

机载激光雷达全波形数据与系统 点云差异的定量分析

卢 昊¹ 庞 勇¹ 徐光彩¹ 李增元¹

1 中国林业科学研究院资源信息研究所,北京,100091

摘 要:目前常用的小光斑机载 LiDAR 波形数据与系统点云数据的来源相关性较大,波形数据的优势难以严格定量地评价和比较。Leica ALS60 机载 LiDAR 系统记录的全波形数据与点云数据相对独立,点云数据来自硬件系统脉冲探测方法,而波形数据是未加处理的原始回波序列。本文对原始波形数据进行分解获取发射脉冲的全部回波,与系统探测点云进行了定量对比,并选取典型林区和城区数据,得到波形在两种地物类型中垂直信息获取能力的定量表征参数。结果表明,波形数据对不同地物类型均能丰富垂直结构信息和提高点云垂直分辨率,且这种提高在林区表现优于城区人工建筑和裸地;激光对树木冠层的穿透能力更明显地表现在回波波形信息中,相较于传统点云激光雷达,全波形 LiDAR 在森林垂直参数获取方面潜力更大。

关键词:全波形;点云;LiDAR;高斯分解;垂直结构;统计决策树;量化;信息熵

中图法分类号:P237.3; TP751 **文献标志码:**A

机载激光雷达是国际上发展迅速的一种主动遥感技术^[1],正被广泛应用于测绘、林业^[2]、数字城市、应急减灾、环境监测等领域。相较于传统的航空摄影测量技术,激光雷达的一大特征是可以直接获取地物的三维坐标信息^[3]。全波形机载激光雷达在传统激光雷达的基础上,增加了全数字化波形记录技术^[4],可以实时地记录全部或部分激光反射回波的波形量化信息^[5]。全波形机载激光雷达最初从大光斑激光雷达系统开始发展,主要有 NASA 机载的 LVIS 系统、SLICER 系统等,近年来开始引入机载小光斑 LiDAR 设备。从信息量的角度看,激光点云所包含的地物信息只是全数字化波形所含信息的一个子集,直接从波形出发进行激光信号的处理和信息挖掘,可以获取更为丰富的定量参数。目前对于波形数据的处理方法主要有高斯分解、反卷积等^[6]。但从技术手段上讲,由于不同厂家对全波形数据采集的方法、后处理的程度和提供给用户的数据形式不同,全波形数据处理的研究目前仍局限于特定设备与数据源的波形分解和使用,而如何从定量的角度评估传统激光雷达点云数据与全波形数据在对地物信息的采样与还原重建和垂直参数反演上的能力,尚缺乏相应的研究。

目前常用的几种商业机载激光雷达系统数据获取的技术手段不同,导致激光雷达点云的生成途径也有区别。例如 Leica ALS60 机载激光雷达系统直接记录点云数据,而 RIEGL LMS Q 系列的激光雷达在工作时并不直接记录激光点云,而只记录全部的全波形数据,点云必须在数据后处理中通过厂家配套的商业软件进行波形分析得到,同时这些软件提供了对应航线的波形数据供用户进行使用^[7]。对于全波形数据源,虽然可以同时获取地物的点云与激光回波波形,但由于点云本身来自于后处理波形,两者信息相关性较大,而且提供给用户的波形数据本身已经进行了地理编码与校正,用户再使用自定制的波形分析方法已很难得到更多有用的信息,在此基础上对两种数据源的信息进行评估比较已失去意义。

针对这些问题,本文利用 Leica ALS60 直接记录的点云数据(称为系统点云)和实时记录的相应全波形数据(对应点云称为“分解点云”),设计了一种实现定量对照的研究方法,比较了由激光雷达系统直接记录的点云与全波形数据分解得到的点云在三维垂直信息表达上的能力,同时以典型城区和林区数据为样本对比了全波形数据信息提取的优势。

