

国产星载激光雷达森林回波波形模拟仿真

蔡龙涛¹ 岳春宇² 黄 缙³ 贺 涛³ 国爱燕³ 邢艳秋¹

(1. 东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
3. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 为探究拟发射国产星载激光雷达卫星波形数据在森林结构参数估测方面应用潜力, 首先需对其回波波形进行模拟仿真。针对地形无规律起伏和林层结构复杂这一问题, 本文采用有限元原理实现了随机地形与林分三维信息的模拟仿真; 针对激光脉冲传输过程中能量衰减的问题, 引入了激光雷达辐射传输模型; 为验证本文所建回波仿真系统有效性, 利用与国产星载激光雷达回波波形相近的 ICESat - GLAS 实测波形数据对 GLAS 仿真波形数据进行验证。研究结果为: 发射波仿真波形与实测波形相关系数为 0.96; 地形坡度分别为 0° ~ 10°、10° ~ 20°、20° ~ 30° 和 30° 以上时回波仿真波形与实测波形相关系数均值分别为 0.90、0.88、0.85 和 0.81; 郁闭度分别为 0 ~ 0.2、0.2 ~ 0.4、0.4 ~ 0.6、0.6 ~ 0.8 和 0.8 ~ 1.0 时回波仿真波形与实测波形相关系数均值分别为 0.81、0.80、0.84、0.88 和 0.90; 针叶林、阔叶林和混交林回波仿真波形与实测波形相关系数均值分别为 0.85、0.86 和 0.89。研究结果表明: 本文所建回波仿真系统可用于国产星载激光雷达回波仿真。回波仿真所得国产星载激光雷达仿真波形, 可为森林结构参数估测研究提供数据支撑。

关键词: 星载激光雷达; 回波仿真; 有限元原理; 随机地形; 激光雷达辐射传输模型

中图分类号: S771.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)04-0208-10 **OSID:** 

Simulation on Forest Echo Waveforms of Domestic Spaceborne LiDAR

CAI Longtao¹ YUE Chunyu² HUANG Jin³ HE Tao³ GUO Aiyao³ XING Yanqiu¹

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
2. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China
3. Remote Sensing Satellite General Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In the process of exploring the application potential of domestic satellite-borne LiDAR satellite waveform data in the estimation of forest structure parameters, simulating the received waveform of the satellite is a very important part of it. In the process of waveform simulation, to solve the problem of irregular terrain undulations and complex forest layer structure, the finite element principle was implemented to realize the simulation of random terrain and forest stand three-dimensional information. To solve the problem of energy attenuation during laser pulse transmission, the laser radar radiation transmission model was used. To verify the effectiveness of the built echo simulation system, the ICESat - GLAS measured waveform data, which was similar to the received waveform of the domestic spaceborne LiDAR, was used to verify the GLAS simulation waveform data. The research results showed that the correlation coefficient between the simulated waveform and the measured waveform of the transmitted wave was 0.96. When the errain slope was 0° ~ 10°, 10° ~ 20°, 20° ~ 30°, and above 30°, the mean values of the correlation coefficients between the simulated received waveform and the measured waveform were 0.90, 0.88, 0.85, and 0.81, respectively. When the canopy closure was 0 ~ 0.2, 0.2 ~ 0.4, 0.4 ~ 0.6, 0.6 ~ 0.8, and 0.8 ~ 1.0, the mean values of the correlation coefficients between the simulated received waveform and the measured waveform were 0.81, 0.80, 0.84, 0.88, and 0.90, respectively. The mean values of correlation coefficients between the simulated received waveform and measured

收稿日期: 2021 - 04 - 15 修回日期: 2021 - 05 - 05
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD060090402、2021YFE0117700 - 6)、北京空间机电研究所开放基金项目和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572019AB18)
作者简介: 蔡龙涛(1990—),男,博士生,主要从事星载激光雷达研究,E-mail: 2550582400@qq.com
通信作者: 邢艳秋(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事林业遥感应用研究,E-mail: yanqixing@nefu.edu.cn

waveform of coniferous forest, broad-leaved forest and mixed forest were 0.85, 0.86 and 0.89, respectively. The research results showed that the built echo simulation system can be used for domestic spaceborne LiDAR echo simulation. The simulation waveforms of domestic spaceborne LiDAR obtained can provide data support for the estimation of forest structure parameters.

Key words: domestic spaceborne LiDAR; echo simulation; finite element principle; random terrain; LiDAR radiation transmission model

0 引言

森林生态系统是陆地生物圈中占地面积最大、结构组成最为复杂以及物质资源最为丰富的生态系统。森林面积约 $3.815 \times 10^9 \text{ hm}^2$, 占全球陆地总面积的 25.60%^[1], 生物量约占地球陆地生态系统总生物量的 90%^[2], 碳储量约占全球碳储量的 45%^[3]。森林生态系统在抑制全球变暖、降低碳排放和促进碳循环方面有着重要作用。为确定 2030 年和 2060 年是否能完成碳达峰和碳中和任务, 需对国内森林资源进行高精度动态监测。

森林资源调查是了解森林资源动态变化的有效手段, 传统森林资源调查费时费力, 且难以实现大区域尺度森林生物量观测研究^[4-6], 目前多采用激光雷达进行森林资源调查。而激光雷达作为一种主动遥感技术, 其发射器发射的激光脉冲具有较强的穿透力, 可穿透森林冠层以探测林下结构和地表信息, 实现森林植被信息的动态观测。目前, 已接收星载激光雷达回波波形的对地观测卫星有 ICESat1 (Ice, cloud, and land elevation satellite)、GF-7 和 GEDI (Global ecosystem dynamics investigation), 后续即将发射的星载激光雷达波形类对地测高卫星为陆地生态系统碳监测卫星^[7]和 MOLI (Multi-footprint observation LiDAR and imager) 卫星^[8]。国外星载激光雷达波形类卫星如 ICESat-GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 波形数据已用于冰川探测^[9-11]、水位探测^[12]、地物分类^[13-15]和估测森林资源^[16-17]; GEDI 卫星波形数据同样在树高估测^[18-20]、植被覆盖度^[21]和森林生物量估测^[22-24]方面取得了一定进展。而国产星载激光雷达波形类卫星还未发射, 目前该卫星尚处于技术攻关阶段, 其波形数据应用潜力有待挖掘。

