

doi:10.3788/gzxb20184711.1128004

# 基于精细地形的星载激光测高仪回波波形仿真

刘仁<sup>1,2</sup>, 谢俊峰<sup>1,2</sup>, 莫凡<sup>2</sup>, 夏雪飞<sup>1,2</sup>

(1 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

(2 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048)

**摘 要:**针对当前我国星载激光测高仪地面载荷性能分析和在轨检校等迫切需求,本文从星载激光测高仪在轨工作环境出发,对激光全链路工作原理进行深入研究,设计了一套基于精细地形的星载激光测高仪回波全链路仿真方法与流程,并详细推导了星载激光测高仪的回波仿真模型;通过精细化地形实现激光光束处理,完成高精度回波仿真.以目前全球唯一具备回波记录的对地观测激光测高仪 GLAS 为试验对象,利用高精度机载点云精细地形数据,选取平坦和山地地形试验区域进行全链路回波波形仿真与试验分析.结果表明:平坦地形区域仿真波形与真实波形相似度达到 0.985,山地地形区域仿真波形与真实波形相似度为 0.921.本文方法能实现两类典型地形的星载激光回波波形高精度仿真.

**关键词:**遥感;星载激光测高仪;波形仿真;精细地形;相似度

中图分类号:P236

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1128004-10

## Waveform Simulation of Spaceborne Laser Altimeter Echo Based on Fine Terrain

LIU Ren<sup>1,2</sup>, XIE Jun-feng<sup>1,2</sup>, MO Fan<sup>2</sup>, XIA Xue-fei<sup>1,2</sup>

(1 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

(2 Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 100048, China)

**Abstract:** For the performance analysis of the domestic spaceborne laser altimeter in the laboratory and in-orbit calibration technology improvement, the principle of laser waveform full-link simulation was studied in detail, and a full-link simulation method with the fine terrain and flow were designed by considering the in-orbit working environment of the spaceborne laser altimeter, as well as its echo simulation model of was deduced in detail. Then high-precision echo simulation was performed by laser beam splitting based on fine terrain. The Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) is used for testing, and the high-precision airborne Lidar point cloud data is used to simulate the waveform of GLAS in flat and mountain terrains. The results show that the simulated waveform are used compared with the real data from GLAS, then the similarity between the simulation waveform and the real waveform is 0.985 in the flat terrain, as well as 0.921 in the mountain terrain. The proposed method and model can achieves high accuracy simulation of the spaceborne laser waveform for the flat areas.

**Key words:** Remote sensing; Satellite laser altimeter; Waveform simulation; Actual terrain; Similarity

**OCIS Codes:** 280.0280; 280.3400; 280.3420

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.41571440,41771360),国家青年科学基金(No.41301525),国家测绘地理信息局青年学术带头人基金(No.201607),高分专项(民用部分)(No.42-Y20A11-9001-17/18)和“十三五”民用航天技术预先研究项目(No.D040106)资助

**第一作者:**刘仁(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为星载激光测高仪回波波形仿真.Email:rs\_liur@163.com

**导师(通讯作者):**谢俊峰(1981—),男,研究员,博士,主要研究方向为精密定姿、卫星影像几何处理以及星载激光雷达几何检校等.Email:junfeng\_xie@163.com

**收稿日期:**2018-05-15; **录用日期:**2018-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

星载激光测高仪起源于 20 世纪 70 年代末,作为卫星激光雷达的一类,其工作原理与传统微波雷达相同<sup>[1]</sup>.与微波雷达相比,它具有分辨率高、测量精度高、稳定性好、功耗低等优点<sup>[2]</sup>.经过三十年发展,2003 年,全球首台对地观测星载激光测高系统 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)搭载在 ICESat(Ice, Cloud and Land Elevation Satellite)卫星成功发射<sup>[3]</sup>,该载荷具备全波形回波记录与下传能力,用于对地球极地冰盖的监测、气溶胶探测、以及地表高程测量<sup>[4-5]</sup>.近几年来,我国星载激光测高仪蓬勃发展.2016 年 5 月 30 日,资源三号 02 星(ZY3-02)首次搭载国产激光测高仪升空,经过检校后该载荷在平坦地区的测高精度优于 1 m<sup>[6]</sup>.作为试验性载荷,并未记录和下传波形数据.我国 2019 年即将发射高分七号(GF-7)卫星、陆地生态碳监测卫星等,星上将装载更高精度且具备回波记录功能的激光测高仪,用于开展国土测绘和林业应用.回波波形数据是星载激光测高仪主要数据源,回波波形仿真不仅用于卫星发射前激光载荷性能指标分析,而且对于在轨检校与分析具有重要参考价值.

目前,国内外对激光雷达回波仿真也有相关研究.文献[7-10]利用星载激光雷达参数,采用数学建模方法分别模拟了理想条件下水平面、倾斜平面、两阶梯平面以及高斯地形,在忽略大气条件下得到了相应回波波形;文献[11-12]利用星载激光雷达参数,对模拟的阶梯、不同斜坡、3D 树木目标进行回波仿真,在忽略大气和目标表面微观粗糙度条件下,得到各目标回波波形;这些研究虽然基于星载激光雷达参数,但未考虑星载激光雷达在轨条件,以及实际地表复杂度.文献[13-14]利用激光雷达参数,对模拟方块目标、真实遮蔽目标进行回波波形模拟,得到多目标的回波全波形,但这些研究针对普通激光成像雷达,在设备参数、工作环境、真实性能等均与星载激光测高仪有较大差距,不足以用于星载激光测高仪.文献[15]在讨论对模拟极简地形回波仿真后,仅对平坦农地简单地形展开真实回波仿真,研究虽实现了星载激光测高仪在平坦地形处回波仿真,但未全面考虑星载激光测高仪在轨环境,对复杂地形进行验证,研究不够全面深入.文献[16]针对 GLAS 星载激光测高仪进行回波仿真,在真实类阶梯状地形处仿真波形与真实波形相似度为 0.908,而在稍复杂的沟壑地形处仿真波形与真实波形相似度仅有 0.66,该研究仿真波形精度差可用性低,究其原因,主要因为未对星载激光测高仪各回波链路进行分析,以及地形精细化表达方法不全面.综上所述,以上研究在星载激光测高仪回波仿真领域开展了相关研究并取得了若干成果,但这些研究多集中于对相对简单地形进行试验,很少利用真实地形开展试验验证,因此,针对复杂地形进行星载激光测高仪全链路回波仿真还需要进一步研究.

