

星载激光雷达 GLAS 与 TM 光学遥感 联合反演森林叶面积指数

骆社周^{1,2}, 王成^{1*}, 习晓环¹, 聂胜¹, 夏少波¹, 万怡平¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094;
2. 北京城市学院, 北京 100083)

摘要:通过对地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)波形数据进行高斯分解,提取精确的波形特征信息,计算出 GLAS 波形数据激光穿透指数(LPI),基于 LPI 提出 GLAS 数据反演叶面积指数(LAI)的新方法,建立了 GLAS 数据反演森林 LAI 的模型($R^2=0.84$, $RMSE=0.64$),并用留一交叉验证法(LOOCV)对反演模型的可靠性进行了验证,结果表明,该模型没有过度拟合,具有很好的泛化能力,最后通过人工神经网络融合 GLAS 与 TM(Thematic Mapper, 专题制图仪)遥感数据实现区域尺度森林 LAI 反演,用 25 个实测 LAI 对反演精度进行了验证,研究表明反演 LAI 与实测值较为接近,精度较高($R^2=0.76$, $RMSE=0.69$),为生态环境研究提供精确的输入参数,为 GLAS 数据大区域高精度 LAI 反演提供新的方法和思路。

关键词:激光雷达;叶面积指数;穿透指数;回波强度;神经网络;地球科学激光测高系统(GLAS)
中图分类号:P237 **文献标识码:**A

Forest leaf area index estimation using combined ICESat/GLAS and optical remote sensing image

LUO She-Zhou^{1,2}, WANG Cheng^{1*}, XI Xiao-Huan¹, NIE Sheng¹,
XIA Shao-Bo¹, WAN Yi-Ping¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Beijing City University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on Gaussian decomposition of the geoscience laser altimeter system (GLAS) waveform, accurate waveform characteristics were extracted, and then laser penetrate index (LPI) was computed for each GLAS waveform. The new method of leaf area index (LAI) estimation using LPI derived from GLAS data was proposed. Forest LAI estimation model based on GLAS data was established ($R^2=0.84$, $RMSE=0.64$) and the model's reliability was assessed using the Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) method. The result indicates that the regression model is not overfitting the data and has a good generalization capability. Finally, regional scale forest LAI was estimated using combined GLAS and TM optical remotely sensed image by artificial neural network. And then, the accuracy of the predicted LAIs based on neural network was validated using the other 25 field-measured LAIs. The results show that forest LAI estimation are very close to the field-measured LAIs with a high accuracy ($R^2=0.76$, $RMSE=0.69$). Therefore, the estimated LAIs provide accurate input parameters to the study on ecological environment. The study provides new methods and ideas to estimate LAI with large regional scale using GLAS waveform data.

Key words: LiDAR, LAI, laser penetrate index, echo intensity, neural network, geoscience laser altimeter system (GLAS)
PACS: 42.68.Wt

收稿日期:2013-07-29, 修回日期:2014-09-24

Received date: 2013-07-29, revised date: 2014-09-24

基金项目:国家自然科学基金(41371350,41271428);北京市自然科学基金(4144074);中国科学院“百人计划”和北京高等学校青年英才计划
Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41371350, 41271428), Beijing Natural Science Foundation (4144074), the 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, and Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project
作者简介(Biography): 骆社周(1979-),男,博士后,研究方向为激光雷达植被遥感. E-mail: luosz@radi.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: wangcheng@radi.ac.cn

引言

全球气候变化问题是当今人类社会面临的最严峻挑战之一,关系到人类的生存和发展,是当前非常热门的研究领域^[1]. 植被是影响全球及区域气候变化的重要因素之一,植被冠层是大气与陆地生物圈的重要接口,植被与大气之间碳、水及能量的生态交换过程受到冠层结构的影响^[2],因此探索冠层结构信息的定量提取技术在植被动态监测中尤为重要. 叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)被定义为单位地表面上所有叶片表面积的一半^[3],是分析冠层结构最常用的参数之一,与植物的光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等密切相关^[4],是植被冠层对全球环境变化响应过程模型的一个非常关键的参数^[5]. 因此快速、准确和客观地估算 LAI 是研究生态系统重要的过程^[5-6],具有重要的理论意义和实际应用价值.

