

基于星载 LiDAR 波形数据的森林胸高断面积估测研究

王蕊, 邢艳秋*, 尤号田, 孙小添

(东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为探索星载 LiDAR 在森林胸高断面积上的应用潜力, 利用星载激光雷达 ICESat/GLAS 波形数据对吉林汪清林区的森林胸高断面积进行估测。通过对 ICESat/GLAS 波形数据波形进行处理, 提取一系列波形特征参数, 利用回归估计方法分析波形特征参数与胸高断面积的相关关系, 建立预测模型对森林胸高断面积进行估测。结果表明:在所提波形特征参数中, 波形长度、 H_5 和 H_{10} 与胸高断面积在三次函数拟合时具有明显的相关性, 判定系数 R^2 分别为 0.813、0.737 和 0.613, 预测精度 P 分别为 0.951、0.932 和 0.901, 综合分析最终确定波形长度估测模型最好, 该模型可稳定准确地估测出胸高断面积。表明星载 LiDAR 是未来估测森林胸高断面积一种有效的方法, 并为进一步的森林蓄积量研究提供了一种技术手段。

关键词:胸高断面积; 星载 LiDAR; ICESat/GLAS; 波形特征参数

中图分类号:S771.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)05-0156-07

Forest Basal Area Estimation Based on Spaceborne LiDAR Waveform Data

WANG Rui, XING Yan-qiu*, YOU Hao-tian, SUN Xiao-tian

(Center for Forest Operations and Environment of Northeast Forest University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to explore the potential application of spaceborne LiDAR in the estimation of the basal area at breast height (BA) of forests, an investigation was carried out in Wangqing forest Farm of Jilin Province by using spaceborne lidar ICESat/GLAS waveform data. The data were processed to extract a series of waveform characteristic parameters. Correlations between obtained parameters and BA were analyzed by using regression estimation method, and the prediction models were established to estimate BA. Among the extracted characteristic parameters of the waveform, significant correlations were observed between BA and the parameters, such as waveform length, H_5 , and H_{10} , fitted by cubic function estimation method. The corresponding R^2 values were 0.813, 0.737 and 0.613, respectively, and prediction accuracy P values were 0.951, 0.932 and 0.901, respectively. After comprehensive analysis, it was concluded that waveform length based model was the best one for estimating BA. The results indicated that it would be an effective method to apply spaceborne LiDAR in estimating BA, and an technical measure for the further estimation of forest volume.

Key words: basal area; spaceborne LiDAR; ICESat/GLAS; waveform characteristic parameter

遥感是近年来迅速发展的一项突破性技术, 它能够在一定程度上实现空间和时间尺度上参数的快速和无破坏测量, 在许多领域得到了广泛的应

用^[1-5]。其中星载 LiDAR (Light Detection and Ranging) 作为一项主动遥感技术, 相对于传统光学遥感和微波遥感, 它不仅能够克服信号饱和的局限

收稿日期: 2013-11-29 修回日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171274); 中国科学院数字地球重点实验室开放基金课题(2011LDE012); 中央高校基本科研业务费专项资金支撑项目(DL12EB07)。

作者简介: 王蕊, 女, 博士, 研究方向: 森林管理与林业信息工程。E-mail: wangrui19890908@126.com

* 通信作者: 邢艳秋, 女, 博士, 教授, 研究方向: 3S 技术及其应用。E-mail: yanqixing@nefu.edu.cn

性,并且还能够准确地获取森林的垂直结构信息,因此可以高精度地估测出森林结构参数,在林业方面得到了广泛的应用^[6-16]。胸高断面积是指树木距地面 1.3 m 处树干的横切面面积,这个面积一般是通过测量树干横切面的直径而求出的。在森林资源调查中,林业工作者野外调查的核心内容是基本的测树因子,其中胸高断面积的测量是必不可少的重要树木参数测量之一。胸高断面积不仅是测算蓄积量的重要指标,也是林业经营、发展和规划的重要决策依据之一。目前已有研究者探索了机载大光斑 LiDAR 在森林胸高断面积上的应用潜力^[17-20]。但是机载大光斑 LiDAR 会受到扫描视场角、激光发散角和飞行高度等限制,阻碍其数据的获取。而与机载大光斑 LiDAR 相比,星载 LiDAR 受地面和天空背景干扰较小,并且具有较高的垂直分辨率,鉴于此本研究探索了星载 LiDAR 在森林胸高断面积上的应用潜力,利用星载激光雷达 ICESat/GLAS 波形数据对吉林汪清地区的森林胸高断面积进行了估测。

