T/CSF XXX-XXXX

**ICS** \*\*\*

**B** \*\*

|  |  |
| --- | --- |
|

|  |
| --- |
| **CSF** |

 |

团体标准

机载激光雷达人工林蓄积量估算

技术规范

**Technical specification for estimating volume of plantation based on airborne LiDAR**

2021-XX-XX实施

2021-XX-XX发布

中国林学会 发布

目 次

[前 言 Ⅱ](#_Toc32706)

[1 范围 1](#_Toc31512)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc10192)

[3 术语和定义 1](#_Toc21333)

[4 总体技术流程 3](#_Toc18923)

[5 激光雷达数据要求 3](#_Toc4133)

[6 地面调查数据获取 4](#_Toc16179)

[7 激光雷达数据预处理方法 5](#_Toc28103)

[8 人工林激光雷达单木分割及立木材积估算 5](#_Toc11266)

[9 人工林激光雷达林分蓄积量估算 5](#_Toc23514)

[10 人工林蓄积量估算精度验证 6](#_Toc29541)

[11 人工林蓄积量统计输出 6](#_Toc17278)

[12 输出图件 6](#_Toc11064)

[附录 A 8](#_Toc22381)

[附录 B 9](#_Toc9811)

[附录 C 10](#_Toc1536)

[附录 D 11](#_Toc27910)

[参考文献 12](#_Toc9278)

# 前 言

本文件按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的附录A、B、C为资料性附录，附录D为规范性附录。

本文件由南京林业大学、中国林业科学研究院资源信息研究所提出。

本文件由中国林学会归口。

本文件起草单位：南京林业大学、中国林业科学研究院资源信息研究所。

本文件主要起草人：曹林、刘清旺、申鑫、周凯。

# 机载激光雷达人工林蓄积量估算技术规范

1 范围

本文件规定了应用激光雷达技术进行单木和林分尺度人工林蓄积量估算的具体作业流程、技术规范。

本文件主要针对有人机载激光雷达遥感数据，规范人工林蓄积量产品处理的技术要求和作业规范，适用于利用机载激光雷达遥感技术对人工林蓄积量进行调查与监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 26424-2010 森林资源规划设计调查技术规范

GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语

GB/T 26423-2010 森林资源术语

GB/T 30363-2013 森林植被状况监测技术规范

GB/T 13989-2012 国家基本比例尺地形图分幅和编号

GB/T 18316-2001 数字测绘产品检查验收规定和质量评定

CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范

CH/T 8023-2011 机载激光雷达数据处理技术规范

CH/T 9015-2012 三维地理信息模型数据产品规范

LY/T 1662-9-2008 数字林业标准与规范

LY/T 2184-2013 森林资源数据库分类和命名规范

LY/T 2186-2013 森林资源数据编码类技术规范

LY/T 2188-2013 森林资源数据采集技术规范

LY/T 2189-2013 森林资源数据处理导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

人工林 forest plantation

由人工直播（条播或穴播）、植苗、分殖或扦插造林形成的森林。

[来源：GB/T 26423-2010，6.18]

3.2

激光雷达 light detection and ranging

集激光扫描系统、全球定位系统、惯性测量单元以及监视控制系统于一身，发射激光束并接收回波获取目标三维信息的系统。

3.3

数字高程模型 digital elevation model

以绝对高程值或海拔模拟地面起伏的数据集。

3.4

数字表面模型 digital surface model

以数字形式表示的物体表面（包括树冠、屋顶等）起伏形态的数据集。

3.5

冠层高度模型 canopy height model

以数字形式表示的植被冠层高度的数据集，由数字表面模型与数字高程模型差值运算生成。

3.6

几何配准 geometric registration

将不同时间、不同传感器系统所获得的同一地区的点云数据，经空间几何变换使同名物点在三维位置和方位上完全叠合的操作。

3.7

特征提取 feature extraction

对激光雷达点云中某一模式的一组测量值进行变换，以突出该模式具有代表性特征的一种方法。或通过三维分析和变换，以提取所需特征的方法。

3.8

特征选择 feature selection

从原始激光雷达点云中，经过变换或重新组合，选择确定对人工林蓄积量估算更有效的特征参数的工作。

3.9

样地 sample plot

以随机或系统抽样方法抽取的用以推算森林资源的数量和质量而限定的地块单元。按保存时间分为固定样地和临时样地，按照形状分为方形样地和圆形样地。

3.10

胸径 diameter at breast height

林木位于距地面1.3 m处的树干直径。

3.11

材积 volume

木材的体积。

3.12

林分蓄积量 stand volume

林分中全部林木的材积，简称蓄积，常用单位面积材积（m3/hm2）表示。

4 总体技术流程

机载激光雷达人工林蓄积量估算的总体流程包括激光雷达数据获取、数据预处理、地面调查数据获取、单木分割与立木材积估算、林分冠层结构特征提取、林分蓄积量估算、精度验证和结果输出，具体流程如图1所示。