为探究国产星载激光雷达波形数据在森林资源调查方面应用潜力, 对其回波波形进行模拟仿真是其中重要的环节。李松等^[25]对星载激光雷达回波波形模拟仿真时把地形分为斜坡地形和阶梯地形。潘浩等^[26]对回波波形模拟仿真时发现冠层回波与地面回波重叠程度随地形坡度增大而增大。庞勇等^[27]发现随着地形坡度增大, 仿真波形中地面波峰和植被波峰值随之降低, 且冠层回波与地面回波发

生信息混叠。其他研究多基于机载点云数据对星载激光雷达回波波形进行模拟仿真^[28-29]。然而, 上述研究并未从地形起伏特点方面对地表进行模拟仿真, 且回波仿真过程中未考虑激光脉冲在大气传输过程中的能量衰减问题, 以及探究多种因素(如地形坡度、郁闭度和森林类型)对回波波形仿真精度的影响。

本文依据有限元原理, 基于林地地形随机分布特点, 建立随机地形; 考虑到激光脉冲在大气传输过程中能量的衰减, 波形仿真过程中加入激光雷达辐射传输模型; 利用回波仿真原理^[30], 分别对 GLAS 发射波, 不同地形坡度、郁闭度和森林类型条件下回波波形进行模拟仿真。依据 GLAS 实测波形与仿真波形相关性分析结果, 对所建回波仿真系统有效性进行验证。然后利用本文建立的回波仿真系统, 对国产星载激光雷达回波波形进行模拟仿真。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区为吉林省汪清林业局经营区(图 1), 该区域属于长白山系中低山区($43^{\circ}5' \sim 43^{\circ}40' \text{ N}$, $129^{\circ}56' \sim 131^{\circ}4' \text{ E}$), 地处寒温带, 总面积 $3.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 南北长约 60 km, 东西长约 85 km, 地面高程变化范围为 360 ~ 1 477 m, 地形坡度变化范围为 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

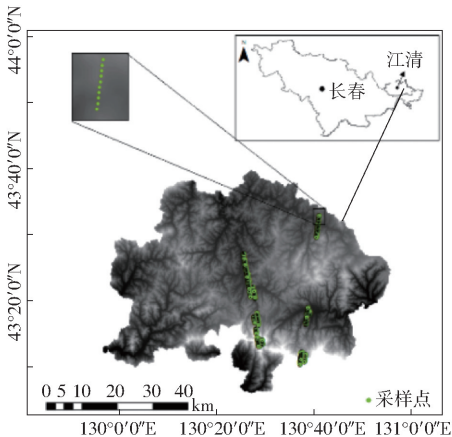


图 1 研究区位置及野外样地分布

Fig.1 Location of study area and distribution of field sampling plots

林区内森林覆盖率达到 95.95%, 深山区林分

以针叶林、阔叶林和混交林为主,带状分布于海拔 500 ~ 1 100 m 之间。针叶树主要有红松 (*Pinus koraiensis* Siebold et Zuccarini)、云杉 (*Picea asperata* Mast.) 和臭冷杉 (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.), 阔叶树多为椴树 (*Tilia tuan* Szyszyl.)、蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fischer ex Ledebour.)、枫桦 (*Betula costa* Trautv.)、色木槭 (*Acer mono* Maxim.) 和白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 等。

1.2 研究数据

1.2.1 ICESat – GLAS 波形数据

为验证本文建立的回波仿真系统有效性,本文选用应用较为成熟的 ICESat – GLAS 波形数据,对 GLAS 发射波仿真波形和 GLAS 回波仿真波形进行相关性分析。结合相关性分析结果验证本文所建回波仿真系统有效性。

ICESat – 1/GLAS 是第 1 个极地轨道大光斑激光雷达卫星,该卫星共提供 15 个数据产品:GLA01 ~ GLA15。其中,GLA01 数据产品记录了 GLAS 发射波和回波波形数据;GLA14 数据产品记录了 GLAS 波形数据对应的地面光斑地理位置和高程数据。GLAS 波形数据可从美国国家冰雪数据中心 (<http://nsidc.org/data/ice-sat/>) 下载,美国国家冰雪数据中心拥有 2003 年至 2009 年采集的所有 ICESat – GLAS 回波波形数据。GLAS 载荷参数如表 1 所示。

表 1 ICESat – GLAS 回波仿真相关载荷参数

Tab.1 Load parameters of ICESat – GLAS for echo simulation

参数	数值	参数	数值
高斯脉冲半波宽/ns	5	光斑直径/m	70
高斯脉冲波长/ns	48	采样间隔时间/ns	1
发射脉冲能量/mJ	75		

1.2.2 国产星载激光雷达载荷参数

目前,国产星载激光雷达所搭载的卫星还未发射,无法获取国产星载激光雷达实测波形。为探究国产星载激光雷达回波波形在森林结构参数估测方面应用潜力,本文基于国产星载激光雷达载荷参数和实地调查数据,结合回波仿真原理^[30]对国产星载激光雷达回波波形进行模拟仿真,以获取国产星载激光雷达仿真波形。国产星载激光雷达回波波形模拟仿真过程涉及到的载荷参数如表 2 所示。

表 2 国产星载激光雷达载荷参数

Tab.2 Load parameters of domestic spaceborne LiDAR

参数	数值	参数	数值
高斯脉冲半波宽/ns	6	光斑直径/m	30
高斯脉冲波长/ns	48	采样间隔时间/ns	1
发射脉冲能量/mJ	70		

1.2.3 实地调查数据

本文利用分层随机采样法,选取 286 组光斑数据,其中森林样地 251 组,其他类型样地如水地、裸地和草地等共计 35 组。分别于 2006 年 9 月、2007 年 9 月和 2010 年 9 月 3 次采集获取。其中,实地调查样地点位分布图如图 1 所示。在实地勘测过程中,以针叶林、阔叶林和针阔混交林作为研究对象,使用 GPS 对已选定的激光光斑采样点进行定位,把验证数据对应光斑中心点作为地面调查样地的圆心,依据公式 $\pi R^2 \cos \theta = 500 \text{ m}^2$,建立水平投影面积为 500 m^2 的圆形样地,记录样地内植被分布情况、植被类型和植被覆盖度、样地坡度与对应样地半径。另外,对针叶林、阔叶林和混交林分类时,主要结合我国森林资源调查主要技术规定,将针叶林蓄积量占总蓄积量 65% 以上的样地定义为针叶林,阔叶林蓄积量占总蓄积量 65% 以上的样地定义为阔叶林,任何一个树种蓄积量占总蓄积量不到 65% 的样地定义为混交林。

