

一种迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法

赖旭东¹, 秦楠楠¹, 韩晓爽², 王俊宏³, 侯文广^{3*}

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;

2. 内蒙古大学 电子信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010021;

3. 华中科技大学 生命科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对传统 LiDAR 波形数据分解方法受噪声影响严重、对复杂重叠及微弱回波分解能力不足的缺点,提出了一种新波形分解方法.通过计算滤波前后波形的幅值变化,估计波形的随机与背景噪声;采用逐层剥离的策略,从原始波形数据中不断分解出波形分量,直到剩余波形中最大峰值小于一定的阈值;利用 L-BFGS 算法优化初始参数,获得波形分量参数的最优解;最后对位置过近的波形分量进行合并.该方法计算速度快,探测微弱回波能力强,显著提高分解后点云的密度与精度.对大量 LiDAR 波形数据进行了分解,验证了其有效性.

关键词:LiDAR; 波形数据; 迭代分解; LM 算法; L-BFGS 算法; 高斯分解

中图分类号:P237 文献标识码:A

Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform

LAI Xu-Dong¹, QIN Nan-Nan¹, HAN Xiao-Shuang², WANG Jun-Hong³, HOU Wen-Guang^{3*}

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;

3. College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: LiDAR (Light Detection and Ranging) waveform decomposition is a key issue in remote sensing data processing. Traditional waveform decomposition methods can't detect weak sub-waveforms when sub-waveforms are overlapped in original data. Besides, these methods are time consuming and not robust to noise. To overcome the obstacle, this paper proposed a new method, which mainly includes four steps. The first is to estimate the errors by filtering the original waveform. Then, iteratively peeling off sub-waveforms from the waveforms till the value of maximum peak is less than a given threshold. The next step is to optimize the parameters of all sub-waveforms using L-BFGS method. At last, nearest sub-waveforms are combined. This new strategy can detect the weak peaks in the complex situations and is very robust to noise. Lots of experiments demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: LiDAR; waveform data; iterative decomposition; LM; L-BFGS; Gaussian decomposition

PACS: 95.75.Rs; 84.40.Xb

引言

目前,机载激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)在获取地面反射点三维坐标的同时,记录了从激光发射到接收的全数字化波形,RIEGL公

司于2004年首次在商业LiDAR系统中提供了具备全波形数字化能力的小光斑扫描仪^[1-3].目前,大多数商业的机载激光雷达系统都已将全波形数字化仪作为标准的配置部件,如Optech ALTM Gemini、Leica ALS-70等.用户可以对波形数据进行分析,从而

收稿日期:2012-04-05,修回日期:2012-10-23

Received date: 2012-04-05, revised date: 2012-10-23

基金项目:国家自然科学基金(41171289);国家科技支撑计划项目(2011BAH12B04);对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验室经费资助项目(K201105);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助项目

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41171289); National Science & Technology Pillar Program (2011BAH12B04); the Key Laboratory of Mapping from Space, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (K201105); LIESMARS Special Research Funding

作者简介(Biography): 赖旭东(1972-),四川资中人,副教授,主要研究方向为LiDAR数据处理及应用, E-mail: lxdwh@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: houwenguang99@163.com

为用户提供更加丰富的信息. 小光斑 LiDAR 波形数据的分解已经成为 LiDAR 技术的热点和难点问题.

对小光斑 LiDAR 波形数据的分解许多学者已进行了大量研究^[4-8]. Hofton 提出基于高斯模型的波形分解方法, 即高斯分解法. 该方法认为波形数据是若干高斯分量的叠加^[4]. Jutzi 采用反卷积的方法来获取地物的特征. 反卷积方法认为接收到的回波实际是发射脉冲和地物响应的卷积^[5]. Chauve 指出对于某些应用和目标物, 采用高斯模型并不能准确拟合波形, 故提出了广义高斯函数模型. Stilla 基于分析共面约束邻域关系, 提出了一种探测波形数据中微弱分量的方法. Roncat 讨论了用于探测和定位全波形数据中回波分量的均方差方法 (ASDF), 其结果与高斯分解的结果高度一致^[6]. Zwally 和 Wagner 指出高斯分解适用于大多数行业应用^[7-8]. 高斯分解能够分析和得到激光束传播过程中目标物的位置和向后散射属性, 即回波分量个数, 每个回波分量的峰值, 位置以及波宽等特征参数.