光学遥感在 LAI 反演上已经得到广泛的应用,是估算植被 LAI 的一个重要手段,为大区域 LAI 估算提供了最有效的途径^[4,7-8]. 从光学遥感数据反演 LAI 主要是通过植被指数与 LAI 之间线性或者非线性的关系来实现的. 植被指数是指两个或多个波长范围内的地物反射率进行线性或非线性组合运算,产生某些对植被长势、生物量等有一定指示意义的专题数值,如归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、大气阻抗植被指数(ARVI)等^[9]. 光学遥感影像反演 LAI 的主要问题是植被茂密的区域(即 LAI 较高的区域,如 LAI 大于 3 时),植被指数趋向于饱和^[10-11],LAI 估算精度较低. 所以,光学遥感数据估算 LAI 具有一定的局限性,其反演精度受到一定的影响^[12],应用范围受限^[13].

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)是近年来国际上发展十分迅速的主动遥感技术,是激光技术与现代光电探测技术结合的先进探测方式^[14-15],可快速获取目标的三维空间信息,能精确地估算森林结构参数^[16-22]. 激光雷达采集的数据精度高,同时对植被具有极强的穿透力,利用激光雷达脉冲通过冠层的穿透率能够描述冠层空隙度,并可通过 Beer-Lambert 定律转换成叶面积指数^[23]. 用激光雷达数据反演 LAI,可以克服传统光学遥感的饱和问题^[24-25],提高 LAI 的反演精度^[19,26],为生态环境研究提供可靠的基础数据,对地球生态系统的研究有重要意义.

先前的研究证明了机载 LiDAR 数据具有反演 LAI 的能力,能提高 LAI 反演精度,目前的研究主要集中在机载小光斑激光雷达数据上^[18-19,26],其数据获取昂贵,研究区域受限;而搭载于 ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) 卫星上的全球性的星载激光雷达 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 数据能够免费获取,可用来测量冰盖高及其随时间的变化、云层和气溶胶的高度、植被的高度以及海冰的厚度等,是第一个用于连续全球观测的星载激光测高系统^[27-28]. 与机载 LiDAR 相比,GLAS 具有许多不可替代的优势. GLAS 采用卫星平台,运行轨道高、观测视野广,对科学研究都具有十分重要的意义^[29].

GLAS 发射的激光脉冲能部分穿透植被冠层,通过回波波形数据可以分析出整个植被冠层的三维结构和冠层下的地形,已广泛应用于树高、生物量、材积和冠层结构参数的反演^[27-28,30],但利用 GLAS 数据反演森林 LAI 的研究较少. 在本研究文献调研过程中还没有发现已经公开发表的有关星载激光雷达 GLAS 联合光学遥感数据反演森林 LAI 的文献.

本研究通过对 GLAS 波形数据进行处理,提出星载 GLAS 反演 LAI 的新方法,并通过神经网络融合 GLAS 与 TM 光学遥感数据实现大区域森林 LAI 反演,具体目标为(1)对 GLAS 波形进行分解,提取精确的波形信息;(2)计算激光穿透指数(Laser Penetrate Index, LPI),建立星载激光雷达 LAI 反演模型并对模型的可靠性和精度进行验证;(3)通过神经网络融合 GLAS 与 TM 光学遥感数据实现大区域连续 LAI 反演. 该研究探索了星载激光雷达数据反演森林 LAI 的原理与方法,充分利用 GLAS 数据的高程和能量信息,提高森林 LAI 反演精度,并融合 TM 光学遥感数据实现西藏林芝地区高精度的 LAI 反演,为生态环境研究提供精确的输入参数,为 GLAS 数据大区域连续高精度 LAI 反演提供新的思路与方法.

