

基于 ICESat-GLAS 波形估测平均树高的研究

刘美爽¹, 邢艳秋^{1,2,3*}, 吴红波², 尤号田²

(1. 东北林业大学 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:以吉林省汪清林业局经营区域为例,基于星载激光雷达 ICESat-GLAS 回波参数,构建了平均树高回归模型,预估精度为 84.05%;利用反距离加权法,对 ICESat-GLAS 光斑平均树高估测值进行差值运算,得到初始 CHM(Canopy Height Model),实现了平均树高空间连续分布制图;再利用坡度校正和 3×3 移动窗口差分滤波平滑初始 CHM,得到研究区平均树高修正 CHM,预估精度达到 91.52%。研究结果表明,坡度校正和移动窗口差分滤波方法能有效削弱坡度影响,剔除异常点,提高平均树高估测精度。

关键词:激光雷达;ICESat-GLAS;波形;平均树高;CHM

中图分类号:S771.8

文献标识码:A

Study on Mean Forest Canopy Height Estimation Based on ICESat-GLAS Waveforms

LIU Mei-shuang¹, XING Yan-qiu^{1,2,3}, WU Hong-bo², YOU Hao-tian²

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Center for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

3. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Taking Wangqing Forestry Bureau of Jilin Province as the study area, a regression model for mean forest canopy height was established using ICESat-GLAS (the Ice, Cloud, and Land Elevation-Geoscience Laser Altimeter System) waveform metrics, with the predicted accuracy of 84.05%. By the method of inverse distance weighted (IDW), the interpolation calculation for ICESat-GLAS estimated mean forest canopy height was carried out and the preliminary CHM (Canopy Height Model) was achieved accordingly with continuous spatial distribution. The adjusted CHM was produced by corrected and smoothed preliminary CHM using slopes and differential filter (with 3×3 windows) respectively, and the predicted accuracy was up to 91.52%. The study results indicated that the method of slope correction and differential filter was able to reduce the influence of slope and remove the outliers effectively for CHM, and improve the predicted accuracy consequently.

Key words: LiDAR, ICESat-GLAS; waveforms; mean canopy height; CHM

平均树高不仅是评价林分垂直结构的重要指标,也是反映林地生产力高低和估测林分蓄积量及碳储量的主要因子^[1]。在传统调查方法里,树高信

息一直主要靠人工实地测量获取,费时费力,难以实现大区域估测。近些年来,被动光学遥感技术在森林参数估测领域应用比较广泛,但多用于获取森林

收稿日期:2013-07-18

基金项目:中央高校创新团队与重大项目培育资金项目(DLI2EB07);国家自然科学基金资助项目(41171274);国家863计划重点项目(2011AA120405);中国博士后科学基金(2011M500036)

作者简介:刘美爽(1964—),女,黑龙江呼兰人,硕士,副编审。研究方向:森林工程。E-mail:liumeishuang@126.com

* 通讯作者:博士,教授。研究方向:林业定量遥感。E-mail:yanqixing@nefu.edu.cn

水平结构信息,却很少能准确地反应森林垂直结构信息^[2-4],限制了遥感在估测森林生物量、森林蓄积量等方面的精度。

随着激光雷达(LiDAR)遥感技术的相对成熟,其在准确获取森林垂直结构参数上表现出很强的优势,并取得了一定的研究进展^[5-12]。搭载在冰、云和陆地高程卫星(ICESat)上的地学激光测高系统(GLAS)能够提供激光雷达全波形数据,且相对机载LiDAR系统而言,其光斑覆盖面积大(直径约70 m),激光回波不仅能够反射森林冠层信息,而且能够到达地面并反射地面信息,更适合于样地或林分平均树高^[13-15]的估测。虽然ICESat-GLAS已经在全球的许多区域成功地用于树高估测^[16-21],但由于相邻的ICESat-GLAS激光光斑之间有一定的距离(间隔约170 m),限制了其在大区域完全覆盖连续观测,而且大多数研究仍局限在地表相对平坦的林地上^[11]。对于那些地形起伏较大的林地,ICESat-GLAS光斑内的森林冠层反射和地面反射混合在一起,使ICESat-GLAS波形解译变得十分困难,在很大程度上影响了森林冠层信息的精确提取^[14-15],降低了树高估测精度。