目前的小光斑 LiDAR 波形数据分解算法, 大多认为波形数据是若干高斯分量的叠加, 采用高斯函数来拟合波形数据, 分解过程分为两步: 特征参数预估, 用于估计高斯分量的个数以及各高斯分量的特征参数; 特征参数优化, 对预估的特征参数进行优化, 得到精确值. 常用的特征参数预估算法主要包括峰值法、重心法和拐点法等. 这些算法均需利用波形的梯度和拐点等信息, 但这些特征信息的获得容易受随机噪声的影响, 故研究人员对波形进行了滤波, 现有滤波算法无法合理将特征和噪声正确分类, 导致滤波对原始数据的特征信息损失较为严重, 分解的精度不高. 为了克服传统波形分解方法在波形数量、波形参数初值估计方面的缺陷, 本文提出一种迭代的小光斑 LiDAR 波形分解算法.

1 算法原理及步骤

首先, 估计原始波形数据噪声, 利用滤波算法对原始波形数据进行滤波, 取滤波后的波形数据的最小值作为背景噪声, 根据波形数据滤波前后的变化值计算随机噪声; 然后, 预估各高斯分量的特征参数及高斯分量的个数, 将原始波形数据减去背景噪声的影响, 从新的波形数据中迭代分解高斯分量直到波形的峰值小于 3 倍随机噪声中误差; 最后, 利用具有全局收敛特性的优化算法对预估出的特征参数进行优化, 从而求解出精确的波形分量特征参数. 原始波形数据可以用式 (1) 来描述.

$$y = N_b + \sum_{i=1}^n A_i \exp[-(t - b_i)^2 / 2\sigma_i^2], \quad (1)$$

式 (1) 中, N_b 表示原始波形的背景噪声; n 表示高斯分量的个数; A_i 表示第 i 个高斯分量的峰值; b_i 表示第 i 个高斯分量的波峰位置; σ_i 表示第 i 个高斯分量的半波宽; y 为 t 时刻回波的振幅.

1.1 原始波形数据噪声估计

基于 Mean Shift 算法的基本原理, Taubin 提出了 λ/μ 滤波算法^[9], 该算法是定义在高斯核基础上的一个低通滤波器, 有效地避免了高斯滤波导致数据边缘收缩的缺陷, 在滤波的同时, 还可以有效地保持原始数据的边缘信息. 其算法是利用式 (2) 对波形数据进行迭代处理.

$$\begin{cases} x'_i = x_i + \lambda \sum_{j \in i^*} w_{ij} (x_j - x_i) \\ x''_i = x'_i + \mu \sum_{j \in i^*} w'_{ij} (x'_j - x'_i) \end{cases}, \quad (2)$$

式 (2) 中的 x_i 表示滤波前的波形数据; x'_i 表示第一次滤波后的波形数据; i^* 表示点 i 的邻域; j 是 i 邻域内的点; 类似地, x''_i 表示第二次滤波后的波形数据; λ 和 μ 表示比例因子, $\lambda > 0, \mu < 0, \mu < -\lambda$; $w_{ij} (w'_{ij})$ 表示 $x_j (x'_j)$ 对 $x_i (x'_i)$ 的影响系数, 可以直接取邻域内点数的倒数. 直观地理解式 (2), 第一步就是对所有数据向各自邻域的重心平移, 第二步则是向各自邻域重心的反方向平移, 通过这种收缩扩展的方式, 在滤除噪声点的同时有效保持了原始数据的特征信息.

