

# 方向自适应的星载光子计数激光测高植被冠层高度估算

王玥, 李松, 田昕, 张智宇, 张文豪

(武汉大学电子信息学院, 激光遥感与光电检测实验室, 湖北武汉 430072)

**摘要:**星载光子计数激光测高系统具有较高的沿轨距离分辨率,能够探测得到植被冠层和地表的连续高程信息。然而星载植被点云的低点云密度和低信噪比,对植被相对冠层高度的估算方法提出了新的要求。本文提出了一种方向自适应的星载光子计数激光测高植被点云冠高估算方法。首先通过寻找点云高程统计直方图中代表冠层和地面位置的极值进行粗去噪,大致得到信号高程所在的范围,并估算出冠层,地面和噪声点云的平均密度以及地表坡度。随后对粗去噪后的点云进行方向自适应的密度聚类精去噪,其邻域的方向为地表坡度,与密度有关的阈值均根据估算出的点云密度自适应的做出调整。在滤波后,结合点云的密度和高程百分比分别找出地面与树冠顶端的初始点,并通过三角网方法(TIN)扩展初始点以进行分类,最终确定地表与树冠顶端的高程。采用ATLAS星载激光测高仪的植被点云对算法进行了验证,结果表明算法能够正确估算植被冠高,十分适用于坡度较大和叶面积指数较低的地区,其中冠顶与地面的高程和机载LIDAR数据高程的决定系数 $R^2$ 分别为0.99与0.77,均方根误差RMSE为0.28 m与2.6 m。

**关键词:**星载光子计数激光测高; 植被点云滤波; 密度聚类; 冠层高度估计  
中图分类号: TP79, TN958.98 文献标识码: A

## An adaptive directional model for estimating vegetation canopy height using space-borne photon counting laser altimetry data

WANG Yue, LI Song, TIAN Xin, ZHANG Zhi-Yu, ZHANG Wen-Hao  
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The space-borne photon counting laser altimetry can detect continuous elevations of vegetation canopy and earth surface for its high along-orbit resolution. However, the relatively low point cloud density and low signal-to-noise ratio (SNR) of space-borne vegetation point clouds put forward new requirements for estimating vegetation canopy heights. In this paper, an adaptive directional model for estimating vegetation canopy heights using space-borne vegetation point clouds was proposed to meet the new requirements. Firstly, the range of signal elevation was roughly obtained by searching two extremums that represent the crown and ground in the statistical histogram of point cloud elevation. The land slope and average densities of crown, ground and noise were estimated as well. Then, the roughly denoised point clouds were further fine denoised by adaptive directional density-based clustering where the direction of neighborhood is along the land surface, and the thresholds related to density are adjusted adaptively according to the estimated point cloud densities. After filtering, the elevations of ground and canopy were estimated respectively by applying triangular irregular networks (TIN) where the initial points of ground and canopy in TIN were found by the densities and elevation percentage of point clouds. Vegetation point clouds of ATLAS space-borne laser altimeter are used to validate the filtering method. The experimental results show that the adaptive directional model can correctly estimate vegetation canopy heights and is fit for areas with large slope and low leaf area in-

dex. The determination coefficients  $R^2$  of canopy and ground elevation between processed ATLAS data and airborne LIDAR data are 0.99 and 0.77 respectively, and RMSE are 0.28 M and 2.6 m.

**Key words:** space-borne photon counting laser altimetry, vegetation point clouds denosing, density-based clustering, canopy height estimation

**PACS:**07.07.Df, 42.62.-b, 85.30.-z, 85.60.Gz

## 引言

线性体制的星载激光测高仪能够在全局范围内快速的测量森林植被的地表高程和垂直结构,已在森林植被的调查中被广泛的使用<sup>[1-3]</sup>。光子计数激光测高仪的灵敏度比线性测高仪高出两到三个数量级,能够进行微脉冲、高重频的探测,可以探测到更为详细的植被冠层和冠层下方地表的连续高程信息,为森林植被的状况和动态变化监测提供了便利。目前,唯一已正式开始运转的星载激光测高仪,是美国 NASA 在 2018 年 9 月 15 日发射的 ICE-Sat2(The ice, cloud, and land elevation satellite-2) 极地探测卫星<sup>[4-6]</sup>上搭载的 ATLAS(the Advanced Topographic Laser Altimeter System)星载激光测高仪。

在 2018 年 9 月升空后,ATLAS 系统将以 10 kHz 的脉冲频率,0.7 m 的沿轨距离精度,160  $\mu$ J 或 40  $\mu$ J 的强/弱微脉冲能量,进行至少为期三年的全球高程探测<sup>[7]</sup>。ATLAS 获取的数据经过 NASA 官方的处理,一共分为 3 级,21 类,囊括了从原始点云,到校正后点云直至冰盖等具体目标的处理后信息。其中 ALT03 数据是经过校正后的点云数据,表示为具有地理位置信息与高程信息的单光子事件的集合。ATL08 数据是对 ATL03 点云进行反演后得到的地面高程和植被冠层高度的集合。