收稿日期:2013-08-29

项目来源:国家 973 计划资助项目(2013CB733404,2013CB733406);国家 863 计划资助项目(2012AA12A306)。

第一作者:卢昊,博士生,现从事全波形机载激光雷达软件研发与森林参数反演方面的研究。E-mail:luhao_rs@gmail.com

1 数据处理与评估方法

为了保证研究的准确可靠,本文设计了从原始波形数据处理到点云定量对比与统计研究的过程(见图1)。

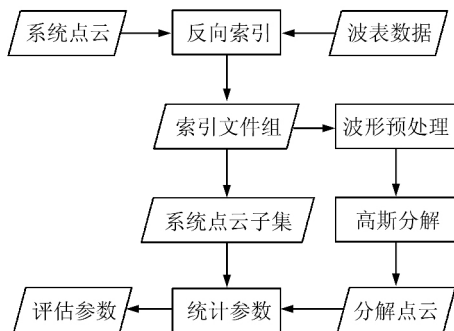


图1 总体技术流程

Fig. 1 Overall Technical Procedure

1.1 实验数据

实验数据为2012年8~9月利用激光雷达传感器在大兴安岭林区进行机载实验采集所得。使用国产运-5小型多用途飞机作为遥感平台,飞行相对速度约180 km/h,飞行相对航高为1 500~2 500 m。实验区域位于大兴安岭中部,大致范围为120.5°E~124°E,50.3°N~53°N,覆盖了大面积的林地与部分城镇。

使用的激光雷达系统为Leica ALS60,该系统的最高扫描频率为200 kHz,最大视场角为75°。由于系统在空中工作时实时记录激光反射信号的距离、方位与强度等信息,同时以一定的采样比例单独记录回波的波形采样信息,所以提供的点云数据反映了传统激光雷达系统实时探测信号的方法对反射激光脉冲的信号提取能力,与波形数据之间的独立性较高。直接获取的系统点云密度约为4 pts/m²。使用高斯分解方法,可以获取波形数据包含的三维点云信息,并可以与相应的系统点云进行严格定量的对比。由于该设备受存储技术限制,只对大约一半的系统点云记录了波形数据,这个属性反映在点数据的相关字段中。通过判断点数据是否关联波形信息,将系统点云分类并选取关联波形作为定量对比的对象(见图2)。

为了评估全波形激光雷达在不同行业的应用潜力,本文从实验数据中分别提取了100万条来自城区和林区的波形数据,作为不同地物类型之间的对照。每个波形数据包有128个采样,每个采样的时间间隔为1 ns,故整个波形代表了约

19.2 m的脉冲方向距离。

1.2 点云与波形数据的关联

ALS60采集的数据经过坐标转换等后处理,系统点云和波形数据以LAS1.3格式^[8]存储在文件中。LAS1.3格式规范在旧版本的基础上增加了对波形数据的支持,波形数据以扩展变长记录的方式挂载在文件末尾,并在点云数据段中增加了点数据到所属波形的映射字段。通过访问一个激光点的数据,能以映射字段为线索访问到与该点关联的脉冲波形,但无法直接从波形数据出发获取系统点云中与该波形对应的点数据。因此,本文将系统点云与波形信息相关联,并在索引文件中对应该波形的的位置标识了该点的文件位置,将波形数据包、关联系统点云与索引信息存储到索引文件组中。这种访问方式可以从波形数据快速访问与该脉冲关联的系统点云,便于快速实施波形分解与系统点云的定量计算。

1.3 波形预处理与波形分解

波形预处理可消除波形采样信息中存在的噪声信号^[9]。由于每个波形数据仅代表19.2 m的沿脉冲距离,而在实际工作环境中不考虑异常噪声点的情况下,可穿透地物的分布范围通常小于这个长度。根据此规律,采用一种波形振幅排序取 N 分位点幅值作为去噪阈值的方法,实验中取 $N=50\%$ 剔除了整体的噪声幅值。对一次去噪后的波形计算每个连续不为零的子波形段,并剔除振幅方差小于阈值 $\Sigma=1$ 的区段。对去噪后波形进行一次高斯平滑,以消除波形采样的高频噪声。