利用 λ/μ 算法对实测波形数据滤波去噪的效果如图 1 所示 (取 $\lambda = 0.6307, \mu = -0.6372$, 迭代次数为 3; 蓝线为原始波形数据的连线, 红线为滤波后波形数据的连线):

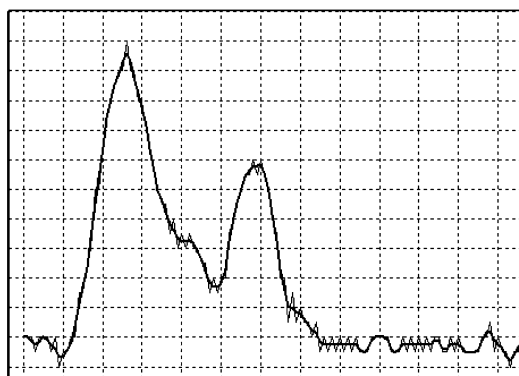


图 1 λ/μ 滤波去噪效果
Fig. 1 Effect of λ/μ filtering

将滤波后波形数据的最小值作为背景噪声的估计量 N_b , 利用式 (3) 计算随机噪声中误差的估计量

σ_n . 若迭代次数的不同,所估算的背景噪声和随机噪声通常会存在一定的差异. 因此,在实际应用中,设置的终止条件是:最近两次滤波前后的波形数据的峰值差的均值小于一定的阈值.

$$\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / n} \quad , \quad (3)$$

式(3)中, Δx_i 表示原始波形数据滤波前后的变化量, n 表示波形数据的个数.

1.2 特征参数预估

特征参数预估包括估计高斯分量个数以及各高斯分量特征参数,具体流程如图 2 所示. 从原始波形数据中减去背景噪声的估计量 N_b , 得到新波形数据 Y_n . 将 Y_n 中最大值作为高斯分量的波峰值 A , 考虑到随机噪声的影响,需要大于 3 倍随机噪声中误差^[10],即大于 $3\sigma_n$. 满足该条件的波峰值 A 对应的位置就是该高斯分量的波峰位置 b . 对高斯函数进行推导可以得到式(4),即如果已知位于波峰值 A 一半处波形数据的位置 t_g ,则可以求出该高斯分量的半波宽 σ . 由于实际波形数据是离散的,所以有时无法直接获取 t_g 的真值. 本算法通过对波峰两侧的数据进行统计分析,来获取 t_g ,再根据式(4)求解 σ 的近似值(对应于图 2 的步骤(b)):

先循环判断波峰右侧的波形数据,如果第 $k-1$ 个波形数据值大于波峰值的一半且第 $k+1$ 个波形数据值小于波峰值的一半,取第 k 个波形数据的位置为 t_g 的近似值,根据式(4)计算出 σ 的近似值. 再循环判断波峰的左侧,如果第 $k-1$ 个波形数据值小于波峰值的一半且第 $k+1$ 个波形数据值大于波峰值的一半,则取第 k 个波形数据的位置为 t_g 的近似值,根据式(4)计算出 σ 的近似值. 如果两侧循环判断结束时,右侧(左侧)没有满足条件的波形数据,则取左侧(右侧)的计算结果为最终的 σ 的近似值;如果两侧都搜索到满足条件的波形数据,则比较左右两侧 σ 近似值的计算结果,取较小的为最终的 σ 的近似值.

$$\sigma = |t_g - b| / \sqrt{2\ln(2)} \quad . \quad (4)$$

求出 σ 的近似值后,记录高斯分量的三个预估特征参数(A, b, σ). 从波形数据中“剥离”刚分解出的高斯分量,如图 2 的步骤(c)所示. 接着对剩余数据重复上述步骤,不断将新的高斯分量迭代“剥离”. 当步骤(a)中的条件不满足时,说明当前波形数据无峰值,则结束处理.

