

文章编号: 1003-501X(2011)06-0018-06

基于植被表面的激光测高仪 回波波形模型化分析

赵欣¹, 张毅², 王相京¹, 涂碧海¹, 赵平建¹, 张黎明¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031;

2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 针对激光测高仪中发射的激光脉冲并不是高斯对称的, 并且由于目标物的影响, 使用一系列标准高斯函数的和来拟合回波脉冲并不精确, 本文提出改变回波分解的取模模型, 通过正确模型的选取来改善回波位置的精确度。该方法采用比高斯函数复杂的对数正态函数和广义高斯函数, 采用 LM 非线性拟合算法拟合回波波形。实验结果表明, 通过对植被等回波数据的拟合显示出针对不同的地形存在不同的改善效果, 同时新参数的引入可获得波形的额外信息, 使得对目标物表面几何形状、反射率和粗糙度等信息的解算变得更为容易。

关键词: 遥感仪器; 激光测高; 高斯分解; 激光回波; 数据拟合

中图分类号: P228.3; TN951

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.06.004

Modeling Raw Signals of Laser Altimeter Echo Waveform Based on Canopy Surface

ZHAO Xin¹, ZHANG Yi², WANG Xiang-jing¹,

TU Bi-hai¹, ZHAO Ping-jian¹, ZHANG Li-ming¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: It has been demonstrated that decomposing the return waveforms into a mixture of Gaussian components was suitable to achieve the information of the target. But the laser impulse is slightly asymmetric, and approximating the waveforms by using a sum of Gaussians may not be an accurate representation depending on the application and target. This paper focus on the improvement of raw signal modeling and refine peak detection greatly increased the number of detected targets as well as their positional accuracy. More complex models than the Gaussian model, such as the Lognormal or generalized Gaussian functions, were introduced and fitted with backscatter waveform of canopy to improve the raw signal by LM algorithm. The results show, through introduction of new echo parameters, it is easy to extract the additional information on the target shape, and calculate reflectivity and roughness.

Key words: remote sensors; laser altimeter; Gaussian decomposition; return waveform; fitting

0 引言

激光测高仪是一种有效的地形地貌遥感仪器, 它能够准确提供激光测高仪和地球表面之间的距离, 该距离通过地理坐标化处理可转换成相关地形的高精度三维点云模型。通过实验观察, 即使在小激光足印系统中, 也可能因单脉冲激光飞行路径中存在的不同距离的目标反射物而造成几个单独回波波形的叠加, 传

收稿日期: 2011-03-17; 收到修改稿日期: 2011-04-07

基金项目: 合肥物质研究院院长基金

作者简介: 赵欣(1978-), 男(汉族), 安徽合肥人。副研究员, 博士, 主要研究工作是激光测距测高。E-mail: zhaoxin79@163.com。

统的激光测高系统只测量第一个和最后一个回波,有些甚至可以测量多达 6 个回波,并包括回波强度的测量。随着测高系统的发展,新一代激光测高仪可以对每一束发射脉冲的后向散射波形数字化记录,它们被称为全波激光雷达。

历史上第一个全波激光测高雷达于 1980 年被用于海洋测深^[1],第一个地形测高系统由 NASA 于 1999 年制造。LVIS (Laser Vegetation Imaging Sensor)激光测高仪发展于 1994 年,它被设计用于描述大规模植被冠盖的空间垂直结构^[2],LVIS 的数据处理显示出通过记录回波波形的去描述林地和地形结构,尤其是被植被遮挡的地面,有着巨大的潜力。第一个通过分析回波波形数据去分类地表不同目标物属性的算法是在 GLAS 激光测高系统中实现的^[3],可以看出全波数据克服了经典多回波数据的许多缺点,通过终端用户的线下处理,全波数据能够比三维点云数据提供更多的被照亮表面的结构细节信息,例如地表目标物反射率以及处于地表和植被冠盖之间的低矮植被可被分离出来,可进一步提高地表测距精度。