波形分解是从波形数据出发求解点云信息的方法之一^[10]。波形高斯分解的效率和准确性与初始参数的选取有很大关系。波形分量初始位置的探测方法主要有简单阈值法、局部极大值法、重心法、二阶导数零点法等^[11-13],本文改进了二阶导数零点法,使用二阶导连续负区间的特征标识波形的初始分量,该方法有效克服了波形离散采样无法准确计算二阶导数零点且无法保证零点严格配对的缺陷,在实际处理中表现出较好的适应性。确定初值后的波形分量经Levenberg Marquard算法迭代优化后达到对预处理后波形的最小二乘拟合。高斯分解得到的波形分量经过点云坐标解算即可获得由波形分解得到的点云大地坐标以及其他属性数据。

1.4 波形分解结果与系统点云的定量对比

得到波形分解的结果后,由原始数据得到如图2所示的数据子集。其中, P_3 表示由相应的全波形信号分析获取的地物回波信号, P_2 表示对应

的由激光雷达系统通过自身探测方法获取的地物回波信号。

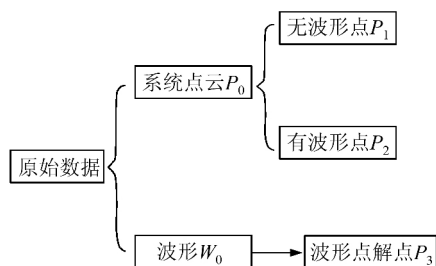


图2 实验数据成分

Fig. 2 Experimental Data Components

为定量评估两者所含信息量以及在地物垂直结构上的信息表达能力,本文设计了一种基于统计方法的决策树来进行参数化评估:对存在多次回波信号的激光脉冲计算相邻回波之间的高程差值 ΔZ ,以有效考察激光雷达的重要性能参数探测空窗在仅有系统点云和存在全波形数据时,在不同工作环境中时的表现。统计决策树方法如图3所示。

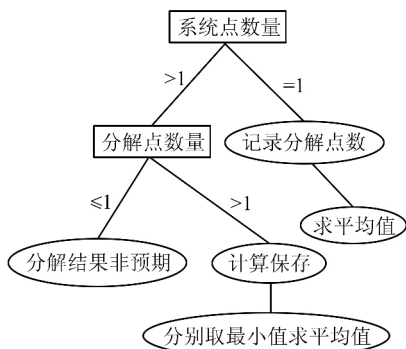


图3 统计决策树

Fig. 3 Statistical Decision Tree

需要指出的是,图3中“分解结果非预期”反映了波形数据不能分解出回波分量或者分量个数小于系统点云的情况。这是由于 Leica ALS60 一般只能记录 128 个波形采样,当激光脉冲打到高空物体上时,理论上的全波形无法被完整记录,导致波形数据的有效波形信息被截断或全部为噪声,无法进行正确的波形分解。100 万条波形中该类波形不超过 200 条,并不影响总体的算法实施和结果分析。

2 结果与分析

将数据样本进行统计分析分别得到两种数据

在两种地物类型下的评估参数(见表1)。

表1 总体评估参数

Tab. 1 Overall Parameters Evaluation

参数	城区	林区
100 万条波形关联系统点数	1 134 185	1 240 654
100 万条波形分解点数	2 051 938	2 366 072
波形分解点数/系统点数	1.809	1.907
同一脉冲内系统点平均最小垂直间隔距离/m	7.605	7.743
同一脉冲内波形分解点平均最小垂直间隔距离/m	1.876	1.859

从表1中可以看出,林区的波形分解得到的点云数量明显高于城区,分解点/系统点比率也大于城区,这反映了波形数据的信息载荷与地物类型有直接关系,由于激光在林区植被中的穿透力更强^[14],所以林区数据中的回波次数更多,相比于城区数据更能体现出全波形信息的优势。总体而言,在两种地物类型中,波形分解得到的点云都明显高于系统实时探测方法获取的点云数量。同一脉冲内的点云平均最小垂直间隔距离反映了激光雷达在垂直方向上的测量分辨率,代表其在连续两次信号探测之间的探测空窗。从表1中可以看出全波形信息将该分辨率从 7.6 m 以上减小到 1.9 m 以下,增强了对于空间细节信息的探测率。

