

一种用于机载激光雷达波形分解的小波变换与广义高斯模型组合法

段乙好^{1,2} 张爱武^{1,2} 刘 诏³ 李 陶^{1,2} 肖 涛^{1,2} 叶秋虹¹

¹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

²首都师范大学空间信息技术教育部工程研究中心, 北京 100048

³中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

摘要 针对小光斑全波形机载激光雷达波形数据中叠加波难以解析和实测波形数据通常表现出展宽或尖峰形态的问题,提出一种基于小波变换与广义高斯模型的组合法(WT-GGM)来分解机载激光雷达波形数据。小波变换方法具有多分辨率分析的特性,在非平稳信号、微弱信号、瞬态信号及奇异信号的检测中显示出独特的优越性。广义高斯模型作为波形分量建模模型,通过调整其形状参数能有效地处理展宽或尖峰形态的波形分量。为了验证算法的有效性,分别对实验数据使用WT-GGM算法、商业软件常用的COG算法、GIPM算法和RGD算法进行分析,对比结果表明小波变换可以有效地从叠加波中检测出目标,WT-GGM算法分解出的目标数与GIPM算法和RGD算法结果基本相同,是COG算法的2倍。

关键词 遥感; 机载激光雷达; 波形分解; 小波变换; 广义高斯模型; 波形数据; 叠加波

中图分类号 P208 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.122802

A Combination Method of Wavelet Transform and Generalized Gaussian Model for Airborne Laser Scanning Waveform Decomposition

Duan Yihao^{1,2} Zhang Aiwu^{1,2} Liu Zhao³ Li Tao^{1,2} Xiao Tao^{1,2} Ye QiuHong¹

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

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

³Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract In view of the problem that overlapping pulses in small footprint full waveform airborne laser scanning waveform data are difficult to parse and the actual measurement wave data usually shows the broadening or peak form. A combination method of wavelet transform and generalized Gaussian model (WT-GGM) is proposed to resolve the wave data of airborne LiDAR. The wavelet transform method with the characteristics of multi-resolution analysis shows the unique advantages in detecting the non-stationary, weak, transient and singular signals. The compare generalized Gaussian model as the waveform component modeling model can effectively dispose the broadening or peak form by adjusting its shape parameter. In order to verify the validity of the proposed algorithm, a contrast experiment of waveform analysis is carried out by using the WT-GGM method, the COG method, the GIPM method and the RGD algorithm. The results show that the wavelet transform can effectively decompose the targets within the overlapping waveform. And the number of targets detected by the WT-GGM method is roughly the same with the GIPM and RGD method, two times of the COG method.

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-07-21; 网络出版日期: 2015-11-25

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(B类)(KZ201310028035)、教育部博士点基金(20131108110005)、长城学者培养计划(CIT&TCD20150323)

作者简介: 段乙好(1985—),男,博士研究生,主要从事机载激光雷达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)

Key words remote sensing; airborne LiDAR; waveform analysis; wavelet transform; generalized Gaussian model; waveform data; overlapping echoes

OCIS codes 280.3400; 280.3640; 100.6890

1 引言

机载激光雷达(ALS)是近年来发展起来的新型对地观测主动式遥感技术,其获取的高精度三维点云可用于快速生产高精度 DSM、DTM 和 DEM 等产品,因此在地形测绘、城市三维建模、森林资源调查、灾害评估、海岸带监测、变化检测等领域得到了广泛应用。新一代小光斑全波形 ALS(FWF-ALS)能以很小的采样间隔(如 1 GHz),对发射激光脉冲及其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。通过对波形数据进行分析,用户不仅能得到传统多回波 ALS 提供的目标三维点云和强度信息,还能获取与目标相关的额外的、更详细的特征信息(如波宽、后向散射截面等)。这些信息可用于揭示目标的几何和物理属性,有利于后续的滤波、分割和分类等研究^[1-3]。

通常所说的 ALS 数据处理与应用(如 DEM 的生成,滤波,分割,建模与分类等),是基于点云的操作。而 FWF-ALS 获取的原始数据是波形数据,需要通过波形分析技术将波形数据中包含的目标提取出来,然后通过坐标变换得到指定坐标系下的目标三维坐标(即三维点云,简称点云)。波形分析是 FWF-ALS 波形数据应用的关键,波形分析得到的目标个数的多少和精度,决定了 ALS 点云数据的多少和精度,进而影响 ALS 点云数据处理与应用。如何快速、准确地从波形数据中提取目标是 FWF-ALS 波形分析的难点。通常用户使用的点云数据是直接由设备生成或由设备制造商提供的软件生成,用户很难知道点云数据的精度等情况。而全波形数据给用户提供了采用自定义方法的可能。使用自定义方法用户可以更好地掌控生成的目标/点云数目、精度及垂直结构等信息。对此,国内外学者提出了很多波形数据分析方法,如峰值检测法^[4]、波形分解法^[5]、反卷积法^[6]、相关法^[7]等。峰值检测法生成的点云精度较低,但计算速度最快;波形分解法受初始参数的影响较大,计算速度慢,但能获取额外的波形特征;反卷积法和相关法受初始参数的影响小,生成的点云精度高,但会丢失一些重要的信息。Slota^[8]指出当需要提取波形特征以用于分类时,推荐使用波形分解法。波形分解法主要包括两个步骤:1) 估计波形数据中目标/组分个数及其参数;2) 利用参数对每个组分建模及参数优化拟合。波形分解法的难点在于如何准确分解出波形数据所包含的目标个数。Lin 等^[9]指出目标个数的错误估计对后续应用的影响不可恢复。而在波形数据中,叠加波和弱波是影响目标个数估计的主要因素,叠加波是合成信号,难以分解,而弱波的信噪比低,难以从噪声中区别^[10]。因此,如何更好地估计目标个数是波形分解法的核心问题。

