

## 全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法

李鹏程, 徐青, 邢帅, 刘志青, 耿迅, 侯晓芬, 张建军

(信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 全波形激光雷达是遥感领域的新兴技术, 相比传统激光雷达, 它对后向散射回波进行全数字化的记录, 通过分解返回波形能够得到更加丰富的地物属性信息, 因此波形分解是激光雷达全波形数据处理的核心内容。针对传统 LM 算法容易陷入局部最优解的问题, 提出一种全局收敛 LM 的激光雷达全波形数据分解方法。该方法引入全局收敛 LM 算法对波形进行拟合, 获得波形分量参数的最优解, 利用迭代的波峰检测策略实现复杂重叠波形分量的逐步分解。通过对 GLAS、LVIS 与 Lite Mapper-5600 的波形数据分解实验证明: 该方法相比传统 LM 算法能够得到更具鲁棒性的波形分解结果, 并且适用于星载波形数据、机载大光斑以及机载小光斑波形数据, 具备较高实用价值。

**关键词:** 遥感; 激光雷达; 波形分解; 全局收敛 LM; 波形数据

**中图分类号:** P237   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2262-06

## Full-waveform LiDAR data decomposition method based on global convergent LM

Li Pengcheng, Xu Qing, Xing Shuai, Liu Zhiqing, Geng Xun, Hou Xiaofen, Zhang Junjun

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Full-waveform LiDAR is a rising technique in the field of remote sensing. Compared with traditional LiDAR, it can digitize all the back-scattering pulses. More abundant attribute of targets shall be obtained by waveform decomposition, which is the core content of full-waveform lidar data processing. A waveform decomposition method based on global convergent LM was proposed. Waveform was fitted and optimal solutions of components' parameters were obtained by introducing global convergent LM. Decomposition of complex overlapping waveform components was realized by iterative peaks detection. The experimental results on GLAS, LVIS and Lite Mapper-5600 waveform data prove that, the decomposing results are more robust than traditional LM and proposed method is practical as it is suitable for satellite, airborne large footprint size and airborne small footprint size waveform data.

**Key words:** remote sensing; LiDAR; waveform decomposition; global convergent Levenberg Marquardt; waveform data

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(41371436)

作者简介: 李鹏程(1987-), 男, 博士生, 主要从事数字摄影测量与激光雷达方面的研究。Email: lplqq@163.com

导师简介: 徐青(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事数字摄影测量、空间数据三维可视化、深空测绘等方面的研究。

Email: xq@szdceec.com

## 0 引言

近年来,全波形激光雷达技术在地形测绘、地质分析以及森林监测等领域发挥了巨大作用,它是传统激光雷达技术的重要延伸。目前,绝大多数的商业激光雷达系统都将全波形数字化仪作为标准的配置部件。用户通过对波形数据进行分析能够得到更加丰富的回波信息,这使得后续的数据处理方式更加灵活机动。波形分解是后续数据处理的重要前提,它也是目前全波形激光雷达技术的热点与难点问题<sup>[1]</sup>。

Mallet<sup>[2]</sup>对现有的波形分解方法进行了总结,波形分解主要分为波形模拟与拟合两个步骤,波形模拟是指选择合理的函数模型,绝大多数方法认为波形数据是若干高斯分量的叠加,因此通常采用高斯函数模型;波形拟合是求解最优化参数的过程,比较典型的参数优化算法有非线性最小二乘法,期望最大化法以及逆跳蒙特卡罗马尔科夫链算法。其中,非线性最小二乘法应用最为广泛,Hofton<sup>[3]</sup>最早将非线性最小二乘法引入 LVIS (Airborne Laser Vegetation Imaging Sensor)的波形数据分解中,为克服参数初始化步骤中不合理初值造成的不利影响,她在波形拟合的过程中逐步增加波峰,直至拟合精度达到要求;Chauve<sup>[4]</sup>研究了高斯函数、对数正态函数与广义高斯函数在波形分解中的差别,提出一种迭代的波峰检测方法,并利用 LM(Levenberg Marquardt)算法<sup>[5]</sup>对波形进行拟合;刘峰<sup>[6]</sup>在广义高斯函数模型的基础上,利用 LM 算法对参数进行优化,在 Lite Mapper-5600 系统获取的小光斑波形数据分解实验中取得较好效果。

