

中华人民共和国测绘行业标准

CH/T XXXX—XXXX

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

Technical specification for data processing of laser full waveform in
linear system of earth observation satellite

(报批稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
4.1 符号	2
4.2 缩略语	2
5 总体要求	3
5.1 源数据的完整性	3
5.2 处理精度	3
6 处理流程	3
7 数据准备	5
7.1 输入数据准备	5
7.2 数据筛选	5
8 波形数据预处理	5
8.1 背景噪声水平估计	5
8.2 回波波形的平滑滤波	6
8.3 发射波形的平滑滤波	6
8.4 波形信号起止时刻计算	6
8.5 波形信噪比计算	6
8.6 波形质量评价与控制	6
8.7 波形数据预处理后的数据和参数输出	7
9 波形分解	7
9.1 波形分解方法	7
9.2 回波波形高斯分量参数初始值估计	7
9.3 发射波形高斯分量参数初始值估计	8
9.4 波形拟合	8
10 波形特征参数提取	11
10.1 输入回波波形和基础波形特征参数	11
10.2 波形分位数高度提取	11
10.3 波形高度指数提取	11
10.4 波形能量指数提取	12
11 过程记录	13
12 成果整理与资料归档	13
12.1 成果整理	13

12.2 资料归档 13

附录 A（资料性）激光全波形数据和辅助数据 14

附录 B（资料性）全波形数据处理方法 15

附录 C（资料性）波形分解输出参数 19

附录 D（资料性）全波形数据处理结果和波形特征参数提取结果示例 22

附录 E（资料性）全波形数据和波形特征参数格式示例 30

参考文献 31

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分技术委员会(SAC/TC230/SC3)归口。

本文件起草单位：自然资源部国土卫星遥感应用中心、湖南科技大学、山东农业工程学院、中国科学院空天信息创新研究院、武汉大学、东北林业大学。

本文件主要起草人：谢俊峰、唐新明、刘诏、莫凡、李国元、薛玉彩、李少宁、陈继溢、杨晨晨、聂胜、倪文俭、周辉、王成、邢艳秋、傅征博。

引 言

卫星激光测高是采用装载于卫星平台的激光测高仪对地形地物进行高程测量的主动遥感技术。对地观测卫星激光测高仪能够快速获取全球高精度高程控制点甚至三维地形，同时在极地冰雪测量、植被高度及生物量估算、海面高度测量、湖泊水库水位测量以及云高测量等方面均发挥重要作用。自 2016 年开始，我国对地观测卫星激光测高技术得到了快速发展，资源三号 02 星搭载的国内首个对地观测试验性激光测高载荷有效获取了激光测高数据，资源三号 03 星、高分七号相继发射并已实现激光测高产品业务化生产，陆地生态系统碳监测卫星（句芒号）已经发射，更先进的陆海激光高程测量卫星也在规划中。

激光全波形数据处理是卫星激光数据处理和专题应用的重要环节。针对卫星激光测高全波形数据的特点，为满足全波形卫星激光测高技术快速发展的需要，特制定对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范，本文件与 CH/T 3030—2023《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、CH/T 3029—2023《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》、CH/T 3027—2023《对地观测卫星激光测高数据产品》、CH/T 3028—2023《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法》配套使用。

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

1 范围

本文件规定了对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理的总体要求、处理流程、数据准备、波形数据预处理、波形分解、波形特征参数提取、过程记录、成果整理与资料归档等内容。

本文件适用于从对地观测卫星线性体制激光全波形数据中提取波形特征参数的全波形数据处理，用于对地观测卫星激光测高标准数据产品和专题产品中波形相关参数的生产。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收