本文旨在对ICESat-GLAS提供的全波形数据提取特征参数,建立平均树高统计回归模型、并对平均树高进行估测,再利用反距离加权插值法,构建空间连续分布的平均树高模型CHM(Canopy Height Model),采用坡度校正和移动窗口差分滤波方法削弱地形对平均树高估测造成的影响,提高估测精度,为森林生物量估测等相关研究奠定数据基础。

1 研究区概况

本研究以位于长白山系东麓的中低山系的吉林汪清林业局经营区(43°05′~43°40′ N, 129°56′~131°04′ E)为研究区,总面积为30.4万hm²。地面高程为360~1477 m,坡度变化范围为0~45°。夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年降水量550 mm左右,其中5—9月的降水量(438 mm)约占全年的80%。年平均气温3.9℃,无霜期137 d。该区域植物种类繁多,结构复杂。深山区林相以天然次生针阔混交林为主,呈带状分布在海拔500~1100 m之间^[15]。针叶树主要有红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、云杉(*Picea* spp.)、臭松(*Symplocarpus foetidus* (L.) Salisb.)、落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.),阔叶树多为水曲柳(*Fraxinus mandshurica*

Rupr.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)、椴树(*Tilia* spp.)、色木(*Acer mono* Maxim.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、杨树(*Populus* spp.)、枫桦(*Betula costa* Trautv.)等^[22]。

2 研究区数据收集与处理

2.1 数据收集

2.1.1 野外调查数据 采用分层随机采样法调查野外数据,主要针对针叶林、阔叶林和针阔混交林3种森林类型,沿卫星飞行航迹方向,随机选取GLAS光斑星下点所对应的地面点,于2006年9月、2007年9月和2009年9月开展了野外样地数据获取工作,共计调查样地286个。在286个调查样地中,包括7个裸地、11个农田、8个草甸、6个湿地、141个阔叶林、62个针阔混交林和51个针叶林,样地坡度主要分布在0~30°之间。样地平均树高统计结果见表1。调查过程中,利用GARMIN征程300型GPS手持仪对ICESat-GLAS激光脚点进行定位。依据森林调查统计原理,并考虑地形坡度导致的GLAS圆形光斑变形,为有效地对样地光斑内林木进行调查,以光斑中心作为调查样地的中心点,结合考虑样地坡度,建立水平有效投影面积为500 m²的圆形样地^[5];用检尺法逐一测定样地中林木胸径≥3 cm的每木胸径(1.3 m高处的直径),用Vertex IV测高仪测量每株活立木树高、冠幅高度等,并记录单木树种、样地郁闭度、森林类型、地表植被覆盖、坡度和坡向等,其中样地的平均坡度、坡向利用地质罗盘测量。

调查样地的平均树高 H_{mean} 为样地内所有立木树高的算术平均值^[23],计算方法见式(1):

$$H_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (1)$$

式中: H_i 为样地内单木实测高度(m); n 为样地内所测单木数量(株)。

表1 平均树高调查统计结果

森林类型	样地数量	最大平均树高/m	最小平均树高/m	平均树高/m
阔叶林	141	24.00	7.50	16.20
混交林	62	26.60	7.50	15.40
针叶林	51	21.90	5.00	15.50

2.1.2 ICESat-GLAS数据 ICESat-GLAS是第一个,也是目前唯一的极地轨道大光斑激光雷达设备,飞行高度为600 km,用于全球观测。GLAS脉冲激

光器每秒发射 40 个激光脉冲,脉冲宽度为 4 ns,每个激光脉冲在地面上覆盖的光斑直径大约为 70 m,相邻光斑间距约为 170 m。卫星上的一个直径为 1 m 的望远镜接收从地面返回的脉冲并引导到模拟探测器,然后由采样器进行数字化并记录回波。这些数字化的回波就是激光波形,从波形上可以判定激光发射和回波接收的时间,进而获取相应地面激光光斑内的地物信息。