1 研究区概况

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(N43°05′—N43°40′、E129°56′—E131°04′)为研究区,总面积 30.4 万 hm²。地面高程为 360~1 477 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 500~1 100 m 之间。针叶树主要有红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、臭松(*Symplocarpus foetidus*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、阔叶树多为水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、椴树(*Tilia tuan*)、色木(*Acer mono*)、榆树(*Ulmus pumila*)、白桦(*Betula platyphylla*)、杨树(*Populus*)、枫桦(*Betula davurica*)等。

2 研究方法

2.1 地面数据采集

随机选取 GLAS 激光光斑位置作为地面数据的调查样地,以激光光斑中心点为圆心建立圆形样地。调查过程中,利用 GARMIN 征程 300 型 GPS (Global Positioning System) 手持仪对 ICESat-

GLAS 激光脚点进行定位并记录其坐标,以光斑中心作为调查样地的中心点,建立水平有效投影面积为 500 m² 的圆形样地;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。本研究所采用的森林类型为混交林,由于星载激光雷达地面光斑尺寸较大,因此所使用的数据是林分的胸高断面积。

2.2 激光雷达数据

搭载在冰、云和陆地高程卫星 ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) 上的 GLAS (Geoscience Laser Altimetry System) 是第一个用于全球地面连续观测的星载激光测高系统,重返周期约 183 d,飞行高度为 600 km,可覆盖地表 86°N~86°S 及两极的大部分区域。GLAS 激光器每秒可发射 40 个激光脉冲,其脉冲宽度为 4 ns,每个激光脉冲在地面上所形成的光斑直径大约为 70 m,相邻光斑的间距为 170 m。ICESat-GLAS 系统共提供了 15 种数据产品,包括 GLA01、GLA02、…、GLA15。其中 GLA01 为全球测高数据产品,其记录了与地面激光光斑内地物相对应的完整波形数据;GLA14 则为陆地测高数据产品,其记录了与 GLA01 波形数据相对应的地面光斑内地物的地理位置和高程数据。本研究则使用了 GLA01 和 GLA14 数据,GLAS 数据可在美国国家冰雪数据中心(<http://nsidc.org/data/ice-at/>)进行下载,针对该研究区则下载了 2003—2009 年的数据。

2.2.1 ICESat/GLAS 数据处理 ICESat/GLAS 原始数据是以专门定义的二进制格式存储的,包括元数据信息和数据信息。在进行数据应用时,需将原始数据的二进制格式转换为 ASCII 的数据格式,在该数据格式转换过程中用到的软件为 IDL 和 MATLAB。为了增强不同波形数据之间的可比性,还需对格式转换后的数据进行标准化处理。上述处理为 ICESat/GLAS 回波波形数据的预处理。

对 ICESat/GLAS 回波波形数据进行预处理后,需要确定波形数据的背景噪声阈值、波形信号开始和波形信号结束的位置(图 1),为后续的波形特征参数提取做准备。在本研究中选取整个波形数据 544 帧中的前 100 帧用于确定背景噪声的均值和标准差,具体计算如式(1)和式(2)所示:

$$noise_mean = \bar{V} = \sum_{i=1}^{100} V_i / 100 \tag{1}$$

$$noise_std_deviation=\Delta V=\sqrt{\sum_{i=1}^{100}(V_i-\bar{V})^2/100}$$

(2)

