

激光测高卫星回波波形精细化模拟仿真方法研究

门华涛^{1,2}, 李国元², 陈继溢², 赵严铭², 邢艳秋^{1*}

¹东北林业大学工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

²国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048

摘要 激光测高卫星的回波波形是其核心数据之一,回波波形的仿真分析对卫星指标论证及数据处理具有重要的参考价值。综合考虑地物反射率、发射波形和激光断面阵列(LPA)这3个因素对回波仿真结果的影响,并进行对比实验,探讨了最优的模拟仿真方法。实验中选择某研究区,以冰、云和陆地高程卫星(ICESat)/地球科学激光测高系统(GLAS)数据作为验证数据,通过相关系数对回波仿真精度进行评价。结果表明:在考虑实际地物反射率和发射波形后可以明显提高回波仿真的精度,仿真结果的相关系数从0.9337提高到0.9492;由于LPA的像素空间分辨率较低,故得到的仿真精度误差较大,通过3次样条插值提高像素分辨率后可使仿真精度提高到0.9513。

关键词 遥感; 激光测高; 回波仿真; ICESat/GLAS; 激光断面阵列; 高分七号卫星

中图分类号 TP706

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0110004

Refined Simulation Methods of Laser Altimetry Satellite Echo Waveform

Men Huatao^{1,2}, Li Guoyuan², Chen Jiyi², Zhao Yanming², Xing Yanqiu^{1*}

¹College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;

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

Abstract The echo waveform is one of the core data from the laser altimetry satellite, and the simulation analysis of echo waveform has important reference value in parameters designing and data processing for the satellite. In this paper, the effects of three factors such as ground reflectivity, emission waveform and laser profile array (LPA) on the echo simulation results are considered, and the contrast experiment is conducted. The optimal simulation method is discussed. In the experiment, a certain research area is selected, and the data of ice, cloud and land elevation satellite (ICESat)/geo-science laser altimeter system (GLAS) is used as the verification data, and the echo simulation accuracy is evaluated by the correlation coefficients. The results show that the echo simulation accuracy can be significantly improved after the actual ground reflectivity and emission waveform are considered, and the correlation coefficient of the simulation results is improved from 0.9337 to 0.9492. Due to the low spatial resolution of the pixels in the LPA, there exists a large error in simulation accuracy. With the increase of pixel resolution by cubic spline interpolation, the simulation accuracy can be improved to 0.9513.

Key words remote sensing; laser altimetry; echo waveform simulation; ICESat/GLAS; laser profile array; GF-7 satellite

OCIS codes 120.0280; 120.7000

1 引 言

车载激光测高是一种主动观测的方法,具有快速获取大范围地表三维信息的优势^[1],冰、云和陆地高程卫星(ICESat)上搭载的地球科学激光测高系

统(GLAS)在极地冰川变化研究^[2]、林业生物量估算^[3-4],以及全球控制点获取^[5]等方面的应用得到了广泛关注。我国的激光测高卫星虽然起步较晚,但也在不断地蓬勃发展中,已经发射成功的“嫦娥”系列卫星^[6-7]以及资源三号02星^[8-9]都搭载了激光测

收稿日期: 2018-07-08; 修回日期: 2018-09-07; 录用日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(41601505)、对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(11-Y20A13-9001-17/18)、2018年基础测绘科技项目(2018KJ0204)

* E-mail: yanqiuqing@nefu.edu.cn

高仪,即将发射的高分七号和陆地生态系统碳监测卫星也将装备具有回波记录功能的激光测高仪。

回波数据是激光测高仪的核心数据之一,回波波形模拟仿真对于卫星数据处理及指标论证具有重要价值。国内外围绕激光回波仿真进行了较多研究;Gardner^[10]通过研究短脉冲激光回波信号的统计特征,建立了最初的激光回波理论模型,为后人的研究奠定了理论基础;在 ICESat/GLAS 发射之前,美国航天局戈达德飞行中心(GSFC)对其进行了全链路仿真研究,并建立了专门的激光测高仿真系统 GSFC Simulator^[11];Bryan Blair 等^[12]基于高精度二维高程数据建立了回波仿真模型,对植被区域的激光回波进行了仿真分析;Yadav^[13]结合数字高程模型和野外全球定位系统数据对复杂地形条件下的大光斑激光回波进行了仿真分析;李松等^[14]利用菲涅耳衍射理论建立了斜坡、阶梯和植被 3 种标准漫反射地物的回波模型;周辉等^[15]分析并推导了激光测高系统接收信号和目标响应函数的理论模型;潘浩等^[16]对一般地形下的大光斑激光回波进行了初步探讨。

