

# 激光雷达森林参数反演研究进展

李增元, 刘清旺, 庞勇

中国林业科学研究院 资源信息研究所 林业遥感与信息技术重点开放性实验室, 北京 100091

**摘要:** 激光雷达通过发射激光能量和接收返回信号的方式, 来获取高精度的森林空间结构和林下地形信息。全波形激光雷达通过记录返回信号的全部能量, 得到亚米级植被垂直剖面; 离散回波激光雷达记录的单个或多个回波, 表示来自不同冠层的回波信号。星载激光雷达一般采用全波形或光子计数激光剖面系统, 仅能获取卫星轨道下方的单波束或多波束数据, 用于区域/全球范围的森林垂直结构及变化观测。机载激光雷达多采用离散回波或全波形激光扫描系统, 能够获取飞行轨迹下方特定视场范围内的扫描数据, 用于林分/区域范围的森林结构观测。地基激光雷达多采用离散回波激光扫描系统, 获取以测站为中心的球形空间内扫描数据, 用于单木/样地范围的森林结构观测。激光雷达单木因子估测方法可分为CHM单木法、NPC单木法和体元单木法3类。CHM单木法通过局部最大值识别树冠顶点, 采用区域生长或图像分割算法识别树冠边界或树冠主方向, NPC单木法一般通过空间聚类或形态学算法识别单木, 体元单木法在3维体元空间采用区域生长或空间聚类算法识别树冠。根据激光雷达冠层高度分布可以估测林分因子, 冠层高度分布特征来自于离散点云或全波形。多时相激光雷达可用于森林生长量、生物量变化等监测, 以及森林采伐、灾害等引起的结构变化监测。随着激光雷达技术的发展, 它将在森林调查、生态环境建模等生产与科学研究领域中得到更为广泛的应用。

**关键词:** 激光雷达, 森林, 单木, 林分

**中图分类号:** TP79    **文献标志码:** A

**引用格式:** 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

Li Z Y, Liu Q W and Pang Y. 2016. Review on forest parameters inversion using LiDAR. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1138–1150 [DOI:10.11834/jrs.20165130]

## 1 前言

森林是陆地生态系统的主体, 森林及其变化对陆地生物圈及其他地表过程有着重要影响。森林对维护区域生态与环境及全球碳平衡、缓解全球气候变化发挥着不可替代的作用。森林可持续服务能力依赖于有效地森林经营管理, 以及碳、水、养分等物质循环的科学认识。传统上, 多通过地面观测试验研究其关键生态过程, 而遥感具有连续时空领域的观测能力, 可满足不同尺度森林资源、生态过程监测分析的需求。

激光雷达LiDAR(Light Detection And Ranging)作为一种主动遥感技术, 通过发射激光能量和接收返回信号的方式, 来获取高精度的森林空间结

构和林下地形信息, 具有被动光学遥感无可比拟的优势(庞勇等, 2005), 在森林经营管理与生态系统研究中具有广阔的应用能力(Hyyppä等, 2008; 黄华国, 2013; 郭庆华等, 2014)。

## 2 激光雷达系统

激光雷达系统记录模式通常分为离散回波和全波形两种模式。全波形激光雷达记录返回信号的全部能量, 得到亚米级植被垂直剖面, 离散回波激光雷达记录单个或多个回波, 表示来自不同冠层的回波信号。剖面激光雷达没有扫描装置, 通常沿着传感器运动方向获取线状观测数据, 扫描激光雷达通过扫描装置获取一定幅宽范围内的

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-07-15; 优先数字出版日期: 2016-07-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(编号: 2013CB733404, 2013CB733405)

第一作者简介: 李增元(1959—), 男, 研究员, 中国林业科学研究院资源信息研究所副所长, 研究方向为林业遥感技术及应用。E-mail: lizengyuan@ifrit.ac.cn

通信作者简介: 刘清旺(1978—), 男, 助理研究员, 研究方向为林业遥感技术及应用。E-mail: liuqw@ifrit.ac.cn

带状观测数据。波形激光雷达一般用于剖面测量, 光斑尺寸通常为几米或更大, 例如SLICER、LVIS和GLAS等(曹林等, 2013)。最新的激光雷达系统可以获取小光斑波形数据, 例如RIEGL Q680等, 实际上在很多应用中更多的使用小光斑离散回波数据。常用离散回波激光雷达包括Optech、TopoSys、Leica和RIEGL等, 通常根据光斑尺寸和点云密度设计飞行平台和传感器参数, 例如飞行高度和速度、扫描频率、脉冲重复频率、最大扫描角等, 对于全覆盖观测, 需要考虑航带重叠率。

## 2.1 星载激光雷达系统

星载激光雷达以卫星为搭载平台, 用于全球尺度的地表特征及变化观测。美国冰云与陆地高程卫星ICESat(Ice, Cloud and land Elevation Satellite)上搭载的地球科学激光测高系统GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)是首个星载激光雷达系统(Zwally等, 2002), 用于测量冰盖收支平衡、云和气溶胶高度、陆地地形和植被特征等, 能够提供2003年—2009年全球测高数据。GLAS包括激光测距系统、全球定位系统GPS(Global Positioning System)接收机、星体跟踪系统, 激光工作波长包括红外光(1064 nm)和可见绿光(532 nm)两种, 发射脉冲时长为4 ns, 激光脉冲发射频率为40 Hz, 激光发散角约0.1 mrad, 光斑直径约70 m, 光斑沿轨间隔约170 m, 激光脉冲数字化采样分辨率为1 ns, 按照183 d重访周期计算, 赤道上光斑跨轨间隔约15 km, 80°纬度上光斑跨轨间隔约2.5 km。

GLAS数据产品包括16种, 分为Level 0、Level 1A、Level 1B、Level 2等级别, 除Level 0级数据产品外, 其他15种数据产品由国家冰雪数据中心NSIDC(National Snow and Ice Data Center)分发。GLAS01、GLAS05、GLAS06、GLAS12-GLAS15是测高产品, GLAS02、GLAS07-GLAS11是大气产品, GLAS03和GLAS04是GLAS工程和地理定位产品。GLAS01包含了测高计的返回波形, GLAS02包含大气剖面, GLAS06包含全球高程, GLAS07-GLAS11包含校正的后向散射、云层、光学厚度数据, GLAS12-GLAS15分别包含冰盖、海冰、陆地和海洋数据。

国际上星载激光雷达发展计划包括美国的

VCL(Vegetation Canopy Lidar)(Cooper, 1997)、DESDynI(Deformation, Eco-system Structure, and Dynamics of Ice)(Hall等, 2011)和ICESat-2(Abdalati等, 2010; Yu等, 2010), 以及德国的Carbon-3D(Hese等, 2005)等, VCL、DESDynI和Carbon-3D卫星计划已经取消, ICESat-2卫星计划于2017年发射。VCL卫星用于全球陆地植被3维结构, 计划搭载多波束激光测高计MBLA(Multi-Beam Laser Altimeter); DESDynI卫星用于全球生物量和3维植被结构, 计划搭载L波段极化合成孔径雷达Pol-SAR(L-band Polarized Synthetic Aperture Radar)和多波束激光雷达(波长1064 nm); Carbon-3D卫星用于估测全球生物量, 计划搭载VCL的MBLA和双向反射分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)成像仪; ICESat-2卫星用于冰盖和海冰变化观测, 将搭载高级地形激光测高系统ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System), ATLAS采用微脉冲光子计数技术, 激光波长为532 nm, 发射频率10 kHz, 激光分为6束, 每2束一组, 组间距约3.3 km, 组内间距约500 m, 光斑直径约10 m。中国在激光雷达方面也取得了重要进展, 计划发射面向林业应用的星载激光雷达卫星。