植被冠层高度估计的前提,是拥有滤波后的精确信号点云<sup>[8]</sup>。迄今为止,绝大部分现有的单光子点云滤波方法的基本依据均为,信号点的密度大于噪声点的密度,且信号在水平方向是连续的。在覆盖有植被的地区,一次激光脉冲的探测中,可能探测到数个不同高程和密度的点,使得滤波中与密度有关的阈值难以界定。如森林等自然景观的地面坡度一般变化较大,当坡度较大时,继续以水平方向考虑信号点的连续性会导致信号点密度的降低。此外,由于植被在常用的激光雷达波段的反射率较低,而星载光子计数激光测高仪发射的激光脉冲能量又较小,因此植被信号点云的密度较低,易受噪声的干扰。

目前,为了对植被的单光子点云进行滤波,

Moussavi 提出了样条逼近算法<sup>[9]</sup>,通过拟合地面和冠层轮廓的曲线,剔除了轮廓外的噪声点,不过算法只适用于有连续冠层的高郁闭度森林。聂胜提出了均匀化的密度聚类法<sup>[10]</sup>,在机载探测的高密度点云<sup>[11-12]</sup>中,点云密度的均匀化能有效防止大气或其他遮挡物导致的地表点云不均匀的问题。但是在星载探测中点云密度较低的情况下,均匀化可能会导致反射率更高的裸露地表被延长。Herzfeld 首先用极值分析法粗去噪,初步得到信号所在的大致高程范围,然后用径向基函数密度法精去噪<sup>[13]</sup>。粗去噪可以排除后续算法中的孤立噪声点。径向基函数是改变了邻域距离比重的密度算法,相较于圆形的邻域有一定的改进。另外,谢锋提出了方向自适应的滤波核算法<sup>[14]</sup>,虽然该算法并不针对植被点云,但是修正了坡度对点云密度的影响,有一定借鉴意义。NASA 官方的 ATL08 数据使用的算法为 DRAGANN (Differential, Regressive, and Gaussian Adaptive Nearest Neighbor) 算法<sup>[15-16]</sup>,算法找出点密度-点个数统计直方图中两个峰值,在设定位于信号与噪声峰值之间的阈值后,便可剔除掉噪声点。DRAGANN 算法将全部点云视作一个整体,在大规模数据的计算上有着优势,但是会不可避免的忽视相邻点云的连续性变化。

在滤波后,还需要对信号点云进行基本的分类并确定地表高程和植被相对冠层高度作为进一步研究森林植被的参考条件。目前一般有将点云密度分布函数视作类高斯函数的叠加并找出高斯函数范围作为高程阈值<sup>[11,13,16]</sup>,用三角网方法对确定的地面与冠顶种子点进行扩展<sup>[10,17]</sup>,或直接按点云的高程百分比划分点云<sup>[18]</sup>等几种点云分类方法。其中,点云密度分布函数要求对大量的数据进行联合分析,难以兼顾点云的局部特性。三角网方法具有良好的分类效果,但是当点云的信噪比较低时,初始种子点的选择十分重要。高程百分比法的分类简单实用,只是一个固定的高程百分比难以在起伏的地形中找到所有的冠顶与地面点云。

针对上述问题,本文提出了一种星载光子计数激光测高植被点云的方向自适应冠层高度估算方

法。算法首先通过寻找点云高程统计直方图中代表冠层和地面的极值进行粗去噪,找出信号所在的大致区域,判别一个区域内是否存在植被,并粗略的估计出地面,冠层和噪声的平均点云密度以及地表的坡度。随后针对不同探测区域的点云密度、坡度和噪声频率,自适应的改变密度聚类算法的邻域形状、大小、方向和最小密度阈值,并利用密度聚类算法精去噪得到信号点。最终结合点云的密度和高程百分比找出初始地面与冠顶点,并通过三角网方法扩展初始地面与冠顶点以进行分类,确定地表与树冠的高程。在对星载光子计数激光测高的植被点云进行实验后发现,本文的算法能够正确的估算地面与树冠的高程,其结果与机载数据大体相同,其中地表与树冠顶端的高程和机载 LIDAR 数据的决定系数  $R^2$  分别为 0.99 与 0.77,均方根误差 RMSE 为 0.28 m 与 2.6 m。且方向自适应的冠层高度估算法特别适用与低叶面积指数,高坡度的地区。

## 1 植被点云的冠层高度估算方法

本文先通过极值搜索法粗去噪,然后采用方向自适应的密度聚类算法精去噪,最后用三角网方法分类点云。算法的整体流程如图 1 所示。

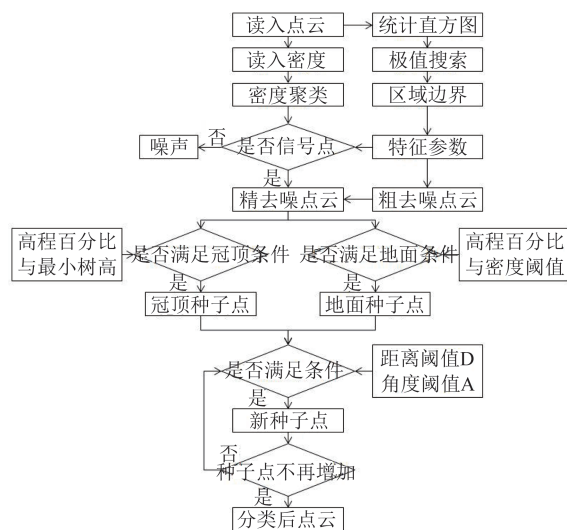


图 1 方向自适应的植被点云冠层高度估算方法

Fig. 1 Flow chart of adaptive directional vegetation canopy height estimation method

