

基于方向自适应的OPTICS(DA-OPTICS)山地林区地表及冠层表面检测

谢俊峰¹, 杨晓梦^{1,2}, 徐超鹏^{1,2}, 芦祎霖³, 张丽斌⁴, 莫凡¹,
吕鑫¹, 刘仁⁵, 曾俊泽¹

1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
2. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 青岛 266590;
3. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094;
4. 云南省遥感中心, 昆明 650032;
5. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650050

摘要: 针对新一代冰、云、陆地高程卫星ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2) 数据在山地林区信号提取精度不高, 导致地表及冠层表面检测困难的问题, 本文提出了一种基于方向自适应的点排序识别聚类结构DA-OPTICS (Direction-Adaptively Ordering Points To Identify the Clustering Structure) 山地林区地表及冠层表面检测方法。首先, 该方法利用随机抽样一致RANSAC (Random Sample Consensus) 分段曲线拟合初始地表, 以此构建方向自适应的椭圆搜索域, 并结合大津法OTSU (Nobuyuki Otsu method) 提取地面信号, 通过地表拟合地面信号提取迭代获取精细地表; 随后, 基于精细地表消除地形对点云影响, 采用垂直方向椭圆OPTICS提取植被信号并检测冠层表面。为评估DA-OPTICS性能, 本文以黑龙江孟家岗林场、辽宁抚顺林区ICESat-2数据为实验对象, 利用人工标注样本及无人机产品验证精度。结果表明: DA-OPTICS提取地表与植被信号精度 (F 值) 达到0.97, 较基于椭圆搜索域的OPTICS, 精度提升了约0.07; 同时, DA-OPTICS检测的地表及冠层表面高程均方根误差RMSE (Root Mean Square Error) 分别为1.08 m和2.33 m, 显著优于ATL08的1.92 m和3.29 m。因此, DA-OPTICS能够实现对山地林区地表及冠层表面的高精度检测, 尤其适用于坡度变化较大的区域, 为森林空间结构参数的精准反演提供了可靠的数据基础。

关键词: ICESat-2/ATLAS, 方向自适应, DA-OPTICS, 迭代精化, 地形坡度, 山地林区

中图分类号: P2

引用格式: 谢俊峰, 杨晓梦, 徐超鹏, 芦祎霖, 张丽斌, 莫凡, 吕鑫, 刘仁, 曾俊泽. 2025. 基于方向自适应的OPTICS(DA-OPTICS) 山地林区地表及冠层表面检测. 遥感学报, 29(10): 2944–2957

Xie J F, Yang X M, Xu C P, Lu Y L, Zhang L B, Mo F, Lyu X, Liu R and Zeng J Z. 2025. Ground and canopy surface detection method based on direction-adaptive OPTICS in mountainous forest areas. National Remote Sensing Bulletin, 29(10): 2944–2957 [DOI:10.11834/jrs.20243390]

1 引言

森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分 (李增元等, 2016), 准确评估森林高度和地上生物量对理解全球气候背景下的碳收支有十分重要的意义 (Su等, 2016; 汪垚等, 2018; 庞勇等, 2022)。美国国家航空航天局于2018年9月成功发

新一代冰、云、陆地高程卫星ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2), 其搭载的先进地形激光高度计系统ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), 以10 kHz重复频率发射激光脉冲, 获取沿轨间隔0.7 m、直径约17 m的重叠光斑, 密集的采样使其在量化植被结构上存在巨大的潜力 (Popescu等, 2018)。然而, 光子计数激

收稿日期: 2023-09-14; 预印本: 2023-12-22

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2020YFE0200800)

第一作者简介: 谢俊峰, 研究方向为星载激光测高仪几何检校、数据处理及应用, 卫星定姿。E-mail: junfeng_xie@163.com

通信作者简介: 杨晓梦, 研究方向为星载激光测高数据处理与应用。E-mail: yxm17854258090@163.com

光雷达传感器高灵敏度和低能量特性，使其易受到太阳背景噪声等干扰（Xie等，2021），形成密集的场景噪声（Huang等，2023）。因此，如何准确有效提取信号，检测地表及冠层表面，是估算森林冠层高度、量化植被结构的关键（Gwenzi等，2016）。

目前，国内外学者针对林区点云信号的提取、地表及冠层表面的检测开展了众多研究。其中，点云信号提取方法可分为基于栅格图像处理、局部统计分析及密度聚类共3类。Magruder等（2012）提出基于图像处理技术检测栅格化产品的特征，以提取林区信号点；Awadallah等（2013）采用主动轮廓模型等技术基于栅格化产品获取地面及森林冠层曲线，达到信号提取的目的。但栅格化会损失部分点云信息，影响信号的有效提取（Chen和Pang，2015）。基于局部统计分析的信号提取依据点云局部统计特征，先后引入了径向基函数（Herzfeld等，2014）、局部距离（夏少波等，2014）、最佳滤波方向点密度（谢锋等，2017）、局部离群因子（Chen等，2019）、相对相邻关系（Li等，2021）等多种统计参数，实现信号提取。该类算法可避免点云信息的损失，但对阈值依赖性高，难以滤除复杂林下噪声。相较于上述方法，基于密度聚类的点云信号算法应用更为广泛（Xie等，2021）。Zhang等（2015）基于密度的噪声应用空间聚类DBSCAN（Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise）提出了椭圆DBSCAN算法，可有效提取信号，但对参数依赖性较强。Nie等（2018）提出均匀化密度聚类算法，消除了林下光子点云密度不均的问题，但会导致裸露地面提取结果异常。Zhu等（2021）提出一种基于改进的点排序识别聚类结构OPTICS（Ordering points to identify the clustering structure），将搜索圆改进为椭圆，能有效提取信号，但并不适用于复杂山地林区。故虽该类算法应用广泛，但对输入参数敏感，难以适用于复杂山地林区。

另外，地表及冠层表面的检测可归结于点云的分类，已有样条插值、高程百分比、三角网格等常用算法（王玥，2020）。其中，样条插值法采用高程直方图、样条插值获取地表及冠层轮廓，结合欧氏距离及阈值对其加密（Moussavi等，2014；夏少波等，2014；Chen等，2019），该类方法易将近地面噪声误判为信号。为此，Popescu等（2018）出了高程百分比法，实现了地表及冠

层信号的提取，在平坦区域效果良好，但无法适用于山地林区。考虑地形，Nie等（2018）、王玥等（2020）引入三角网加密扩展了初始地面信号，虽有效提升了地表检测精度，但对初始地面点依赖性较强，难以推广应用。为此，朱笑笑等（2021）引入了经验模态分解，可有效去除高频噪声，但坡度较大区域会产生对地面信号的误判，使其对山地林区的检测并不可靠。上述算法依赖点云信号密度特征来检测地表与冠层表面，但其对地形变化较为敏感，在山地林区等复杂的地形条件下的适用性较差。

因此，基于光子点云分布与地形间较高的空间关联性，本文提出了一种基于方向自适应的OPTICS（DA-OPTICS）山地林区地表及冠层表面检测方法。该方法首先采用RANSAC分段曲线拟合初始地表，构建方向自适应的椭圆搜索域，结合OTSU提取地表信号，并通过迭代地表拟合与地表信号提取，获取精细地表；随后，利用该精细地表消除地形影响，采用垂直椭圆OPTICS实现植被信号提取与冠层表面的检测。为验证DA-OPTICS有效性，研究选取黑龙江孟家岗林场与辽宁抚顺林区的ICESat-2/ATLAS数据为实验对象，结合人工标注样本与无人机遥感产品进行精度验证，系统评估该方法在复杂地形林区的性能，以期量化森林植被结构提供可靠的数据支撑。

2 实验区与数据

2.1 实验区

选取黑龙江孟家岗林场（图1（a）和（b））、辽宁抚顺林区（图1（c））为实验区。其中：孟家岗林场由低山丘陵及缓坡组成，东北高，西南低，以次生落叶阔叶混交林和人工针叶林为主；抚顺林区位于抚顺东南部，由中低山区组成，以温带针阔叶混交林为主。

