

激光大足印多目标距离信息提取与验证技术

蓝晓萍 黄庚华* 王海伟 吴 军

中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

摘要 针对星载对地观测激光高度计大足印回波信号中多目标相对高程信息提取的问题,采用基于最小二乘的高斯分解算法对波形数据进行多目标分离,设计了全波形采集系统,并开展了地面多目标分离的算法验证实验。实验结果表明,该算法可有效分离回波信号中的多个目标,目标间相对距离偏差小于0.03m,验证了激光大足印全波形采集系统进行多目标相对距离信息提取的可行性,对星载对地观测激光高度计的系统设计及数据处理算法的研究具有重要借鉴意义。

关键词 遥感; 星载激光高度计; 波形分解; 多目标; 相对距离; 大足印

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0701001

Technology of Laser Large-Footprint Multi-Objective Relative Distance Information Extraction and Verification

Lan Xiaoping Huang Genghua Wang Haiwei Wu Jun

Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract In order to extract the relative elevation information of multi-objects from the echo waveform of the spaceborne earth observing laser altimeter with large-footprint, a Levenberg-Marquardt-based Gaussian decomposition algorithm is used to separate the waveforms, and a full-waveform acquisition system is developed for multi-objects. Experiments on the ground-based multi-objective distance information acquisition are carried out to verify the decomposition algorithm. The experimental results show that the calculated relative distance error of multi-objectives is less than 0.03 m which reveals the effectiveness of algorithm in separating multi-objects from echo waveforms and the validity of the large-footprint full-waveform acquisition system for extracting the relative distance information of multi-objects. The research is useful for the design of space-borne laser altimeter system and the study of data processing algorithm.

Key words remote sensing; space-borne laser altimeter; waveform decomposition; multi-objective; relative distance; large-footprint

OCIS codes 010.0280; 010.3640; 000.2170;

1 引 言

星载全波形激光高度计由于具有能充分记录返回激光的所有脉冲信息,可以构成完整的波形数据,区域数据获取能力强,并可充分测量足印内目标物的垂直结构等优势,在近年来受到了广泛关注。当前,搭载在冰云和土地高程卫星(ICESat)上的地球科学激光测高系统(GLAS)是世界上第一个进行全球观测的全波形星载激光高度计系统(LiDAR),虽然它的初始目的是监测两极冰川变化、沿线的陆地和海洋地貌以及获取云层及气溶胶分布高度数据,但它在足印(66 m)范围内能够精确地直接测量地物高度和垂直结构^[1],使得其波

收稿日期: 2015-01-12; 收到修改稿日期: 2015-03-23

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金(CXJJ14S133)

作者简介: 蓝晓萍(1988-),女,硕士研究生,主要从事激光主动遥感方面的研究。E-mail:lanxiaoping0520@163.com

导师简介: 黄庚华(1980-),男,研究员,硕士生导师,主要从事空间激光主动遥感技术方面的研究。

E-mail:genghuah@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

形数据被广泛应用于极地冰川变化研究^[2-3]和林业研究^[4-5]两大方面。此外,人们正在拓展全波形激光雷达波形数据的其他应用,包括提取水面高程变化^[6]和土地覆盖分类^[7]等领域。

由于轨道高度高,星载激光高度计星下点激光足印直径在50~100 m量级^[8],远大于机载激光雷达亚米量级的激光足印,在应用过程中不可避免的会遇到激光足印中存在多个地物目标的情况,面临各目标高程信息精确分离和提取的难题。目前,虽然已有一些研究将小足印全波形激光雷达波形数据应用于地形测绘时地物的识别与分类,但在大足印全波形激光雷达波形数据采集与研究方面,既缺乏相关的星载对地观测激光高度计系统,也缺少地面精确标定实验数据的支持。

基于上述研究背景,本文选用合适的波形分解算法对系统所采集的波形数据进行处理,设计并实现了激光大足印全波形采集系统,并进行了基于地面多目标靶板的采集和验证实验,实验结果表明,该激光大足印全波形采集系统性能良好,所选波形分解算法对多目标相对距离的提取精度可以控制在0.03m范围内,具有良好的工程应用效果。

