红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

基于遗传算法的星载激光全波形分解

谢俊峰 杨晨晨 梅永康 韩保民

Full waveform decomposition of spaceborne laser based on genetic algorithm

Xie Junfeng, Yang Chenchen, Mei Yongkang, Han Baomin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20200245

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于可变分量的参数随机抽样的激光雷达脉冲波形分解

Waveform decompostion of lidar pulse based on the variable component parameter random sampling method

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1005009–1005009(8) https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1005009

基于量子遗传算法的多光电二极管布局优化

Multi–photodiode layout optimization based on quantum genetic algorithm

红外与激光工程. 2019, 48(8): 813002–0813002(8) https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0813002

基于鲁棒Otsu的红外无损检测缺陷分割算法

Algorithm for defect segmentation in infrared nondestructive testing based on robust Otsu

红外与激光工程. 2019, 48(2): 204004–0204004(9) https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0204004

成像激光雷达测量大气能见度实验研究

Experimental research of atmospheric visibility measured by imaging lidar

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1030003–1030003(9) https://doi.org/10.3788/IRLA201766.1030003

惯性稳定平台固有特性参数辨识

Parameter identification of inherent characteristics of inertial stability platform

红外与激光工程. 2019, 48(S1): 89–96 https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S117004

光纤激光相控阵阵元分布优化方法

Optimization method for array element distribution of fiber laser phased array

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706007–0706007(7) https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706007

基于遗传算法的星载激光全波形分解

谢俊峰[1], 杨晨晨[1,2*], 梅永康[1,3], 韩保民[2]

(1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心，北京 100048；
2. 山东理工大学 建筑工程学院，山东 淄博 255000；
3. 中国矿业大学 (北京) 地球与测绘工程学院，北京 100083)

摘　要：全波形激光雷达的回波中包含着地物目标的垂直结构特征信息，传统的全波形数据处理方法在提取这些信息时过于依赖初始参数，导致地形复杂地区的数据可利用率低、准确率低。针对这一问题，提出了一种基于遗传算法的波形分解方法。改进后的处理算法无需提供精确的初始参数，用概率性传递规则代替确定性规则，具有全局寻优特点。并以高分七号卫星激光全波形数据进行试验。结果证明，基于改进后的波形处理方法拟合的回波波形与预处理后波形的相关系数在 99% 以上。文中对森林地区最大树高的反演与 ICESat-2 的 ATL08 产品中的森林冠层高度参数进行对比，两者相关系数为 0.85，中误差为 1.1 m，表明该方法可以较准确地提取复杂波形的特征信息。

关键词：高分七号；　遗传算法；　波形分解；　树高测量
中图分类号：P237　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3788/IRLA20200245

Full waveform decomposition of spaceborne laser based on genetic algorithm

Xie Junfeng[1], Yang Chenchen[1,2*], Mei Yongkang[1,3], Han Baomin[2]

(1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of National Resources, Beijing 100048, China;
2. School of Civil and Architecture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The echo of the all waveform lidar contains the vertical structure information of the ground object. The traditional all waveform data processing methods rely too much on the initial parameters when extracting these information, resulting in the low availability and accuracy of the data in the terrain complex area. To solve this problem, a waveform decomposition method based on genetic algorithm was proposed. The improved algorithm did not need to provide accurate initial parameters, and used probabilistic transfer rules instead of deterministic rules, which had the characteristics of global optimization. The experiment was carried out with the full waveform data of GF-7 satellite laser. The results show that the correlation coefficient between the echo waveform fitted by the improved waveform processing method and the preprocessed waveform is more than 99%. The inversion of the maximum tree height in the forest area was compared with the forest canopy height