已有的研究大多是基于理论模型直接建立回波仿真模型的,较少讨论实际波形形成过程中一些参数的影响。鉴于此,本文基于已有激光回波模拟的研究,探讨实际环境中的地物反射率、发射波形以及激光断面阵列(LPA)对激光回波仿真精度的影响。

2 基本原理

2.1 回波仿真的原理

卫星上的激光探测器按照一定的时间间隔对回波脉冲进行采样,利用该时间段内的累积光子数表示激光回波在该时段的回波能量强度值。探测器输出的信号经过探测增益、信号积分以及模数转换等过程,最终转换为计算机可以处理的数字信号。根据 Gardner^[10,17]的推导,当探测器带宽远大于信号带宽时,激光雷达内部积分器模型可表示为

$$h(t) = \begin{cases} e/\Delta t, & |t| < t/2 \\ 0, & |t| \geq t/2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: e 为电子电荷; Δt 为采样间隔。此时激光探测器对接收的回波输出可表示为

$$E[i(t)] = Gp(t) * h(t) = G \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \frac{e}{\Delta t} p(\tau) d\tau \approx Gep(t), \quad (2)$$

式中: G 为增益值; $p(t)$ 为接收到的脉冲信号; $i(t)$

为接收信号经过接收系统增益和积分之后的结果,即 $i(t) = Gp(t) * h(t)$; $*$ 表示卷积运算。接收回波的脉冲光子数可以表示为不同时刻接收到的脉冲信号的积分,即

$$N = \int_0^{\infty} p(t) dt = \frac{1}{Ge} \int_0^{\infty} i(t) dt. \quad (3)$$

实际地物目标可以看作由不同的散射体组成,对单一的散射体,探测器接收的回波脉冲能量(累积的光子数)可以表示为

$$\langle N \rangle = E \left[\frac{1}{Ge} \int_0^{\infty} i(t) dt \right] = \frac{E_T}{h\nu} \cdot \frac{A_R}{R^2} \cdot \frac{\rho \cos \theta}{\pi} T_a^2 \eta, \quad (4)$$

式中: E_T 为发射脉冲能量; h 为普朗克常量; ν 为激光频率; A_R 为望远镜接收孔径的面积; R 为激光器到目标的距离, $R = H/\cos \varphi$, H 为轨道高度, φ 为激光指向角,即激光光轴与天底方向的夹角; T_a 为单程大气影响; η 为光子探测效率; ρ 为地表反射率; θ 为地表反射面法向量与望远镜视场方向的夹角。

由于实际地表多是非均匀且异质的,激光的回波能量会受到地表粗糙度和坡度的影响,因此采用细分地形的方式将 GLAS 光斑范围内的地形网格化。当网格单元足够小时,可认为网格内的地表是均匀同质的,从而对每个网格计算回波光子数,即

$$\langle N \rangle_i = \frac{E_{T,i}}{h\nu} \cdot \frac{A_R}{R_i^2} \cdot \frac{\rho_i \cos \theta_i}{\pi} T_a^2 \eta, \quad (5)$$

式中: $E_{T,i}$ 为单位网格对应的发射脉冲能量值,其在空间上服从二维高斯分布; R_i 为不同网格到激光接收器的距离; ρ_i 为单位网格对应的地物反射率; θ_i 为单位网格反射面法向量与望远镜视场方向的夹角。将后向散射的光子数按探测器采样频率($\Delta t = 1 \text{ ns}$)进行记录,获得若干层光子数的累加和,记作地物响应函数 $N(t)$,其中划分层次 m 由地物到激光接收器的最大距离 R_{\max} 、最小距离 R_{\min} 以及 Δt 确定,即 $m = (R_{\max} - R_{\min})/\Delta t$ 。由于发射脉冲能量在时间上服从高斯分布,因此探测系统接收的回波信号可以视为发射波形与地物响应函数的卷积,即