1 研究区域与数据处理

1.1 研究区域

西藏位于中国的西南部,林芝地区地处藏东南雅鲁藏布江下游,地理位置为东经 93°28' ~ 95°14',北纬 29°22' ~ 30°13'. 该区平均海拔 3 100 m 左右,气候温暖湿润,年降雨量 650 mm 左右,年均温度 8.7 °C,年平均日照为 2 022.2 h,无霜期为 180 d. 林芝的森林面积约为 2.64×10^6 hm²,森林覆盖率为

46.9%,木材蓄积量为 $8.82 \times 10^6 \text{ m}^3$,为中国第三大林区,西藏森林的 80% 都集中在这里,不仅面积大,分布广,而且树种齐全,从亚热带到寒带植物都有生长,素有“绿色宝库”之称,主要树种有柏树、桑树、云杉、冷杉、高山松。

1.2 数据的获取

1.2.1 GLAS 数据的获取及处理

研究采用 2008 年 3 月份的 GLAS 数据,该数据可从美国国家冰雪数据网站上免费下载(<http://nsidc.org/data/icesat/>). 为了有效地对不同波形数据进行了比较和分析,必须对其进行标准化^[31]. 通过每一时刻接收的能量除以波形所有能量的和,实现对波形数据的标准化,其算法见式(1),标准化后的波形数据所有能量和为 1. GLAS 波形数据受到大气、云和系统噪声的影响,存在大量的背景噪声或者无效波形,因此需要对噪声进行滤除,保留有效信号,使得后续波形分析结果精度更高,本文采用低通高斯滤波对背景噪声进行平滑。

$$V_t = \sum_{i=1}^{1000} V_i, \quad V_n(i) = \frac{V_i}{V_t}, \quad (1)$$

V_t 是一个波形的总能量, V_i 为第 i 时刻的能量, $V_n(i)$ 为标准化后第 i 时刻的能量。

因为 GLAS 激光雷达发射激光脉冲近似高斯形状,假设地表也服从高斯分布,那么激光回波波形也应该是高斯曲线. 因此可以把地表回波表达成多个高斯波的和加上一个偏差. 在海洋、海冰和大部分冰盖区域回波是单一高斯波形,但是在陆地和更复杂的冰盖区域,一个光斑内可能有不同地物或坡度较大的地形,回波波形中可能出现多个明显的峰值,因此回波波形模型可以用式(2)表示^[32]. 高斯分解实质上是一个将原始回波信号拟合为一个多高斯函数曲线的过程. 将地面与地物分离是高斯分解的一个重要工作,本研究将拟合后曲线的最后一个高斯波作为地面返回的信号^[31-32]. GLAS 波形高斯分解及特征信息如图 1 所示,可见原始波形由 3 个高斯波形叠加而成。

$$w(t) = \varepsilon + \sum_{m=1}^{N_p} W_m, \quad W_m = A_m e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2}}, \quad (2)$$

$w(t)$ 是波形在 t 时刻的幅度, N_p 是高斯波形的个数, W_m 是第 m 个高斯波, A_m 是第 m 个高斯波的幅度, ε 是高斯波的偏差(噪声), t_m 是高斯波形的位置, σ_m 是第 m 个高斯波的标准差。

1.2.2 光学数据的获取及处理

研究选取的光学遥感数据是 2008 年 10 月份

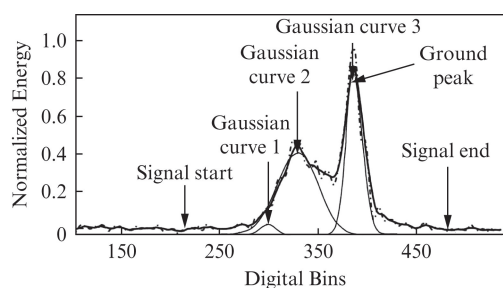


图 1 GLAS 波形高斯分解及特征信息

Fig. 1 The Gaussian decomposition of GLAS waveform and characteristic parameters

TM 影像的 4 个波段,分别为蓝光波段(0.45 ~ 0.52 μm)、绿光波段(0.52 ~ 0.60 μm)、红光波段(0.63 ~ 0.69 μm)、近红外波段(0.76 ~ 0.90 μm),其分辨率为 30 m,数据在使用之前对其进行辐射校正与几何校正. TM 数据的获取是通过官方网站免费下载。

