulate the effect of average surficial height and height mean square error on the properties of return signal, including waveform, power and pulse width. The results show that height mean square error determines the properties of return signal, while the change of terrain mean height cause no difference in return signal in the case of fixed height mean square error.

**Key words:** laser technique; laser ranging; return signal; surficial average height; surficial height mean square error

### 引言

星载激光测高仪在国民经济及军事等领域发挥着重要的作用, 近年来世界上许多国家都开展了星载激光测高技术的研究<sup>[1-2]</sup>。星载激光测高仪通过测量接收系统接收到的回波时延获得地表目标的高程, 其测量结果很大程度上受回波信号的影响<sup>[3]</sup>。地面目标的复杂性是导致回波脉冲波形畸变的直接原因, 国内外有关地面目标对回波信号的影响均有大量研究, 其中大多是针对斜坡、阶梯及突变等典型地形的分析研究<sup>[4-8]</sup>。

沙漠、草坡、森林以及丘陵等自然地物都具有连续分布的特点, 并且由于地物的单一性, 可以认为激光足印内各点对激光的反射率相同。本文中针对沙漠、草坡等地物特点, 建立了连续地面模型, 采用网格化划分方法对地面目标进行离散处理, 数值计算了回波信号特性受地面平均高度和高度均方差的影响。

### 1 回波信号

脉冲激光测距系统由激光发射系统、激光接收系统和时间间隔测量系统 3 个基本部分组成。激光发射系统向目标发射高功率的激光脉冲, 激光发射系统出瞳光场分布为:

$$U_0(x, y, t) = U_0(x, y) f(t) \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

式中,  $U_0(x, y)$  为激光发射脉冲在空域上的分布,  $f(t)$  为振幅随时间的变化,  $t$  为时间,  $\omega_0$  为激光频率。

星载激光测高仪大都选用激光波长为 1064nm 的 Nd:YAG 激光器, 并且其激光发射系统及接收系统与目标之间距离  $z_1$  通常在几百千米, 满足夫琅和费衍射条件<sup>[9]</sup>:

$$z_1 \geq \frac{kw^2}{2} \quad (2)$$

式中  $k$  为入射光波波数,  $w$  为激光束的束腰半径。激光发射系统发射的激光脉冲经长距离传输, 在地面形成一个具有一定面积的圆形光斑; 经过复杂地物的反射后, 回波脉冲由接收探测器接收, 接收功率为<sup>[5]</sup>:

$$P(t) = \gamma(z) \iint \beta(\xi, \eta) \times \exp\left[-\frac{(t-\psi)^2}{2\sigma^2} - \frac{\xi^2 + \eta^2}{2R(\xi, \eta)^2 \tan^2 \theta}\right] d\xi d\eta \quad (3)$$

作者简介: 崔云霞(1986-), 女, 硕士, 主要从事星载激光测高仪测距误差方面的研究。

E-mail: wsac86@163.com

收稿日期: 2011-10-17; 收到修改稿日期: 2011-12-02

式中  $\gamma(z) = \frac{A_r T_a^2 T_r E}{(2\pi)^{3/2} \sigma R^4 \tan^2 \theta}$ ,  $\psi = \frac{2z}{c} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{cR} - \frac{2h(\xi, \eta)}{c}$ 。  $A_r$  为接收望远镜的面积,  $T_a$  为大气对入射激光的单程透过率,  $T_r$  为接收光学系统的透过率,  $c$  为光速,  $E$  为发射激光的能量,  $\sigma$  为入射激光脉冲的脉冲宽度,  $\theta$  为激光发散角,  $\beta(\xi, \eta)$  为地面各点的反射率, 本文中假设光斑足印内各点反射率相同,  $z$  为激光发射端到地面的垂直距离,  $R$  为光束传播的距离。

## 2 回波信号数值模拟研究

### 2.1 坐标变换

建立基准坐标系和测量坐标系<sup>[7,10]</sup>,如图 1 所示。以激光足印中心点为坐标原点,设为  $O$  点。基准坐标系  $O-\xi\gamma\eta$  以平行卫星运行方向为  $\xi$  轴,平行天底方向为  $\gamma$  轴,  $\eta$  轴由右手螺旋法则判定;测量坐标系  $O-\xi_1\gamma_1\eta_1$  是将基准坐标系顺时针旋转  $\varphi$  角度后得到。对于角度  $\varphi$  的符号作如下规定:若从  $\gamma$  轴到  $\gamma_1$  轴的锐角是顺时针为正,逆时针则为负。