## 2.2 机载激光雷达系统

机载激光雷达以航天/航空飞机为搭载平台, 用于区域尺度的地表特征及变化观测。机载激光雷达的激光脉冲一般偏离天底方向向下观测, 扫描方向垂直于飞行方向, 通过飞行平台的运动获取激光扫描条带数据。美国为了论证星载激光雷达, 设计了一系列机载激光雷达系统, 例如植被激光成像传感器/陆地植被与冰传感器LVIS(Laser Vegetation Imaging Sensor or Land, Vegetation, and Ice Sensor)、冠层回波重建激光扫描成像仪SLICER(Scanning LiDAR Imager of Canopies by Echo Recovery)、多测高波束试验激光雷达MABEL(Multiple Altimeter Beam Experimental LiDAR)等(黄麟和张晓丽, 2006), LVIS是VCL卫星载荷的机载原型, MABEL是ICESat-2卫星载荷的机载原型, 开展了多次飞行试验。近年来, 激光雷达技术发展迅速, 出现了一系列商用机载激光雷达系统, 例如Riegl、Optech、Leica、Trimble等公司推出了激光雷达系统, 在森林调

查、生态环境监测等方面得到了很好应用。典型机载激光雷达系统如表1所示, 大部分为单波段激

光雷达, 其中Optech Titan为多波段激光雷达, 波长为532 nm、1064 nm和1550 nm。

表 1 典型机载激光雷达系统  
Table 1 Typical airborne LiDAR system

| ST                | WL/nm | PRF/kHz | SF/Hz   | FOV/(°) | MR/m     | LBD/mrad  | EM   |
|-------------------|-------|---------|---------|---------|----------|-----------|------|
| NASA LVIS         | 1064  | 0.1—0.5 | —       | 7       | 10000    | 2.5       | 全波形  |
| NASA SLICER       | 1064  | —       | —       | —       | 6700     | 1.5       | 全波形  |
| NASA MABEL        | 532   | 5—25    | —       | 6       | 20000    | 0.1       | 光子计数 |
|                   | 1064  |         |         |         |          |           |      |
| RIEGL LMS-Q680i   | 1550  | ≤400    | 10—200  | 60      | 30—1600  | ≤0.5      | 全波形  |
| RIEGL LMS-Q780    | 1550  | ≤400    | 10—200  | 60      | 50—5800  | ≤0.25     | 全波形  |
| Leica ALS60       | —     | ≤200    | ≤100    | 75      | 200—5000 | 0.15      | 4回波  |
| Leica ALS70-CM    | —     | ≤500    | 120—200 | 75      | 100—1600 | ~0.15     | 全波形  |
| Leica ALS70-HP    | —     | ≤500    | 120—200 | 75      | 100—3500 | ~0.15     | 全波形  |
| Leica ALS70-HA    | —     | ≤250    | 60—100  | 75      | 100—5000 | ~0.15     | 全波形  |
| Leica ALS80-CM    | —     | ≤1000   | 120—200 | 72      | 100—1600 | 0.15—0.18 | 全波形  |
| Leica ALS80-HP    | —     | ≤1000   | 120—200 | 72      | 100—3500 | 0.15—0.18 | 全波形  |
| Leica ALS80-HA    | —     | ≤500    | 60—100  | 75      | 100—5000 | 0.15—0.18 | 全波形  |
| Trimble AX60      | 近红    | 100—400 | 200     | 60      | 50—4700  | ≤0.25     | 全波形  |
| Trimble AX60i     | 近红    | 80—400  | 200     | 60      | 30—1600  | ≤0.5      | 全波形  |
| Trimble AX80      | 近红    | 200—800 | 400     | 60      | 50—4700  | ≤0.25     | 全波形  |
| Optech ALTM 3100  | —     | ≤100    | ≤70     | 50      | 80—3500  | 0.3/0.8   | 4回波  |
| Optech ECLIPSE    | 1500  | ≤450    | 100     | 60      | 50—1000  | —         | 7回波  |
| Optech Galaxy     | 1064  | 35—550  | 0—200   | 60      | 150—4700 | 0.25      | 8回波  |
| Optech Orion-C300 | 1541  | 100—300 | 0—90    | 50      | 50—1100  | 0.25      | 4回波  |
| Optech Orion-M300 | 1064  | 50—300  | 0—90    | 50      | 100—2500 | 0.25      | 4回波  |
| Optech Orion-H300 | 1064  | 35—300  | 0—90    | 50      | 150—4000 | 0.25      | 4回波  |
| Optech Pegasus-HD | 1064  | 100—500 | 0—140   | 75      | 300—2500 | 0.25      | 4回波  |
|                   | 532   |         |         |         |          | 0.35      |      |
| Optech Titan      | 1064  | 50—300  | 0—210   | 60      | 300—2000 | 0.35      | 4回波  |
|                   | 1550  |         |         |         |          | 0.7       |      |

注: ST为传感器类型(sensor type), WL为激光波长(wavelength), PRF为脉冲重复频率(pulse frequency repetition), SF为扫描频率(scan frequency), FOV为视场角(field of view), MR为测距范围(measurement range), LBD为激光发散角(laser beam divergence)、EM为回波模式(echo mode)。

机载激光雷达与其他载荷相集成, 可以保证不同传感器观测条件的一致性, 并有效提高数据获取效率。美国国家生态观测网研制了机载观测平台AOP(Airborne Observation Platform), AOP集成了可见/短波红外成像光谱仪、波形激光雷达和

高分辨率航空相机(Kampe 等, 2010); 美国斯坦福大学研制了卡耐基航空观测平台CAO(Carnegie Airborne Observatory), CAO试验系统集成了可见/近红外成像光谱仪和波形激光雷达(Asner 等, 2007), CAO-2代系统集成了可见—短波红外成像

光谱仪、双波长波形激光雷达和高空间分辨率可见-近红外成像光谱仪(Asner 等, 2012); 美国宇航局戈达德空间中心研发了G-LiHT(Goddard's LiDAR, Hyperspectral and Thermal)系统, 由激光雷达、高光谱和热成像仪组成, 并在美国北部、南部森林开展了多次飞行实验(Cook 等, 2013)。中国林业科学研究院资源信息研究所从德国定制了CAF-LiCHY(Chinese Academy of Forestry-LiDAR, CCD(Charge Couple Device)and Hyperspectral)系统, 由激光雷达、高光谱和航空相机3种传感器组成, 单次飞行就可以同步获取激光雷达和光学数据, 在中国不同森林试验区开展了应用研究(Pang 等, 2013, 2016)。

随着无人机(Unmanned Aerial System, UAS; Unmanned Aerial Vehicle, UAV)遥感技术的快速发展, 出现了一些无人机激光雷达系统(Nagai 等, 2004, 2009; Jaakkola 等, 2010; Lin 等, 2011), 并取得了成功应用。Nagai 等人(2004, 2009)开发了一种无人机激光雷达系统, 搭载了低