上述方法在波形拟合过程中均运用的是 LM 算法,该算法灵活吸收了梯度法与牛顿法的优点,又具有类似于神经网络的特点<sup>[7]</sup>,然而它对初始值的要求较高,容易陷入局部最优解。文中针对这一问题,提出一种全局收敛 LM 的激光雷达波形分解方法,该方法利用迭代波峰检测的策略,并引入一种全局收敛 LM 算法对波形进行拟合。

## 1 全局收敛 LM 算法

传统 LM 往往容易得到局部唯一解,而全局收敛 LM 算法主要针对这一不足进行改进。该算法由湘潭大学的杨柳<sup>[8]</sup>首先提出,海军工程大学的贺星<sup>[9]</sup>

将该算法引入燃气轮机部件特性曲线的拟合优化中,并取得较好的实验效果。文中将全局收敛 LM 算法引入到激光雷达全波形数据的波形拟合中,不仅拓展了全局收敛 LM 算法的应用领域,也为激光雷达全波形数据分解提供了更加可靠的解决方案。公式(1)为传统 LM 算法的解算公式。

$$p=p^{(0)}+[H(x,p^{(0)})+\lambda E]^{-1}J^T(x,p^{(0)})[y-f(x,p^{(0)})] \quad (1)$$

式中: $f(x,p)$ 为待定系数 $(p_1,p_2,\dots,p_m)$ 的函数,其观测数据为 $(x_i,y_i),i=1,2,\dots,n;p^{(0)}=(p_1^{(0)},p_2^{(0)},\dots,p_m^{(0)})$ 为函数参数的初始值; $\lambda$ 为阻尼系数,当 $\lambda=0$ 时,即为高斯牛顿法的形式; $J(x,p)$ 为函数 $f(x,p)$ 的一阶偏导数组成的雅克比矩阵; $H(x,p)$ 为函数 $f(x,p)$ 的海塞矩阵。在解算过程中,若 $p$ 与 $p^{(0)}$ 中各元素之差的绝对值很小,则迭代结束;若 $\|p-p^{(0)}\|$ 较大,则将解算得到的 $p$ 作为新的 $p^{(0)}$ 重新进行计算,如此反复迭代直到 $\|p-p^{(0)}\|$ 达到收敛条件或迭代次数达到最大为止。

假设解集非空且记为 $P^*$ ,若 $J(x,p^*)(p^* \in P^*)$ 非奇异且初始点 $p^{(0)}$ 与 $p^*$ 充分靠近时,LM 算法产生的迭代点列二阶收敛于 $p^*$ 。然而,在实际运用中,方程解处的雅克比矩阵非奇异这一条件往往过于严格,而且非奇异性条件表明该方法得到的解是局部唯一的。因此,文中采用一种基于信赖域技巧的全局收敛 LM 算法使得解具有全局收敛性。算法选取阻尼系数 $\lambda_k=\alpha_k[\theta\|F_k\|+(1-\theta)\|J_k^T F_k\|]$ , $\theta \in [0,1]$ ,其中 $\alpha_k$ 利用信赖域技巧来修正,其原理如下:

定义目标函数 $\|F\|^2$ ,则第 $k$ 步迭代的实际下降量 $Ared_k$ 和预估下降量 $Pred_k$ 分别为:

$$Ared_k=\|F_k\|^2-\|F(p^{(k)}+\Delta p^{(k)})\| \quad (2)$$

$$Pred_k=\|F_k\|^2-\|F_k-J_k\Delta p^{(k)}\|^2 \quad (3)$$

式中: $\Delta p^{(k)}=p^{(k+1)}-p^{(k)}$ ,用实际下降量 $Ared_k$ 和预估下降量 $Pred_k$ 的比值 $r_k$ 决定是否接受试探步 $\Delta p^{(k)}$ 以及调整迭代参数中 $\alpha_k$ 因子的大小。一般来说, $r_k$ 越大,说明目标函数 $\|F\|^2$ 下降得越多,因此接受 $\Delta p^{(k)}$ ,期望下一试探步 $\Delta p^{(k+1)}$ 更长,故减小 $\alpha_k$ ;反之, $r_k$ 越小,则考虑拒绝接受 $\Delta p^{(k)}$ ,从而增大 $\alpha_k$ 。