收稿日期：2020−06−14；　**修订日期**：2020−10−18
基金项目：国家国防科技工业局科学预先研究项目 (D040105, D040106)；科技部重点研发计划 (2017YFB0504201)；国家自然科学基金面上项目 (41571440, 41771360, 41971426)；科技部重点研发计划国际合作项目 (2020YFE0200800)；北京市科协金桥工程种子资金 (ZZ19013) 高分测绘应用示范项目二期 (42-Y30B04-9001-19/21)；自然资源部杰青项目
作者简介：谢俊峰 (1981−)，男，研究员，主要从事卫星姿态与激光数据应用等方面的研究。Email: junfeng_xie@163.com
通讯作者：杨晨晨 (1993−)，男，硕士生，主要从事星载激光雷达数据处理与应用等方面的研究。Email: chyangcc@163.com

parameter in the ATL08 data of ICESat-2. The correlation coefficient is 0.85 and the mean square error is 1.1 m, which shows that the method can extract the feature information of complex waveform more accurately.

Key words: GF-7; genetic algorithm; waveform decomposition; tree height measurement

0 引 言

激光测高是主动式遥感技术的一种。激光测高卫星发射一束短脉冲激光，经过地面探测目标的后向散射后，使用卫星装置的探测器接收这一回波脉冲，通过获取发射脉冲和接收脉冲之间的时间差，来计算出地面探测目标与卫星之间的距离[1]。全波形激光雷达技术通过数字化采样获取了回波脉冲的完整波形，不仅可以获取被探测目标的距离，还可以提取出激光足印范围内被测目标的垂直结构信息与地形特征，如地形粗糙度、森林冠层垂直结构、地物分布等 [2−6]。全波形回波波形可以认为是在一个激光足印范围内，不同高度的多个被测目标面散射后产生的回波脉冲的叠加。因此，可以通过波形分解技术获取单个被测地物目标的回波波形，进而由分析其高程与其他垂直结构信息。所以全波形数据的处理至关重要。国内外学者都对此进行了一定的研究，Hofton 等人对原始激光回波信号进行高斯分解，并且对分解后的波形进行进行拟合[7]；Zhou T, Popescu S C 等人提出了一种非线性反卷积的波形处理方式，对较小地物的回波强度进行了放大，从而可以分解出更多的地物，但是此方法不具有通用性，且对预处理的方法要求较高[8]；由于地物组成的复杂性，可能导致回波信号不完全符合高斯分布，马跃等人提出了一种自适应高斯滤波的方法对全波形数据进行平滑降噪，解决了固定宽度高斯滤波方法造成的信号位置偏移问题，并对南极冰盖高程变化进行计算[9]；李洪鹏等人提出了改进的 LM 回波波形分解方法，并且采用可变阈值的经验模态分解滤波法 (EMD-soft) 对原始波形进行滤波和噪声水平评估，采用一套应对多种波形组成的初始参数估计方法，获取后续拟合所需的初始参数[10]；李奇和马洪超等人提出了一种改进的 EM 脉冲检测算法来计算激光回波波形高斯分量的位置和脉宽[11]；崔成玲针对传统的奇偶拐点高斯分解法提取高斯分量峰值点不准确，效率低的问题，提出了一种自动识别波峰的分解方法，但是此方法对于波形的隐藏峰提取能力较弱[12]。

综上所述，目前的数据处理方法都对于待处理的波形数据和初始参数的准确性具有非常高的要求，如果输入的初始参数与期望值差距太大，会导致拟合收敛到局部最小值，而不是所需的全局最小值，甚至导致拟合发散。因此，文中提出了一种基于遗传算法的全波形数据处理方法，解决分解过程过于依赖初始参数的问题，进而提高拟合精度。

1 波形数据处理原理

1.1 波形预处理

(1) 波形背景噪声估计

波形信号中包含了因传感器本身等因素影响造成的系统误差，即背景噪声。因此需要消除这部分噪声对激光测高的影响。其计算公式如下：

$$E_{100} = m_{100} + n \cdot s_{100} \tag{1}$$

$$m_{100} = \sum_{i=1}^{100} V_i / 10 \tag{2}$$

$$s_{100} = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} \frac{(V_i - \bar{V})^2}{100}} \tag{3}$$