2.2 实验数据

本文选用过境实验区ICESat-2 ATL03数据为实验数据，具体信息如表1所示。

2.3 精度验证数据

以ICESat-2 ATL03数据为研究对象，通过人工标注样本及无人机产品两种形式的数据评估算法精度。其中，人工标注样本见图2，无人机产品见图3。

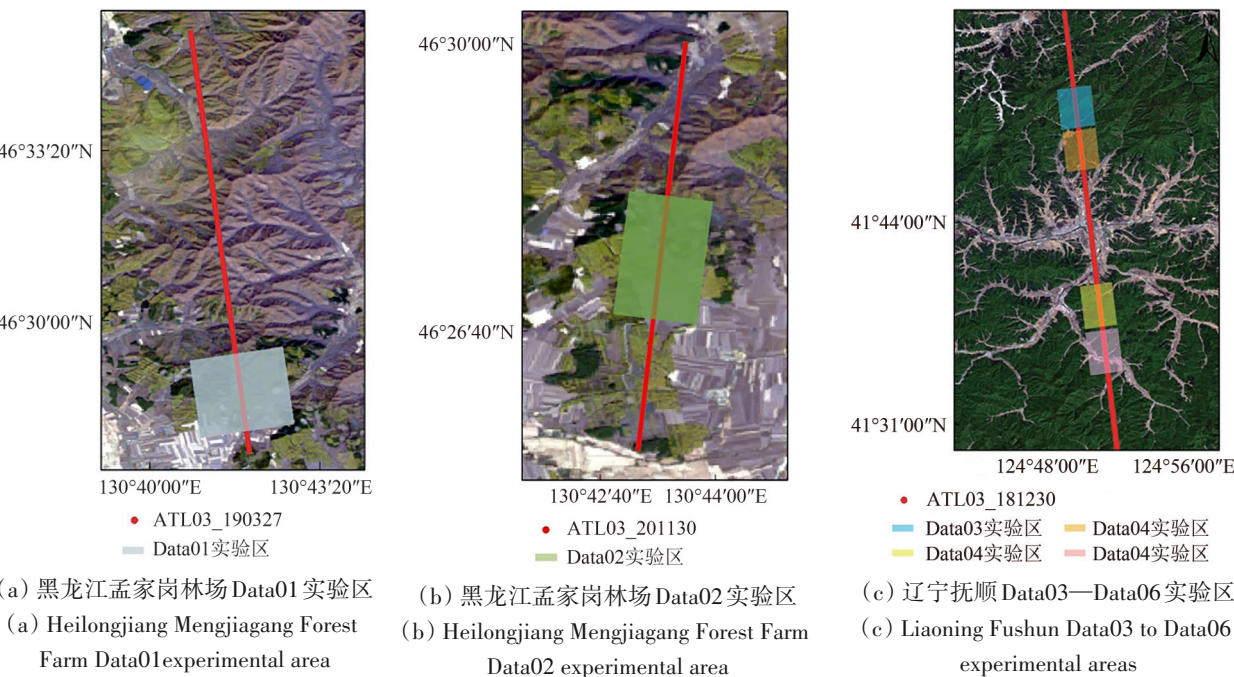


图1 实验区位置及概况
Fig. 1 Distribution of the experimental areas and experimental data

表1 新一代冰、云、陆地高程卫星 ATL03 数据
Table 1 Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 ATL03 data

实验区	ICESat-2 ATL03 数据	波束	数据集
孟家岗林场	ATL03_20190327224640_13670202_005_01	gt11	Data01
	ATL03_20201130054816_10240906_005_01	gt11	Data02
辽宁抚顺林区	ATL03_20181230032408_00260202_005_01	gt11	Data03
	ATL03_20181230032408_00260202_005_01	gt11	Data04
	ATL03_20181230032408_00260202_005_01	gt11	Data05
	ATL03_20181230032408_00260202_005_01	gt11	Data06

3 研究方法

传统 OPTICS 的搜索邻域为圆，因光子计数激光数据沿轨密度高于垂轨（Chen 等，2019；Nie 等，2018；Xie 等，2021），具有各向同性的圆并不能区分点云在不同方向分布的差异性。受地形影响，地面和植被信号通常沿地形方向连续分布，以自适应于地形方向的椭圆搜索域替代圆，更能区分信号与噪声。如图 4（a），当核心光子为地面信号时，自适应于地形方向的椭圆搜索域内光子密度明显高于圆及水平椭圆；反之，当核心光子为近地面噪声时，如图 4（b），自适应于地形方向的椭圆搜索域内光子密度明显低于其他搜索域。故自适应地形方向的椭圆搜索域更能区分复杂地形近地面处信号与噪声。另外，因去地形影响后的植被信号在垂轨方向分布更具连续性（Xie 等，

2021），以垂直椭圆替换圆，如图 4（c），当核心点为近冠层噪声时，垂直椭圆内光子密度明显低于其他搜索域，更易区分近冠层噪声与信号。

综上，本文提出了一种基于方向自适应的 OPTICS（DA-OPTICS）山地林区地表及冠层表面检测方法，包括精细地表检测、冠层表面检测两个部分，流程如图 5 所示。

首先利用随机抽样一致 RANSAC（Random Sample Consensus）分段曲线拟合初始地表，修改传统 OPTICS 搜索圆为方向自适应于初始地表的椭圆，计算可达距离 RD（Reachability Distance），引入大津法 OTSU（Nobuyuki Otsu method）获取潜在地面信号，拟合潜在地表，以信号提取与地表拟合迭代获取精细地表；随后，基于其消除地形影响，采用垂直椭圆的 OPTICS 提取植被信号并检测冠层表面。

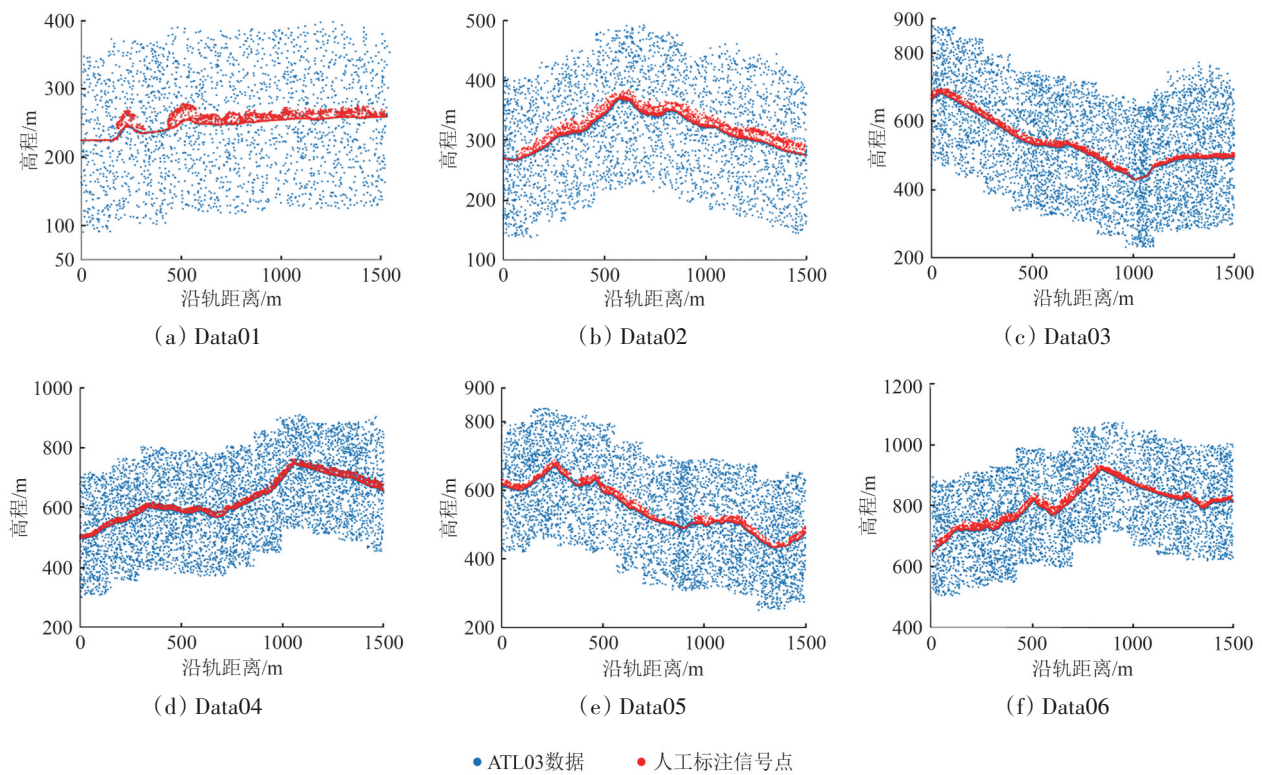


图2 不同实验区新一代冰、云、陆地高程卫星 ATL03 数据人工标注信号点

Fig. 2 Manually annotated signal photons from Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) ATL03 data across different experimental regions

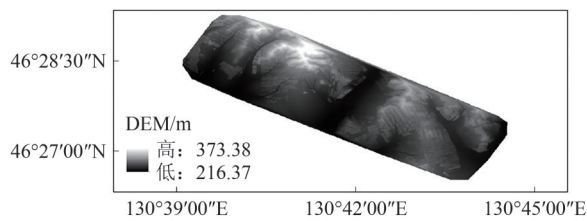


图3 黑龙江孟家岗林场无人机数据

Fig. 3 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data from Mengjiagang Forest Farm in Heilongjiang Province