2 全波形采集系统原理

按照回波记录方式的不同,激光雷达可以分为离散和全波形两类。前者记录的是足印内有限个离散的回波信号,而后者记录的是足印内连续的回波信号。全波形数字化记录即对激光的发射信号和回波信号均以很小的采样间隔进行采样并记录。这种连续记录方式,不仅包含了反射地物的空间位置信息,还包含了地物对激光发射信号的特征反映,通过分析这些数字化波形,可以得到详细的参数(如波形幅度、宽度等),这些参数对于地物信息的识别与分类具有重要意义。图1为回波数字化及波形分析的原理图^[9]。图中第一行是模拟信号,最左边对应的是激光发射脉冲的一部分,而接下来的两个脉冲表示地物的(如树冠部分和地表)回波脉冲。该模拟信号以一定的时间间隔进行采样,经过模拟数字转换器(AD)生成数据流。经过预处理后的数据存储在数据记录器中,可用于离线处理。数据记录器中记录了回波信号的全部波形形态信息,在数据处理过程中,采用合适的算法就可以实现信号的完全重建和详细分析,如通过发射脉冲相对于目标物的时间位置可以得出绝对的目标距离,通过回波脉冲间的时间间隔可以得出目标距离上的高精度相对距离信息^[9]。

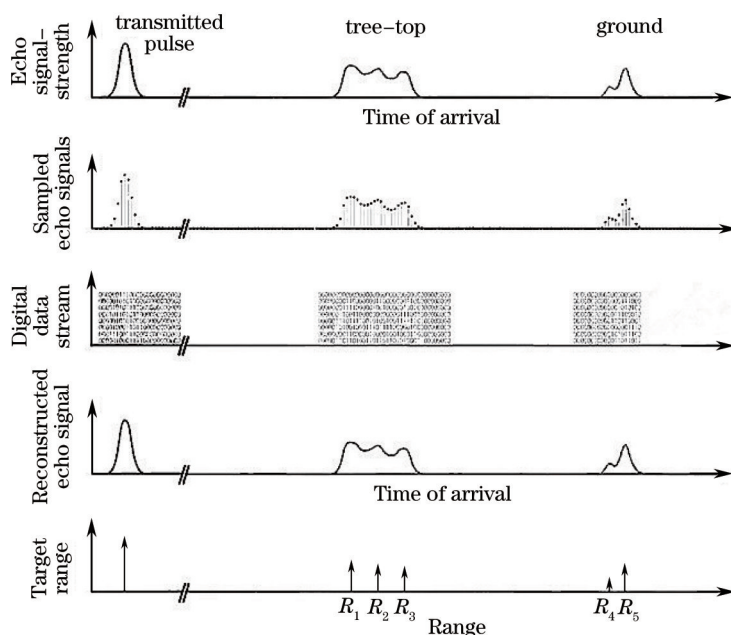


图1 回波数字化及波形分析原理图

Fig.1 Principle of echo digitization and full-waveform analysis

3 全波形分解算法

全波形激光雷达按照激光光束照射到地面时足印的大小,分为小足印和大足印两类。小足印激光雷达

的足印尺寸较小,通常小于1 m,所以其足印内目标物较少甚至出现足印尺寸小于目标物的情况,一般利用其高密度的激光点云数据来估测目标物的结构参数。而大足印激光雷达的足印直径一般在8~70 m,通常会大于目标直径,且会出现足印内多目标的情况,波形中往往包含了足印范围内多目标的垂直结构和水平位置信息,一般利用其回波波形来估测大范围的多目标结构参数。目前记录波形的激光雷达主要有美国国家航空航天局(NASA)的机载植被激光成像传感器(LVIS),基于回波重建的扫描式雷达成像系统(SLICER),星载的地球科学激光测高系统(GLAS)。其中LVIS系统和SLICER系统的光斑在8~25 m,星载GLAS系统的光斑为70 m,并已经在全球范围内获取了大量数据。

当前激光雷达波形数据的处理方法主要包括四种:1)波形分解;2)频域反卷积;3)波形数据统计分析;4)基于回波模型反演。利用大足印激光雷达波形数据解译地物信息的关键点在于选用合适的方法对波形进行处理,或从波形直接得到目标物特征,或从波形得到相关参数,再间接用于估计目标特征。理论上,回波波形可以看作是若干个高斯函数的叠加,高斯模型可以很好的模拟波形数据,因而基于高斯模型的波形分解算法是目前激光雷达较为常用的波形数据处理方法。

