

# 一种用于机载 LiDAR 波形数据高斯分解的高斯拐点匹配法

段乙好<sup>1,2</sup> 张爱武<sup>1,2</sup> 刘 诏<sup>1,2</sup> 王书民<sup>3</sup> 王京萌<sup>1,2</sup> 叶秋虹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048

<sup>2</sup>首都师范大学空间信息技术教育部工程研究中心, 北京 100048

<sup>3</sup>中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

**摘要** 针对小光斑全波形机载激光雷达(LiDAR)波形数据高斯分解法的核心问题——高斯分量个数估计,提出一种高斯拐点匹配法。该算法用平面曲线离散点集拐点的快速查找算法检测波形数据中的拐点,计算过检测出的拐点及其右边第一个点的直线的斜率,根据斜率将所有检测出的拐点分为左、右拐点,一个左拐点与其邻近的一个右拐点组成一个高斯分量,据此可以确定波形数据中高斯分量个数。采用高斯拐点匹配法对模拟和实测波形数据进行分解,并与传统的脉冲检测方法(重心法和高斯脉冲拟合法)相比。结果表明,高斯拐点匹配法方法能极大地减小伪拐点的影 响,快速、准确地检测并分解出波形数据中高斯分量,提高波形数据分解速度。同时其能分解出更多的高斯分量,从而提高点云密度。

**关键词** 遥感; 机载激光雷达; 波形分析; 高斯分解; 高斯拐点匹配法; 全波形数据

中图分类号 P208 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.102801

## A Gaussian Inflexion Points Matching Method for Gaussian Decomposition of Airborne LiDAR Waveform Data

Duan Yihao<sup>1,2</sup> Zhang Aiwu<sup>1,2</sup> Liu Zhao<sup>1,2</sup> Wang Shumin<sup>3</sup> Wang Jingmeng<sup>1,2</sup> Ye QiuHong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Space Information Technology, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>3</sup>Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract** Estimation of Gaussian components' number is a core problem in the procedure of Gaussian decomposition of small-footprint full-waveform airborne LiDAR waveform data. A new approach named Gaussian inflexion points matching method (GIPM) is proposed to solve it. GIPM algorithm uses the quick locating algorithm for turning points in discrete point set of plane curve (QLATP) method for detecting the inflexion points (IFPs). The slope of the line between the detected IFP and its adjacent point is calculated. The detected IFPs are classified as left IFPs and right IFPs according to the slope. A left IFP and its neighboring right IFP comprise a Gaussian component, thus getting the number of the Gaussian components of waveform data. GIPM method is used to decompose the simulated and the measured waveform data, comparing with two traditional pulses detection method (center of gravity and Gaussian pulse fitting). The results demonstrate that the GIPM method can tremendously retain the impact of the pseudo IFPs, and quickly and accurately detect and decompose Gaussian components of the waveform data, and then immensely speed up the decomposition of

收稿日期: 2014-05-09; 收到修改稿日期: 2014-05-14; 网络出版日期: 2014-09-12

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH31B01)、北京市自然科学基金重点项目(KZ201310028035)

作者简介: 段乙好(1985—),男,博士研究生,主要从事机载 LiDAR 数据分析及应用方面的研究。

E-mail: duan420684@163.com

导师简介: 张爱武(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事地理信息工程、激光雷达、计算机视觉等方面的研究。

E-mail: zhangaw98@163.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

waveform data. Meanwhile, it can get more Gaussian components than others, thus improving the density of point cloud.

**Key words** remote sensing; airborne LiDAR; waveform analysis; Gaussian decomposition; Gaussian inflexion points matching method; full-waveform data

**OCIS codes** 280.3400; 280.3640; 100.6890

## 1 引言

作为一种主动遥感探测技术和工具,激光雷达(LiDAR)是现代雷达探测技术从厘米波、毫米波向光波探测技术的延伸,具有高精度、高时空分辨率及垂直分辨等优点,在三维成像、对地观测和深空探测等领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。机载 LiDAR 技术是近年来发展起来的新型遥感技术,能够快速获取高精度、高空间分辨率的数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DEM)等,在大地测量、城市建模、灾害评估、虚拟现实等许多方面得到日益广泛的应用<sup>[2]</sup>。自2004年新一代商用小光斑全波形机载 LiDAR 出现后,全波形机载 LiDAR 能以很小的等采样间隔(如1 GHz),对发射激光脉冲与目标作用形成的后向散射能量按时间先后顺序进行采样记录,得到一个随时间变化的回波信号。这个回波信号被称为全波形/波形数据<sup>[3-5]</sup>,反映了地物的垂直分布,揭示了地物的几何和物理属性,是地物分类的重要判据<sup>[6]</sup>。与多回波机载 LiDAR 获取的离散点云数据相比,全波形机载 LiDAR 波形数据能提供更多的目标信息(如振幅、波宽、距离、后向散射截面等),但这也给波形数据分析和信息提取提出了更高要求。