1.3 特征参数优化

特征参数优化的目的是求解预估参数的精确

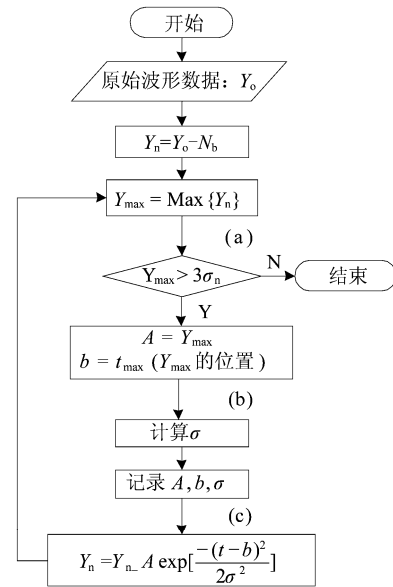


图 2 初始特征参数估计流程图

Fig. 2 Flowchart for estimating initial characteristic parameters

值. 常用参数优化算法主要是 LM (Levenberg-Marquard) 算法, 和 EM (Expectation-Maximization) 算法及其改进算法. 因其稳定的数值效果和快速收敛性, BFGS 算法被认为是求解无约束优化问题中效率最高的方法^[11]. 为了减少存储量、提高计算效率, Nocedal 提出了 L-BFGS 算法. 大量的数值实验结果表明,此算法非常适合求解大规模无约束优化问题. 因此,本文采用 L-BFGS 作为优化方法.

Lin 等假设,任何波形分量波峰位置的间距如果小于一个脉冲长度,则为噪声,并用实验证明了这个假设^[10]. 根据该理论,本文对优化后的波形分量进行了噪声滤除,具体流程如图 3 所示. 对任一高斯分量,判断它的波峰位置与其它所有的高斯分量的波峰位置的间距是否大于 1 个脉冲长度,如果小于则只保留这些“过近”的高斯分量中峰值最大的;对剩下的参数继续优化,再对优化结果滤除噪声,迭代直到噪声滤除前后高斯分量的个数固定不变为止. 图 3 所示的噪声滤除方法也可同时应用于参数预估步骤之后.

2 实验

实验数据是 Leica ALS 60 系统在 2009 年采集的某地的点云及波形数据,波形数据采样间隔为 1ns,采样数为 128,测区含盖建筑物及山林.

2.1 波形分解

算法如图 4~7 所示,图 4 为某一回波的原始波形数据,图 5 为原始数据的噪声估计,图 6 为参数预

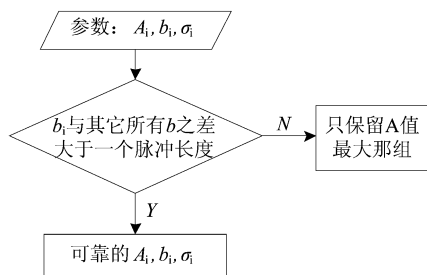


图3 特征参数噪声滤除流程图
Fig. 3 Flowchart for estimating initial characteristic parameters

估的流程,其中,图6(a)为预估的第一个高斯分量,图6(b)为除去第一个高斯分量后的波形数据,图6(c)为在(b)的基础上预估的第二个高斯分量,如此循环下去直到终止,最后,可得图6(d)所示的初始特征参数预估结果.图8是采用优化算法计算后的波形分量.(图4~11的坐标纵轴和横轴分别表示波形数据的振幅值和采样数,图中的黑点表示原始波形数据,粉色线表示对随机噪声的估计,绿线表示对背景噪声的估计,红线表示拟合波形,蓝线表示分解出来的高斯分量)