1.3 回波仿真相关原理

1.3.1 基于有限元原理构建地表响应函数模型

本文所选林分为天然林,林分内树种多样,林层结构复杂,难以实现光斑内林分信息三维模拟仿真。本文依据有限元原理,以光斑中心为原点,自原点出发,0.05 m 为间隔把正圆划分为不同直径的同心圆。然后以原点为中心,从极坐标 0° 开始,以 3° 为间隔画直线把光斑等分成 120 个扇形。直线和同心圆共同把光斑划分为 72 000 个小区域,如图 2 所示。

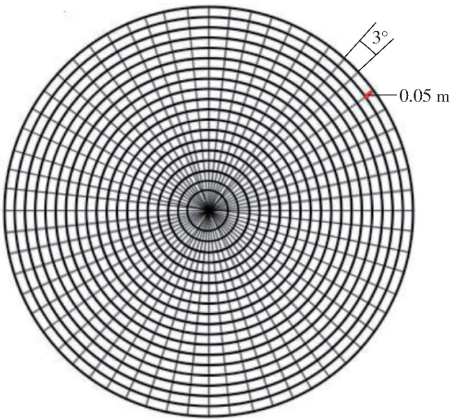


图 2 光斑划分示意图

Fig.2 Schematic of spot division

星载激光雷达光斑划分为若干扇形小区域后,在垂直方向上以 0.15 m 为间隔对光斑内地物进行垂直分层。假定在垂直方向上可分为 m 层,每层有 k 个小区域,统计每层(第 j 层)小区域内地物在地面的投影面积,并将所有层地物投影面积按时间序列排列起来,可构成地表响应函数模型,计算式为

$$N(t(j)) = N(j) = \sum_{i=1}^k N_i \quad (1)$$

$$G(t) = \{N(t(1), t(2), \dots, t(m))\} \quad (2)$$

式中 $t(j)$ ——发射波与第 j 层地面目标物接触时的时刻

$N(j)$ ——第 j 层地面目标物在地面的投影面积

N_i ——第 j 层第 i 个小区域在地面投影面积

$G(t)$ ——地表响应函数

1.3.2 回波仿真模型

依据回波仿真原理^[30], 星载激光雷达回波波形为发射波函数与地表响应函数(后向散射截面的集合)的卷积。若不考虑大气影响, 回波仿真模型定义为

$$E(t) = F(t) * G(t) \quad (3)$$

式中 $E(t)$ ——回波波形

$F(t)$ ——激光发射脉冲函数

$*$ ——卷积运算符

本文所用样地在地面投影为直径 25.2 m 的正圆, 而验证数据对应光斑直径为 70 m, 两者覆盖区域面积相差较大, 不同区域内林木个数同样存在较大差异。为高精度模拟仿真国产星载激光雷达回波波形, 需对直径 25.2 m 样地林木个数进行扩展, 在保证林木密度、森林类型和郁闭度相同的条件下把光斑直径扩展到 70 m, 近似模拟 70 m 光斑内林分地面三维信息。

1.3.3 激光雷达辐射传输模型

激光脉冲在大气中传输过程中, 受到大气分子、水蒸气和气溶胶等因素影响, 产生一系列物理反应(如大气折射、后向散射和大气分子吸收等), 这些反应使得激光脉冲能量值产生一定程度衰减。其中, 激光在大气中的透过率决定了激光脉冲回波波形的振幅值, 该投过率可由朗伯-比尔定律^[31]表示, 公式为

$$\tau_{\text{atm}}(\lambda) = \exp\left(-\int_0^L \beta(\lambda) dl\right) \quad (4)$$

式中 $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ ——波长为 λ 时激光脉冲在大气中的单程投过率

L ——激光脉冲发射器与目标物之间的距离

$\beta(\lambda)$ ——波长为 λ 时总衰减系数

其中 $\beta(\lambda)$ 由 4 部分构成^[32]

$$\beta(\lambda) = \sigma_m + \sigma_a + s_m + s_a \quad (5)$$

式中, σ_m 、 σ_a 分别为分子、气溶胶吸收系数, s_m 、 s_a 分别为分子、气溶胶散射系数。另外, 大气总衰减系数值一般为 0.5^[26]。

1.4 星载激光雷达回波波形信噪比

星载激光雷达实测回波波形中存在大量噪声数

据。为高精度模拟仿真国产星载激光雷达回波波形, 需对国产星载激光雷达理论仿真波形进行添加噪声处理。本文对验证数据回波波形进行信噪比分析, 以确定国产星载激光雷达回波波形添加混合噪声信噪比设定值。其中, 星载激光雷达回波波形信噪比定义公式^[33]为

$$R_{\text{SNR}} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^{544} f^2(i)}{\sum_{i=1}^{544} (s(i) - f(i))^2} \right) \quad (6)$$

式中 R_{SNR} ——信噪比

$s(i)$ ——去噪前验证数据回波波形

$f(i)$ ——去噪后验证数据回波波形

1.5 混合噪声模拟

星载激光雷达回波波形为大尺度遥感数据^[34], 激光脉冲在大气传输过程中经由两次菲涅耳衍射后, 得到的回波波形为多模式复杂曲线, 其中混入了探测器噪声、背景噪声、量子噪声和热噪声等若干高斯分量, 这些噪声数据中除背景噪声为非零均值高斯白噪声外, 其余噪声均认为是零均值高斯白噪声^[35-37]。