本文针对这些研究不足之处,结合星载激光测高仪真实在轨工作条件,以及实际外界环境,设计了一套新的星载激光测高仪回波全链路仿真方法与流程,并根据该流程方法详细推导了一套适用于星载激光测高仪回波仿真模型;基于该模型方法,以 GLAS 为试验对象,利用其下传原始数据,在平坦、高山地等两类代表性地形,对激光进行分束处理,继而利用机载点云构建三角网内插每条子光束高程与坡度精细化光斑内部地形,来获取激光足印内部精细的高程、坡度信息,同时结合地物光谱反射率库获取光斑内部对应地物反射率,进行全链路回波仿真,得到高精度仿真波形,并与 GLAS 下传原始记录波形进行相似性对比评价,验证本文理论方法和模型的正确性.

## 1 全链路回波仿真方法与模型

### 1.1 星载激光全链路回波仿真原理与流程

星载激光测高仪的工作原理为激光发射器以一定功率发射一束激光束,经过大气传输至地表目标面上,再经地面目标漫反射穿过大气,由卫星激光接收望远镜接收进行信号处理,如图 1 所示.

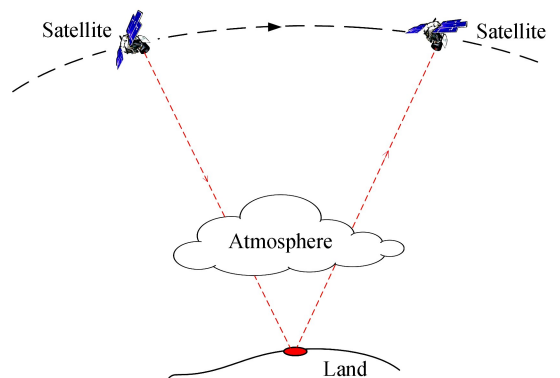


图 1 星载激光测高仪工作原理图  
Fig.1 The working principle diagram of spaceborne laser altimeter

对星载激光测高仪进行全链路回波波形仿真,主要是从激光发射系统、大气衰减、激光足印内部精细地形表达和回波信号接收系统四方面依次展开分析研究,具体流程如图2所示。

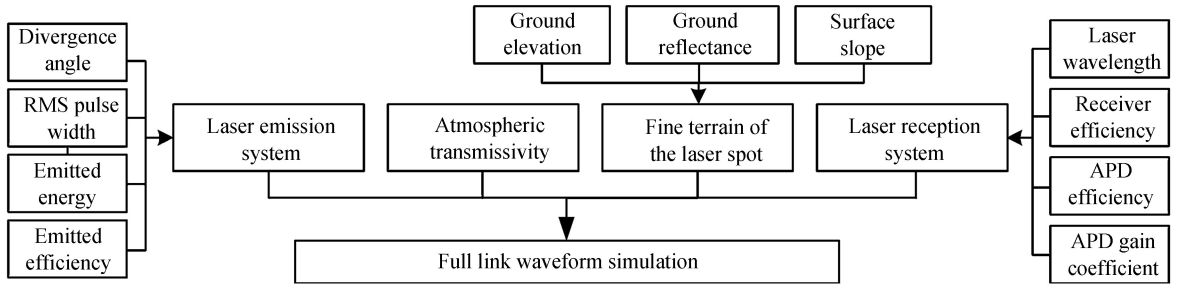


图2 星载激光测高仪全链路波形仿真流程图

Fig.2 The full-link waveform simulation flow chart of spaceborne laser altimeter

### 1) 激光发射系统

星载激光测高仪激光发射器,通常采用调Q技术将脉冲能量压缩至极窄脉宽发射<sup>[17]</sup>,在进行全链路波形仿真时,首先根据激光发散角、均方根脉宽、脉冲能量将激光出光脉冲能量分解至时域和空域,完成发射脉冲的模拟。

### 2) 大气衰减

发射激光脉冲到接收将与大气介质发生两次相互作用,产生一系列物理效应,主要物理效应为:大气的折射,大气分子的吸收,后向散射等;这些效应导致激光路径的偏移,能量的衰减以及回波的干扰.主要考虑激光在大气中能量的衰减,总衰减系数由大气分子和气溶胶粒子的衰减系数组成,表达式如式(1)所示;而工程上一般直接采用大气透过率表示。

$$\eta(\lambda, R) = \eta_a(\lambda, R) + \eta_p(\lambda, R) = K_m(\lambda, R) + \sigma_m(\lambda, R) + K_p(\lambda, R) + \sigma_p(\lambda, R) \quad (1)$$

式中, $\eta(\lambda, R)$ 为大气总衰减系数, $\lambda$ 为激光波长; $R$ 为激光传输距离; $K_m(\lambda, R)$ 和 $\sigma_m(\lambda, R)$ 分别为大气分子的吸收和散射系数; $K_p(\lambda, R)$ 和 $\sigma_p(\lambda, R)$ 分别为大气气溶胶的吸收和散射系数。