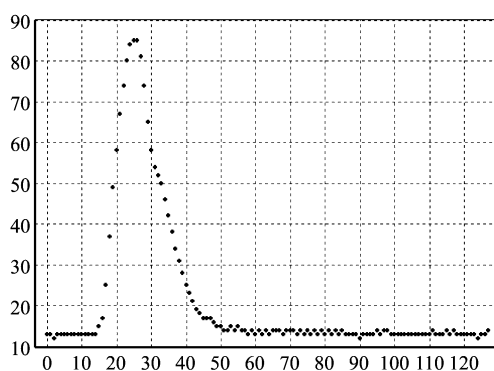


图4 原始波形数据
Fig. 4 Original waveform data

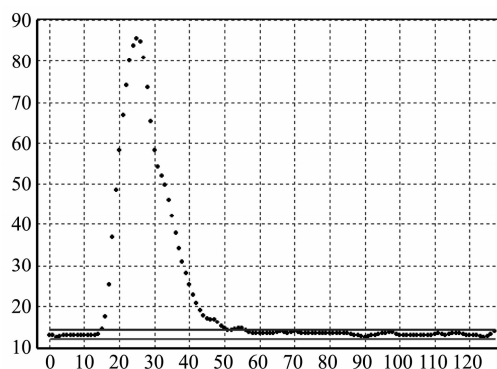


图5 噪声估计
Fig. 5 Estimation of noise

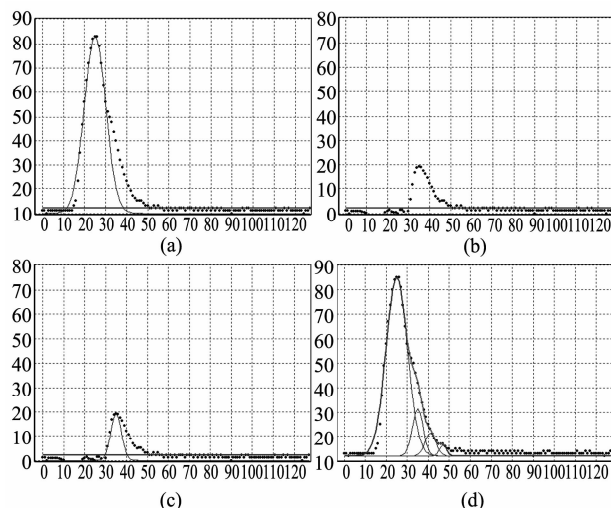


图6 初始特征参数预估 (a)表示预估第一个高斯分量,(b)表示去除第一个高斯分量影响,(c)表示预估第二个高斯分量,(d)表示初始特征参数预估的结果
Fig. 6 Estimation of initial Gaussian component, (a) shows the estimation of first Gaussian component, (b) shows the result of removing first Gaussian component, (c) shows the estimation of second Gaussian component, (d) shows the final result of estimating initial characteristic parameters

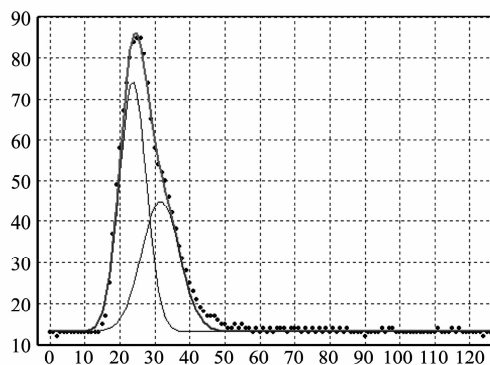


图7 L-BFGS 优化处理后的结果
Fig. 7 The final iteration result

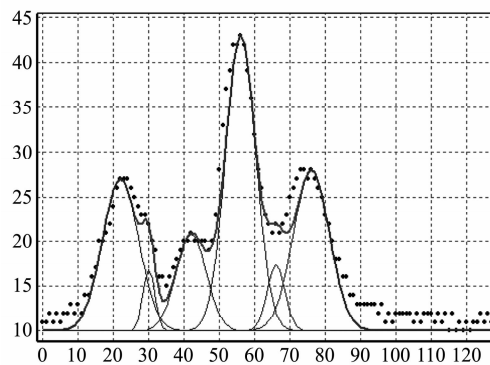


图8 复杂波形初始特征参数
Fig. 8 Initial characteristic parameter of a complicated wave

图 8 ~ 10 是 LM 算法与 L-BFGS 算法对相同初始特征参数优化结果的对比,其对应的高斯分量的参数见表 1 所示.由图 4 和图 10 可见,通过本文方法预估出的初始特征参数是比较理想的.在优化计算中,L-BFGS 优化结果更加稳健,适用于更加复杂的波形.