小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的能力和高分辨率分析的特性,使其在信号处理和分析化学等领域得到了广泛地应用,尤其是在非平稳信号、微弱信号、瞬态信号及奇异信号的检测中显示出独特的优越性^[11]。Shao 等^[12]和 Jiao 等^[13]的研究中证实小波变换可有效地从叠加波中检测出目标个数。鉴于此,针对小光斑全波形机载激光雷达波形数据中叠加波难以解析和实测波形数据通常表现出展宽或尖峰形态的问题,本文提出一种基于小波变换与广义高斯模型的组合法(WT-GGM)来分解机载激光雷达波形数据。小波变换方法能在多个尺度上将回波信号分解为细节和逼近信号,进而可以在某个尺度的细节信号中找出分离的小波。这些分离的小波被认为是叠加波中不同的分量,也就是不同的目标,因此小波变换可以从叠加波中检测出目标个数。广义高斯模型通过调整其形状参数能有效地处理展宽或尖峰波形。

2 波形数据

全波形机载激光雷达系统在采样频率、扫描方式和光斑大小等方面差别较大,但其工作原理基本相同,即对发射激光脉冲及其后向散射能量进行采样记录,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。波形表示激光脉冲后向散射能量随时间变换的函数。图 1 为机载激光雷达的工作原理^[14]。通过对信号能量、离散回波记录方式和全波形回波记录方式的比较,可以知道全波形回波记录方式获取的波形数据更能反映地物的垂直结构分布,而离散回波则会损失很多有用的信息。图 2 为多条波形数据在激光脉冲传播方向上的显示,从中可以更直观的看出波形是时间-振幅的函数^[15]。图 3 为 RIEGL WaveView 软件中显示的实测波形数据,横坐标可以显示为时间、距离、测距索引,测距索引可以当作时间来用;纵坐标表

示振幅值,即像元亮度值(DN);坐标系统黑色圆点表示采样值,且采样值之间使用绿色实线连接,看起来就像一个波形。右边面板显示了更多有关原始数据的信息。

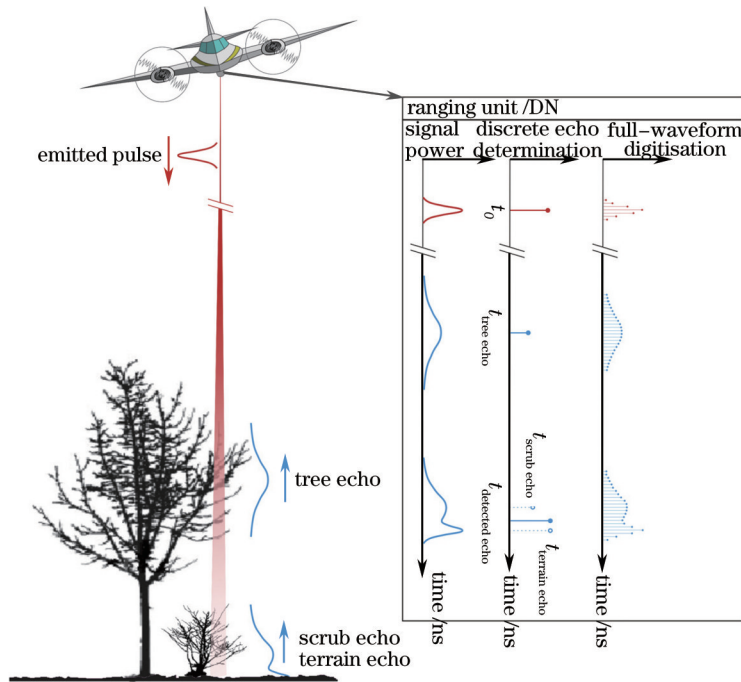


图1 传统多回波与全波形激光雷达的区别

Fig.1 Differences between conventional multi-echo and full-waveform ALS

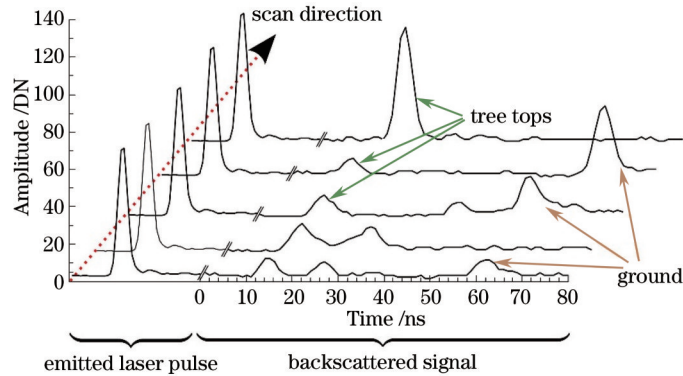


图2 波形数据及其地物在激光脉冲传播方向的展示

Fig.2 Display of waveforms data and its ground object plotted in the laser pulse direction of propagation

