

文章编号: 1001-3806(2016)02-0284-04

## 基于粒子群算法的 3 维激光雷达回波分解

戴 璨, 王元庆\*, 徐 帆

(南京大学 电子科学与工程学院 立体成像实验室, 南京 210046)

**摘要:** 为了提高 3 维激光雷达回波分解的精度和准确度, 采用粒子群算法与最小二乘法相结合的方法, 分析了激光雷达回波分解原理以及粒子群算法原理, 研究了粒子群算法在激光雷达回波信号分解中的应用; 进行了理论分析与实际数据验证, 取得了实际激光雷达回波数据的分解结果。结果表明, 采用粒子群算法与最小二乘法相结合的分解方法, 激光雷达回波可以更高精度地分解为一系列单个波形的叠加, 并获得了延时、强度及脉宽等参量, 拟合度提高至 0.989, 一定程度上抑制了噪声的干扰。该算法可以有效提高激光雷达回波分解的精度。

**关键词:** 激光技术; 回波分解; 参量拟合; 粒子群算法

**中图分类号:** TN958.98

**文献标志码:** A

**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.028

### 3-D lidar echo decomposition based on particle swarm optimization

DAI Can, WANG Yuanqing, XU Fan

(Stereo Image Technology Laboratory, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** In order to improve accuracy and precision of lidar echo decomposition, the theory combining particle swarm optimization algorithm with the least squares method was used and the principles of lidar echo decomposition and particle swarm optimization algorithm were analyzed. The application of particle swarm optimization algorithm in lidar echo decomposition was studied. After theoretical analysis and experimental verification, real data of decomposition experiment was gotten. The results show that lidar echo can be decomposed into a series of single waveform by the combining method. The fitting degree was improved to 0.989 by using the parameters of time delay, intensity and pulse width. It may reduce noise interference to some extent. The result shows this algorithm is effective and feasible.

**Key words:** laser technique; echo decomposition; parameter fitting; particle swarm optimization

## 引 言

经过几十年的研究发展, 激光 3 维成像技术已经从大型的大地测量拓展到遥感和测量的各个领域。激光 3 维成像技术摆脱了以往探测成像技术的难题, 具有适用范围广、抗干扰能力强<sup>[1]</sup>等优点, 能很容易地将地物、地貌、植被等区分开来, 并用数字进行描述, 同时还能根据需求生成数字地形模型、正射影像图、平断面数据等数字化产品<sup>[2]</sup>。

当前, 激光 3 维成像系统按搭载平台分类主要有: 地面激光 3 维成像系统、机载激光 3 维成像系统<sup>[3]</sup>和星载激光 3 维成像系统。其中, 地面固定式激光 3 维成像系统有 Optech 公司的 ILRIS-3D 系统等<sup>[4]</sup>。机载

激光扫描成像系统主要有加拿大 ALTM 系统、美国 FLI-MAP 和 SHOALS 系统等<sup>[6]</sup>, 国内机载激光扫描成像系统的研究在国家八六三计划的支持下也取得了很大进展, 由中国科学院上海技术物理研究所研制的 ASLRIS 圆锥扫描系统, 经过一系列试验取得了一批地形、高程数据和 3 维影像, 体现出良好的技术性能。星载 3 维成像系统主要有美国国家航空航天局对月探测器的 Clementine 系统、火星全球勘探者的 MOLA-2 系统和 ICEsat 的地球科学激光测高仪 GLAS 系统<sup>[6]</sup>。

激光回波波形中蕴含着大量激光光斑内部地表信息, 通过对回波波形的分析可以对地表目标的细特征进行提取<sup>[7]</sup>。然而, 激光回波信号会受到背景光、光电探测器暗电流噪声等因素的影响<sup>[8]</sup>, 因此, 为了提高最终的分解精度, 寻找一个有效并且准确的回波分解算法是一个值得研究的课题。

