



机载激光雷达波形数据横向高斯分解方法

孟志立¹ 徐景中¹

¹ 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对机载激光雷达波形数据分解易受噪声影响,高斯组分个数及叠加波初始参数估计不精确等问题,提出了一种横向高斯波形分解方法。该方法首先对波形进行滤波平滑处理,剔除背景噪声后,将检测到的波峰划分为不同的类型,分别估计其初始参数;然后横向逐步迭代分解估计初始高斯分量,在去除无效的初始高斯分量后,利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt)算法进一步优化参数;最后解算得到分解点云。实验结果表明,该方法能有效地检测各种类型的回波信号,对叠加波形具有良好的适应性,并能在一定程度上保护弱波。相比系统点云,本文方法解算的点云在数量和细节上更具有优势,反映了更加丰富的地物垂直结构信息以及在森林参数获取方面的应用潜力。

关键词:全波形数据;高斯分解;列文伯格-马夸尔特算法;分解点云

中图法分类号:P231

文献标志码:A

机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)作为一种主动遥感技术,可以直接量测激光扫描仪与地形之间的距离,获取地面反射点的三维坐标,已成为对地空间信息获取的一种重要技术手段^[1]。2004年,RIEGL公司首先推出了商用的全波形LiDAR系统,可以以纳秒为单位记录后向散射信号,得到一个连续的高分辨率回波波形,即全波形数据,该波形反映了地物的垂直分布、几何和物理特征^[2]。相比传统离散多回波记录方式,全波形记录能够提供更加丰富的地形细节,提高测距精度和地表分辨率,而且用户可以通过分析后向散射波形得到地物更多的物理特征(振幅、宽度等信息),这在植被提取和地物分类方面有很大的潜力,例如,低矮植被的分离以及冠层高度的精确提取^[3]。波形数据分解处理已经成为LiDAR数据处理研究中的热点问题之一。目前对于波形数据的处理方法包括脉冲阈值检测法、相关性技术分析法和信号分解方法^[4-8]等。由于激光脉冲回波信号的分布形态近似高斯分布,基于高斯函数的波形信号分解方法逐渐成为LiDAR波形分解的主流方法。Hofton等^[9]用两个相邻拐点确定一个高斯分量,提出了基于高斯模型的波形分解方法。Wagner等^[6]论述了将波形建模为一系列高斯脉冲的理论基础。Chauve

等^[10]考虑到波形的细节特征,采用广义高斯函数和对数高斯函数进行波形分解。波形的高斯分解通常包括两个步骤:①确定高斯分量的个数以及其初始参数,②特征参数的优化及后处理。初始参数的估计方法主要包括局部极值、重心法和拐点法等,这些方法通过计算波形数据的一阶导数零点、重力中心、二阶导数零点等^[11-13]信息确定初始参数,高斯分量个数可以通过迭代方式获得。波形参数的优化方法通常有两种:①基于概率模型的期望最大化(expectation maximization, EM)及其改进算法^[14-15];②基于非线性最小二乘的相关算法^[16-17],如列文伯格-马夸尔特(Levenberg Marquardt, LM)优化算法。由于高斯分量的初始值估计容易受噪声影响,参数优化结果依赖比较精确的初始值,且并不能优化高斯分量的个数^[12],因此,针对叠加波等复杂波形,如何更好地估计高斯分量个数及其初始参数仍是目前基于高斯函数分解法需要解决的关键问题。

本文提出一种横向高斯分解方法,该方法在波形数据去噪的基础上,检测波峰类型并估计其初始参数,采用横向迭代分解估计初始高斯分量,利用非线性最小二乘算法优化参数,并解算得到分解点云,利用Leica ALS60记录的波形数据进行波形分解实验和分析,比较了分解点云和系统

点云在三维信息表达上的能力。

1 波形分解及步骤

激光雷达回波波形可以看作激光脉冲和目标表面散射函数的卷积结果,两者都可以用高斯函数来描述,假设接收到的回波信号满足混合高斯分布,则可以用混合高斯模型来描述:

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

式中, A_i 是第 i 个高斯分量的振幅; μ_i 是第 i 个高斯分量的波峰位置; σ_i 为第 i 个高斯分量的标准差; n 为高斯函数个数; b 为背景噪声。