$$F(t) = T(t) * N(t) = \sum_n^{m-1} T(n)N(t-n), \quad (6)$$

式中: $T(t)$ 为发射波形。

2.2 回波仿真方法

本课题组根据回波仿真原理建立回波模型,并对回波仿真过程进行实验,实验流程如图 1 所示。

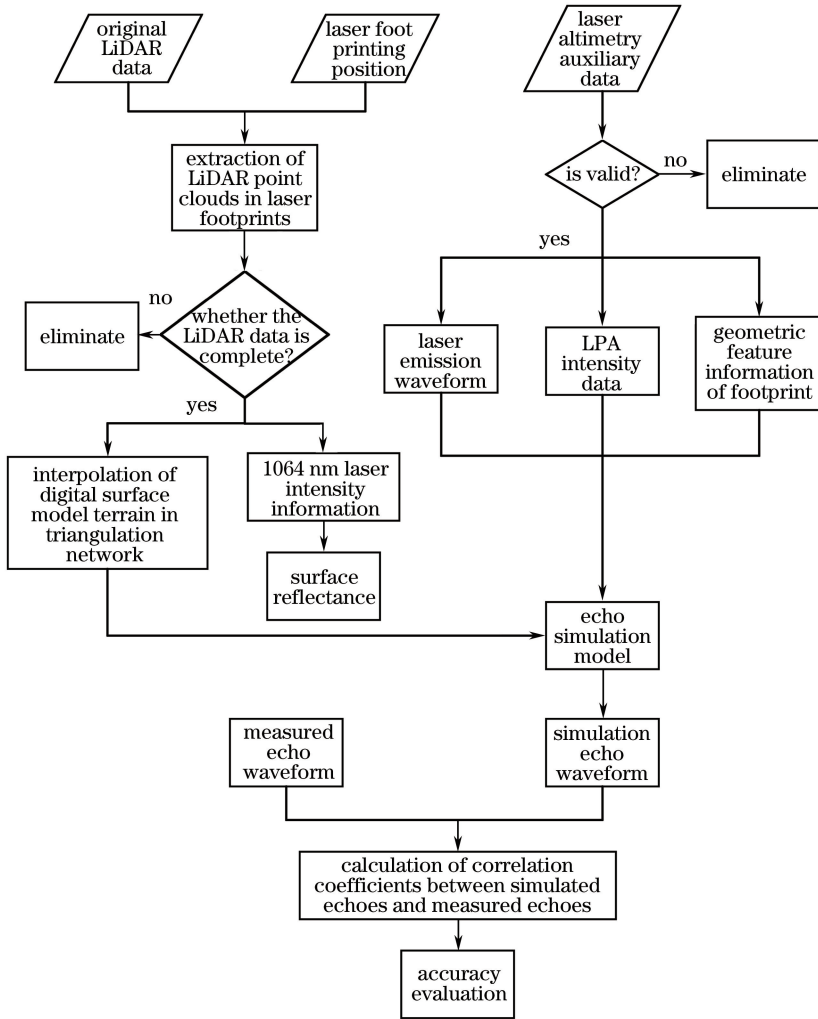


图 1 星载激光测高卫星回波仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of echo simulation for spaceborne laser altimetry satellite

图 1 还涉及到的技术要点如下：

1) 确定覆盖足印范围的机载点云数据及坐标转换。保证机载数据能完全覆盖 GLAS 足印,并将基于 Topex/Poseidon 椭球的 GLAS 激光足印点三维坐标和基于 NAD83 参考框架的机载数据三维坐标转换到 WGS84 参考框架中。

2) LPA 与地面足印点的匹配。LPA 作为地面激光的远场投影,可以表示激光光斑在地表的能量分布^[18],要将 LPA 精准地投影到 GLAS 足印中,需准确获得足印中心位置。由于 LPA 的投影视场角为 0.08°,对应的像元空间分辨率约为 10.43 m^[13],因此,本课题组采用精度较高的高斯拟合法计算激光光斑的中心,将误差控制在 0.1 pixel^[19]。

