

激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望

曹林, 余光辉*, 代劲松

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 随着全球气候变化的日益加剧, 森林生物量动态监测及碳储量定量估算日显重要。激光雷达技术可以准确地获取森林的三维结构信息, 与蓄积量和生物量等植被生物物理参数有很高的相关性, 对于区域生物量连续变化制图和碳储量估算有很好的应用前景。笔者介绍了激光雷达系统的组成和原理、不同形式的激光雷达数据生物量提取方法及估算模型, 重点分析了单木和林分两个级别的机载小光斑激光雷达系统的森林生物量获取方法。针对当前激光雷达系统获取森林生物量信息的局限性进行了探讨, 展望了未来多源遥感数据集成及激光雷达硬件革新。

关键字: 激光雷达; 森林生物量; 碳储量; 碳汇计量; 林业调查

Status and prospects of the LiDAR-based forest biomass estimation

CAO Lin¹, SHE Guanghui^{1*}, DAI Jinsong¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: With the increasing severity of climate change, biomass dynamic monitoring and carbon storage quantitative estimation have become more and more important. LiDAR (Light Detection And Ranging) can be used as a tool to accurately acquire three dimensional information of the forests, and usually has a high correlation with the biophysical parameters such as volume and biomass. It shows a sound application potential of regional biomass continuous mapping and carbon storage estimation. In this paper, the composition and principle of a typical LiDAR system are introduced; then various methods of biomass extraction and model fitting from different LiDAR data types are described; especially airborne LiDAR-based biomass estimations at the single tree and stand level. Finally, the limitation of biomass information extraction is discussed, and the future prospects of LiDAR development, such as the integration of data from various remote sensors and the most recent LiDAR hardware innovations, are presented.

Key words: LiDAR; biomass; carbon storage; carbon accounting; remote sensing; climate change; forest inventory

收稿日期: 2012-12-04 修回日期: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30571491)

第一作者: 曹林, 讲师, 博士生。通信作者: 余光辉, 教授。E-mail: ghshe@njfu.edu.cn

森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分，拥有全球 86% 的总植被碳储量，在维持全球生态环境及碳平衡中起着极其重要的作用^[1]。近年来，随着人类对全球气候变化的日益关注，各个尺度的森林生物量变化监测及碳储量估算日显重要。发达国家（如加拿大），在联合国气候变化框架公约（UNFCCC，United Nations Framework Convention on Climate Change）的倡议和东京议定书(Kyoto Protocol)的框架下，正在通过森林碳汇计量项目（FCAP, Forest Carbon Accounting Program）进行多时相多尺度的森林调查，其中包含大量森林生态系统碳储量监测方法和模型的研究^[2]。另一方面，发展中国家也有提交温室气体排放报告和节能减排的义务。我国已在《国家森林资源连续清查技术规定》补充技术规定中将全国主要树种的生物量组分作为第八次资源清查（2009-2013）的新增调查因子，并启动了多个清洁发展机制（CDM，Clean Development Mechanism）项目，加强了碳汇计量与监测方法学的研究。

遥感方法有效地减少了生物量调查和计量的人力和时间耗费，且在较高精度下保证了数据的空间完整性和时间一致性^[3]。传统的光学遥感技术通过处理分析卫星影像的像元亮度值，结合地面调查，从而间接估测较大区域的连续森林生物量分布，最后推算碳储量的变化。其不足之处在于对森林垂直结构分布只能提供有限信息^[4]；且在森林接近郁闭的地区，就算是森林复杂度变异程度很高，其光谱差异还是会趋于很小，从而导致从光学影像上提取的生物量，叶面积及蓄积信息呈现区域性光谱信号饱和^[5]。激光雷达（LiDAR，Light Detection and Ranging）是近年来发展迅速的主动遥感技术，用户可以自主设计数据获取时间和范围，并获取点云（Point clouds）高度、密度、分布、强度及波形信息，从而得到森林的三维结构参数。这些特性与擅长获取水平光谱信息的传统光学遥感互补，在森林生物物理参数反演、生物量及碳储量估测领域具有很好的应用前景^[6]。

1 激光雷达系统的组成和原理

激光雷达(LiDAR) 是通过发射激光束照射物体表面并分析其返回信号的一种主动遥感系统。通过 LiDAR 可获得高精度的高度信息，如提取数字高程模型（DEM，digital elevation model）垂直精度能达到 15cm 左右。LiDAR 系统由三部分组成(见图 1)，即激光系统（Laser system），用于精确测定距离；全球定位系统（GPS，Global Positioning System），用于决定地理位置和传感器高度（即 x_p, y_p, z_p ）；惯性导航系统（IMU，Inertial Measurement Unit），记录精确的传感器方位信息。LiDAR 系统通过计算每束发射激光到达地面并返回传感器的时间，（在已知光速的前提下）便可计算到地物的距离^[7]。