对于全波形信号,其截面可以用一系列的高斯函数来表示

$$y = f(t) + b = \sum_{i=1}^N f_i(t) + b, \quad (1)$$

$$f_i(t) = A_i \exp\left[-\frac{(t - t_i)^2}{2S_i^2}\right], \quad (2)$$

式中 y 表示波形, N 代表脉冲的个数, $f(x)$ 是高斯函数, b 为噪声, A_i , t_i , S_i 分别表示高斯函数的幅值、中心位置和标准差^[10-11]。

Levenberg-Marquardt(LM)算法^[12-16]是一种利用标准数值优化技术的快速算法,将梯度下降法与高斯-牛顿法结合,既有高斯-牛顿法的局部收敛性,也有梯度下降法的全局特性。

设 $\mathbf{w}^{(i)}$ 为第 i 次迭代的参数所组成的向量,新的参数组成的向量 $\mathbf{w}^{(i+1)}$ 可根据下面的规则求得:

$$\mathbf{w}^{(i+1)} = \mathbf{w}^{(i)} + \Delta \mathbf{w}, \quad (3)$$

$$\mathbf{w}^{(i)} = [A_i \quad t_i \quad S_i \quad b]_i. \quad (4)$$

对于牛顿法则

$$\Delta \mathbf{w} = -[\nabla^2 E(\mathbf{w})]^{-1} \nabla E(\mathbf{w}), \quad (5)$$

式中 $\nabla^2 E(\mathbf{w})$ 表示输出误差 $E(\mathbf{w})$ 的 Hessian 矩阵, $\nabla E(\mathbf{w})$ 表示梯度。

误差函数为

$$E(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (d_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l e_i^2(\mathbf{w}), \quad (6)$$

式中 $e_i(\mathbf{w})$ 为误差, d_i 为期望输出, y_i 为实际输出,有

$$\nabla E(\mathbf{w}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{e}(\mathbf{w}), \quad (7)$$

$$\nabla^2 E(\mathbf{w}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{e}(\mathbf{w}) + S(\mathbf{w}), \quad (8)$$

式中 $S(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^l e_i(\mathbf{w})\nabla^2 e_i(\mathbf{w})$, $\mathbf{J}(\mathbf{w})$ 为 Jacobian 矩阵。

$$\mathbf{J}(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\mathbf{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1(\mathbf{w})}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1(\mathbf{w})}{\partial w_n} \\ \frac{\partial e_2(\mathbf{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2(\mathbf{w})}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2(\mathbf{w})}{\partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial e_l(\mathbf{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_l(\mathbf{w})}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_l(\mathbf{w})}{\partial w_n} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对于高斯-牛顿法的法则则有

$$\Delta \mathbf{w} = -[\mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{J}(\mathbf{w})]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{w})^T \mathbf{e}(\mathbf{w}). \quad (10)$$

LM 算法是一种改进的高斯牛顿法,它的形式为

$$\Delta \mathbf{w} = -[\mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{J}(\mathbf{w}) + u\mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{w})^T e(\mathbf{w}). \quad (11)$$

由(11)式可得,当比例系数 $u=0$ 时,LM 算法变为高斯-牛顿法,当 u 取值增大时,LM 算法接近梯度下降法。LM 算法在每次迭代成功一步时, u 减小一些,这样在接近误差目标的时候,其逐渐与高斯-牛顿法相似。高斯-牛顿法在靠近误差最小值时,其收敛速度会更快些,精度也随之更高,但仍不够稳定。由于 $[\mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{J}(\mathbf{w}) + u\mathbf{I}]$ 是正定的,因此(11)式的解总是存在的,而对于高斯-牛顿法, $\mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{J}(\mathbf{w})$ 是否满秩不能确定,所以 LM 算法优于高斯-牛顿法。另外,由于 LM 算法利用了近似的二阶导数信息,比梯度下降法快得多,所以它也优于梯度下降法。在实际操作中, u 是一个试探性参数,对于给定的 u ,如果求得的 $\Delta \mathbf{w}$ 能使误差函数 $E(\mathbf{w})$ 降低,则 u 降低;反之,则 u 增加。

LM 算法的计算步骤如下:

- 1) 给出误差允许值 ε , 系数 β , u_0 以及初始化参数向量 $\mathbf{w}^{(0)}$, 令 $i=0$, $u = u_0$;
- 2) 计算实际输出值;
- 3) 按(9)式计算 Jacobian 矩阵;
- 4) 分别按(11)式和(6)式计算 $\Delta \mathbf{w}$ 和 $E[\mathbf{w}^{(i)}]$;
- 5) 若 $E[\mathbf{w}^{(i)}] < \varepsilon$, 转到 7), 否则,以 $\mathbf{w}^{(i+1)}$ 计算误差函数 $E[\mathbf{w}^{(i+1)}]$;
- 6) 若 $E[\mathbf{w}^{(i+1)}] < E(\mathbf{w}^{(i)})$, 则令 $i = i + 1$, $u = u/\beta$, 回到 2); 否则这次不更新参数值,令 $\mathbf{w}^{(i+1)} = \mathbf{w}^{(i)}$, $u = u\beta$, 并回到 4);
- 7) 结束。

波形分解算法的流程图如图 2 所示,采用的是基于 LM 高斯分解算法,它是把高斯函数与波形数据用非线性最小二乘法进行拟合后分解。波形分解算法一般包括:波形预处理,参数初始化以及波形参数最优化。波形的预处理包括波形数据读取、噪声去除以及波形平滑,这一步骤处理的结果好坏直接影响到波形分解算法的处理效果。系统接收的回波数据中包含大量噪声,如果对噪声估计得过小,则分解过程将含有大量噪声,而后续的二阶求导对噪声十分敏感,所以会严重影响到波形分解精度;如果对噪声估计得过大,则会导致部分有效回波信息缺失。在进行噪声估计时,选择将回波数据(共 2000 个采样点)前面 50 个采样点和后面 50 个采样点求平均值作为噪声的估计值。同时,在对噪声进行估计之后,为防止后续的计算处理中伪高斯函数的产生,选择与系统发射脉冲相仿的高斯函数作为滤波器,对波形进行平滑处理,获得较为理想的处理结果。二阶求导所得的波形初始化参数根据前面所述的 LM 算法的计算步骤进行曲线拟合,以得到波形的最优化参数值。

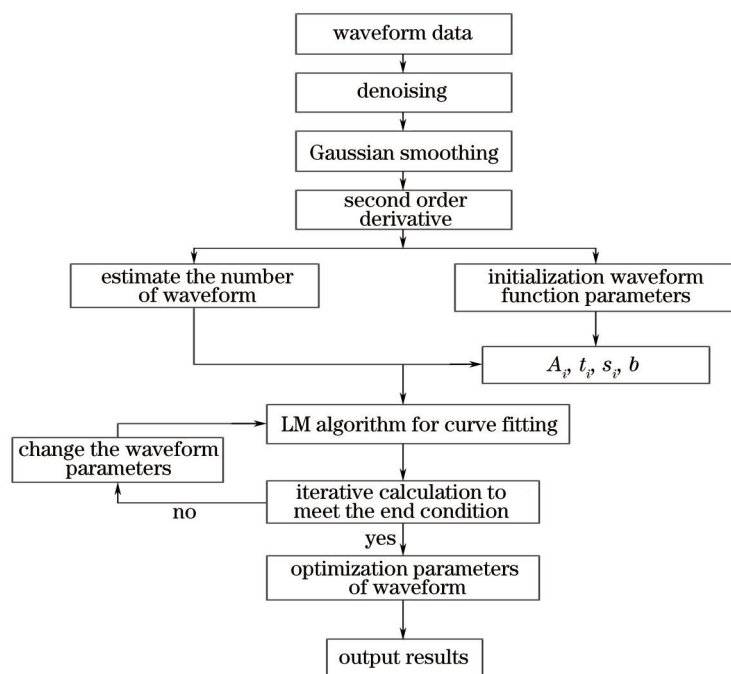


图 2 波形分解流程图

Fig.2 Flow chart of wave decomposition

4 激光大足印全波形采集系统架构

激光大足印全波形采集系统是通过发射激光光束、接收回波信号,分析激光与探测目标的相互作用过程,来获取距离信息及所需的目标特征,其系统结构框图如图3所示,包括发射单元、接收单元、探测单元、信号调理单元、全波形采集和测时单元、系统控制和处理单元以及使其协调工作的部件等。