对此,国内外学者已进行了大量研究,提出了很多波形数据分析方法,如波形分解法、反卷积法、相关法等。其中,高斯分解法是一种已被广泛采用的波形分解法<sup>[7-9]</sup>,市场上销售的全波形机载 LiDAR 波形处理软件基本上都采用高斯分解法。高斯分解法主要由两步组成:1)高斯分量个数及其初始参数的估计;2)参数优化。Lin 等<sup>[8,10]</sup>指出高斯分量个数的错误估计不可恢复。因此,如何更好地估计高斯分量个数就是高斯分解法的核心问题。Hofton 等<sup>[11]</sup>提出高斯分解法(即认为波形数据是若干高斯分量的叠加),并将其用于大光斑全波形机载 LiDAR 系统 LVIS 波形数据的分析。通过计算拐点并将每两个相邻拐点组成一个高斯分量,再将高斯分量按“重要性”和“等级”分类,这样“重要性”和“等级”高的高斯分量即为波形数据中高斯分量的个数。但是,该方法受噪声影响大、计算过程复杂。Persson 等<sup>[12]</sup>将高斯分解法(加权高斯函数的和)用于小光斑全波形机载 LiDAR 系统 TopEye Mark II 波形数据的分析,并使用 AIC 准则来确定分量的个数。然而,该方法中许多参数只适用于 TopEye Mark II 波形数据,通用性不强。Wagner 等<sup>[13-14]</sup>从理论角度阐述了高斯分解法,并使用两种传统的脉冲检测法(重心法和一阶导数零交叉法)估计分量个数。Chauve 等<sup>[15]</sup>针对高斯分解法不能有效处理非对称、尖的或平展的回波的缺点,提出采用 Lognormal 和广义高斯函数作为拟合函数,然后用一阶导数零交叉法估计分量的个数和位置。Ma 等<sup>[16]</sup>在高斯分解法的理论上,采用改进的 EM 脉冲检测算法和一阶导数零交叉法得到回波脉冲的位置和宽度。上述三个方法都使用一阶导数零交叉法,但是对于复杂回波,一阶导数零交叉法不足以检测所有真实的峰值,可能导致振幅值为负值、波峰位置超出波形范围等问题<sup>[13,15]</sup>。Lin 等<sup>[8]</sup>在高斯分解法的基础上,提出了严格高斯检测法。将局部最大值作为候选明显波形,计算二阶导数、候选明显波峰处上升沿和下降沿的采样个数来查找叠加波峰,再使用二阶导数零交叉法获取弱波波峰,这样就确定了波形中的高斯分量个数。但是,该方法计算过程复杂,实用性不强。Zhu 等<sup>[17]</sup>在高斯分解法的基础上,提出了渐进波形分解法。该方法通过局部最大值来确定一个高斯分量,并将其从波形数据中分离出来,然后在上次分离剩下的波形数据上求最大值,确定下一个高斯分量,直到最大值小于给定的阈值为止。但是,该方法中波峰阈值根据经验确定,不同阈值会导致分量不同。赖旭东等<sup>[18]</sup>在高斯分解法的基础上,采用逐层剥离的策略。该方法与文献[17]的方法类似,都难以处理只有一个主要峰值点存在的叠加波形。

针对上述方法在高斯分量个数估计问题上的不足,本文以高斯分解法为理论基础,提出了一种高斯拐点匹配法。该方法以左拐点及其右边的右拐点来确定高斯分量,能有效地减小伪拐点的影响。

## 2 高斯拐点匹配法

### 2.1 高斯分解法

高斯分解法是建立在如下假设的基础上进行的。假设发射激光脉冲信号是类高斯分布型,进一步假设

目标回波信号也是高斯分布型,那么回波波形就是由一系列高斯散射信号组成<sup>[11,13]</sup>。目前,国内外学者在理论和实践上都已证明<sup>[11-18]</sup>,机载LiDAR回波波形可以近似地看作不同目标后向散射的高斯波形的叠加,即机载LiDAR回波波形是一系列高斯分量与噪声之和在时间轴上的叠加[用(1)式表示]。波形数据是等间隔采样的序列,  $\{x_k, k=1, \dots, N\}$  是采样时间,  $\{y_k, k=1, \dots, N\}$  是采样时间  $x_k$  对应的采样值/振幅值。高斯分解的目的是尽可能多地提取高斯分量,并获取每个分量的信息(如振幅、波宽、距离、后向散射截面等)<sup>[15]</sup>:

$$y = f(x) = b + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (1)$$

式中  $y$  表示原始波形数据振幅值,  $x$  表示原始波形数据采样时间,  $f(x)$  表示高斯分解得到的拟合波形数据,  $b$  表示原始波形数据的背景噪声,  $n$  表示高斯分量的个数,  $A_i$ 、 $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  分别表示第  $i$  个高斯分量的峰值、位置、半峰全宽。

## 2.2 高斯分量个数及初始参数的估计

### 2.2.1 高斯分量个数估计

由高斯函数性质可知,一个高斯函数由两个拐点 ( $x = \mu \pm \sigma$ ) 唯一确定(如图1所示)。基于此,通过判断回波波形中拐点个数,可以确定回波波形中所含的高斯分量的个数<sup>[11]</sup>。采用王兵团<sup>[19]</sup>提出的“平面曲线离散点集拐点的快速查找算法(QLATP)”来检测拐点。该算法尤其适用于曲线离散点集横坐标为等间距的情况,而全波形机载LiDAR系统获取的波形数据就是等间隔采样的数据。当波形数据上的点  $(x_k, y_k)$  满足