全局收敛 LM 算法的具体步骤如下:

(1) 给定 $p^{(1)} \in R^n, \alpha_1>r>0, 0 \leq Opts_0 \leq Opts_1 \leq Opts_2 < 1, k=1$ ;

(2) 若 $\|J_k^T F_k\| \leq \varepsilon$ ,则停止计算;否则,取 $\lambda_k=\alpha_k[\theta\|F_k\|+(1-\theta)\|J_k^T F_k\|]$ 并带入 LM 算法的迭代公式中求解

$\Delta p^{(k)}$ ;

(3) 计算  $r_k$ ;

(4) 计算  $p^{(k+1)}$ 。若  $r_k > \text{Opts}_0$ , 取  $p^{(k+1)} = p^{(k)} + \Delta p^{(k)}$ ; 否则取  $p^{(k+1)} = p^{(k)}$ ;

(5) 计算  $\alpha_{k+1}$ 。若  $r_k > \text{Opts}_1$ , 取  $\alpha_{k+1} = 4\alpha_k$ ; 若  $\text{Opts}_1 \leq r_k \leq \text{Opts}_2$ , 取  $\alpha_{k+1} = \alpha_k$ ; 否则取  $\alpha_{k+1} = \max\{\alpha_k/4, t\}$ ;

(6) 令  $k=k+1$ , 转到步骤(2)。

在全球收敛 LM 算法中,  $t$  为给定常数, 它是参数因子  $\alpha_k$  的下界, 其作用是当迭代点列靠近方程解时, 防止试探步过大而引起的数值困难<sup>[8-9]</sup>。

## 2 波形分解原理

波形分解将波形分为多个回波的总和, 从而对脉冲下的不同目标进行特征描述。波形分解的目的是使得波峰检测率最大化, 获得更加密集的点云以及扩展波形处理的能力。由波形分解得到的波形特征参数将有利于数字地面模型的生成以及地物的类别分析。通常, 波形分解算法只对原始波形进行波峰检测, 这样无法分解出复杂重叠的波形分量, 因此文中采取逐步逼近原始波形的迭代策略, 选取高斯函数为波形模拟的函数模型, 在每次波形拟合中运用全局收敛 LM 算法求解最优参数。波形分解的流程如图 1 所示。

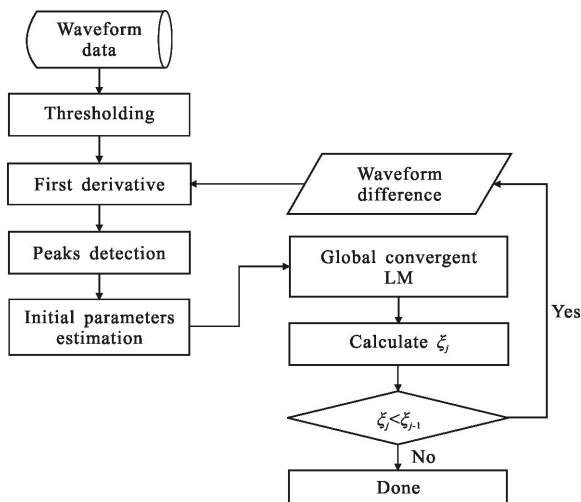


图 1 波形分解流程图

Fig.1 Workflow of waveform decomposition

(1) 噪声去除。波形在采集的过程中由于多方面的原因会产生背景噪声, 这些噪声一般呈现小振幅抖动的形态, 在波形分解前, 必须设定一定的阈值将

噪声去除, 这里设定的噪声阈值是最后 5% 波形的振幅最大值;

(2) 波峰检测。计算每个采样点的一阶导数, 将零交叉值的点视为波峰位置, 检测出的波峰数量决定了波形分解参数的个数;

(3) 参数初始化估计。对于高斯函数模型, 需要初始化的参数包括脉冲振幅  $A_k$ 、脉冲宽度  $\sigma_k$  和脉冲距离  $\mu_k$ 。正确设置参数的初始值能够提高运算的速度, 减少迭代次数, 因此根据检测出的波峰对这些参数进行初始化赋值;

(4) 求解参数的最优化估计。采用全局收敛 LM 算法实现波形的拟合, 全局收敛 LM 算法原理详见文中第一部分;