植被覆盖度(Fraction vegetation cover, FVC)是衡量地表植被状况的一个最重指标,对区域环境变化监测研究具有重要意义. 像元二分模型(Dimidiated Pixel Model)是估算 FVC 的一种简单实用的遥感模型(式 3),其可靠性已经得到证实^[33],它假设一个像元由植被覆盖部分与无植被覆盖部分组成,而这两个组分因子的权重是各自面积在像元中所占的比例,因此植被覆盖度可以看作是植被所占的权重^[34]. 本研究用该模型实现研究区 FVC 的估算,作为 GLAS 融合光学遥感影像的输入参数。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}}, \quad (3)$$

FVC 是植被覆盖度, $NDVI_{\text{soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区($FVC = 0$) NDVI 的值, $NDVI_{\text{veg}}$ 为完全被植被覆盖($FVC = 1$) NDVI 的值, NDVI 的计算方法见公式(4)。

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}, \quad (4)$$

NDVI 为归一化植被指数, ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别表示近红外和红光波段的反射率。

1.2.3 实测数据的获取

实测工作于 2011 年 7 月在西藏林芝地区进行, LAI 的测量采用冠层分析仪 LAI-2000, 树高测量用红外测高仪. 由于其光斑直径约为 70 m, 因此光斑大小对应着一片林地. 实地测量时以光斑中心为圆心设置采样区, 在 0° 、 120° 、 240° 和光斑中心分别设置半径约为 10 m 的 4 个子样区, 最终测量了 38 个

GLAS 样本. 每个 GLAS 样点, 用高精度 RTK 差分 GPS 精确定位 GLAS 光斑的中心坐标, 并详细测量和记录各样区内的 LAI、坡度、坡向、植被类型、树龄、数量、树高等信息. 除了 38 个 GLAS 光斑内的 LAI, 用同样的方法测量了 25 个其它位置的 LAI.

2 GLAS 光斑内树高及 LAI 反演

2.1 GLAS 波形数据树高提取

为了提高树高的提取精度, 可以用地形指数法 (Terrain Index) (见式 5) 或 GLAS 波形边沿长度法 (Edge Extent) (见式 6) 减少地形对树高的影响^[32,35]. 由于本研究没有合适的数字高程模型 (DEM), 所以用式(6)对树高进行提取, 减少地形对树高的影响.

$$H = a_1 \times \text{wfExt} - a_2 \times \text{demExt} \quad , \quad (5)$$

$$H = a_1 \times \text{wfExt} - a_2 \times (\text{leadExt} + \text{trailExt}) \quad , \quad (6)$$

其中, a_1 和 a_2 是系数, 可以通过回归分析求得; demExt 是地形指数 (Terrain Index), 即 GLAS 光斑内最大高程与最小高程的差值, 单位是; wfExt 是波形长度 (Waveform Extent), 指信号能量超过噪声阈值开始与结束之间的距离; leadExt 是波形前缘长度 (Leading-edge Extent), 即信号开始位置 (能量超过噪声阈值) 与最大能量一半时最高数据帧之间的高度差, trailExt 是波形后缘长度 (Trailing-edge Extent), 即信号的结束位置与最大能量一半时最低数据帧之间的高度差^[36].

2.2 GLAS 波形数据反演 LAI 及精度验证

2.2.1 GLAS 波形数据反演 LAI

通过分解后的高斯波组精确地计算打到冠层与地面的回波能量, 用地面能量 E_l (见式 7) 与总回波能量 E_{l_0} (见式 8) 的比值计算星载激光穿透指数, 并用该穿透指数与实测 LAI 进行回归分析, 建立星载激光雷达 LAI 反演模型.

$$E_l = \sum_{\text{GroBeg}}^{\text{GroEnd}} E_i \quad , \quad (7)$$

$$E_{l_0} = \sum_{\text{SigBeg}}^{\text{SigEnd}} E_i \quad , \quad (8)$$

其中 E_i 为时刻 i 收到的回波能量, GroBeg 和 GroEnd 是地面回波 (最后一个高斯曲线) 开始和结束的位置, SigEnd 和 SigBeg 是整个波形信号大于阈值的开始和结束的位置, E_l 是地面回波能量和, E_{l_0} 是波形信号大于阈值的所有能量和 (参数位置见图 1).