尽管激光脉冲的发散角很小,但是在传播过程中不可避免会发散,形成一个衍射锥。由于地表及其上建筑物和植被等地物类型复杂,当激光脉冲打到地表或建筑物屋顶等时,只会产生一个回波,形成一个单峰

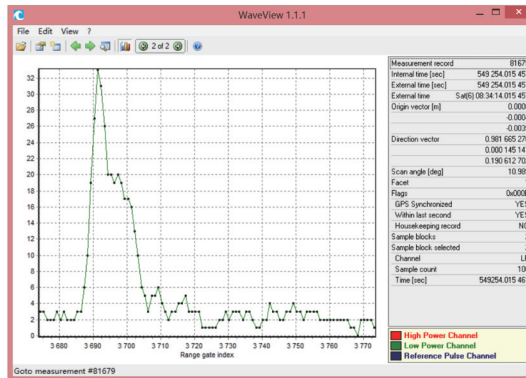


图3 RIEGL WaveView软件中显示的实测波形数据

Fig.3 Measured waveform data display in the RIEGL WaveView software

波形;当激光脉冲打到建筑物边缘或高大植被时,部分激光会继续向下传播,特别是在林区激光甚至可能穿透植被间隙到达地面,从而产生多次回波,形成一个多峰波形(叠加波)。由图3可知,3685~3707之间的采样值形成一个叠加波,通过对叠加波的分析可以知道其中包含的目标数,进而可以更详细的描述地物的垂直结构分布等信息;同时3707后也存在很多小的波峰,由于这些采样值都较小,可以认为是噪声,也可以认为其中包含弱波,这会影响到波形中地物的个数,甚至会产生完全不同的结果。图1近地面部分离散回波和全波形分析出的地物数不同、地面位置也大不相同,图2是否将振幅较小的波峰认为是弱波,得到的地物数不同、地面位置也相差很大。

3 研究方法

本文算法应用于小光斑FWF-ALS波形分解的具体步骤如图4所示。

1) 原始波形数据的预处理,包括背景噪声和随机噪声的消除。通常将原始波形数据中的最后10个采样值视为背景噪声,经过对5000条原始波形数据的统计,得到噪声标准差 $\sigma_n=0.93$ 。然后取三倍的噪声标准差为背景噪声(即 $b=3\sigma_n$ 。因为振幅值是整数,故取 $b=3$)。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 1×3)。

2) 波形数据中组分个数及其参数估计。利用多尺度小波变换对预处理后的波形数据进行组分检测,特别是叠加波中组分的解析,获取波形的初始组分个数及每个组分的初始参数。通过比较小波基的正交性、对称性、紧支性、消失矩等参数特性,同时结合实际采集的波形数据,经多次实验,最终选用sym6小波对叠加波进行5尺度的分解,并从第2层高频细节系数中获取初始组分数^[10,16]。利用第2层高频细节系数重建信号,该重建信号中分离的小波被认为是叠加波中不同的分量,也就是不同的目标。

3) 组分建模。针对实测波形数据表现出展宽或尖峰的形态,选用广义高斯模型作为每个组分的建模模型。

4) 参数优化拟合。在非线性最小二乘准则下使用信赖域反射优化算法来优化各个组分的参数。得到优化参数后,将其带入建模模型以拟合预处理后的波形数据。

5) 通过判断残差最大值和拟合精度是否满足要求,来确定是否需要添加新组分。如果需要添加新组分,则重复步骤3)和4),直到满足要求。否则,结束波形分解过程。

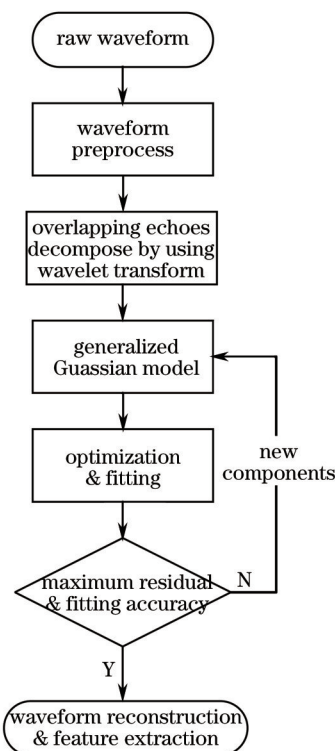


图4 WT-GGM波形数据处理流程

Fig.4 Process flow of WT-GGM waveform data

经过上述步骤后,得到重建后的波形,且从最终优化拟合得到的参数中可以获取波形数据的组分数、振幅、波宽、后向散射截面等特征。

3.1 小波变换

小波变换(WT)是从傅里叶变换(FT)发展起来的一种信号处理方法。顾名思义,小波就是小的波形。所谓小是指它具有衰减性;波则是指它的波动性,其振幅为正负相间的振荡形式。与FT相比,WT是时间(空间)和频率的局部化分析,它通过伸缩和平移运算对信号或函数逐步进行多尺度细化,最终达到高频处时间细分,低频处频率细分,能自动适应时频信号分析的要求,从而可以聚焦到信号的任意细节,解决了FT在转换时丢掉时间信息的问题,成为继FT以来在科学方法上的重大突破^[17]。