3.1 精细地表检测

3.1.1 基于RANSAC分段曲线拟合的初始地表获取

(1) 将点云数据基于沿轨距离分割为若干 100 m 的子数据集，随机选取 3 个点拟合生成曲线模型：

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

式中， a 、 b 、 c 为模型参数。

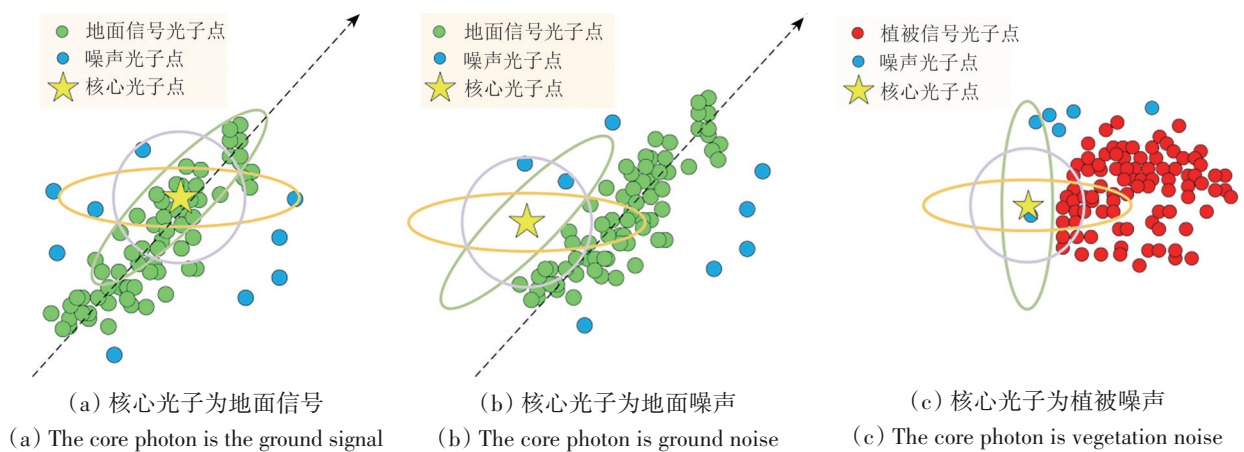


图4 不同邻域对核心光子密度统计的影响

Fig. 4 The influence of different neighborhoods on the statistics of core photon density

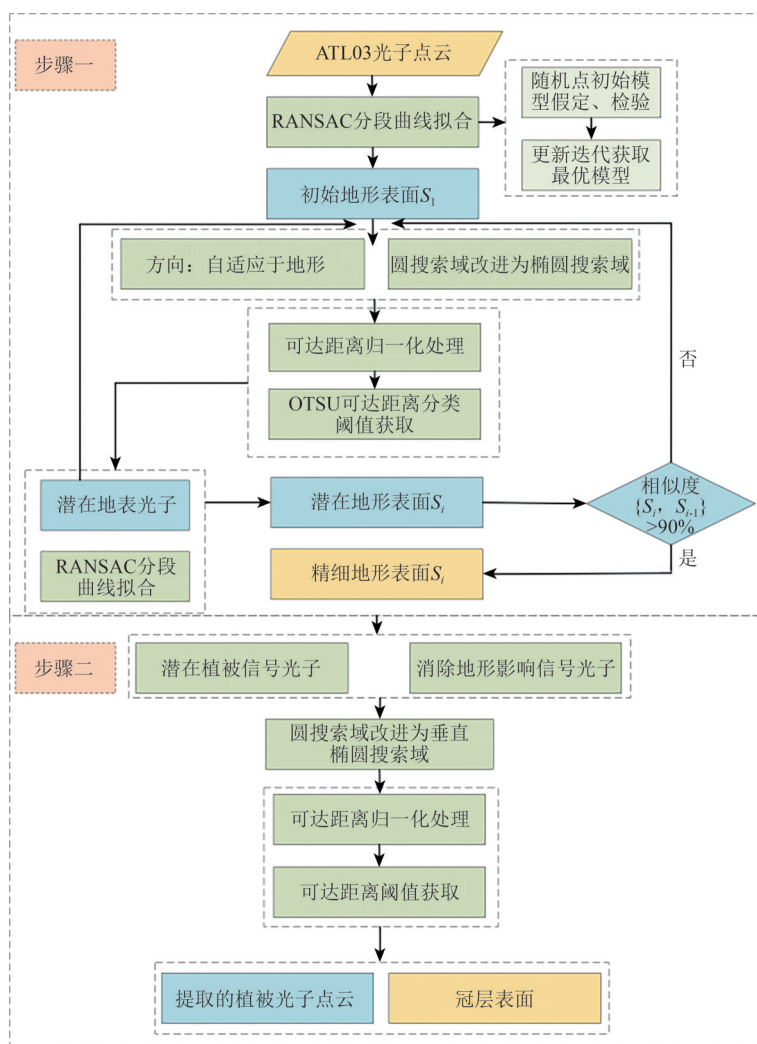
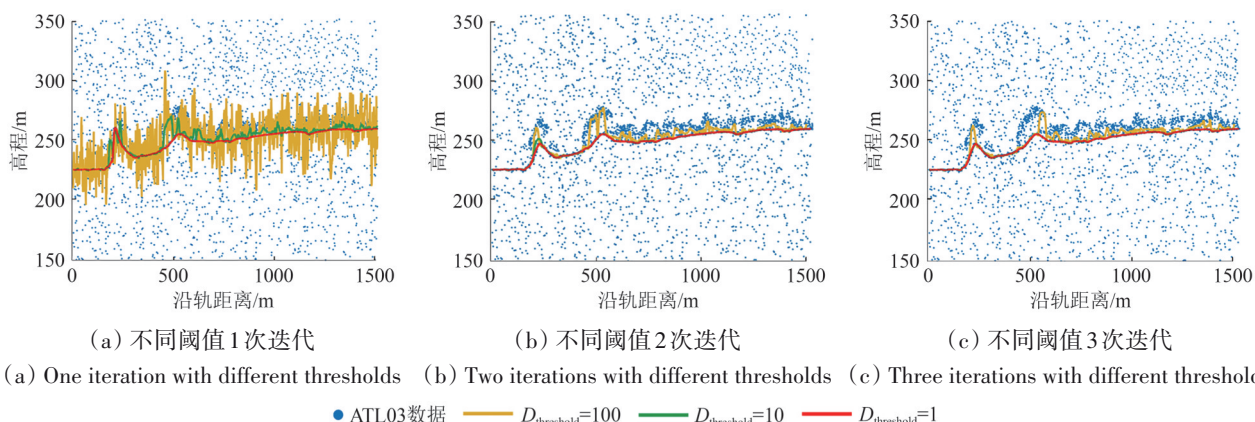


图5 DA-OPTICS 流程图

Fig. 5 Flowchart of DA-OPTICS

(2) 根据式 (1), 计算各点的距离 D_i , 因初始地表仅提供粗略方向, 后续通过迭代不断精化地表, 所以将 $D_{\text{threshold}}$ 初值粗略地设置为 3 个数量

级, 即 $D_{\text{threshold}}=1, 10, 100$, 如图 6, 若 $D_i < D_{\text{threshold}}$, 则为内点, 否则为外点; 遍历记录内点数。

图6 不同 $D_{\text{threshold}}$ 1、2 和 3 次迭代对地表检测结果的影响Fig. 6 Impact of different $D_{\text{threshold}}$ iterations (1st, 2nd, and 3rd) on surface detection results

(3) 重复 (1)、(2), 将内点最多时的模型视为最优模型, 基于 Savitzky-Golay 滤波, 得到初始地表 S_1 。

3.1.2 基于 DA-OPTICS 的地面点云信号获取

将 3.1.1 中获取的初始地表 S_1 作为初始方向, 基于 DA-OPTICS 获取潜在地面光子, 具体过程如下。

以图 7 (a) 所示 Data01 实验区 ATL03 数据为例, OPTICS 中, 核心距离 CD (Core Distance) 为使样本点成为核心点的最小半径, 如图 7 (b) 中 ε' , 任意两点的距离以欧氏距离衡量, 具体计算公式如下:

$$\text{Dist}(p, o) = \sqrt{(x_p - x_o)^2 + (y_p - y_o)^2} \quad (2)$$

式中, $o(x_o, y_o)$ 为核心点, $p(x_p, y_p)$ 为非核心点。若 $p(x_p, y_p)$ 恰好为满足 o 为核心点的最小点, 则:

$$\text{CD}(o) = \text{Dist}(p, o) \quad (3)$$

针对方向自适应的椭圆搜索域, 不同方向的点

到中心的距离随相对角度变化, 使 ε' 并不唯一, 即导致 CD 与 RD 均不能基于式 (2) 解算。如图 7 (c), $p(x_p, y_p)$ 为恰好使样本点成为核心点的最小点, CD 取 ε' , p_1, p_2 位于 ε' -邻域椭圆内, 若基于式 (2), $\varepsilon' = \text{Dist}(p, o)$, 针对点 p_1 , $\text{RD}(p_1, o)$ 取 ε' ; 针对 p_2 , 若直接将 $\text{Dist}(p_2, o)$ 与 ε' 比较, 会产生 $\text{RD}(p_2, o)$ 取 $\text{Dist}(p_2, o)$ 的误判。因此, 针对方向自适应的椭圆搜索域中不同对象 RD 的求解, 需将 Dist 与 CD 归一化处理。即考虑光子与椭圆搜索域、 ε' -邻域椭圆的几何关系, 如图 7 (d), 基于式 (4) 解算 $o(x_o, y_o)$ 与核心点 $p(x_p, y_p)$ 及非核心点间的距离, 得到 $\text{CD}(o)$ 、 ε' , 且 p_1, p_2 均在 ε' -邻域椭圆中, 即 $\text{RD}(p_1, o)$ 、 $\text{RD}(p_2, o)$ 均取 ε' 。归一化后, RD 的求解转化为光子与椭圆搜索域、 ε' -邻域椭圆几何关系的判断, 即同一 ε' -邻域椭圆上不同角度的光子视为等价点, 避免了因角度不同引起 RD 的误判。