CH/T 1001 测绘技术总结编写规定

CH/T 3028—2023 对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法

CH/T 3029—2023 对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

线性体制激光 linear system laser

采集的模拟电脉冲信号与激光脉冲回波信号成线性关系的激光。

3.2

激光全波形数据 laser full-waveform data

以不大于四分之一激光发射光源全脉宽采样间隔，离散化记录的激光发射脉冲和目标后向散射回波脉冲强度信号。

注：一般用一系列采样点时刻（或采样点帧数）对应的幅值（即信号强度）表示。

3.3

地面回波 ground echo

经激光雷达数字化采集的由地表反射的激光脉冲信号。

3.4

波形特征参数 waveform characteristic parameters

表征波形特征的度量参数。

注：包括波形分解得到的高斯分量的振幅、中心位置及脉宽等基础波形特征参数，以及波形分位数高度、波形高度指数和波形能量指数等专题波形特征参数。

3.5

波形特征参数提取 extraction of waveform characteristic parameters

采用波形分解提取基础波形特征参数，并在此基础上，结合回波波形及其有效信号的起始和结束时刻等信息，提取表征目标垂直结构分布度量参数的过程。

3.6

波形分位数高度 height of waveform energy quantiles

计算某一位置回波能量累积值相对有效回波信号总能量占比的分位数，该分位数对应位置与地面回波峰值位置之间的距离。

注：通常从回波波形有效信号的结束时刻开始累积有效回波信号的能量。

3.7

波形高度指数 waveform height index

波形中某两个时刻之间对应时间间隔激光传输的距离。

注：主要包括波形全高、波形长度、波峰长度、半波能量高、波形的前缘长度和波形的后缘长度等指数。

3.8

波形能量指数 waveform energy index

表征波形中回波能量、某个回波分量的能量、两个回波分量之间的能量比等。

注：主要包括回波总能量、回波相对能量、地面回波能量、冠层回波能量、地面回波能量比例以及冠层回波能量比例等。

3.9

波形数据预处理 waveform data preprocessing

对全波形数据进行背景噪声水平估计和滤波以实现波形去噪的处理过程。

3.10

波形分解 waveform decomposition

利用高斯分解等算法提取激光发射波形或回波波形高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等特征参数的过程。

注：其中高斯分量脉宽特指均方根脉宽。

3.11

波形拟合 waveform fitting

通过一定的模型函数拟合形成近似波形，从而逼近激光发射波形或回波波形的优化过程。

4 符号和缩略语

4.1 符号

下列符号适用于本文件。

e_C : 冠层回波能量。

e_G : 地面回波能量。

e_R : 回波总能量。

H_{25} : 累计能量达到回波波形有效信号总能量25%时的位置距离地表的高度。

H_{50} : 累计能量达到回波波形有效信号总能量50%时的位置距离地表的高度。

H_{75} : 累计能量达到回波波形有效信号总能量75%时的位置距离地表的高度。

H_{100} : 累计能量达到回波波形有效信号总能量100%时的位置距离地表的高度。

L_D : 波形长度。

L_L : 波形前缘长度。

L_P : 波峰长度。

L_T : 波形后缘长度。

L_W : 波形全高。

SNR_w : 回波波形信噪比。

SNR_f : 波形数据预处理后回波波形的信噪比。

Th : 地物返回信号检测阈值。

$\overline{W_f}$: 回波波形所有采样点幅值的平均值。

4.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FWHM: 半高全宽 (Full Width at Half Maximum)

HDF5: 层次性数据格式第五版 (Hierarchical Data Format Version 5)

HOME: 半波能量高 (Height Of Median Energy)

LM: 列文伯格-马夸尔特法 (Levenberg-Marquardt)

RMS: 均方根 (Root Mean Square)

RMSE: 均方根误差 (Root Mean Square Error)

5 总体要求

5.1 源数据的完整性

源数据应包括发射波形、回波波形和辅助数据，激光全波形数据和辅助数据见附录A。源数据的完整性应符合以下要求：

- a) 发射波形数据应为一组规定采样时间间隔和个数的有效离散数据，应包含数据单位、数据类型、采样间隔等，发射波形数据示例见表A.1；
- b) 回波波形数据应为一组规定采样时间间隔和个数的有效离散数据，应包含数据单位、数据类型、采样间隔等，回波波形数据示例见表A.1；
- c) 辅助数据应包含激光发射波形和回波波形相关的时刻信息等，应包含数据单位、数据类型等，辅助数据示例见表A.2。