目前有很多机构针对全波激光雷达回波信号处理和分析进行研究^[4-6],其中非线性最小二乘法^[7]和基于 EM(Expectation Maximization)的最大似然估计算法^[8]被用于拟合高斯混合回波,并提取回波中每个单模波形的参数,研究发现小激光足印回波分析更适合于高斯和函数^[9]。通过实际观察激光测高仪发射波形来看,很多情况下其出射脉冲形状并不是左右对称的高斯波形,并且其下降沿尾部总存在过冲和拖拽,使用高斯函数来近似这些波形并不能正确复现激光足印,这种情况下,通过更复杂的表达式,例如不同衰减系数的双指数曲线,或许能更精确近似出发射波形。因此本文希望找出更好的波形拟合算法和模型,以此来提高激光测高系统的数据测量精度。

1 全波激光雷达数据的获取

本文波形数据的获取都是通过激光测高原型样机来获得的。该激光测高仪采用卡塞格林式光学接收系统,发射激光波长为 1 064 nm,峰值功率可达 75 mJ,重复频率 1~20 Hz,回波数据通过 1 GHz 采集卡采集。该系统可同时数字化记录发射和接收脉冲波形,试验中我们通过从上往下照射来获取约 2 km 外地表的反射数据,如图 1 所示。

图 2 为选取的一幅激光足印同时照射在植被及地面的回波波形数据,激光飞行路径参考图 1。可以看出每个回波数据都是由一系列的单独钟形脉冲叠加组成,采样深度约 2 000 点,采样间隔为 1 ns,对应 300 m 的距离,其中虚线标识为回波峰值点,第一个峰值点对应植被冠盖顶层,最后一个对应路面回波。

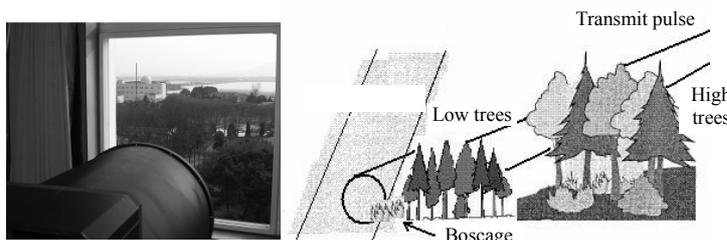


图 1 激光测高试验靶场与测量路径

Fig.1 A schematic showing fly path of laser pulse and the prototype of altimeter

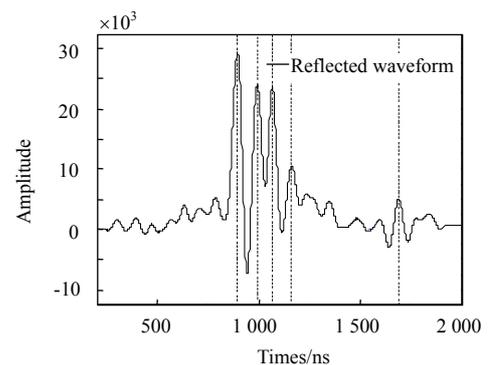


图 2 激光测高原型样机回波波形

Fig.2 Example of a measured waveform by the prototype of altimeter

2 波形处理过程

波形处理过程由高斯解压缩算法组成,它通过把回波波形分解成一组单峰值波形来得到光斑路径内不同反射物的属性。波形处理的主要目的是在回波中尽可能地提取有效峰值,并得到每个峰值相关的信息。现阶段波形处理的主要步骤由优化的非线性拟合算法构成,优化过程依赖于初始参数的估计。

从图2数据中可以看出,全波数据由2000个基于1GHz采样频率的连续点构成数组 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1, \dots, N}$,我们的目标在于把回波分解成一系列的能够反映激光足印内单独目标物的回波波形的叠加函数,其中 n 为回波数量, f_j 为每个单独回波的函数形式,例如高斯型、对数正态型、广义高斯型等。

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^n f_j(x) \quad (1)$$

算法顺序为:1)通过卷积滤波和阈值去除背景噪声;2)估计钟形回波个数和中心位置;3)进行非线性最小二乘拟合;4)通过拟合结果进一步拟合,寻找因为波形交叠而失配的峰值。