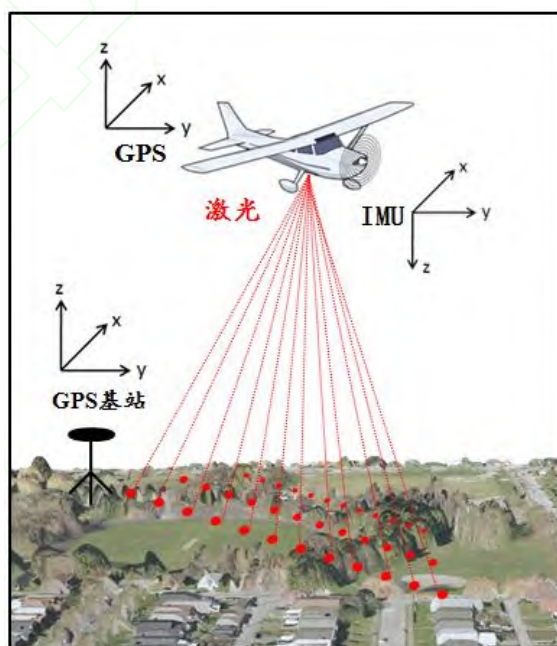


图 1 机载激光雷达系统的组成

Fig.1. The composition of airborne LiDAR system

根据数据获取的形式可将 LiDAR 系统分为离散回波 (Discrete return) 及全波形 (Full waveform) 系统, 也可进一步根据传感器原理分为剖面系统 (Profiling systems) 及扫描系统 (Scanning systems)。全波形系统往往具有较低空间分辨率和较高的连续垂直分辨率, 由 ICESat (Ice, Cloud and Laser Altimeter System) 卫星搭载的 GLAS 传感器 (光斑直径为 60~70 m, 光斑间隔为 170 m) 可以用于获取较大尺度的植被信息及空间建模, 并估算植被冠层高度及地上部分生物量^[8]。剖面激光雷达 (Profiling LiDAR) 固定了底点视角, 并沿着特定线路获取地物剖面高度。其获取的 LiDAR 剖面被用来代表森林调查区域^[9], 并通过插值法外推到区域尺度。此技术的优点在于价格较低, 易于推广; 不足在于缺乏空间细节, 难于展开对应的地面调查。