### 3) 足印地形表达

足印内部地形表达是全链路仿真的核心.考虑到地球表面复杂地形地貌状况,本文利用三角网来实现激光足印内部地面模型精细化表达,首先采用激光光束分束法,将一束激光离散为 $N$ 条子光束,如图3所示;同时利用机载点云精度高、密度大的特点<sup>[18-19]</sup>,构建三角网,精细化表达足印内部地形;继而依据细分后子光束定位所在三角面片,内插得到子光束高程以及坡度信息.光斑内部植被、岩石、水体等不同地物对激光能量均有吸收、透射和散射等影响,但本文进行回波仿真时仅考虑经光斑内地物反射回去的激光能量,采用地物光谱反射率<sup>[20]</sup>,作为模型输入参数.由于足印范围相对较小,所涉及地物类型有限,各类地物光谱反射率可直接从地物光谱库获得。

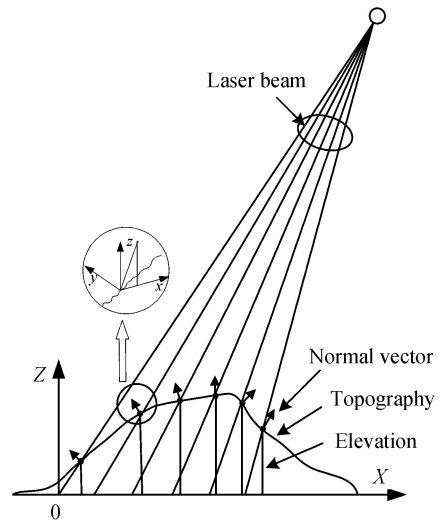


图3 激光束离散化示意图

Fig.3 The schematic diagram of laser beam discretization

### 4) 回波信号接收系统

当发射脉冲的均方根脉宽 $\kappa_t$ 与接收望远镜的面积 $A_R$ 满足关系式: $c\kappa_t \gg A_R/R$ 时,经目标漫反射和大气传输后回波信号,仍符合菲涅尔衍射理论,回波光子即可被接收望远镜探测.进行回波信号探测时,需考虑系统对回波光子的接收效率、APD探测器光电转换效率、增益系数以及负载电阻。

## 1.2 星载激光全链路回波仿真模型

基于传统激光雷达方程理论,本文结合星载激光测高仪在轨工作原理及流程,推导一套适用于星载激光

测高仪的回波仿真模型,具体如下:

### 1) 激光发射脉冲模型

激光出光脉冲能量在时域和空域上分别满足一维和二维高斯分布,表达式为<sup>[7]</sup>

$$E(t) = \frac{E}{\sqrt{2\pi}\delta_t} \exp\left(-\frac{t^2}{2\delta_t^2}\right) \quad (2)$$

$$I(x, y) = \frac{E}{2\pi l} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2l^2}\right) \quad (3)$$

式中,  $E(t)$  为在  $t$  时刻激光发射能量,  $I(x, y)$  为  $(x, y)$  处激光发射能量强度,  $E$  为单脉冲能量,  $\delta_t$  为脉冲均方根脉宽;  $l$  为激光光斑直径.

### 2) 目标响应函数

光斑内部地形表达的精细化程度直接决定了仿真波形的形状及其精确度;现采用对激光分束后每条子光束与地物目标间的关系来构建光斑内部地形几何模型的方法来确定,如图4所示,以激光测高仪出光轴定义坐标系,坐标原点位于子光束与地面交点  $F$ ,  $Z$  轴是由激光测高仪  $A$  与地心的连线,  $X$  轴位于  $Z$  轴与出光轴构成平面内且为卫星前进方向,且垂直于  $Z$  轴,  $Y$  轴根据右手系确定.

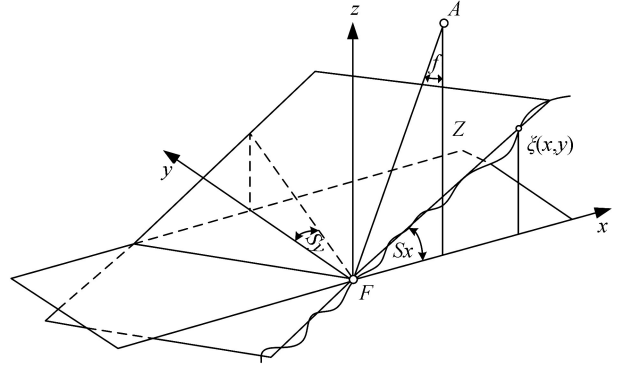


图4 广义的地形几何学模型

Fig.4 Generalized geometry model of the terrain

通过构建地形几何模型,子光束目标地形模型表示为

$$\xi(Z, S, T) = \xi_0 + \mathbf{S} \cdot \mathbf{r} + T + Z \quad (4)$$

式中,  $\xi(Z, S, T)$  为子光束目标地形矢量;  $\mathbf{r} = (x, y)$  为子光束目标平面坐标;  $\xi_0$  为常量;  $\mathbf{S} = \Delta h / \Delta l$  为子光束目标平均坡度,  $\Delta h$  为子光束内部最大高差值,  $\Delta l$  为最大高差两点间水平距离;  $T$  为子光束目标地表反射率;  $Z$  为子光束目标高程.

光斑内部所有子光束的地形集合构成了单个激光光斑精细地形,即单个光斑地形模型,表示为

$$\rho = \sum_{i=1}^N \xi(Z_i, S_i, T_i) \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为激光足印内部精细地形矢量,  $\xi(Z_i, S_i, T_i)$  为第  $i$  条子光束目标矢量.