LPI 定义为地面回波总能量 E_l 与整个波形能量 E_{l_0} 的比值 (见式 9).

$$\text{LPI} = \frac{E_l}{E_{l_0}} \quad . \quad (9)$$

由于在近红外冠层与地面的反射率不同, 需要对其进行校正, 以提高 LAI 的反演精度^[37-38]. 假设 ρ_c 和 ρ_g 分别是冠层和地面的反射率, 则二者反射率的比值 n 等于 ρ_c/ρ_g , 本研究取值 2^[37-38]. 用校正后的回波强度, 通过地面与总回波强度的比计算各样本的激光穿透指数, 计算方法见式 (10).

$$\begin{aligned} \text{LPI}_i &= \frac{A_g}{A_g + A_c} = \frac{\rho_g^{-1} I_g}{\rho_g^{-1} I_g + \rho_c^{-1} I_c} \quad , \quad (10) \\ &= \frac{I_g}{I_g + n I_c} \end{aligned}$$

LPI_i 为基于激光雷达强度的激光穿透指数, A_g 和 A_c 分别为激光打到地面和冠层上的面积, I_g 和 I_c 分别为地面和冠层的回波强度值.

LAI 间接测量方法通常是基于冠层空隙度的 Beer-Lambert 定律 (见式 11) 来实现的^[26,39], 如半球影像方法、TRAC 和 LAI-2000 测量仪器.

$$I = I_0 e^{-kL} \quad , \quad (11)$$

其中 L 是叶面积指数, I 是冠层下面的光, I_0 是冠层上面的光, k 是消光系数, 取决于叶倾角和光束方向. 可以看出, 假如 k 已知, LAI 可以通过 I/I_0 (冠层空隙度) 来计算 (见式 12), 其中 I/I_0 可以用 LPI 代替, 因此激光在冠层中的衰减也可采用基于消光系数与 LAI 的 Beer-Lambert 定律来描述.

$$L = -\frac{1}{k} \ln(I/I_0) = -\frac{1}{k} \ln(\text{LPI}) \quad . \quad (12)$$

本研究用 GLAS 提取的 LPI 与 38 个实测 LAI 进行了回归分析 (见图 2), 建立了 GLAS 数据 LAI 反演模型 ($R^2 = 0.84$, $\text{adj. } R^2 = 0.83$, $\text{RMSE} = 0.64$), 可见 GLAS 波形数据提取的 LPI 与实测 LAI 有很强的相关性.

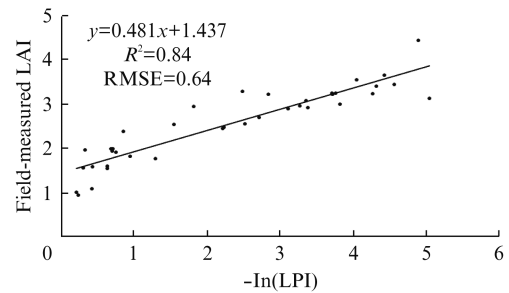


图 2 实测 LAI 与 $-\ln(\text{LPI})$ 的回归关系 ($R^2 = 0.84$, $\text{RMSE} = 0.64$, $n = 38$)

Fig. 2 The scatterplot of the field-measured LAIs against the log-transformed inverse of the LPI ($R^2 = 0.84$, $\text{RMSE} = 0.64$, $n = 38$)

2.2.2 GLAS 波形数据反演 LAI 模型精度评价

由于没有额外的实测 GLAS 光斑内的 LAI 对反演模型进行验证,因此为了评价 GLAS 波形数据反演 LAI 模型的可靠性,用留一交叉验证法(Leave-One-Out Cross-Validation, LOOCV)计算预测残差平方和(Predicted Residual Sums of Squares, PRESS statistic)^[19].留一交叉验证法是假设有 n 个样本,每次用 $n-1$ 个样本作为训练样本,剩下的一个作为模型的验证数据,该方法是评价回归模型泛化能力的一个有效方法,尤其在样本数量相对较少的情况下非常有效^[40].对参加建模的 38 个样本,采用交叉验证方法得到 PRESS 的均方根是 0.65,而 LAI 反演模型的 RMSE 是 0.64,两者比较接近,表明回归模型没有过度拟合,具有很好的泛化能力.