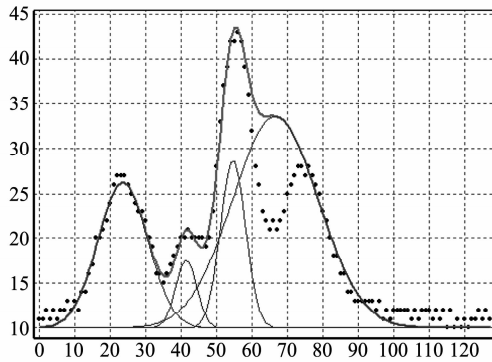


图 9 LM 算法优化的参数
Fig.9 Parameter optimized by LM algorithm

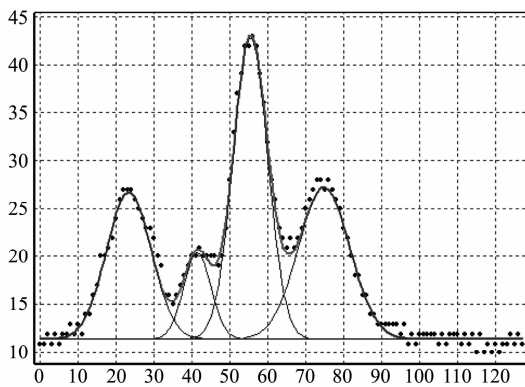


图 10 L-BFGS 算法优化的参数
Fig. 10 Parameter optimized by L-BFGS algorithm

表 1 图 8 ~ 10 中高斯分量参数
Table 1 Gaussian component parameters among Figs.8 ~ 10

优化算法	分解波形个数	波峰(A)	波峰位置(b)	半波宽(σ)
无	6	17.000	22.000	5.096
	6.841	30.000	1.699	
	10.848	42.000	4.247	
	33.000	56.000	4.247	
	7.311	66.000	2.548	
	17.999	76.000	5.096	
LM	4	16.225	23.504	6.980
	7.572	41.377	2.967	
	18.739	54.553	3.539	
	23.569	66.526	12.126	
L-BFGS	4	15.319	23.328	5.823
	8.937	41.365	3.561	
	31.494	55.342	4.527	
	15.810	74.759	6.723	

2.2 精度分析

图 11 是实验区同一椭圆形建筑物点云数据的对比.其中,图 11(b)中点云数据是通过本文方法对波形数据分解后计算获得,图 11(a)中点云数据由硬件制造商提供.图 12 中的(a)和(b)分别对应图 11 中(a)和(b)的黑色矩形区域(建筑物顶部边缘).从图 11 和图 12 可以直观地看出,本文算法得到的信息更为丰富,能反映更多局部的细节信息.

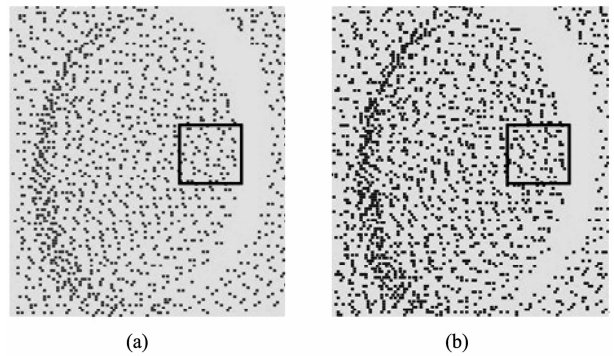


图 11 建筑物点云对比
Fig. 11 Contrast of building point data

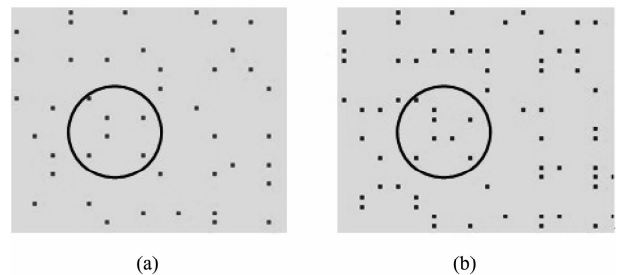


图 12 点云细节对比
Fig. 12 Contrast of point data's details

分别从系统提供的点云和本文分解的点云中,随机抽取相同的 5 个建筑物顶部点云数据(建筑物顶部皆是平面),进行平面拟合,平面拟合的精度如表 2 所示.根据表 2,本文方法分解出的点云要比系统提供的点云的点位精度高.