式中：E_{100}为通过经验公式估算的背景噪声阈值；m_{100}为电压值转换之后前 100 帧数据的平均值；s_{100}为前 100 帧波形采样点数据的均方差；V_i为第 i 帧数据的电压值；$\bar{V}$为前 100 帧数据电压的平均值。

(2) 波形滤波

星载激光测高仪发射脉冲的能量分布符合标准的高斯函数，通常将标准高斯函数的一阶导函数作为高斯滤波核函数，也称为高斯滤波器，如公式 (4) 所示：

$$g(t)^{(1)} = -\frac{t}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

式中：σ和t分别为标准高斯分布的脉宽和高斯峰值位置。平滑之后的波形可以用公式 (5) 表示：

$$f(t) \otimes g(t)^{(1)} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i \sigma_i}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}} e^{\frac{-(t-t_i)^2}{2\left(\sigma^2+\sigma_i^2\right)}} \tag{5}$$

式中：$f(t)$为剔除背景噪声后的有效信号；$\otimes$为卷积计算符号。

1.2 波形分解

激光波形信号通常是多个地物目标反射形成的，

通过对激光回波信号进行分解提取单个地物的垂直信息，为了得到准确的波形特征参数，通常需要对分解后的结果进行拟合[8−12]。对于高分七号激光波形来说，拟合目标函数可以表示为公式 (6)。受限于激光测高仪的硬件系统，通常认为回波波形中最多可以提取 6 个地物目标的高度信息[10]。

$$y=\sum_{i=1}^{n}A_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma^2}}\ n\leqslant 6 \tag{6}$$

如图 1 所示，高斯分解算法对于平坦地形下的简单回波，可以快速准确地提取高斯参数，但是对于图 2 所示复杂地形下的混叠波形，高斯分量提取能力差。由于该波形为多个地物目标回波共同叠加的效果，对于隐藏的高斯分量不能有效地识别。

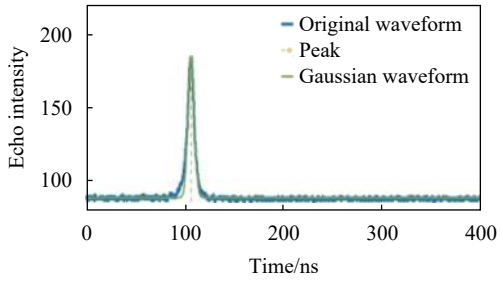

图 1 单一地物的高斯分解

Fig.1 Gaussian decomposition of a single figure

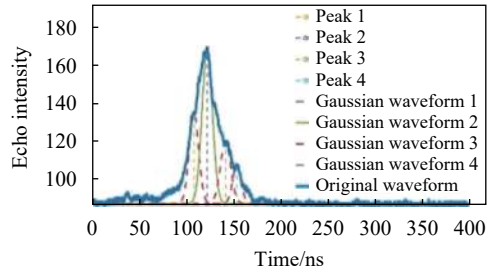

图 2 复杂地形下的激光波形

Fig.2 Laser waveform in complex terrain

2 基于遗传算法的波形处理方法

全波形星载激光雷达的波形数据中包含地物目标的垂直结构信息，通过波形数据处理可以将这些信息提取出来用于测绘、林业等生产与科研领域[13]。目前常用的全波形数据分解方法需要提供非常准确的波形初始参数，否则会导致提取的高程信息不准确。针对这一问题，文中提出了一种基于遗传算法的全波形分解方法，改进后的处理算法无需提供精确的初始参数，具有全局寻优特点[14]。基于遗传算法波形分解的基本运算过程如下：

(1) 波形数据预处理，消除因外界环境和仪器系统等引起的噪声；

(2) 波形分解：根据两个拐点与一个极大值点确定一个高斯分量，按照一定的原则等进行高斯分量合并，得到高斯分量的初始参数；

(3) 参数编码：设置拟合迭代次数的最大阈值和拟合收敛的标准 (一般将回波 3 倍标准差作为拟合收敛的标准，文中也采取此原则进行拟合收敛判断)。使用实数编码在拐点法波形分解得到的初始参数一定范围内随机生成 N 个个体作为初始群体 $G(0)$。此次实验将 N 设置为 20；