由于星载激光雷达回波波形中大部分噪声数据可视为零均值高斯白噪声, 因此, 本文加入高斯白噪声以代替星载激光雷达回波波形中的噪声数据。另外, 加入的噪声数据可通过改变信噪比的方式进行控制。混合噪声模拟公式为

$$D_{\text{noise}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W^2(i)}{n}}}{\text{std}(D_{\text{RN}}) D_{\text{RN}}} \sqrt{10 \exp\left(\frac{D_{\text{SNRV}}}{10}\right)} \quad (7)$$

其中 $D_{\text{RN}} = D_{\text{Raw}_{\text{RN}}} - \text{mean}(D_{\text{Raw}_{\text{RN}}}) \quad (8)$

式中 D_{noise} ——混合噪声模拟数据

D_{SNRV} ——信噪比设定值

$D_{\text{Raw}_{\text{RN}}}$ ——随机波形数据, 波形长度为 544

W ——国产星载激光雷达理论仿真波形数据

n ——国产星载激光雷达回波波形帧数, 取 544

$\text{std}()$ ——标准差函数

$\text{mean}()$ ——求平均值函数

2 实验与结果分析

按照统计学标准, 样本抽样个数一般不低于 30。本文对仿真波形进行相关性分析时, 从样本总个数较多(超过 30)的样本中随机抽取 30 个样本数据作为调查数据, 进行相关性分析; 对样本总个数较

少(低于 30)的样本整体进行相关性分析。

2.1 发射波波形

基于验证数据对应测高系统载荷参数,结合发射波函数模型^[30],对其发射波波形以及发射波激光脉冲能量分布进行模拟仿真,仿真结果如图 3 所示。

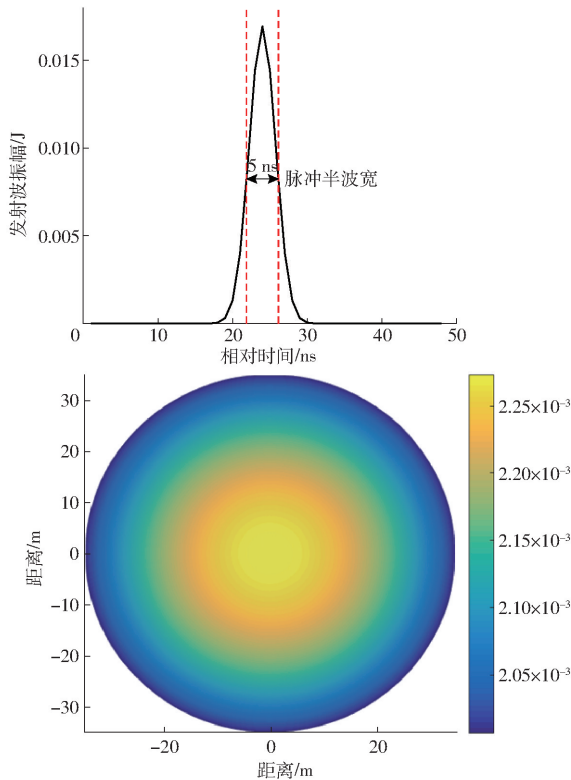


图 3 发射波仿真波形与激光脉冲能量分布示意图

Fig.3 Schematics of emission wave simulation waveform and laser pulse energy distribution

对比分析发射波仿真波形与实测波形,发现发射波实测波形波峰点与发射波仿真波形波峰点之间存在一定距离偏移,如图 4a 所示。据激光雷达测高原理与发射波函数可知,回波波形测距结果不会因发射波波峰位置变化而改变。故本文在对发射波仿真波形进行验证时,可对其波形波峰点进行左右平移,以获取发射波仿真波形与发射波实测波形相关系数最大值,并把该值作为发射波仿真波形与发射波实测波形相关系数。平移后发射波仿真波形与实测波形示意图如图 4b 所示。

平移前发射波仿真波形与发射波实测波形相关系数为 0.32。平移后发射波仿真波形与发射波实测波形相关系数为 0.96。研究结果表明发射波仿真波形波峰点平移对相关系数分析结果会产生较大影响,而不会影响测距结果。因此,有必要对发射波仿真波形波峰点进行平移,以获取发射波仿真波形与发射波实测波形相关系数最大值,并把该值作为两者相关系数实际值。

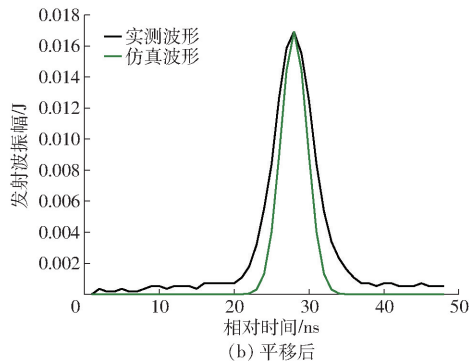
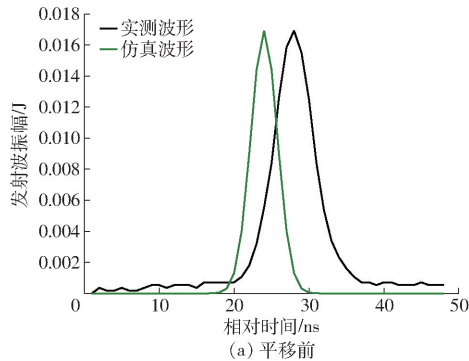


图 4 波峰点平移前后发射波仿真波形与实测波形示意图

Fig.4 Schematics of transmitted wave simulated waveforms and measured waveforms before and after crest point was shifted

研究中随机选取 30 组发射波实测波形,与发射波仿真波形进行相关性分析,得出发射波仿真波形波峰点平移之后与发射波实测波形相关系数均值为 0.96。研究结果显示发射波仿真波形与发射波实测波形具有较高的相关性,表明本文建立的发射波仿真模型可对国产星载激光雷达发射波波形进行模拟仿真。