频激光扫描仪和单反相机等, 用于提取DSM和纹理特征; Jaakkola 等人(2010)和Lin 等人(2011)设计了一种轻小型无人机激光雷达系统(FGI Sensei), 搭载了激光扫描仪、CCD相机、光谱仪和热红外相机, 采用模块化设计, 可以任意组合不同遥感传感器, 并能用于车载移动制图; Wallace等人(2012, 2014a, 2014b, 2014c, 2016)研制了一种低成本无人机激光雷达系统(TerraLuma), 搭载了低频激光扫描仪和高清录像机, 用于森林资源清查; Gottfried等人(2015)介绍了一种多旋翼无人机激光雷达系统(RIEGL VUX-SYS), 搭载了高频激光扫描仪和可见光相机, 面向林业等多种行业应用。

2.3 地基激光雷达系统

地基激光雷达一般架设在固定地点获取扫描数据, 用于单木/样地尺度的地物3维结构观测。地基激光雷达扫描方式不同于机载激光雷达, 一般通过水平面和垂直面内的二轴旋转来观测球形空间内的地物, 典型地基激光雷达如表2所列。

表 2 典型地基激光雷达系统  
Table 2 Terrestrial LiDAR system

| 传感器                          | WL/nm    | PRF/kHz  | SF/(Hz) | FOV/(°) | MR/m     | LBD/mrad | EM     |
|------------------------------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|--------|
| Trimble TX8                  | 1500     | 1000     | 30—60   | 360×317 | 120      | 0.3      | 1回波    |
| RIEGL VZ-400                 | 近红       | 100—300  | 3—120   | 360×100 | 1.5—600  | 0.35     | 全波形    |
| RIEGL VZ-400i                | 近红       | 100—1200 | 3—240   | 360×100 | 1.5—800  | 0.35     | 4—15回波 |
| RIEGL VZ-1000                | 近红       | 70—300   | 3—120   | 360×100 | 2.5—1400 | 0.3      | 全波形    |
| RIEGL VZ-2000                | 近红       | 50—1000  | 3—240   | 360×100 | 2.5—2050 | 0.3      | 全波形    |
| RIEGL VZ-4000                | 近红       | 30—300   | 2—240   | 360×60  | 5—4000   | 0.15     | 全波形    |
| RIEGL VZ-6000                | 近红       | 30—300   | 2—240   | 360×60  | 5—6000   | 0.12     | 全波形    |
| Leica ScanStaion P16/P30/P40 | 1550/658 | ≤1000    | —       | 360×290 | 0.4—40   | 0.23     | 全波形    |
|                              |          |          |         |         | 0.4—120  |          |        |
|                              |          |          |         |         | 0.4—270  |          |        |
| Leica C5/C10                 | 532      | 25/50    | —       | 360×270 | 35/300   | 0.09     | 1回波    |
|                              |          |          |         |         | 3—1250   | 0.15     |        |
| Optech ILRIS-HD/HD-ER/LR     | 1535     | 10       | —       | 40×40   | 3—1800   | 0.15     | 1回波    |
|                              |          |          |         |         | 3—3000   | 0.25     |        |

3 激光雷达单木因子估测研究

单木是构成森林的基本组成部分, 其空间结构、生物物理、生物化学组分等是森林资源调查、生态环境建模研究等所需的关键因子。传统

单木地面观测一般采用围尺、皮尺、测高计等工具直接测量胸径、树高、枝下高、冠幅等因子, 或者采用攀爬的方式测量树冠特征, 或者将立木伐倒之后测量相关的特征参数。激光雷达通过发射激光脉冲到树木的干枝叶等组分上, 接收后向散射信号来获取单木各组分的3维空间位置等信

息, 机载激光雷达和地基激光雷达在一定的测距范围内均能用于单木测量, 机载激光雷达采用自上而下的观测模式, 而地基激光雷达采用自内向外的观测模式, 二者之间具有一定的互补性(刘鲁霞和庞勇, 2014)。

### 3.1 机载激光雷达单木因子

机载激光雷达在距离森林冠层上方一定高度的位置处向下观测, 可以很精确地获取树冠上部枝叶的空间特征, 通过树冠内部以及树冠之间的空隙, 测量树冠内部和林下地形的空间特征, 由于树冠的遮挡影响, 很难获取树干的空间特征。由机载激光雷达数据可以直接提取单木树高、冠幅等因子, 根据树冠顶点位置估计单木位置, 结合异速生长方程或回归分析, 可以进一步计算胸径、蓄积量、生物量、碳储量等因子(赵峰等, 2008; 赵静等, 2013)。

已有研究对机载激光雷达探测单木方法进行了对比分析和综述(Hyyppä等, 2008; Larsen等, 2011; Kaartinen等, 2012; Vauhkonen等, 2012), 激光雷达数据提取单木结构因子的方法可分为3类, 第1类是由栅格化冠层高度模型(CHM)中识别单木特征(Brandtberg等, 2003; Brandtberg, 2007; Koch等, 2006; Popescu, 2007; Yu等, 2011; 刘清旺等, 2008, 2010), 称为CHM单木法; 第2类是由离散的地形归一化点云NPC(Normalized Point Cloud)数据识别单木特征(Alexander, 2009; Reitberger等, 2009; Lähivaara等, 2012; Li等, 2012), 称为NPC单木法; 第3类是将点云投影到体元空间识别单木特征(Morsdorf等, 2003; Wang等, 2008; Vaughn等, 2012), 称为体元单木法。对于能够获取回波能量随时间分布的全波形激光雷达数据来说, 一般需要进行波形分解, 提取地面点和植被点, 然后再提取单木结构因子(Liu等, 2011; 段祝庚和肖化顺, 2011; 焦义涛等, 2015)。

CHM单木法基本思路是将原始点云分为地面点和植被点, 采用插值算法生成对应的DEM和DSM栅格, 由DSM减去DEM得到CHM, 通过树冠识别算法提取树冠顶点、树冠边界等特征。基于CHM的单木树冠识别方法一般分为两种, 第1种是通过局部最大值判断树冠顶点, 然后根据树冠形状特征识别树冠边界或树冠主方向(Popescu等,

2002; Holmgren等, 2003a; Maltamo等, 2004; Roberts等, 2005; Koch等, 2006); 第2种是通过CHM分割确定树冠边界, 然后将树冠边界内局部最大值作为树冠顶点(Brandtberg等, 2003)。在CHM中搜索局部最大值时可采用固定或可变窗口尺寸, 窗口尺寸依赖于冠幅、林分密度等因子(Zimble等, 2003; Roberts等, 2005)。若CHM存在一些凹陷区, 需要对CHM进行平滑处理(Maltamo等, 2004; Koch等, 2006), 以便保证树冠边界的完整性。另外, 通过树冠特征约束条件, 例如树高与冠幅之间的关系, 可以去除一些伪树冠特征(Brandtberg, 2007)。