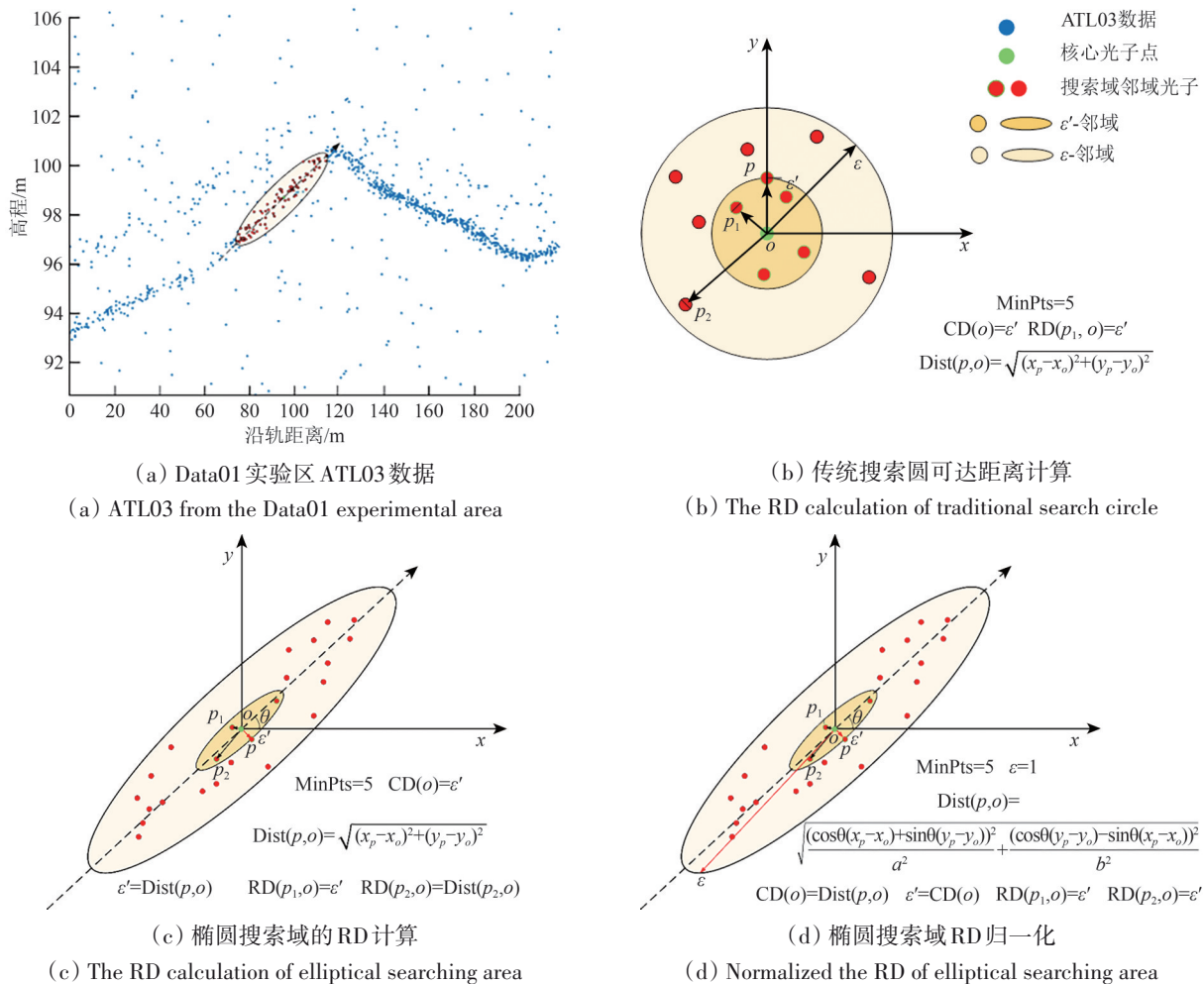


图 7 椭圆搜索域 RD 归一化处理原理图

Fig. 7 The principle diagram of RD normalization of elliptical searching area

$$\text{Dist}(p, o) = \sqrt{\frac{(\cos \theta (x_p - x_o) + \sin \theta (y_p - y_o))^2}{a^2} + \frac{(\cos \theta (y_p - y_o) - \sin \theta (x_p - x_o))^2}{b^2}} \quad (4)$$

$$\text{CD}(o) = \text{Dist}(p, o) \quad (5)$$

式中, x 为沿轨距离, y 为高程值, θ 为点 $p(x_p, y_p)$ 处对应的地形坡度, a, b 为椭圆搜索域的长半轴与短半轴, 且 $a=6, b=1$ (Zhu 等, 2021)。

3.1.3 迭代检测地表

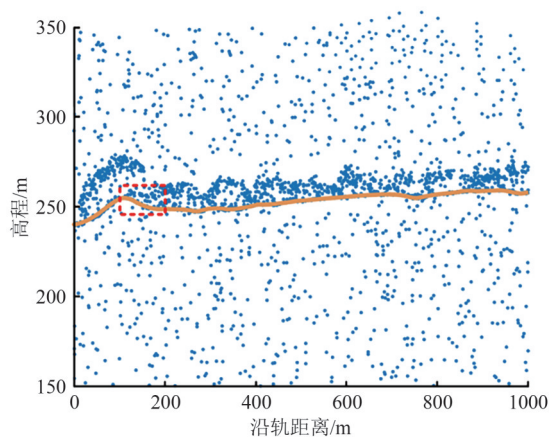
针对 3.1.2 中潜在地面光子, 再次通过 RANSAC 获取潜在地表 S_2 , 若 S_2 与 S_1 相似度 $>90\%$, 则 S_2 为精细地表; 否则, 更新椭圆搜索域的方向重复 3.1.1 和 3.1.2, 直至 S_i 与 S_{i-1} 相似度 $>90\%$, 则 S_i 为精细地表。如图 6 (a)–(c), 经多次迭代, $D_{\text{threshold}}$ 取 1 与 10 时获取地表相似度逐步增高, 当迭代次

数=3 时 (图 6 (b) 和 (c)), 二者均可检测到精细地表。基于对迭代次数、复杂地形等的综合考量, 将数据集 $D_{\text{threshold}}$ 的初值设置为 10, 首次迭代后将 $D_{\text{threshold}}$ 更新为 1, 直至获取精细地表。

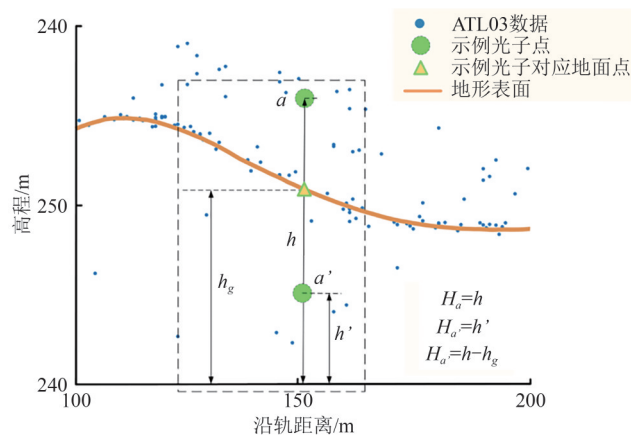
3.2 冠层表面检测

3.2.1 基于精细地表去地形影响

基于 3.1 中检测的 ATL03 精细地表, 视其以上的光子为潜在植被光子, 将相同沿轨距离处潜在植被光子高程与对应地面点的高程做差, 如图 8, 以点 a 为示例光子, a' 则为 a 去除地形影响后光子, 逐个处理, 去除地形影响。



(a) Data01 实验区 ATL03 数据
(a) ATL03 from the Data01 experimental area



(b) 图(a)的局部放大图
(b) A partial enlarged view of Fig. (a)