2.2 光斑内地面信息三维模型

为高精度模拟仿真国产星载激光雷达回波波形,需对林木和林地形高精度模拟仿真。本文依据林木冠层结构把针叶树冠型定义为椭球体型,阔叶树冠型定义为椭球体型、上半球体型和下半球体型。本文在李松等^[25]研究基础上,依据实测林地内地形无规律分布特点,通过有限元原理,获取了每个小区内地物三维坐标,并对其进行曲面拟合,建立了随机地形,如图 5a 所示。该地形无规律起伏的特点,增大了模拟地形的地表粗糙度,提高了实际地形仿真精度。之后,联合林木冠型定义方式和随机地形,对光斑内林分进行了三维建模,建模结果如图 5b 所示。

2.3 仿真波形添加混合噪声

结合 1.5 节混合噪声模拟原理,对国产星载激光雷达仿真波形进行添加噪声处理:首先,基于混合噪声模拟公式(7)获取噪声波形,噪声波形获取过

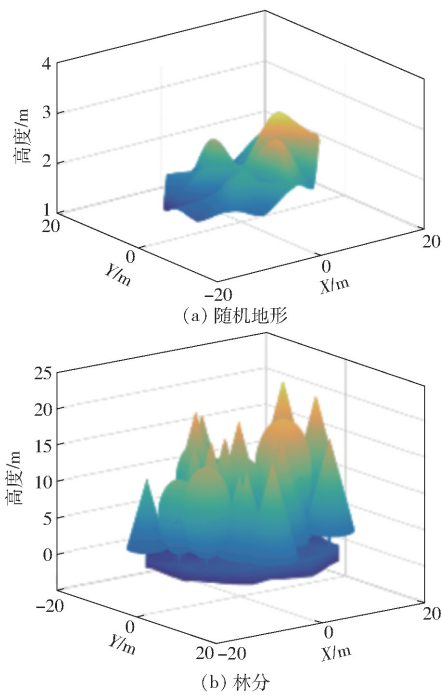


图 5 随机地形和林分三维模拟示意图
Fig. 5 Three-dimensional simulation diagrams of random terrain and forest stands

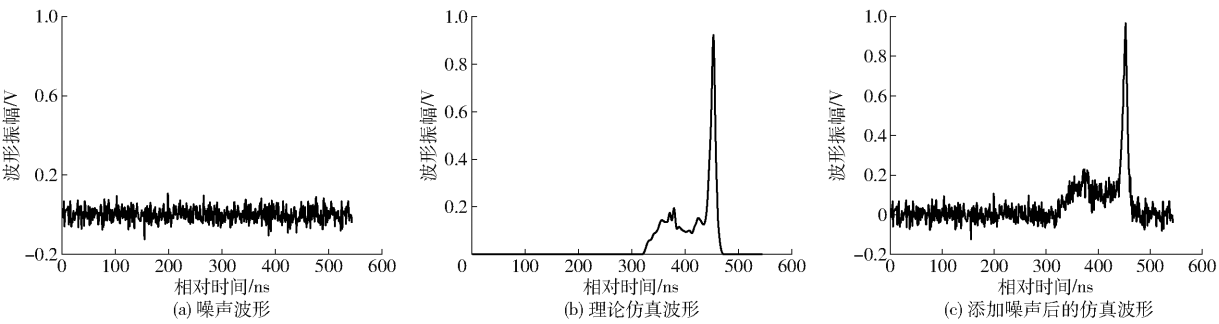


图 6 国产星载激光雷达仿真波形添加噪声示意图

Fig. 6 Schematics of adding noise to simulation waveform of domestic spaceborne LiDAR

表 3 不同地形坡度回波波形仿真精度			
Tab.3 Simulation accuracy of received waveform under different terrain slopes			
地形坡度/(°)	相关系数		样本点个数
	最大值	平均值	
0 ~ 10	0.95	0.90	30
10 ~ 20	0.93	0.88	30
20 ~ 30	0.93	0.85	30
≥30	0.85	0.81	15
总计			105

表 4 不同郁闭度回波波形仿真精度				
Tab.4 Simulation accuracy of received waveform under different canopy covers				
郁闭度	相关系数		地形坡度 均值/(°)	样本点 个数
	最大值	平均值		
0 ~ 0.2	0.92	0.81	9.24	16
0.2 ~ 0.4	0.91	0.80	10.50	30
0.4 ~ 0.6	0.92	0.84	12.37	30
0.6 ~ 0.8	0.95	0.88	13.96	30
0.8 ~ 1.0	0.94	0.90	13.59	30
总计				136

相关性。

2.4.2 不同郁闭度回波波形

林分郁闭度为林分在地面的投影面积与林地面积之比,对森林每年碳增量存在较大影响^[41]。研究中以 0.2 为间隔,将郁闭度分为 0 ~ 0.2、0.2 ~ 0.4、0.4 ~ 0.6、0.6 ~ 0.8、0.8 ~ 1.0 等 5 个范围,对不同郁闭度条件下回波仿真波形与实测波形进行相关性

程中可通过改变信噪比确定添加混合噪声数据的大小;然后,把混合噪声波形数据与国产星载激光雷达仿真波形数据对应帧数据振幅相加,可得带有噪声数据的国产星载激光雷达仿真波形,如图 6a 所示。

2.4 仿真波形验证

2.4.1 不同地形坡度回波波形

地形坡度较大区域,星载激光雷达回波波形存在波形展宽现象^[38-39],影响森林结构参数估测精度^[40]。为探究本文所建回波仿真系统在不同地形坡度条件下是否有效,以 10°为间隔把地形坡度分为 0° ~ 10°、10° ~ 20°、20° ~ 30°和 30°以上共 4 个小组,对不同地形坡度条件下回波仿真波形与实测波形进行相关性分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,回波仿真波形与实测波形相关系数整体随地形坡度增大而降低。分析其原因:地形坡度较大时,星载激光雷达回波波形出现波形展宽现象^[38-39],且据实地调查发现地形坡度较大时光斑内地形呈无规律起伏分布,以致回波仿真波形与实测波形存在较大差异,降低了仿真波形与实测波形

分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,仿真波形与实测波形相关系数随郁闭度增大呈先减小后增大的趋势。分析其原因:对郁闭度范围为 0 ~ 0.2 和 0.2 ~ 0.4 条件下仿真波形与实测波形相关系数进行分析,发现郁闭度较小条件下(低于 0.2)的林分,其冠层反映在回波波形