NPC单木法直接使用原始/归一化点云进行分割, 包括K均值聚类算法、三角剖分算法、贝叶斯算法、局部最大值聚类算法等(Morsdorf等, 2003; Alexander, 2009; Lähivaara等, 2012; Li等, 2012)。K均值聚类算法根据点云坐标之间的欧氏距离将特征空间划分为包含相似值的区域, 特征空间内点之间的距离之和最小(Morsdorf等, 2003)。三角剖分算法在一定尺度内识别种子点或局部最大值, 采用区域生长算法识别树冠(Alexander, 2009)。贝叶斯算法通过估计树高、冠长、冠幅等参数相关的先验知识, 来提高密林的单木探测结果(Lähivaara等, 2012)。局部最大值聚类算法采用顶向下方法对点进行分类, 将全局最大值点作为最高木的树冠顶点, 根据树冠特征将点分为目标木点和其他点, 在其他点中迭代循环, 直到所有点被分为对应的集合(Li等, 2012)。

体元单木法将点云投影到体元空间, 体元属性为体元内所包含的点数, 采用形态学算法识别树冠。Wang等人(2008)将地形归一化点云投影到体元空间, 对每一高度层进行聚类分析, 同一树冠在临近层均可见, 从顶到底跟踪树冠的聚类特征来提取单木。Vaughn等人(2012)提出了一种基于体元的分割算法, 从最高层开始, 每次处理一层体元, 按照体元之间的距离进行空间聚类, 聚类参数包括当前聚类的体元个数、垂直中心、到新体元的距离等, 通过试验数据对参数进行优化。

另外, 还有一些研究将不同单木法综合应用来改善树冠识别结果。Morsdorf等人(2003)在平滑后DSM中识别局部最大值, 将其用作点云特征空间K均值聚类的种子点进行单木分割。Reitberger等人(2009)将CHM单木法和体元法相结合识别上层

木和下层木,基本思路是首先通过分水岭算法分割CHM,将分割单元内局部最大值作为上层木位置,然后将分水岭分割边界内点云投影到体元空间,采用聚类算法识别小树树干和树冠。Gupta 等人(2010)对比分析了3种聚类算法,包括k均值算法、修正K均值算法(使用局部最大值或/和高度尺度缩减)和使用算术平均值加权对组法WPGMA (Weighted Pair-Group Method using arithmetic Averages)的分层聚类,发现使用来自CHM的外部种子点和高度尺度缩减的修正K均值算法是识别单木树冠的最优聚类方法。

### 3.2 地基激光雷达单木因子

地基激光雷达一般架设在森林样地内,按照一定扫描频率或转速绕着水平轴在垂直面内震荡或旋转,获取垂直剖面内的扫描数据,同时按照一定转速绕着垂直轴在水平面内旋转360°获取球形空间内扫描数据。单站观测仅能获取面向测站方向的立木干枝叶空间特征,通过合理地配置多站观测,可以获取近似完整的立木空间特征。地基激光雷达可以很精确地获取森林内部空间特征,由于树冠之间的相互遮挡,特别是郁闭林分条件下,很难获取树冠顶部的空间特征,容易造成低估树高。通过地基激光雷达数据可以直接提取单木位置、胸径、冠幅、树高等结构因子,结合异速生长方程或回归分析进一步计算相关因子。

已有地基激光雷达探测单木方法主要分为3类(Liang等,2016),第1类是2维层搜索方法,在原始点云的2维切片层中识别树干,采用的搜索算法包括点聚类 and 圆匹配等,通过重复搜索不同高度处的切片层可以改善探测结果(Aschoff和Spiecker,2004;Maas等,2008;Tansey等,2009;Lindberg等,2012;Strahler等,2008;Yao等,2011);第2类是测距图像聚类方法,在测量图像中按照距离或曲率等局部属性进行分组,将3维临域搜索转换到2维空间来提高运算效率(Haala等,2004;Forsman等,2012);第3类是点云处理方法,按照点之间的几何和语义关系识别树干(Liang等,2012)。

地基激光雷达可以直接探测树干位置和株数密度,对于单站地基激光雷达,探测率随着株数密度的增加而降低,在株数密度为200—400株/ha的稀疏林中能够探测80%以上树木,在在株数密度大于1000株/ha的密林中大约探测70%的树木,对

于多站地基激光雷达,探测率在62%—100%之间,依赖于森林结构和测站配置;胸径测量精度一般为1—2 cm,依赖于森林类型和测站配置;树高容易被低估,测量误差一般为几米(Maas等,2008;Yao等,2011;Lindberg等,2012;Liang和Hyyppä,2013;Kankare等,2015)。

## 4 激光雷达林分因子估测研究

林分是森林的内部结构特征大体相似而与邻近地段又有明显区别的森林,可以根据树种组成、森林起源、林龄、郁闭度、林冠层次等因子划分林分类型。林分结构因子可以直观地反映林分生长状况,按照测量方式的不同,林分结构因子包括两类,一类是通过单木因子统计得到,例如株数密度、林分蓄积量等,另一类是直接测量得到,例如郁闭度、林层等。通过激光雷达可以直接获取林分结构因子(Holmgren等,2003b;庞勇等,2008a,2008b),不同激光雷达系统获取的林分空间范围差异较大,星载激光雷达能够获取线状的观测数据,机载扫描激光雷达能够获取面覆盖的观测数据,地基激光雷达便于获取小范围的观测数据,不适合大范围的面覆盖数据应用。

从激光雷达数据中提取林分结构因子时,可以根据冠层高度分布特征与地面测量值之间的关系估测森林结构参数,例如生物量、蓄积量、胸高断面积等(Næsset,2002;Holmgren,2004;Packalén和Maltamo,2007;Hudak等,2008)。激光雷达数据特征空间可以分为点云和波形两种,基于点云特征空间的方法直接使用点云进行分析,计算相关统计或指数特征量,例如不同的高度分位数、平均值、标准差、峰度、偏度、首回波郁闭指数、冠形郁闭指数等(Goodwin等,2006;Wallace等,2014b);基于波形特征空间的方法是在一定的空间范围内,按照指定的高度间隔对点进行点云数据进行统计,生成频率或强度合成波形,计算波形特征量,例如波形分位数、波形峰值、波形前沿、波形后沿等。根据高度分布法提取的系列特征量,采用回归分析、机器学习等算法间接估测相关森林参数(Zhao等,2011;Gleasona和Im,2012;García-Gutiérrez等,2015)。

## 5 激光雷达森林动态变化研究

森林变化主要指在一定时间间隔内由于森林

自身的生长演替、外部干扰等因素引起的森林结构、组成成分等变化,树木的生长状况包括树高的增加,树冠尺寸的增加,树冠之间空隙的减少等,年积温、水分胁迫、立地条件等外部因素会直接影响树木的生长状况。另外,人工修枝、间伐/择伐、森林病虫害传播、外来物种入侵、林火、风灾、冰冻雪灾等均会直接影响森林结构变化(McElhinny 等, 2005)。通过多时相激光雷达数据序列,可以分析不同的森林结构变化特征。