## 1 激光雷达回波波形分析

已存在的波形处理方法通常假设激光发射波形为高斯脉冲波形, 回波由一系列高斯脉冲波形叠加产生,

基金项目: 海军总医院重大专项基金资助项目 (AHJ2011Z001)

作者简介: 戴 璨 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光数据处理方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yqwang@nju.edu.cn

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-04-30

通过对称拐点的检测获取脉宽、延时以及强度参量的初值。但是激光信号实际上并非对称的高斯脉冲波形,尤其是在叠加展宽的情况下,通过这种方式获得的参量偏差较大,影响最终 LM 算法的准确性,其对比如图 1 所示。因此本文中考虑将回波分解成一系列单个波形的叠加,并通过粒子群算法获取其脉宽等参量,以此提高最终的分解与拟合精度,经过大量模型验证,所选模型为  $y = a(x - b)^2 \exp[-(x - b)/\tau]$  时最接近实际波形,其中,  $a$  表示激光回波的强度值,即通过光电转换所得的幅度值,表现了目标物点的亮度信息;  $b$  为延时参量,表示了目标物点的深度值;  $\tau$  为脉宽参量;  $x, y$  分别表示横纵坐标的时间采样信息和信号幅值。分析该激光雷达回波模型并将其与高斯模型对比可知,峰值点位置为  $b + 2\tau$  处,而高斯模型的峰值点位置即延时值,因此,为了提高最终获得的目标物点的深度及亮度信息的精度,需要将原始波形分解成一系列单个波形的叠加,同时获得强度、延时及脉宽参量,通过各项参量获得目标物点的信息。

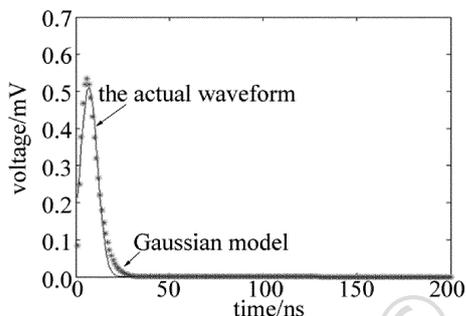


Fig. 1 Comparison of the actual waveform of lidar echo and Gaussian model

## 2 激光雷达回波处理

### 2.1 去噪及滤波

激光雷达回波信号信噪比受距离和环境影响,因此需要对回波信号进行处理<sup>[9]</sup>。背景噪声会导致波形幅度的随机变化,过多的毛刺可能会导致检测到误点,然而,一些滤波算法会导致幅值上的失真过度平滑使得细节丢失或是丢失峰值点等结果,因此需要比较并选择其中较好的算法。

本文中滤波算法选取 Vondrak 算法, Vondrak 数据平滑方法不仅适用于等间距和等精度的测量数据,同时也可用于对不等间距和不等精度数据的平滑处理,因此应用范围较广<sup>[10]</sup>。其基本假设为:

$$Q = F + \lambda^2 S = \min \quad (1)$$

$$F = \sum_{i=1}^n P_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2)$$

$$S = \int_{x_1}^{x_n} (\bar{y}_i''')^2 dx \quad (3)$$

对于获取的波形数据序列  $(x_i, y_i)$ ,  $x_i$  为采样时间,  $y_i$  是数据采样值,  $\bar{y}_i$  是平滑后的值,  $\bar{y}_i'''$  表示  $\bar{y}_i$  的 3 阶导数,  $P_i$  是测量值的权,  $F$  为逼近度,  $S$  为平滑度,  $\lambda^{-2}$  称为平滑系数。

### 2.2 阈值设定以及峰值检测

本文中通过检测峰值点来确定回波个数,从而分离出单独的波形,然而即使通过滤波去除了绝大多数的噪声以及毛刺,但仍然有许多因为噪声产生的极值点需要进一步去除,因此需要设定一个阈值。