2.3 GLAS 融合 TM 数据反演 LAI

2.3.1 神经网络融合 GLAS 与 TM 数据反演 LAI

星载 GLAS 数据是不连续的,呈条带状分布,条带内数据是离散的点,沿轨道间隔是 170 m,在赤道两条重复轨道之间的间距是 15 km,在 80° 纬度处重复轨道之间的间距为在 2.5 km^[30].由于 GLAS 数据的离散性,水平方向的分布面积有限,如果要获取连续区域尺度的森林结构参数就需要与其它遥感数据进行融合,发挥不同数据各自的优势,实现不同数据来源优势互补^[30].

BP 神经网络(Back-Propagation neural network)是采用误差反向传播算法的人工神经网络模型,它由输入层、输出层、隐含层构成.本文采用 3 层 BP 网络,传递函数用 sigmoid 函数.

为了得到连续高精度的森林 LAI,首先将 GLAS 和 TM 数据进行坐标转换,使其在同一坐标系下进行配准.然后利用 GLAS 数据反演的光斑内的树高、LAI 与 TM 数据计算的植被指数、覆盖度转换为矩阵,输入神经网络模型进行训练,建立人工神经网络模型.由于所用样本数据输入值域之间相差较大,为了避免大值对小值的掩盖,提高网络的训练速度,需要将原始数据标准化至 0~1 之间^[30],用式(13)对原始样本值进行了标准化.

$$y_i = \frac{x_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, \quad (13)$$

y_i 是标准化后的样本值, x_i 是原始样本值, a_{\max} 是样本最大值, a_{\min} 是样本最小值.

由于隐含层节点数的选择不仅对神经网络模型的性能影响很大,而且也是造成“过拟合”的直接原因.因此,在确定隐含层节点数方面,其原则是在满

足精度要求的前提下取尽可能紧凑的结构,即取尽可能少的隐层节点数.通过实验,最终确定 BP 网络模型的结构隐含层节点数为 8.研究采用自适应调整学习速率法加快网络的收敛速度,并通过不断改变网络连接权值的初始值比较系统误差值的大小而得到全局最小值,解决局部极小问题.

该研究神经网络的误差界值设为 0.000 1,同时设置训练次数为 4 000 次,当训练次数大于最大训练次数或网络训练误差小于训练目标时停止训练,输出结果.最后将模型应用于整个研究区得到连续的 LAI,反演结果见图 3.

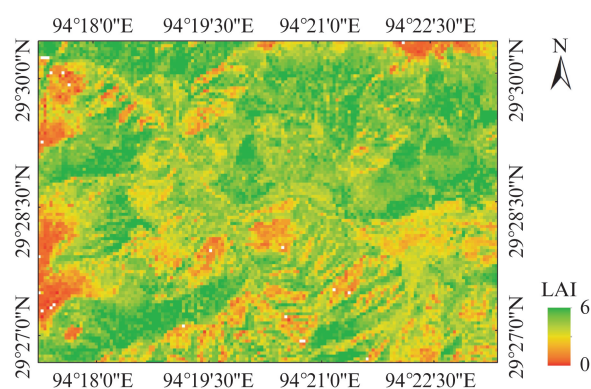


图3 基于BP神经网络的LAI制图

Fig. 3 LAI mapping based on BP neural network

2.3.2 LAI 反演精度验证

利用实测 LAI 对 GLAS 与 TM 数据反演的 LAI 进行精度验证.由于本研究只测了 38 个 GLAS 光斑的 LAI,用来对 GLAS 反演 LAI 建模,所以用 25 个非光斑内的实测 LAI 对反演精度进行验证,结果表明实测 LAI 与预测 LAI 具有较好的相关性,反演精度较高($R^2 = 0.76$, $RMSE = 0.69$).