### 3) 激光回波方程

根据星载激光测高仪发散角、发射脉冲能量等参数,推算地面光斑内部能量分布密度为

$$\Gamma_t = \frac{E}{A_t} \eta_{\text{tra}} \eta_{\text{atm}} \quad (6)$$

式中,  $E$  激光单脉冲能量;  $\eta_{\text{tra}}$  为系统发射效率,  $\eta_{\text{atm}}$  大气透过率;  $A_t$  为激光光斑地面理论面积,  $A_t = \frac{\pi}{4} (D + R\gamma)^2$ , 其中  $R$  为卫星平台到地面光斑间距离;  $\gamma$  为激光出光发散角;  $D$  为激光发射器孔径;

通过式(6)光斑地面能量密度分布,结合光斑内部地面坡度、反射率、激光指向,得到激光脉冲与地面响应后方程式为

$$E_{\text{tar}} = \frac{T}{\pi} A_{\text{tar}} \Gamma_t \cos(S + \beta) \quad (7)$$

式中,  $A_{\text{tar}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{tar}}^2$  表示地面激光光斑实际面积;  $D_{\text{tar}}$  为实际光斑直径;  $T$  为目标反射率,  $S$  为光斑内部地面坡度,  $\beta$  为激光器指向角;

激光与地面目标响应后,经地面漫反射再次穿过大气到达卫星激光接收望远镜,从而得到激光发射脉冲回波能量方程为

$$E_r = E_{\text{tar}} \frac{A_r}{R^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} \quad (8)$$



式中,  $A_r = \frac{\pi}{4} D_r^2$  表示激光接收望远镜面积;  $D_r$  为激光接收机望远镜口径,  $\eta_{\text{sys}}$  系统接收效率;

星载激光测高仪卫星平台高度 500 km 左右, 距离  $R$  值非常大, 故激光器发射孔径  $D$  相对  $R\gamma$  可忽略不计, 根据式(6)~(8), 得到星载激光回波能量方程为

$$E_r = E \frac{TD_r^2 D_{\text{tar}}^2}{4R^4 \gamma^2} \cos(S + \beta) \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{tra}} \eta_{\text{sys}} \quad (9)$$

激光能量经过雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode Detectors, APD)的光电转换后, 以电信号形式显示其回波强度, 光电转换公式为<sup>[20-21]</sup>

$$V_d(t) = \frac{\eta_{\text{APD}} G e R_L}{h \nu_0} E_r(t) \quad (10)$$

式中,  $R_L$  为负载电阻,  $h$  为普朗克常量;  $\nu_0$  为激光频率,  $\nu_0 = c/\lambda$ ,  $c$  为光速,  $\lambda$  为激光测高仪激光脉冲波长.  $\eta_{\text{APD}}$  为 APD 探测器的量子转换效率,  $G$  为 APD 探测器的增益系数,  $e$  为电子电量,  $E_r(t)$  为  $t$  时刻接收能量值;

星载激光测高仪仿真全波形函数  $S(t)$ , 可由发射脉冲时间分布函数式(2)与回波方程式(10)卷积得到, 即: 星载激光回波波形表达式为<sup>[7]</sup>

$$S(t) = E(t) * V_d = \sum_{i=1}^m E(t_i) \cdot V_d(t - t_i) \quad (11)$$

根据激光发射脉冲能量以及脉宽, 利用式(2)可仿真出激光发射脉冲波形, 即为式中  $E(t)$ ; 式(3)用于模拟光斑内部能量空间分布, 该能量分布作为式(9)中输入的能量  $E$ , 地物反射率  $T$  主要根据地物光谱库获取对应地物的反射率信息, 距离  $R$  以及坡度等光斑内地形数据可通过式(5)单个光斑地形模型得到, 而接收器接收、发射效率等参数均为激光器固定参数, 根据以上这些数据即可完成式(9)光斑内部回波能量的计算, 该回波能量通过式(10)转换后可形成电信号, 即式(11)中的  $V_d$ ; 通过  $E(t)$  与  $V_d$  的卷积即可得到单个激光回波的仿真波形.

#### 4) 仿真精度估计

星载激光测高仪一般均具备回波记录功能, 故可利用原始记录回波与仿真波形进行相似度分析, 从而评价回波仿真精度; 通常采用皮尔逊相关系数算法计算两者间相似度, 皮尔逊相关系数公式为

$$\text{Corr}(X, Y) = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (12)$$

式中, 变量  $X, Y$  分别可表示原始波形与仿真波形数据.

由于仿真波形与原始回波波形往往在信号强度上存在一定差异, 为精确反映两者间相似程度, 首先需要对仿真波形与原始波形统一进行归一化处理, 接着对归一化后波形采式(12)进行相关系数计算, 从而评价仿真精度.

## 2 回波波形仿真试验与分析

### 2.1 试验数据

#### 1) GLAS 数据

GLAS 作为全球首套对地观测星载激光测高系统, 在轨工作时间为 2003 年~2009 年, 激光器基本参数如表 1 所示<sup>[3]</sup>; 其下传数据共分 15 级, 即 GLA01-GLA15, 包含地面坐标信息、气溶胶数据、回波波形等等数据; 根据本文仿真需求, 获取 GLA01 数据包中在轨真实回波波形数据, 以及 GLA14 级数据包中激光足印质

表 1 GLAS 激光器基本参数

Table 1 The laser basic parameters of GLAS

Laser wavelength/nm	Repetition rate/Hz	Beam divergence/mrad	Pulse width/ns	Emitted energy/mJ	Orbital altitude/km	Telescope diameter/m	Incidence angle/(°)
1 064/532	40	0.11	4	75/35	600	1.0	0.008

心位置信息作为仿真输入参数.