(5) 残差计算。计算原始波形与拟合波形之间的残差  $\xi$ , 若残差值小于前一次的计算结果, 则对残差波形进行上述步骤(2)~(4)的处理从而能够检测出遗漏的波峰, 如此迭代计算直至残差值  $\xi$  停止减小。残差  $\xi$  的计算公式如公式(4)所示<sup>[4]</sup>, 其中,  $n$  是采样点的个数,  $m$  为拟合函数的参数个数,  $y_i$  为原始波形各个采样点的振幅值,  $f(x_i)$  为拟合波形中各个采样点的振幅值。

$$\xi = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4)$$

波形分解得到的是组合高斯函数的模型参数, 这些参数称为波形参数, 它们描述了各个波形分量的振幅  $A_k$ 、脉冲距离  $\mu_k$  以及脉冲宽度  $w_k$ , 而每个波形分量对应地物的一次反射回波, 因此波形分解的效果直接影响生成激光点云的质量; 不仅如此, 波形参数反映了照射地物的物理属性, 这些参数特征对于地物的分类也会起到重要作用。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据

为验证该方法的有效性, 选取三个不同系统获取的激光雷达全波形数据进行波形分解实验, 它们分别是 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), LVIS 与 Lite Mapper-5600<sup>[10]</sup>。其中, GLAS 由 NASA 设计开发, 搭载于 ICESat 卫星, 主要用于研究南极洲、格林兰岛陆地与海洋冰川的演化, 海洋冰川的粗糙度与厚度以及地形与云层微粒的垂直结构, 其获取的是星载激光雷达全波形数据; LVIS 是由 NASA

开发的机载全波形激光雷达系统,主要用于林区特征描述与地形测绘,其获取的是机载大光斑波形数据;Lite Mapper-5600 由 RiegI 公司生产,搭载于航空平台,获取的是机载小光斑波形数据。表 1 给出了这三种系统的主要规格参数。此次实验采用的 GLAS 与 LVIS 数据由 LASTools 的创始人 Martin Isenburg 提供,Lite Mapper-5600 数据由黑河综合遥感联合试验提供。

表 1 三种系统的主要规格参数

Tab.1 Main technical specifications for three systems

System	GLAS	LVIS	Lite Mapper-5600
Company manufacturer	NASA	NASA	RiegI
Platform	Satellite	Airborne	Airborne
Beam deflection	None	Oscillating	Polygon
Beginning-final year	2003-	1997-	2004-
Wavelength/nm	1 064/532	1 064	1 550
Flying height/km	600	<10	<1.5
Pulse rate/kHz	0.04	0.1-0.5	≤100
Pulse energy/mJ	75/35	5	0.008
Pulse width/ns	6	10	4
Scan rate/Hz	-	500	5-160
Scan angle/(°)	0	14	45
Beam divergence /mrad	0.11-0.17	8	0.5
Footprint size/m	66@600 km	40@5 km	0.5@1 km
Range accuracy/cm	5-20	30	2
Digitizer/ns	1	2	1

3.2 实验结果

图 2、图 3 与图 4 分别为 GLAS、LVIS 与 Lite Mapper-5600 全波形数据中某条波形的分解结果以及与传统 LM 算法的对比。其中,(a)为传统 LM 算法的分解结果;(b)为文中方法得到的分解结果。图中圆点表示原始波形数据,虚线表示分解出的波形分量,实线表示拟合波形,横坐标与纵坐标分别表示采样时间与波形数据的振幅值。表 2~4 给出了对应的

波形分量参数。从实验图表可以看出,无论是星载波形数据、机载大光斑波形数据还是机载小光斑波形数据,文中方法得到的拟合波形均能够很好地吻合去噪后的原始波形;对于传统 LM 算法,其在 GLAS 波形中分解出振幅小于噪声阈值的分量,LVIS 与 Lite Mapper-5600 的拟合波形对原始采样数据的模拟存在一定偏差,而文中算法则不存在这些问题,并且检测到的波形分量数也较传统 LM 算法多。因此文中算法相比传统 LM 算法更具鲁棒性。