对于任意的函数或信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其中 $L^2(\mathbb{R})$ 表示定义在 \mathbb{R} 上、可测的平方可积函数构成的函数空间,也常称为能量有限的信号空间,其连续小波变换公式为

$$Wf(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (1)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (a,b \in \mathbb{R}, a > 0), \quad (2)$$

式中 $Wf(a,b)$ 为 $f(t)$ 经连续小波变换后的小波系数, $\langle f, \psi_{a,b} \rangle$ 是连续小波变换的内积形式, a 为尺度参数(反映小波函数的伸缩性能), b 为平移参数(反映小波函数沿时间轴的平移性能), $\psi_{a,b}^*(t)$ 为小波基函数, $\psi_{a,b}(t)$ 的复共轭函数。小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 是由满足式容许性条件的基本/母小波函数 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后得到,

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (3)$$

式中 C_{ψ} 有界, $\hat{\psi}(\omega)$ 表示母小波函数 $\psi(t)$ 在频率 ω 处的傅里叶变换。

在实际问题的数值计算中,连续小波变换常采用离散形式,即通过离散化连续小波变换中的伸缩参数 a 和平移参数 b 得到离散小波变换。

多分辨率分析(MRA)是小波变换的重要特征,将原信号分解为低分辨率的逼近信号和高分辨率的细节信号。多分辨率分析实质是将信号描述为不同尺度下一系列小波函数的极限,表明各频段上分量与小波母函数系的相似程度^[18]。

因此,将小波变换用于波形数据分析可以认为是度量波形数据与小波的相似度。如果选取的小波与回波在形状上相似,那么小波波峰所在的位置就意味着波形中回波的位置。图5是不同尺度的小波应用于波形数据的结果:小尺度小波变换能够得到3个波峰,且正确地分解出了叠加波形;而大尺度小波变换不能正确地分解叠加波形,这是因为展宽的小波不能分解小于其尺寸的回波^[10]。

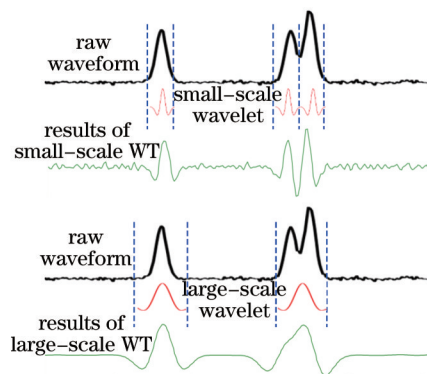


图5 不同尺度的小波变换应用于波形数据的结果

Fig.5 Results of WT applied to waveform data with different scales

3.2 广义高斯分解法

3.2.1 波形分解法

根据电磁传播理论,雷达方程同样适用于LiDAR,可以表示为^[4-5,8]

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_i^2} \cdot \sigma \cdot \mu_{\text{sys}} \cdot \mu_{\text{atm}}, \quad \sigma = \frac{4\pi}{\Omega_s} \rho A_s, \quad (4)$$

式中 P_r 为进入接收器的功率, P_t 为激光器的发射功率, D_r 为接收器的光学孔径直径, R 为激光器到目标的距离, β_i 为激光发散角, σ 为后向散射截面, Ω_s 为散射立体角, ρ 为散射体反射率, A_s 为散射体的有效接收面积, μ_{sys} 为系统衰减系数, μ_{atm} 为大气衰减系数。

由于波形数据是发射激光脉冲在传播路径上与不同距离目标相互作用后散射返回接收器的信号的总和,因此波形分解法的原理是建立在这个假设的基础之上:波形数据是多个目标回波的线性叠加,且每个目标回波都满足同一模型。通常,可以将波形分解法用数学模型(不考虑噪声的影响)来表达:

$$y_i = f(x_i) = \sum_{j=1}^n f_j(x_i), \quad (5)$$

式中 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, N$ 是波形数据(i 是采样数, x_i 是每个采样的时间, y_i 是 x_i 对应的采样值), $f(x_i)$ 是波形分解法得到的建模函数, n 是波形数据中的目标个数, $f_j(x_i)$ 是第 j 个目标的建模模型。

3.2.2 广义高斯模型

由于发射激光脉冲通常表现出类高斯型,所以许多研究都使用高斯模型作为波形分解法的建模模型,并且也取得了很好的结果。Wagner等^[9]的研究结果表明,超过98%的由RIEGL系统获取的波形数据可以用高斯模型来拟合。高斯模型或高斯分解法已经成为实际应用中的标准波形分解法。实际上,不同的ALS系统发射的激光脉冲及观测得到的波形数据不总是高斯型,而会表现出展宽、尖峰和非对称形态。引入了高斯模型的标准扩展——广义高斯模型作为组分建模的模型,通过调整其形状参数能有效地处理展宽或尖峰波形,如图6所示^[19],图6(a)红色实线、蓝色虚线和绿色的虚点线分别表示高斯、尖峰和展宽的波形,图6(b)表示固定 A, σ, μ 的值,形状参数 α 对广义高斯模型形状的影响。形状参数也能表征目标属性,使用广义高斯模型能额外增加一个特征。