Yu等人(2004)使用两期激光雷达估测森林生长量并监测采伐木,数据获取时间为1998年和2000年,林分尺度生长量精度为5 cm,样地尺度生长量精度为10—15 cm,能够探测所有成熟采伐木,不能探测大部分采伐的小树。Næsset和Gobakken (2005)使用两期激光雷达分析了森林生长量,数据获取时间为1999年和2001年,采用冠层高度分布相关变量估测森林生长量,发现上高度分位数的增长量比地面测量的高度增长量大一些,激光雷达估测2年周期生长量的精度较低。Yu等人(2006)使用两期激光雷达探测了冠层高度生长量,数据获取时间为1998年和2003年,对比分析了树冠内最大Z的差值、DSM之间的差值和高度分位数(85%、90%、95%)之间的差值估测的生长量,结果表明多时相激光雷达能够用于测量单木生长量。Yu等人(2008)使用多时相激光雷达进一步分析了样地尺度平均高和蓄积生长量,发现树顶差值法估测的平均高生长量最优,DSM差值法估测的蓄积生长量最优。Næsset等人(2013)将激光雷达与地面样地相结合,分析了采伐、退化和未干扰3种森林的生物量变化,结果表明激光雷达能够显著降低生物量变化量的估计值标准差。Cao等人(2016)使用多时相激光雷达估测了森林生物量变化量,对比分析了直接法(通过激光雷达变量之间的差值预测生物量变化量)和间接法(在每一时间点进行生物量建模并预测生物量变化量),发现直接法估测的生物量变化量精度更高,通过激光雷达首次回波计算的平均高差值和上高度分位数差值(75%、95%)模型最优。

## 6 激光雷达林下地形研究

激光雷达对森林冠层具有穿透性,在高精度大区域地形制图方面具有无可比拟的优势,欧美

一些国家开始使用激光雷达生产区域或全国DEM产品。激光雷达点云提取地形信息时通常根据点云之间的空间位置关系,采用不同的点云分类算法将回波点分为地面点和非地面点,由离散地面点内插生成DEM栅格。Meng等人(2010)将区分地面点和非地面点的地面滤波算法分为6类,即分割/聚类、形态学、方向扫描、等高线、不规则三角网TIN(Triangulated Irregular Network)和插值,选择地面滤波算法时应考虑最优回波(首回波、中间回波、末回波)和局部临域等因素。Guo等人(2010)通过不同内插算法由激光雷达点云生成DEM,考虑了地形起伏、点云密度、空间分辨率等条件,发现简单插值算法(例如反距离加权法、自然邻近点法、TIN法)更为高效,而克里金插值算法(例如普通克里金和泛克里金)更为精确。

激光回波信号中地物信息依赖于光斑尺寸,小光斑观测的地物结构相对单一,大光斑能够观测复杂的地物结构。对于小光斑激光雷达来说,光斑直径为几厘米至几十厘米,对于大光斑激光雷达来说,光斑直径为几米至几十米。激光脉冲回波信号包含的信息分为3种情况,第1种是仅包含植被冠层信息,第2种是仅包含地形信息,第3种是混合了植被冠层和地形信息,通过回波强度或返回波形特征量很难获得精确的地形信息,但是根据点云之间的空间位置关系可以提取精确的地形信息。小光斑波形数据中地形坡度变化引起的波形展宽较小,相应的测量误差也较小。大光斑波形数据中地形坡度引起的波形展宽较大,由于波形中混合了植被冠层信息,很难确定地形引起的波形展宽量,导致地形测量误差较大。

## 7 结 语

激光雷达3维空间结构探测能力在很多领域得到了广泛应用,应用需求又进一步促进了激光雷达技术的快速革新。激光脉冲扫描频率从几十赫兹提高到千赫兹、百万赫兹、千万赫兹级别,显著提高了地物3维空间测量的精细程度,对于高频激光扫描仪,探测距离较大时容易产生激光测距的歧义性问题,即尚未接收到当前激光脉冲的回波信号,又发射了新的激光脉冲,造成发射激光脉冲与回波信号之间的匹配问题,激光雷达厂商给出专用解决方法。激光脉冲由单波段向多波段



发展, 单波段激光雷达不能提供丰富的光谱信息, 很难用于植被类型识别, 多波段激光雷达提供多种波长的激光脉冲, 直接获取3维空间点的多光谱信息, 有利于目标识别和分类, 商业多波段激光雷达开始进入行业应用。面阵激光雷达也取得了一些成功试验成果, 但是尚未出现商业面阵激光雷达。国际上光子计数激光雷达已取得了重大突破, 在美国ICESat-2卫星上计划搭载光子计数激光雷达。

激光雷达采样密度是影响森林参数估测精度的关键因素, 对于单木结构来说要保证单木树冠上有足够的回波信号, 才能减少树顶及树冠边缘错失现象, 提高树高及冠幅等参数估测精度; 对于样地尺度或林分尺度森林参数来说, 要保证不同高度的树冠上有足够的回波信号, 避免冠层上表面的非充分采样, 提高平均高及郁闭度等参数估测精度。激光雷达航带间的匹配误差将直接影响航带重叠区的森林参数估测精度, 由于定姿定位系统的测量误差, 特别是对于激光扫描系统来说, 微小的角度测量误差可能导致较大的空间位置误差, 该误差随着激光脉冲传输距离的增加而变大, 因此, 对于整个测区要进行航带精确匹配和平差处理, 以便保证激光回波信号的定位精度。对于地基激光雷达, 测站间匹配误差是影响单木结构估测精度的关键因素, 一般采用人工布设标志贴或标志球的方式来提高匹配精度。

不同的激光雷达数据处理方法也将影响森林参数估测精度, 例如波形处理方法、点云分类方法、单木识别方法、林分估测方法等。激光脉冲返回信号一般采用离散回波或连续波形方式进行记录, 通过波形分解或探测阈值等方法可以从连续波形得到离散回波, 与激光雷达直接记录的离散回波相比, 可以提供更多的离散回波点以及波形相关信息。激光雷达数据中包含了地形和地上植被等信息, 提取森林参数时通常需要去除地形影响。点云分类可以将回波点分为地面点、植被点等类别, 将植被点高程减去地面高程得到地形归一化植被点, 用于提取单木或林分参数, 或者生成CHM来提取相关参数。对于平缓地形来说, 常用的点云分类算法可以很好地区分地面点和非地面点; 对于陡坡、断崖等复杂地形来说, 很难正确地区分地面点和非地面点, 需要采用人工交互方式识别地面点; 另外, 对于森林中的高压线

设施、房屋等人工建筑, 现有算法很难从非地面点中区分植被点和非植被点, 需要采用人工交互方式去除这类非植被点。在不同的森林类型、林木空间分布、地形等环境条件下, 归一化点云的聚类分析、CHM的平滑滤波及分割、冠层垂直高度分布特征等相关算法的适用性存在差异, 需要建立特定的处理流程和估测模型来提高森林参数估测精度。

激光雷达在空间结构测量方面具有显著优势, 不少国家或地区已经获取了大区域的机载激光雷达数据, 用于地形测绘或森林资源调查等业务。多时相激光雷达可用于森林生长量、生物量变化等监测, 以及森林采伐、灾害等引起的结构变化监测。通过低采样密度激光雷达获取全覆盖数据, 高采样密度激光雷达获取条带数据, 将两种数据获取方式相结合, 可有效降低观测成本并保证一定的森林参数估测精度。激光雷达能够精确地获取林下地形信息, 摄影测量提供上层树冠的结构信息, 激光雷达与摄影测量相结合可用于森林变化监测。激光雷达条带数据与雷达、光学影像等面覆盖数据相结合, 可用于估测区域尺度森林参数。激光雷达无论作为单一数据源还是综合其他遥感数据, 可很好地服务于多种尺度的森林参数反演等应用。