ICESat 地面轨道回归周期为 183 d,在赤道附近相邻轨道间距为 15 km,而在纬度 80°处间距为 2.5 km。ICESat - GLAS 共提供 15 个数据产品,即 GLA01, GLA02... GLA15。根据研究需求,本研究选择 GLA01 和 GLA14 作为研究数据。其中,GLA01 提供测高仪所发送和接收的全波形数据,包括全波形主要参数和统计数据,其数据格式为整数型二进制,可为平均树高估测提供波形参数;与波形数据相应的地面光斑地理位置和高程数据由高程数据产品 GLA14 记录,可准确建立 GLAS 波形数据与地面点的联系。

GLA01 和 GLA14 数据均通过美国国家冰雪数据中心 (<http://nsidc.org/data/icesat/>) 获取,采集时间为 2003 - 02 - 21—2009 - 03 - 24,共 6 479 组数据,其光斑分布如图 1 所示。

2.1.3 ASTER GDEM 数据 ASTER DEM 是美国航空航天局 (NASA) 和日本经济产业省 (METI) 在 2009 年 6 月 29 日联合发布的目前覆盖范围最大、最精准的地球陆地海拔地形图,覆盖了全世界陆地面积的 99% (范围为 83°S ~ 83°N),空间分辨率为 30 m,垂直和水平数据可信度均达到了 95%。本研究采用研究区 ASTER GDEM 数据 (如图 1 所示),用于计算地面坡度。ASTER GDEM 数据获取网址为 <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>。

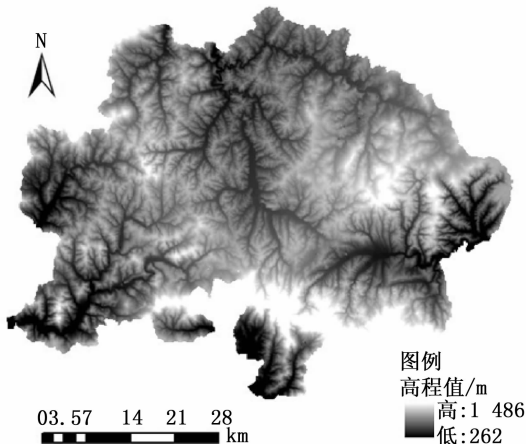


图 1 研究区 ASTER GDEM 数据

2.2 ICESat-GLAS 数据处理及参数提取

本研究按以下所述步骤对 ICESat-GLAS 回波数据进行处理及其参数提取。

(1) 数据预处理: GLA01 和 GLA14 原始数据为二进制格式,为方便后续处理的读取及分析,先将其转换成 ASCII (American Standard Code for Information Interchange) 数据格式 (* . rasc),再将由数字 0 - 255 表示的波形数据转换为由电压表示的数据^[15]。根据 GLA01 和 GLA14 提供的激光光斑编号,将同一激光光斑的 GLA01 与 GLA14 数据进行匹配,整合两者所提供的波形信息及其地理参数。为便于不同单位或量级的参数能够进行比较和加权,增强波形之间的可比性,将回波的光电压值标准化在 [0, 1] 区间 (标准化后 GLAS 回波如图 3 中虚线所示),计算方法如式 (2) 所示:

$$x_i = \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (2)$$

其中, x_i 为单个波形标准化后的数值; E_i 为单个波形数据中的光电压值 (V); E_{\max} 为单个波形数据的光电压最大值 (V); E_{\min} 为单个波形数据的光电压最小值 (V)。

(2) ICESat-GLAS 回波滤波去噪: ICESat-GLAS 回波噪声导致 ICESat-GLAS 回波识别、分析和分类困难。因此,本研究采用具有良好时间域、空间域特性的小波变换方法对波形进行去噪处理。小波变换对信号进行去噪,其实质是将信号与小波核函数做内积,因此小波核函数的选用至关重要。GLAS 激光器发射的为高斯脉冲信号,由此可以假设接收的激光回波也是由高斯分量构成的,所以本文选择高斯小波作为核函数,利用软阈值法对含噪信号进行小波分解及重构。软阈值法去噪的关键是噪声阈值的设定,本研究设定噪声阈值为回波数据前 100 帧数据的平均值与其 3 倍标准差之和,详细过程见参考文献 [24] 及 [25]。