$$F(y_k) = (y_{k-2} + y_k - 2y_{k-1})(y_{k-1} + y_{k+1} - 2y_k) < 0 \quad (2)$$

时,该点就是拐点。

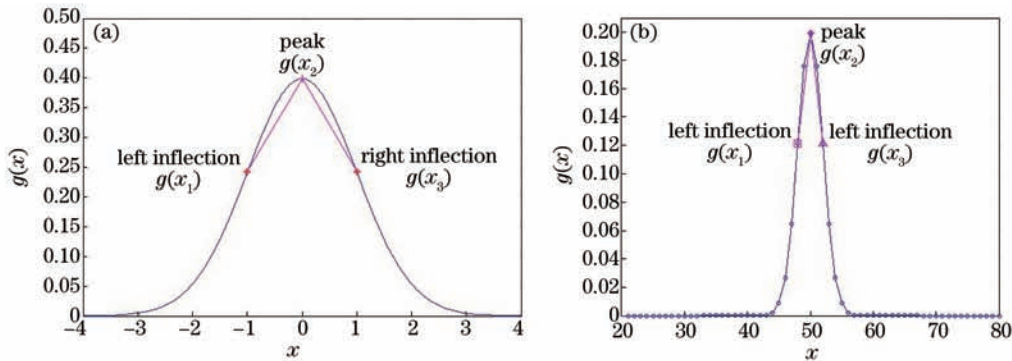


图1 (a) 连续高斯函数及其左右拐点和波峰; (b) 离散高斯函数及其左右拐点和波峰

Fig.1 (a) Continuous Gaussian function and its inflexion points; (b) discrete Gaussian function and its inflexion points

由于高斯函数关于直线  $x = \mu$  对称,基于此将高斯函数的两个拐点分别称为左拐点和右拐点(如图1所示)。自然地,一个高斯函数由一个左拐点 ( $x = \mu - \sigma$ ) 及其右边一个右拐点 ( $x = \mu + \sigma$ ) 唯一确定,由此提出“高斯拐点匹配法(GIPM)”来确定波形数据中高斯分量的个数。那么,将检测出的拐点准确地分为左、右拐点是高斯拐点匹配法关键。

由高斯函数性质可知,高斯函数在对称轴 ( $x = \mu$ ) 左边是单调递增函数,在对称轴右边是单调递减函数。又由增(减)函数定义可知,高斯函数  $g(x)$  上任意两点  $x_1, x_2 \in (-\infty, \mu)$ ; ( $x_1 < x_2$ ), 有  $g(x_1) < g(x_2)$ , 故过  $x_1, x_2$  的直线的斜率大于零 ( $[g(x_2) - g(x_1)] / (x_2 - x_1) > 0$ ), 即过高斯函数对称轴左边任意两点的直线,其斜率必大于零;反之,直线斜率必小于零。同时,从高斯函数分布曲线(如图1所示)上可知,从左拐点到右拐点的弧上任意一点,与左拐点所构成直线的斜率大于零,与右拐点所构成直线的斜率小于零。但是,高斯分解法是建立在发射波形和回波波形均为高斯函数的基础上,而噪声和波形叠加不可避免地会对回波波形产生影响,所以实测波形数据不是标准高斯函数,其左右拐点也就不可能对称,如图3、4所示。综上,将检测出的拐点的与其右边第一个点连成直线,如果直线斜率大于零,则该拐点为左拐点;如果直线斜率小于零,则该拐点为右拐点。如此,可将所有检测出的拐点分为左、右拐点。

由于波形数据中存在的噪声会使振幅值随机起伏,导致检测出的拐点中出现“伪拐点”。而包含伪拐点

的那部分波形实际上不是由目标后向散射信号产生的<sup>[11]</sup>。Hofton等<sup>[11]</sup>提出每两个相邻拐点组成一个高斯分量的方法。由于伪拐点的影响,必然会产生大量伪分量。而采用高斯拐点匹配法能极大地减小伪拐点的影响。

因为噪声和波形叠加作用的影响,导致分出的左、右拐点不正确(如图3、4所示)。因此,需要在优化过程中判断拟合波形  $f(x)$  与原始波形数据  $y_k$  残差绝对值的最大值  $\xi_r$  是否小于预定义拟合精度  $\varepsilon_r$ ,以确定是否需要添加新的高斯分量<sup>[8]</sup>:

$$\xi_r = \max |f(x) - y_k| < \varepsilon_r. \quad (3)$$

如果需要添加新的高斯分量,则先检查  $\xi_r$  处或其附近有没有“未参与”优化拟合的拐点:1)如果有“未参与”优化拟合的拐点,则将其纳入下一次优化拟合的过程;2)如果没有“未参与”优化拟合的拐点,则在  $\xi_r$  处添加一个新的高斯分量(给定该高斯分量的  $\mu$  值为  $\xi_r$  处对应的采样时间值,  $A$  值为  $\mu$  值对应的振幅值,  $\sigma$  值为系统半峰全宽  $\sigma_s$ ),用于下一次优化拟合。然后再次检查优化拟合约束条件,直到满足要求为止。

### 2.2.2 初始参数估计

由于高斯函数的拐点 ( $x = \mu \pm \sigma$ ) 由位置参数  $\mu$  和尺度参数  $\sigma$  唯一确定<sup>[11]</sup>。在确定了一个高斯分量的左拐点  $g(x_1)$  和右拐点  $g(x_2)$  后(如图1所示),可以反推出  $\mu$  和  $\sigma$  的值为

$$\begin{cases} \mu = \frac{g(x_1) + g(x_2)}{2} \\ \sigma = \frac{g(x_2) - g(x_1)}{2} \end{cases}. \quad (4)$$