图 8 光子点云去地形影响原理图

Fig. 8 Schematic diagram of removing the effect of terrain on photon point clouds

3.2.2 植被信号获取及冠层表面检测

经去地形影响后的潜在植被光子在垂直方向聚合度较高, 故采用垂直椭圆的 OPTICS 获取植被信号。基于式 (4), 计算 RD, 借助 OTSU 阈值, 将大于阈值的光子标记为噪声, 否则标记为植被信号。

为获取完整冠层表面, 采用第 98 百分位高度值 (RH98) 辅以分段 3 次 Hermite 插值多项式 PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) 拟合, 检测冠层表面。

3.3 精度评估

为验证算法精度, 针对植被信号提取、地表

及冠层表面检测结果进行了定量、定性分析。其中, 定性评估通过目视解译完成; 定量分析通过引入基于混淆矩阵衍生出的召回率 (Recall, R)、准确率 (precision, P) 和 F1-Score (F) 3 个统计评价指标, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} R &= \frac{TP}{TP + FN} \\ P &= \frac{TP}{TP + FP} \\ F &= \frac{2PR}{P + R} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, TP (True Positive)、FP (False Negative)、TN (True Negative)、FN (False Positive) 为混淆矩阵解算的指标, 其中, TP、TN 代表本身为信号

或噪声且被正确识别的光子数量，FP代表本身为噪声但被误判的光子数量，FN代表本身为信号但被漏判的光子数量。将4个指标组合，得到更能衡量算法性能的 R 、 P 、 F 。

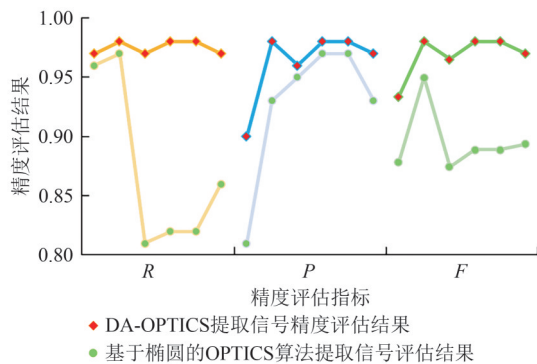


图9 Data01—Data06 DA-OPTICS与基于椭圆的OPTICS提取信号精度对比

Fig. 9 Comparison of the signal extraction accuracy between the proposed and the OPTICS based on elliptical searching area

另外，利用无人机数字地形模型DTM (Digital Terrain Model) 和数字表面模型DSM (Digital Surface Mode)，引入决定系数 R^2 (Coefficient of Determination)，平均误差 (Bias)、均方根误差RMSE (Root Mean Square Error) 评估精的计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (9)$$

式中， x_i 、 y_i 分别为第*i*个冠层/地形表面估计值及参考值， $\bar{x}$ 是估计值的平均值， n 是样本数。

4 实验流程与结果分析

4.1 实验流程

以过境黑龙江孟家岗林场、辽宁抚顺林区的Data01—Data06为研究对象，通过本文提出的DA-OPTICS检测地表及冠层表面，并引入基于椭圆的OPTICS算法、ATL08对比，基于标注样本及无人机产品评估精度。

4.2 结果及分析

4.2.1 实验结果

因DA-OPTICS提取的植被信号是基于精细地表及以上的光子进行，避免了地表以下噪声影响，但对比算法直接处理原始数据，存在对近地面及地表以下噪声的误判。为确保不同算法间对比的一致性，本研究仅评估对比算法中地表及以上的信号，结果如表2、图9所示。

表2 DA-OPTICS与基于椭圆的OPTICS信号提取精度对比
Table 2 Comparison of signal extraction accuracy between DA-OPTICS and OPTICS based on elliptical searching area

数据集	DA-OPTICS 信号提取结果			基于椭圆的OPTICS算法信号提取结果		
	R	P	F	R	P	F
Data01	0.97	0.90	0.93	0.96	0.81	0.88
Data02	0.98	0.98	0.98	0.97	0.93	0.95
Data03	0.97	0.96	0.96	0.81	0.95	0.87
Data04	0.98	0.98	0.98	0.82	0.97	0.89
Data05	0.98	0.98	0.98	0.82	0.97	0.89
Data06	0.97	0.97	0.97	0.86	0.93	0.89

由表2、图9可见：针对所有指标，DA-OPTICS提取信号精度均超过0.90，整体优于对比算法，且稳定性较高。然而，在Data01上，指标 P 和 F 明显偏低，其主要原因是当信号分布呈现冠层顶部集中、内部稀疏时，稀疏信号易被漏判，导致 P 、 F 指标下降。针对所有数据集，DA-OPTICS提取信号的平均 F 值达0.97，相较于对比算法的平均 F 值 (0.90)，平均提高了约0.07，表明该方法更适用于山地林区的点云信号提取。

为进一步评估DA-OPTICS的可行性，基于 R^2 、Bias等指标评估其检测地表及冠层表面的精度，并与ATL08对比，如表3。相较于ATL08，无论是地表还是冠层表面，DA-OPTICS的 R^2 值均较高，可靠性更强；二者的Bias均为正值，即均存在被高估现象。另外，DA-OPTICS的RMSE明显优于ATL08，更能突出考虑地形的必要性。

4.2.2 分析与讨论

(1) 精细地表检测分析。以RANSAC拟合结合DA-OPTICS迭代修正检测精细地表，将初始与最终地表 (精细地表) 对比，结果见图10。针对地形起伏较大、植被信号分布集中在冠层顶部且

地表信号较稀疏的情况，如图 10 (a)，初始地形表面会出现欠拟合现象，与实际存在偏差，故对其迭代修正是必要的；当初始与精细地表偏差较小时，如图 10 (b)，较少次数的迭代即可检测到精细地表。总体来说，本文方法综合考虑了坡度、点云密度及光子分布的连续性，检测的地表更接近于真实地表，更适用于山地林区地表的快速获取。

(2) 信号提取分析。针对去地形影响后的光子，基于垂直椭圆的 OPTICS 结合 OTSU 提取植被信号，结果见图 11。由图 11 (a)–(f)，针对山地林区，DA-OPTICS 和基于椭圆的 OPTICS 算法均能有效提取信号，但相较于 DA-OPTICS：基于椭圆

的 OPTICS 算法因未参考精细地表，会产生对地表以下噪声的误判（图 11 (a)–(f)）；且其对近地面、冠顶光子敏感性较低，易产生误判或漏判（图 11 (b)）；另外，图 11 (d)–(f) 中存在部分信号缺失。故针对山地林区，DA-OPTICS 可更加有效提取地表及植被的信号点，适用性更强。

表3 DA-OPTICS检测地表及冠层表面与ATL08精度对比
Table 3 The accuracy comparison between DA-OPTICS and ATL08 in detecting surface and canopy surface

类别	DA-OPTICS 结果			ATL08 提取结果		
	R^2	Bias/m	RMSE/m	R^2	Bias/m	RMSE/m
地表	0.98	0.99	1.08	0.97	1.30	1.92
冠层表面	0.93	1.72	2.33	0.84	3.11	3.29