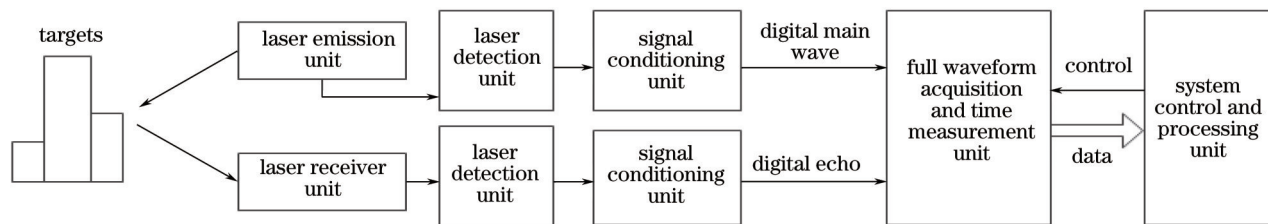


图3 激光大足印全波形采集系统框图

Fig.3 Acquisition system diagram of laser with large-footprint full-waveform

其中全波形采集和测时单元的结构框图如图4所示。激光发射单元按照一定的频率发射激光脉冲,一小部分光经分光片后反射回来被探测单元探测并作为主波信号送至信号调理单元,由信号调理单元出来后经过高速比较器转换为数字主波送至高精度时间数字转换模块(TDC)作为高精度时间间隔测量的起始信号。另一部分照射到目标的光经目标反射回来经过接收单元后被探测单元探测并作为回波信号送至信号调理单元,由信号调理单元出来后经调整与AD幅度匹配后一路送至变压器转换为差分信号输入到高速AD芯片,该芯片采样率为1.5 GS/s,量化位数为10 bit,另一路送至高速比较器转换为数字回波作为高精度时间间隔测量的结束信号,同时该数字回波与时钟同步信号一同输入到脉冲展宽电路完成触发信号和被测脉冲信号的第一个采样点之间的时间间隔测量。TDC接收起始和结束信号并进行主波到回波过阈值触发的时间间隔测量。现场可编程门阵列(FPGA)作为系统的实时控制和处理中心,控制ADC、TDC、时钟管理芯片、脉冲展宽电路以及阈值电平设置等工作过程,并接收ADC的采样数据、TDC和脉冲展宽电路的测量结果进行存储和预处理。系统根据公式 $H = c \cdot t / 2$ 得出距离信息,通过基于最小二乘的高斯分解算法对所采集的波形数据进行处理从而获得波形形态信息。

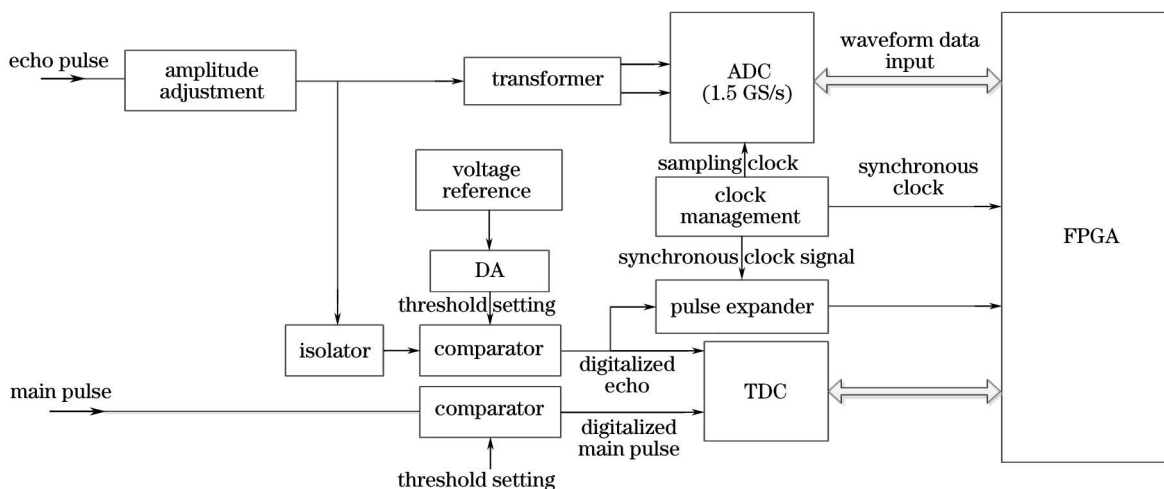


图4 全波形采集和测时单元结构框图

Fig.4 Structure diagram of full-waveform acquisition and time measurement unit

图5为激光大足印全波形采集系统实物图,激光发射单元主要由激光器和分光片组成,如图5中1和2所示,激光器发射脉冲波长为1064 nm,其脉宽为6~7 ns,发散角为18 mrad,单脉冲能量为140~200 μJ,重频可调;分光片的透过率为95%,反射率为5%;图5中3和6分别为激光探测单元和信号调理单元,3用于探测主波信号以及信号的调理工作,采用的是光电二极管(PIN)探测器,6用于探测回波信号以及信号的调理工作,采用的是雪崩光电二极管(APD)探测器;激光接收单元由1064nm滤光片和接收镜头组成,接收镜头焦距为35 mm,口径为25 mm,视场为22 mrad,如图5中的4和5所示;图中7为激光器电源,8为全波形采集、测时单元与系统控制和处理模块。