波形分解流程如图 1 所示,由于波形数据以扩展变长记录形式存储在 LAS 文件末尾,为了便于利用分解参数解算点云,在对波形数据处理前,需要建立波形数据与点云之间的索引。

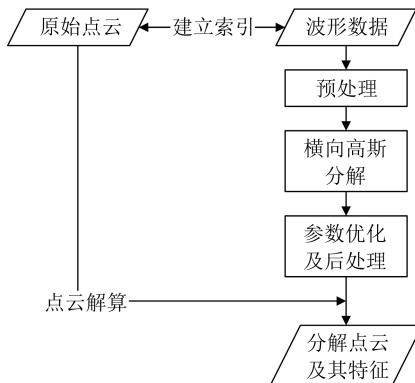


图 1 波形分解技术流程图

Fig.1 Waveform Decomposition Technical Procedure

1.1 波形预处理

波形预处理可以消除原始波形信息中的背景噪声和随机噪声。本文采用塞威兹克-戈利(Savitzky-Golay, S-G)算法去除随机噪声。S-G 滤波是一种在时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法,该滤波器最大的特点在于在滤除噪声的同时可以确保信号的形状、宽度不变^[18]。图 2 显示了使用 S-G 滤波和高斯滤波对实测波形数据的滤波效果对比。通过对比发现,S-G 滤波在对波形平滑的同时很好地保留了信号的形状、宽度信息,而高斯滤波后波形在波峰处与原始波形相比会出现明显的变形。

1.2 横向高斯分解

估计高斯分量的个数及其参数是波形高斯分解的关键步骤,优化过程需要尽可能精确地估计初始参数。对于多次明显叠加波,波峰位置由于叠加的原因会偏离原始位置,因此可利用左右拐点

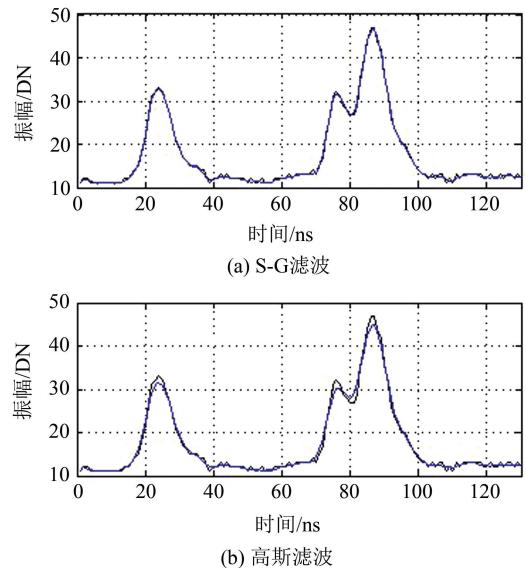


图 2 S-G 滤波与高斯滤波效果对比

Fig.2 Return Waveform Before and After Smoothing Using Gaussian Filter and S-G Filter

点位置确定波峰位置和宽度;对于弱叠加波,左右拐点位置难以判断,选择半波宽公式求高斯分量宽度。对预处理后的波形,由局部最大值确定明显波峰位置。对于检测到的明显波峰,若相邻波峰间距小于 $4\sigma_0$ (σ_0 为系统发射脉冲宽度),则标记为明显叠加波;对于明显叠加波,在波峰左右一定范围内寻找左右拐点,拐点通过离散数据的二阶五点数值微分求得,并通过式(2)确定该高斯分量的初始参数。

$$\begin{aligned} \delta &= |p_r - p_l| / 2 \\ \mu &= |p_r + p_l| / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, p_l, p_r 分别为波峰 μ_i 左右拐点位置; σ 为该高斯分量的宽度; μ 为波峰位置。对于弱叠加波和独立波,在波峰左右寻找为波峰值一半处的波形数据的位置 h_l, h_r ,如果第 $i-1$ 个波形数据值大于波峰值的一半且第 $i+1$ 个波形数据值小于波峰值的一半,则第 i 个波形数据值的位置就作为 h_l, h_r 的值。波峰位置为峰值 X_i 在波形中的位置,宽度由半波宽公式求得。算法通过迭代方式进行波形分解,每次从当前波形中减去波形宽度最大的波形以减少波形叠加对初始参数估计的影响。