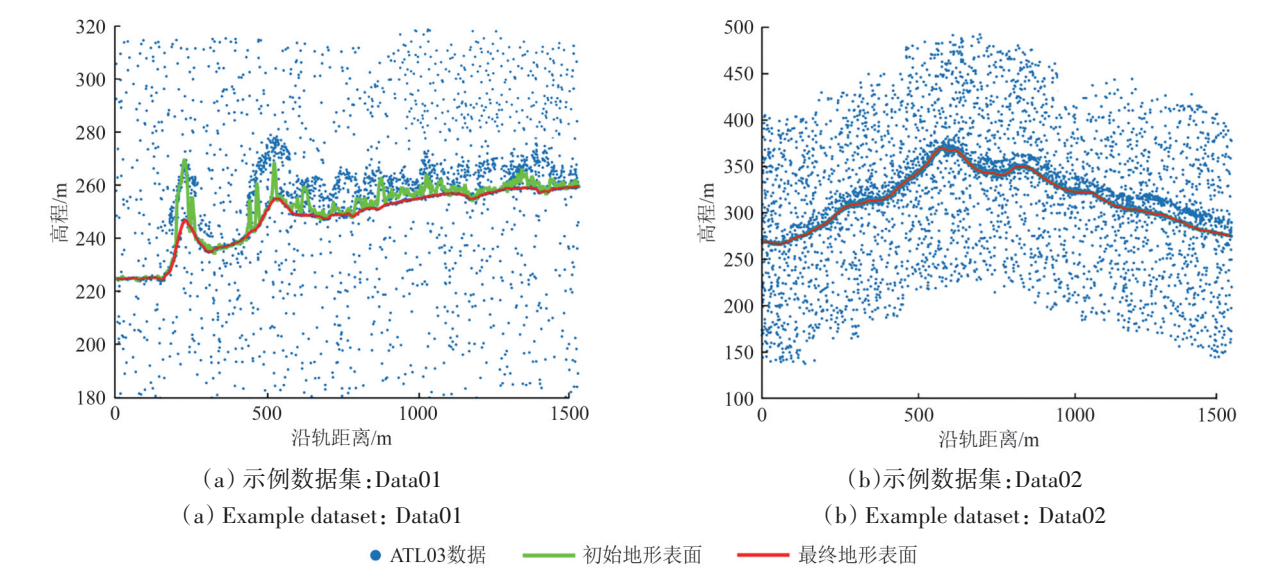
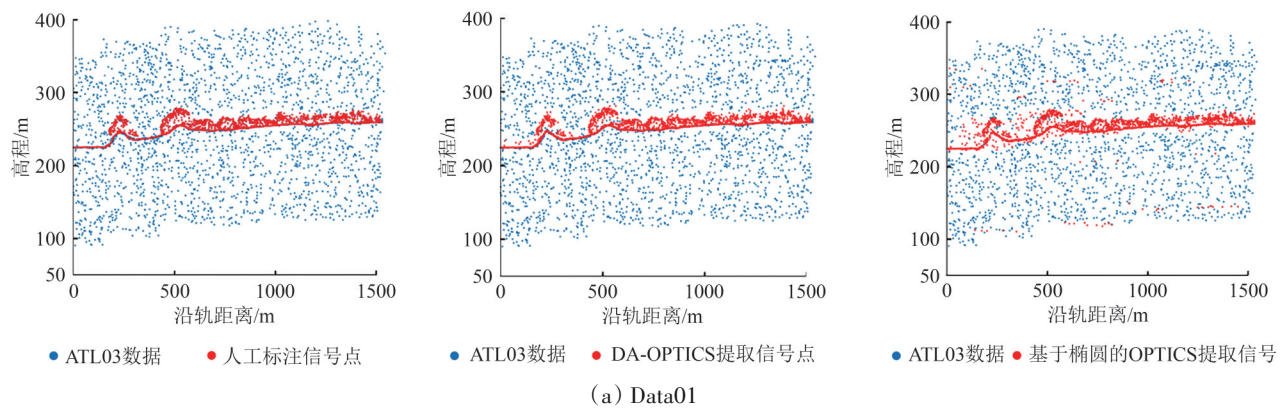


图 10 初始地形表面与迭代生成最终地形表面对比
Fig. 10 Comparison between the initial ground surface generated and the final ground surface generated by iteration



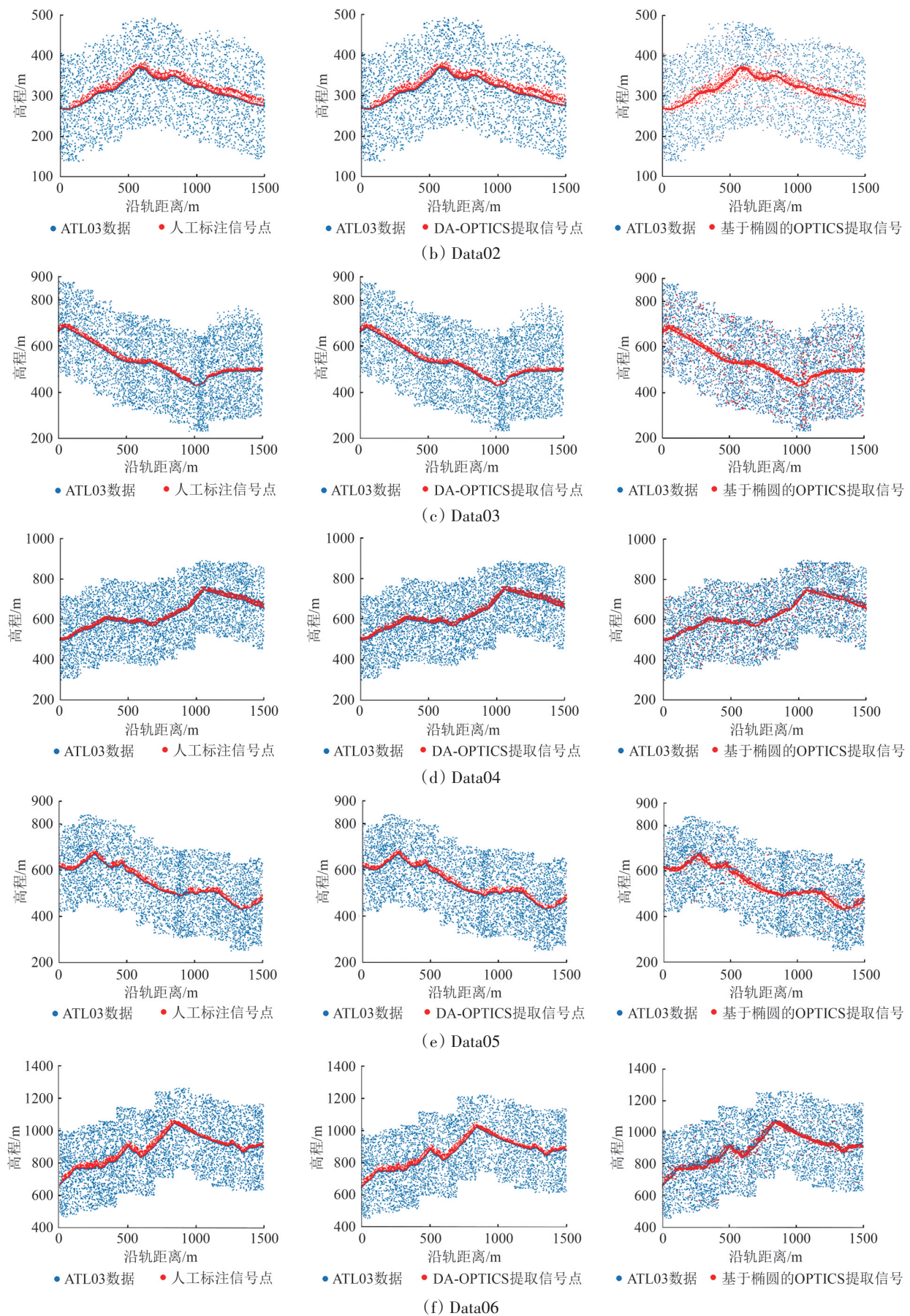


图 11 DA-OPTICS 与基于椭圆的 OPTICS 算法提取信号点的结果对比

Fig. 11 Comparison of signal extraction results between DA-OPTICS and the OPTICS based on elliptical searching area

以Data01实验区ATL03数据为例(图12(a)、图13(a)),将DA-OPTICS检测的精细地表对应的信号,即最后一次迭代被RANSAC标记为“内点”的信号,视为地表信号,将其与ATL08对比,如图12、图13,可明显看出,针对山地林区,DA-OPTICS对地面信号的漏判、误判均较低(图12(b)和(c)),原因为其充分考虑点云密度、地形坡度及地表连续性,采用方向自适应的OPTICS并引入迭代修正,可有效提取复杂地形处

的地面信号。此外,DA-OPTICS在去地形影响基础上,基于垂直椭圆的OPTICS提取冠层信号,提升了识别精度。另外,如图13(a)和(b),在地势起伏较大的区域,ATL08会对地面、冠层信号产生较大的漏判,原因可能为差分、回归和高斯自适应最近邻DRAGANN(Differential, Regressive, and Gaussian Adaptive Nearest Neighbor)并未考虑地形影响,使其在地形变化较大时可信度较低。因此,相较于ATL08,DA-OPTICS更适用于地形复杂林区。