上为回波波形振幅偏低,且冠层回波能量之和较小。因此,仿真波形中冠层回波波形与实测波形中冠层回波波形振幅值相差较小,且郁闭度在 0~0.2 条件下地形坡度平均值为 9.24°,低于郁闭度 0.2~0.4 条件下地形坡度平均值 10.50°,以至郁闭度在 0~0.2 条件下仿真波形与实测波形相关系数高于郁闭度在 0.2~0.4 条件下仿真波形与实测波形相关系数。

针对仿真波形与实测波形相关系数随郁闭度(郁闭度大于 0.2)增大而增大的问题,分析其原因:依据回波仿真原理^[30],林分郁闭度可直接影响星载激光雷达回波振幅,而郁闭度越大表明林分中林木个数越多。由于林木在林分中随机分布,光斑内林木个数越多,地面信息三维仿真模型与实际地面信息越相近,极端条件下如郁闭度为 1 时,林木随机分布这一因素对回波波形仿真精度的影响达到最小。因此,郁闭度大于 0.2 后,仿真波形与实测波形相关系数随郁闭度增大而增大。

2.4.3 不同森林类型回波波形

不同森林类型条件下星载激光雷达回波波形森林结构参数估测精度存在较大差异^[42]。为验证本文所建回波仿真系统在不同森林类型条件下是否有效,研究中分别对针叶林、阔叶林和混交林回波仿真波形与实测波形进行相关性分析,结果如表 5 所示。

表 5 不同森林类型回波波形仿真精度
Tab.5 Simulation accuracy of received waveform under different forest types

森林类型	相关系数		样本点个数
	最大值	平均值	
针叶林	0.94	0.85	30
阔叶林	0.94	0.86	30
混交林	0.95	0.89	30
总计			90

由表 5 可知不同森林类型条件下仿真波形与实测波形相关系数整体从小到大依次为针叶林、阔叶林和混交林。

依据林木冠形特征和地形分布规律,对不同森林类型条件下仿真波形和实测波形相关系数差异性进行分析:发现针叶树冠型多为圆锥体型,冠层枝叶多分布于冠层中下部位置,反映在回波波形上表现为针叶林冠层回波波形与地面回波波形之间距离较近。当地形存在一定坡度时,受波形展宽影响,冠层回波波形与地面回波波形存在一定程度的重叠;且受林木随机分布影响,地形坡度越大,冠层回波波形与地面回波波形重叠度越大。因此,针叶林仿真波形和实测波形相关系数较低。相对于针叶林,阔叶

树冠型多为椭球体型、上半球体型和下半球体型,冠层枝叶多集中于冠层中上部位置,反映在回波波形上表现为阔叶林冠层回波波形与地面回波波形之间距离较远。一定地形坡度条件下,冠层回波波形与地面回波波形重叠度较低。因此阔叶林仿真波形和实测波形相关系数高于针叶林仿真波形和实测波形相关系数。相对于针叶林和阔叶林,混交林同时存在针叶树和阔叶树,反映在回波波形上表现为冠层回波波形与地面回波波形既存在重叠部分,也存在未重叠部分。重叠部分仿真波形多为针叶树冠层回波,该波形与光斑内针叶树冠层实测波形相关性较高(任意地形坡度下);未重叠部分仿真波形多为阔叶树冠层回波,该波形与光斑内阔叶树实测回波波形相关性较高(任意地形坡度下)。因此,任意地形坡度下,仿真波形中冠层回波与地面回波重叠部分和未重叠部分都与实测波形具有较高相关性,表现在仿真波形与实测波形相关性上为混交林仿真波形与实测波形具有更高的相关性。

2.5 国产星载激光雷达回波仿真波形

对 251 组验证数据回波波形进行信噪比分析,发现验证数据回波波形信噪比均值为 19。因此,本文对国产星载激光雷达理论仿真波形添加噪声时,把混合噪声信噪比设定为 19。

2.4 节已验证本文建立的回波仿真系统有效性,依据该回波仿真系统,结合国产星载激光雷达载荷参数和实地调查数据,可对国产星载激光雷达回波波形进行模拟仿真。星载激光雷达回波波形受地形坡度影响较大^[38-39],故本文以地形坡度为例,分别对坡度 0°、10°、20°和 30°条件下国产星载激光雷达回波波形进行模拟仿真,仿真结果如图 7 所示。

对图 7 中不同地形坡度条件下国产星载激光雷达仿真波形进行分析,发现国产星载激光雷达仿真波形中地面回波波形长度随地形坡度增大而增大。这与星载激光雷达回波波形受地形坡度影响结果相同^[38-39],说明本文所建回波仿真系统适用于国产星载激光雷达回波波形模拟仿真。

3 结论

- (1)验证数据发射波仿真波形与实测波形相关系数均值为 0.96,表明本文所得发射波波形可用于星载激光雷达回波波形模拟仿真。
- (2)利用有限元原理可实现林分三维信息的模拟仿真,且构建的随机地形与实际地形起伏规律更为相近,可用于国产星载激光雷达回波波形模拟仿真。
- (3)不同地形坡度、郁闭度和森林类型条件下验证数据仿真波形与实测波形相关系数均值分别为