5.2 处理精度

将波形拟合残差的RMSE作为激光测高全波形数据处理精度的评价指标。波形拟合残差RMSE宜小于4.5倍的背景噪声标准差。

6 处理流程

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术流程见图1。

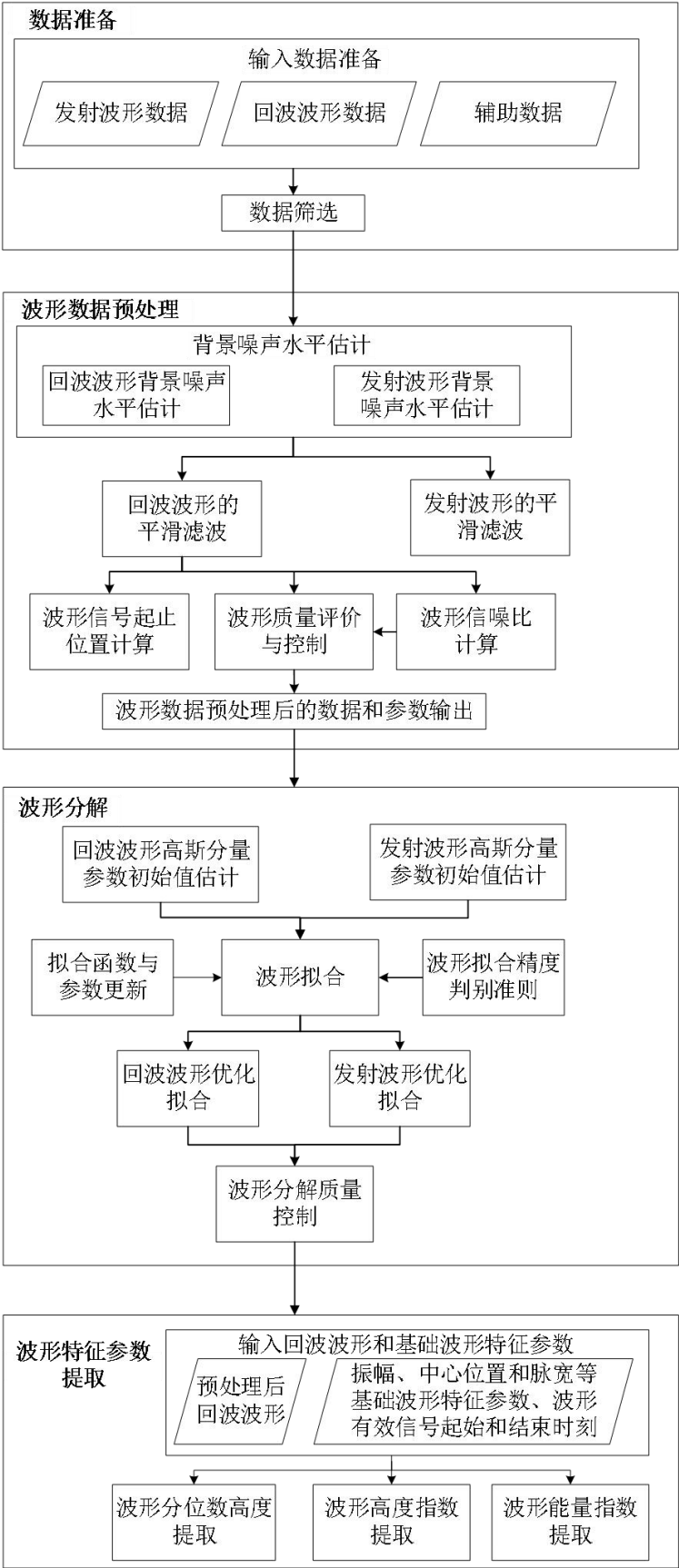


图1 对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术流程

7 数据准备

7.1 输入数据准备

按照5.1的要求，准备发射波形数据、回波波形数据、辅助数据。

7.2 数据筛选

7.2.1 筛选要求

回波波形数据应符合以下要求：

- a) 回波波形中存在地物返回信号；
- b) 回波波形未出现饱和。

7.2.2 筛选方法

7.2.2.1 检测地物返回信号

地物返回信号检测步骤如下：

- a) 计算回波波形所有采样点幅值的平均值 $\overline{W_f}$ ；
- b) 初步寻找背景噪声区的回波波形采样点：从回波波形的最后一个采样点开始，依次寻找所有满足对应幅值小于 $\overline{W_f}$ 的采样点，直到采样点的幅值大于 $\overline{W_f}$ 时结束；
- c) 设置地物返回信号检测阈值：计算步骤b)中寻找到的所有回波波形采样点的幅值平均值和标准差，该幅值标准差的若干倍（宜取值4.5）与该幅值平均值相加之和记为 Th ；
- d) 筛选地物返回信号：如果回波波形的最大幅值大于步骤c)中的 Th 值，则判断从回波波形中检测出地物返回信号，否则判断回波波形中不存在地物返回信号。