3 结论

对星载激光雷达 GLAS 波形数据处理的方法进行了介绍,实现了波形特征信息的精确提取,建立 GLAS 数据 LPI 计算模型,并基于 LPI 提出了 GLAS 数据 LAI 反演的新方法;通过该方法构建了 GLAS 数据反演 LAI 的模型($R^2 = 0.84$, $RMSE = 0.64$),并用 LOOCV 交叉验证方法对模型进行验证,结果表明该模型概括性能较好,因此用 GLAS 波形数据实现大区域 LAI 反演具有巨大的潜力.为了实现大区域连续 LAI 的反演,通过人工神经网络法融合 GLAS 与 TM 光学遥感数据实现森林 LAI 的反演.本研究充分利用了 GLAS 数据的高程和能量信息,能

提高森林 LAI 反演精度,并结合 TM 光学遥感数据实现西藏林芝地区高精度的 LAI 反演,为生态环境研究提供精确的输入参数,为 GLAS 数据大区域高精度 LAI 反演提供新的方法和思路,对地球生态系统的研究具有重要意义。

References

- [1] FANG Jing-Yun, ZHU Jiang-Ling, WANG Shao-Peng, *et al.* Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties [J]. *Science China Earth Sciences* (方精云,朱江玲,王少鹏,等. 全球变暖、碳排放及不确定性. *中国科学: 地球科学*), 2011, **41**(10): 1385 - 1395.
- [2] Lowman M D, Rinker h B. Forest canopies. 2nd edition. Elsevier/Academic Press, SanDiego, CA, 2004.
- [3] Chen J M, Pavlic G, Brown L, *et al.* Derivation and validation of canada wide coarse resolution leaf area index maps using high resolution satellite imagery and ground measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **80**(1): 165 - 184.
- [4] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **55**(2): 153 - 162.
- [5] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, *et al.* Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **121**(1-2): 19 - 35.
- [6] ZHANG Jia-Hua, FU Cong-Bin, YAN Xiao-Dong, *et al.* Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations[J]. *Chinese Journal of Geophysics* (张佳华,符淙斌,延晓冬,等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究. *地球物理学报*), 2002, **45**(5): 631 - 637.
- [7] Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, *et al.* On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(2): 244 - 255.
- [8] LUO She-Zhou, CHENG Feng, WANG Fang-Jian, *et al.* Leaf area index inversion based on TM in Linzhi, Tibet[J]. *Remote Sensing Technology and Application* (骆社周,程峰,王方建,等. 基于 TM 遥感数据的西藏林芝地区叶面积指数反演. *遥感技术与应用*), 2012, **27**(5): 740 - 745.
- [9] LIU Liang-Yun, ZHANG Bing, ZHENG Lan-Fen, *et al.* Target classification and soil water content regression using land surface temperature (LST) and vegetation index (VI) [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves* (刘良云,张兵,郑兰芬,等. 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(4): 269 - 273.
- [10] Colombo R, Bellingeri D, Fasolini D, *et al.* Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **86**(1): 120 - 131.
- [11] Eriksson H, Eklundh L, Kuusk A, *et al.* Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**(4): 408 - 418.
- [12] Hall S A, Burke I C, Box D O, *et al.* Estimating stand structure using discrete-return LiDAR: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management* [J]. 2005, **208**(1-3): 189 - 209.
- [13] Tang H, Dubayah R, Swatantran A, *et al.* Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **124**: 242 - 250.
- [14] LIU Cun, LI Nan, WU Hang-Bin, *et al.* Adjustment model of boundary extraction for urban complicate building based on LiDAR data [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)* (刘春,李楠,吴杭彬,等. 机载激光扫描中复杂建筑物轮廓线平差提取模型. *同济大学学报(自然科学版)*), 2012, **40**(9): 1399 - 1405.
- [15] MA Hong-Chao, YAO Chun-Jing, ZHANG Sheng-De. Some technical issues of airborne LIDAR system applied to Wenchuan earthquake relief works[J]. *Journal of Remote Sensing* (马洪超,姚春静,张生德. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨. *遥感学报*), 2008, **12**(6): 925 - 932.
- [16] LIU Zheng-Jun, QIAN Jian-Guo, ZHANG Zheng-Peng, *et al.* Experiment on high resolution DTM acquisition by 3D terrestrial laser scanner [J]. *Science of surveying and Mpping* (刘正军,钱建国,张正鹏,等. 三维激光扫描数据获取高分辨率 DTM 试验研究. *测绘科学*), 2006, **31**(4): 72 - 74.
- [17] 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.
- [18] Korhonen L, Korpela I, Heiskanen J, *et al.* Airborne discrete-return LiDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(4): 1065 - 1080.
- [19] Peduzzi A, Wynne R H, Fox T R, *et al.* Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, **270**: 54 - 65.
- [20] Dupuya S, Lainéa G, Tassinin J, *et al.* Characterization of the horizontal structure of the tropical forest canopy using object-based LiDAR and multispectral image analysis[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, **25**: 76 - 86.
- [21] ZHOU Meng-Wei, LIU Qin-Huo, LIU Qiang, *et al.* Inversion of leaf area index based on small-footprint waveform airborne LIDAR [J]. *Transactions of the CSAE* (周梦维,柳钦火,刘强,等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演. *农业工程学报*), 2011, **27**(4): 207 - 213.
- [22] CUI Yao-Kui, ZHAO Kai-Guang, FAN Wen-Jie, *et al.* Retrieving crop fractional cover and LAI based on airborne Lidar data[J]. *Journal of Remote Sensing* (崔要奎,赵开广,范闻捷,等. 机载 Lidar 数据的农作物覆盖度及 LAI 反演. *遥感学报*), 2011, **15**(6): 1276 - 1288.
- [23] Solberg S. Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(5): 1227 - 1244.
- [24] 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.
- [25] Koch B. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment[J]. *ISPRS Journal of Photogram-*