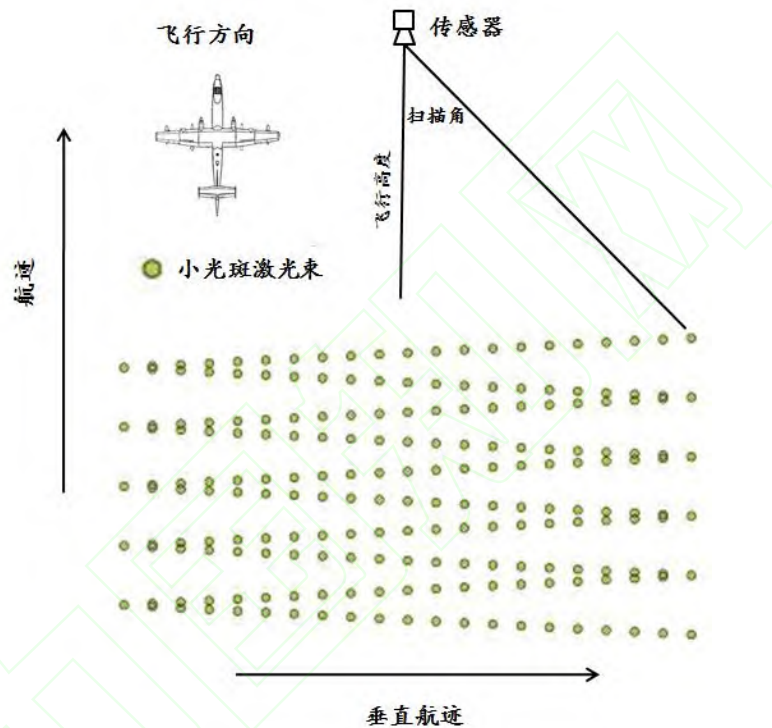


图 2 离散点云数据扫描原理

Fig.2. The scanning principle of discrete point clouds

近年来, 虽然星载大光斑激光雷达 (GLAS) 和剖面激光雷达研究取得很大进展, 但其在林业上的应用还是有所局限。目前, 林业 LiDAR 应用以机载平台为主, 常见的传感器为小光斑离散回波 LiDAR 系统。其光斑直径为 0.1~2.0 m, 通常为每束激光波 1-5 次回波, 并用于生成亚米级精度的地形高度数据^[10] (见图 2)。激光点云数据往往被分类为地面和非地面返回, 地面返回点往往借助不规则三角网, 邻近像元插值等算法生成数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model), 而植被高度信息则源于冠层高度模型 (CHM, Canopy Height Model), CHM 是非地面返回和 DEM 的差值^[11]。常用机载小光斑离散回波 LiDAR 的系统参数如表 1, 当飞行高度和速度为常量时, 高脉冲发射率的传感器能够产生更高的单位面积返回。

表 1 常用记载离散回波 LiDAR 系统参数对比表

Table 1. Comparison of the parameters of the discrete LiDAR systems

参数	ALS50-II (Leica)	Falcon III (TopoSys)	ALTM 3100EA (Optech)
类型	离散回波	离散回波	离散回波
最大脉冲重复频率 (kHz)	150	125	100
强度 (bits)	8	12	12
激光波长 (μm)	1.064	1.560	1.064
每束波的单位返回	4	9	4
扫描角 ($^\circ$)	$\pm 37.5^\circ$	固定 28°	$\pm 25^\circ$
飞行高度 (m)	200 到 6000	30 到 2500	80 到 3500

2. 激光雷达估测森林生物量

遥感技术通常被用来提取地上部分植被生物量，其提取方法可大致分为直接法和间接法。在运用直接法时，往往通过多元回归模型，k-NN分类及神经网络等构建遥感设备接收到的地物响应信号及生物量的关系。而非直接法则首先利用遥感直接估测森林参数，如树高，郁闭度，树种和森林类型等作为主要输入变量，然后利用这些变量估计林分平均直径，林分年龄和蓄积量等，最后将算得的蓄积量乘以特定的生物量扩散因子 (BEF, Biomass Expansion Factor) 从而得到生物量^[12]。森林的蓄积和生物量等是描述森林生态系统功能和生产力的重要生物物理参数^[13]，这些参数大都和森林的垂直结构(如冠层高)有很高的相关关系^[11]，而这些恰恰是激光雷达擅长获取的信息。从小光斑离散回波LiDAR数据中获取森林参数的过程可以分为单木和林分两个级别^[14]。

2.1 小光斑 LiDAR 单木生物量估测

2.1.1 高密度点云提取单木

当获取的小光斑LiDAR数据点密度很高时（如每平方米4~5次回波），借助可视化软件，往往可以目视识别树顶和冠幅边界^[15]。同时，也可以运用计算机算法自动提取每棵树的冠幅结构和属性信息，如树高，冠层高及冠幅直径等^[16]。单木级别所提取的植被三维信息往往不直接用来求算单株生物量，而是作为回归模型及正交验证的参数去估算样地尺度的森林信息，如平均高，胸径 (DBH)，单位面积胸高断面积等，并通过直接或间接法估算蓄积量和生物量。Popescu等基于小光斑LiDAR数据结合高分辨率多光谱影像，在提取单株树信息的基础上，构建模型估计了样地尺度的蓄积量，生物量，单位面积胸高断面积及胸径^[17]。其研究发现：落叶树生物量的最大决定系数为0.32（均方根误差为44Mg/hm²），松树为0.82（均方根误差为29Mg/hm²）；而对于蓄积量，落叶树生物量的最大决定系数为0.39（均方根误差为52.84m³/hm²），松树为0.83（均方根误差为47.9 m³/hm²）。刘清旺等采用高密度机载LiDAR数据（点间距约0.52m），运用双正切角树冠识别算法对重庆铁山坪林场的单株木提取了平均树高及冠幅^[18]。结果表明，单株木级别的树高和冠幅决定系数偏低（分别为0.34和0.03）；而样地级别决定系数较高（分别为0.97和0.71）。