表 2 建筑物屋顶平面拟合误差对比
Table 2 Plane fitting error contrast of building roof

屋顶编号	点数/个	中误差/cm		最大误差/cm	
		系统	分解	系统	分解
1	1 000	5.343	4.700	27.695	25.406
2	640	5.438	3.152	23.815	19.312
3	387	4.723	4.220	25.550	23.076
4	270	4.408	3.717	22.238	13.946
5	170	4.455	3.794	27.290	20.194

3 结论

提出并实现了一种基于迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法. 主要创新点在于: 通过比较滤波前后波形数据的峰值差, 准确估计了任意波形的噪声; 提出了通过层层剥离的策略, 进行波形分量特征参数初值的预估, 克服了传统方法中查找波形特征点的难点; 引入 L-BFGS 算法, 优化了波形分量特征参数的初始预估值. 文中方法能准确分解出复杂重叠高斯分量及微弱高斯分量, 提高了测距的分辨率和精度. 未来的研究包括如何有效利用波形分量的特征参数对地物分类及生成数字高程模型等.

REFERENCES

- [1] Blair J, Rabined D, Hofton M. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, **54**(2-3): 115 - 122.
- [2] LI Qi, MA Hong-Chao. The study of point-cloud production method based on waveform laser scanner data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*(李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云生产. *测绘学报*), 2008, **37**(3): 349 - 354.
- [3] Reitberger J, Krzystek P, Stilla U. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(5): 1407 - 1431.
- [4] Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(4): 1989 - 1996.
- [5] Jutzi B, Stilla U. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, **61**(2): 95 - 107.
- [6] Roncat A, Wagner W, Melzer T, et al. Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator[J]. *Photogrammetric Journal of Finland*, 2008, **21**(1): 62 - 72.
- [7] Zwally H, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice atmosphere, ocean, and land[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, **34**(3): 405 - 445.
- [8] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, 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, **60**(2): 100 - 112.
- [9] Taubin G. A signal processing approach to fair surface design: Proceedings of the 22nd Annual ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995[C]. New York: ACM, 1995: 351 - 358.
- [10] Lin Y, Mills J, Smith-Voysey S. Rigorous pulse detection from full-waveform airborne laser scanning data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(5): 1303 - 1324.
- [11] Xue Yi. *Numerical analysis and scientific computation* [M]. Beijing: Science Press(薛毅. *数值分析与科学计算*. 北京: 科学出版社), 2001.
- (上接 312 页)
- [3] ZHANG Ting-Cheng, LIU Li-Ping, CHANG Jun, et al. Design of infrared zoom system with 4 reflective mirrors [J]. *J. Infrared Millim. Wave*(张庭成, 刘莉萍, 常军, 等. 四反射镜红外变焦距系统设计. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(3): 196 - 200.
- [4] CHEN Lu-Ji, LI Ping, MA Ling. Compact MWIR zoom system. [J]. *Infrared Technology*(陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑中波红外连续变焦光学系统设计. *红外技术*), 2010, **32**(10): 652 - 666.
- [5] XU Zhao-Dong, LIU Xin, DONG Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. *Infrared and laser engineering*(许照东, 刘欣, 董涛. 机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计. *红外与激光工程*), 2007, **36**(5): 619 - 621.
- [6] ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of applied optics*(张良. 中波红外变焦距系统的光学设计. *应用光学*), 2006, **27**(1): 1038 - 1043.
- [7] Aron Y, Boubis I, Shavit R. Topaz: a novel design of a high magnification athermalized 1:30 zoom in the MWIR [J]. *SPIE*, 2004, 5406: 97 - 106.
- [8] Sanson M C, Cornell J. MWIR continuous zoom with large zoom range [J]. *SPIE*, 2010, 7660: 76601X1 - 12.
- [9] ZHANG Jian-Qi, WANG Xiao-Rui. *Photoelectric imaging system modeling and performance evaluation theory* [M]. Xian: Xidian University Press(张建奇, 王晓蕊. *光电成像系统建模及性能评估理论*, 西安: 西安电子科技大学出版社), 2010: 66 - 68.