式中, V_i 是回波波形在时刻 i 接收到的回波能量。

背景噪声阈值设为噪声的均值与 4 倍的标准差之和^[11],具体计算如式(3)所示:

$$Threshold=noise_mean+4\times noise_std_deviation$$

(3)

信号开始位置则设为高于背景噪声阈值的波形中最左边能量的位置,信号结束位置则设为高于背景噪声阈值的波形中最右边能量的位置,如式(4)和式(5)所示:

$$Signal_start=(t\in I)\cap(t\leqslant(\forall i\in I))$$

(4)

$$Signal_end=(t\in I)\cap(t\geqslant(\forall i\in I)),$$
$$with I=\{i\mid V_i>threshold,1\leqslant i\leqslant 544\}$$

(5)

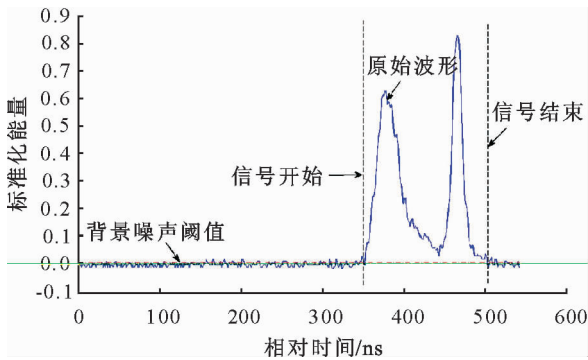


图 1 背景噪声阈值、信号开始和信号结束位置

Fig. 1 Background noise threshold signal start and signal end location

2.2.2 波形特征参数提取 在数据应用时去除了仅有一个回波波峰和位于较大坡度($>5^\circ$)上的波形数据,因为仅有一个回波波峰的波形数据可能为地面回波数据,而较大坡度($>5^\circ$)上的波形数据则很难清楚地辨别冠层回波和地面回波。对 ICESat/GLAS 波形数据进行处理后,就可从回波波形中进行波形特征参数的提取。本研究提取了波形长度和波形分位数(H_5 、 H_{10} 、 H_{15} 、 \cdots 、 H_{25} 、 \cdots 、 H_{45} 、 H_{50} 、 H_{55} 、 \cdots 、 H_{75} 、 \cdots 、 H_{85} 、 H_{90} 、 H_{95})一系列波形特征参数(图 2)。

在所提取的波形特征参数中,其中波形长度指的是在回波波形中,首次回波点和地面回波峰值点之间的距离,在图 2 中所示即为信号开始和地面回波峰值点之间的距离;其中波形分位数参数 H_{50} 指的是在回波波形中,相对于首次回波点,波形能量占总能量 50% 的位置,在图 2 中所示即为相对于信号开始,波形能量占总能量(信号开始和信号结束之间的能量和)50% 的位置;其中波形分位数参数 H_{75} 指的是在回波波形中,相对于首次回波点,波形能量占总能量 75% 的位置,在图 2 中所示即为相对于信号开始,波形能量占总能量(信号开始和信号结束之间的能量和)75% 的位置;其他波形分位数参数的含义和 H_{50} 、 H_{75} 的相类似。

2.3 统计方法比较

应用回归估计方法建立胸高断面积预测模型,即利用提取的一系列波形特征参数直接建立单变量胸高断面积回归方程。所使用的回归估计方法包括线性函数估计、二次函数估计、三次函数估计、对数函数估计、幂函数估计和 logistic 函数估计。