图5 激光大足印全波形采集系统实物图

Fig.5 Acquisition system picture of laser with large-footprint full-waveform technology

5 实验设计及结果分析

采用基于模拟信号的仿真和基于地面多目标靶板试验数据对所选波形分解算法进行验证。

5.1 模拟信号的仿真验证

模拟信号的生成主要包括以下几个步骤:设定 N 个分别已知条件的高斯函数,对 N 个高斯函数进行叠加形成一个波形,为了模拟全波形激光雷达系统的接收过程,对该波形函数加入随机噪声,这样可以得到一个模拟的回波数据^[17]。对模拟回波采用上述的处理步骤进行波形分解处理,在实际操作中分别模拟了 2~6 个高斯函数,且分别对高斯函数的幅值、中心位置、标准差等设定了不同的参数进行了波形分解的试验,结果均与真实的数据接近,图 6 是一组由五个高斯函数形成的模拟波形验证过程及其分解结果。

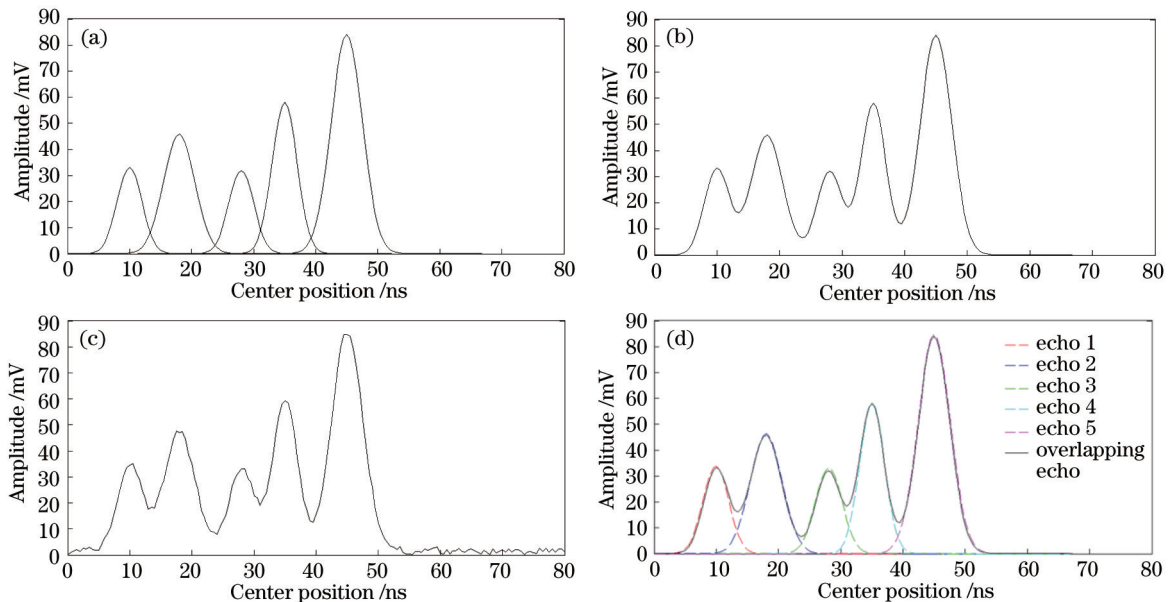


图6 模拟波形验证过程及分解结果。(a) 原始五个高斯函数;(b)高斯函数叠加;(c) 加入随机噪声;(d) 波形分解结果

Fig.6 Validation process of simulation waveform and result of decomposition.(a) Original five Gaussian function;

(b) superposition of Gaussian function; (c) join the random noise; (d) results of waveform decomposition

如图 6 所示,黑色实线为原始高斯函数,彩色虚线为分解结果。原始五个高斯函数和加入 3mV 白噪声,信噪比为 11 的五个高斯函数分解所得参数(幅度、中心位置、标准差)如表 1 所示。