1.3 参数优化及后处理

由于噪声影响,实际的波形分布形态并不完全符合高斯函数的形状,完成初始参数的估计后还需要去掉无意义的高斯分量。实验表明,如果两个高斯分量波峰间距小于一个脉冲宽度时,叠加之后只会有一个主要波峰存在,且脉冲形状与

标准的高斯分布相似。因此,对于相邻波形分量波峰位置间距如果小于一个脉冲长度,则把波峰值较小的高斯分量视为无效分量,其判别条件为:

$$\forall G_i \begin{cases} D_{G_{i,j}} < \delta_0 \& A_i < A_t \\ A_i < A_t \& \delta_i > 1.5\delta_0 \mid \delta_i < 0.5\delta_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, G_i 为初始估计的任一高斯分量; $D_{G_{i,j}}$ 代表任意两个高斯脉冲之间的波峰距离; A_i 为高斯分量的振幅; A_t 为设定的弱波检测阈值; δ_i 为当前高斯分量的宽度; δ_0 为发射脉冲的宽度。对剩余的回波按弱波检测阈值分为明显波和弱波,对明显波进行拟合,如果拟合后的均方根误差大于预定的精度,则添加一个弱波到拟合过程中,直到满足预定的精度为止。LM 算法同时具有梯度法和牛顿法的优点^[19],本文采用 LM 优化算法对确定初值的高斯分量进行波形拟合,得到的波形分量可用于后续的点云坐标解算以及植被提取等方面的应用。

1.4 点云提取

系统点云是 LiDAR 系统产生的有限次回波点,点位获取方法对用户是不透明的,无法评价点位所在位置的可靠性,点云密度也有待提高。因此,对全波形回波信号进行分析,并解算出更具物理意义的点位信息对于提高点位的可靠性以及辅助后续点云应用具有重要意义。本文基于波形分解得到的高斯分量的波峰位置作为分解点云的响应位置,由波形数据对应的系统点云及相应的转换参数可以得到分解点云,如式(4):

$$\begin{cases} X = X_0 + X(t) \cdot t \\ Y = Y_0 + Y(t) \cdot t \\ Z = Z_0 + Z(t) \cdot t \end{cases} \quad (4)$$

式中, X, Y, Z 为根据波形参数推算点的空间位置; X_0, Y_0, Z_0 为起始点的位置; $X(t), Y(t), Z(t)$ 为激光信号的速度矢量在各坐标方向上的分量; t 为相对起始点的时间,单位为皮克秒。

2 波形分解实验及分析

2.1 波形分解实验数据

本文的实验数据来自 Leica ALS 60 系统在 2012 年采集的某地数据,点云和波形信息以 LAS1.3 标准格式存储在 LAS 文件中,波形数据采样间隔为 1 ns,采样数为 256,发射脉冲宽度为 5 ns。测区内地物丰富,主要包含建筑物、树木和道路等。

2.2 波形分解及优化

图 3 显示了原始波形信号进行横向高斯分解

及优化的过程,这里背景噪声为回波信号最后 5% 的数据的平均值。图 4 显示了算法处理各种复杂回波的效果,处理的波形包含了弱叠加波,明显叠加波和左右叠加波等类型的回波,图 4(a)、4(b)给出了初始估计的高斯分量,可以看出,对于复杂回波,初始估计的高斯分量中包含有无效的高斯分量。图 4(c)、4(d)显示了优化后的结果,优化过程很好地确定了最佳的高斯分量个数以及参数。相比系统方法和一阶导数零点法,本文方法能够有效地检测出叠加波和弱波等复杂波形,可以分解得到更多的高斯分量以及对应的波形特征信息。