2)精细地形数据

a)平坦试验区

试验区域选择云南省普洱市区,区域面积约  $0.97 \times 4.46 \text{ km}^2$ ,经纬度范围  $100.956 24^\circ \sim 101.001 65^\circ \text{N}, 22.795 94^\circ \sim 22.804 35^\circ \text{E}$ ,高程范围  $1 220.48 \sim 1 468.84 \text{ m}$ ,激光足印点所在区域地形平坦,高差在  $0.5 \text{ m}$  左右,地形数据采用 2013 年航摄获取的高精度机载点云,点云密度为  $10.85 \text{ pts/m}^2$ ,点云高程精度为  $10 \text{ cm}$ ,如图 5 所示.

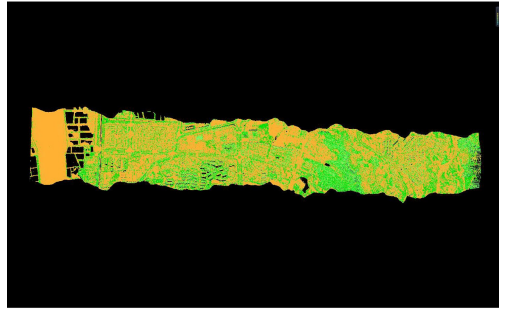


图 5 普洱市区机载点云数据

Fig.5 The airborne point cloud data in pu'er city

根据地形数据范围,查询落在其中的激光点数据,恰有 2008 年 3 月 7 日 GLAS 激光数据经过机场跑道处,该位置地形随时间变化可忽略,GLAS 激光点与机载点云范围如图 6.

根据地形数据范围,查询落在其中的激光点数据,恰有 2008 年 3 月 7 日 GLAS 激光数据经过机场跑道处,该位置地形随时间变化可忽略,GLAS 激光点与机载点云范围如图 6.



图 6 普洱市区机载点云范围与 GLAS 激光数据分布图

Fig.6 The range of airborne point cloud and GLAS laser data distribution in pu'er city

试验选取机载点云范围内部的 6~9 号 GLAS 激光点进行试验,基本信息如表 2 所示,由于 6 号点对应机载点云空缺,试验仅对 7、8、9 三个激光点进行全链路波形仿真.

表 2 GLAS 激光点基本信息

Table 2 The basic information of GLAS laser points

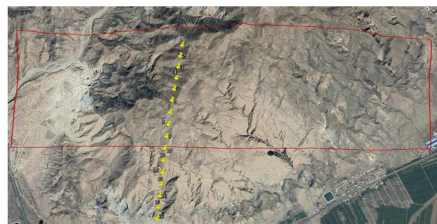
Laser point	Index	UTC_time/s	Latitude/°	Longitude/°	Elevation/m	Notes
6	817 521 047	258 155 409.583	22.797 870	100.957 931	1 261.727	Blank
7	817 521 047	258 155 409.608	22.799 428	100.957 714	1 261.391	N/A
8	817 521 047	258 155 409.633	22.800 986	100.957 493	1 261.269	N/A
9	817 521 047	258 155 409.658	22.802 544	100.957 269	1 261.561	N/A

b)山地试验区

试验区域选择宁夏省银川市与内蒙古阿拉善盟之间的贺兰山脉,地物为裸露岩石,地形为高山地,且随时间变化时地形无明显变化,区域面积约为  $6.37 \times 1.03 \text{ km}^2$ ,经纬度范围  $106.427 38^\circ \sim 106.501 25^\circ \text{N}$ ,



(a) The airborne point cloud



(b) GLAS laser points

图 7 贺兰山区机载点云数据与 GLAS 激光点分布示意图

Fig.7 The airborne point cloud data and GLAS laser points in Helan Mountains

39.091 02°~ 39.101 06°E,高程范围 1 076.65~1 737.18 m,地形数据为该区域 2014 年高精度机载点云数据,点云密度为 10.85 pts/m<sup>2</sup>,点云高程精度为 10 cm,如图 7 所示,图(a)为机载点云数据,图(b)为该机载点云范围内部 2008 年 3 月 16 日 GLAS 激光点。

试验选取图 7(b)中地形范围内部所有 GLAS 激光点(1~9 号激光点),进行全链路波形仿真, GLAS 激光点基本信息如表 3。

表 3 GLAS 激光点基本信息  
Table 3 The basic information of GLAS laser points

Laser point	Index	UTC_time/s	Latitude/(°)	Longitude/(°)	Elevation/m
1	821 618 917	258 974 983.482	39.097 464	106.456 831	1 565.361
2	821 618 917	258 974 983.507	39.095 915	106.456 545	1 596.020
3	821 618 917	258 974 983.532	39.094 363	106.456 256	1 571.088
4	821 618 917	258 974 983.557	39.092 810	106.455 966	1 592.876
5	821 618 917	258 974 983.582	39.091 254	106.455 674	1 598.996
6	821 618 917	258 974 983.607	39.089 700	106.455 382	1 648.163
7	821 618 917	258 974 983.632	39.088 143	106.455 090	1 607.160
8	821 618 917	258 974 983.657	39.086 588	106.454 799	1 566.893
9	821 618 917	258 974 983.682	39.085 039	106.454 511	1 532.844