2.1 峰值检测和初始参数估计

基本的检测方法是基于一阶偏导过零点的方法来发现峰值点,当然该求导数据是平滑阈值后的波形,并要考虑两个峰值之间的最小采样间隔。找到峰值点后通过基于LM算法的最小二乘法来拟合回波数据,拟合结果通过下式来约束:

$$\xi = \frac{1}{N-p} \sum_{x_k}^N (y_k - f(x_k))^2 \quad (2)$$

分子为观察数据和拟合数据之间的残差, N 为采样点个数, p 为拟合后的数据点个数。

如果存在比较复杂的回波交叠情况,一阶过零求导并不能有效地发现所有的峰值。因为两个回波靠得太近可能导致只能发现一个最大的峰值,因此需要进一步精确拟合。解决方法为执行第二次峰值检测,如果发现新的峰值,则重新进行拟合,直到 ξ 停止增加为止。图3为拟合好的回波波形,对比可看出精确拟合结果可进一步发现双峰交叠现象。

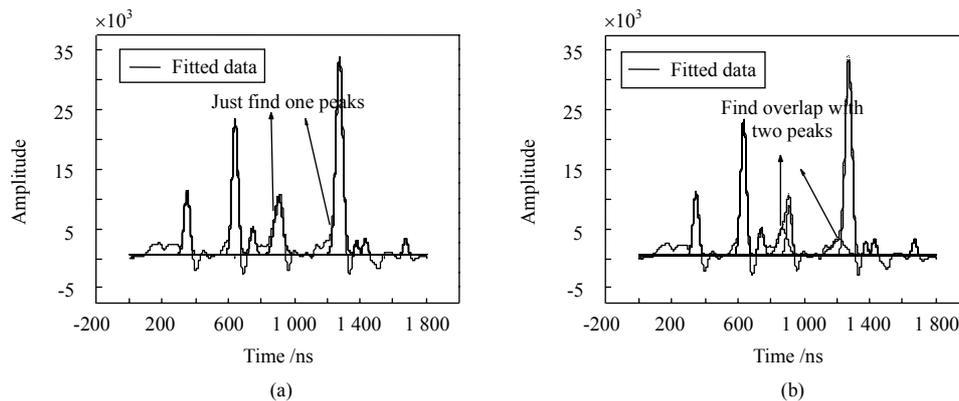


图3 复杂回波拟合。(a)拟合后未发现回波交叠峰值;(b)拟合后发现交叠峰值。

Fig.3 Example of complex waveform. (a) Fit without finding overlaps; (b) Fit with finding overlaps.

2.2 模型函数

假设每个激光输出脉冲形状为高斯型,并知道其参数。那么回波脉冲就是该高斯脉冲和表面函数的卷积,卷积函数根据目标物不同而不同。研究发现如果光斑路径内目标物垂直分布高度符合高斯分布,那么反射回波可近似为一系列高斯函数之和^[3],Wagner已验证在其测高系统中观察到98%的波形可被拟合为高斯函数之和^[9]。然而该假设并不总是合理的,不同的激光测高系统,其发射波形并不总是高斯型的,存在非对称、平坦、过冲等失真现象,尤其对小光斑系统来说,即使在植被地区其高度分布也不能假设为高斯型。因此把激光雷达回波数据用高斯函数近似并不准确,需要更复杂的参数模型来处理以获得有用信息。高斯函数标准的扩展形式并适合回波模型的有对数正态分布(Lognormal,式(4))和广义高斯(generalized Gaussian,式(5))分布^[10],如果被检测的波形为非对称的,可用对数正态分布来拟合;同样一些对称回波,但是在森林或者建筑屋顶造成平坦失真的,可用广义高斯形式来拟合其复杂回波的交叠波形,其中式(3)为标准高斯对称分布函数。

$$f_{G,j(x)} = \frac{A}{\sqrt{\pi/2w}} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}\right] \quad (3)$$

$$f_{L,j(x)} = \frac{A}{\sqrt{2\pi wx}} \exp\left[-\frac{(\ln(x/x_c))^2}{2w^2}\right] \tag{4}$$

$$f_{GG,j(x)} = \frac{A}{\sqrt{\pi/2w}} \exp\left[-\frac{|x-x_c|^{\alpha^2}}{2w^2}\right] \tag{5}$$