2.3 点云生成及分析

为了对比分解点云与系统点云的差异,本文将波形分解的点云响应位置与系统记录点云在波形中的位置相近的点作为同一地物点,图 5 为分解点与系统点在波形上的响应位置对比,可以看出,分解点响应位置更加稳定和可靠。结合分解点响应位置以及公式(4),可以解算得到分解点坐标,表 1 显示了分解点云与系统点云在点位坐标上的差异,由于与分解点与系统点在波形中的响应位置不同,点云坐标在 X、Y、Z 轴向均存在一定程度的偏差,X、Y 偏差程度为厘米级。Z 值偏差较大,其原因主要在于,激光脉冲在传播时 Z 方向被赋予较大的速度矢量。

表 2 给出了分解点云与系统记录点云在回波次数分布情况上的统计对比分析。由表看出,系统最多只能检测 4 次回波,本文的分解方法可以检测出多达 8 次回波,分解点数量比系统点增加了 61.8%,多次回波分解得到的点云个数明显增加。图 6 显示了分解点云与系统点云的差异,图 6(a)为系统点云与分解点云局部细节对比图,可以看出低矮植被可以从地表分离出来,分解点云显示了更丰富的地形细节,图 6(b)为分解点与系统点的差值图,显示出分解的额外点主要集中在植被(包括树木、草地、绿化带)地区,分解的多次回波点明显多于系统点,这主要是由于激光具有很强的植被穿透能力,同时说明了分解点云在林业领域的应用前景。

3 结语

针对传统 LiDAR 波形数据分解方法易受噪声影响,高斯组分个数及叠加波和弱波参数估计不精确等问题,本文提出并实现了一种横向高斯

表 1 分解点云与系统点云坐标精度对比

Tab.1 Coordinate Error Between Decomposition Point and System Record Point

点号	系统点坐标/m	分解点坐标/m	坐标差/m	距离差/m
1	X=483 233.673	X=483 233.642	0.031	
	Y=240 462.434	Y=240 462.451	-0.017	0.225
	Z=86.026	Z=85.772	0.254	
2	X=483 234.766	X=483 234.744	0.022	
	Y=240 461.359	Y=240 461.371	-0.012	0.179
	Z=85.902	Z=85.723	0.179	
3	X=483 245.717	X=483 245.697	0.020	
	Y=240 450.802	Y=240 450.811	-0.009	0.169
	Z=88.426	Z=88.257	0.169	
4	X=483 248.772	X=483 248.734	0.038	
	Y=240 447.607	Y=240 447.626	-0.019	0.334
	Z=84.380	Z=84.042	0.338	