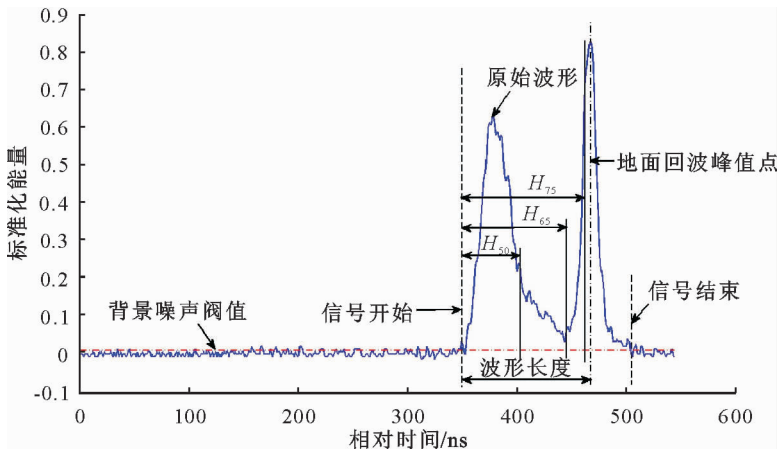


图 2 波形长度、 H_{50} 、 H_{65} 和 H_{75} 图示

Fig. 2 Schematic diagram of wavelength H_{50} H_{65} and H_{75}

2.4 模型评价指标

将筛选剔除后所选取的野外数据(27)分为 2 组,一组数据(18)用来建立森林胸高断面积估测模

型,而另一组数据(9)则用来进行模型的验证。模型预估精度 P 对估测模型的预测精度进行评价,计算公式为:

$$P=1-\frac{|y-\hat{y}|}{y} \tag{6}$$

式中, y 为实测值, \hat{y} 为用建立模型计算所得到的估计值。

3 结果与分析

利用回归估计方法线性函数估计、二次函数估计、三次函数估计、对数函数估计、幂函数估计和 logistic 函数估计分别分析了波形特征参数和胸高断面面积的相关关系,利用判定系数的大小来评价各估测模型拟合结果的优劣,判定系数为相关系数的平方,用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标。判定系数越大,说明自变量对因变量的解释程度就越高,当建模的目的为预测因变量值时,一般是

优先考虑有较高判定系数的估测模型。
由表 1 可看出,在各回归估计方法中,三次函数估计方法的判定系数最大,回归结果最优,二次函数估计方法回归结果次之,其他函数估计回归结果较差。

表 1 波形长度 H 与胸高断面面积判定系数
Table 1 Determination coefficient of wavelength H and basal area

波形特征参数	回归估计方法					
	线性	二次	三次	对数	幂	Logistic
波形长度	0.291	0.581	0.813	0.247	0.175	0.195