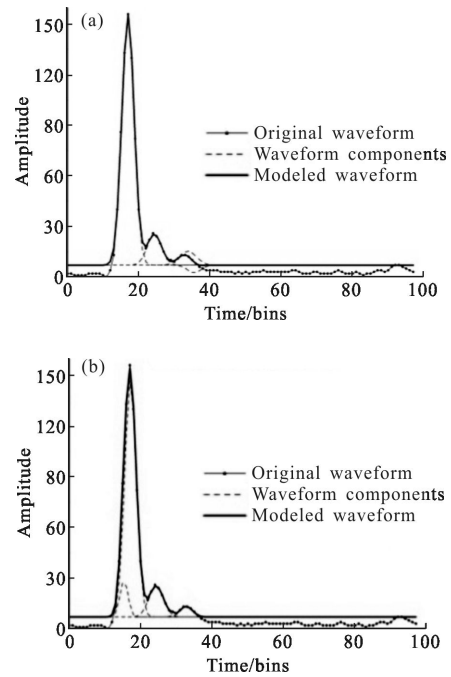


图 2 GLAS 波形分解结果图

Fig.2 Decomposition result of GLAS waveform

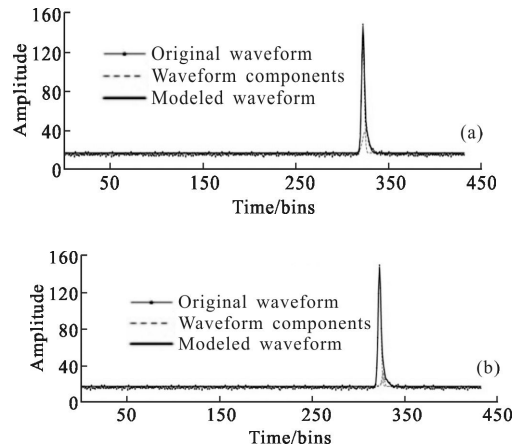


图 3 LVIS 波形分解结果图

Fig.3 Decomposition result of LVIS waveform

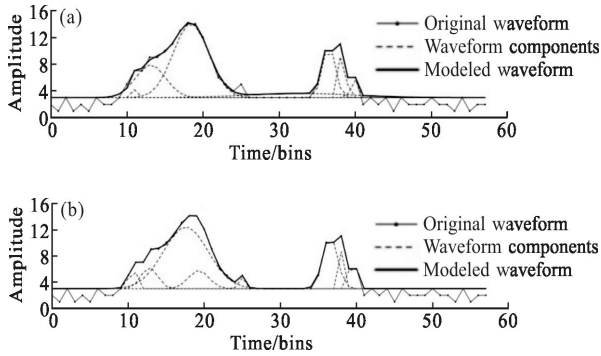


图 4 Lite Mapper-5600 波形分解结果图

Fig.4 Decomposition result of Lite Mapper-5600 waveform

表 2 GLAS 波形分量参数

Tab.2 Parameters of GLAS waveform components

Method	Number of components	Pulse amplitude $A_k$	Pulse range $\mu_k$	Pulse width $w_k$
Traditional LM	4	155.754	16.968	1.712
		25.437	24.371	1.990
		15.321	33.769	-2.376
		3.528	35.509	1.819
Proposed method	5	28.441	15.347	1.140
		147.401	17.159	1.628
		25.444	24.343	2.014
		10.530	28.593	0.267
		13.369	32.753	1.738

表 3 LVIS 波形分量参数

Tab.3 Parameters of LVIS waveform components

Method	Number of components	Pulse amplitude $A_k$	Pulse range $\mu_k$	Pulse width $w_k$
Traditional LM	2	131.708	321.955	1.433
		40.268	324.845	3.162
		145.441	322.026	1.513
Proposed method	3	32.647	325.893	1.217
		24.848	328.178	3.422

表 4 Lite Mapper-5600 波形分量参数

Tab.4 Parameters of Lite Mapper-5600 waveform components

Method	Number of components	Pulse amplitude $A_k$	Pulse range $\mu_k$	Pulse width $w_k$
Traditional LM	7	4.210	11.019	0.148
		7.897	13.116	1.957
		14.057	18.408	2.311
		3.629	32.754	7.081
		10.760	36.506	0.822
		13.971	38.370	0.338
		10.700	39.609	0.267
Proposed method	8	5.791	10.521	0.216
		6.253	12.777	1.073
		12.357	17.575	2.925
		5.766	19.250	1.329
		5.209	24.592	0.199
Proposed method	8	10.991	36.516	0.956
		8.756	38.147	0.129
		5.919	39.505	0.251