(3) 样地平均树高参数提取: ICESat-GLAS 回波波形与树冠垂直结构密切相关。综合考虑研究区地形与森林类型特点,利用标准化的 ICESat-GLAS 回波定义并提取波形长度 $Extent$ 、地面回波长度 $Trail$ 和首波长度 $Lead$ 等与平均树高相关的回波波形参数 (如图 2 所示)。参数计算方法如式 (3)~式 (5) 所示:

$$Extent = t_{end} - t_{start} \quad (3)$$

$$Lead = t_{Lead,end} - t_{start} \quad (4)$$

$$Trail = t_{Trail, start} - t_{end} \quad (5)$$

式中: $Lead$ 和 $Trail$ 两者均包含样地坡度对其回波展宽的影响; t_{start} 为波形噪声阈值与波形的第一个有效回波的交叉点, 即回波波点起始时间; t_{end} 为波形噪声阈值与波形最后一个有效回波的交叉点, 即回波波形终止时间; $t_{Lead, end}$ 为首波的终止时间; $Trail = t_{Trail, start} - t_{end}$ 为地面回波的起始时间。

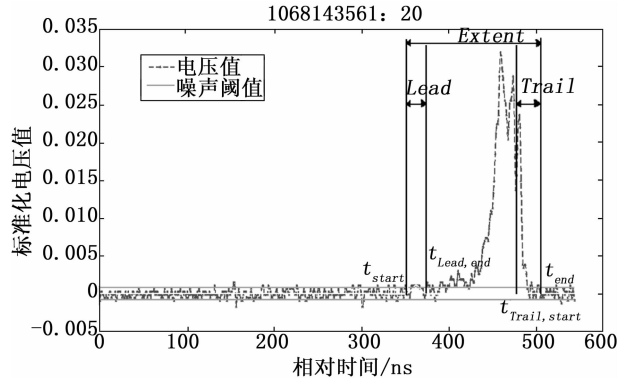


图2 与平均树高相关的 GLAS 波形参数

2.3 平均树高模型 CHM 构建

2.3.1 ICESat-GLAS 光斑内森林平均树高估算

以 ICESat-GLAS 波形参数 $Extent$, $Trail$ 和 $Lead$ 等为变量, 以实测样地平均树高为因变量, 构建样地平均树高估测模型, 求出 ICESat-GLAS 光斑内的平均树高估测值。为实现上述研究目的, 本文随机选取 209 块样地实测数据及其所对应的 ICESat-GLAS 数据, 提取其波形参数(参考 2.2), 利用多元统计回归方法, 建立 ICESat 光斑内的平均树高实测值与 $Extent$, $Trail$ 和 $Lead$ 的关系式, 估算出其余 ICESat-GLAS 光斑内平均树高。

2.3.2 反距离加权插值法构建初始 CHM

基于 ICESat-GLAS 估测的光斑内平均树高(视为已知数据), 利用反距离加权 IDW (Inverse Distance Weighted) 插值法对激光光斑覆盖以外的林区进行推广估测。反距离加权插值法是常用的空间插值方法之一, 它以插值点与样本点间的距离为权重进行线性加权来决定输出的栅格值。权重与距离成反比, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大, 对输出栅格的值影响越大; 离输出栅格越远的样本点赋予的权重越小, 对输出栅格的值影响越小。式(6)和式(7)所示为反距离加权插值计算未知点的数值方法。

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{(d_i)^p} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p}$$

式中, Z_0 为待估计的栅格像元值, 即 ICESat-GLAS 光斑外区域的平均树高估计值; $Z(x_i)$ 为第 i 个光斑样点已知数据 ($i = 1, 2, 3 \dots n$), n 为用于数据插值的已知样点数据个数, d_i 为未知插值点到第 i 个光斑样点的距离, λ_i 即为样点在插值过程中的权重; p 为距离的幂。

通过反距离加权插值后, 利用所有已知点和插值点构建不规则三角网 (TIN), 生成空间连续的初始 CHM 模型^[26-28]。树高除了受森林类型、林龄结构影响外, 还特别受到地形因素如坡度和坡向等的影响。由于 ICESat 相邻轨道间距较大, 在利用反距离加权法插值时未能全面考虑山脊、山谷, 坡向等变化引起的树高变化, 存在一定的局限性。鉴于此, 本研究将对初始 CHM 模型进行坡度校正和移动窗口差分滤波, 以期部分削弱地形变化对 CHM 的影响, 提高估测精度。