由图 3 可看出,利用三次函数估计模型的拟合度较高,其次为二次函数估计,其他函数估计模型的拟合度较低。

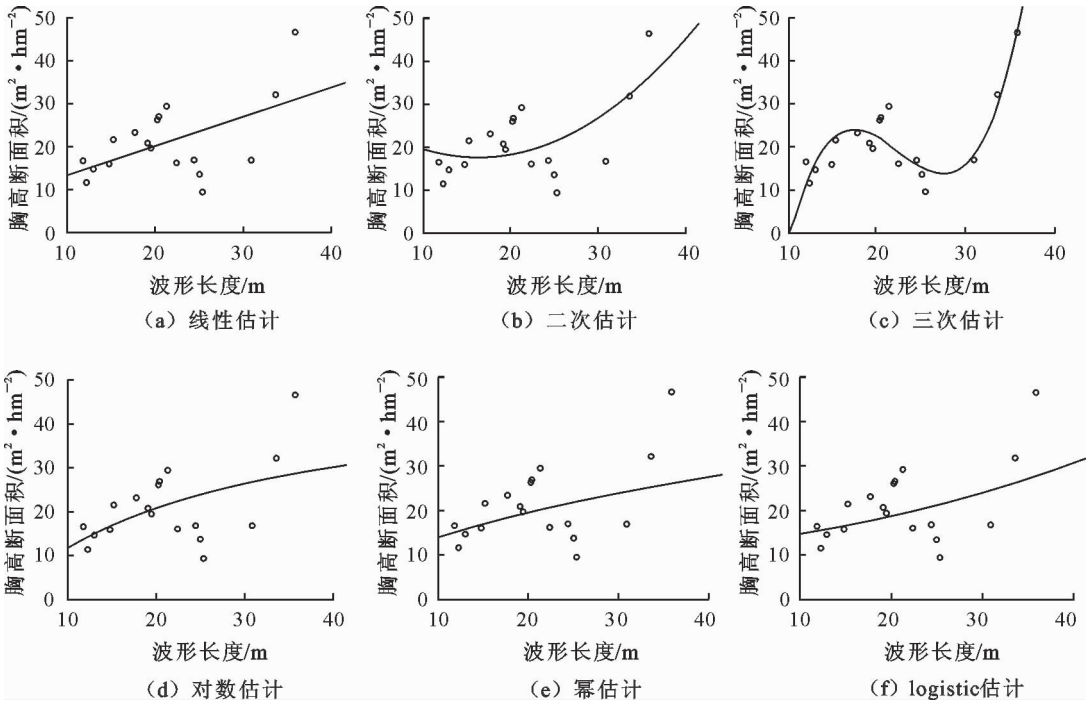


图 3 利用各估计方法波形长度回归分析结果

Fig. 3 Result of wavelength regression analysis using various estimation methods

由表 2 可看出,在各回归估计方法中,三次函数估计方法下的判定系数最大,回归结果最优,二次函数估计回归结果次之,其他函数估计回归结果较差。
由图 4 可看出,利用三次函数估计模型的拟合度较高,其次为二次函数估计,其他函数估计模型的拟合度较低。

表 2 H_5 与胸高断面面积判定系数

波形特征参数	回归估计方法					
	线性	二次	三次	对数	幂	Logistic
H_5	0.212	0.571	0.737	0.133	0.055	0.103

由表 3 可看出,在各回归估计方法中,三次函数估计方法下的判定系数最大,回归结果最优,二次函数估计回归结果次之,其他函数估计回归结果较差。
由图 5 可看出,利用三次函数估计模型的拟合度较高,其次为二次函数估计,其他函数估计模型的拟合度较低。

表 3 H_{10} 与胸高断面面积判定系数

波形特征参数	回归估计方法					
	线性	二次	三次	对数	幂	Logistic
H_{10}	0.002	0.446	0.613	0.003	0.023	0.004