3) 原始数据筛选。考虑到大气对激光能量的影响,根据 GLAS14 产品提供的云量标识参数^[20],保留清洁大气条件下的数据,以减小大气散射引起

的激光波形失真的影响。根据机载 LiDAR 数据范围的完整性对原始数据进行筛选。

4) 基于 Delaunay 三角网对机载 LiDAR 数据进行地形建模,计算仿真回波波形。由于实际接收到的 GLAS 激光回波会受到传输环境和仪器性能的影响,包含了噪声,因此还需要进行去噪处理^[21-22]。

5) 采用皮尔逊相关系数评价仿真回波的精度,表达式为

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (7)$$

式中: $\rho_{X,Y}$ 为总体相关系数; $\text{cov}(X,Y)$ 为协方差; σ_X 和 σ_Y 分别为变量 X、Y 的标准偏差。

3 研究区及数据介绍

3.1 研究区的概况

由于较高精度的地形数据能够更准确地反映地

表分布,从而可以获取较高的回波仿真精度^[13],因此本课题组选取高精度的机载 LiDAR 数据建立地形模型。考虑到 GLAS 数据和机载 LiDAR 数据获取的时间不同,为了尽量保持二者在获取数据时地表环境的一致性,所选数据需要满足 3 个条件:1)研究区的地形、地貌受气候环境的影响较小;2)研究区的地形、地貌受人类活动的影响较小;3)为了考察地

物反射率的影响,研究区内的地物不应过于单一。基于上述讨论,最终选择美国犹他州西瓦利城作为研究区,该地区的 GLAS 足印覆盖部分多为别墅住宅和部分常绿植被,地形、地貌受气候和人类活动的影响很小。研究区范围为:西经 111°58'54"~112°01'28",北纬 40°40'51"~40°44'23"。图 2 展示了研究区域的概况。

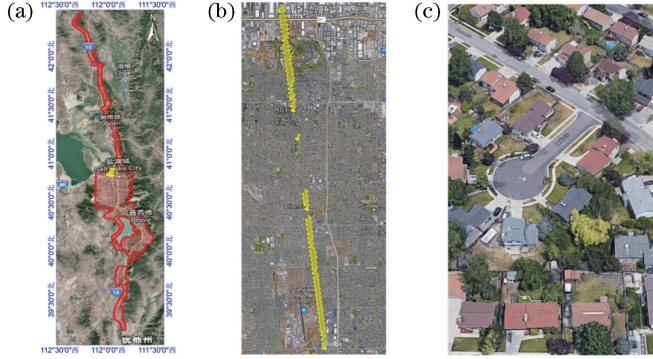


图 2 研究区概况。(a)机载 LiDAR 数据覆盖范围;(b)实验区域范围;(c)实验区内局部地区地貌
Fig. 2 Overview of research region. (a) Airborne LiDAR data coverage; (b) experimental region; (c) local area in the experimental region

3.2 GLAS 数据简介

本研究以 GLAS 数据为验证数据,对仿真结果进行验证和评估。美国国家冰雪数据中心将 GLAS 数据划分为 3 级 15 种标准数据产品,此实验中选取

了 GLA01 (L1A global altimetry data)、GLA04 (L1A global laser pointing data)以及 GLA14 (L2 global land surface altimetry data)中的相关数据,详见表 1。

表 1 GLAS 产品参数

Table 1 Product parameters of GLAS

Parameter	Product number	Product grade	Sampling frequency /Hz	Illustration
i_rec_ndx	GLA01/GLA04/GLA14		1	Unique identifier
i_tx_wf	GLA01	Level 1A	40	Transmit pulse
i_rng_wf	GLA01	Level 1A	40	Echo waveform
i_Pixint	GLA04	Level 1A	40	LPA pixel intensity data
i_tpazimuth_avg	GLA14	Level 2	1	Transmit pulse azimuth
i_tpeccentricity_avg	GLA14	Level 2	1	Transmit pulse eccentricity
i_tpmajoraxis_avg	GLA14	Level 2	1	Transmit pulse major axis