表2给出了对两种地物类型,相同数量的激光脉冲在不同信号探测方法时的回波次数分布情况。可以看出,Leica ALS60 系统最多只能检测到 4 次回波,而由相应的波形分解方法可以检测出 8 次回波信号。在城区地物中,波形分解结果以 2 次回波为最多,高次回波数量明显低于林区植被;而林区植被的回波信号中,2 次回波数量低于城区,但高次回波的数量很大,且呈缓慢下降趋势。一般而言,激光脉冲与植被发生交互作用时,可以探测到树冠顶层的首次回波与穿透到地面造成的末次回波,超过 2 次的回波发生在植被冠层内部的枝叶与树干,可以反映出植被的垂直分布结构。表2很好地反映了该特征,说明全波形信号更适合对植被区域进行垂直参数提取。

表3反映了系统点云与波形分解点云在其脉冲回波中的分布情况。通过比较城区与林区两种点云的数量分布可以看出与表2类似的特征:相比于系统点云,波形分解可以探测到大量的高次回波以填补缺失的垂直结构信息;相比于城区数据,林区数据中的分解点云有更大的部分为高次回波信号。

表 2 波形数量随回波次数分布

Tab. 2 Distribution of Waveform Counts by Number of Returns

回波次数		1	2	3	4	5	6	7	8
城区	系统点云	870 226	125 249	4 459	21	0	0	0	0
	波形分解点云	295 990	479 354	130 544	68 426	22 173	3 245	215	8
林区	系统点云	771 679	215 909	12 215	128	0	0	0	0
	波形分解点云	264 916	354 750	199 148	122 338	48 648	9 329	770	32

表 3 属于第 N 次回波的点数量分布

Tab. 3 Distribution of Point Counts Belonging to the Nth Return

第 N 次		1	2	3	4	5	6	7	8
城区	系统点数	999 955	129 729	4 480	21	0	0	0	0
	分解点数	999 955	703 965	224 611	94 067	25 641	3 468	223	8
林区	系统点数	999 931	228 252	12 343	128	0	0	0	0
	波形点数	999 931	735 015	380 265	181 117	58 779	10 131	802	32

表 4 中参数反映了当激光束打在穿透性地物上时,在通过系统自身探测方法只能获取首次反射回波的情况下,波形数据仍然可以恢复出多次反射信号。相比于植被较少的城区,激光穿透林地冠层造成的高次回波数量更大,对植被垂直结构的获取尤为有利。

表 4 系统点云为单回波时波形分解点数量分布

Tab. 4 Distribution of Decomposed Point Counts When System Detects Single Return

回波数量	1	2	3	4	5	6	7	8
城区	295 655	463 346	79 792	24 557	6 018	801	52	5
林区	263 588	328 953	114 990	45 864	15 186	2 831	258	9

通过统计同一脉冲在两种数据中表现出的回波探测能力,可以得到波形数量在两种数据上的分布矩阵如图 4 所示。其中,平面维度表示系统点云和分解点云中的 1~8 次回波,纵坐标表对应该情形的波形数量。可以看出,地物类型直接影响了激光脉冲的响应,并反映在脉冲回波的内部参数中。总体而言,该矩阵内数据的分布重心集中于波形分解点一侧。系统探测到 $N=$

$\{1,2,3,4\}$ 个回波信号时,波形分解可以检测到 1~8 次不等的回波,且波形数量分布的最大频率值对应的波形分解点数量总是大于 N 。该关系矩阵反映了全波形数据对于激光脉冲信号探测率的还原能力,从一个侧面反映出原始系统的探测方法下回波信号的丢失,可以作为评估激光雷达性能的一个重要参考,这是传统激光雷达只获取点云数据的条件下无法实现的。相对于城区数据,林区数据关系矩阵的重心偏向高次回波的分解点云,该特征与前文的结论一致。

利用 § 1.4 节中的统计决策树方法对同一脉冲内点云的垂直空间分布进行统计,可以定量评估系统点云与波形分解点云在垂直方向上的信息载荷。图 5 表示了在两种地物类型中,波形分解点云与系统点云在脉冲内的分布特征。其中,横轴表示脉冲内相邻回波的垂直间隔 ΔZ ,纵轴表示该 ΔZ 的数量。