同时,将左拐点和右拐点之间的最大值作为这个高斯分量的峰值  $A$ 。因而,可以得到每个高斯分量的初始参数 ( $A_i$ 、 $\mu_i$ 、 $\sigma_i$ )。

### 2.3 参数优化

选用列文伯格-马夸尔特(L-M)算法作为优化算法,同时,采用Hofton等<sup>[11]</sup>给出的式评价拟合精度。

$$\xi_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_k - f(x)]^2} < \varepsilon_H, \quad (5)$$

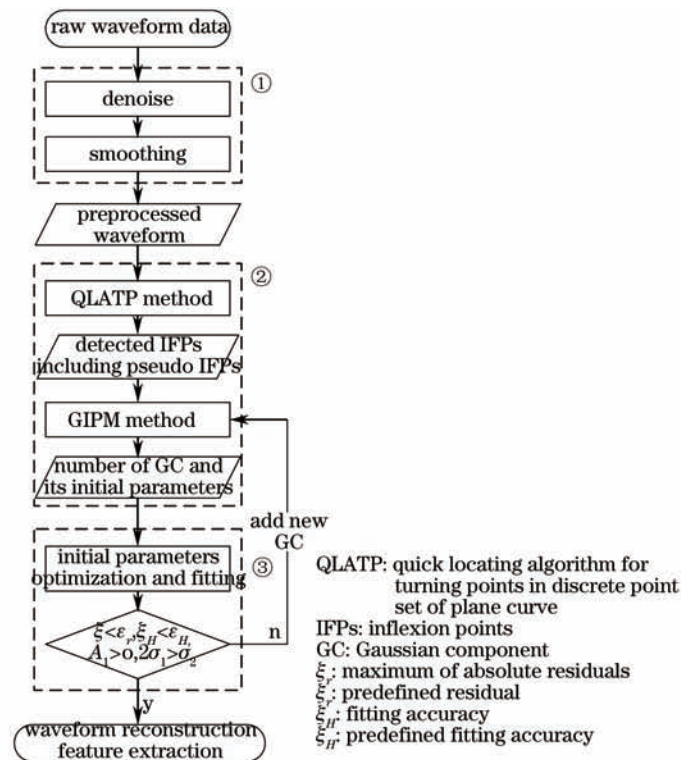


图2 利用高斯拐点匹配法的小光斑全波形机载LiDAR波形数据高斯分解流程

Fig.2 Procedure of Gaussian decomposition of small-footprint full-waveform airborne LiDAR data using GIPM method



式中  $\xi_H$  是拟合质量评价函数,  $N$  是原始波形数据采样点的个数,  $f(x)$  是拟合波形,  $\varepsilon_H$  为预定义拟合精度。

为了使优化拟合结果最优且有意义, 需要检查每次优化拟合后的约束条件(即  $\xi_r$ 、 $\xi_H$ 、峰值和波宽)。因此, 规定优化拟合后每个高斯分量的峰值  $A_i$  大于零, 波宽  $\sigma_i$  大于等于系统发射激光脉冲波宽的一半  $\sigma_s$  [8, 11]。

本文对小光斑全波形机载 LiDAR 波形数据的高斯分解流程如图 2 所示。

### 3 实验及结果分析

为了验证算法的有效性和可行性, 使用高斯拐点匹配法分别对模拟和实测波形数据进行了高斯分解。

#### 3.1 模拟波形数据高斯分解

模拟了“离散情况下”, 两个不同振幅、波宽的高斯函数随间距的增大而形成的叠加波形(如图 3 所示)。因为全波形机载 LiDAR 系统获取的原始波形数据是一系列等间隔的采样点, 这些采样点所表现出来的特征在连续情况下(参见 Lin 等[8]的文章)不能得到很好的反映。