GLAS 系统的发射激光脉冲被调制为基模高斯脉冲光束^[23],其能量在空间上服从二维高斯分布,但实际太空环境中的激光能量分布会受各种因素的影响,从而与实验室定标结果有一定差异。为了记录激光能量在卫星运行时的状态,GLAS 系统以 40 Hz 的频率对发射激光脉冲进行实时采样,并将结果记录在 LPA 中。在激光器状态稳定的情况下,LPA 图像上的光斑呈椭圆形分布,可以通过椭圆拟合来提取与 LPA 相关的参数:激光光斑的质心位

置、方向、主轴、离心率以及强度^[24]。

3.3 机载 LiDAR 数据简介

实验中, LiDAR 数据从开放数据平台 OpenTopography 中下载,数据概况如表 2 所示。

数据来自犹他州 LiDAR 数据采集项目 (Utah LiDAR 2013/2014 project),研究区内机载 LiDAR 数据的获取时间为 2013 年 10 月—2014 年 5 月。LiDAR 激光扫描系统记录了高精度地表三维信息和反射率信息。

表 2 机载 LiDAR 数据概况

Table 2 Overview of airborne LiDAR data

Digital object identifier	https://doi.org/10.5069/G9TH8JNQ
Dataset name	State of Utah acquired LiDAR data: Wasatch Front
Collection platform	Airborne LiDAR
Horizontal coordinates	UTM zone 12N, NAD83 (2011) [EPSG26912]
Vertical coordinates	NAVD88 (GEOID12A) [EPSG5703]
Number of cloud points	377491435
Point cloud density / (points·m ⁻²)	7.42

4 实验与分析

采用第 3 节论述的方法,最终筛选了 119 个激光光斑数据进行实验,数据的获取时间主要分布在 2006-03-02、2006-11-02、2007-03-19、2007-10-10、

2008-02-25 这几天,分别对应 L3 激光器的 L3E、L3G、L3H、L3I 和 L3J 工作周期。对每组数据进行仿真实验,分别生成地形分布图、反射率分布图、Google 地形参考图以及仿真结果对比图,其中一组示例如图 3 所示。

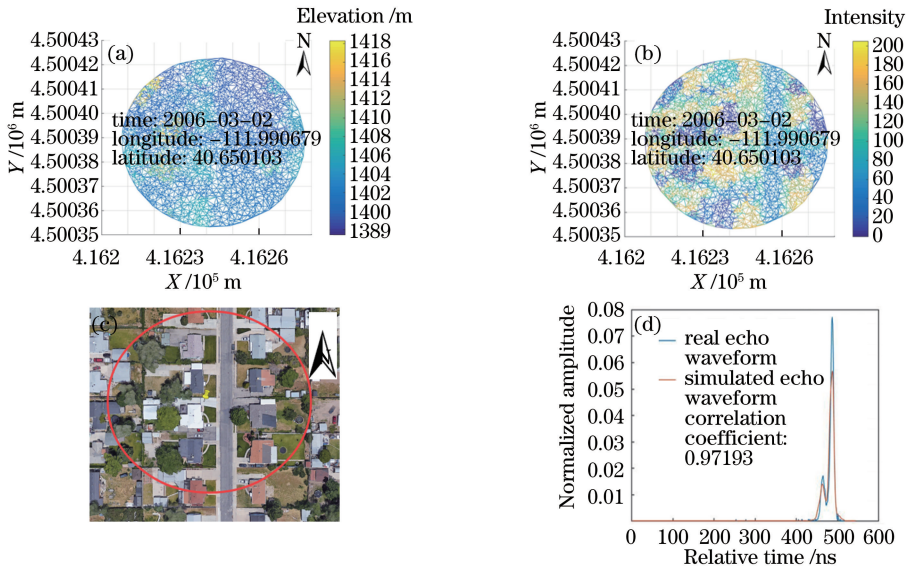


图 3 仿真结果图示。(a)地形分布;(b)反射率分布;(c)实际地形影像;(d)仿真回波与实际回波对比图

Fig. 3 Simulation results. (a) Topographic distribution; (b) reflectance distribution; (c) real terrain image;