图1 总体技术流程图

5 激光雷达数据要求

5.1 数据存储格式

激光雷达数据主要采用点云数据格式，包含每个点的空间坐标、强度、回波编号、回波数目、扫描角和颜色等信息，选择LAS数据标准格式进行存储。

5.2 点密度

为满足林分尺度人工林蓄积量估算的需求，机载激光雷达获取的点云数据密度需≥1点/m2；满足单木尺度人工林立木材积估算的需求，点云密度需≥5点/m2。

5.3 扫描角

机载激光雷达数据获取时的扫描角需满足≤±30°。

5.4 回波数

机载激光雷达每个脉冲的可记录回波数≥2。

5.5 检校场数据

由机载激光雷达系统通过2条不同飞行高度的交叉航线获得，检校场数据需包含平坦裸露地形和明显凸出地物点信息。

6 地面调查数据获取

6.1 样地形状与大小

样地可以是固定边长的正方形或固定半径的圆形。样地的大小需要充分考虑边界效应、GPS定位误差、数据采集的效率及成本、激光雷达特征量提取精度等。

方形样地边长为20 m-30 m（即面积为400 m2-900 m2）；圆形样地半径为10 m-15 m（即方形样地的内切圆）。

6.2 样地位置与代表性

样地的位置需较为均匀地分布在研究区，要综合考虑立地条件、树种组成和林龄等因素。样地需尽量远离易受人为干扰的区域（如林区内的居民区和道路等），建议直线距离在60 m以上。

样地要具有林分代表性，建议根据已有的地面调查小班信息，涵盖不同的地形、森林类型、生长阶段等多种林分特征，分层选取典型样地。

6.3 森林参数测定

测量时，根据样地编号顺序进行，同时记录单木编号、树种、胸径等，以免漏测或重测。在坡地测量时，应沿平行于等高线方向进行，在平地沿S形方向进行。测定正好处于样地境界上的树木时的原则：北要南不要，取东舍西。

实测森林参数包括：单木和样地位置、树高、枝下高、胸径等（胸径>5 cm的单木）。树高和枝下高可采用超声波或激光测高器，胸径测量使用围尺。

单木蓄积量（也称为立木材积）通过地面实测的单木胸径和树高，并借助当地二元材积模型计算。平均胸径、平均树高和林分单位面积（hm2）蓄积量通过相应的单木参数在样地尺度汇总统计得到。

样地中心（圆形样地）和角点（方形样地）位置坐标，通过差分GPS设备量测，精度应为厘米级。对于胸径>5cm的单木，通过全站仪（或超声波单木定位仪，或罗盘仪结合皮尺）对样地内的单木进行定位。

6.4 其他考虑

地面调查时应兼顾调查成本、效率和精度，综合考虑样地尺寸、样地数量、样地空间分布和调查因子等。

7 激光雷达数据预处理方法

7.1 数据要求

包括：点云数据；航迹文件[GPS时间、位置信息（X,Y,Z）与姿态信息（翻滚角、俯仰角、偏航角）相对应的列表文件等参考文件]；地面检查点，即用于精度检测的野外实测数据；成果坐标系统与点云坐标系统之间的转换参数；其他有关数据，如与数据处理、成果检验相关的数据。高程精度要求如附录A中表A.1所示。

7.2 数据预处理方法

7.2.1 坐标系统转换和分块

利用坐标系统转换参数，将点云数据转换至成果坐标系统。根据实际需要对点云数据进行分块。每一个数据块一般按矩形切块，也可以按照条带分块。数据块的大小根据数据处理的软、硬件性能综合考虑。

7.2.2 去噪和点云滤波

将明显低于地面的点和明显高于地表目标的点，以及移动地物点定义为噪声点并进行去除。利用基于回波次数、反射强度、地物形状等的算法或算法组合，对点云数据进行自动滤波。植被覆盖区域可能对应多次回波，正常的地面点是最后一次回波对应的反射点。如有需要，可采用人工编辑的方式对错误的点重新进行滤波。