图 4 给出了高斯波形和标准正态分布波形之间的差异, 标准正态分布波形中心位置要比高斯波形偏离 10%左右, 这符合实际激光测高仪发射波形形状(图 4 中的虚线), 数据拟合中, 可根据发射波形实际形状通过调节中心位置来左右顶点的偏离度。观察原始数据显示, 大部分的非对称波形重叠很近时, 造成第三个拐点很难被拟合出来, 因此通过对数正态分布函数拟合比标准高斯拟合, 峰值点位置精度要好一些。

图 5 为广义高斯不同 α 下的曲线外形, 其中参数 α 对波形的平坦度造成一定的影响, 不同的平坦度针对于不同地物表面的回波波形, α 变成了波形信息的额外参量, 如波形的展宽、地物粗糙度属性, 通过它可对地物进行分类, 因此广义高斯形式可用于多种地形状态的拟合, 但同时函数也增加了自由度使得拟合变得复杂的多。

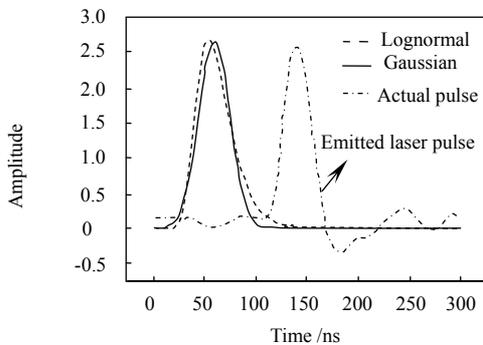


图 4 高斯、对数正态分布波形之间的对比

Fig.4 Comparison between Gaussian and Lognormal functions

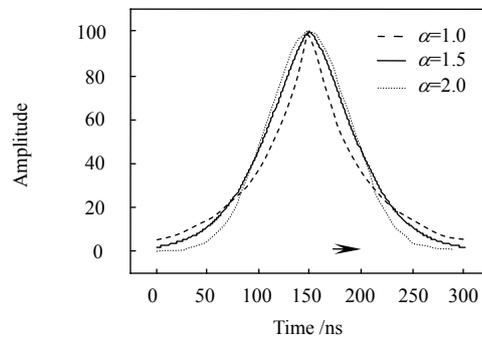


图 5 不同参数 α 下的广义高斯波形

Fig.5 The generalized Gaussian function with different α

2.3 模型比较

通过拟合曲线和分散的点云数据比较我们可以知道, 弱峰值和交叠峰值通过波形的曲线拟合可以被检测出来。像所期望的那样, 这些点往往靠近树冠层或者处于近地的植被层通过简单的激光测距而难以被检测到。首先我们取原始数据模型为高斯型进行拟合, 同时通过前面的残差 ξ 我们认为, 当 $\xi < 0.5$ 的时候, 波形拟合较好。当 $\xi > 0.5$ 产生模型失配, 实验发现, 失配往往产生在林地地区。

其次通过拟合高斯型与对数正态模型对比我们发现, 对数正态分布模型对数据拟合除了局部一些地形外并不能有效改善拟合数据的残差, 而且其残差还高于高斯型拟合结果。但不是全局数据残差都很高, 在原始数据为建筑物回波时尤其合适。因此在对数据拟合时或许针对不同目标物采取不同的模型更为合适。