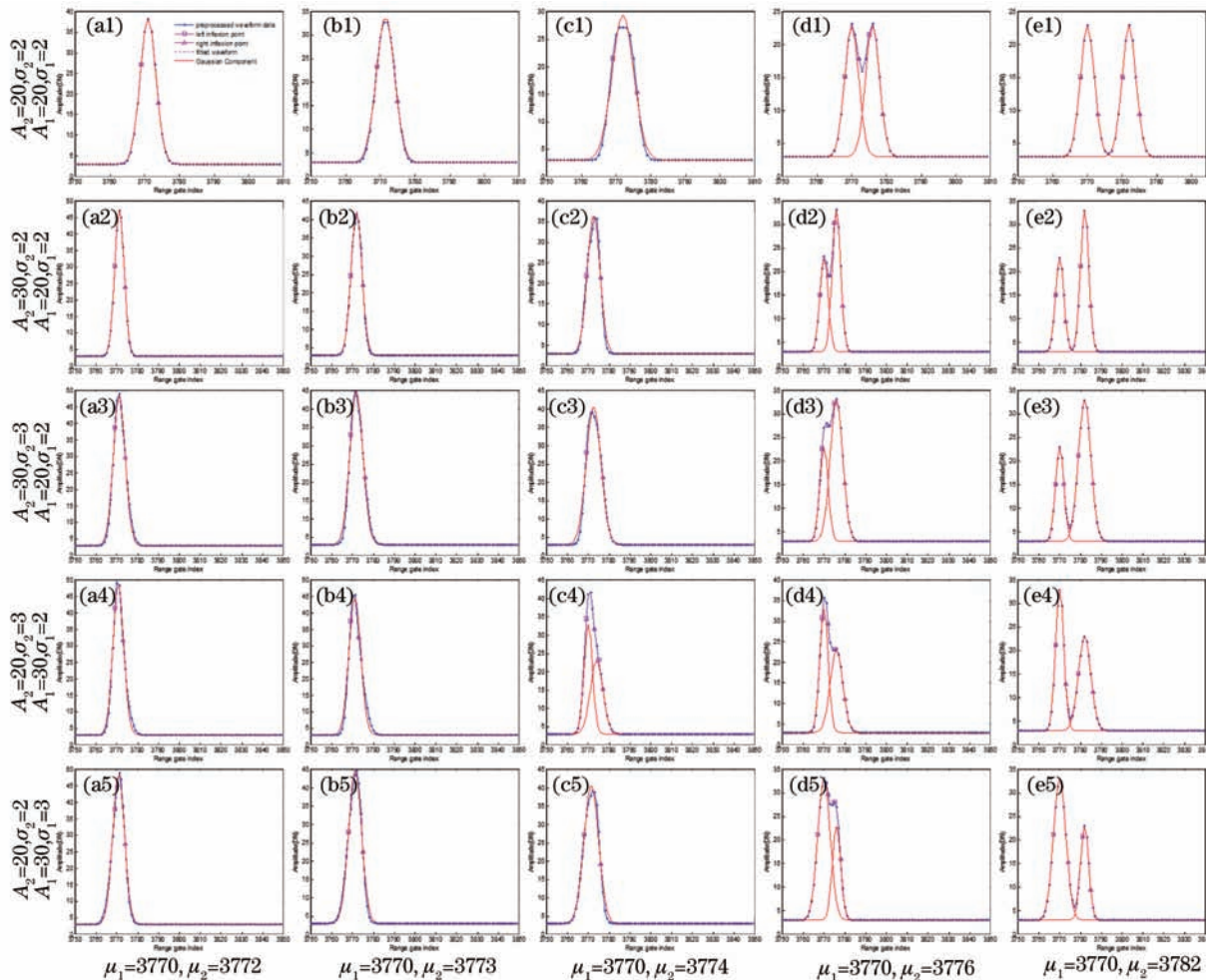


图 3 GIPM 方法应用于模拟波形数据得到的分解结果

Fig.3 Results of the simulated waveform data using the GIPM method

所用实测波形数据中, 每条回波波形数据大部分由 1 个采样序列组成, 且每个采样序列包含 100 个采样值。统计发现, 大部分回波波形采样点在距离索引(可以认为是时间, 单位为 ns)3600~4000 的范围内。而拟合质量评价函数  $\xi_H$  与原始波形数据采样点的个数  $N$  有关,  $N$  不同得到的  $\xi_H$  不同。为了与实测波形数据相呼应, 选择典型值 3750~3849 作为模拟数据横坐标范围。

表1 GIPM方法拟合模拟波形数据得到的  $\xi_r$  和  $\xi_H$  值Table 1  $\xi_r$  and  $\xi_H$  value from the fitting of the simulated waveform data by using the GIPM method

	$\mu_1=3770$ $\mu_2=3772$	$\mu_1=3770$ $\mu_2=3773$	$\mu_1=3770$ $\mu_2=3774$	$\mu_1=3770$ $\mu_2=3776$	$\mu_1=3770$ $\mu_2=3782$
$A_1=20, \sigma_1=2$	$\xi_r=0.1620$	$\xi_r=0.7415$	$\xi_r=2.1833$	$\xi_r=9.0985 \times 10^{-11}$	$\xi_r=1.7121 \times 10^{-9}$
$A_2=20, \sigma_2=2$	$\xi_H=0.0577$	$\xi_H=0.2597$	$\xi_H=0.6773$	$\xi_H=2.0853 \times 10^{-11}$	$\xi_H=5.0926 \times 10^{-10}$
$A_1=20, \sigma_1=2$	$\xi_r=0.3975$	$\xi_r=1.3110$	$\xi_r=2.9507$	$\xi_r=1.0310 \times 10^{-11}$	$\xi_r=1.0142 \times 10^{-9}$
$A_2=30, \sigma_2=2$	$\xi_H=0.0818$	$\xi_H=0.3064$	$\xi_H=0.7339$	$\xi_H=2.1953 \times 10^{-12}$	$\xi_H=2.5284 \times 10^{-10}$
$A_1=20, \sigma_1=2$	$\xi_r=2.0959$	$\xi_r=2.8656$	$\xi_r=3.3349$	$\xi_r=4.6932 \times 10^{-10}$	$\xi_r=2.7594 \times 10^{-11}$
$A_2=30, \sigma_2=3$	$\xi_H=0.6042$	$\xi_H=0.7268$	$\xi_H=0.7781$	$\xi_H=9.8896 \times 10^{-11}$	$\xi_H=5.7343 \times 10^{-12}$
$A_1=30, \sigma_1=2$	$\xi_r=2.9658$	$\xi_r=3.5867$	$\xi_r=7.6550 \times 10^{-11}$	$\xi_r=4.3048 \times 10^{-11}$	$\xi_r=4.7645 \times 10^{-10}$
$A_2=20, \sigma_2=3$	$\xi_H=0.7073$	$\xi_H=0.9984$	$\xi_H=1.3182 \times 10^{-11}$	$\xi_H=8.9812 \times 10^{-12}$	$\xi_H=1.0813 \times 10^{-10}$
$A_1=30, \sigma_1=3$	$\xi_r=2.0955$	$\xi_r=2.8656$	$\xi_r=3.3348$	$\xi_r=9.2279 \times 10^{-7}$	$\xi_r=6.5777 \times 10^{-7}$
$A_2=20, \sigma_2=2$	$\xi_H=0.6042$	$\xi_H=0.7268$	$\xi_H=0.7781$	$\xi_H=1.4490 \times 10^{-7}$	$\xi_H=1.4611 \times 10^{-7}$