### 1.1 极值搜索法粗去噪

粗去噪可以大致寻找出信号点云所在的区域,剔除明显的噪声点,并初步得到地面,冠层与噪声点云的密度和地表坡度。点云的密度和地表坡度

可以进一步指导后续的点云滤波与分类过程。

在植被的单光子点云中,地面和树冠的点云密度必然高于周遭区域,因此在高程-离散点数目统计直方图中,地面和树冠高程片所含的点云数目是高于周围高程片的。如果某区域内覆盖有植被,则只需不断的改变高程片宽度,一定能找到合适的高程片宽度,使得树冠和地面的高程片是直方图中两个最大的极大值。最后在这两个高程片的周围,找出信号与噪声的分界处,即可得到高程的阈值。由于此算法不断对不同高程片宽度下的直方图的极值进行搜索,故称为极值搜索法。

具体方法如下:(1)统计点云数目。将选定的点云以固定的沿轨距离为间隔划分,对一个间隔内的点云按照高程等距离划分为  $M$  个高程片,统计每个高程片中的离散点数量,形成高程-离散点数量统计直方图,如图 2(a)所示。(2)剔除明显的噪声极值。找出直方图中数值最高的高程片  $H_{max}$ 。一般来讲,  $H_{max}$  在树冠和地面之间,而树高也难以超过 100 m,因此,认为  $H_{max}$  上下 100 m 外均为噪声,统计处于  $[H_{max}-100, H_{max}+100]$  之外的高程片内含有离散点数的均值  $N_n$ ,  $N_n$  即为噪声密度。然后找出直方图中所有大于  $N_n$  的极大值高程片,作为潜在的峰值所在位置的集合  $\Omega_1$ 。(3)令  $M=M/2$ ,再次执行步骤 1-2,找出新的极大值的集合,倘某个极大值同时出现新、旧极大值的集合中,则将其归入新的潜在峰值所在集合  $\Omega_2$ 。(4)重复步骤 3,直至潜在峰值集合的元素数只剩下两个,令其为  $P_1$  和  $P_2$ ,且  $P_1 < P_2$ 。在三种情况下,此地段被认为是没有植被存在的,包括:  $P_1$  和  $P_2$  相隔小于预设的最小树高(一般为 1.5 m)则会被认为均为地面;或  $P_1$  和  $P_2$  相隔太远,大于预设的当地最大植被高度,则会被认为有一个是噪声;或迭代过程始终无法找出两个峰值。否则,  $P_1$  和  $P_2$  就是统计直方图高程片中地面和树冠所在处。(5)找出高程片的上下限阈值。如果判定没有植被存在,则认为  $H_{max}$  为地面所在高程片,选取距  $H_{max}$  预计最大树高内的范围作为信号区域。如果判定有植被存在,则对步骤 1 中的  $M$  个高程片进行阈值为  $N_n$  的低通滤波,找出滤波后的高程片中,小于  $P_1$  和大于  $P_2$  且距离两个峰值最近的高程片,作为信号区域的边缘,如图 2(a)所示。粗去噪结果如图 2(c)所示,其中原始点云来自赞比亚热带灌木林地区的 ATL03 数据,在后文中会进行详细说明。

在粗去噪中,还需计算地面附近的点云密度  $N_g$



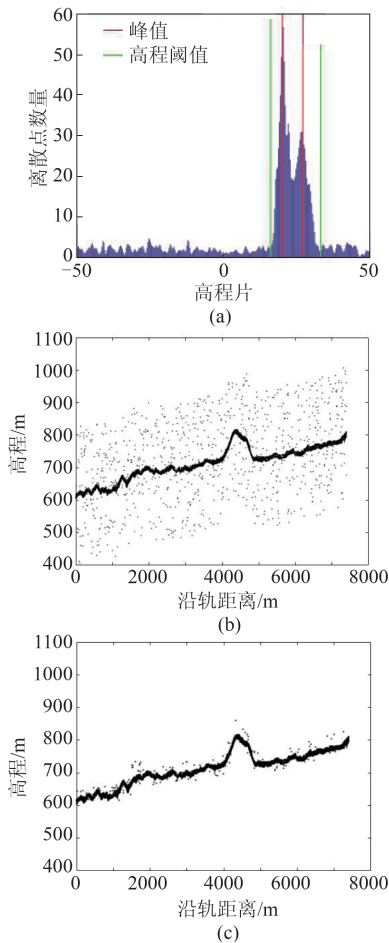


图2 粗去噪(a)极值搜索结果,(b)原始点云,(c)粗去噪后点云

Fig. 2 Rough denoising (a) extremum seeking results, (b) original point cloud, (c) denoised point cloud

(位于  $P_i \pm 1.5$  m 之间)与冠层的点云密度  $N_c$  (位于  $P_i + 1.5$  m 与高程上边缘之间),以及地表坡度(相邻  $P_i$  相减)作为后续滤波的指导参数。

### 1.2 方向自适应的密度聚类法滤波

粗去噪无法剔除地面与冠顶附近的噪声点,为此,本文提出了一种方向自适应的密度聚类算法进一步精去噪。密度聚类<sup>[19]</sup>(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)算法是一种典型的基于空间密度的聚类算法,其核心思想是将具有足够密度且密度相连的点划分为簇,从而实现聚类。该算法通过将簇包含的点定义为目标点,其它点定义为噪声点,从而来实现滤波。