本文中根据背景噪声设定阈值来去除因噪声产生的极值点的影响,  $T$  为所设阈值,  $\bar{N}$  为选取的背景噪声平均值,  $N_v$  为选取的背景噪声方差。

$$T = \bar{N} + 4N_v \quad (4)$$

2.2.1 参量拟合算法 单个回波的延时、脉宽、幅值等参量基本代表了目标的深度、强度等有效信息,因此,拟合出单个波形的准确参量对于提高测距精度以及后期 3 维成图的准确性有着重要的影响。

2.2.2 粒子群算法拟合 之前通过峰值检测只是可以获得位置及幅值信息,且通过其得到的参量并不准确,对于脉宽参量并没有很好的方法,因此在这里通过粒子群算法对于回波参量进行拟合。

粒子群算法是基于群智能的并行全局搜索算法<sup>[11-12]</sup>。其具体流程如下:(1)确定参量、随机初始化粒子群体的位置和速度,记录个体极值以及群体极值;(2)计算每个粒子的适应值;(3)比较每个粒子适应值与个体极值,如果较优,则更新该粒子个体极值;(4)比较每个粒子适应值与群体极值,如果较优,则更新该粒子群体极值;(5)更新每个粒子的位置和飞行速度;(6)设定迭代次数,达到则停止计算。

本文中对参量粒子进行更新:

$$V_{i,k+1} = \omega V_{i,k} + c_1 r (P_{i,k} - x_{i,k}) + c_2 r (P_{g,k} - x_{i,k}) \quad (5)$$

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + V_{i,k} \quad (6)$$

式中,  $P_{i,k}$  为个体极值,指粒子本身找到的最优解,  $P_{g,k}$  为群体极值,是指全局找到的最优解,  $x_{i,k}$  为参量粒子,  $V_{i,k}$  为飞行速率,  $\omega$  为惯性因子,  $c_1$  与  $c_2$  为加速常数,  $r$  为随机函数。

通过粒子群算法拟合后,该数据用于分析地形等信息仍存在较大误差,收敛度以及精度仍然可待提高,因此需要进一步拟合。

2.2.3 LM 算法 最小二乘拟合方法通常通过一系列的参量组合去迭代寻找结果,而 Levenberg-Marquardt (LM) 算法可以设定约束条件,因此选择 LM 算法。LM 算法类似于阶梯陡降法与高斯牛顿法相结合,当拟合结果与目标相差很大时,迭代系数很大则近

似于阶梯陡降法;当目标接近于拟合结果时,迭代系数很小则近似于高斯牛顿法<sup>[13]</sup>,但是其精度很大程度上依赖其初值。

对于最终拟合的精度,本文中通过拟合度来表示:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n o_i^2} \quad (7)$$

式中,  $o_i$  为目标,  $n$  为实际回波采样点数, 当该值越接近于 1 时, 拟合度越高, 效果越好。

而对于叠加严重的情况下, 多个回波分量会被认为是一个回波, 对于这种情况, 若是需要对其进行分解, 解决方法为减小出射激光脉冲的半宽来提高分辨率等。

### 3 数据处理与验证

本文中用来验证的激光雷达回波数据是从南京大学立体成像实验室自主开发研制的 3 维激光雷达获取, 发射激光波长为 532nm, 峰值功率可达 5W, 重复频率为 10kHz, 回波数据通过 1GHz AD 采集板采集, 如图 2 所示。

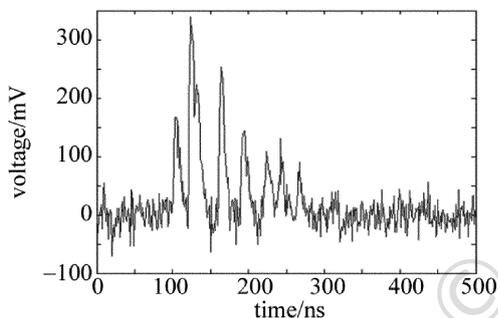


Fig. 2 The original data

对该回波首先进行去噪, 本文中采取小波去噪<sup>[14]</sup>, 小波基选择 sym8, 去噪后结果如图 3 所示, 可见处理后的波形数据中噪声得到了明显的抑制。