图3是离散情况下,两个不同振幅( $A_1, A_2$ )、波宽( $2\sigma_1, 2\sigma_2$ )的高斯函数随间距( $\mu$ )增大而形成的叠加波形。从左到右依次是间距为半个波宽(2、3)、一个波宽(4、6、12)时,两个高斯函数叠加形成的波形及用该方法优化拟合后的波形。因为两个不含噪声的高斯函数叠加是最简单的叠加情况。图3中,蓝色点表示在距离索引3750~3849上每隔一个索引值采样的高斯函数值,蓝色实线是所有蓝色点用直线连接后形成的模拟波形数据,蓝色实线上覆盖的粉红色虚线是最后的拟合结果,红色实线是得到的高斯分量,正方形表示左拐点,三角形表示右拐点。

由图3可知,当间距为半波宽2[图3(a1)~(a5)]或3[图3(b1)~(b5)]、一个波宽4[图3(c1)~(c5)]时,两个高斯函数(高斯波形)叠加为单峰类高斯波形。除了由波宽相同的两个高斯函数形成的叠加波形外[图3(a1)、3(a2)、3(b1)、3(b2)、3(c1)],其他叠加波形都表现出轻微的偏态性。除了图3(c4)外,都只能检测到两个拐点,并被正确地分为左右拐点。而图3(c4)共检测出四个拐点,其中波峰右边检测出三个右拐点。为了更好地利用检测出的拐点,假定图3(c4)由两个高斯分量组成,并将第二个右拐点改正为左拐点用于波形数据优化拟合。

当间距为一个波宽(6)[图3(d1)~(d5)]时,两个高斯函数叠加为双峰波形。同时可知,所有的叠加波形都能检测出四个拐点,且都有一个拐点刚好处于波峰或波谷附近。由于叠加波形是明显的双峰波形,将这种拐点纳入优化拟合过程。当间距为12[图3(e1)~(e5)]时,两个高斯函数几乎没有叠加,此时能很好地检测到两个高斯分量及其左右拐点。

综上,当间距小于等于一个波宽(4)时,使用本文方法只能分解出模拟波形数据中的一个高斯分量[图3(c4)除外];当间距大于一个波宽(4)时,能正确地分解出波形数据中的全部(两个)高斯分量。结果表明,当两个高斯函数(高斯分量)间距小于系统波宽4 ns时,不可再分。

表1直接反映了所有叠加波形的拟合精度,当间距为半峰全宽(2、3)至一个波形(4)时, $\xi_r$ 和 $\xi_H$ 值较大,且基本上呈逐渐递增趋势[除了图3(c4)的叠加波形],直到间距为一个波宽(4)时, $\xi_r$ 和 $\xi_H$ 值达到最大,当间距大于一个波宽(6)时, $\xi_r$ 和 $\xi_H$ 值都很小( $10^{-7}$ 甚至更小),几乎可以认为是完全拟合。

模拟结果表明,该算法能有效地检测、分解、优化和拟合模拟机载LiDAR波形数据,具有较好可行性和有效性。同时说明当两个高斯函数(高斯分量)间距小于系统波宽(4)时,叠加波形不可再分。并可将来 $\xi_r$ 最大值3.5867和 $\xi_H$ 最大值0.7781作为预定拟合精度 $\varepsilon_r$ 和 $\varepsilon_H$ 值,用于实测波形数据分解。

### 3.2 实测波形数据高斯分解

所采用的实测数据是LiteMapper 5600机载LiDAR系统(全波形激光扫描系统是RIEGL LMS-Q560)采集的波形数据。LiteMapper 5600机载LiDAR系统的发射波形类似理想的高斯函数,发射脉冲波宽是4 ns,波形数据采样间隔为1 GHz(即1 ns)<sup>[20]</sup>。采集数据时,飞机的相对航高为500 m,ALS系统的脉冲重复频率为240 kHz。测区内地物主要有公路及其两旁的树林。选取8条典型回波数据做分析。