广义高斯模型从图形上看更适合于对平坦的、狭窄的或者强回波取模, ξ 值也比高斯模型小一些。图 6 给出了高斯模型和广义高斯模型的残差值比较, 通过将近 20 000 点数据看出广义高斯模型拟合效果可能要优于高斯模型, 当然该结果还需要通过大量的不同地形数据来进一步验证。广义高斯模型引入了一个新的参数 α , 从波形上看该参数和陡峭度相关。也就是说该参数描述了目标物表面的粗糙度, 斜率和反射率等信息, 通过该参数, 我们可以进行一些目标物分类: 当 $\alpha > 1.9$ 的情况比较少见, 一般存在于建筑物边缘地区和植被冠盖的边沿地区; 当 $1.6 < \alpha < 1.9$ 是典型植被区域回波形状, 同时也

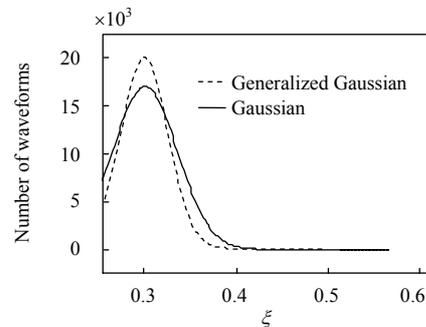


图 6 高斯拟合和广义高斯拟合 ξ 值对比

Fig.6 ξ values for the Gaussian fit and generalized Gaussian fit

存在于人造平面建筑,例如街道和沥青路面等;当 $1.3 < \alpha < 1.6$ 时和高斯函数形似相近,通常存在于自然地表,草地和建筑物屋顶;当 $\alpha < 1.3$ 的情况也很少,一般存在于植被冠层。大部分情况下后向散射回波还是类似于平坦的高斯模型(也就是 $1.3 < \alpha < 1.6$ 的情况),极限情况($\alpha < 1.3$ 和 $\alpha > 1.9$)在林地区域存在多一些。可以看出 α 似乎对地表辐射变化并不敏感,在广义高斯模型的三个参数中,其宽度和幅值参数受地物影响较大,如有斑马线的地表,停车场区域和潮湿不均地表,而 α 基本是一个常量,因此通过 α 可区分本质相同的目标物属性。

下面给出了一组实验数据的拟合结果对比,如图7所示,由于试验场地的原因,我们也只选取植被地形作为验证。激光照射路径仍然如图1所示,但选取的2000点回波数据基本为植被回波,图7(a)、图7(b)、图7(c)分别对应系数 $\alpha = \sqrt{2}, \alpha = 1.6, \alpha = \sqrt{3}$ 下的广义高斯模型拟合结果。我们可以清楚地看到,当 $\alpha = \sqrt{2}$ 时,为标准高斯拟合模型,但是由于植被属性造成回波的展宽,使得回波并不是标准高斯波形,因此拟合结束时,拟合结果无论从幅度还是脉宽来说和原波形相差很大,残差 $\xi > 0.5$ 的情况很多,很明显标准高斯拟合并不适用;当 $\alpha = 1.6$ 时,为广义高斯模型拟合,拟合结果非常准确,残差 $\xi < 0.1$,因此可以确定通过改变拟合模型比高斯拟合能达到更好的效果;当 $\alpha = \sqrt{3} \approx 1.732$ 时,拟合后脉冲的宽度呈缩窄趋势,广义高斯模型渐渐产生失配,因此选取 $\alpha = 1.6$ 表明该广义高斯函数模型参数的选取为该激光脉冲脚印内地形回波拟合的最佳匹配。因为我们提前知道照射目标,而选取对应 α 值,这也从反面证明广义高斯模型比标准高斯模型多出的参数 α 使得有可能通过波形直接判断地表目标物的属性。