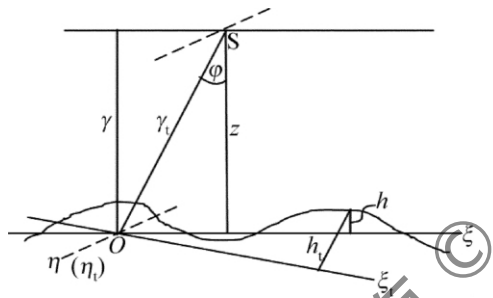


Fig. 1 Coordinate transformation

图 1 中的  $h$  和  $h_1$  分别代表在基准坐标系和测量坐标系下地面的高度,考虑简单的几何关系,得到:

$$h_1 = \xi \sin \varphi + h \cos \varphi \quad (4)$$

$$\xi_1 = \xi \cos \varphi - h \sin \varphi \quad (5)$$

$$\eta_1 = \eta \quad (6)$$

### 2.2 数值计算方法

已公布的关于地面目标对回波信号的影响大多针对突变和阶梯等典型地物,其各点的高度  $h$  直接用该点地面坐标  $(\xi, \eta)$  进行数学公式的统一描述,然后代入功率积分公式即可计算。而连续地面各点高度比较复杂,难以用包含地面坐标的数学表达式简单描述,所以采用离散化处理,将离散后地面各点回波功率的求和来近似积分运算。将激光足印内地面分解为  $N$  个面积相同面积元,在每一个面积元内取一点,以该点高度代替整个面积元内的高度,接收功率即可表示为:

$$P(t) = \gamma(z) \sum_{i=1}^N \beta(\xi, \eta) \times \exp\left[-\frac{(t - \psi_i)^2}{2\sigma^2} - \frac{\xi_i^2 + \eta_i^2}{2R^2 \tan^2 \theta}\right] \Delta_s \quad (7)$$

式中  $\psi_i = \frac{2z}{c} + \frac{\xi_i + \eta_i}{cz} - \frac{2h_i}{c}$ ,  $(\xi_i, \eta_i)$  为第  $i$  个点的坐标,  $h_i$  为第  $i$  个点的高度,  $\Delta_s$  为面积元的面积。

忽略地面微观粗糙度和大气传输的影响,将地面平均高度  $H_{\text{mean}}$  及地面均方差  $H_{\text{MSE}}$  作为地面的两个主要特征进行分析。

其中,地面平均高度为所有面积元高度取平均值,即:

$$H_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (8)$$

地面高度均方差为:

$$H_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - H_{\text{mean}})^2} \quad (9)$$

对面积元高度  $h_i$  进行下面的变化得到新的高度分布:

$$h_i' = h_i - H_{\text{mean}} + a \quad (10)$$

可以求得  $h_i'$  的平均高度为:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - H_{\text{mean}} + a) = a \quad (11)$$

即  $h_i'$  的平均高度为  $a$ ,即利用(10)式可以变换得到理想平均高度的地面。

设地面的高度均方差为  $H_{\text{MSE}}$ ,对面积元高度  $h_i$  进行(11)式的变换得到新的高度分布:

$$h_i' = h_i \frac{b}{H_{\text{MSE}}} \quad (12)$$

可以求得  $h_i'$  的平均高度为:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i' = \frac{b}{H_{\text{MSE}}} H_{\text{mean}} \quad (13)$$

将(11)式、(12)式代入(9)式,可以得到:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ h_i' - \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i' \right) \right]^2} = b \quad (14)$$

即新的地面高度均方差为  $b$ ,所以可以利用(12)式来得到特定高度均方差的地面高度分布。

### 2.3 回波特性分析

利用软件随机生成连续地面模型如图 2 所示,以图 2 为基本地面模型,利用(10)式、(12)式等对模型的高度进行函数变换,可以得到不同的地面平均高度以及地面高度均方差。

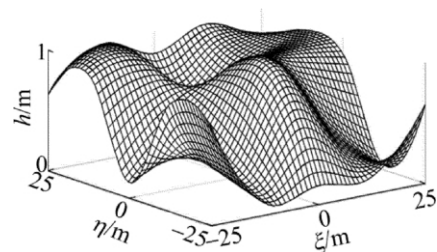


Fig. 2 Random continuous terrain model

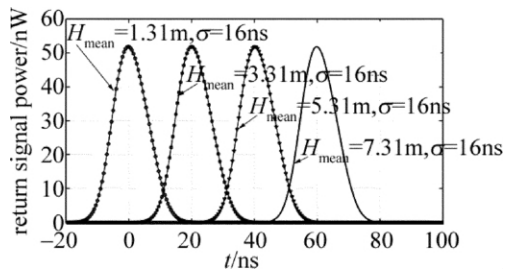
设定好地面模型后,利用(3)式计算回波功率,各参量如表 1 所示。

Table 1 Parameters of altimeter system

$\lambda/\text{nm}$	$\theta/\text{mrad}$	$\sigma/\text{ns}$	$E/\text{mJ}$	$z_r/\text{km}$	$T_a^2$	$T_r$	$A_r/\text{m}^2$
1064	0.1	4	100	500	0.4	0.6	0.8

为方便计算并保证光斑的完整性,取积分区域为边长为50m的正方形,将积分区域平均分解为10000个网格,每个网格为面积 $0.25\text{m}^2$ 的正方形。