广义高斯模型作为高斯模型的扩展,通过调整其形状参数 α 可以模拟高斯($\alpha = \sqrt{2}$)、展宽($\alpha = 2$)和尖峰波形($\alpha = 1$),可表达为^[20]

$$f_{GC}(x) = A \exp\left[\frac{-(x-\mu)^{\alpha^2}}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

式中 A 和 σ 表示每个组分的振幅值和波宽,平移/位置参数 μ 表示组分的位置。

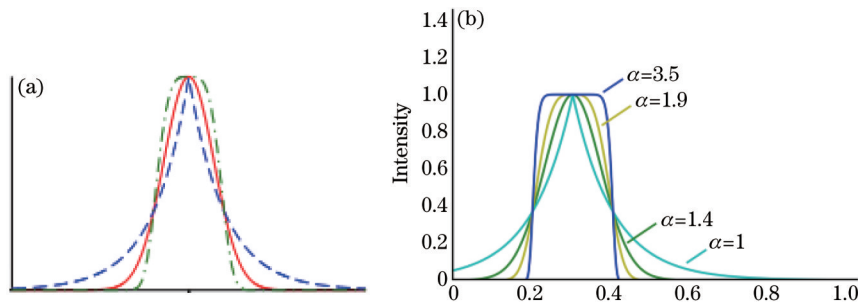


图6 (a) 高斯、尖峰和展宽的波形; (b) α 对广义高斯模型形状的影响

Fig.6 (a) Gaussian, peaked and broadening waveform; (b) the impact of α on the shape of the generalized Gaussian model

4 实验与讨论

实验所用ALS波形数据是由LiteMapper 5600(采用的激光发射器为LMS-Q560)获取,采样间隔为1 ns,每条波形的采样数为100。为了验证算法的有效性,选取了8条典型的实测波形数据。

4.1 小波变换解析叠加波结果

通过比较小波基的正交性、对称性、紧支性、消失矩等参数特性,同时结合实际采集的波形数据,经多次实验,最终选用sym6小波对叠加波进行5尺度的小波变换/分解。图7是原始波形、预处理后波形与小波变换结果。其中,横坐标是采样时间,纵坐标是振幅值(即DN值),青色带点实线是原始波形,蓝色带点实线是预处理

后波形,红色和橙色实线分别是小波变换第2层尺度的低频逼近系数和低频逼近系数重建波形(即a2和d2)。

由图7原始波形和预处理后波形可知,预处理操作能有效消除原始波形中的高频振荡信号(波形尾部采样值),同时大致保留有效信号。但是图7(b)中原始波形3624处的局部最大值特性在预处理后波形中消失;图7(e)中,由于高斯滤波的平滑作用,使得其局部最大值原始波形3697和3701处的局部最大值特性在预处理后波形中减少一个,进而波宽变大;图7(h)中原始波形在波峰处的2个峰值经预处理后变为单峰波形。这种重要特征的消失和变化可能会影响波形中目标个数的检测。