## 参考文献(References)

- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, Csatho B, Farrell S L, Fricker H A, Harding D, Kwok R, Lefsky M, Markus T, Marshak A, Neumann T, Palm S, Schutz B, Smith B, Spinhrne J and Webb C. 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 735–751 [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2034765]
- Alexander C. 2009. Delineating tree crowns from airborne laser scanning point cloud data using Delaunay triangulation. *International Journal of Remote Sensing*, 30(14): 3843–3848 [DOI: 10.1080/01431160902842318]
- Aschoff T and Spiecker H. 2004. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data//*International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-8/W2. Freiburg: 71–75
- Asner G P, Knapp D E, Boardman J, Green R O, Kennedy-Bowdoin T, Eastwood M, Martin R E, Anderson C and Field C B. 2012. Carnegie Airborne Observatory-2: increasing science data dimensionality via high-fidelity multi-sensor fusion. *Remote Sensing of Environment*, 124: 454–465 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.012]
- Asner G P, Knapp D E, Kennedy-Bowdoin T, Jones M O, Martin R E,



- Boardman J and Field C B. 2007. Carnegie Airborne Observatory: in-flight fusion of hyperspectral imaging and waveform light detection and ranging for three-dimensional studies of ecosystems. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 013536 [DOI: 10.1117/1.2794018]
- Brandtberg T. 2007. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5): 325–340 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2006.10.006]
- Brandtberg T, Warner T A, Landenberger R E and McGraw J B. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 290–303 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00008-7]
- Cao L, Coops N C, Innes J L, Sheppard S R J, Fu L Y, Ruan H H and She G H. 2016. Estimation of forest biomass dynamics in subtropical forests using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 178: 158–171 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.012]
- Cao L, She G H, Dai J and Xu J X. 2013. Status and prospects of the LiDAR-based forest biomass estimation. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 37(3): 163–169 (曹林, 余光辉, 代劲, 徐建新. 2013. 激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 37(3): 163–169)
- Cook B D, Corp L A, Nelson R F, Middleton E M, Morton D C, McCorkel J T, Masek J G, Ranson K J, Ly V and Montesano P M. 2013. NASA Goddard's LiDAR, Hyperspectral and Thermal (G-LiHT) airborne imager. *Remote Sensing*, 5(8): 4045–4066 [DOI: 10.3390/rs5084045]
- Cooper J. 1997. VCL: The vegetation canopy lidar mission//Proceedings of the 11th AIAA/USU Conference on Small Satellites. McLean, VA: [s.n.]: 1–6
- Duan Z G and Xiao H S. 2011. Review of methods for forest parameter estimation with LiDAR. *Forest Resources Management*, (4): 117–121 (段祝庚, 肖化顺. 2011. 机载激光雷达森林参数估算方法综述. *林业资源管理*, (4): 117–121) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6622.2011.04.021]
- Forsman M, Börnin N and Holmgren J. 2012. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Melbourne, Australia: [s.n.]: 261–265 [DOI: 10.5194/isprarchives-XXXIX-B5-261-2012]
- García-Gutiérrez J, Martínez-Álvarez F, Troncoso A and Riquelme J C. 2015. A comparison of machine learning regression techniques for LiDAR-derived estimation of forest variables. *Neurocomputing*, 167: 24–31 [DOI: 10.1016/j.neucom.2014.09.091]
- Gleasona C J and Im J. 2012. Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches. *Remote Sensing of Environment*, 125: 80–91 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.006]
- Goodwin N R, Coops N C and Culvenor D S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment*, 103(2): 140–152 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.003]
- Gottfried M, Hollaus M, Glira P, Wieser M, Milenković M, Riegl U and Pfennigbauer M. 2015. First examples from the RIEGL VUX-SYS for forestry applications. *Proceedings of SilviLaser 2015*, 105–107.
- Guo Q H, Li W K, Yu H and Alvarez O. 2010. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(6): 701–712 [DOI: 10.14358/PERS.76.6.701]
- Guo Q H, Liu J, Tao S L, Xue B L, Li L, Xu G C, Li W K, Wu F F, Li Y M, Chen L H and Pang S X. 2014. Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling. *Chinese Science Bulletin*, 59(6): 459–478 (郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 薛宝林, 李乐, 徐光彩, 李文楷, 吴芳芳, 李玉美, 陈琳海, 庞树鑫. 2014. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望. *科学通报*, 59(6): 459–478) [DOI: 10.1360/972013-592]
- Gupta S, Weinacker H and Koch B. 2010. Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-D single tree detection using airborne fullwave LiDAR data. *Remote Sensing*, 2(4): 968–989 [DOI: 10.3390/rs2040968]
- Haala N, Reulke R, Thies M and Aschoff T. 2004. Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition.//Proceedings of the ISPRS Working Group V/1, IAPRS-XXXIV.
- Hall F G, Bergen K, Blair J B, Dubayah R, Houghton R, Hurtt G, Kellndorfer J, Lefsky M, Ranson J, Saatchi S, Shugart H H and Wickland D. 2011. Characterizing 3D vegetation structure from space: mission requirements. *Remote Sensing of Environment*, 115(11): 2753–2775 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.024]
- Hese S, Lucht W, Schmullius C, Barnsley M, Dubayah R, Knorr D, Neumann K, Riedel T and Schröter K. 2005. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO<sub>2</sub> balance—the Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment*, 94(1): 94–104 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.006]
- Holmgren J, Nilsson M and Olsson H. 2003a. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning. *Forest Science*, 49(3): 419–428
- Holmgren J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 543–553 [DOI: 10.1080/02827580410019472]
- Holmgren J, Nilsson M and Olsson H. 2003b. Simulating the effects of lidar scanning angle for estimation of mean tree height and canopy closure. *Canadian Journal of Remote Sensing: Journal Canadien de Télédétection*, 29(5): 623–632 [DOI: 10.5589/m03-030]
- Huang H G. 2013. Progress analysis of LiDAR research on forestry sci-