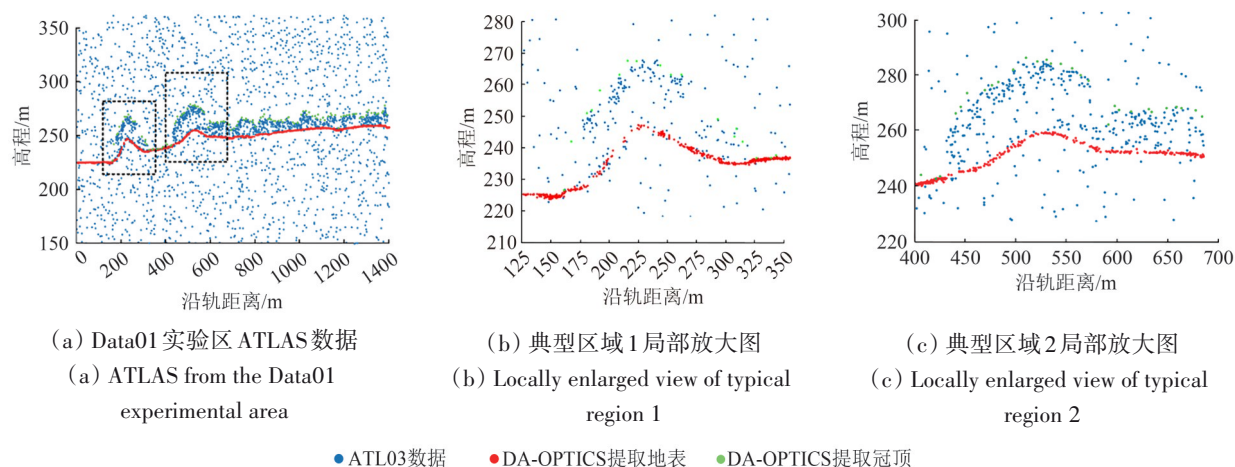


图12 DA-OPTICS提取地表与冠层表面信号

Fig. 12 DA-OPTICS extracts ground and canopy surface signal

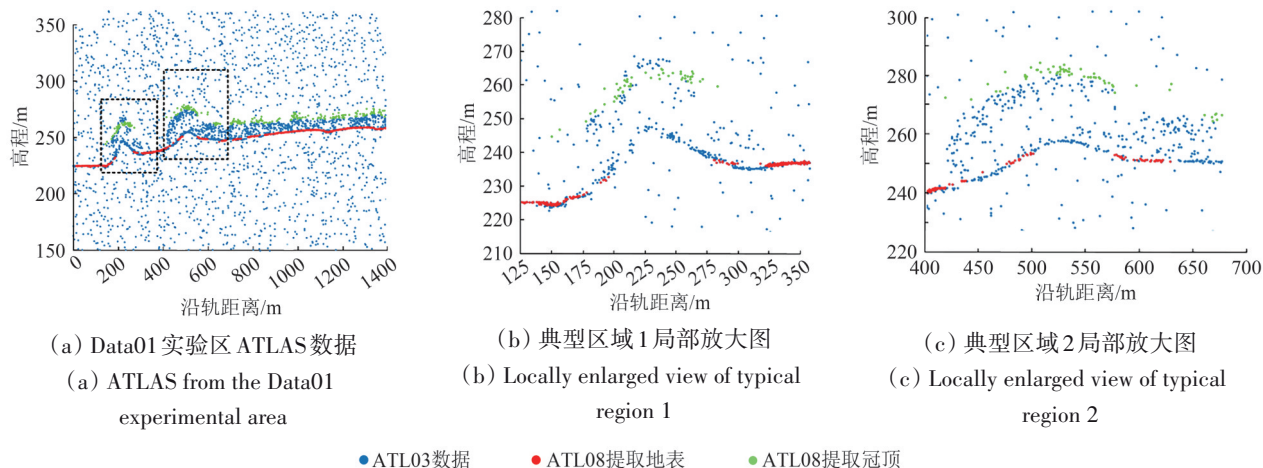


图13 ATL08数据地表与冠层表面信号结果

Fig. 13 ATL08 data ground and canopy surface signal results

(3) 地表及冠层表面检测分析。针对DA-OPTICS获取的地表及冠层表面信号,基于PCHIP获取完整的冠层表面,如图14。另外,将DA-OPTICS、ATL08结果与无人机数据对比分析,如图15。

如图15,DA-OPTICS与ATL08均能有效检测

地表,且前者与DTM一致性较强。因ATL08对地形起伏较大处信号的漏判,导致提取的地表明显低于真实地表。另外,图15中同样对比了不同方法检测的冠层表面与DSM的一致性。整体来说,DA-OPTICS、ATL08检测的冠层表面与DSM整体趋势一致,但ATL08对信号较多的漏判致其检测

的冠层表面与真实表面存在一定的偏差, 易在山峰处被低估、森林间隙处被高估。较于 ATL08, DA-OPTICS 检测的冠层表面与 DSM 匹配度较高, 但仍存在山峰、山谷处易被高估的情况, 原因可能是地形变化较大处, 常规导数获取的坡度与真实坡度存在偏差, 导致冠层表面被高估; 另外, 在去地形影响时, 光子在坡度变化较大时易发生局部扩散或重叠, 致其对冠顶噪声的误判, 导致冠层表面被高估。总体来看, 针对山地林区, 相较于 ATL08, DA-OPTICS 能有效地检测地表及冠层表面, 适用性较强。

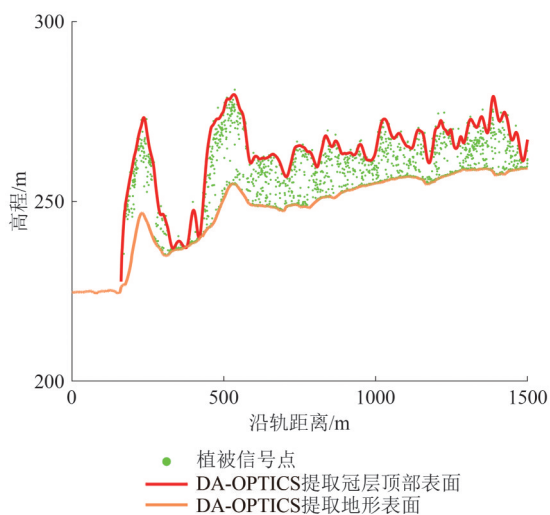


图 14 信号提取、地表及冠层表面检测结果

Fig. 14 Signal extraction, ground and canopy surface detection results

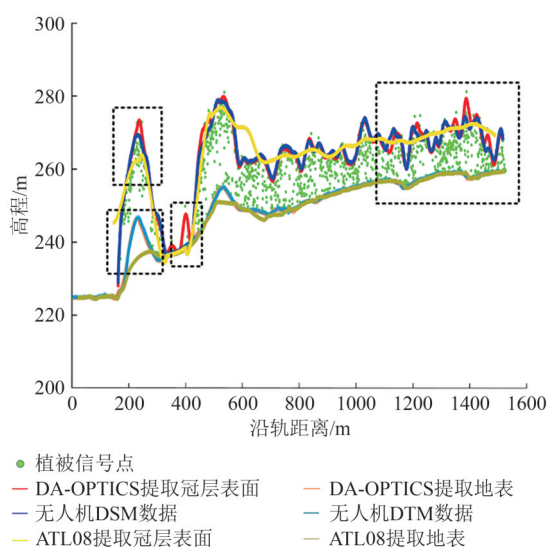


图 15 无人机产品验证不同算法结果

Fig. 15 UAV product-based validation of different algorithms

5 结 论

为提高山地林区 ICESat-2/ATLAS 点云信号提取、地表及冠层表面检测精度, 本文提出了一种基于方向自适应的 OPTICS (DA-OPTICS) 山地林区地表及冠层表面检测方法, 以黑龙江孟家岗林场、辽宁抚顺部分林区为实验区, 过境 ICESat-2/ATLAS 为实验对象开展实验, 通过标注样本及无人机产品验证了算法的有效性及可靠性。主要结论如下:

(1) DA-OPTICS 对山地林区地表较敏感, 较少次数迭代修正即可获取精细地表;

(2) DA-OPTICS 可充分发挥精细地表对植被信号提取的参考价值, 实现植被信号的高精度快速提取, 有助于改善冠层高度被低估的现象;

(3) 针对信号提取, DA-OPTICS 基于不同数据集 F 值均优于 0.93, 均值达到 0.97, 相较于基于椭圆的 OPTICS 算法的 0.90, F 平均值提高了约 0.07, 优势明显, 更适用于山地林区的信号提取;

(4) 针对地表及冠层表面检测, 无人机 DTM、DSM 产品评估 DA-OPTICS 的 RMSE 分别为 1.08 m 和 2.33 m, 优于 ATL08 的 1.92 m 和 3.29 m, 为后续森林空间结构的反演, DTM、DSM 等数据产品的生成提供了可靠的数据基础。

总的来说, 本文提出的 DA-OPTICS 更适用于山地林区的地表及冠层表面检测, 但林区密集、林下点云光子稀疏等因素仍会造成较大的地表检测误差, 导致点云信号提取及冠层表面检测效果不佳。因此, 如何提高大范围密集林区地表及冠层表面检测精度, 为大范围、高精度 DTM、DSM 产品生成提供数据基础, 仍具挑战, 是本文算法后续研究中的重点。

志 谢 本文所用无人机产品由中国林业科学研究院提供, 在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Awadallah M, Ghannam S, Abbott L and Ghanem A M. 2013. Active contour models for extracting ground and forest canopy curves from discrete laser altimeter data//13th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems. Beijing: 129-136