7.2.3 数字高程模型生成和检查

通过地面点结合内插算法进行数字高程模型构建。通过三维透视及晕渲，检查数字高程模型的可靠性。使用实地量测的地面检查点，计算并统计检查点与内插点间的高程误差。

8 人工林激光雷达单木分割及立木材积估算

通过固定窗口对CHM进行均值和中值滤波，并采用标记控制分水岭分割法进行单木分割。基于分割获得的树冠和树顶信息提取树高和树冠边界，并借助当地树高-胸径曲线模型估算胸径。借助当地的二元材积模型计算立木材积。单木树高、冠幅和立木材积以标准的表格文件格式输出。其中当样地坡度大于30°时，建议基于非地形归一化原始点云进行单木分割，以避免树顶检测错位。

9 人工林激光雷达林分蓄积量估算

9.1 LiDAR点云垂直分布特性的冠层特征量计算

计算基于冠层中LiDAR点云高度分布的特征变量（*h*25, *h*50, *h*75, *h*95, *h*mean, *h*cv, *h*skewness, *h*kurtosis）和基于冠层各高度层覆盖度的特征变量（*d*1, *d*3, *d*5, *d*7, *d*9, *CC*2m）（详细描述见附录C中表C.1）。

9.2 林分尺度人工林蓄积量估算

将提取的全部LiDAR特征量与实测林分蓄积量进行Pearson’s相关性分析，剔除相关性低的特征变量（Pearson’s < 0.6）。将地面实测汇总的各样地尺度林分蓄积量作为因变量，筛选后的LiDAR特征量作为自变量，建立多元逐步回归模型。

在多元回归模型建立之前，所有因变量和自变量都使用自然对数进行转换，并使用偏差校正因子（BCF, Bias Correction Factor）对偏差进行校正。建模公式详见附录B中公式B.1。通过赤池信息量准则(AIC, Akaike information criterion)选择最优模型。

将覆盖整个研究区的归一化激光点云数据重采样为栅格数据格式（栅格尺寸与样地大小一致：正方形样地为样地边长、圆形样地为样地直径），借助所构建的模型并通过栅格运算得到蓄积量的空间分布图。

10 人工林蓄积量估算精度验证

10.1 单木分割及立木材积估算验证

当地面实测树冠中心点在分割的树冠边界之内时，认为分割单木探测正确。如多棵单木都在分割树冠边界内，则需进一步比较实测单木位置与提取单木位置的距离以及实测树高与提取树高的差异。单木分割的精度采用*F1*-score作为评价指标，其计算公式详见附录B中公式B.2。采用地面实测数据结合决定系数（*R*2）、均方根误差（*RMSE*）和相对均方根误差（*rRMSE*）评价立木材积估算的精度，公式详见附录B中公式B.3。*rRMSE*应小于20%。

10.2 林分尺度蓄积量估算精度验证

采用留一交叉验证法结合附录B中公式B.3评价森林蓄积量估算模型的精度，*rRMSE*应小于20%。

11 人工林蓄积量统计输出

以表格形式输出提取的单木位置、胸径、树高、树冠和立木材积信息，表格格式见附录D中表D.1和表D.2。Lon代表经度，Lat代表纬度，表中各列有效数字规定为小数点后6位。

12 输出图件

12.1 图纸幅面

依实际情况选择如下规格：A0（84.1 cm×118.9 cm）、A1（59.4 cm×84.1 cm）、A2（42.0 cm×59.4 cm）、A3（29.7 cm×42.0 cm）、A4（21.0 cm×29.7 cm）。

12.2 制图要素

a）字体：汉字使用宋体，阿拉伯数字使用新罗马字体；

b）图名：该地图的名称，应概括地图的主要内容；

c）图例：简明扼要，重点突出，表达清晰，指代明确；

d）比例尺：应与地图的单位保持一致，大小以制图范围确定。大范围高度信息反演制图常用比例尺有：1:500、1:2000、1:5000、1:10000等，样地尺度的单木分割结果图比例尺在1:100-1:400之间；