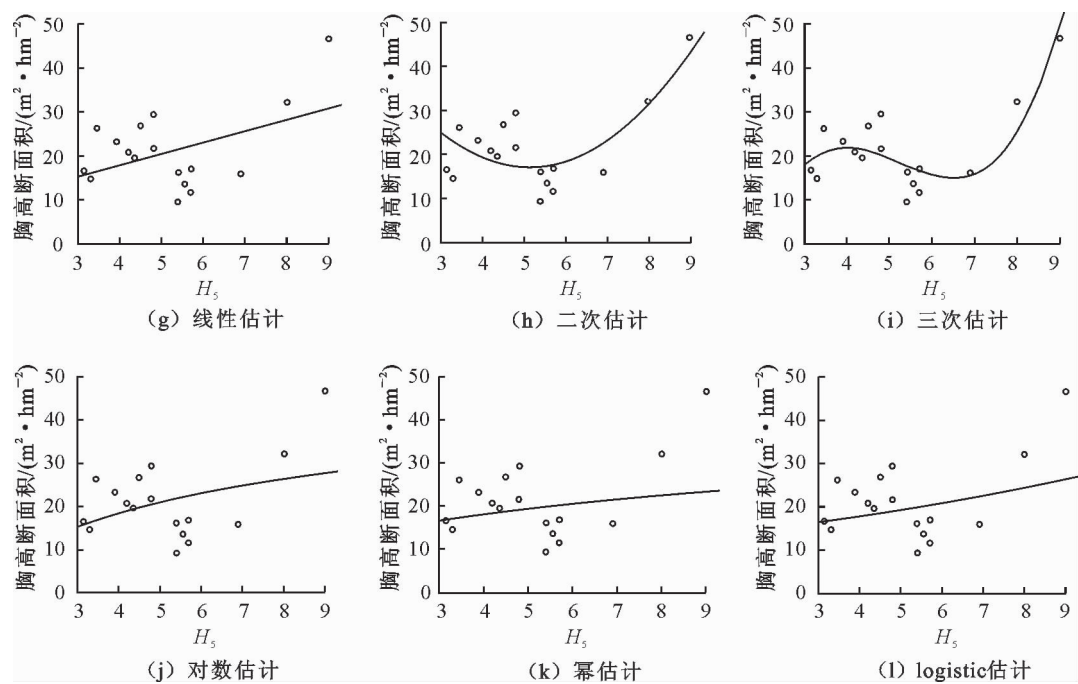


图 4 利用各估计方法 H_5 回归分析结果

Fig. 4 Result of H_5 regression analysis using various estimation methods

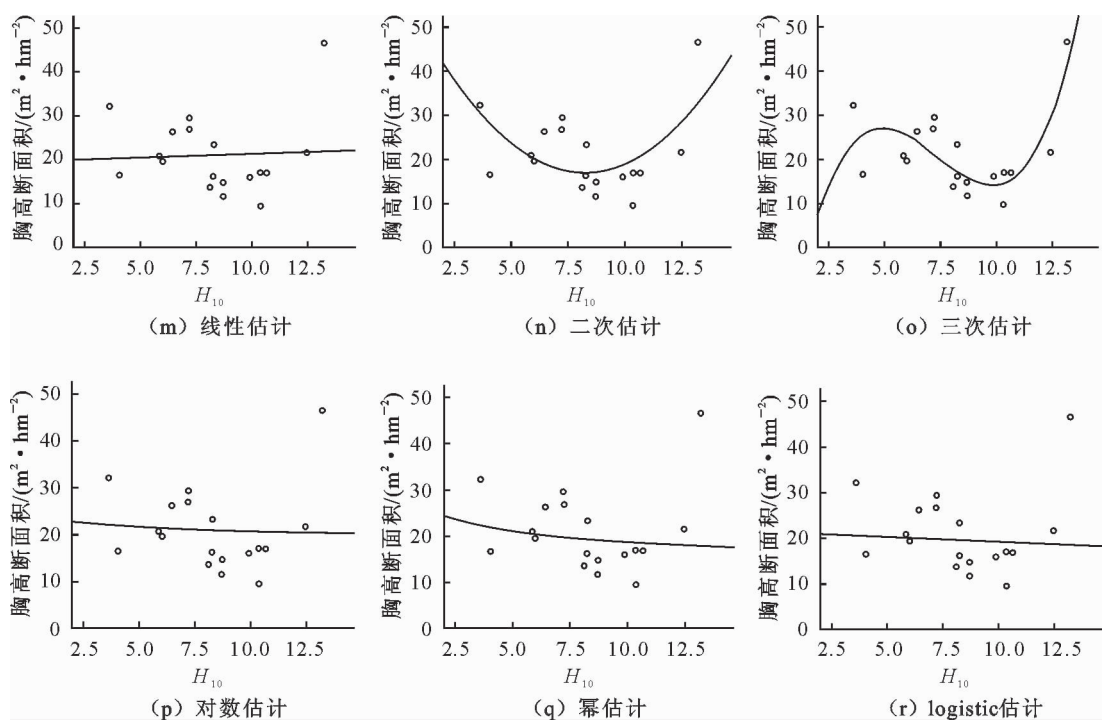


图 5 利用各估计方法 H_{10} 回归分析结果

Fig. 5 Result of H_{10} regression analysis using various estimation methods

利用各回归估计方法分析其他波形特征参数与胸高断面积的相关关系,结果表明其他波形特征参数与胸高断面积的相关关系较差, R^2 最大值仅为 0.197,回归估计结果较差。

综上所述,在回归估计方法线性函数估计、二次函数估计、三次函数估计、对数函数估计、幂函数估计和 logistic 函数估计中,利用三次函数估计方法时波

形特征参数中波形长度、 H_5 、 H_{10} 与胸高断面积的相关关系最为显著,在所有的函数估计方法中,其它的波形特征参数则与胸高断面积无明显的相关关系。

由表 4 可看出,波形长度和胸高断面积的相关性最高; H_5 次之; H_{10} 最低。综合考虑胸高断面积与波形特征参数估测模型拟合相关性及模型精度评价结果,最终确定波形特征参数中的波形长度估测