2.1.2 较低密度点云提取单木

对于较低点密度环境下提取单株树的三维信息目前仍存在不确定性。Næsset等通过对苏格兰松和挪威云杉的研究也发现：1米左右的平均点距无法满足精确提取单木的冠层信息（如枝下高及冠幅宽度）的需要^[19]；Popescu等发现虽然低密度点云（点间距约0.7m）可以提取单木的树高，但是却很难提取其它冠层信息，如冠幅宽度等，尤其是在落叶混交林^[17]。赵峰等使用较低密度点云（每平方米约0.3个点）结合高空空间分辨率真彩色影像，运用面向对象、分树种树冠分割的方法进行了单株木的识别^[20]。结果表明此方法简单准确，由LiDAR数据生成的CHM辅助分类有利于提高分类精度，单木树高总平均精度达到74.89%，估测冠幅与实测冠幅间存在较好的相关性。

2.1.3 基于分割算法提取单木

除了从CHM中提取冠层信息外，还可以利用分割算法从原始激光点云数据中直接提取单木信息。Morsdorf等（2004）使用k均值聚类法（k-means clustering）根据LiDAR数据的x,y,z三维坐标进行单木识别^[21]；其主要操作步骤为：首先通过平滑滤波和形态识别窗体构建数字表面模型(DSM, Digital Surface Model)，然后通过局部最大值法从DSM中获得“种子”，最后将这些“种子”点用于聚类分析。Reitberger等（2009）运用归一化分割算法从LiDAR数据中提取单木冠幅^[22]。其使用的算法为：基于组内相似性和组间差异性的图像分割。依照这一原则，LiDAR点云被立体空间分割并通过节点和边界的形式显示。边界依据内部节点的距离和相似性被赋予权重，从而根据最小化权重和的组合节点和边界并构造单木。Yu等（2008）比较了3种不同技术，运用连续多年的LiDAR数据估测林分平均高和蓄积增长量^[23]。研究比较了样地尺度的百分位高（Percentile heights），数字表面模型高（DSM heights）及单木高，最终发现单木高制图最能解释森林的高度增长量。

2.2 小光斑 LiDAR 样地生物量估测

样地尺度的森林生物量提取往往通过从 LiDAR 获取的地物响应信息对比样地级别的森林汇总参数，借助统计模型构建两者之间的关系，然后估算样地级别的树高、胸高断面积、蓄积量、森林密度及地上部分生物量等^[24,25]。研究表明，这种映射关系在很多森林类型和结构上都是相当稳定的，原因在于这些 LiDAR 地物响应信息详细描述了森林的各个表面如冠层（叶片、树枝及主干等），故即使是较低点密度（1~2m 点距）的激光数据或垂直结构复杂的森林（如复杂多林层及明显的林下灌层），仍可以得出较好的统计相关性^[26]。

2.2.1 间接法估测样地生物量

在应用LiDAR数据估测生物量的研究中，间接法往往被采用，其常见推算流程为：首先基于LiDAR数据估算树高^[27]，然后运用树木蓄积量估算模型得到蓄积量^[28]，最终借助生物量扩展因子估测生物量。在激光雷达技术发展初期，Nelson等就曾使用剖面LiDAR获取参数估测美国南部松林的森林冠层高度，其中经过2个对数模型结合6个激光提取冠层信息的筛选，其最佳方程可以解释53%和65%的生物量及蓄积量变异^[27]；Lefsky等应用LiDAR估测的冠层结构来推算地上生物量及大面积碳储量，研究表明多元回归模型可以解释84%的变异^[29]；Popescu等借助更高密度点云数据进行模型拟合，计算结果解释了93%的生物量变异^[30]。Hyypä等应用多回波离散LiDAR数据提取了高质量的森林高度和结构信息^[31]。刘东起等利用较高密度LiDAR点云（每平方米大于2个点）采用间接法估测了小兴安岭凉水地区的森林蓄积量和生物量^[32]；该研究首先从LiDAR数据中提取树高，然后分别采用树高冠幅线性模型及树高曲线推算冠幅和胸径，在此基础上再推算蓄积（平均标准木法）和生物量（生物量转换因子）。Tokola将LiDAR技术和二阶分层抽样结合，

得到精度较高的生物量及碳储量估测模型,其均方根误差为均值的18%^[33]。Næsset 运用统计回归方法估测了地下(决定系数86%)和地上生物量(决定系数92%),这也是为数不多的利用LiDAR对地下生物量估测研究^[34]。