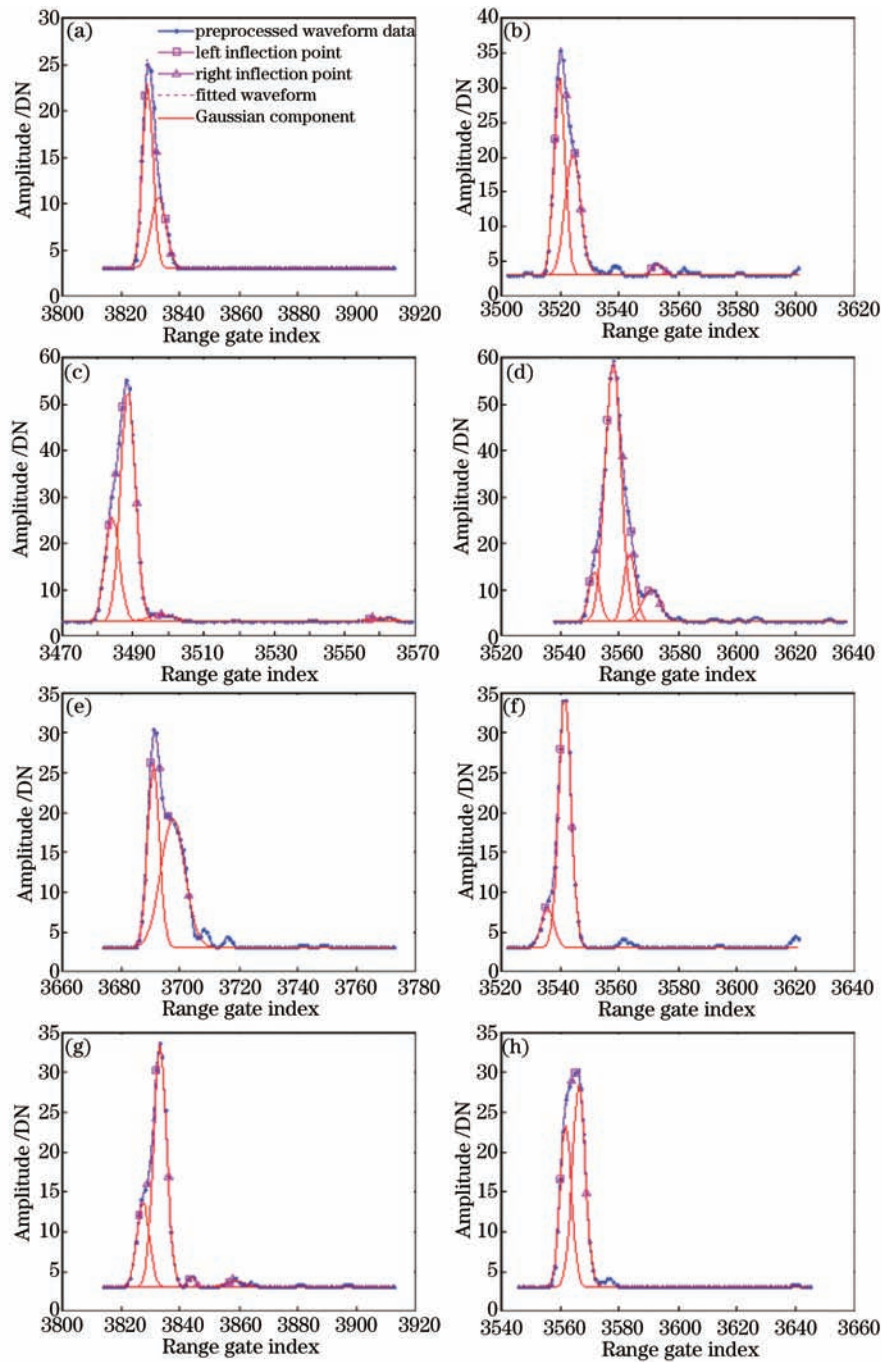


图4 GIPM方法应用于8条典型实测回波数据得到的分解结果

Fig.4 Results of 8 typical measured waveform data by using the GIPM method

表2 GIPM法拟合实测波形数据得到的  $\xi_r$  和  $\xi_n$  值

Table 2  $\xi_r$  and  $\xi_n$  value from the fitting of the measured waveform data using the GIPM method

No.	$\xi_r$	$\xi_n$
1	0.8052	0.1485
2	1.3000	0.3545
3	0.4094	0.1577
4	1.0000	0.2910
5	1.6874	0.4225
6	1.3000	0.2854
7	0.3804	0.1182
8	0.9999	0.2157



表3 不同脉冲检测方法检测出的分量个数对比

Table 3 Comparison of the number of Gaussian components detected by COG, GPF and GIPM method

No.	COG	GPF	GIPM
1	1	1	2
2	1	1	3
3	1	1	4
4	2	2	4
5	1	2	2
6	1	1	2
7	1	2	4
8	1	2	2

统计了5000条原始波形数据中每条波形数据的最后10个振幅值<sup>[11]</sup>,得到噪声标准差 $\sigma_n=0.93$ 。然后取3倍的噪声标准差(即 $b=3\sigma_n$ ,因为振幅值是整数,故取 $b=3$ )为背景噪声<sup>[8]</sup>。为了消除随机噪声的影响,对原始波形数据进行高斯滤波(考虑到原始波形数据在波峰附近变化剧烈,且系统发射波形的波宽为4 ns,将滤波窗口设置为 $1\times 3$ )。如图4所示,蓝色实线是去除背景噪声和高斯滤波后得到的预处理波形数据,其上的蓝色点是对应的振幅值;蓝色实线上覆盖的粉红色虚线是最后的拟合结果,红色实线是利用优化参数绘出的每个分量,正方形表示左拐点,三角形表示右拐点,从左到右、至上而下依次编号为(a)~(h)。

由图4可知,几乎所有的实测数据都是有偏态的单峰波形,应用该方法后,都得到了较好的分解和拟合结果。表2也直接反映出这种情况, $\xi_r$ 值最大为1.6784[图4(e)], $\xi_r$ 值最小为0.3804(图4(g)),且所有 $\xi_r$ 值都在1(即1个振幅值)附近浮动。拟合质量评价函数 $\xi_H$ 值最大为0.4225[图4(e)], $\xi_H$ 值最小为0.1182(图4(g)),且所有 $\xi_H$ 值都在0.3附近浮动。图4(e)、(b)、(h)个波形数据的 $\xi_r$ 和 $\xi_H$ 值相对来说都较差,这主要是由实测波形数据中存在弱波(即波峰较小的波形)。