2.3.3 坡度校正和移动窗口差分滤波构建修正 CHM

(1) 初始 CHM 模型坡度校正

初始 CHM 数据包含有地表坡度的影响, 需要进一步对其进行校正。本研究利用 ASTER GDEM 数据计算研究区地表坡度, 在对应的 CHM 估测之中减去坡度造成的高差, 实现对 CHM 模型的坡度校正。

(2) 移动窗口差分滤波平滑 CHM

在地形起伏较大的林区, 相邻的 CHM 估测值会产生“突兀”现象, 导致估计误差增加。鉴于这一问题, 假定林分平均树高随地形变化是一致的, 没有较大突变, 采用移动窗口差分滤波对坡度校正后初始 CHM 数据进行平滑处理, 以期提高估测精度。该算法的具体执行过程如下所述:

基于坡度校正后初始 CHM 栅格数据, 以最低数据点作为初始点集 $P(j, i) \in A$, 以 $P(j, i)$ 为移动窗口中心点, 定义一个 3×3 差分矩形模板算子进行滤波, 求任意中心点与其 8 个邻域点之间的差分, 计算公式见式(8)和式(9)。

$$g(j, i, 1) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 |P((j-2+m), (i-2+n)) - P(j, i)| \quad P(j, i) \in A \quad (8)$$

$$g(j, i, 2) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 P((j-2+m),$$

$$(i-2+n)) - P(j,i) \quad P(j,i) \in A \quad (9)$$

式中, $g(j,i,2)$ 和 $g(j,i,1)$ 分别表示中心点 $P(j,i)$ 与其各邻域点的差分之和及差分之和的绝对值。如果 $g(j,i,1)$ 和 $g(j,i,2)$ 同时满足小于某一设定的阈值(该阈值由程序自动设定),即可判定该点为正常点,否则为粗差点或异常点。对于粗差点或异常点,需要反复进行滤波计算,每一次计算都是对前一次模型的平滑调整,直到将这些点调整到合理范围为止。本研究定义平滑后的 CHM 模型为修正 CHM 模型。

2.4 模型评价

为有效地评价并比较 ICESat-GLAS 平均树高回归模型和 CHM 模型的精度,本研究利用未参与建模的 77 块样地数据进行估测精度检验,计算方法分别如式(10)和式(11)所示。

$$P = 1 - \frac{|H_{mean} - \hat{H}_{mean}|}{H_{mean}} \quad (10)$$

式中: P 为预估精度(%); H_{mean} 为野外调查样地的平均树高实测值(m); \hat{H}_{mean} 为利用回归模型估计的平均树高(m)。

$$P_{adj} = 1 - \frac{|H_{mean} - \hat{H}_{mean,adj}|}{H_{mean}} \quad (11)$$

式中: P_{adj} 为 CHM 模型预估精度(%); $\hat{H}_{mean,adj}$ 是经移动窗口差分滤波后 CHM 的估测值(m)。

3 结果与分析

3.1 平均树高回归模型及其估测结果

基于 ICESat-GLAS 波形参数,利用 2.3.1 所述方法建立平均树高回归模型如式(12)所示:

$$H_{mean} = 2.76 + (0.60 \times (Extent + (-0.35 \times (Trail + Lead)))) \quad (12)$$

回归方程的复相关系数为 0.80 ($P=0.01$), 预估精度为 84.05% (具体如表 2 所示)。ICESat 回波样本数据中的 6 193 个 ICESat-GLAS 回波,发现存在两类异常现象:1) 平均树高估测值为负,该类波形总计 434 个。通过 GLAS 波形数据和地表覆盖状况对比分析,发现造成这类异常结果的可能原因是 GLAS 光斑内分布的为稀疏且矮小的灌木,或者在外界干扰(包括人为干扰和自然干扰)影响下,造成树木枯倒或消失,导致了 GLAS 回波中 $Trail$ 和 $Lead$ 值较大,模型估测值则为负;2) 无法估测森林平均树高,或者估测值超出 GLAS 波形所能反映的最大平均树高 81.6 m,该类回波个数达 290 个。其原因有

二:①地表坡度大,造成 GLAS 展宽现象严重,使其无法真实估测光斑内的平均树高;②GLAS 回波实为云层回波,而不是地表回波,模型估测值更可能反映的是云层高度而非平均树高。将以上两类异常数据剔除后,余下 5 755 个有效 ICESat-GLAS 反映的平均树高估测值均值为 30.3 m。