2.2.2 筛选最佳因子估测生物量

很多研究表明,林分高度、郁闭度和森林类型是估测生物量的最佳因子。Lefsky等的研究发现从激光数据中提取的植被表面结构参数(即高度和冠幅盖度)与生物量有很高的相关性^[35]。Colin等通过结合LiDAR提取高度百分位数、单木高度和冠层返回点密度等参数,基于样地数据,应用多元线性回归模型比较估测了加拿大BC省沿海北美花旗松大树的生物量^[36]。结果表明,结合点密度和样地平均高估测样地级生物量的决定系数为0.75,均方根误差29.68Mg/hm²;而点密度和单木高结合的估测结果反而较低(决定系数:0.71,均方根误差:31.95 Mg/hm²)。作者认为,这与LiDAR单木信息提取无法获得完整的大树复杂冠层信息有关。Li等通过比较了逐步回归,主成分变换及贝叶斯均值(BMA, Bayesian modeling averaging)法对3个研究区的LiDAR数据生物量估测^[37]。通过分别构建和比较回归模型,得出范围从0.67到0.88的决定系数。PCA运算结果表明:平均高,高度变异系数和冠层点密度在较大范围解释了绝大多数生物量变异;而在每个研究区,使用这三个预测变量的森林生物量模型也同样具有较高的决定系数。此研究结果有助于LiDAR生物量估测模型的因子筛选及模型简化,使其生物学原理更易于解释。何祺胜等在单木结构参数提取的基础上应用多元逐步回归分析法,建立了样地尺度上LiDAR估测的平均树高、冠幅等与实测的林分平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量等之间的统计回归关系^[38]。其研究结果表明,林分平均高、林分算术平均高、地上生物量的估测方程精度较高,决定系数(> 0.7),而平均冠幅、平均胸径、林分密度的估测方程决定系数略低(> 0.5)。

2.2.3 估测森林组分生物量

Lim等利用机载离散回波LiDAR对加拿大东部不同年龄的成熟及过熟林生物量组分进行了估算^[11]。通过LiDAR百分位高度拟合模型,每个模型的决定系数都大于0.8。地上总生物量,主干生物量,树皮,树枝及叶片生物量的均方根误差分别为8.1,5.1,2.9,2.1和1.1Mg/hm²;Fu等从LiDAR数据中提取了树冠高度变量组和植被密度变量组作为自变量,采用逐步回归方法进行自变量选择并构建模型^[39]。其分析建立在云南省中部78块样地调查数据的基础上,探讨了加权平均高预测模型和生物量预测模型。其地上生物量估测结果为针叶林($R^2=0.68$, $SE=1.53$ Mg/hm²)优于阔叶林($R^2=0.43$, $SE=1.58$ Mg/hm²),混交林的生物量与激光雷达数据则没有明显相关性;庞勇等运用树冠高度变量组和植被密度变量组对小兴安岭温带森林典型森林类型的树叶、树枝、树干、地上、树根和总生物量等组分的生物量进行了估测^[40]。通过逐步回归方法选择自变量,结果表明:就地上生物量而言,针叶林($R^2 = 0.95$) > 阔叶林($R^2 = 0.88$) > 混交林($R^2 = 0.80$);混合类型的各部分生物量估测与地面实测值显著相关($R^2 > 0.6$),而区分森林类型分别建模则可进一步提高估测精度。

2.3 大光斑全波形LiDAR生物量估测

大光斑全波形卫星数据ICESat/GLAS是估测大尺度生物量参数和冠层高度的有力工具。与机载激光雷达相比,应用GLAS做生物量信息提取的研究要少得多,但是ICESat的发射及相应研究对未来LiDAR技术的发展有着极其重要的意义^[41]。Lefsky等结合GLAS波形和STRM(Shuttle Radar Topography Mission)地形数据,估算了巴西热带阔叶林,美国田纳西州的温带阔叶林以及俄勒冈州的温带针叶林的最大树高^[42]。结果表明,模型解释了59%~68%冠层高度(均方根误差:4.85和12.66m);另外,基于LiDAR估测的巴西热带阔叶林地上部分生物量较高($r^2 = 73%$, $RMSE = 58.3$ Mg/hm²)。Pang等以中国东北温带森林为研究对象,采用了森林高度法和近重复观测法分析GLAS波形数据^[43]。结果表明:夏季GLAS波形获得的植被冠层

回波较好；秋季早期虽然强度降低，但依然有足量的回波信息；春季和晚秋数据具有较少的植被冠层返回信号以至难以估测树高。Sun等基于GLAS估测了森林生物量，结果表明GLAS所获得75%百分位高度和LVIS（Land, Vegetation, and Ice Sensor）数据75%百分位高度的决定系数为0.82，和LVIS数据50%百分位高度的决定系数为0.83^[44]。在这之前，Drake等已研究发现了LVIS的50%百分位高度和森林生物量有很高的相关性，此研究再次证明了GLAS估测生物量具有很大潜力^[45]。除以上研究外，大光斑卫星数据估测生物量的大多在北亚寒带的森林系统进行，如北欧以云杉和松树为主的森林。