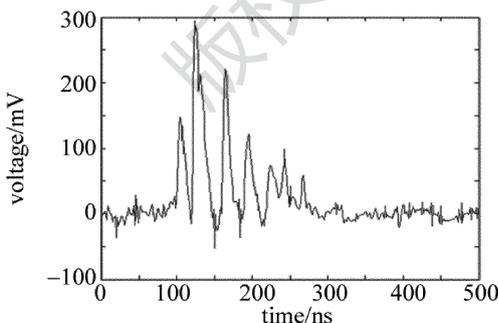


Fig. 3 Waveform after wavelet denoising

对于去噪后的波形, 仍然存在很多的毛刺现象, 需要进行平滑平滑, 得到较为理想的波形, 其平滑效果对比图如图 4 所示。

根据噪声的均值以及方差设定阈值电平, 本文中的阈值通过计算噪声的方差以及均值获得阈值电平,

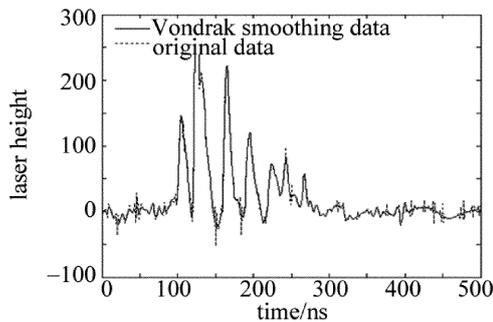


Fig. 4 Vondrak smoothing

因噪声的幅度往往较回波信号小很多, 因此通过阈值电平与检测到的幅值相比较来去除误点。通过观察回波波形, 本文中选取前 80 个点为噪声点, 阈值电平约为 40mV。从图 5 中可以看出, 检测后发现 8 个回波。

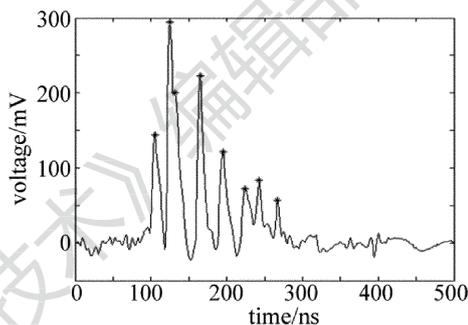


Fig. 5 Result of peak detecting

此时若直接将峰值点参量作为后期数据则会造成较大误差, 这对于整个系统来说是不希望的。因此通过粒子群算法以及 LM 算法进行参量优化拟合, 最终得到结果。粒子群算法中, 惯性因子  $\omega$  经比较取 0.729 时收敛性较好,  $c_1$  与  $c_2$  为加速常数, 其值本文中取为 1.454。

最终分解结果如图 6 所示, 可以看出, 其拟合精度

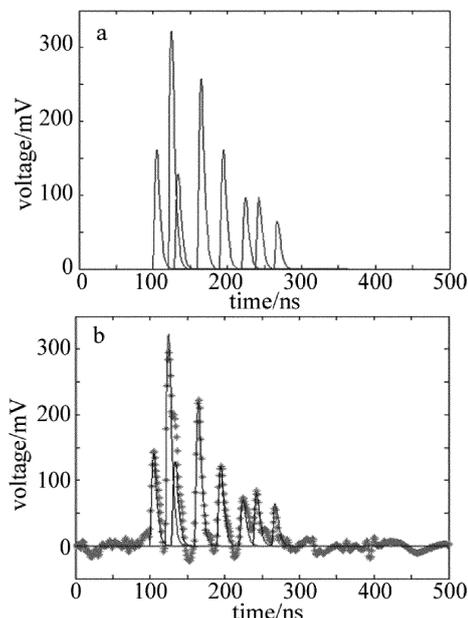


Fig. 6 The final result of fitting

以及参量准确度都较高。原始波形被分解成一系列单个波形的叠加,这些分解得到的单个波形都是理想不含噪声的信号,它的各项参量(见表 1)也代表着目标物体的不同信息,通过这些信息,可以恢复出目标物体的深度值和强度值,提高分解精度。