- Chen B W and Pang Y. 2015. A denoising approach for detection of canopy and ground from ICESat-2's airborne simulator data in Maryland, USA//Proceedings Volume 9671, AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications. Beijing: SPIE: 383-387 [DOI: 10.1117/12.2202777]
- Chen B W, Pang Y, Li Z Y, Lu H, Liu L X, North P R J and Rosette J A B. 2019. Ground and top of canopy extraction from photon-counting LiDAR data using local outlier factor with ellipse searching area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(9): 1447-1451 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2899011]
- Gwenzi D, Lefsky M A, Suchdeo V P and Harding D J. 2016. Prospects of the ICESat-2 laser altimetry mission for savanna ecosystem structural studies based on airborne simulation data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 118: 68-82 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.04.009]
- Herzfeld U C, McDonald B W, Wallin B F, Neumann T A, Markus T, Brenner A and Field C. 2014. Algorithm for detection of ground and canopy cover in micropulse photon-counting lidar altimeter data in preparation for the ICESat-2 mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4): 2109-2125 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2258350]
- Huang X, Cheng F, Wang J L, Duan P and Wang J S. 2023. Forest canopy height extraction method based on ICESat-2/ATLAS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5700814 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3240848]
- Li Y, Fu H Q, Zhu J J and Wang C C. 2021. A filtering method for ICESat-2 photon point cloud data based on relative neighboring relationship and local weighted distance statistics. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(11): 1891-1895 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3011215]
- Li Z Y, Liu Q W and Pang Y. 2016. Review on forest parameters inversion using LiDAR. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1138-1150 (李增元, 刘清旺, 庞勇. 2016. 激光雷达森林参数反演研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1138-1150) [DOI: 10.11834/jrs.20165130]
- Magruder L A, Wharton M E III, Stout K D and Neuenschwander A L. 2012. Noise filtering techniques for photon-counting lidar data//Proceedings Volume 8379, Laser Radar Technology and Applications XVII. Baltimore: SPIE: 237-245 [DOI: 10.1117/12.919139]
- Moussavi M S, Abdalati W, Scambos T and Neuenschwander A. 2014. Applicability of an automatic surface detection approach to micropulse photon-counting LiDAR altimetry data: implications for canopy height retrieval from future ICESat-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 35(13): 5263-5279 [DOI: 10.1080/01431161.2014.939780]
- Nie S, Wang C, Xi X H, Luo S Z, Li G Y, Tian J Y and Wang H T. 2018. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data. *Optics Express*, 26(10): A520-A540 [DOI: 10.1364/OE.26.00A520]
- Pang Y, Li Z Y, Yu T, Liu Q W, Zhao L and Chen E X. 2022. Status and development of forest carbon storage remote sensing satellites. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 43(6): 1-15 (庞勇, 李增元, 余涛, 刘清旺, 赵磊, 陈尔学. 2022. 森林碳储量遥感卫星现状及趋势. *航天返回与遥感*, 43(6): 1-15) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2022.06.001]
- Popescu S C, Zhou T, Nelson R, Neuenschwander A, Sheridan R, Narine L and Walsh K M. 2018. Photon counting LiDAR: an adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 208: 154-170 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.019]
- Su Y J, Guo Q H, Xue B L, Hu T Y, Alvarez O, Tao S L and Fang J Y. 2016. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 173: 187-199 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.002]
- Wang Y. 2020. Signal Processing on Spaceborne Photon Counting Laser Point Cloud and its Applications in Vegetation Remote Sensing. Wuhan: Wuhan University (王玥. 2020. 星载光子计数激光点云信号处理及在植被遥感中的应用. 武汉: 武汉大学) [DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.000752]
- Wang Y, Li S, Tian X, Zhang Z Y and Zhang W H. 2020. An adaptive directional model for estimating vegetation canopy height using space-borne photon counting laser altimetry data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 39(3): 363-371 (王玥, 李松, 田昕, 张智宇, 张文豪. 2020. 方向自适应的星载光子计数激光测高植被冠层高度估算. *红外与毫米波学报*, 39(3): 363-371) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2020.03.015]
- Wang Y, Ni W J, Zhang Z Y, Liu J L, Yu H Y and Zhang D F. 2018. Retrieval of forest canopy heights by using large-footprint waveform data assisted by the LiDAR model over hillsides. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(3): 466-477 (汪垚, 倪文俭, 张志玉, 刘见礼, 于浩洋, 张大凤. 2018. 激光雷达回波模型辅助的坡地森林冠层高度反演. *遥感学报*, 22(3): 466-477) [DOI: 10.11834/jrs.20187152]
- Xia S B, Wang C, Xi X H, Luo S Z and Zeng H C. 2014. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 18(6): 1199-1207 (夏少波, 王成, 习晓环, 骆社周, 曾鸿程. 2014. ICESat-2 机载试验点云滤波及植被高度反演. *遥感学报*, 18(6): 1199-1207) [DOI: 10.11834/jrs.20144029]
- Xie F, Yang G, Shu R and Li M. 2017. An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 36(1): 107-113 (谢锋, 杨贵, 舒嵘, 李铭. 2017. 方向自适应的光子计数激光雷达滤波方法. *红外与毫米波学报*, 36(1): 107-113) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2017.01.019]
- Xie H, Xu Q, Ye D, Jia J H, Sun Y, Huang P Q, Li M, Liu S J, Xie F, Hao X L and Tong X H. 2021. A comparison and review of surface detection methods using MBL, MABEL, and ICESat-2 photon-counting laser altimetry data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 7604-7623 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3094195]
- Zhang J S and Kerekes J. 2015. An adaptive density-based model for extracting surface returns from photon-counting laser altimeter data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(4): 726-730

[DOI: 10.1109/LGRS.2014.2360367]
 Zhu X X. 2021. Forest Height Retrieval of China with a Resolution of 30 m Using ICESat-2 and GEDI Data. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences) (朱笑笑. 2021. 基于ICESat-2和GEDI数据的中国30米分辨率森林高度反演研究. 北京: 中

国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院)) [DOI: 10.44231/d.cnki.gktxc.2021.000011]

Zhu X X, Nie S, Wang C, Xi X H, Wang J S, Li D and Zhou H Y. 2021. A noise removal algorithm based on OPTICS for photon-counting LiDAR data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 18(8): 1471-1475 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3003191]

Ground and canopy surface detection method based on direction-adaptive OPTICS in mountainous forest areas

XIE Junfeng¹, YANG Xiaomeng^{1,2}, XU Chaopeng^{1,2}, LU Yilin³, ZHANG Libin⁴, MO Fan¹, LYU Xin¹, LIU Ren⁵, ZENG Junze¹

1.Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

2.College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3.China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

4.Yunnan Remote Sensing Center, Kunming 650032, China;

5.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650050, China

Abstract: The successful launch of the Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2), carrying the Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS), has made it possible to accurately quantify global vegetation structure. However, given the limitations of the sensitive photon detection system, its data contain a large amount of background noise photons. Aiming at the problem that ICESat-2/ATLAS has low signal extraction accuracy in mountainous forest areas, which leads to the difficulty of ground and canopy surface detection, the method of ground and canopy surface detection based on direction-adaptive ordering points to identify the clustering structure (DA-OPTICS) is proposed.

First, the initial ground surface is obtained through segmented curve fitting based on random sample consensus (RANSAC), which is used to construct a direction-adaptive elliptical searching area to replace the traditional circle in OPTICS, forming the DA-OPTICS. On the basis of this algorithm, the reachability distance of all photon point clouds is obtained. Potential ground signals and surface are obtained successively via a “two-step method”: Otsu’s method is first introduced to obtain potential ground signals, and potential ground surface is then acquired by fitting potential ground signals through RANSAC. The “two-step method” is iterated several times until the similarity between the potential ground surface obtained before and after is greater than 90%, indicating that the potential ground surface is considered a fine ground surface. Second, the effect of terrain on photons is eliminated by referring to the fine ground surface, and the vegetation signal is extracted by vertical elliptical OPTICS. Finally, on the basis of the vegetation signal, the canopy surface is detected by combining the elevation percentile and piecewise cubic Hermite interpolation curve fitting.

The ICESat-2 ATL03 data of Mengjiagang Forest Farm in Heilongjiang Province and Fushun Forest Farm in Liaoning Province are used as research objects to carry out experiments, and the accuracy is verified by manually labeled samples and unmanned aerial vehicle products. Results show that the extraction accuracy (F) of ground surface and vegetation signals in the mountainous forest areas is 0.97, which is about 0.07 higher than that of the OPTICS based on elliptical searching area. In addition, the RMSEs of ground and canopy surfaces detected by the proposed method are 1.08 m and 2.33 m, respectively, compared with 1.92 m and 3.29 m of ATL08, respectively, implying a significant improvement in accuracy.

Therefore, compared with the OPTICS based on elliptical searching area and ATL08, DA-OPTICS has higher precision in extracting vegetation signal photons and detecting ground and canopy surfaces. It is more suitable for areas with large gradient changes such as mountainous forest areas and can provide a reliable data foundation for the subsequent inversion of forest spatial structure.

Key words: ICESat-2/ATLAS, direction adaptive, DA-OPTICS, iterative refinement, terrain slope, mountain forest area

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2020YFE0200800)