可以看出,在波形数量相同的情况下,可得出以下结论。

1) 林区曲线的幅值整体高于城区曲线,说明通过波形分解得到的点云数量,林区明显大于城区,反映出全波形数据在林区环境中由于激光穿透作用明显,可以在垂直方向上获取更丰富的反射信号。

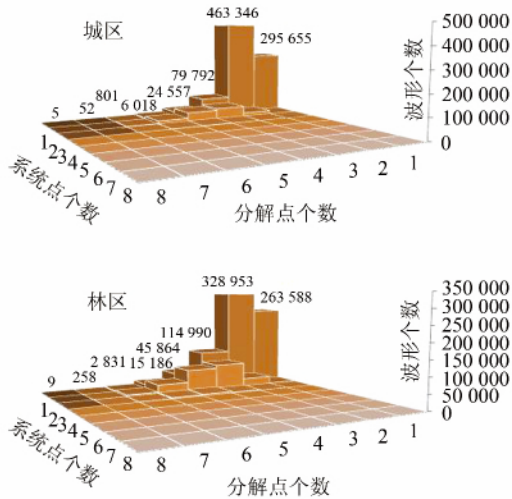
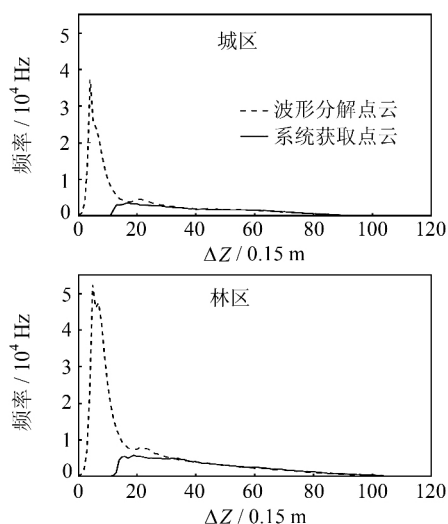


图 4 波形数量在两种回波次数的分布

Fig. 4 Distribution of Waveform Counts in Two Return Numbers

图5 ΔZ 在两种地物类型中的频率分布Fig. 5 Frequency Distribution of ΔZ in Two Ground Object Types

2) 系统点云在 ΔZ 的分布上集中在大于 2 m 的区间,且平缓下降。而通过波形分解获取的点云在分布上更靠近纵坐标轴,说明波形数据在减小探测空窗范围上的效果很突出,可以探测到被激光系统点云丢失的垂直信息;形态上表现为“两头小、中间大”,在空间结构上更符合林区植被或人工地物的分布特征。

3) 两条曲线在尾部较为接近,二者的差异主要体现在 $\Delta Z < 4$ m 的范围上。这说明全波形数据在信号探测过程中对激光雷达自身探测方法是一种很好的补充,主要体现在小尺度空间分布上能提供更为精细的结构特征,对提高点云空间分辨率表现出了比较乐观的潜力。

从上述结果可以看出,全波形激光雷达数据相较于传统的激光雷达点云数据,可以大幅度提高三维点云的空间分辨率和垂直结构信息含量。但由于激光穿透深度往往取决于地物类型,在城区或裸地范围,激光由于无法穿透建筑物或地表,所能提供的垂直信息受到限制;而在林区植被范围,树冠与枝叶质地稀疏,激光脉冲的穿透深度大幅增加,波形数据所携带的信息量也随之增加。加上植被本身具有较为丰富的垂直空间分布特征,利用全波形激光雷达进行植被信息提取和参数反演仍可以进一步发掘出更大的潜力。

3 结 语

本文在波形的高斯分解预处理中改进了一种初始波形分量探测方法,利用连续二阶导为负的

特征标识波形分量位置,可以保证在不出现过拟合的情况下兼顾重叠分量的探测,得到了比较理想的结果。本文还对激光雷达的性能评估提出了几种定量参考依据,可以作为衡量点云激光雷达和全波形激光雷达性能参数的指标或数据质量评价的根据。