- ence studies. *Journal of Beijing Forestry University*, 35(3): 134–143 (黄华国. 2013. 激光雷达技术在林业科学研究中的进展分析. *北京林业大学学报*, 35(4): 134–143)
- Huang L and Zhang X L. 2006. Applications of Lidar and 3D remote sensing in forestry. *World Forestry Research*, 19(4): 11–17 (黄麟, 张晓丽. 2006. 三维成像激光雷达遥感技术在林业中的应用. *世界林业研究*, 19(4): 11–17) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4241.2006.04.003]
- Hudak A T, Crookston N L, Evans J S, Hall D E and Falkowski M J. 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2232–2245 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.10.009]
- Hyypä J, Hyypä H, Leckie D, Gougeon F, Yu X and Maltamo M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1339–1366 [DOI: 10.1080/01431160701736489]
- Jaakkola A, Hyypä J, Kukko A, Yu X W, Kaartinen H, Lehtomäki M and Lin Y. 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6): 514–522 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002]
- Jiao Y T, Xing Y Q, Huo D, You H T and Zhao C Y. 2015. A review on full-waveform airborne LiDAR data processing and its application to forestry. *World Forestry Research*, 28(3): 42–46 (焦义涛, 邢艳秋, 霍达, 尤号田, 赵晨阳. 2015. 机载全波形LiDAR数据处理及林业应用研究综述. *世界林业研究*, 28(3): 42–46) [DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2015.03.005]
- Kaartinen H, Hyypä J, Yu X W, Vastaranta M, Hyypä H, Kukko A, Holopainen M, Heipke C, Hirschmugl M, Morsdorf F, Næsset E, Pitkänen J, Popescu S, Solberg S, Wolf B M and Wu J C. 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing*, 4(4): 950–974 [DOI: 10.3390/rs4040950]
- Kampe T U, Johnson B R, Kuester M and Keller M. 2010. NEON: the first continental-scale ecological observatory with airborne remote sensing of vegetation canopy biochemistry and structure. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1): 043510 [DOI: 10.1117/1.3361375]
- Kankare V, Liang X L, Vastaranta M, Yu X W, Holopainen M and Hyypä J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108: 161–171 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007]
- Koch B, Heyder U and Weinacker H. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(4): 357–363 [DOI: 10.14358/PERS.72.4.357]
- Lähivaara T, Seppänen A, Kaipio J P, Vauhkonen J, Korhonen L, Tokola T and Maltamo M. 2012. Bayesian approach to tree detection with airborne laser scanning//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 1641–1644 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351213]
- Larsen M, Eriksson M, Descombes X, Perrin G, Brandtberg T and Gougeon F A. 2011. Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 32(20): 5827–5852 [DOI: 10.1080/01431161.2010.507790]
- Li W K, Guo Q H, Jakubowski M K and Kelly M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(1): 75–84 [DOI: 10.14358/PERS.78.1.75]
- Liang X L and Hyypä J. 2013. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors*, 13(2): 1614–1634 [DOI: 10.3390/s130201614]
- Liang X L, Kankare V S, Hyypä J, Wang Y, Kukko A, Haggrén H, Yu X W, Kaartinen H, Jaakkola A, Guan F Y, Holopainen M and Vastaranta M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63–77 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006]
- Liang X L, Litkey P, Hyypä J, Kaartinen H, Vastaranta M and Holopainen M. 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2): 661–670 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2161613]
- Lin Y, Hyypä J and Jaakkola A. 2011. Mini-UAV-Borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3): 426–430 [DOI: 10.1109/LGRS.2010.2079913]
- Lindberg E, Holmgren J, Olofsson K and Olsson H. 2012. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research*, 131(6): 1917–1931 [DOI: 10.1007/s10342-012-0642-5]
- Liu L X and Pang Y. 2014. Applications of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning to forestry. *World Forestry Research*, 27(1): 49–56 (刘鲁霞, 庞勇. 2014. 机载激光雷达和地基激光雷达林业应用现状. *世界林业研究*, 27(1): 49–56) [DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.01.009]
- Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, Pang Y, Li S M and Tian X. 2011. Feature analysis of LIDAR waveforms from forest canopies. *Science China Earth Sciences*, 54(8): 1206–1214 [DOI: 10.1007/s11430-011-4212-3]
- Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, Pang Y, Tian X and Cao C X. 2010. Estimating biomass of individual trees using point cloud data of airborne LIDAR. *Chinese High Technology Letters*, 20(7): 765–770 (刘清旺, 李增元, 陈尔学, 庞勇, 田昕, 曹春香. 2010. LIDAR点云数据估测单株木生物量. *高技术通讯*, 20(7): 765–770) [DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2010.07.019]
- Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, Pang Y and Wu H G. 2008. Extracting height and crown of individual tree using airborne LIDAR data. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(6): 83–89 (刘清旺, 李

- 增元, 陈尔学, 庞勇, 武红敢. 2008. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠. 北京林业大学学报, 30(6): 83–89
- Maas H G, Bienert A, Scheller S and Keane E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1579–1593 [DOI: 10.1080/01431160701736406]
- Maltamo M, Eerikainen K, Pitkanen J, Hyyppä J and Vehmas M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90(3): 319–330 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.01.006]
- McElhinny C, Gibbons P, Brack C and Bauhus J. 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. *Forest Ecology and Management*, 218(1/3): 1–24 [DOI: 10.1016/j.foreco.2005.08.034]
- Meng X L, Currit N and Zhao K G. 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3): 833–860 [DOI: 10.3390/rs2030833]
- Morsdorf F, Meier E, Allgöwer B and Nüesch D. 2003. Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees//*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data. Dresden, Germany: ISPRS, 34-3/W13: 27–33
- Næsset E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 88–99 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00290-5]
- Næsset E, Bollandsås O M, Gobakken T, Gregoire T G and Ståhl G. 2013. Model-assisted estimation of change in forest biomass over an 11 year period in a sample survey supported by airborne LiDAR: a case study with post-stratification to provide “activity data”. *Remote Sensing of Environment*, 128: 299–314 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.008]
- Næsset E and Gobakken T. 2005. Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3/4): 453–465 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.001]
- Nagai M, Chen T E, Shibasaki R, Kumagai H and Ahmed A. 2009. UAV-borne 3-D mapping system by multisensor integration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3): 701–708 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010314]
- Nagai M, Shibasaki R, Manandhar D and Zhao H. 2004. Development of digital surface and feature extraction by integrating laser scanner and CCD sensor with IMU//*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Istanbul, Turkey: [s.n.]: 655–659
- Packalén P and Maltamo M. 2007. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 109(3): 328–341 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.01.005]
- Pang Y, Li Z, Ju H, Lu H, Jia W, Si L, Guo Y, Liu Q, Li S, Liu L, Xie B, Tan B and Dian Y. 2016. LiChy: The CAF's LiDAR, CCD and hyperspectral integrated airborne observation system. *Remote Sensing*, 8(5): 398 [DOI: 10.3390/rs8050398]
- Pang Y, Li Z Y, Chen E X and Sun G Q. 2005. Lidar remote sensing technology and its application in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3): 129–136 (庞勇, 李增元, 陈尔学, 孙国清. 2005. 激光雷达技术及其在林业上的应用. 林业科学, 41(3): 129–136) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2005.03.022]
- Pang Y, Li Z Y, Ju H B, Liu Q W, Si L, Li S M, Tan B X, Zhong K T, Lu H, Dian Y Y, Liu L X and Jia W. 2013. LiChy: CAF's LiDAR, CCD and hyperspectral airborne observation system//*Proceedings of the 13th International Conference on Lidar Applications for Assessing Forest Ecosystems*. Beijing: Chinese Academy of Forestry: 45–54
- Pang Y, Li Z Y, Tan B X, Liu Q W, Zhao F and Zhou S F. 2008a. The effects of airborne LiDAR point density on forest height estimation. *Forest Research*, 21(S): 14–19 (庞勇, 李增元, 谭炳香, 刘清旺, 赵峰, 周淑芳. 2008a. 点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影响. 林业科学研究, 21(增刊): 14–19) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2008.z1.003]
- Pang Y, Zhao F, Li Z Y, Zhou S F, Deng G, Liu Q W and Chen E X. 2008b. Forest height inversion using airborne lidar technology. *Journal of Remote Sensing*, 12(1): 152–158 (庞勇, 赵峰, 李增元, 周淑芳, 邓广, 刘清旺, 陈尔学. 2008b. 机载激光雷达平均树高提取研究. 遥感学报, 12(1): 152–158) [DOI: 10.11834/jrs.20080120]
- Popescu S C. 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, 31(9): 646–655 [DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.06.022]
- Popescu S C, Wynne R H and Nelson R F. 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1/3): 71–95 [DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00121-7]
- Reitberger J, Schnörr C, Krzystek P and Stilla U. 2009. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 561–574 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002]
- Roberts S D, Dean T J, Evans D L, McCombs J W, Harrington R L and Glass P A. 2005. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. *Forest Ecology and Management*, 213(1/3): 54–70 [DOI: 10.1016/j.foreco.2005.03.025]
- Strahler A H, Jupp D L B, Woodcock C E, Schaaf C B, Yao T, Zhao F, Yang X Y, Lovell J, Culvenor D, Newnham G, Ni-Miester W and Boykin-Morris W. 2008. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(S2): S426–S440 [DOI: 10.5589/m08-046]