(d) comparison between simulated echo waveform and real echo waveform

4.1 地表反射率对回波的影响

不同地物由于各自的物理性质不同,因此反射率也各不相同。理论上,考虑不同地物反射率计算得到的回波仿真结果更加精确。由于本研究选取的机载 LiDAR 激光波长和 GLAS 波形数据波长均为 1064 nm,因此以机载 LiDAR 数据中记录的反射率信息近似表示 GLAS 足印内的地物反射率信息。

实际地物和对应反射率分布可以参考图 3(c)和图 3(b)。

针对反射率的影响,本课题组设计了两组仿真实验:一组以机载 LiDAR 数据中对应位置的反射强度值作为反射率参考值(取值范围为 0~1),记为考虑反射率;另一组将地物反射率统一设置为 1,记为忽略反射率。得到的仿真结果如表 3 所示。

表 3 反射率对仿真结果的影响

Table 3 Influence of reflectivity on simulation results

Number of footprints	Mean correlation coefficient		The count of better results	
	Ignoring the reflectivity	Considering the reflectivity	Ignoring the reflectivity	Considering the reflectivity
119	0.9337	0.9417	51	68

4.2 发射波形对回波的影响

在已有的回波仿真研究中,大多是对发射波形进行高斯拟合的,对模拟的发射波形与地表响应函数进行卷积计算就可以得到回波仿真结果,但实际的发射波形并不总是标准的高斯波形,GLAS 实际发射波形的首尾两端会出现明显的“翘起”,如图 4 所示。

根据 4.1 节的结果,本组实验在考虑地物反射率的前提下,基于实际发射波形和模拟发射波形进行对比,统计结果如表 4 所示。

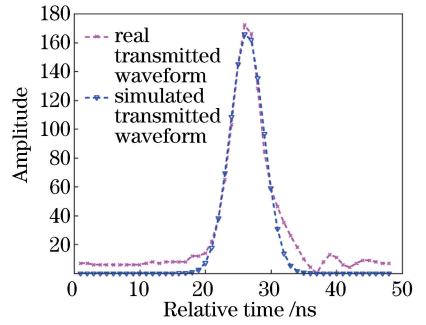


图 4 GLAS 实际发射波形与模拟发射波形

Fig. 4 Real and simulated transmitted waveforms of GLAS

表 4 发射波形对仿真结果的影响

Table 4 Influence of transmitted waveform on simulation results

Number of footprints	Mean correlation coefficient		Count of better results	
	Simulated transmitted waveforms	Real transmitted waveforms	Simulated transmitted waveforms	Real transmitted waveforms
119	0.9417	0.9492	12	107

4.3 激光光斑能量分布对仿真回波的影响

GLAS 系统中 LPA 的变化在一定程度上反映了激光能量分布的变化以及激光器的工作状态。LPA 的统计结果表明,随着时间的推移,激光光斑的形状会由最初的高斯椭圆分布逐渐变为高斯圆形分布^[22]。在已有的回波仿真研究中,很少有人直接考虑 LPA,一般都是通过二维高斯分布函数来模拟激光的能量分布状况,即

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta_r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta_r^2}\right), \quad (8)$$

式中: δ_r 为标准差。激光光斑的边缘可以通过峰值能量的 $1/e^2$ 来确定,从而确定光斑的大小,再根据 GLAS 光斑的大小即可确定 δ_r 的取值。由于卫星在太空环境中会受到各种因素的影响,激光能量分布不一定完全服从高斯分布。而实时记录的 LPA 理论上会比用高斯函数模拟的激光能量分布更加接近真实情况,因此推测使用 LPA 会得到更高的仿真精度。