胸高断面面积的结果最好,效果最优。

对于胸高断面面积的估测,分析对比了星载大光斑与机载大光斑的估测结果,Lefsky^[18]等利用机载大光斑数据估测胸高断面面积时,精度为 0.87,利用星载大光斑数据估测胸高断面面积时,精度为0.81,略低于机载大光斑的估测精度。分析其原因,可能有以下几个方面:1)相对于机载大光斑的光斑尺寸(8~25 m),星载大光斑的光斑尺寸(70 m)明显较大,尽管本文所选取的星载光斑位置位于较为平坦的区域,但与机载大光斑相比,受到地面影响的程度则会

较大;2)受野外实地测量环境及仪器的限制,野外采集样地的大小很难达到星载大光斑的光斑尺寸,这就存在一定的尺寸差异,相比较而言,野外采集样地大小则很容易实现与机载大光斑相同的尺寸;3)汪清地区森林多为天然林,人工林较少,因此受到林分的限制,所选取的研究对象为混交林,而混交林中针叶树和阔叶树在树木结构形状上会有一定的差异。而在使用机载大光斑估测胸高断面面积时,所选取的研究对象为单一森林类型(阔叶林)^[19]或单一树种(铁杉)^[18],这就减小了树木结构形状上的差异。

表 4 胸高断面面积估测模型及精度评价结果

Table 4 Estimation model of basal area and result of accuracy evaluation

估测模型					精度评价
自变量	因变量	R^2	RMSE	模型	P
H	胸高断面面积	0.813	3.999	$-177.325+29.322H-1.376H^2+0.02H^3$	0.951
H_5	胸高断面面积	0.737	4.987	$-22.700+35.836H_5-8.532H_5^2+0.6H_5^3$	0.932
H_{10}	胸高断面面积	0.613	6.059	$-40.854+32.883H_{10}-4.987H_{10}^2+0.225H_{10}^3$	0.901

4 结论与讨论

利用星载 LiDAR 数据估测了吉林汪清地区的森林胸高断面面积,主要目的是探索星载 LiDAR 数据在森林结构参数胸高断面面积上的应用潜力。通过从波形中提取波形特征参数,分析波形特征参数与胸高断面面积的相关关系,建立胸高断面面积估测模型。综合分析最终确定波形长度估测模型最好,该模型可稳定准确地估测出胸高断面面积。回归模型在森林胸高断面面积的估测中取得了较好的效果,表明利用星载 LiDAR 来估测森林胸高断面面积是一种比较有效的方法,为进一步的森林蓄积量研究提供了一种技术手段。

总体来说,用星载 LiDAR 数据来估测森林胸高断面面积是比较可行的,但同时该研究也存在一些不足:1)在回归分析中,只考虑了单变量,建议考虑多变量的线性或非线性组合;2)仅考虑了波形本身特征,建议进一步分析波形数据的高斯分量特征(位置和数目等),探索其与胸高断面面积的关系;3)仅对较平坦区域(0~5°)的胸高断面面积进行了研究,而对其他区域(>5°)进行研究时需减弱或消除地形因素的影响;4)研究对象只选取了混交林,建议进一步探索星载 LiDAR 在单一森林类型或单一树种方面的应用潜力,以减小树木结构差异对估测结果的影响;5)该研究利用回归方法进行数据的分析和模型的构建,建议探索其他方法(如神经网络和支持向量机等)在该参数数据分析和模型构建上的应用潜力。

[1] 孙存举,赵鹏祥,张振华. 基于 GIS 和 RS 的黄龙山林区土地时空动态变化分析[J]. 西北林学院学报,2012, 27(3):174-179. SUN C J, ZHAO P X, ZHAO Z H. Analysis of land use dynamic changes in Huanglong mountainous forest areas based on GIS and RS [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3):174-179. (in Chinese)