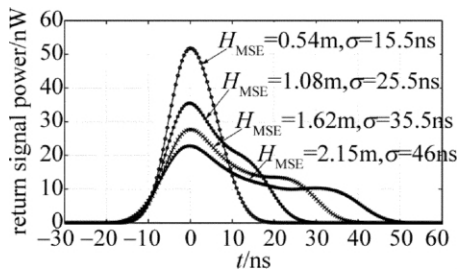
2.3.1 地面平均高度对回波信号的影响 对图2的基本模型进行变换,得到地面高度均方差 $H_{\text{MSE}}$ 均为0.54m,地面平均高度 $H_{\text{mean}}$ 分别为1.31m,3.31m,5.31m以及7.31m的4个地面模型,激光垂直入射后的回波信号随地面平均高度 $H_{\text{mean}}$ 的变化如图3所示(为便于观察,将波形中心位置进行平移)。

Fig. 3 Return waveform vs.  $H_{\text{mean}}$ 

观察回波信号可以看出,不同地面平均高度下激光脉冲的回波形状一致,经计算得到回波脉冲宽度 $\sigma$ 均为16ns。

地面平均高度表征了地面的整体海拔高度,地面高度均方差一定使地面高度分布一定,地面平均高度的变化是对地面模型整体的升降。仿真结果表明回波信号不会随地面海拔的高低而发生变化。

2.3.2 地面高度均方差对回波信号的影响 对图2的基本模型进行变换,得到地面平均高度为0m,地面高度均方差 $H_{\text{MSE}}$ 分别为0.54m,1.08m,1.62m和2.15m的4个地面模型,激光垂直入射地面经地面反射后,回波信号随地面高度均方差 $H_{\text{MSE}}$ 的变化见图4。

Fig. 4 Return waveform vs.  $H_{\text{MSE}}$ 

随着地面高度均方差 $H_{\text{MSE}}$ 的增加,回波功率逐渐减小,由 $H_{\text{MSE}}=0.54\text{m}$ 时的高于 $50\text{nW}$ ,下降到 $H_{\text{MSE}}=2.15\text{m}$ 时的 $20\text{nW}$ ,并且随着高度均方差 $H_{\text{MSE}}$ 的增加,回波波形发生畸变,不再呈高斯分布,脉冲展宽也越发严重, $H_{\text{MSE}}=2.15\text{m}$ 时,脉冲宽度达到 $46\text{ns}$ ,与入射激光脉冲宽度相比展宽了10倍。

地面高度均方差表征地面高低起伏的剧烈程度,高

度均方差越大,说明地面各点的高度差别越大,高度起伏越剧烈。图4的仿真结果表明,激光足印内各点的高度起伏会直接导致回波波形的变化,当地面高度起伏很大时,回波信号能量展宽很严重,甚至发生畸变。

### 3 结论

建立了连续分布地面模型,对地面平均高度、地面高度均方差以及激光入射天底角造成回波信号的变化进行数值模拟研究,得到以下有益的结论:(1)在确定地面高度均方差的条件下,地面平均高度的变化是指地面不会引起回波信号的变化,说明地面海拔高度不会影响回波信号;(2)地面高度均方差表征了地面高度分布的起伏,地面高度均方差越大说明地面高度起伏越剧烈。地面高度起伏越剧烈,回波波形畸变越严重,回波能量越小,脉冲展宽越严重。地面目标的复杂多样导致星载激光测高仪回波信号发生严重的形变。将激光足印内的复杂地面进行网格化,解决了地物数学建模的困难,为复杂地面影响星载激光测高仪回波信号的研究提供了新思路。采用地面平均高度以及高度均方差作为影响因素进行研究,宏观上说明了影响测距激光回波特性的地面高低起伏的剧烈程度,而非地面的整体海拔。地面目标对星载激光测高仪回波的影响非常复杂,本文中只是对其中一种地物进行理论分析,要深入全面地理解地面目标对回波特性的影响,还需要进一步的深入理论研究和实验验证。

### 参考文献

- [1] LI S. Recent progress of spaceborne laser altimeter system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(6): 4-6 (in Chinese).
- [2] BUFTON J L. Laser altimetry measurement from aircraft and space-craft[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(3): 463-477.
- [3] DAI B M, ZHANG Ch, LI D Sh. Analysis of ranging error of pulse laser ranger[J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 50-52 (in Chinese).
- [4] HARDING D L, BUFTON J L, FRAWLEY J J. Satellite laser altimeter of terrestrial topography: vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(2): 329-339.
- [5] GARDNER C S. Ranging performance of satellite laseraltimeters[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [6] LI S, ZHOU H, SHI Y, et al. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 33-39 (in Chinese).
- [7] ZHOU H, LI S. Waveform simulator of return signal for laser altimeter[J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(10): 1402-1406 (in Chinese).
- [8] FANG Q H, ZHAO Y L. The research progress in data processing algorithm of satellite laser ranging[J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 417-423 (in Chinese).
- [9] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. Beijing: Science Press, 1980: 68 (in Chinese).
- [10] GARDNER C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. Applied Optics, 1982, 21(3): 448-453.