- metry and Remote Sensing*, 2010, **65**(6): 581–590.
- [26] Zhao K, Popescu S. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(8): 1628–1645.
- [27] PANG Yong, YU Xin-Fang, LI Zeng-Yuan, *et al.* Waveform length extraction from ICESat GLAS data and forest application analysis[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(庞勇, 于信芳, 李增元, 等. 星载激光雷达波形长度提取与林业应用潜力分析. *林业科学*), 2006, **42**(7): 136–140.
- [28] XING Yan-Qiu, WANG Li-Hai. ICESat-GLAS full waveform-based Study on forest canopy height retrieval in sloped area—a case study of forests in Changbai Mountains, Jilin [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*(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. *武汉大学学报(信息科学版)*), 2009, **34**(6): 696–700.
- [29] LI Ran, WANG Cheng, SU Guo-Zhong, *et al.* Development and applications of spaceborne LiDAR[J]. *Science & Technology Review*(李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用. *科技导报*), 2007, **25**(14): 58–63.
- [30] DONG Li-Xin, WU Bing-Fang, TANG Shi-Hao. Estimation of forest aboveground biomass by integrating GLAS and ETM data[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*(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. *北京大学学报(自然科学版)*), 2011, **47**(4): 703–710.
- [31] Duong V H, Lindenbergh R, Pfeifer N, *et al.* Single and two epoch analysis of ICESat full waveform data over forested areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(5): 1453–1473.
- [32] Chen Q. Retrieving vegetation height of forests and woodlands over mountainous areas in the Pacific Coast region using satellite laser altimetry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(7): 1610–1627.
- [33] Jiang Z, Huete A R, Chen J. *et al.* Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **101**(3): 366–378.
- [34] LI Miao-Miao, WU Bing-Fang, YAN Chang-Zhen, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resources science*(李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. *资源科学*)2004, **26**(4): 153–159.
- [35] Pang Y, Lefsky M, Andersen H, *et al.* Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, **34**(Suppl. 2), 471–484.
- [36] 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.
- [37] LUO She-Zhou, WANG Cheng, ZHANG Gui-Bin, *et al.* Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*(骆社周, 王成, 张贵宾, 等. 机载激光雷达森林叶面积指数反演研究. *地球物理学报*), 2013, **56**(5): 1467–1475.
- [38] 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.
- [39] Richardson J J, Moskal L M, Kim S H, *et al.* Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LiDAR[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(6–7): 1152–1160.
- [40] Brovelli M A, Crespi M, Fratarcangeli F, *et al.* Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, **63**(4): 427–440.