Table 1 Parameters of the single waveform

No.	time delay/ns	pulse width/ns	amplitude/mV	fitting degree
1	100.4511	16.4757	262.9728	0.9892
2	120.5939	16.8876	603.2819	
3	129.4733	16.7110	241.2356	
4	160.8891	16.8765	406.2963	
5	190.9724	16.7906	223.0270	
6	221.7808	16.7133	129.8962	
7	238.4133	16.1562	153.8706	
8	263.6134	16.2197	122.3484	

对于分解的每一个子波,其延时是对应像素点的高程信息,其幅度是对应像素点的强度信息。

#### 4 结 论

通过实际数据的处理验证了 3 维激光雷达回波分解算法的合理性和优势,提高了分解的精度。然而该算法并不唯一,参量拟合算法、峰值检测到的回波个数等都会产生较大影响,针对不同的目标物体应该存在最优的拟合准则。在实际应用中,仍然需要通过测量来验证算法的可靠性。

#### 参 考 文 献

[1] LI D, LI Y X, MENG W. Research of plane array propelled laser imaging detection for small targets at low altitude and slow speed[J]. Laser Technology, 2014, 38(1):44-48(in Chinese).  
 [2] LI L, HU Y H. Application of three-dimensional laser imaging tech-

nology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12):66-70 (in Chinese).  
 [3] CUI H X, SU G Zh, ZHAO X H, et al. Self-calibration of exterior orientation parameters of aerial digital images based on airborne LiDAR point clouds[J]. Laser Technology, 2013, 37(4):445-448(in Chinese).  
 [4] DONG X J, HUANG R Q. Application of 3-D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(22):3629-3635 (in Chinese).  
 [5] BUCKSCH A, LINDENBERGH R. Breast height diameter estimation from high-density airborne LiDAR data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(6):1056-1060.  
 [6] SUN X L. Space lidar developed at the NASA goddard space flight center—the first 20 years[J]. IEEE Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3):1660-1675.  
 [7] ZHAO X, ZHANG Y. Algorithm of laser altimeter reflecting waveform based on Gaussian decomposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3):643-648 (in Chinese).  
 [8] WANG Y Zh. An adaptive segment smoothing algorithm for lidar signal[J]. Laser Technology, 2014, 38(5):599-602 (in Chinese).  
 [9] TAO X H, HU Y H. Application of empirical mode decomposition in atmospheric echo processing of lidar[J]. Laser Technology, 2008, 32(6):590-593 (in Chinese).  
 [10] LEI Y, ZHAO D N. Filtering random noise from PPP time transfer based on Vondrak [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(6):18-21 (in Chinese).  
 [11] WANG F, HE X. Hybrid optimization algorithm of PSO and Cuckoo search[J]. Artificial Intelligence, 2011, 11(1):1172-1175.  
 [12] LIANG Zh J, WANG K F. Digital speckle image correlation method based on particle swarm optimization algorithm[J]. Laser Technology, 2014, 38(5):603-607 (in Chinese).  
 [13] ZHAO X, ZHANG Y. Modeling raw signals of laser altimeter echo waveform based on canopy surface[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(6):18-23 (in Chinese).  
 [14] CHEN G, ZHU X F. Applications of wavelets and sparse decomposition in non-continuous film denoising[J]. Laser Technology, 2014, 38(4):546-550 (in Chinese).