3.2 CHM 模型构建结果

3.2.1 初始 CHM 模型 剔除平均树高异常估测值后,以其余的 5 755 个有效回波所对应的平均树高估测值为已知点,利用反距离加权法进行空间插值,进而基于已知点和插值点进行不规则三角网 TIN 数据构建,形成新的格网栅格数据,即初始 CHM 模型(如图 3 所示)。

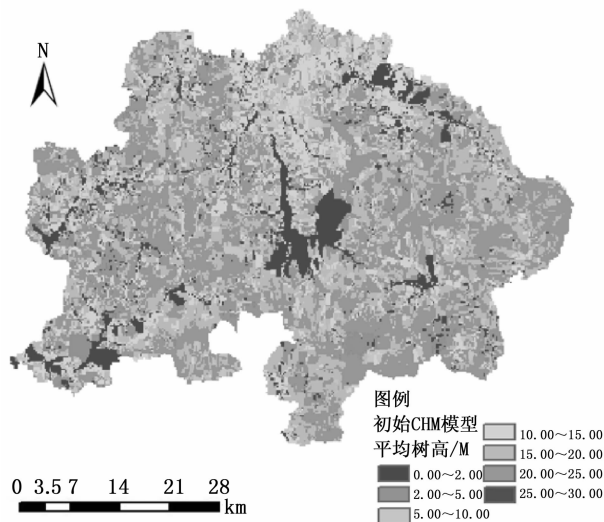


图3 初始 CHM 模型

通过分析观察初始 CHM 模型发现,基于 ICESat 光斑内平均树高进行反距离加权空间插值,虽然实现了树高的连续空间分布,但由于未能全面考虑地形的影响,尚存在一定不稳定点,需进一步修正。

3.2.2 修正 CHM 模型 从 ASTER GDEM 数据中获取高程和坡度、坡向等因子,利用反距离加权插值法生成坡度图(如图 4 所示),为初始 CHM 坡度校正提供数据源,在对应的 CHM 估测之中减去坡度造成的地面高差,消除坡度对平均树高造成的影响。

通过对初始 CHM 栅格数据进行坡度校正和移动窗口差分滤波后,削弱了地面坡度对平均树高的影响,并平滑了 CHM 中的“突兀”点,得到修正 CHM 模型,如图 5 所示。