e）公里网：根据比例尺确定公里网间隔，数字标注为整数，单位为米（m）；

f）指北针：在地图上应画出指北针，所指方向应与实际正北方向保持一致；

g）坐标系：CGCS2000；

h）制图时间：位于图幅右下方，标明实际成图时间，格式为yyyy-mm-dd；

i）制图单位：位于图幅左下方，格式为xxxx制。

12.3 图面配置要求

a）图形应分布于图幅中央；

b）图廓上应标注公里网；

c）图幅内应标注比例尺、图例、指北针等信息；

d）比例尺宜位于图幅的右下角；

e）指北针宜位于图幅的左上角；。

f）制图时间位于图幅右下方；

g）制图单位位于图幅左下方；

附录 A

（资料性）

表 A.1 LiDAR点云数据高程精度要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 地形类别 | 比例尺 | 点云数据高程误差 |
| 平地 | 1:500 | 0.15 |
| 1:1000 | 0.15 |
| 1:2000 | 0.25 |
| 1:5000 | 0.35 |
| 1:10000 | 0.35 |
| 丘陵地 | 1:500 | 0.25 |
| 1:1000 | 0.35 |
| 1:2000 | 0.35 |
| 1:5000 | 0.85 |
| 1:10000 | 0.85 |
| 山地 | 1:500 | 0.35 |
| 1:1000 | 0.50 |
| 1:2000 | 0.85 |
| 1:5000 | 1.75 |
| 1:10000 | 1.75 |
| 高山地 | 1:500 | 0.50 |
| 1:1000 | 1.00 |
| 1:2000 | 1.00 |
| 1:5000 | 2.80 |
| 1:10000 | 3.50 |

表 A.2 常用算法说明

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 适用对象 | 算法名称 | 原理 | 参考文献 |
| 单木分割 | 标记控制分水岭 | 以树顶点作为标记的局部最小值点，在高程低处构建分割线，形成区分树冠的分水岭从而分割树冠。 | Huang et al, 2018 |
| 模型优选 | 赤池信息量准则 | 建立在信息熵的概念基础上，假设模型的误差服从独立正态分布，寻找可以最好地解释数据但包含最少自由参数的模型。 | Akaike, 1974 |

附录 B

（资料性）

B.1 建模计算公式

 (1)

 (2)

 (3)

式中：*y*为林分蓄积量；*x*1、*x*2、*x*3…*xi*分别为筛选的激光雷达特征量；、、、…分别为模型自变量的系数；为经ln转换的某林分蓄积量实测值；为经ln转换的某林分蓄积量估算值；N为样地数。

B.2 单木分割精度验证计算公式

 (4)

 (5)

 (6)

式中：代表单木探测率；代表探测出的单木的精度；代表总体精度。是通过算法分割出且与地面实测相对应的冠幅数量（正确分割）；是算法未能分割得到但地面实测存在的冠幅数量（漏分）；是通过算法分割得到但地面实测不存在的冠幅数量（过度分割）。

B.3 蓄积量提取精度验证计算公式

 (7)
 (8)

 % (9)

式中：为某单木（或林分）蓄积量实测值；为单木（或林分）蓄积量实测平均值；为某单木（或林分）蓄积量估算值；*n*为单木（或样地）数。

附录 C

（资料性）

表 C.1 LiDAR点云垂直分布特性的冠层特征量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 特征量类型 | 特征量名称 | 计算方法 |
| 基于冠层中点云的高度分布 | 高度百分位数（*h*25, *h*50, *h*75, *h*95） | 第一次回波点的冠层高度分布的高度百分位数（25th, 50th, 75th , 95th） |
| 平均高（*h*mean） | 地面以上第一回波点的平均高度值 |
| 高度变异系数（*h*cv） | 第一回波点的高度变异系数 |
| 偏度和峰度（*h*skewness, *h*kurtosis） | 第一回波点的高度的偏度和峰度 |
| 基于冠层各高度层的覆盖度 | 冠层各层覆盖度（*d*1, *d*3, *d*5, *d*7 and *d*9） | 百分位以上回波点占所有点的比例（10th, 30th, 50th, 70th and 90th） |
| 覆盖度（>2 m）（*CC*2m） | 2m 以上回波点占总回波点比例 |

附录 D

（规范性）

表 D.1 单木信息统计表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 树木编号 | 经度 /° | 纬度 /° | 胸径 /cm | 树高 /m | 冠幅 /m | 立木材积 /m3 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |  |

表 D.2 林分信息统计表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样地编号 | 经度 /° | 纬度 /° | 平均胸径 /cm | 平均树高 /m | 平均冠幅 /m | 蓄积量 /(m3/hm2) |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |  |

参考文献

[1] Akaike, Hirotsugu. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 1974, 19 (6): 716-723.

[2] Huang, Hongyu; Li, Xu; Chen, Chongcheng. Individual tree crown detection and delineation from very-high-hesolution UAV images based on bias field and marker-controlled watershed segmentation algorithms [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(7): 2253-2262.