## 2.2 试验结果与分析

### 1) 平坦地形区域

本文星载激光全链路回波仿真试验,根据 GLAS 星载激光测高仪性能,设定激光器基本参数如表 1 所示,发射效率与接收效率均为 0.5,APD 探测效率为 0.35,增益系数为 120、负载电阻为 20 k $\Omega$ ;单程大气透过率设为 0.5;地形参数依据机载点云数据,分片获取激光每条子光束足印内部高程、坡度参数;由于该试验区光斑内为草地与水泥路面两类地物,结合地物反射率光谱库,分别设定草地和水泥地面反射率为 0.42、0.33,将上述参数代入回波响应函数得到回波能量,并与模拟的发射脉冲进行卷积得到仿真回波波形,依此对平坦地区 7、8、9 号点进行回波仿真.为了精确分析仿真波形与真实波形间相关性,归一化处理仿真波形与真实波形得到相对回波强度,结果如图 8 所示。

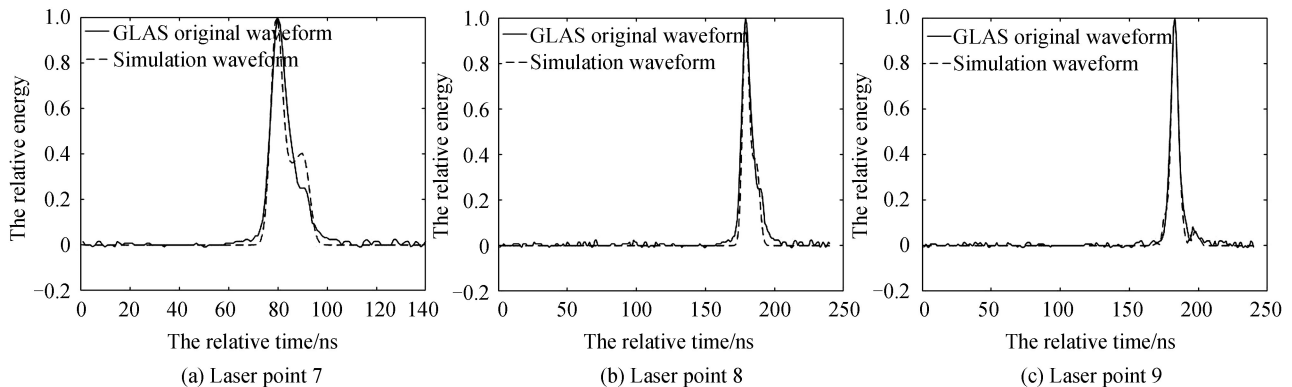


图 8 仿真波形与真实波形对比图

Fig.8 The comparison chart of simulated waveforms and real waveforms

进一步精确描述它们间相似度,根据式(12)皮尔逊相关系数计算仿真波形与真实波形间相关性,得到结果如表 4。

从图 8 和表 4 来看,二者评价结果完全一致,即从总体上看,对于平地地形区域,7、8、9 号三个点仿真的回波波形与真实波形十分吻合,相似度极高,平均相关系数可达 0.985;单独来看,9 号点仿真结果最优,达到 0.990,8 号次之,7 号相对较差,为 0.980.究其原因,从图 6 中可以看出,7 号激光点位于跑道和草地接边处,地形存在小阶梯“跳跃”,仿真的回波出现“双波峰”现象;8 号点足印内部存在微小斜坡,相比于 9 号点波形展宽更大,说明激光仿真一定程度上受地形坡度影响,一般会随着坡度增加仿真波形精度减弱;9 号激光点

处于机场跑道上,地形十分平坦,近似完美高斯波,试验充分说明了本文的方法模型在平坦地区具有非常高的回波波形仿真精度.

表 4 平坦地形仿真回波波形与真实回波波形间相关系数

Table 4 The correlation coefficients between simulated waveform and real waveform in flat terrain

Laser point	UTC_time/s	Correlation coefficient
7	258 155 409.608	0.980
8	258 155 409.633	0.984
9	258 155 409.658	0.990
Average	—	0.985

## 2) 山地地形区域

为进一步验证算法模型的可靠性,选取复杂山地地形激光点进行波形仿真,试验流程如前所述;试验区域内光斑内部仅有裸露的岩石,地物单一,岩石反射率为 0.2;由于地形复杂,高程落差大,充分利用算法中基于机载点云数据,实现星载激光分束获取足印内部高程、坡度精细地形信息,结合本文推导的回波仿真模型,实现了山地地形 9 个 GLAS 激光点回波波形仿真,得到结果如图 9.