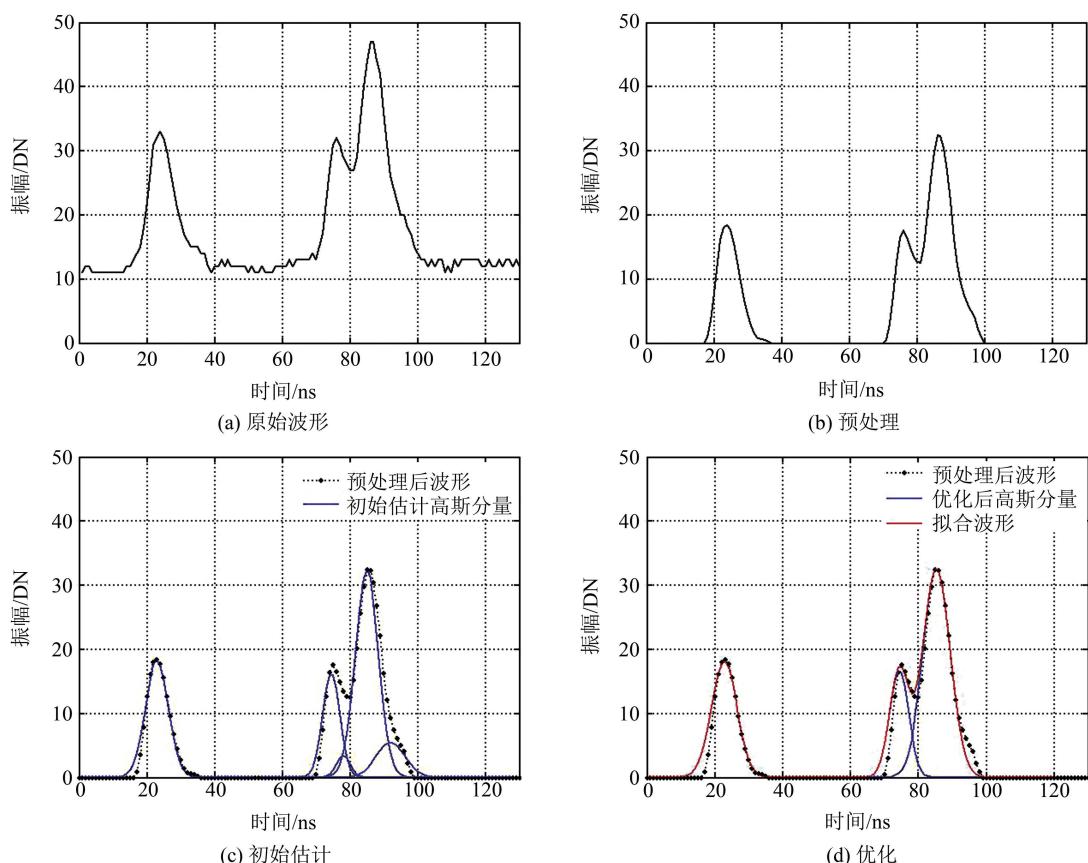


图 3 波形的横向高斯分解及优化过程

Fig.3 Lateral Gaussian Decomposition Procedure of Waveform and Optimization

表 2 分解点云与系统点云按回波次数统计

Tab.2 Comparison of Points Derived from Decomposition and the Hardware System

回波次数	分解点数	系统点数	差异
1	152 299	356 507	-204 208
2	381 256	34 170	347 086
3	74 472	1 275	73 197
4	20 924	20	20 904
5	4 485	0	4 485
6	606	0	606
7	77	0	77
8	8	0	8
总和	634 127	391 927	242 200

分解方法,可用于小光斑 LiDAR 波形数据精细分解。实验表明,该方法能够处理各种类型的回波信号,具有良好的鲁棒性和适应性,分解的点云不仅在数量上具有优势,在点位可靠性方面也有所提高。本文主要采用 S-G 滤波算法既对波形进行了平滑,保持了波形的形状、宽度不变;对于不同类型的回波分别采用合适的方法进行参数估计;通过剔除无效高斯分量,确定了最佳高斯分量个数;从点云数量、信号位置以及坐标精度等多方