(4) 计算适应度：以拟合的残差和为标准，对进化后的所有个体的适应度进行计算；

(5) 选择运算：根据步骤 (4) 中计算的适应度，选择适应度大的个体进入下一代；

(6) 交叉运算：交叉运算是整个遗传算法的关键。此次实验按照如下公式进行参数个体交叉运算。

$$x_A^{t+1}=\alpha x_B^t+(1-\alpha)x_A^t \tag{7}$$

$$x_B^{t+1}=\alpha x_A^t+(1-\alpha)x_B^t \tag{8}$$

式中：x_A^{t+1}和x_B^{t+1}是交叉运算之后的个体；x_A^t和x_B^t是随机选择的交叉运算之前的两个个体；t是遗传运算的代数；α是交叉运算的常数，取值范围为 (0,1)；

(7) 变异运算：变异运算的实质就是对高斯分量的初始参数按一定的规则进行随机变化，从而得到新的个体。变异运算的公式如下：

$$x_A^{t+1}=\begin{cases} x_A^t+k*(x_{\max}-x_A^t)*r \\ x_A^t-k*(x_A^t-x_{\min})*r \end{cases} \tag{9}$$

式中：x_A^{t+1}为变异运；x_A^t为变异之前的个体；k是一个变异常数，取值范围为 (0,1)；$x_{\max}$和$x_{\min}$分别为个体中参数的最大值和最小值；r是一个随机数。

(8) 遗传终止判断：当迭代次数达到设定的阈值或拟合收敛，输出具有最大适应度的个体。

3 评价指标

(1) 波形拟合的残差和为：

$$\varepsilon=\sum_{i=0}^{N}(f_i-y_i) \tag{10}$$

式中：N 为波形采样点数；f_i为拟合后第 i 个采样波形的电压值；y_i为预处理后波形第 i 个采用波形的电压

值；ε为波形拟合的残差和。

(2) 森林冠层高度

线性体制激光雷达回波波形的有效信号起始点是激光足印内树冠顶端的位置，有效信号结束位置是地面的位置[15−16]。根据下式进行森林最大冠层高度的计算：

$$H = BinSize \cdot (Groundpeak - SigBeg) \tag{11}$$

式中：H 为森林最大冠层高度；$Groundpeak$ 为地面回波峰值位置；$SigBeg$ 是回波波形有效信号的起始位置，单位均为 ns；$BinSize$=15 cm。

(3) 基于波形反演的最大树高与真实树高的相关系数为：

$$R(H_{\text{wave}}, H) = \frac{Cov(H_{\text{wave}}, H)}{\sqrt{Var[H_{\text{wave}}]Var[H]}} \tag{12}$$

式中：H_{wave} 为基于波形反演的最大树高；H 为真实树高；$Cov(H_{\text{wave}}, H)$ 为 H_{wave} 与 H 的协方差；$Var[H_{\text{wave}}]$ 和 $Var[H]$ 分别为 H_{wave} 与 H 的方差。

(4) 该区域内所有基于波形数据处理反演的最大树高与真实树高差值的平均值为：

$$\Delta H = H_{wave} - H \tag{13}$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \Delta H}{N} \tag{14}$$

式中：ΔH为基于波形反演最大树高与真实树高的差值；N为波形采样点数。

(5) 基于波形反演的最大树高的中误差为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta H^2}{N}} \tag{15}$$

式中：ΔH为基于波形反演最大树高与真实树高的差值；N为波形采样点数；$RMSE$为基于波形反演的最大树高的中误差。

4 试验验证

4.1 试验数据

(1) 高分七号波形数据

高分七号卫星是我国首个下传波形数据的激光测高卫星，其平均轨道高度约为 505 km。激光脉冲在地面形成直径小于 30 m 的类圆激光足印，并以高于 1 GHz 的采样频率获取全波形数据。高分七号激光测高仪的基本参数如表 1 所示。