DBSCAN算法需要输入邻域半径  $Eps$  和核心点阈值  $MinPts$  两个参数。邻域半径  $Eps$  表示以给定对象为中心,半径为  $Eps$  的圆所包含的区域,如图3所示。一个点的邻域内所包含的所有点数,称为该点

的密度,当某个点的密度大于核心阈值点  $MinPts$  时,该对象就被认为是目标点。

叶面积指数的变化会引起植被点云中树冠与地面点数量的变化。因此,对于叶面积指数较低,即冠层点云较稀疏的区域,邻域半径  $Eps$  需要扩大,以防止随机误差导致的误判,并增加冠层与地面点之间的关联性。在粗去噪中已经估算出了平均地面点密度  $N_g$ ,冠层点密度  $N_c$  与噪声点密度  $N_n$ ,则邻域半径  $Eps$  的取值为

$$Eps = 4 \cdot \sqrt{N_g/N_c} \quad (1)$$

核心阈值点  $MinPts$  的选择与噪声和信号点的密度有关。显然,  $MinPts$  应当介于邻域内噪声点个数与信号点个数之间。且信号与噪声密度的比值较大时(代表着信噪比高,探测环境较好),将噪声点误判为信号点的概率较小。此时,为了防止漏掉信号点,相对于信号点数,  $MinPts$  应当更靠近噪声点数,因此  $MinPts$  可表示为

$$MinPts = S \times \left[ N_i \frac{2}{4 + \log(N_i/N_n)} + N_n \frac{2 + \log(N_i/N_n)}{4 + \log(N_i/N_n)} \right] \quad (2)$$

式中  $S$  代表邻域的面积,  $N_i$  代表  $N_g$  与  $N_c$  中较小的值。

在通常的聚类算法中,邻域是一个圆,邻域半径在各个方向均相等。但是对于单光子植被点云,由于地面和树木冠层点云通常在沿地面坡度的方向是连续的,因此对象的邻域应该设定为一个沿地面坡度方向的椭圆,如图3所示。

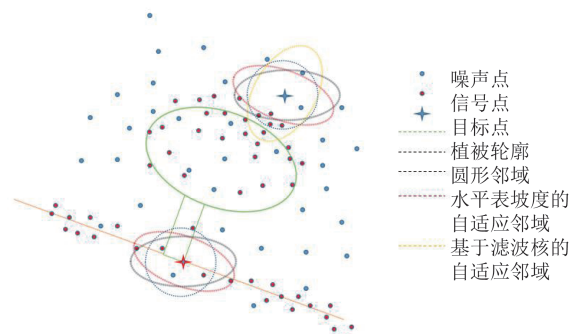


图3 方向自适应邻域

Fig. 3 Adaptive directional neighborhood

图3的模拟点云中,地表坡度为  $20^\circ$ ,在采用沿坡度方向的自适应邻域后,植被树冠下方属于地面反射回波的目标信号点的密度增加,高于采用圆形邻域和沿水平方向的椭圆邻域。而树冠上方的目标噪声点则相反,采用沿坡度方向的自适应邻域后



会使得其密度降低,利于信号和噪声点的区分。值得一提的是,由于植被冠层并非单层的反射体,位于冠层顶端附近的信号点在高程方向同样具有一定的连续性,若采用滤波核算法<sup>[14]</sup>对每个点搜索其密度最大的方向,可能会将冠层附近的噪声误判为信号,因此本文使用粗去噪中求得的地表坡度作为方向自适应的先验条件。判断某个点 $q$ 是否在目标点 $p$ 的邻域内,可以采用以下公式:

$$f = \left(\frac{x'_q}{a}\right)^2 + \left(\frac{y'_q}{b}\right)^2 < 1 \quad , \quad (3)$$

$$x'_q = (x_q - x_p)\cos\theta + (y_q - y_p)\sin\theta \quad , \quad (4)$$

$$y'_q = (y_q - y_p)\cos\theta - (x_q - x_p)\sin\theta \quad , \quad (5)$$

式中 $\theta$ 代表坡度, $x$ 为沿轨距离方向的坐标; $y$ 为高程方向的坐标; $f$ 是以 $p$ 为圆心,坐标轴旋转 $\theta$ 角度,椭圆长轴在新坐标系横轴上的椭圆方程; $(x'_q, y'_q)$ 为新坐标系下 $q$ 点的坐标。

椭圆邻域的长轴 $a$ 和短轴 $b$ 的大小受激光光斑间距(决定整体的连续性),以及被测区域植被形状(决定冠层的连续性)的影响。以ATLAS的数据为例,根据经验,针叶林由于树木较高且树冠呈锥形,冠层沿坡度方向的连续性较低,选择 $a=3Eps, b=Eps$ 能取得较好的结果;椭圆型的阔叶林选择 $a=3.2Eps, b=0.9Eps$ ;冠层形状类似方形的热带灌木林选择 $a=3.4Eps, b=0.8Eps$ 。

直接对粗去噪后的点云进行聚类会受到边界效应的影响,可能导致部分冠层顶点丢失。因此需首先对原始点云进行方向自适应的密度聚类,再甄别出位于粗去噪范围内的点,即可综合粗去噪和精去噪的结果,得到滤波后的点云。方向自适应聚类的实验结果如图4所示。