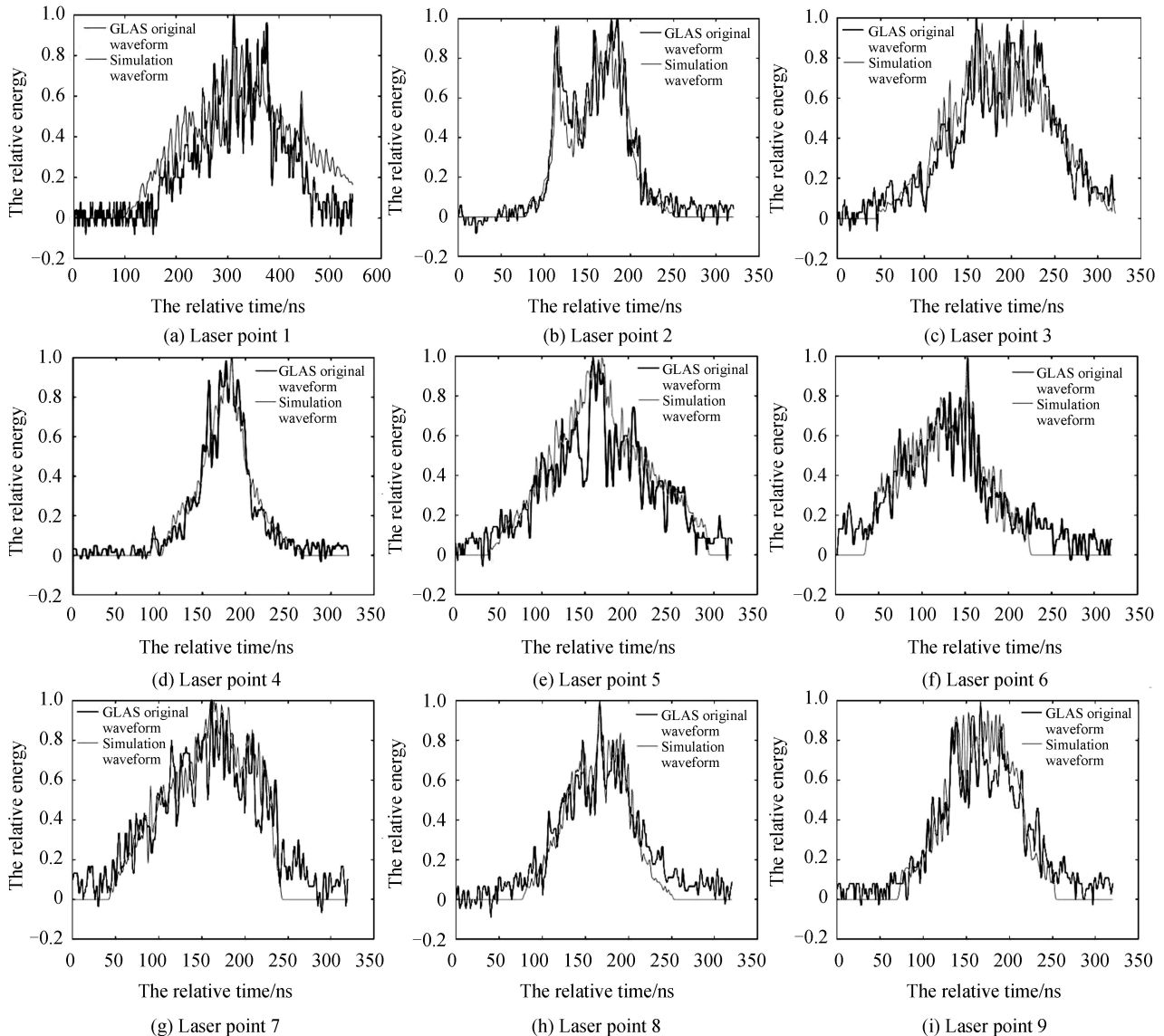


图 9 仿真波形与真实波形对比图

Fig.9 The comparison chart of simulated waveforms and real waveforms

采用皮尔逊相关系数计算上述四个激光点仿真波形与 GLAS 真实波形相关系数,得到结果如表 5.



从图 9 和表 5 结果来看,总体情况依然基本一致.山地地形回波仿真相似度较平坦地区差,由于存在复杂地形因素,总体仿真结果仍然较为理想,平均相似度为 0.921.从图 9 波形可看出,1 号点波形展宽最大,“毛刺”最多,波形最为复杂,主要是因为该点位于山脊顶部,该点足印内部地形最为复杂;从 4 号点原始波形可看出该点地形较其余各点复杂度最小,故仿真波形相似度最高,可以达到 0.986.对比 1~9 号激光点仿真波形与真实波形相关系数,随着地形复杂程度变大,回波仿真波形展宽和“毛刺”的增加,依赖波形细节计算的仿真相关系数越低,但从图 9 中仿真波形与真实波形轮廓的趋势而言,二者仍具有非常高的相似性,充分证明了本文设计的方法、提出的模型在复杂地形区域的有效性和可靠性,为未来高分七号、陆地生态碳监测等卫星搭载激光测高仪地面载荷性能分析和在轨应用分析提供可靠的技术手段.

表 5 山地地形仿真回波波形与真实回波波形间相关系数

Table 5 The correlation coefficients between simulated waveform and real waveform in mountain terrain

Laser point	UTC_time/s	Correlation coefficient
1	258 974 983.482	0.844
2	258 974 983.507	0.932
3	258 974 983.532	0.882
4	258 974 983.557	0.986
5	258 974 983.582	0.899
6	258 974 983.607	0.924
7	258 974 983.632	0.920
8	258 974 983.657	0.953
9	258 974 983.682	0.945
Average	—	0.921

### 3 结论

本文针对星载激光测高仪特定工作环境,提出了适用于星载激光雷达回波仿真模型,设计并实现了一套全链路回波波形仿真方法,选取平坦和复杂山地地形为试验区域,以目前唯一上传波形数据的 GLAS 为试验对象,通过机载点云等真实地形数据开展回波波形仿真试验,经过与在轨真实波形数据进行对比分析,得出结论如下:

1)对于平坦地形,基于精细地形仿真的回波波形与真实波形对比,其相关系数达到 0.985,表明本文方法和模型在平坦地形具备很高的精度与可靠性.

2)尽管本文仿真算法和模型进行了优化,波形仿真精度依然会受地形等客观因素的影响.与平坦地形相比,随着地形复杂度的增加,仿真回波波形展宽变大、“毛刺”的增多,从相关系数计算值来看,波形仿真精度还是有所下降,平均值为 0.921.

3)在复杂山地区域,尽管“毛刺”增多导致皮尔逊系数计算结果下降,但从图 9 中二者总体趋势可以看出,利用本文方法和模型在山地地形区域仿真的回波波形与真实波形的符合性较好,具有很高的相似度,也充分说明本文方法和模型的可靠性和精确性.