表 1 高分七号激光测高仪基本参数

Tab.1 Basic parameters of the GF-7 laser altimeter

Parameters	Value
Laser beam	2
Pulse wavelength/nm	1 064
Pulse energy/mJ	100-180 (adjustable)
Pulse width/ns	4-8
Repetition rate/Hz	3/6 (adjustable)
Digital interval/ns	0.5
Ranging range/km	450-550
Ranging accuracy/m	≤0.3

(2) DEM 数据

ALOS 是日本于 2006 年 1 月 24 日发射的对地观测卫星，文中利用 ALOS 的 12.5 m DEM 数据计算地表坡度。

(3) ICESat-2 数据

由于目前缺少试验区的实测数据，文中采用 ICESat-2 的 ATL08 数据作为验证数据，只分析两种数据计算树高之间的相关性。ICESat-2 的 ATL08 产品包含沿轨道方向的地形和树冠高度，以及由森林地区的其他描述性参数。ATL08 产品在计算森林冠层高度时也消除了地形因素的影响，测高精度为米级。

4.2 精度分析

为了验证文中改进方法的普适性和准确性，此次实验选取 8 个典型地物的波形进行波形分解，并分析其分解的精度。高分七号波形原始数据及其处理过程分别如图 3 和图 4所示。

对传统方法和改进后数据处理方法的处理效果进行统计分析，统计其提取的波形分量的个数，用于分析其探测波形中隐藏波峰的能力，统计其拟合后残差的平方和，用于分析两种方法的拟合精度；统计两种方法的相关系数的平方，用于分析处理后的波形与原始波形的相关性。统计结果如表 2 所示。由图 4 和表 2 可以看出，对于湖、海洋、耕地、冰盖、沙漠等单一波峰的回波波形，两种方法得到的结果基本一致，均可以达到不错的分解效果，但是对于林地、山地等复杂地区，改进后的方法明显优于传统波形分解方法的效果。尤其是对于林地地区，传统方法受波形分解时初始参数计算的准确度影响容易拟合发散，而改进后的算法对初始参数的精确度要求低，可以避免这

个问题。通过上述分析可以得出文中算法与传统的波形分解方法相比，拟合精度提高，而且可以对混叠峰进行分离。

为了进一步分析文中算法的有效性，根据现有的高分七号卫星数据，挑选 (115E, 24N)~(117E,30N) 范围作为研究区域，考虑地形坡度对树高反演精度的影响，文中采用激光发射波形数据的 3 倍标准差对波形数据进行校正，地面回波波形的半波宽等于该激光点