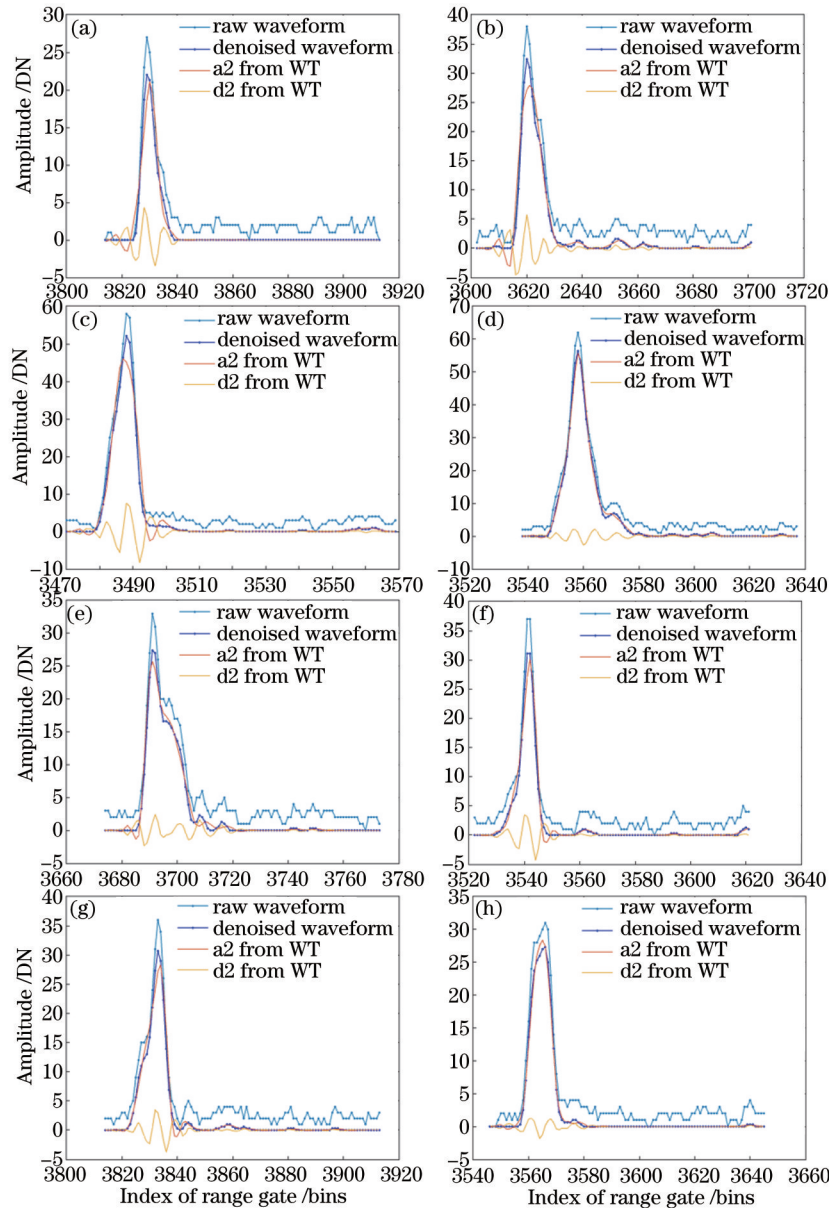


图7 原始波形、预处理后波形与小波变换结果

Fig.7 Results of raw and preprocessing waveform and the WT

由图7预处理后波形和低频逼近系数重建波形a2可知,低频逼近系数重建波形基本能反映预处理后波形[图7(b)和7(c)除外]。同时由表1可知,低频逼近系数重建波形与预处理后波形的残差值基本都在4以内。但图7(b)和7(c)在峰值部分都出现了较大的差别,其最大残差绝对值分别为7.8000和5.2692,这可能表明存在目标未被检测出来。

由图7预处理后波形和高频细节系数重建波形d2可知,高频细节系数重建波形中的小波与预处理后波形大致相似,这些小波的位置就是预处理后波形中目标的位置,这表明小波变换法可以有效地检测叠加波中的目标。但d2中的小波也存在错误,如图7(a)、7(b)和7(e)的d2中第一个小波以及图7(c)、7(f)和7(g)的d2中第

三个小波,这些小波对应的预处理后波形中没有明显的目标存在。通过查看这些小波附近的原始波形和预处理后波形可知,采样值变化幅度很大并形成近似 90° 直线的波形。这可能表明这种近似 90° 直线的波形是由多个目标信号叠加而成,为了避免出现伪组分(实际不存的目标)的情况,需要对d2中的小波增加约束条件。图7(b)中3608、3638、3654、3663处,图7(c)中3500附近,图7(d)中3610处,图7(e)中3708、3716处,图7(f)中3562、3620处,图7(g)中3884、3859处,图7(h)中3576处振幅值都小于3可以看作弱波在确定初始目标数时排除掉。

表1 小波变换后低频逼近信号重建波形a2与预处理后波形的残差值

Table 1 Residual between the low frequency approximation signals reconstruction waveform a2 after WT and waveform after preprocessing

No.	R_{\min}	R_{\max}
a	-4.1557	3.2376
b	-5.2692	4.6428
c	-7.5318	7.8000
d	-2.5691	2.6110
e	-2.5383	2.2665
f	-3.9764	4.0404
g	-3.4862	3.4393
h	-1.6366	1.5793

由图7原始波形、预处理后波形和低频逼近信号重建信号d2可知,虽然预处理后波形中的部分局部最大值特征消失或变化,但使用小波变换仍然能够检测出来,如图7(a)、7(b)和7(h)所示,不影响叠加波中目标的检测。但是图7(e)由于高斯滤波的平滑作用,原始波形的局部特征已经完全变为一个波宽较大的波形,则小波变换法不能检测出这种变化。

综上所述,尽管预处理操作使原始波形中的局部最大值特征消失或变化,小波变换法还是能从预处理后波形中检测出这种变化,从而有效地检测出波形中的目标。同时,小波变换法对采样值变化幅度很大并形成近似 90° 直线的波形有明显的反应。

4.2 波形分解结果

由于在采集数据时,难以确定每条波形数据所包含的目标个数,且很难人工标记出足够多的目标以用作对比。因此,波形分解结果的质量通常是用分解出的组分数或点云数来进行定量评价^[5]。

分别使用本文算法WT-GGM、商业软件常用的重心法(COG)、高斯拐点匹配法^[2](GIPM)和Lin等^[9]提出的严格高斯检测法(RGD),对实验数据进行分析。图8是WT-GGM的分解结果。其中,第一条蓝色点实线是预处理后波形,第二条红线是最终优化拟合得到的波形数据,介于第三条和最后一条之间的是分解得到的广义高斯组分,最后一条是小波变换第2层尺度的高频细节系数重建波形d2。