即将发射的高分七号与陆地生态碳卫星均搭载了具备回波记录功能的星载激光测高仪,本文在平坦与山地地形的回波仿真研究对其进行性能指标评估及数据处理具有十分重要的意义.结合国产星载激光测高仪性能指标,对植被等地物覆盖密集的地形区域的回波仿真研究将是下一步的重点工作.

### 参考文献

- [1] DAI Yong-jiang. lidar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 9-14.  
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 9-14.
- [2] YU Zhen-zhen, HOU Xia, ZHOU Cui-yun. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(2): 52-61.  
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, **50**(2): 52-61.
- [3] ABHIRE J B, SUN X, RIRIS H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit measurement performance[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003(1): 1534-1536.
- [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**(3-4): 405-445.

- [5] SUN Pei-yu, YUAN Ke-e, YANG Jie, *et al.* Measurement of extinction coefficient of near-surface aerosol by CCD lidar in the daytime[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0301001.  
孙培育, 苑克娥, 杨杰, 等. CCD激光雷达探测白天近地面气溶胶消光系数[J]. 光子学报, 2018, **47**(3): 0301001.
- [6] TANG Xing-ming, XIE Jun-feng, FU Xing-ke, *et al.* Zy3-02 laser altimeter on-orbit geometrical calibration and test[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(6): 714-723.  
唐新明, 谢俊峰, 付兴科, 等. 资源三号 02 星激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. 测绘学报, 2017, **46**(6): 714-723.
- [7] ZHOU Hui, LI Song. Waveform simulator of return signal for laser altimeter[J]. *Chinese Journal of 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.
- [8] WANG Chun-hui, LI Xu, PENG Huan. Research on simulation and analysis of spaceborne full waveform laser altimeter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(10): 270-276.  
王春辉, 李旭, 彭欢. 星载全波形激光测高仪仿真分析技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, **52**(10): 270-276.
- [9] ZHU Jin, SUN Shi-jun. Simulation analysis of spaceborne laser altimeter echo signal[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, **34**(1): 67-78.  
朱近, 孙世君. 星载激光测高仪回波信号仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2013, **34**(1): 67-78.
- [10] JUTZI B, STILLA U. Simulation and analysis of full-waveform laser data of urban objects[C]. Urban Remote Sensing Joint Event. IEEE Xplore, 2007:1-5.
- [11] WU J, AARDT J A N V, ASNER G P A. comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint lidar waveform simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, **49**(6): 2402-2414.
- [12] LI Song, ZHOU Hui, SHI Yan, *et al.* Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 33-39.  
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.
- [13] HUANG Tao, HU Yi-hua, ZHAO Nang-xiang, *et al.* Simulation and modeling of lidar waveforms returned from obscure targets[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(1): 11-14.  
黄涛, 胡以华, 赵楠翔, 等. 遮蔽目标激光雷达回波波形的建模与仿真[J]. 激光技术, 2011, **35**(1): 11-14.
- [14] ZHAO Ming-bo, HE Jun, FU Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 238-251.  
赵明波, 何峻, 付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 238-251.
- [15] PAN Hao. Research on space-borne lidar echo simulation technology based on topography[D]. Shengyang: Liaoning University, 2015.  
潘浩. 基于地形特征的星载激光雷达回波仿真技术研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2015.
- [16] YADAV U K. Simulation of ICESat/GLAS full-waveform over highly rugged terrain[D]. Netherlands: University of Twente, 2010.
- [17] DI Hui-ge, YU Jian-yu, HUANG Geng-hua, *et al.* Detecting equation of spaceborne laser rangefinder to particle-target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 526-528.  
狄慧鸽, 王建宇, 黄庚华, 等. 星载激光测距系统点目标探测方程研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(4): 526-528.
- [18] LI Jing-jing, FAN Da-zhao, GENG Hong-yi, *et al.* Triangular mesh construction for city points based on region growing[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2016, **33**(1): 65-70.  
李晶晶, 范大昭, 耿弘毅, 等. 城市点云的区域生长三角网构建方法[J]. 测绘科学技术学报, 2016, **33**(1): 65-70.
- [19] XU Bo, JIANG Wan-shou, LI Le-lin. Hrtt: a hierarchical roof topology structure for robust building roof reconstruction from point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(4): 354.
- [20] LIU Liang-yun. Principle and application of vegetation quantitative remote sensing[M]. Science Press, 2014: 23-45.  
刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 科学出版社, 2014: 23-45.
- [21] MA Yue, LI Song, YANG Fan-lin, *et al.* Model of waveform parameters for laser altimeter system under flattened Gaussian beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(4): 282-287.  
马跃, 李松, 阳凡林, 等. 激光测高仪平顶高斯光束条件下的回波参数模型[J]. 中国激光, 2015, **42**(4): 282-287.
- [22] GARDNER C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(3): 448-53.

**Foundation item:** The Natural Science Foundation of China (Nos. 41571440, 41771360), the Natural Science Foundation for Young Scientist of China (No. 41301525), the NASG Young Academic Leaders Foundation (No. 201607), the Major Special Project Research Project of High-resolution Earth Observation System (Civil Part) (No 42-Y20A11-9001-17/18), the Civil Space Technology Pre-research Project of the Thirteenth Five-year Plan(No.D040106)

引用格式: LIU Ren, XIE Jun-feng, MO Fan, *et al.* Waveform Simulation of Spaceborne Laser Altimeter Echo Based on Fine Terrain[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1128004

刘仁, 谢俊峰, 莫凡, 等. 基于精细地形的星载激光测高仪回波波形仿真[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1128004