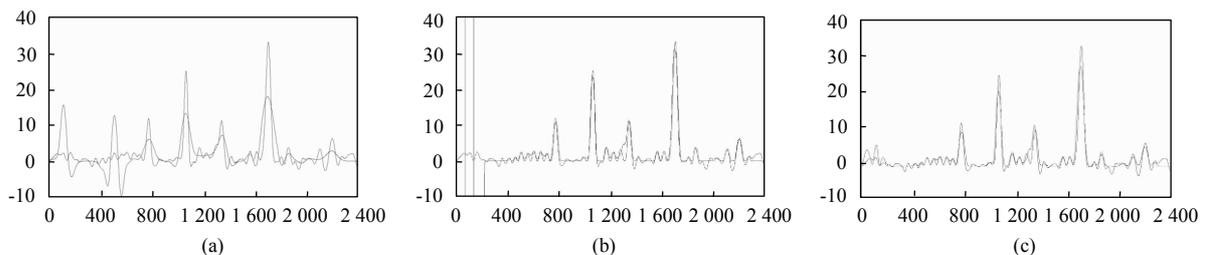


图7 不同的 a 下的广义高斯模型拟合结果

Fig.7 Generalized Gaussian fit result with different a

3 讨论

本文着重讨论了全波激光测高雷达的回波拟合模型取模问题。对激光测高回波进行拟合分解不仅能够提高测距精度,而且能给出激光足印内变化表面的不同海拔高度。但是传统的高斯取模拟合模型虽然能匹配大部分的回波模型,但同时也存在许多失配问题。我们使用对数正态函数去拟合非对称回波,但其只适合在人造的街区和屋顶地形,并不适合多元化的地球表面;我们同时引入广义高斯模型去拟合展宽峰值,通过新的参数 α 可区分地表目标物,但参数 α 的可变性在非线形拟合优化中存在一定困难。总的来说这两种模型都能在其特有的方面改善回波拟合方式,因此我们可以根据不同的激光发射脉冲形状和不同的地形去有选择性的拟合或许有更好的效果。当然可以去寻找其它更好的描述激光测高回波函数的表达式,或许能够获取更多的关于峰值的信息和更有利于对激光雷达点云数据的分割。

参考文献:

- [1] Guenther G, Mesick H. Analysis of airborne lidar bathymetric waveforms [C]// **Proc. of SPIE Ocean Optics IX**, Orlando, United States, 1988: 232-241.
- [2] Harding D, Lefsky M, Parker G. Laser altimeter canopy height profiles. Methods and validation for closed-canopy broadleaf forests [J]. **Remote Sensing of Environment**(S0034-4257), 2001, **76**(9): 283-297.
- [3] Zwally H, Schutz B, Abdalati W, *et al.* ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. **Journal of Geodynamics**(S0264-3707), 2002, **34**(3): 405-445.

- [4] 郭冠军, 焦威严, 曲士良, 等. 脉冲展宽对机载激光扫描仪性能的影响 [J]. 光电工程, 2010, **37**(3): 51–55.
GUO Guan-jun, JIAO Wei-yan, QU Shi-liang, *et al.* Effect of Pulse Spreading on the Ranging Performance of Airborne Laser Scanner [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2010, **37**(3): 51–55.
- [5] 闫小伟, 邓甲昊, 孙志慧. 脉冲激光成像探测系统回波信号仿真 [J]. 光电工程, 2009, **36**(12): 42–46.
YAN Xiao-wei, DENG Jia-hao, SUN Zhi-hui. Simulation of Echo Signal in Laser Imaging Detection System [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(12): 42–46.
- [6] 李松, 周辉, 石岩. 激光测高仪的回波信号理论模型 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(1): 33–39.
LI Song, ZHOU Hui, SHI Yan, *et al.* Theoretical model for return signal of laser altimeter [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(1): 33–39.
- [7] Hofton M, Minster J, Blair J, *et al.* Decomposition of Laser Altimeter Waveforms [J]. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**(S0196-2892), 2000, **38**(4): 1989–1996.
- [8] Persson A, oderman S, UT opel, *et al.* Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data [C]. **ISPRS workshop 'Laser scanning 2005'**, Enschede, The Netherlands, Sept 12-14, 2005: 103–108.
- [9] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, *et al.* Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner [J]. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**(S0924-2716), 2006, **66**: 100–112.
- [10] Adrien Chauve, Mallet C, Bretar F, *et al.* Processing full-waveform LIDAR data: modeling raw signals[C]// **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**(S1682-1750), 2007, **2004**(3): 12–17.