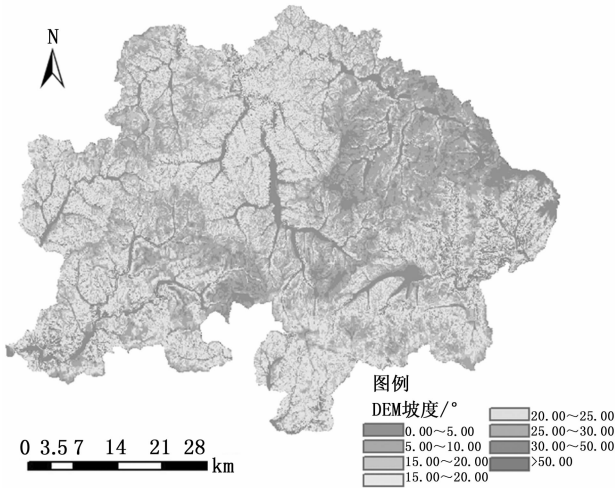


图4 Aster GDEM 派生的坡度图

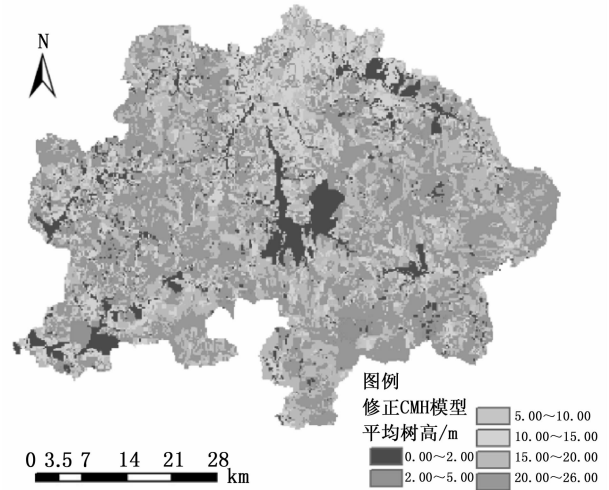


图5 修正 CHM 模型

3.3 平均树高模型精度评价与分析

按照样地森林类型区别,对应的平均树高模型

精度如表2所示。

表2 平均树高估测精度评价

样地森林类型	数量	样地坡度 s	平均树高实测值/m	回归模型平均树高高度估测值/m	修正 CHM 平均树高高度估测值/m	回归模型预估精度/%	修正 CHM 预估精度/m
阔叶林	39	$4.50 \leq s \leq 31.70$	18.05	14.68	16.27	81.35	90.14
混交林	18	$3.00 \leq s \leq 19.10$	18.46	23.09	21.70	74.88	82.42
针叶林	13	$3.00 \leq s \leq 13.60$	19.54	17.90	18.30	91.59	93.63
裸地	1	$s = 0.00$	1.00*	0.90	0.95	90.00	95.00
农田	2	$0.00 \leq s \leq 5.00$	2.00	1.90	2.10	95.00	95.00
草甸	2	$8.60 \leq s \leq 11.20$	1.80	1.60	1.76	88.89	97.78
湿地	2	$3.00 \leq s \leq 5.00$	0.60	0.40	0.52	66.67	86.67
总体	-	-	-	-	-	84.05	91.52

* : 由于在裸地上有零星分布有少量未收割的农田或草类,会影响到 GLAS 回波,因此未将裸地的平均树高实测值定义为0,而是1。

根据表2结果分析,对 ICESat-GLAS 平均树高回归模型而言,其总体预估精度为 84.05%,其中农田和裸地的估测精度较高,达到 90% 以上,主要原因是其地表覆盖简单,且主要分布在地势平缓地区, GLAS 波形及参数受地面坡度影响小;针叶林平均树高预估精度高于阔叶林和混交林,除了其地形平缓对 GLAS 波形影响较小外,还由于阔叶树的冠形一般呈椭圆形,冠顶部分变化较缓,大部分阔叶林对应的 ICESat-GLAS 波形的首个回波不是来自树冠顶部的反射,导致 GLAS 波形提取的平均树高值与实测值偏差稍大。相反,针叶树的冠形一般呈圆锥形或铅笔形,因此其树冠的垂直结构上升快,冠顶边缘清晰, GLAS 波形的首个回波为冠顶或上层树冠反射的概率更大一些,而 GLAS 波形提取的平均树高值会更接近于实测值。

修正 CHM 模型比 ICESat-GLAS 平均树高回归方程预测精度普遍提高,总体预估精度达到了

91.52%。这是因为修正 CHM 在构建过程中通过坡度校正削弱了地形起伏变化对平均树高的干扰,并通过移动窗口差分滤波,抑制了部分突兀点,使 CHM 模型更平滑,更接近于实测值。

4 结论

本研究以吉林省汪清林业局经营区域为例,基于星载激光雷达 ICESat-GLAS 回波参数 *Extent*、*Lead* 和 *Trail* 建立了平均树高多元回归模型并进行平均树高估算,进而运用反距离插值和不规则三角网 TIN 构建了空间连续的平均树高初始 CHM 模型,再利用移动窗口差分滤波构建修正 CHM,提高了估测精度。主要研究结论如下:

应用多元回归法构建的平均树高估测模型,总体平均估测精度为 84.05%,实现了空间连续分布制图。其中针叶林平均树高估测精度高于阔叶林和混交林。修正 CHM 模型对总体预估精度为