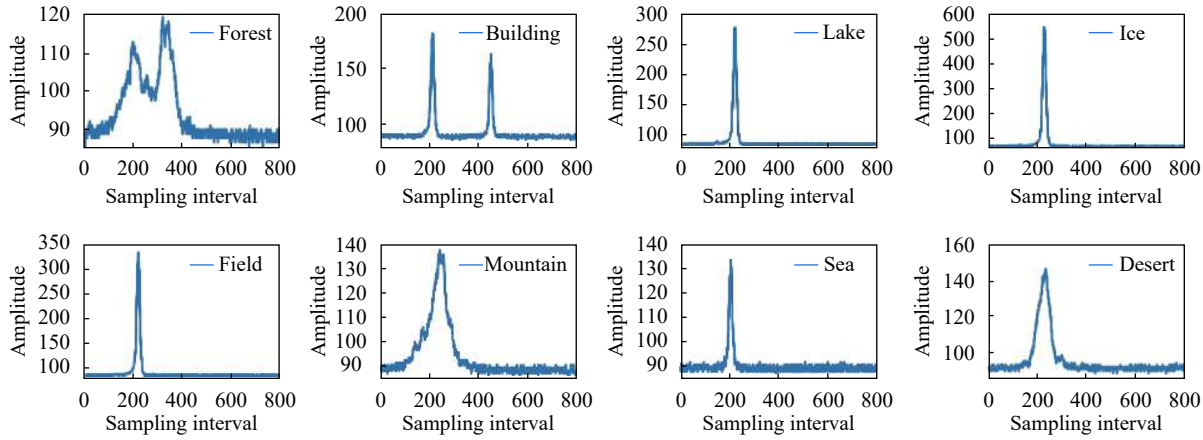

图 3 原始波形

Fig.3 Original waveform

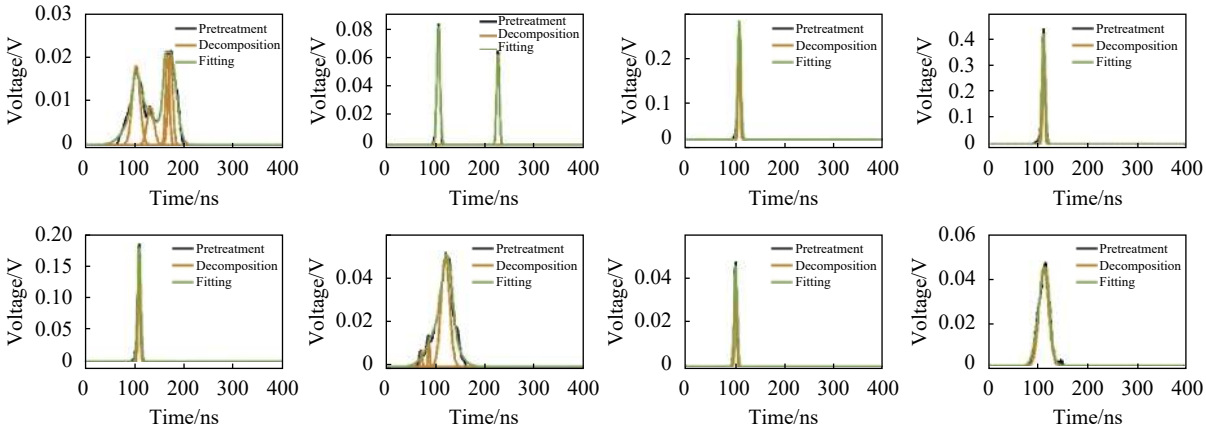

图 4 拟合后的波形

Fig.4 Fitted waveform

表 2 波形分解实验结果统计表

Tab.2 Statistical table of waveform decomposition test results

Feature type	Traditional method			Improved waveform data processing method		
	Number	RSS	R^2	Number	RSS	R^2
Forest	2	Divergence	0	4	0.000 17	0.993
Mountain	1	0.005 674	0.931	3	0.000 16	0.997
Desert	1	0.000 679	0.990 5	1	0.000 169 9	0.997
Duilding	2	0.000 835	0.999	2	0.000 07	0.999
Lake	1	0.000 373 9	0.998	1	0.000 04	0.999
Sea	1	0.000 16	0.99	1	0.000 04	0.999
Field	1	0.001 18	0.997	1	0.000 04	0.999
Ice	1	0.000 26	0.99	1	0.000 04	0.999

发射脉冲的 3 倍标准差，受地形坡度影响导致森林冠层回波波形和地面回波波形都发生一定程度的展宽[15]。波形展宽应该是地面回波与发射脉冲的 3 倍标准差之差，消除波形展宽后重新计算波形起始点的位置进行坡度校正，但是该方法也有一定的局限性，对于坡度较大的地区校正效果较差。所以文中只使用地形坡度小于 15°的高分七号波形数据。在此试验区内高分七号数据有一轨数据，第 446 轨数据，研究区内拥有原始激光点数量 526 个，其中符合文中实验要求的林地类激光点数量为 43 个。研究区内激光点及地形坡度如图 5 所示。然后根据公式 (11) 中的森林冠层高度提取方法，使用传统方法和改进后方法对研究区内的森林冠层高度进行反演。并与 ICESat-2 的数据进行对比统计，结果如表 3 所示。