可以看到,在坡度较大的图4(b)中蓝框内的区域,采用固定方向的去噪算法,其明显属于信号的点,在边缘处会有部分丢失。

### 1.3 点云分类

在基本剔除了点云中的噪声后,就可以对属于地面和冠层顶端的点云进行分类,并得到地面和冠顶的高程。

结合已知的点云密度条件和高程百分比与三角网方法分类出属于地面的点云。通常对于植被点云来讲,地面点位于信号所占高程的0-15%左右<sup>[19]</sup>,但是对于噪声较多的单光子点云,即使进行了精去噪也难以保证消除了所有的噪声,为了防止噪声引起误差,本文选择0-30%作为潜在地面点所在的区域。随后,以每个沿轨间隔(一般为10 m-50

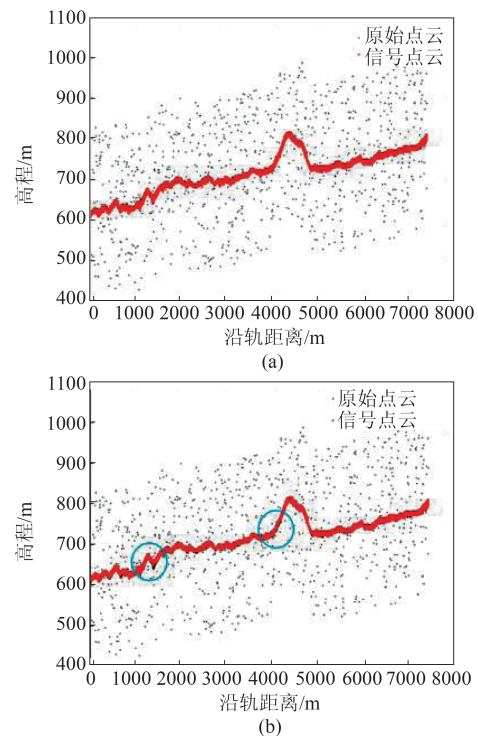


图4 精去噪结果(a)方向自适应聚类算法,(b)固定邻域聚类算法

Fig.4 Fine denoising results of(a)adaptive directional clustering, (b)fixed neighborhood clustering

m)内潜在地面点密度的均值作为阈值进行高通滤波,得到确定的初始地面点,其中所有点的密度已经在上节的聚类算法中得出。接着采用三角网方法<sup>[12]</sup>扩张初始点,得到所有的地面点。三角网方法首先通过初始地面点生成一个稀疏的TIN(三角网),然后通过迭代逐步扩展地面点,提取出所有属于地面的点。其扩展的准则如图5所示。

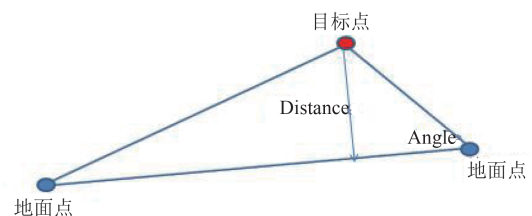


图5 三角网方法示意图

Fig.5 Triangular irregular networks

当目标点到距离最近的两个地面点之间所成直线的距离 $D$ ,和所成的夹角 $A$ 小于阈值时,便将目标点添加进地面点。最终以反距离权重法对地面点进行插值,得到完整地面轮廓。

冠层顶端点云的提取方法与地面点略有不同。首先,某个沿轨距离片内可能没有植被存在。其

次,由于植被的反射率较低,冠层点云密度一般小于地面点云,且冠顶点的密度不一定大于周围的点。因此,除了选择85~100%高程作为潜在冠顶区域外,冠顶点云还必须高于地面轮廓预定的最小树高(一般为1.5m)以上,且无需考虑点的密度,直接将所有潜在冠顶区域内的点当作初始点,使用三角网方法扩张,得到最终冠顶点云。分类结果如图7(a)所示。

## 2 实验结果

为了验证算法的可行性,选择了ICE-Sat2极地探测卫星的ATLAS星载激光测高仪所采集到的芬兰拉鲁阿省,加拿大萨斯克彻温省,中国黑龙江省,以及赞比亚境内的ATL03单光子点云数据进行实验。在芬兰地区,算法的处理结果与当地的机载LIDAR数据和NASA公布的ATL08数据以及参考文献[10,13]算法的处理结果进行对比以验证算法的准确性。在其他地区,算法的处理结果分别与ATL08数据进行对比以说明算法的普适性。

### 2.1 准确性验证

芬兰拉鲁阿省地区的单光子点云数据为ATL03\_20181124001516\_08610105\_001\_01的gt11

分轨道,探测轨道如图6(a)所示,截取的沿轨片段总长度为10km,位于东经24°,北纬66°附近,该区域的叶面积指数较低,只有约0.7左右,原始点云如图6(b)所示。用于对比的机载LIDAR数据来自于芬兰2014年的全国普查,由于和星载探测有着4年的时间差,本文参照谷歌地图对出现了明显高程变化的地点略作修改以符合实际情况。机载LIDAR数据来源于<https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta?lang=en>网站,其laz文件已经对点云进行了分类,机载点云的轨道和部分点云分别如图6(c),6(d)所示。

滤波和分类后的点云数据如图7(a)所示,冠顶与地面所在高程如图7(b)所示,为了方便与ATL08数据进行对比,所有数据的高程均采用ATL08的方式每隔100m采样一次。