[2] 吴飏,张登荣,张汉奎,等. 结合图像纹理特征的森林郁闭度遥感估测[J]. 林业科学,2012,48(2):48-53. WU Y, ZHANG D R, ZHANG H K, et al. Remote sensing estimation of forest canopy density combined with texture features[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012,48(2):48-53. (in Chinese)

[3] 范少辉,官凤英,苏文会,等. 基于遥感技术的竹资源变化监测研究[J]. 西北林学院学报,2012, 27(5):169-173. FAN S H, GUAN F Y, SU W H, et al. Monitoring of bamboo resources based remote sensing technology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5):169-173. (in Chinese)

[4] 李永亮,林辉,马延辉. 基于 CBERS-02B 星数据的竹林、针叶林纹理特征变化分析[J]. 西北林学院学报,2011, 26(1):171-175. LI Y H, LIN H, MA Y H. Analysis of the texture feature variations of bamboos and coniferous forests based on CBERS-02B data [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011, 26(1):171-175. (in Chinese)

[5] 刘翠玲,许亚平. 基于 TM 数据的敦煌绿洲土壤盐碱化信息提取研究[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2013, 34(3):68-76. LIU C L, XU Y P. Soil salinization extraction research in Dunhuang oasis based on TM data [J]. Journal of Capital Normal University:Nat. Sci. Edi., 2013, 34(3):68-76. (in Chinese)

[6] SIMARD M, PINTO N, FISHER J B, et al. Mapping forest canopy height globally with spaceborne Lidar[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences (2005-2012),2011,116

(G4).

[7] LEFSKY M A. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System[J]. Geophysical Research Letters,2010,37(15).

[8] ROSETTE J A, NORTH P R J, SUAREZ J C, *et al.* A comparison of biophysical parameter retrieval for forestry using airborne and satellite LiDAR [J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30(19):5229-5237.

[9] 王金亮,程峰,王成,等. 基于 ICESat-GLAS 数据估算复杂地形区域森林蓄积量潜力初探——以云南香格里拉县为例[J]. 遥感技术与应用,2012,27(1):45-50.

WANG J L, CHENG F, WANG C, *et al.* Primary discussion on the potential of forest volumes estimating using ICESat-GLAS data in complex area——a case study of Shangri-la, Yunnan province[J]. Remote Sensing Technology and Application,2012,27(1):45-50. (in Chinese)

[10] 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, 2007,1:1-18.

[11] LEFSKY M A, HARDING D J, KELLER M, *et al.* Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. Geophysical Research Letters,2005,32:1-4.

[12] XING Y, WANG L. Estimating of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat full waveform data;a case study in Changbai Mountain, China. [C]//Second International Conference on Earth Observation for Global Changes. International Society for Optics and Photonics,2009: 74710-74719.

[13] 于颖,范文义,李明泽. 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.

YU Y, FAN W Y, LI M Z. Estimation of forest tree heights and biomass from large footprint lidar data[J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(9):84-87. (in Chinese)

[14] MARIANO GARCÍA, SORIN POPESCU, DAVID RIAÑO, *et al.* Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data[J]. Remote Sensing of Environment,2012,123:81-89.

[15] 洛社周. 激光雷达遥感森林叶面积指数提取方法研究与应用[D]. 北京:中国地质大学,2012.

[16] ZHANG J, ALFRED DE GIER, XING Y, *et al.* Full waveform-based analysis for forest type information derivation from large footprint spaceborne lidar data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2011,77(3):281-290.

[17] LEFSKY M A, COHEN W B, PARKER G G, *et al.* Lidar remote sensing for ecosystem studies[J]. BioScience January,2002,52(1):19,30.

[18] LEFSKY M A, COHEN W B, ACKER S A, *et al.* Structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock forests[J]. Remote sensing environment,1999,70:339-361.

[19] LEFSKY M A, HARDING D, COHEN W B, *et al.* Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA[J]. Remote sensing environment,1999,67:83-98.

[20] MEANS J E, ACKER S A, HARDING D J, *et al.* Scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon[J]. Remote Sensing Environment,1999,67:298-308.