3 LiDAR 估测森林生物量的局限及展望

LiDAR可以精确地获得高度、地形和植被的垂直信息，且与很多森林生物物理参数有很好的相关关系；在估算生物量高的地区，LiDAR也不会出现传统光学遥感信息饱和的“瓶颈”。但任何单一的遥感技术都存在其局限，LiDAR也不例外：1）至今机载LiDAR数据成本依然很高，很难覆盖大区域；2）星载激光虽幅宽很大，但太大的光斑会受到林下地形和树木空间结构的影响，降低植被信息估测精度^[46]；3）虽然可以通过高密度点云提供的结构信息区分森林类型，但由于LiDAR无法获得植被的光谱信息，故分类精度较低；至于树种的区分就更难了。4）由于缺乏历史数据，基于LiDAR的森林生物量的多时相动态监测难于实施。

许多研究表明，多传感器的集成应用能够较好地解决以上问题^[28]。LiDAR和光学数据的结合综合了森林结构和光谱信息，可以提高树种识别能力^[47]。Chen等利用统计方法分别从LiDAR剖面中获取高度信息，从快鸟影像上提取地物信息，并把将高度信息加入到快鸟影像进行区域连续信息提取，从而得到较高的区域估算精度^[48]。董立新等通过集成激光雷达GLAS与ETM联合反演，建立了复杂地形条件下森林地上生物量神经网络反演模型，制作了研究区森林地上生物量分布图^[49]；庞勇等结合机载激光雷达、星载激光雷达和成像光学遥感等数据进行大湄公河次区域的森林地上生物量估测，结果表明星-机-地协同观测数据可以有效地估测森林地上生物量^[50]。

LiDAR并不是全天候的，其“可视”范围受LiDAR传感器的电磁波谱范围制约（通常在红外波段，如1064nm）。虽然可以处理薄雾，但在雾天无法“穿透”森林。而同属主动遥感技术的雷达（RADAR, RAdio Detection And Ranging）可以穿透云层、薄雾、尘埃等，在几乎所有的气候和环境条件下获取数据；通过设置不同的发射波波长，也可返回不同层次的森林参数，如树冠，叶片信息（X和C波段），树干及主枝（L波段）等。LiDAR与RADAR数据的结合使用，不仅可以降低成本并获得连续较大区域植被生物量信息；且可以发挥RADAR的长波优势（范围约为1cm - 1m，可获取地物表明粗糙度、电介质特性及湿度信息），实现互补。Banskota等测试了集成BioSAR数据和LiDAR数据估测生物量的方法，结果表明数据集后的精度大幅提高： R^2 在0.76-0.8^[51]；Hyde等利用低频BioSAR数据集成LiDAR估测松树生物量：最佳多变量RaDAR模型 R^2 为81%，最佳单变量模型 R^2 为93.3^[52]。

在当前应用中，小光斑离散回波LiDAR系统估算的树高往往偏低。故实际操作时，需要降低飞行高度，增大采样密度，从而增加了费用^[46]。但未来激光雷达技术的不断提升，硬件革新和改进算法将解决这一问题。Leica和Riegl公司的最新多脉冲技术大大增强了点密度，这使得估测单木高度和冠层容量的精度提高，也将提高估算生物量的精度。未来，全波形机载激光雷达高密度系统能产生每平方米多于20个点的高密度点云；多角度（Multiple Look Angles LiDAR）系统能基于不同的发射方向提高单木的勾绘能力和树冠体积的估测。这些新技术大大提升LiDAR可提取的信息种类；强度信息（Intensity）也将作为重要的数据信息更加受到关注，尤其在树种识别领域。Flash LiDAR将在未来从高空获取大区域的高密度点云数据^[53]；而SAL量子计算系统将提升操作距离并提供增强建模的方式。Morsdorf等尝试了利用多波长LiDAR（Multi-wavelength LiDAR）数据估测生物量，通过模拟和验证，评估了多光谱全波形LiDAR数据及虚拟林分技术估测生物量（Photosynthetically active biomass）的能力，结果表明多波长LiDAR能够很好地提高估测生物量的精度^[54]。