从图7中可以看出,本文算法能够滤除原始点云里的噪声并估算出地面轮廓与冠顶高程,具有较高的准确性。所有被选取算法的地面与冠顶高程的估算结果和机载LIDAR数据高程的决定系数 $R^2$ 与均方根误差RMSE见表1所示。

从表1中可以看出,本文算法在地面和冠层顶

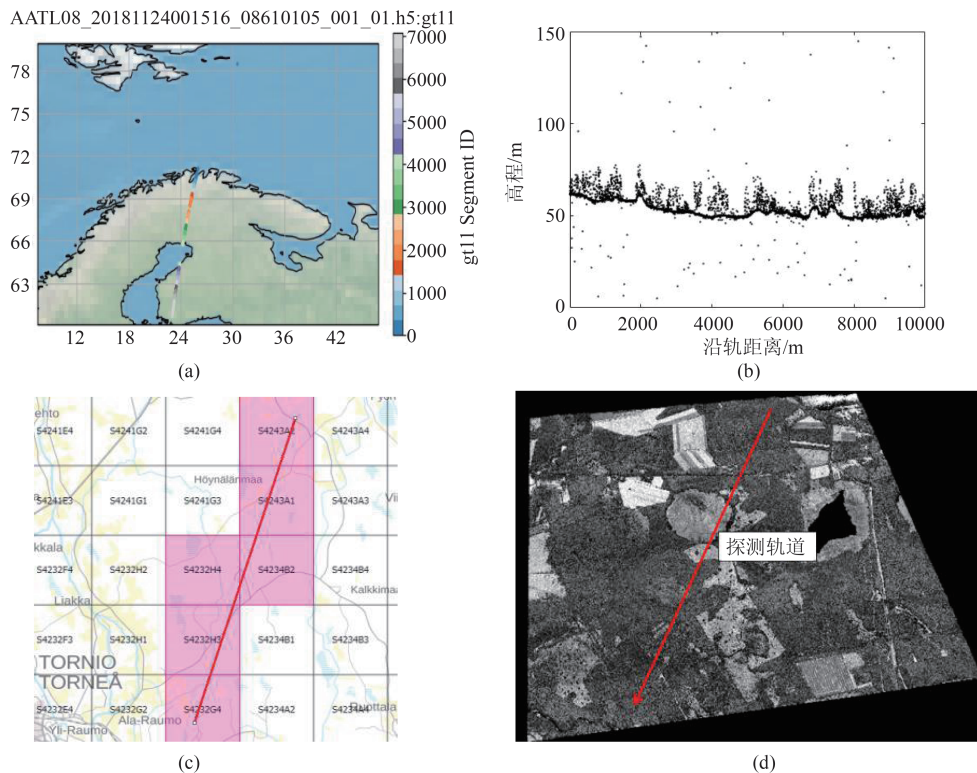


图6 芬兰境内的植被点云数据 (a)星载探测轨道,(b)原始星载点云,(c)机载轨道,(d)部分机载点云  
 Fig.6 The point cloud data in Finland of (a)space-borne detection orbit,(b)space-borne point cloud,(c)airborne detection orbit, and(d)part of the airborne point cloud

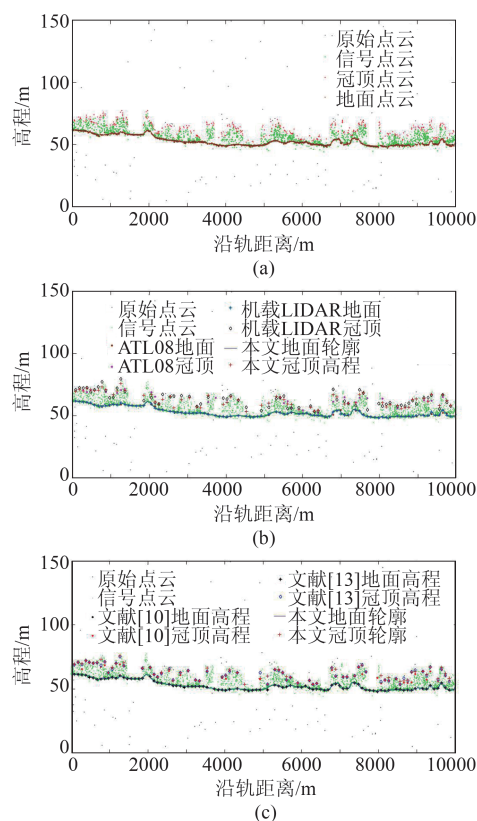


图7 芬兰植被点云处理结果(a)滤波与点云分类,(b)高程估算,(c)实验结果对比

Fig. 7 The processed Finnish vegetation point cloud of (a) filter and classification, (b) estimation of ground and crown top elevations and (c) comparison of experimental results

表1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

	地面 $R^2$	地面 RMSE	冠顶 $R^2$	冠顶 RMSE	识别率
本文算法	0.9941	0.28 m	0.772 8	2.6 m	97.01%
文献[10]	0.9888	0.41 m	0.645 9	3.2 m	97.01%
文献[13]	0.9890	0.4 m	0.499 8	3.9 m	98.51%
ATL08	0.9702	0.65 m	0.409 2	3.4 m	43.4%