针对全波形激光雷达数据的应用能力定量评估,本文对相同测量区域内同时获取的激光点云数据和全波形数据进行计算和比较,定量地分析了全波形数据相较于传统激光点云数据在地物信息获取上的优势,尤其是垂直结构信息上的获取能力。同时,以不同类型地表为研究对象,本文得出了全波形数据在林业应用相较于城市、道路、测绘等部门应用潜力更大的结论。通过比较不同地物的回波表现可以得出的一般性结论是:全波形数据比系统自身探测的点云包含了更丰富的地物信息,非常有效地弥补了传统探测方法的量测盲区。全波形激光雷达更适合工作于穿透性高的地物环境,地物穿透性越高其信息探测能力越强。但这些参数目前仅限于相对的比较和评估,如何将定量评估方法拓展到一般性的评价体系中,还需要更进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Ackmann F. Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54: 64-67
- [2] Lefsky M A. LiDAR Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-fir western Hemlock Forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(3):339-361
- [3] Baltsavias E P. A Comparison Between Photogrammetry and Laser Scanning[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54: 83-94
- [4] Wagner W. Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61: 100-112
- [5] Mallet C. Full-Waveform Topographic Lidar: State-of-the-Art[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64: 1-16
- [6] Wagner W. From Single-Pulse to Full Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges[C]. *ISPRS Congress, Istanbul*, 2009
- [7] IGI Gmb H. LiteMapper 6800 User Manual[S].

- Germany: IGI, 2010
- [8] ASPRS. LAS Specification Version 1.3-R10[S]. USA: ASPRS, 2010
- [9] Ma Hongchao, Li Qi. Modified EM Algorithm and Its Application to the Decomposition of Laser Scanning Waveform Data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1):35-41
- [10] Pang Yong, Li Zengyuan, Sun Guoqing, et al. LiDAR Remote Sensing Technology and Its Application in Forestry[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3):129-136(庞勇, 李增元, 孙国清, 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)
- [11] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. Forest Height Inversion Using Airborne LiDAR Technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1):152-158(庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1):152-158)
- [12] Li Qi, Ma Hongchao. The Study of Point-cloud Production Method Based on Waveform Laser Scanner Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3):349-354(李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云产生[J]. 测绘学报, 2008, 37(3):349-354)
- [13] Zhou Mengwei, Liu Qinhuo. Inversion for Crop Height by Small-Footprint-Waveform Airborne LiDAR[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8):183-188(周梦维, 柳钦火. 基于机载小光斑全波形LiDAR的作物高度反演[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):183-188)
- [14] Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Gaussian Decomposition of Laser Altimeter Waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38:1 989-1 996

Quantitative Analysis of Differences Between Full Waveform Data and System Point Cloud Data from Airborne LiDAR

LU Hao¹ PANG Yong¹ XU Guangcai¹ LI Zengyuan¹

¹ Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The superiority of waveform data is hard to evaluated and compared with point clouds quantitatively due to a high correlation between two data sources from the most commonly used LiDAR systems. Leica ALS60 airborne LiDAR system can record both of discrete return data and waveform data simultaneously and independently. The raw waveforms are decomposed into individual pulse returns and compared with the laser points from the hardware system quantitatively. Data from typical forest and urban areas are picked to perform a digitized assessment of the capability of waveform. The results show that waveform data can increase the vertical information in different types of ground objects and spatial resolution of point cloud at a certain level and that the increment in forest area is higher than that of urban area and bare earth. It is concluded that the penetration capability of laser pulse is more evident in full waveform data than in point cloud from ALS system itself, and that full waveform LiDAR has much more potential in constructing the vertical parameters in the forest areas than original LiDAR with only point clouds.

Key words: full waveform; point cloud; LiDAR; Gaussian decomposition; vertical structure; statistical decision tree; quantification; information entropy

First author: LU Hao, PhD candidate, specializes in airborne LiDAR data processing software R&D and forest parameter inversion. E-mail: luhao_rs@gmail.com

Foundation support: The National 973 Program of China, Nos. 2013CB733404, 2013CB733406; the National 863 Program of China, No. 2012AA12A306.