表 1 原始高斯函数与加入白噪声高斯函数分解所得参数

Table 1 Decomposition parameters of original and white noise added Gaussian function

Wave of decomposition	Original Gaussian wave			Random noise added Gaussian wave		
	Amplitude /mV	Center position /ns	Standard deviation	Amplitude /mV	Center position /ns	Standard deviation
1	33	10	2	34.27	9.955	2.05
2	46	18	2.5	47.54	18.03	2.581
3	32	28	2	32.7	28.06	2.102
4	58	35	2	59.27	35.01	2
5	84	45	2.5	85.23	45.03	2.561

根据表 1 可以计算出相邻波形之间相距的实际距离如表 2 所示。

表 2 模拟波形相邻间隔与分解结果比较

Table 2 Comparison with adjacent interval of simulation waveform and results of decomposition

Decomposed echo wave	Echo wave 1	Echo wave 2	Echo wave 3	Echo wave 4	Echo wave 5
Actual distance between the wave /m	1.2	1.5	1.05	1.5	
Calculated distance between the wave /m	1.21125	1.5045	1.0425	1.503	
Error /m	0.01125	0.0045	0.0075	0.003	

5.2 地面多目标实验的验证

激光大足印全波形采集系统所设计的激光器发散角为 18 mrad, 计划机载飞行试验(机载飞行试验的装备与星载类似)高度在 1667 m 高空时, 其在地面的激光足印直径为 30 m, 目标物为 5 m。地面多目标试验是根据足印内目标大小与激光足印的比值一定的缩放原则对星载激光高度计相关性能参数做了适当的缩放比例设计, 实验中激光器到靶板的距离为 100 m, 激光光束在 100 m 处的足印直径为 1.8 m, 通过在激光光路上不同位置放置 1 个面积为 2 m×2 m 的大靶板和 4 个面积为 0.3 m×0.3 m 的正方体物块来分别模拟地面以及不同高度的建筑物, 5 个目标物之间间距为 1 m。图 7 为试验现场目标物的正视图和侧视图。

图 8 为单个激光脉冲的回波全波形分解结果, 实线为分解前的重叠回波, 虚线为分解后的多个单一回波, 全波形分解所得各子回波参数(幅值, 中心位置, 标准差)分别为:[44.87, 804.2, 2.602]、[24.68, 810.7, 2.34]、[14.48, 817.4, 2.279]、[37.76, 824, 2.475]、[128.8, 830.5, 2.124]。

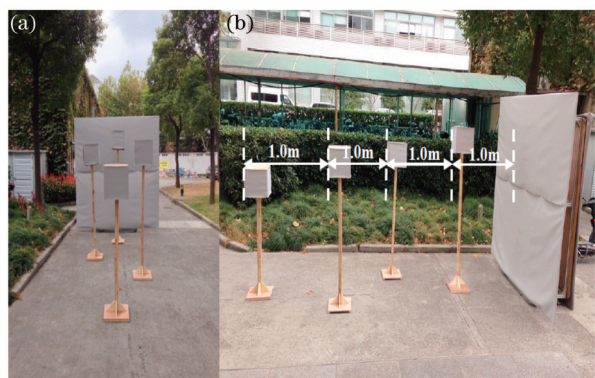


图 7 实验现场目标物。(a) 正视图; (b) 侧视图

Fig.7 Target object in experimental field.

(a) Front view; (b) side view

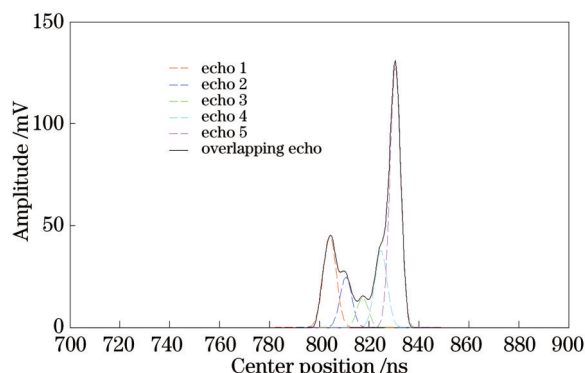


图 8 波形分解结果

Fig.8 Result of waveform decomposition

根据分解结果计算得出目标间距离与实际目标间距离如表 3 所示。由表 3 和表 2 的波形分解结果可以得出, 所选择的波形分解算法在模拟信号的验证过程中, 由于模拟信号较为理想化, 相邻波形间隔与分解结果之间的误差较小, 控制在 0.02m 范围内。实际测试过程中, 由于实验系统、人为测量等误差的存在, 实测相邻目标物的间隔与分解结果之间的误差较仿真结果大, 但仍在 0.03m 范围内, 体现了良好的多目标相对距离信息提取能力。