端的高程估算中均具有一定优势。在经由方向自适应的滤波后,点云中地表下方和树冠上方几乎没有残余的噪声点。并且本文算法在进行点云分类时,优化了初始点的选择,进一步排除了噪声和冠层内的点对分类的干扰,因此高程的估算更加准确。

## 2.2 普适性验证

除芬兰地区外,本文还选择了三种典型的植被区域作为研究对象,分别为:1、北方针叶林,位于加拿大萨斯克彻温省艾伯特王子城西方,北纬  $54^\circ$ ,西

经  $-109^\circ$ 附近。2、中纬度针阔混交林,位于中国黑龙江境内,北纬  $44^\circ$ ,东经  $130^\circ$ 附近。3、热带灌木林,位于赞比亚境内,南纬  $-14^\circ$ ,东经  $30^\circ$ 附近,其原始点云数据来自 NASA 官方的 OpenAltimetry 数据库。这三块典型的区域,具有不同的叶面积指数,冠层形状,和地表坡度。且因数据采集时间不同,点云具有不同噪声率,能够反映出点云滤波与分类算法的普适性。实验结果如图8所示。

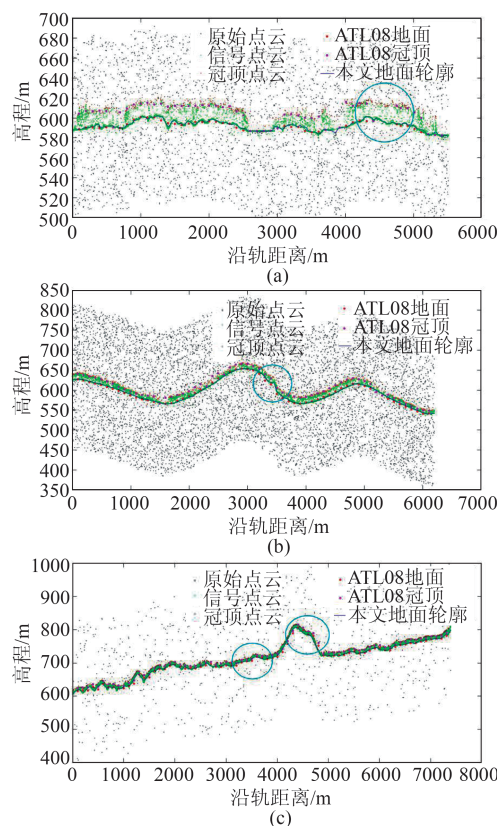


图8 植被点云处理结果(a)北方针叶林,(b)中纬度针阔混交林,(c)热带灌木林

Fig. 8 The processed vegetation point cloud of (a) northern coniferous forest, (b) mid-latitude mixed broadleaf-conifer forest, and (c) tropical shrub forest

可以看到,本文的算法在多个不同类型地区的植被点云中均有良好的滤波和分类效果,与 ATL08 数据基本相符。但是在坡度较大地区,例如图8(b)中地面凸起处和图8(c)中右侧的山丘(由蓝圈标出),本文算法能正确找到在坡上的地面和冠顶轮廓,而 ATL08 会出现误判。在信噪比较低的北方针叶林中,ATL08 的算法由于滤波参数不适应该段点云较低的信噪比,且没有考虑水平方向地面的连续性,会出现无法正确识别植被的地区,如图8(a)中蓝圈标识处,该算法能够正确找到冠顶点云。



此外,ATL08的冠层高度的均值比LIDAR数据和本文算法反演得到的结果要略低一些,其原因在于ATL08算法没有自适应的调整每个点计算密度时的方向性。在坡度较大的区域,例如图8(c)中右侧蓝圈中的标记处,噪声点的邻域会将地面囊括进去,导致密度变大,此时ATL08树冠顶端的高程会以肉眼可见的幅度明显超出植被的范围。为了减少这种情况的发生,ATL08数据的best\_fit(即最佳阈值内的点)会紧缩,导致在较平坦的区域,树冠顶点和地面过于接近,如图8(c)中左侧蓝圈所示。由于地表大部分情况下还是以平地或缓坡居多,因此ATL08数据的整体冠高相对偏低。

### 3 结论

星载光子计数激光测高的植被点云,有着高程分布范围广、点云密度变化大、日照条件下噪声大等特点。其点云在植被冠层表面处较为稀疏,密度受植被种类影响十分明显,且日照条件下所含的噪声点数远超线性体制的小光斑机载激光雷达点云。因此,一个受叶面积指数变化、坡度变化与噪声率变化的影响较小的具有高稳定性的冠层高度估算方法,是通过星载光子计数激光测高的植被点云研究森林植被冠层高度的必要条件。

本文提出的冠高估算方法,考虑了植被点云的密度、坡度、与信噪比变化,能够适用于多种类型的植被点云,且特别适用于坡度较大与冠层密度较低的植被点云。其处理结果与机载LIDAR的点云数据基本相符,其中冠顶与地面的高程和机载LIDAR数据高程的决定系数 $R^2$ 分别为0.99与0.77,均方根误差RMSE为0.28 m与2.6 m。算法较好地满足了星载光子计数激光雷达植被点云冠层高度估算的需求,提高了植被点云高程估算的精度。

### 参考文献

[1] Richardson J J, Moskal L M, Kim S H. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(6-7):0-1160.

[2] Lim K, Treitz P, Baldwin K, et al. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, **29**(5):658-678.