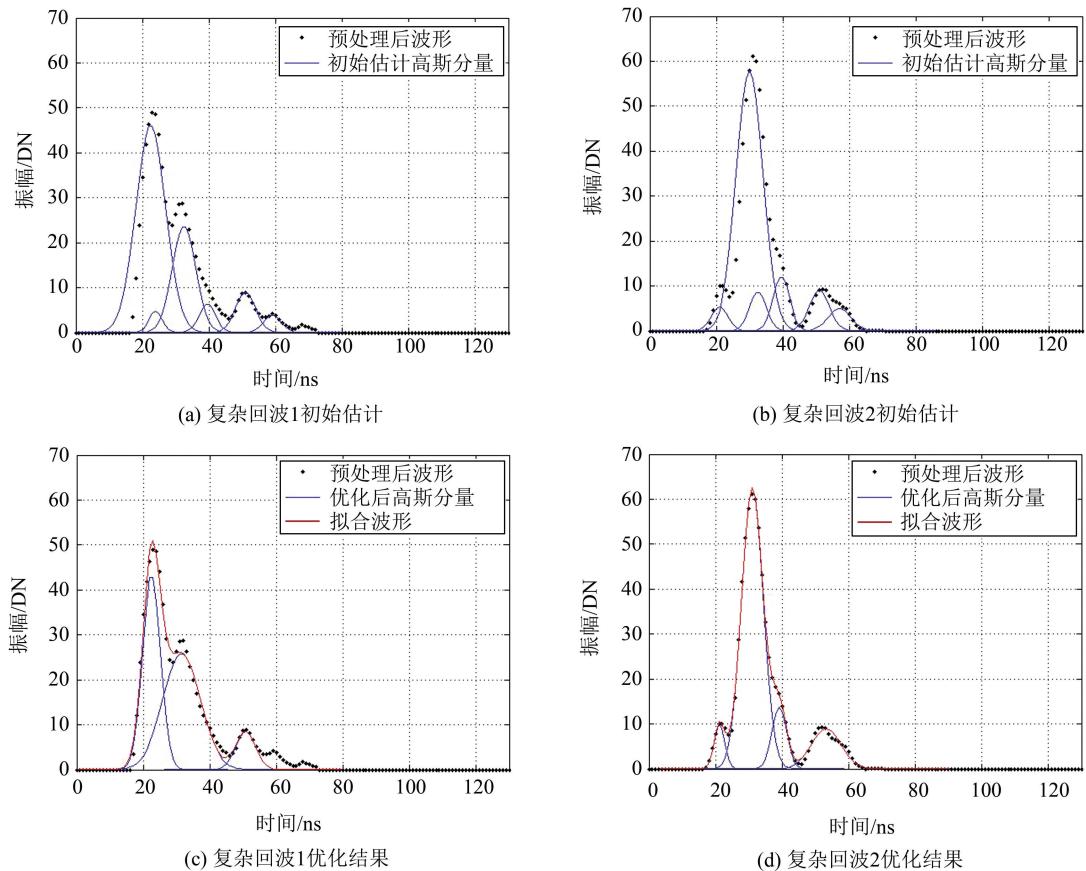


图4 复杂回波的高斯分解

Fig.4 Gaussian Decomposition of Complicated Waveform

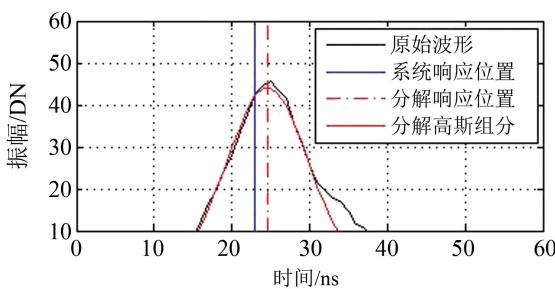


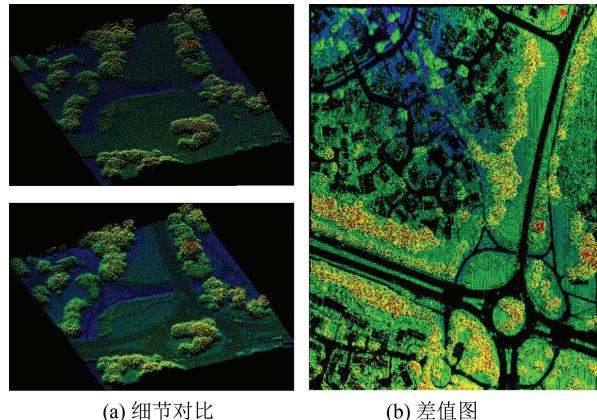
图5 分解点与系统点响应位置对比

Fig.5 Comparison of Response Location Between Decomposition Point and System Point

面定量比较了波形分解点云与系统点云的差异。由于缺少地面实测数据,本文只对比分析了分解点云与系统点云的相对位置精度。进一步的研究包括点位绝对精度验证以及波形特征参数在地物分割、分类方面的应用。

参 考 文 献

- [1] Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54 (2-3): 199-214



(a) 细节对比

(b) 差值图

图6 分解点云与系统点云对比

Fig.6 Comparison of Decomposition Point and System Point

- [2] Mallet C, Bretar F. Full-waveform Topographic Lidar: State-of-the-art [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16
- [3] Hug C, Ullrich A, Grimm A. Litemapper 5600 a Waveform-digitizing Lidar Terrain and Vegetation Mapping System [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2004, 36(8/W2): 24-29
- [4] Wagner W, Ullrich A, Melzer T, et al. from Sin-