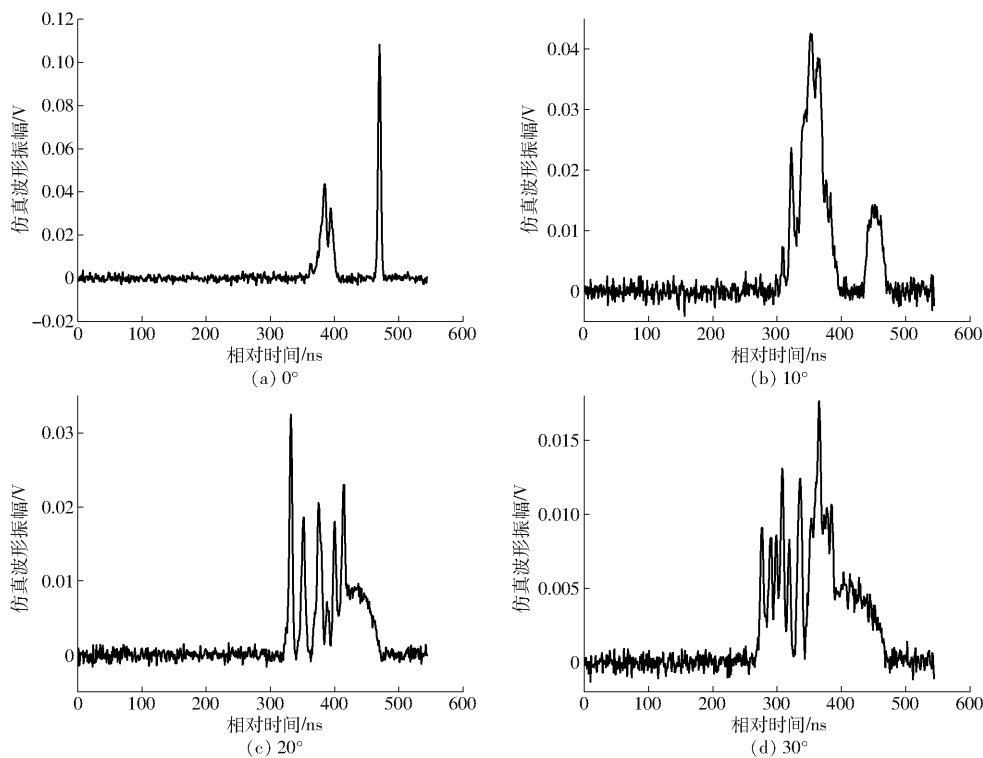


图 7 不同地形坡度仿真波形示意图

Fig.7 Schematics of simulation waveforms under different terrain slopes

0.87、0.85 和 0.87；且国产星载激光雷达仿真波形中地面回波波形长度随地形坡度增大而增大，与波形展宽现象一致。表明本文所建回波仿真系统可用于星载激光雷达回波波形模拟仿真。

参 考 文 献

[1] 陈海波. 我国发布首幅 2018 年全球 30 米分辨率森林覆盖图[EB/OL]. (2019-11-21). http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201911/t20191121_2482563.html.

[2] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary productivity of the biosphere[M]. Springer-Verlag, 1975.

[3] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882):1444-1449.

[4] BOUDREAU J, NELSON R F, MARGOLIS H A, et al. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3876-3890.

[5] STEFAN D. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 33(9): 2937-2984.

[6] TSUI O W, COOPS N C, WULDER M A, et al. Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate above-ground biomass and biomass components in a coastal temperate forest[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 69: 121-133.

[7] 王思恒, 黄长平, 张立福, 等. 陆地生态系统碳监测卫星近红波段叶绿素荧光反演算法设计[J]. 遥感技术与应用, 2019,34(3):476-487.

WANG Siheng, HUANG Changping, ZHANG Lifu, et al. Designment and assessment of far-red solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval method for the terrestrial ecosystem carbon inventory satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019,34(3):476-487. (in Chinese)

[8] SINGH U N, SUGIMOTO N, JAYARAMAN A, et al. Construction and first atmospheric observations of a high spectral resolution lidar system in argentina in the frame of a trinational Japanese-Argentinean-Chilean collaboration[C]// Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV, 2016.

[9] 陈国栋,李建成,黄甜. 利用 ICESat/GLAS 数据获取北极海冰出水高度的研究[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(12):1291-1296.

CHEN Guodong, LI Jiancheng, HUANG Tian. Research on arctic sea ice freeboard derived from ICESat/GLAS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2017,37(12):1291-1296. (in Chinese)

[10] WU Hongbo, WANG Ninglian, GUO Zhongming, et al. Regional glacier mass loss estimated by ICESat - GLAS data and SRTM digital elevation model in the West Kunlun Mountains, Tibetan Plateau, 2003—2009[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1):1-18.

[11] WANG Xianwei, GONG Peng, ZHAO Yuanyuan, et al. Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/