图 5 给出了 LPA 记录的能量分布与模拟激光能量场分布的差异。

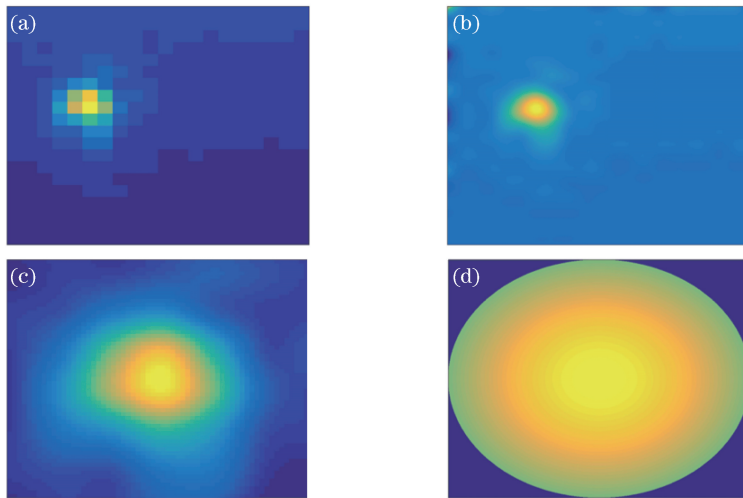


图 5 LPA 记录的能量分布与 GLAS 光斑模拟能量分布。(a)原始 LPA 数据; (b) LPA 插值后的结果;(c)图 5(b)光斑中心部分;(d)模拟光斑能量分布

Fig. 5 Energy distribution recorded by LPA and simulated spot energy distribution. (a) Original LPA data; (b) interpolated results for LPA; (c) central part of the spot in Fig. 5(b); (d) simulated energy distribution

本节针对原始 LPA 数据和模拟激光能量分布进行回波仿真对比实验,即将图 5(a)所示的原始 LPA 数据和图 5(d)所示的模拟光斑能量分布作为

光斑能量输入。根据前两组的实验结果,本组实验在考虑地物反射率和实测发射波形的前提下进行。统计结果如表 5 所示。

表 5 激光能量分布对仿真结果的影响

Table 5 Influence of laser energy distribution on simulation results

Number of footprints	Mean correlation coefficient		The count of better results	
	Simulated energy	Original LPA	Simulated energy	Original LPA
	distribution	energy distribution	distribution	energy distribution
119	0.9492	0.9537	74	45

从表 5 的统计结果来看,虽然大部分基于原始 LPA 仿真得到的精度比基于模拟能量输入获得的精度低,但仿真结果的相关系数均值却提高了,说明少数结果的大幅提升拉高了整体的平均值。可见,LPA 对仿真结果精度的影响具有较大的不确定性,可能是由于 LPA 的分辨率较低,像素单元对应的空

间区域太大,无法很好地反映激光能量分布的细节。为进一步分析,本课题组采用三次样条插值算法对原始 LPA 进行二维插值,结果如图 5(b)所示,光斑中心部分如图 5(c)所示。将原始 LPA 与插值后的结果分别作为输入条件进行实验,统计结果如表 6 所示。

表 6 原始 LPA 和 LPA 插值对仿真结果的影响

Table 6 Influence of original LPA and interpolated LPA on simulation results

Number of footprints	Mean correlation coefficient		The count of better results	
	Original LPA	Interpolated LPA	Original LPA	Interpolated LPA
	119	0.9537	0.9513	52

由表 6 可以看出,对 LPA 插值可以得到更精细的光斑能量分布,降低原始 LPA 数据因能量分布不均而带来的误差,得到的更优结果的次数有所增加。此外,基于 LPA 插值的结果比基于模拟的理想光斑输入得到的平均仿真精度提高了 0.0021。

碳监测卫星将会装备具有回波采样和记录功能的激光测高仪,以及记录激光能量分布的足印相机。激光足印相机能记录激光发射能量分布的实时状态,还有较大的应用潜力可以挖掘。文中探讨了几个因素对卫星激光回波仿真精度的影响,期望能为更高分辨率的 LPA 研究和更精细的回波仿真研究提供借鉴。

5 结 论

参 考 文 献

通过几组对比实验可以得到以下结论:

1) 地物反射率会影响激光回波的波形。4.1 节的对比实验表明,采用大光斑激光足印内的地物实际反射率得到的回波仿真结果更好,仿真精度可由 0.9337 提高到 0.9417。

[1] Tang X M, Li G Y. Development and prospect of laser altimetry satellite[J]. Space International, 2017 (11): 13-18.
唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017(11): 13-18.

[2] Brenner A C, Dimarzio J P, Zwally H J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2): 321-331.

[3] Hyde P, Dubayah R, Peterson B, et al. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using waveform lidar: validation of montane ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3/4): 427-437.