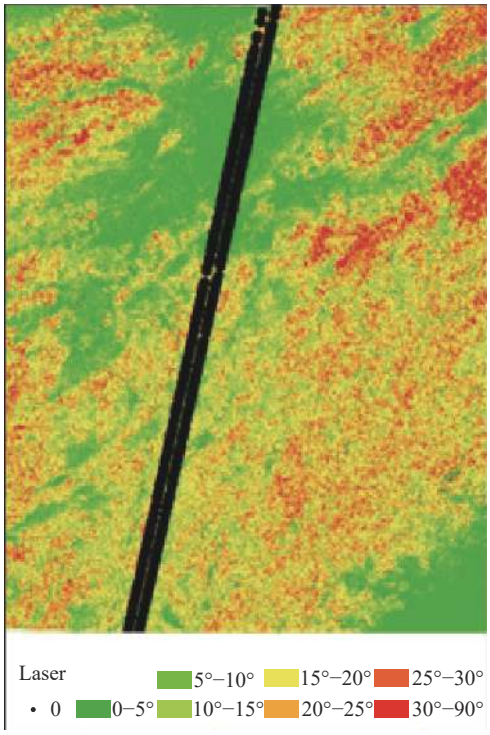

图 5 研究区内高分七号数据及坡度分布图

Fig.5 Data and gradient distribution map of GF-7 in the study area

表 3 传统方法与改进方法树高提取精度指标对比

Tab.3 Indexs comparison of accuracy evalution of the height extraction used by the traditional method and the improved method

Evaluating indicator	*ME*/m	*RMSE*/m	*COV*
Traditional method	0.618	3.160 9	0.71
Improved waveform data processing method	0.534	1.160 9	0.87

图 6 表明了 ICESat-2 的冠层高度与基于高分七号波形计算的冠层高度之间的相关性。可以看出，两者之间有很好的相关性，经过计算得出其相关系数为 0.87，而传统方法的相关系数为 0.71，说明文中基于波形参数计算的冠层高度与 ICESat-2 测量的地面冠层高度基本一致，然后分析其误差中误差，对比发现，文中算法的中误差为 1.160 9 m，而传统方法的中误差要大于 3 m，所以说明文中的方法有很高的可靠性，可以用于大区域森林冠层高度估算的研究和应用。考虑高分七号还在在轨测试阶段，激光载荷只进行了粗检校，平面定位精度存在 5 m 左右的误差。在外业检校之后获得更加准确的平面位置信息，基于波形参数估测森林冠层高度的精度有望进一步提高。

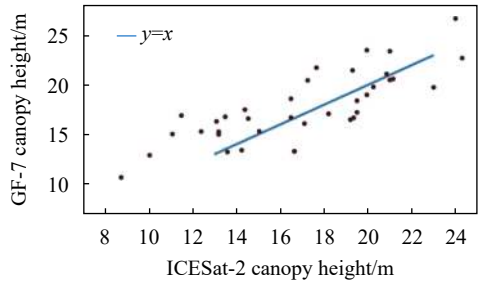

图 6 研究区内高分七号数据及坡度分布图

Fig.6 Data and gradient distribution map of GF-7 in the study area

5 结 论

文中提出了一种基于遗传算法的激光雷达数据处理方法，该算法能够实现全波形体制激光雷达回波波形信号的波形数据处理，而且可以解决传统方法进行波形拟合时过于依赖初始参数准确性的问题。不仅可以处理平地、海洋等简单地物的回波信号，还可以很好地处理森林等回波波形较为复杂的地区的回波信号，从中提取地物垂直结构信息，进而用于生产和应用。利用概率性传递规则代替确定性规则，具有全局寻优特点。试验证明文中基于遗传算法改进后的波形处理算法提高了地物的测高精度，拟合后波形与分解前波形的相关系数大于 99%。并以我国东南方地区作为研究区，利用高分七号波形数据实现了森林地区最大冠层高度的估算，为了降低坡度对冠层高度估算的影响，文中选用坡度小于 15°的区域，使用发射脉冲的 3 倍标准差重新定位信号起始位置对地形坡度进行校正，并用 ICESat-2 的 ATL08 产品中的冠

层高度对其进行精度评价。研究发现，基于遗传算法的波形分解算法对高分七号波形数据进行处理后能较为准确地估算森林冠层高度信息。

参考文献：

[1] Liu Ren, Xie Junfeng, Mo Fan, et al. Waveform simualtion of spaceborne laser altimeter echo based on fine terrain [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2018, 47(11): 79-88. (in Chinese)
刘仁, 谢俊峰, 莫凡, 等. 基于精细地形的星载激光测高仪回波波形仿真[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 79-88.