由图8预处理后波形和拟合波形可知,拟合波形的效果较好。结合表2可知,拟合精度越小越好,且都在0.8以下;图8(d)的拟合精度最差为0.7208,其他都在0.6以下。残差最大值也是越小越好,且都在3以下;图8(d)和8(e)的效果最差分别为2.7912和2.2667,其他都在2以下。

由图8预处理后波形、分解出的组分和高频细节系数重建波形d2可知,小波变换能够从叠加波中正确地检测出目标。但是由于小波变换对微弱信号、瞬态信号和奇异信号的检测能力强,所以小波变换法对采样值变化幅度很大并形成近似 90° 直线的波形有明显的反映,如图8(a)、8(b)和8(e)的d2中第一个小波以及图8(c)、8(f)和8(g)的d2中第三个小波,而这些小波所在位置及其附近是没有对应的组分存在。

由图8和表3可知,商业软件常用的COG算法从每条实验数据中的检测出的组分数都最少,WT-GGM算法分解出的组分个数与GIPM和RGD算法基本相同,是COG算法的2倍。仔细观察结果图可以发现,对图8(c)和8(d),WT-GGM和GIPM算法比RGD算法多分解出一个组分,这表明RGD算法对倾斜不明显的单峰叠加波分解效果较差。对图8(e),WT-GGM算法比RGD和GIPM算法多分解出一个组分,WT-GGM算法分解得到的第2、3个组分与原始波形中局部最大值相对应[图7(e)],因此WT-GGM算法分解结果可能更符合实际;而且第2个组分的峰值比第3个组分的峰值高,也符合能量衰减的实际情况;而GIPM算法分解结果中上述第2、3个组分变为一个波宽更大的组分,参考文献[2]分解结果图。就分解结果而言,这两种分解结果都可接受。但是在滤波和分类应用中,假如认为最后一个组分是地面,那么就会得到两个完全不同的地面。对图8(h),虽然WT-GGM和GIPM算法都分解出了2个组分,但是两种算法分解出的组分的振幅

值却不同,WT-GGM算法分解出的第一个组分振幅值大于第二个组分,而GIPM算法得到的结果恰好相反。结合图7(h)中的原始波形可知,GIPM算法的结果更符合原始波形;如果从能量衰减的角度看,GIPM算法的结果可能较好;如果从能量累积的角度看,WT-GGM算法的结果可能较好。