表 3 相邻目标物的实际间隔与分解结果比较

Table 3 Actual interval of adjacent target comparison with the results of decomposition

Waves 1.5 /(GS/s)	Echo wave1	Echo wave2	Echo wave3	Echo wave4	Echo Wave5
Actual distance /m	1	1	1	1	1
Calculated distance /m	0.975	1.005	0.99	0.975	0.975
Error /m	0.025	0.005	0.01	0.025	0.025

星载激光高度计的工作环境较文中的地面多目标实验环境复杂,所设计的足印内目标物大小、间距以及反射率较理想化,目标受到的光强分布较均匀,而在实际工作环境中,足印内目标物大小和间距具有不确定性和不规则性,目标也会出现处于不同坡度和不同反射率的情况,这些因素均会影响激光的回波波形,后续将对上述因素展开深入研究。

6 结 论

针对星载对地观测大足印全波形激光高度计在实际使用过程中面临多目标相对距离提取的问题,开展了激光大足印全波形采集系统和波形数据处理算法的研究,通过仿真分析和地面多目标靶板试验,波形数据处理算法对多目标距离信息的提取精度可达到 0.03 m,同时还提取出了幅度、波形中心位置、标准差等重要参数,为后续目标物的识别和分类研究、飞行实验策划提供了理论和设计基础。

参 考 文 献

- 1 Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, *et al.*. Overview of the cesat mission[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): L21S01.
- 2 Slobbe D C, Lindenbergh R C, Ditmar P. Estimation of volume change rates of greenland's ice sheet from icesat data using overlapping footprints[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4204-4213.
- 3 Brenner A C, Dimarzio J P, Zwally H J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2): 321-331.
- 4 Chen Q. Retrieving vegetation height of forests and woodlands over mountainous areas in the pacific coast region using satellite laser altimetry[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1610-1627.
- 5 Anderson J, Martin M E, Smith M L, *et al.*. The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 248-261.
- 6 Urban T T, Schutz B E, Neuenschwander A L. A survey of icesat coastal altimetry applications: Continental coast, open ocean island, and inland river[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2008, 19(1&2): 1-19.
- 7 Duong H, Pfeifer N, Lindenbergh R. Full waveform analysis: ICESat laser data for land cover classification[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, 36: 30-35.
- 8 R S. Afzal. Performance of the GLAS laser transmitter[J]. SPIE, 2006, 6100: 610020.
- 9 A Ullrich, R Reichert. High resolution laser scanner with waveform digitization for subsequent full waveform analysis[J]. SPIE, 2005, 5791: 82-88.
- 10 P Gong, Z Li, H Huang, *et al.*. ICESat GLAS data for urban environment monitoring[J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3): 1158-1172.
- 11 W Wagner, A Ullrich, V Ducic, *et al.*. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 60(2): 100-112
- 12 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.
- 13 Chauve A, Mallet C, Bretar F, *et al.*. Processing full-waveform lidar data: Modelling raw signals[C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007: 102-107.
- 14 Ling M Q, Liu W W. Research on intrusion detection systems based on Levenberg-Marquardt algorithm[C]. 2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2008, 7: 3684-3688.
- 15 Zhang B, Li Q, Wang G, *et al.*. Breakout prediction based on BP neural network of LM algorithm in continuous casting process[C]. Automation (ICMTMA), 2010 International Conference Measuring Technology and Mechatronics on, 2010, 1: 765-768.
- 16 Wang Daodang, Wang Fumin, Chen Xixi, *et al.*. Three-dimensional coordinate measurement with point-diffraction interferometer based on levenbergy-marquardt algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812001.
王道档, 王福民, 陈茜茜, 等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的点衍射三维坐标测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812001.
- 17 G Xu, Y Pang, L Yuan, *et al.*. Characteristics of full-waveform lidar data from typical objects and its potential in point cloud classification[J]. SPIE, 2010, 7840: 78401P.

栏目编辑: 苏 岑