91.52%,比前者提高了7.47%。研究表明,ICESat-GLAS 波形参数 *Extent*、*Lead* 和 *Trail* 等与平均树高相关性较高,适合用于平均树高的估测,但估测精度受地表坡度影响较大。坡度校正和移动窗口差分滤波可有效削弱复杂地形因素对平均树高估测的影响,抑制“突兀”点,提高平均树高估测精度。然而,本研究在构建 CHM 模型时未考虑不同的森林类型的季节性变化以及森林冠层形状对其高度估测的影响,建议在后续工作中对此进行探索研究,以期进一步提高平均树高估测精度。另外,建议 ICESat-GLAS 数据联合其他数据源,如 TM (Thematic Mapper) 数据,进行空间插值运算,可望得到更为理想的连续平均树高空间分布结果。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 邢艳秋,王立海. 基于森林生物量相容性模型长白山天然林生物量估测[J]. 森林工程, 2008, 24(2): 1 - 4
- [3] 李立存,张淑芬,邢艳秋. 全站仪和测高仪在树高测定上的比较分析[J]. 森林工程, 2011, 27(4): 38 - 41
- [4] Means J E, Acker S A, Harding D J, *et al.* Use of Large - Footprint Scanning Airborne Lidar To Estimate Forest Stand Characteristics in the Western Cascades of Oregon [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67 (3): 298 - 308
- [5] Xing Y Q, de Gier A, Zhang J J, *et al.* An improved method for estimating forest canopy height using ICESat-GLAS full waveform data over sloping terrain: A case study in Changbai mountains, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12 (5): 385 - 392
- [6] Hyde P, Dubayah R, Walker W, *et al.* Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102 (1/2): 63 - 73
- [7] Drake J B, Dubayah R O, Knox R G, *et al.* Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81 (2/3): 378 - 392
- [8] Sun G, Ranson K J, Kimes D S, *et al.* Forest vertical structure from GLAS: An evaluation using LVIS and SRTM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (1): 107 - 117
- [9] Næsset E, Gobakken T. Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96 (3/4): 453 - 465
- [10] Lefsky M A, Cohen W B, Acker S A, *et al.* 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
- [11] Lefsky M A, Hudak A T, Cohen W B, *et al.* Geographic variability in lidar predictions of forest stand structure in the Pacific Northwest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95 (4): 532 - 548
- [12] Nelson R, Ranson K J, Sun G, *et al.* Estimating Siberian timber volume using MODIS and ICESat/GLAS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113 (3): 691 - 701
- [13] Dubayah R O, Drake J B. LiDAR remote sensing for forestry [J]. *Journal of Forestry*, 2000, 98 (6): 44 - 46
- [14] Harding D J, Carabajal C C. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure [J]. *Gophysical Research Letters*, 2005, 32 (L21S10): 1 - 4
- [15] 邢艳秋,王立海. 基于 ICESat-GLAS 完整波形的坡地森林冠层高度反演研究——以吉林长白山林区为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2009, 34(6): 696 - 700
- [16] Lefsky M A, Keller M, Pang Y, *et al.* Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1): 013013 - 013537
- [17] 于颖,范文义,李明泽,等. 利用大光斑激光雷达数据估测树高和生物量[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 84 - 87
- [18] Duncanson L I, Niemann K O, Wulder M A. Estimating forest canopy height and terrain relief from GLAS waveform metrics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 138 - 154
- [19] Allouis T, Durrieu S, Couteron P. A new method for incorporating hillslope effects to improve canopy-height estimates from large-footprint lidar waveforms [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2012, 9(4): 730 - 734
- [20] Wulder M A, White J C, Nelson R F, *et al.* Lidar sampling for large - area forest characterization: A review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 196 - 209
- [21] Fatoyinbo T E, Simard M. Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(2): 668 - 681
- [22] 吴红波. 基于星载大光斑 LiDAR 数据反演森林冠层高度及应用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2011
- [23] Nakai T, Sumida A, Kodama Y, *et al.* A comparison between various definitions of forest stand height and aerodynamic canopy height [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150: 1225 - 1233
- [24] Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State of the art [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64 (1): 1 - 16
- [25] Starck J L, Bijaoui A. Filtering and deconvolution by the wavelet transform [J]. *Signal Processing*, 1994, 35 (3): 195 - 211
- [26] Clevis Q, Tucker G E, Lancaster S T, *et al.* A simple algorithm for the mapping of TIN data onto a static grid: Applied to the stratigraphic simulation of river meander deposits [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32 (6): 749 - 766
- [27] Tucker G E, Lancaster S T, Gasparini N M, *et al.* An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modeling using triangulated irregular networks [J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27 (8): 959 - 973
- [28] Ali T, Mehrabian A. A novel computational paradigm for creating a Triangular Irregular Network (TIN) from LiDAR data [J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2009, 71 (12): 624 - 629