致谢 加拿大UBC大学集成遥感实验室IRSS（Integrated Remote Sensing Studio）的Colin Ferster博士，Martin

Van Leeuwen博士及Olivier Tsui对此论文文献收集和分类给予很大帮助，在此表示衷心感谢！

参考文献

- [1] Olson J. S., Watts J. A., Allison L. J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems[R]. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. 1983:15-25.
- [2] Kurz, W.A., Dymond, C.C., White, T.M., et al. A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (4): 480 - 504.
- [3]Wulder, M.A., White, J.C., Stinson, G, et al. Implications of differing input data sources and approaches upon forest carbon stock estimation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010,166 (1 - 4): 543 - 561.
- [4]Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O., et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality[J]. *Environmental Research Letters*,2007, 2 (4): 1 - 13.
- [5]Duncanson, L., Niemann, K., Wulder, M., Integration of GLAS and Landsat TM data for aboveground biomass estimation[J].*Canadian Journal of Remote Sensing*,2010,36 (2): 129 - 141.
- [6]李德仁,王长委,胡月明,等.遥感技术估算森林生物量的研究进展.[J]*武汉大学学报(信息科学版)*,2012,37(6):631-635.
- [7]Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation (6th Edition)* [M].New York:Wiley Desktop Edition.2008:701-802.
- [8]Lefsky, M.A., D.J. Harding, M. Keller, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters* 2005.
- [9]Nelson, R., M. Valenti, A. Short et al. A multiple resource inventory of Delaware using airborne laser data[J]. *BioScience*, 2003, 53: 981-992.
- [10]Blair, J.B., D.L. Rabine, M.A. Hofton. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography [J].*ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54: 115-122.
- [11]Lim, K., P. Treitz, M.A. Wulder, et al. LiDAR remote sensing of forest structure[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27: 88-106.
- [12]Chóidez, J.J.N., Allometric equations and expansion factors for tropical tree forest trees of eastern Sinaloa, Mexico[J]. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2009, 10 (1): 45 - 52.
- [13]Dubayah, R.O., Drake, J.B.. LiDAR remote sensing for forestry[J]. *Journal of Forestry*, 2000, 98 (6): 44 - 46.
- [14]Reutebuch, S.E., H.E. Andersen, R.J. McGaughey. Light detection and ranging (LIDAR): An emerging tool for multiple resource inventory[J]. *Journal of Forestry*, 2005, 103: 286-292.
- [15]Andersen, H.E., S.E. Reutebuch, R.J. McGaughey. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LiDAR and conventional field methods[J].*Canadian Journal of Remote Sensing*, 2006, 32: 355-366.
- [16]Popescu, S.C.,R.H. Wynne. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70: 589-604.
- [17]Popescu, S.C., R.H. Wynne , R.F. Nelson. Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003,29: 564-577.
- [18]刘清旺, 李增元, 陈尔学等. 利用机载激光雷达提取单株木树高与树冠 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30 (6) : 83 - 89.