[3] Morsdorf F, K.Tz B, Meier E, et al. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(1):50-61.

[4] Neeck S. P. (2010). *Ice, Clouds and Land Elevation (ICE-*

*Sat-2) Mission.*

- [5] Markus T., Neumann T., Martino A., Abdalati W., Brunt K., & Csatho B., et al. (2017). The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (icesat-2): science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, **190**, 260-273.
- [6] Martino A. (2017-4-17). ATLAS Performance spreadsheet. [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/legacy-data/sigma/sigma\\_data.php](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/legacy-data/sigma/sigma_data.php).
- [7] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **190**:260-273.
- [8] Degnan J. J. (2002). Photon-counting multikilohertz micro-laser altimeters for airborne and space-borne topographic measurements. *Journal of Geodynamics*, **34**(3), 503-549.
- [9] Moussavi M S, Abdalati W, Scambos T, et al. Applicability of an automatic surface detection approach to micro-pulse photon-counting lidar altimetry data: implications for canopy height retrieval from future ICESat-2 data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(13):5263-5279.
- [10] Nie S, Wang C, Xi X, et al. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(10):A520.
- [11] Kwok R., Markus T., Morison J., Palm S. P., Neumann T. A., & Brunt K. M., et al. (2014). Profiling sea ice with a multiple altimeter beam experimental lidar (mabel). *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, **31**(5), 1151-1168.
- [12] Brenner A C, Barbieri K, Markus T, et al. ICESat-2 Simulations and Analysis using Sigma Space MPL Measurements over Greenland [C]// *Agu Fall Meeting*. 2010.
- [13] Awadallah M, Ghannam S, Abbott L, et al. A two-stage algorithm for extraction of ground and top of canopy in photon-counting profiling-LiDAR data in preparation for the ICESat-2 mission [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2014:1353-1356.
- [14] Herzfeld U C, McDonald B W, Wallin B F, et al. Algorithm for Detection of Ground and Canopy Cover in Micro-pulse Photon-Counting Lidar Altimeter Data in Preparation for the ICESat-2 Mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(4):2109-2125.
- [15] XIE Feng, YANG Gui, SHU Rong, LI Ming. An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢锋, 杨贵, 舒嵘, 等. 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), 2017, **36**(1):107-113.
- [16] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**:247-259.
- [17] Amy L. Neuenschwander, Lori A. Magruder. Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look [J]. *Remote Sens.* 2019, **11**, 1721; doi: 10.3390/rs11141721
- [18] Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models [J]. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2000, 33.

[19] Popescu S C, Zhou T, Nelson R, *et al.* Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **208**:154-170.

[20] Liu P, Zhou D, Wu N. VDBSCAN: Varied Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise [C]// *Service Systems and Service Management, 2007 International Conference on. IEEE*, 2007.

## 第七届国际新型光电探测技术及其应用研讨会

2020年11月 昆明

会议官网:<https://b2b.csoe.org.cn/meeting/NDTA2020.html>

主办单位:中国光学工程学会、微光夜视技术重点实验室

承办单位:云南大学、西安工业大学、北方夜视技术股份有限公司、天津津航技术物理研究所、中国宇航学会光电技术专业委员会、红外与微光技术应用产业联盟

大会主席:褚君浩院士(中科院上海技术物理研究所)、于起峰院士(国防科技大学)、姜会林院士(长春理工大学)

征文方向:

- |                     |               |
|---------------------|---------------|
| ◇紫外探测技术及应用          | ◇复合探测技术及应用    |
| ◇微光探测技术及应用          | ◇空间探测技术及应用    |
| ◇单光子探测技术及应用         | ◇高动态成像技术及应用   |
| ◇红外探测技术及应用          | ◇高速成像技术及应用    |
| ◇太赫兹探测技术及应用         | ◇三维成像技术及应用    |
| ◇激光探测技术及应用          | ◇光电子器件技术及应用   |
| ◇可见光探测技术及应用         | ◇先进光学设计与制造技术  |
| ◇偏振探测技术及应用          | ◇智能光电探测技术及应用  |
| ◇量子探测技术及应用          | ◇智能化信息处理技术及应用 |
| ◇多光谱/高光谱/超光谱探测技术及应用 | ◇其他           |

论文发表:

请作者登录网站提交论文全文,组委会请专家进行审稿。通过审查的稿件被大会录用。择优推荐到正式出版物发表。英文稿件将被 SPIE 会议论文集(EI检索)收录,中文稿件推荐至《红外与毫米波学报》(SCI)(同时收英文稿件)、《红外与激光工程》(EI)、《光学精密工程》(EI)、《光子学报》(EI)、《兵工学报》(EI)、《中国光学》(EI)、《航空学报》(EI)、《信息与控制》(中文核心)、《电光与控制》(中文核心)、《应用光学》(中文核心)、《红外技术》(中文核心)、《强激光与粒子束》(中文核心)、《太赫兹科学与电子信息学报》(中文核心)、《现代防御技术》(科技核心)、《光学与光电技术》(科技核心)正刊出版。

投稿网址:<http://events.kjtxw.com/tougao/NDTA2020.html>

截稿时间:2020年7月31日(第二轮)

组委会:

联系人:刘艳,电子邮箱:[liuyan@csoe.org.cn](mailto:liuyan@csoe.org.cn),联系电话:022-58168510