- GLAS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132:131–144.
- [12] LI Chunlan, WANG Jun, HU R C, et al. ICESat/GLAS-derived changes in the water level of Hulun Lake, Inner Mongolia, from 2003 to 2009[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(2): 420–430.
- [13] GHOSH S, NANDY S, PATRA S, et al. Land cover classification using ICESat/GLAS full waveform data[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 45(2): 327–335.
- [14] TIAN Jinyan, WANG Le, LI Xiaojuan, et al. Differentiating tree and shrub LAI in a mixed forest with ICESat/GLAS spaceborne LiDAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 87–94.
- [15] 谭继强, 詹庆明, 韩凉, 等. ICESat GLAS 完整波形信号处理技术在南极查尔斯王子山脉地区地表覆盖分类中的应用研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(4): 8–12.
- TAN Jiqiang, ZHAN Qingming, HAN Liang, et al. ICESat/GLAS full waveform signal processing for land cover classification in Antarctica Prince Charles Mountains[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(4): 8–12. (in Chinese)
- [16] NELSON R, RANSON K J, KIMES D S et al. Estimating Siberian timber volume using MODIS and ICESat/GLAS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(3): 691–701.
- [17] IQBAL I A, DASH J, ULLAH S, et al. A novel approach to estimate canopy height using ICESat/GLAS data: a case study in the New Forest National Park, UK[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 109–118.
- [18] POTAPOV P, LI X Y, HERNANDEZ S A, et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112165.
- [19] ADAM M, URBAZAEV M, DUBOIS C, et al. Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in european temperate forests: influence of environmental and acquisition parameters[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3948.
- [20] WENDY Q, LEE S K, HANCOCK S, et al. Improved forest height estimation by fusion of simulated GEDI Lidar data and TanDEM-X InSAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 621–634.
- [21] RISHMAWI K, HUANG C, ZHAN X, et al. Monitoring key forest structure attributes across the conterminous United States by integrating GEDI LiDAR measurements and VIIRS data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 442–464.
- [22] SILVA C A, DUNCANSON L, HANCOCK S, et al. Fusing simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR data for regional aboveground biomass mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 1–14.
- [23] WENLU Q, SVETLANA S, ARMSTON J, et al. Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 1–17.
- [24] SAARELA S, HOLM S, HEALEY S P, et al. Generalized hierarchical model-based estimation for aboveground biomass assessment using GEDI and landsat data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1–27.
- [25] 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(1): 33–39.
- LI Song, ZHOU Hui, SHI Yan, et al. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007(1): 33–39. (in Chinese)
- [26] 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.
- PAN Hao, LI Guoyuan, WANG Huabin, et al. Research on large spot laser altimetry echo simulation of general terrain[J]. *Geomatics World*, 2015, 22(2): 82–87. (in Chinese)
- [27] 庞勇, 李增元, MICHAEL Lefsky, 等. 地形对大光斑激光雷达森林回波影响研究[J]. *林业科学研究*, 2007, 20(4): 464–468.
- PANG Yong, LI Zengyuan, MICHAEL Lefsky, et al. Effects of terrain on the large footprint Lidar waveform of forests[J]. *Forest Research*, 2007, 20(4): 464–468. (in Chinese)
- [28] 门华涛, 李国元, 陈继溢, 等. 激光测高卫星回波波形精细化模拟仿真方法研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 310–317.
- MEN Huatao, LI Guoyuan, CHEN Jiayi, et al. Refined simulation methods of laser altimetry satellite echo waveform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 310–317. (in Chinese)
- [29] LDA B, AN C, SHA D, et al. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 1–16.
- [30] 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.
- ZHOU Hui, LI Song. Waveform simulator of return signal for laser altimeter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(10): 1402–1406. (in Chinese)
- [31] 耿蕊, 陈芳芳, 吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究[J]. *激光杂志*, 2016, 37(12): 13–17.
- GENG Rui, CHEN Fangfang, LÜ Yong. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere[J]. *Laser Journal*, 2016, 37(12): 13–17. (in Chinese)
- [32] 张景芝. 大气中不同波长激光的传输特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHANG Jingzhi. Research on transmission performances of atmospheric laser communication system with different wavelengths[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [33] MATZ V, SMID R, STARMAN S, et al. Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(8): 752–759.
- [34] WULDER M A, WHITE J C, NELSON R F, et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: a review[J]. *Remote*

- Sensing of Environment, 2012, 121: 198 – 209.
- [35] BUFTON J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(3):463 – 477.
- [36] GARDNER C S. Ranging performance of satellite laser altimeters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5):1061 – 1072.
- [37] ZHAO Xin, ZHANG Yi, ZHANG Liming, et al. Algorithm of laser altimeter reflecting waveform based on Gaussian decomposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3):643 – 648.
- [38] PANG Yong, LEFSKY M, SUN Guoqing, et al. Impact of footprint diameter and off-nadir pointing on the precision of canopy height estimates from spaceborne lidar[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(11): 2798 – 2809.
- [39] MAHONEY C, KLJUN N, LOS S O, et al. Slope estimation from ICESat/GLAS[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10): 1 – 25.
- [40] XING Yanqiu, GIER A D, ZHANG Junjie, et al. An improved method for estimating forest canopy height using ICESat – GLAS full waveform data over sloping terrain: a case study in Changbai mountains, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(5): 385 – 392.
- [41] 田静. 森林生物量遥感估测及人为干扰对森林碳储量影响研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.
TIAN Jing. Study on forest biomass estimation and effect of human disturbance on forest carbon storage using remote sensing data[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2017. (in Chinese)
- [42] 邱赛. ICESat – GLAS 波形与 HJ – 1A 高光谱影像联合反演森林地上生物量的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2016.
QIU Sai. The research of regional forest above ground biomass inversion combining ICESat – GLAS waveform and HJ – 1A hyperspectral imageries[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2016. (in Chinese)
-

(上接第 163 页)

- [12] 路春燕, 雷依凡, 苏颖, 等. 基于面向对象-深度学习的闽东南低海拔海岸带地区湿地动态遥感分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4):713 – 727.
LU Chunyan, LEI Yifan, SU Ying, et al. Dynamic remote sensing analysis of low-altitude coastal wetland in southeast Fujian based on object-oriented and deep learning[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4):713 – 727. (in Chinese)
- [13] HAO Shengyu, WANG Gaoang, GU Renshu. Weakly supervised instance segmentation using multi-prior fusion[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2021, 211: 103261.
- [14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U – Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Lecture Notes in Computer Science, Munich, Germany: Springer Verlag,2015, 9351: 234 – 241.
- [15] 魏秀参. 解析深度学习:卷积神经网络原理与视觉实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2018.
- [16] 宁斯岚. 基于深度学习和雷达遥感数据的水稻种植面积提取研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
NING Silan. Extraction of rice planting area based on deep learning and radar remote sensing data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [17] RUDER S. An overview of gradient descent optimization algorithms[J]. arXiv preprint arXiv:1609.04747, 2016.
- [18] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [C] // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, United States, 2015: 149801.
- [19] 董蕴雅, 张倩. 基于 CNN 的高分遥感影像深度语义特征提取研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 1 – 11.
DONG Yunya, ZHANG Qian. A review of deep semantic feature extraction from high-resolution remote sensing images based on CNN[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1): 1 – 11. (in Chinese)
- [20] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2015, Boston, MA, United States, 2015: 1 – 9.
- [21] HOWARD A G, ZHU M, CHEN B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [J]. arXiv preprint arXiv:1704.04861, 2017.
- [22] 周欣昕, 吴艳兰, 李梦雅, 等. 基于特征分离机制的深度学习植被自动提取方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(9):1675 – 1689.
ZHOU Xinxin, WU Yanlan, LI Mengya, et al. Deep learning automatic vegetation extraction method based on feature separation mechanism[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(9):1675 – 1689. (in Chinese)
- [23] 熊俊涛, 刘柏林, 钟灼, 等. 基于深度语义分割网络的荔枝花叶分割与识别[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):252 – 258.
XIONG Juntao, LIU Bailin, ZHONG Zhuo, et al. Segmentation and recognition of litchi mosaic based on deep semantic segmentation network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):252 – 258. (in Chinese)