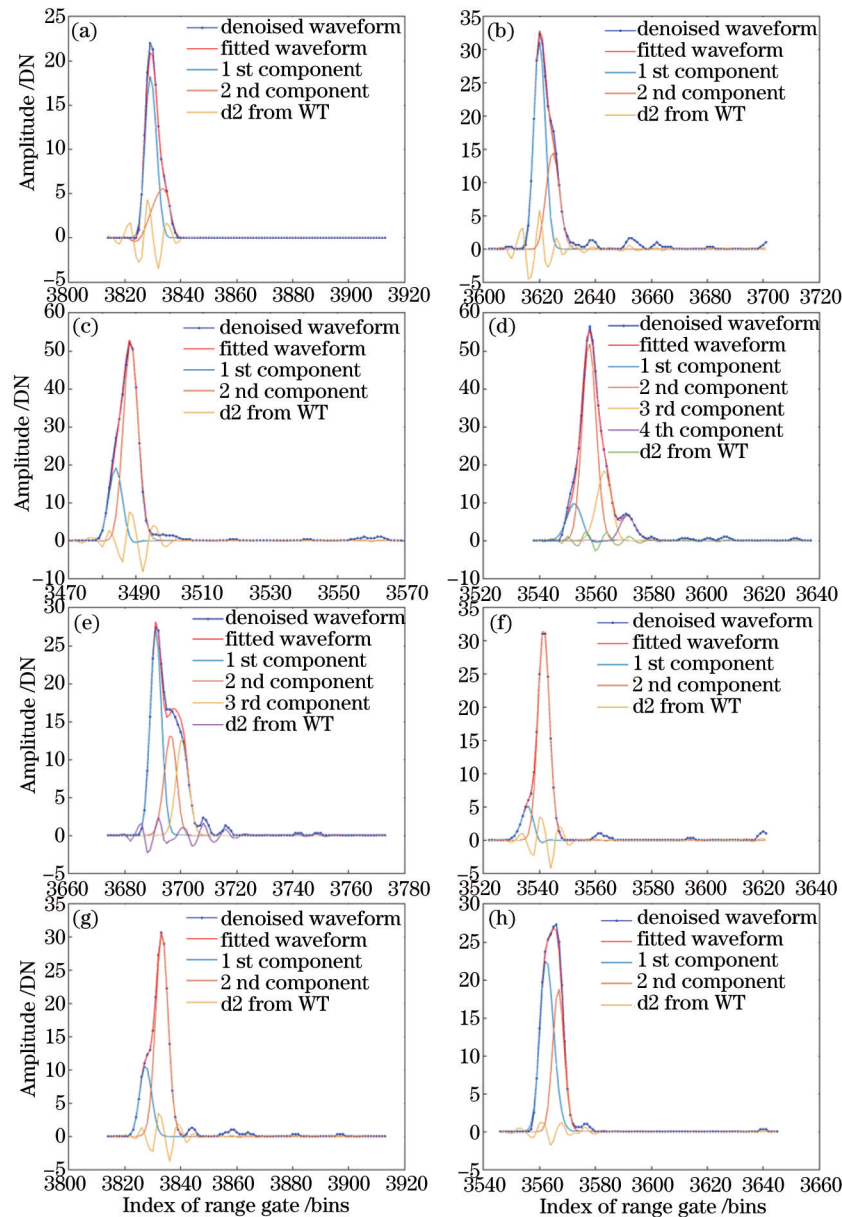


图8 WT-GGM对典型实测波形数据分解结果

Fig.8 Decomposition results of typical measured waveform data by using WT-GGM

表2 WT-GGM对实验波形数据分解后的拟合精度和残差最大值

Table 2 Fitting accuracy and maximum residual of measured waveform data after decomposition by WT-GGM methods

No.	A_{fitting}	R_{max}
a	0.5855	1.6444
b	0.5674	1.8205
c	0.5855	1.6444
d	0.7208	2.7912
e	0.5940	2.2667
f	0.2847	1.3000
g	0.2936	1.2998
h	0.3449	1.2500

表3 各种算法检测出的波形数据中目标数

Table 3 Number of objects within the waveform data detected by different methods

No.	Method			
	WT-GGM	COG	GIPM	RGD
a	2	1	2	2
b	2	1	2	2
c	2	1	2	1
d	4	2	4	3
e	3	1	2	2
f	2	1	2	2
g	2	1	2	2
h	2	1	2	2

5 结 论

针对小光斑全波形机载激光雷达波形数据中叠加波解析难的问题,引入了小波变换方法;针对实测波形数据通常表现出展宽或尖峰的形态,引入了广义高斯模型作为组分建模模型,通过调整其形状参数能有效地处理展宽或尖峰波形。为了验证本文算法的有效性,分别对实验数据使用WT-GGM算法、商业软件常用的COG算法、GIPM算法和RGD算法进行分析,对比结果表明:

1) 小波变换可以有效地从叠加波中检测出目标。但是由于小波变换对微弱信号、瞬态信号和奇异信号敏感,所以叠加波检测中普遍会出现过检测现象,但通过添加约束条件可以避免误检测问题。

2) WT-GGM算法分解出的组分数与GIPM和RGD算法结果基本相同,是COG算法的2倍。而且相比其他分解出的组分,WT-GGM结果更能反映原始波形,可能更符合实际情况。

但在非对称波形数据分析、模型参数预估计等方面还存在不足,有待进一步研究。

参 考 文 献

- Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16.
- Duan Yihao, Zhang Aiwu, Liu Zhao, *et al.*. A Gaussian inflexion points matching method for gaussian decomposition of airborne LiDAR waveform data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102801.
段乙好, 张爱武, 刘 诏, 等. 一种用于机载LiDAR波形数据高斯分解的高斯拐点匹配法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102801.
- 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 诏, 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.
- 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, 35(Part B3): 201-206.
- 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.
- 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.
- 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.
- Slota M. Decomposition techniques for full-waveform airborne laser scanning data[J]. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2014, 8(1): 61-74.
- 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.
- Wang C. Exploring weak and overlapped returns of a LiDAR waveform with a wavelet-based echo detector[J]. *Int*

- Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, 2012, 39(B7): 529–534.
- 11 Ma Pengge, Liu Yi, Qi Lin, *et al.*. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 4(04): 26–29.
马鹏阁, 柳毅, 齐林, 等. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. *电光与控制*, 2011, 4(04): 26–29.
- 12 Shao X, Cai W, Sun P. Determination of the component number in overlapping multicomponent chromatogram using wavelet transform[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1998, 43(1): 147–155.
- 13 Jiao L, Gao S, Zhang F, *et al.*. Quantification of components in overlapping peaks from capillary electrophoresis by using continuous wavelet transform method[J]. *Talanta*, 2008, 75(4): 1061–1067.
- 14 Doneus M, Briese C, Fera M, *et al.*. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(4): 882–893.
- 15 Mallet C. Analysis of Full-Waveform Lidar Data for Urban Area Mapping[D]. Paris: Telecom Paris Tech, 2010.
- 16 Lin Zhaopei. Wavelet-Based Identification of Overlapping Chromatographic Peaks and Related Optimization[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
林兆培. 基于小波的色谱重叠峰辨识及优化方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- 17 Zhang Defeng. MATLAB Engineering Application Stacks: MATLAB Wavelet Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 18 Zhang Hongyu, Fan Guihua, Zhang Tinghua, *et al.*. Research on wavelet denoising for echo signal of lidar[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2012, (5): 52–55.
张宏宇, 樊桂花, 张廷华, 等. 激光雷达回波信号的小波去噪研究[J]. *国外电子测量技术*, 2012, (5): 52–55.
- 19 Roncat A, Bergauer G, Pfeifer N. B-spline deconvolution for differential target cross-section determination in full-waveform laser scanning data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66: 418–428.
- 20 Mallet C, Soergel U, Bretar F. Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas[J]. *Photogrammetrie Fernerkundung GeoInformation*, 2008(5): 337–349.

栏目编辑: 苏 岑