- Tansey K, Selmes N, Anstee A, Tate N J and Denniss A. 2009. Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19): 5195–5209 [DOI: 10.1080/01431160902882587]
- Vaughn N R, Moskal L M and Turnblom E C. 2012. Tree species detection accuracies using discrete point lidar and airborne waveform lidar. *Remote Sensing*, 4(2): 377–403 [DOI: 10.3390/rs4020377]
- Vauhkonen J, Ene L, Gupta S, Heinzl J, Holmgren J, Pitkänen J, Solberg S, Wang Y S, Weinacker H, Hauglin K M, Lien V, Packalén P, Gobakken T, Koch B, Næsset E, Tokola T and Maltamo M. 2012. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85(1): 27–40 [DOI: 10.1093/forestry/cpr051]
- Wallace L, Lucieer A, Malenovsky Z, Turner D and Vopěnka P. 2016. Assessment of forest structure using two UAV techniques: a comparison of airborne laser scanning and Structure from Motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3): 62 [DOI: 10.3390/f7030062]
- Wallace L, Lucieer A and Watson C S. 2014a. Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(12): 7619–7628 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2315649]
- Wallace L, Lucieer A, Watson C and Turner D. 2012. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4(12): 1519–1543 [DOI: 10.3390/rs4061519]
- Wallace L, Musk R and Lucieer A. 2014b. An assessment of the repeatability of automatic forest inventory metrics derived from UAV-borne laser scanning data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11): 7160–7169 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2308208]
- Wallace L, Watson C and Lucieer A. 2014c. Detecting pruning of individual stems using airborne laser scanning data captured from an Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30: 76–85 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.010]
- Wang Y S, Weinacker H, Koch B and Sterenczak K. 2008. Lidar point cloud based fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV II. Beijing: [s.n.]: 45–51
- Yao T, Yang X Y, Zhao F, Wang Z S, Zhang Q L, Jupp D, Lovell J, Culvenor D, Newnham G, Ni-Meister W, Schaaf C, Woodcock C, Wang J D, Li X W and Strahler A. 2011. Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using ECHIDNA ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*, 115(11): 2965–2974 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.03.019]
- Yu A W, Stephen M A, Li S X, Shaw G B, Seas A, Dowdy E, Troupaki E, Liiva P, Poullos D and Mascetti K. 2010. Space laser transmitter development for ICESat-2 mission//Proceedings of the SPIE 7578, Solid State Lasers XIX: Technology and Devices. San Francisco, California, USA: SPIE: 757809 [DOI: 10.1117/12.843342]
- Yu X, Hyypä J, Kaartinen H, Maltamo M and Hyypä H. 2008. Obtaining plotwise mean height and volume growth in boreal forests using multi-temporal laser surveys and various change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1367–1386 [DOI: 10.1080/01431160701736356]
- Yu X W, Hyypä J, Kaartinen H and Maltamo M. 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 451–462 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.001]
- Yu X W, Hyypä J, Kukko A, Maltamo M and Kaartinen H. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(12): 1339–1348 [DOI: 10.14358/PERS.72.12.1339]
- Yu X W, Hyypä J, Vastaranta M, Holopainen M and Viitala R. 2011. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1): 28–37 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.003]
- Zhao F, Li Z Y, Wang Y S and Pang Y. 2008. The application of LiDAR data in forest. *Remote Sensing Information*, (1): 106–110, 53 (赵峰, 李增元, 王韵晟, 庞勇. 2008. 机载激光雷达(LiDAR)数据在森林资源调查中的应用综述. *遥感信息*, (1): 106–110, 53) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2008.01.021]
- Zhao J, Li J and Liu Q H. 2013. Review of forest vertical structure parameter inversion based on remote sensing technology. *Journal of Remote Sensing*, 17(4): 697–716 (赵静, 李静, 柳钦火. 2013. 森林垂直结构参数遥感反演综述. *遥感学报*, 17(4): 697–716)
- Zhao K G, Popescu S, Meng X L, Pang Y and Agca M. 2011. Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1978–1996 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.001]
- Zimble D A, Evans D L, Carlson G C, Parker R C, Grado S C and Gerard P D. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87(2/3): 171–182 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00139-1]
- Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, Abshire J, Bentley C, Brenner A, Bufton J, Dezio J, Hancock D, Harding D, Herring T, Minster B, Quinn K, Palm S, Spinhirne J and Thomas R. 2002. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics*, 34(3/4): 405–445 [DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00042-X]

## Review on forest parameters inversion using LiDAR

LI Zengyuan, LIU Qingwang, PANG Yong

*State Laboratory for Forest Remote Sensing and Information Techniques, Research Institute of Forest Resource Information Techniques of Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*

**Abstract:** LiDAR can be used to obtain forest spatial structure and terrain under canopy with high precision by transmitting laser energy and receiving returned signals. Full waveform LiDAR is able to record whole energy of returned signal and characterize vegetation vertical profile with sub-meter. Discrete return LiDAR records single or multiple echoes from stratified canopies. Spaceborne LiDAR usually configures laser profiling system with full waveform or photo counting technique to acquire single or multiple beams data under satellite orbit for vertical structure or change observation of forest at regional or global scale. Airborne LiDAR often use laser scanning system with discrete return or full waveform technique to obtain scan data within special FOV under flight trajectory for structure measurements of forest at stand or regional scale. Terrestrial LiDAR mainly carry laser scanning system with discrete return technique to get scan data within spherical space centered at observing station for detecting vertical structure of individual trees or forest stand. Inversion methods of individual tree parameters may be group into three category including CHM-based, NPC-based and voxel-based methods. CHM-based methods recognize tree tops by local maximum algorithm, and detects crown edges or crown main direction by region growth or image segmentation. NPC-based methods distinguish individual trees by spatial clustering or morphology algorithm. Voxel-based methods identify tree crown by region growth or spatial clustering algorithm in 3D voxel space. Forest stand parameters can be estimated using individual tree based or canopy height distribution based method. The features of canopy height distribution may be extracted from point cloud or full waveform. Multiple temporal LiDAR can be used to monitor forest growth, biomass change, structure changes caused by deforestation or disaster. It will be widely used in the field of operating organization or scientific research such as forest inventory, ecosystem modelling, etc. as the development of LiDAR technique.

**Key words:** LiDAR, forest, individual tree, forest stand

**Supported by** National Basic Research Program (973 Program)(No.2013CB733404, 2013CB733405)