- gle-pulse to Full-waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2004, 35(B3):201-206
- [5] 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]. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 2008, 21(1): 62-75
- [6] 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 & Remote Sensing*, 2006, 60 (2): 100-112
- [7] Jutzi B, Stilla U. Range Determination with Waveform Recording Laser Systems Using a Wiener Filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 61 (2): 95-107
- [8] Malgorzata S. Decomposition Techniques for Full-waveform Airborne Laser Scanning Data [J]. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2014, 8 (1):61-74
- [9] Hofton M, Minster J, Blair J. Decomposition of Laser Altimeter Waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38 (4): 1 989-1 996
- [10] Chauve A, Mallet C, Bretar F, et al. Processing full-waveform Lidar Data: Modelling Raw Signals [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, 36 (Part 3/W52):102-107
- [11] Zhu J F, Zhang Z X, Hu X Y, et al. Analysis and Application of Lidar Waveform Data Using a Progressive Waveform Decomposition Method[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 38(part 5 31/W12):31-36
- [12] Yu C L, Mills J P, Voysey S. Rigorous Pulse Detection from Full-waveform Airborne Laser Scan-
- ning Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(5):1 303-1 324
- [13] Liu Zhao, Zhang Aiwu, Duan Yihao, et al. Research on Decomposition of Full-waveform Airborne Laser Data[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2014, 24(2):144-151(刘诏,张爱武,段已好,等.全波形机载激光数据分解研究[J].高技术通讯,2014,24(2):144-151)
- [14] Persson Å, Söderman U, Töpel J, et al. Visualization and Analysis of Full-waveform Airborne Laser Scanner Data[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, 36 (Part 3/W19):103-108
- [15] Ma H C, Li Q. Modified EM Algorithm and its Application to the Decomposition of Laser Scanning Waveform Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13 (1):35-41
- [16] Lai Xudong, Qin Nannan, Han Xiaoshuang, et al. Iterative Decomposition Method for Small Footprint 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)
- [17] Lu Hao, Pang Yong, Xu Guangcai, et al. Quantitative Analysis of Differences Between Full Waveform System Point Cloud Data from Airborne LiDAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5):588-593(卢昊,庞勇,徐光彩,等.机载激光雷达全波形数据与系统点云差异的定量分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(5):588-593)
- [18] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36 (8): 1 627-1 633
- [19] Manolis I, Lourakis A. A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by Levmar[OL]. <http://users.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/levmar.pdf>, 2005

A Lateral Gaussian Decomposition Method for LiDAR Waveform Data

MENG Zhili¹ XU Jingzhong¹

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

Abstract: The decomposition of waveform data is a key step in waveform analysis. Traditional wave- (下转第 100 页)

ea in the 30°S to 30°N range. ABLT temperature and ABLT height are positively correlated over 40°S-90°S and 40°N-90°N ranges, and is negatively correlated over the 30°S~30°N range. The ABLT height in 2008 and 2011 were found to diverge from the monthly means for six years. The mean diurnal variation amplitude of global mean ABL depth in 2012 is 0.37 km. The diurnal variation of ABL depth over land and sea areas of the same latitude is correlated to each other to some extent.

Key words: ABL top; COSMIC refractivity; wavelet covariance transform; thermodynamic; atmospheric dynamics

First author: XU Xiaohua, PhD, professor, specializes in GNSS meteorology. E-mail: xhxu@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: LUO jia, PhD, associate professor. E-mail: jluo@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374036; the Open Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, No. SKLGED2013-4-7-E; the National Key Basic Research Program of China, No.2013CB733302.

(上接第 86 页)

form decomposition methods cannot detect overlapped sub-waveforms and weak sub-waveforms, and cannot appropriately estimate the number of Gaussian components. In this article, we propose a lateral Gaussian decomposition method. A waveform is smoothed after removing the background noise. We divide the detected waves into different types of waveforms, and estimate their initial parameters with different methods, then progressively laterally decompose waveform until all the Gaussian components are decided. After removing invalid components, we use the Levenberg-Marquardt method to further optimize the parameters. Experiments show that this new method can effectively detect different kinds of complicated waveforms; demonstrating both robustness and efficiency.

Key words: full-waveform; Gaussian decomposition; LM method; generate point cloud

First author: MENG Zhili, master, specializes in the airborne LiDAR waveform data process and application.

Corresponding author: XU Jingzhong, PhD, associate professor. E-mail: jz_xu@whu.edu.cn