3.3 精度分析

波形分解的精度用残差  $\xi$  评定，计算公式如公式(4)所示。如果  $\xi < 0.5$ ，则认为该波形分解结果是合格的<sup>[4]</sup>。表 5 给出了上述实验波形的残差统计，并对传统 LM 算法与文中算法的波形残差进行比较。文中方法对以上三种波形的分解精度均达到要求，并且比传统 LM 算法计算的残差值都小，说明该方法的波形分解结果比传统 LM 算法更加可靠。

表 5 波形残差统计

Tab.5 Statistics of waveform residual

System	Traditional LM ( $\xi$ )	Proposed method ( $\xi$ )
GLAS	0.387	0.193
LVIS	0.194	0.110
Lite Mapper-5600	0.172	0.148

为进一步验证该方法的稳健性，对这三类数据的所有波形进行波形分解实验并计算每个波形的残差，根据波形分解精度评定条件统计达到精度要求的波形数量与合格率。传统 LM 算法与文中方法的

统计结果如表 6 与表 7 所示。可以看出,利用文中方法得到的波形分解合格率都达到 98%以上,较传统 LM 算法改进明显,证明本波形分解方法更加稳健。

表 6 传统 LM 算法合格波形统计

Tab.6 Statistics of qualified waveform using traditional LM

System	Qualified waveform	Unqualified waveform	Number of waveform	Qualified rate
GLAS	760	240	1 000	76.0%
LVIS	888	112	1 000	88.8%
Lite Mapper-5600	169 655	18 650	188 305	90.1%

表 7 文中算法合格波形统计

Tab.7 Statistics of qualified waveform using proposed method

System	Qualified waveform	Unqualified waveform	Number of waveform	Qualified rate
GLAS	985	15	1 000	98.5%
LVIS	999	1	1 000	99.9%
Lite Mapper-5600	186 411	1 894	188 305	99.0%

## 4 结 论

文中提出并实现了一种全局收敛 LM 的激光雷达全波形数据分解方法。主要创新点在于:引入全局收敛 LM 算法进行激光雷达波形数据的拟合,从而得到可靠的最优化波形参数解;利用逐步迭代的波峰检测策略,使得算法适用于复杂波形的情况。对 GLAS、LVIS 与 Lite Mapper-5600 的波形分解实验能够得出以下结论:

(1) 该方法能够有效实现波形数据的分解,波形拟合精度高;

(2) 对于星载波形数据、机载大光斑波形数据以及机载小光斑波形数据均适用,证明算法适应性强。

(3) 该方法较传统 LM 算法更加稳健,具有实际应用价值。

进一步的研究将利用获得的波形分量参数提高

数字地面模型生成的精度以及辅助地物的类别分析;并利用基于 GPU 的并行技术,将大量波形的分解运算分配到众多计算单元上并行执行。

## 参考文献:

- [1] Lai Xudong, Qin Nannan, Han Xiaoshuang, et al. Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(4): 319-324. (in Chinese)
- [2] Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64: 1-16.
- [3] Hofton M, Minster J, Blair J. Decomposition of laser altimeter waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1989-1996.
- [4] Chauve A, Mallet C, Bretar F. Processing full-waveform lidar data: modeling row signals [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, 36(Part 3/W52): 102-107.
- [5] Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1969, 11(2): 431-441.
- [6] Liu Feng, Tan Chang. Study of decomposition of full waveform airborne laser scanner data [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 30(8): 148-154. (in Chinese)
- [7] Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. Application of Levenberg-Marquardt algorithm in the wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 500-504. (in Chinese)
- [8] Yang Liu, Chen Yanping. A new global convergent Levenberg-marquardt method for solving nonlinear system of equations [J]. *Mathematica Numerica Sinica*, 2008, 30(4): 388-396. (in Chinese)
- [9] He Xing, Liu Yongbao, Sun Fengrui. Optimal fitting of gas turbine performance based on improved Levenberg-Marquardt method [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2012, 24(4): 35-40. (in Chinese)
- [10] Hug C, Ullrich A, Grimm A. Lite Mapper-5600—a waveform-digitizing lidar terrain and vegetation mapping system [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 36(Part 8/W2): 24-29.