[2] Liu Z, Gao X, Li G, et al. Decomposition techniques for ICESat/GLAS full-waveform data[C]//ISPRS Technical Commission III Midterm Symposium on "Developments,Technologies and Applications in Remote Sensing", 2018, 4: 1367-1370.

[3] Zhang Wenhao, Li Song, Zhang Zhiyu, et al. Using waveform matching to precisely locate footprints of a satellite laser altimeter [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(11): 1117007. (in Chinese)
张文豪, 李松, 张智宇, 等. 利用波形匹配实现卫星激光测高脚点精确定位的方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1117007.

[4] Zhao Chuan, Zhang Baoming, Yu Donghang, et al. Airborne LiDAR point cloud classification using transfer learning [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2019, 27(7): 1601-1612. (in Chinese)
赵传, 张保明, 余东行, 等. 利用迁移学习的机载激光雷达点云分类[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(7): 1601-1612.

[5] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11(6): 30-42. (in Chinese)
高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 30-42.

[6] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2013, 21(3): 813-820. (in Chinese)
马跃, 李松, 周辉, 等. 系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 813-820.

[7] Hofton Mamjbb. Decomposition of laser altimeter waveform [J]. ***IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing***, 2000, 4(38): 1989-1996.

[8] Zhou Z, Hua D, Wang Y, et al. Improvement of the signal to noise ratio of Lidar echo signal based on wavelet de-noising technique [J]. ***Optics and Lasers in Engineering***, 2013, 51(8): 961-966.

[9] Ma Yue.The data processing and error analysis for satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)
马跃. 星载激光测高系统数据处理和误差分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.

[10] Li Hongpeng, Li Guoyuan, Cai Zhijian, et al. Full-waveform LiDAR echo decomposition method [J]. ***Journal of Remote Sensing***, 2019, 23(1): 89-98. (in Chinese)
李洪鹏, 李国元, 蔡志坚, 等. 全波形激光雷达回波分解方法[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 89-98.

[11] Li Qi, Ma Hongchao. The study of point-cloud production method based on waveform laser scanner data [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2008(3): 349-354. (in Chinese)
李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云生产[J]. 测绘学报, 2008(3): 349-354.

[12] Cui Chengling. Research of forest tree height extraction for the laser altimeter satellite full waveform data[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016. (in Chinese)
崔成玲. 激光测高卫星全波形数据的森林树高提取研究[D]. 徐州：中国矿业大学, 2016.

[13] Yao Jiaqi, Gao Xiaoming, Li Guoyuan, et al. Cloud optical depth inversion of echo energy data based on ICESat/GLAS [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2019, 48(S1): S117009. (in Chinese)
么嘉棋, 高小明, 李国元, 等. ICESat/GLAS回波能量数据的云光学厚度反演[J]. 红外与激光程, 2019, 48(S1): S117009.

[14] Mohamed Attwa, Sara Zamzam. An integrated approach of GIS and geoelectrical techniques for wastewater leakage investigations: Active constraint balancing and genetic algorithms application [J]. ***Journal of Applied Geophysics***, 2020(175): 103992.

[15] Hancock D W, Brenner A C, Zwally H J, et al.ICESat/GLAS standard data products[R]. American Geophysical Union, 2003.

[16] Chen Lu, Gao Zhishan, Yuan Qun, et al. Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter [J]. ***Chinese Optics***, 2019, 12(4): 896-904. (in Chinese)
陈露, 高志山, 袁群, 等. 星载激光测高仪距离参数地面标定方法[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 896-904.