[4] Drake J B, Dubayah R O, Clark D B, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar [J]. Remote Sensing of

2) 基于 4.2 节的对比实验可知,基于实测发射波形的仿真结果比基于模拟发射波形得到的仿真结果更好,仿真精度可进一步提高到 0.9492,而且结果更优的次数也明显增多(与 4.1 节实验相比)。

3) LPA 作为 GLAS 激光足印的远场投影,反映了激光能量在地表的分布。根据仿真实验结果可知,LPA 导致多数区域的仿真精度都有所下降,但平均仿真精度有所提高,LPA 对回波仿真的影响具有较大的不确定性。主要原因可能是 LPA 分辨率低,导致激光能量分布细节不准确,通过对 LPA 进行插值细分,得到了比第二组实验更好的结果,仿真精度提高到 0.9513。

未来即将发射的国产高分七号、陆地生态系统

- Environment, 2002, 79(2/3): 305-319.
- [5] Carabajal C C, Harding D J, Suchdeo V P, *et al.* Development of AN ICESat geodetic control database and evaluation of global topographic assets [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, 2010: C41A-0494.
- [6] Li C L, Ren X, Liu J J, *et al.* Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model[J]. Scientia Sinica Terrae: Earth Sciences, 2010, 40(3): 281-293.
李春来, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥一号激光测距数据及全球 DEM 模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 281-293.
- [7] Wang J Y, Shu R, Chen W B, *et al.* Chang'E-1 satellite-mounted laser altimeter[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, 40(8): 1063-1070.
王建宇, 舒嵘, 陈卫标, 等. 嫦娥一号卫星载激光高度计[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(8): 1063-1070.
- [8] Tang X M, Li G Y, Gao X M, *et al.* The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1182-1191.
唐新明, 李国元, 高小明, 等. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182-1191.
- [9] Li G Y, Tang X M. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(12): 1939-1949.
李国元, 唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1939-1949.
- [10] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. Applied Optics, 1982, 21(3): 448-453.
- [11] Abshire J B, McGarry J F, Pacini L K, *et al.* Laser altimetry simulator. version 3.0: user's guide[R]. Lanham: Science Systems and Applications, Inc., 1994.
- [12] Bryan Blair J, Hofton M A. Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(16): 2509-2512.
- [13] Yadav G K. Simulation of ICESat/GLAS full-waveform over highly rugged terrain[D]. Enschede: University of Twente, 2010.
- [14] 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.
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.
- [15] Zhou H, Li S. 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.
- [16] Pan H, Li G Y, Wang H B, *et al.* Research on large spot laser altimetry echo simulation of general terrain [J]. Geomatics World, 2015, 22(2): 82-87.
潘浩, 李国元, 王华斌, 等. 一般地形大光斑激光测高回波模拟研究[J]. 地理信息世界, 2015, 22(2): 82-87.
- [17] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [18] Bae S, Urban T. Summary of Laser Profile Array (LPA) Parameter Estimation [EB/OL]. (2011-08-01). https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/CSR_Summary_of_LPA_param_est_v2.pdf
- [19] Yuan X Q, Li G Y, Tang X M, *et al.* Centroid automatic extraction of spaceborne laser spot image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 135-141.
袁小棋, 李国元, 唐新明, 等. 星载激光光斑影像质心自动提取方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 135-141.
- [20] Li G Y, Tang X M, Zhang C Y, *et al.* Multi-criteria constraint algorithm for selecting ICESat/GLAS data as elevation control points [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 96-104.
李国元, 唐新明, 张重阳, 等. 多准则约束的 ICESat/GLAS 高程控制点筛选 [J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 96-104.
- [21] Duong V H. Processing and application of ICESat large footprint full waveform laser range data [D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [22] Lefsky M A, Harding D J, Keller M, *et al.* Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(22): L22S02.
- [23] Ma Y, Li S, Yang F L, *et al.* Model of waveform parameters for laser altimeter system under flattened Gaussian beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0413002.
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): 0413002.
- [24] Bae S, Smith N, Schutz B E. The GLAS algorithm theoretical basis document for precision attitude determination (PAD) [R]. Greenbelt: NASA, 2013.