- [19] Næsset, E., T. Økland. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 105–115.
- [20] 赵峰. 机载激光雷达数据和数码相机影像林木参数提取研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [21] Morsdorf F, Meier E, Koetz B, et al. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92:353–362.
- [22] Reitberger J, Schnörr C, Krzystek P et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2009, 64:561–574.
- [23] Yu X, Hyypä J, Kaartinen H, Maltamo M et al. Obtaining plotwise mean height and volume growth in boreal forests using multi-temporal laser surveys and various change detection techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29:1367–1386.
- [24] Popescu, S.C., R.H. Wynne. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70: 589–604.
- [25] Coops, N.C., T. Hilker, M.A. Wulder, et al. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR[J]. *Trees: Structure and Function*, 2007, 21(3): 295–310.
- [26] Reutebuch, S.E., H.E. Andersen, R.J. McGaughey. Light detection and ranging (LIDAR): An emerging tool for multiple resource inventory[J]. *Journal of Forestry*, 2005, 103: 286–292.
- [27] Nelson, R., Krabill, W., Tonelli, J., Estimating forest biomass and volume using airborne laser data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24 (2):247 – 267.
- [28] Straub, C., Dees, M., Weinacker, H., et al, Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands[J]. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2009, 30 (3):277 – 287.
- [29] Lefsky, M.A., W.B. Cohen and T.A. Spies. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon[J]. *Canadian Journal of Forest Research*. 2001, 31: 78–87.
- [30] Popescu, S.C., Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31 (9): 646 – 655.
- [31] Hyypä, J., Hyypä, H., Yu, X. et al, Forest Inventory Using Small Footprint Airborne Topographic Laser Ranging and Scanning Principles[J]. CRC Press, Boca Raton, 2009, pp. 335–370.
- [32] 刘东起, 范文义, 李明泽. 利用小光斑激光雷达估测林分参数和生物量[J]. *东北林业大学学报*. 2012, 40(1):39-43.
- [33] Tokola, T., Development of Forest Resource Assessment Design for Lao PDR. Report to the Ministry of Agriculture and Forestry of Lao PDR, Vientiane 2009, 8.
- [34] Næsset, E. Estimation of Above- and Below-Ground Biomass in Boreal Forest Ecosystems[C]. In M. Thies, B. Kock, H. Spiecker & H. Weinacker, *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Freiburg, Germany: International society of photogrammetry and remote sensing, 2004:145 – 148.
- [35] Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D. et al, Remote sensing of aboveground biomass in three biomes. *International archives of the Photogrammetry*[J]. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2001, 34:155 – 160.
- [36] Colin J. Ferster, Nicholas C. Coops, J.A. (Tony) Trofymow. Aboveground large tree mass estimation in a coastal forest in British Columbia using plot-level metrics and individual tree detection from lidar[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2009, 35(3): 270-275.
- [37] Li, Yuzhen; Andersen, Hans-Erik; McGaughey. A Comparison of Statistical Methods for Estimating Forest Biomass from Light Detection and Ranging Data[J]. *Western Journal of Applied Forestry*, 2008, 23(4):223-231.
- [38] 何祺胜, 陈尔学, 曹春香, 等. 基于LiDAR数据的森林参数反演方法研究[J]. *地球科学进展*, 2009, (7):748-755.
- [39] Fu T, Pang Y, Huang QF et al, Subtropical forest parameters estimation using airborne Lidar data[J], *Journal of Remote Sensing*, 2001, 15:1092–1098.
- [40] 庞勇, 李增元. 基于机载激光雷达的小兴安岭温带森林组分生物量反演[J]. *植物生态学报*, 2012, 36 (10): 1095 – 1105.
- [41] Nelson RF. Model effects on GLAS-based regional estimates of forest biomass and carbon[R]. 17–19 September,

Edinburgh ,SilviLaser, 2008:207–215

[42] Lefsky, M., Harding, D., Keller, M., et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. *Geophysical Research Letters*,2005: 32 (22).

[43] Pang, Y., Lefsky, M., Sun, G., et al. Temperate forest height estimation performance using ICESat GLAS data from different observation periods[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,2008, 37 (Part B7): 777 - 782.

[44] Guoqing Sun, Z. Guo, W. Ni et al. Radar and lidar synergy studies by model simulation[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008:1413-1418.

[45] Drake JB, Dubayah RO, Clark DB, et al, Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR. *Remote Sensing of Environment*,2002,79:305–319.

[46] 庞勇,李增元, 陈尔学, 等.激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. *林业科学*,2005,41(3):129-136.

[47] Holmgren, J., Persson, A., Soerman, U.,Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images[J]. *International Journal of Remote Sensing*,2008: 29 (5), 1537 - 1552.

[48]Chen, G., Hay, G., Modeling large-area canopy surface heights from lidar transects and quickbird data[R]. College Station, Texas, USA ,SilviLaser, 2009: 202 - 209.

[49] 董立新, 吴炳方, 唐世浩. 激光雷达GLAS 与ETM 联合反演森林地上生物量研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011,47(4):704-710.

[50] 庞勇, 黄克标, 李增元.等, 基于遥感的涪公河次区域森林地上生物量分析[J].*资源科学*, 2011, 33 (10) : 1863-1869.

[51] Banskota, A., Wynne, R.H., Johnson, P., Emessiene, B., Synergistic use of very high-frequency radar and discrete-LiDAR return for estimating biomass in temperate hardwood and mixed forests[R]. 14 - 16 October, College Station, Texas, USA, Silvilaser, 2009: 81 - 87.

[52] Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D. et al, Exploring LiDAR - RaDAR synergy —predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR, and InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*,2007,106 (1): 28 - 38.

[53] Steinvall, O., Chevalier, T., Larsson, H., et al, Internationell utvecklinginom 3D-laerradaromradet. Technical Report[R], 2008,October.

[54]Morsdorf, F., Nichol, C., Malthus, T.,et al. Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral waveforms by radiative transfer modelling[J]. *Remote Sensing of Environment*,2009,113 (10), 2152 - 2163.