表3是两种商业软件中常用的脉冲检测算法——重心法(COG)、高斯脉冲拟合法(GPF),与提出的高斯拐点匹配法(GIPM)分解出的高斯分量个数的比较。

结合图4和表3可知,GIPM方法能检测并分解出更多的高斯分量,而COG方法分解出的高斯分量最少。如图4(b)和4(c)中,GIPM方法分解出的高斯分量是其他方法的三或四倍。图4(b)、4(c)、4(d)和4(g)中,有一部分分解出的高斯分量是弱波。图4(e)和4(i)中的波形虽都含有弱波,但GIPM方法却都能很好地进行处理。图4(h)中的预处理波形在排除伪拐点的影响后,只剩下三个拐点,且第一个拐点处分解出了一个高斯分量,这是在二次优化拟合过程中添加新分量后的结果。

综上所述,提出的高斯拐点匹配法能很好地检测、分解、优化和拟合小光斑全波形机载LiDAR系统获取的波形数据,并得到较高的拟合精度。

## 4 结 论

针对小光斑全波形机载激光雷达波形数据高斯分解过程中的核心问题——高斯分量个数估计,以高斯分解法为理论基础,提出一种高斯拐点匹配法。并将高斯拐点匹配法用于模拟和实测波形数据进行分解,并与传统的脉冲检测方法(重心法和高斯脉冲拟合法)进行比较,结果表明,提出的高斯拐点匹配法能很好地检测、分解、优化和拟合小光斑全波形机载LiDAR系统获取的波形数据,并得到较高的拟合精度。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Process and current state of space-borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.  
于真真,侯霞,周翠芸.星载激光测高技术发展现状[J].激光与光电子学进展,2013,50(2):020006.
- 2 Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LIDAR by using orthogonalization-based experiments[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214003.  
王建军.基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计[J].中国激光,2013,40(2):0214003.
- 3 Alexander Cici, Tansey Kevin, Kaduk Jörg, *et al.*. Backscatter coefficient as an attribute for the classification of full-



- waveform airborne laser scanning data in urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(5): 423-432.
- 4 Mallet Clément, Lafarge Florent, Roux Michel, *et al.*. A marked point process for modeling lidar waveforms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3204-3221.
- 5 Mallet Clément, Bretar Frédéric. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(1): 1-16.
- 6 Liu Zhao, Zhang Aiwu, Duan Yihao, *et al.*. Research on decomposition of full-waveform airborne laser data[J]. High Technology Letters, 2014, 24(2): 144-151.  
刘 谔, 张爱武, 段乙好, 等. 全波形机载激光数据分解算法研究[J]. 高技术通讯. 2014, 24(2): 144-151.
- 7 Abed Fanar Mansour. Processing intensive full-waveform aerial laser scanning Matlab jobs through condor[J]. Internet of Things and Cloud Computing. 2013, 1(1): 5-14.
- 8 Lin Yu-Ching, Mills Jon, Smith-Voysey Sarah. Rigorous pulse detection from full-waveform airborne laser scanning data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(5): 1303-1324.
- 9 Fieber Karolina D, Davenport Ian J, Ferryman James M, *et al.*. Analysis of full-waveform LiDAR data for classification of an orange orchard scene[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 82: 63-82.
- 10 Roncat Andreas, Wagner Wolfgang, Melzer Thomas, *et al.*. Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator[J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2008, 21(1): 62-75.
- 11 Hofton Michelle A, Minster Jean Bernard, Blair J Bryan. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(4): 1989-1996.
- 12 Persson Å, Söderman U, Töpel J, *et al.*. Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data[C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Working Group III/3, 2005. 103-108.
- 13 Wagner Wolfgang, Ullrich Andreas, Ducic Vesna, *et al.*. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 6(2): 100-112.
- 14 Wagner W, Ullrich A, Melzer T, *et al.*. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanning: potential and practice challenges[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004, XXXVI-3/W52: 201-206.
- 15 Chauve Adrien, Mallet Clément, Bretar Frédéric, *et al.*. Processing full-waveform LIDAR data: modelling raw signals [C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007, 36(3/W52): 102-107.
- 16 Ma Hongchao, Li Qi. Modified EM algorithm and its application to the decomposition of laser scanning waveform data [J]. J Remote Sens, 2009, 13(1): 35-41.
- 17 Zhu Junfeng, Zhang Zuxun, Hu Xiangyun, *et al.*. Analysis and application of lidar waveform data using a progressive waveform decomposition method[C]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, XXXVIII-S/W12: 31-36.
- 18 Lai Xudong, Qin Nannan, Han Xiaoshuang, *et al.*. Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 319-324.  
赖旭东, 秦楠楠, 韩晓爽, 等. 一种迭代的小光斑LiDAR波形分解方法[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4): 319-324.
- 19 Wang Bingtuan. Quick locating algorithm for turning points in discrete point set of plane curve[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2001, 25(6): 85-87.  
王兵团. 平面曲线离散点集拐点的快速查找算法[J]. 北方交通大学学报, 2001, 25(6): 85-87.
- 20 Hug C, Ullrich A, Grimm A. LiteMapper-5600—a waveform-digitizing LIDAR terrain and vegetation mapping system [C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Working Group VIII/2, 2004.