7.2.2.2 检测波形饱和

波形饱和检测步骤如下：

- a) 寻找幅值大于7.2.2.1 c)中 Th 值的回波波形；
- b) 计算回波波形最大幅值；
- c) 检测回波波形饱和平峰：判断回波波形最大幅值位置局部邻域内（宜由7个采样点组成）所有采样点幅值是否均等于回波波形最大幅值；
- d) 如果回波波形中检测到饱和平峰，则判断回波波形饱和，否则判断回波波形未饱和。

8 波形数据预处理

8.1 背景噪声水平估计

8.1.1 回波波形背景噪声水平估计

对于回波波形，选取回波波形背景噪声区的样本及其样本数，用于回波波形背景噪声计算，选取方法按照CH/T 3029—2023中5.5.1.2.2的规定执行。根据选择的波形样本，计算回波波形背景噪声的平均值和标准差，设置背景噪声阈值，计算方法如下：

- a) 回波波形背景噪声平均值计算见公式（1）；

$$\mu_{noise} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m y_j / m, & \text{当在回波波形开始部分选取噪声样本区时} \\ \sum_{j=N-m+1}^N y_j / m, & \text{当在回波波形结尾部分选取噪声样本区时} \end{cases} \quad (1)$$

式中：

- μ_{noise} ——回波波形背景噪声平均值；
 m ——用于背景噪声水平估计的采样点个数；
 J ——回波波形采样点的序号；
 y_j ——回波波形第 j 个采样点幅值；
 N ——波形总采样数。

b) 回波波形背景噪声标准差计算见公式 (2)；

$$\sigma_{noise} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \mu_{noise})^2}{m-1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

σ_{noise} ——回波波形背景噪声标准差。

c) 回波波形的背景噪声阈值计算见公式 (3)。

$$th_{noise} = \mu_{noise} + N_B \cdot \sigma_{noise} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

th_{noise} ——回波波形的背景噪声阈值；

N_B ——回波波形背景噪声标准差的倍数，宜取值 4.5。

8.1.2 发射波形背景噪声水平估计

按照 8.1.1 的方法，输入发射波形数据，计算发射波形背景的平均值和标准差，设置背景噪声阈值。

8.2 回波波形的平滑滤波

8.2.1 滤波方法

滤波方法有高斯滤波、小波降噪、均值滤波等，常用滤波方法见 B.2.2，其中高斯滤波法较为成熟且更具普适性，宜采用高斯滤波方法对回波波形进行平滑滤波，高斯滤波的核函数见公式 (4)。

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

t ——回波波形采样点的时刻，即波形采样点在横坐标中的位置；

$g(t)$ ——滤波核函数；

σ ——高斯滤波核函数的 RMS 脉宽；

e ——自然常数。

8.2.2 回波波形高斯滤波

设置高斯滤波核函数中 σ 的大小， σ 宜取值为发射波形的 RMS 脉宽。基于滤波核函数 $g(t)$ 对回波波形进行卷积运算，完成对回波波形的平滑滤波，得到波形数据预处理后的回波波形。

8.3 发射波形的平滑滤波

按照 8.2 的方法，输入发射波形数据，对发射波形进行平滑滤波。

8.4 波形信号起止时刻计算

当波形数据预处理后的回波波形幅值超过回波波形的背景噪声阈值时，对应的第一个采样点和最后一个采样点时刻作为回波波形有效信号的起始和结束时刻。

8.5 波形信噪比计算

回波波形和波形数据预处理后回波波形的信噪比计算方法如下：

a) 回波波形信噪比 SNR_w 按照 CH/T 3028—2023 中的公式 (17) 计算；

b) 波形数据预处理后回波波形的信噪比计算见公式 (5)。

$$SNR_f = 10 \lg \left[\frac{\sum_{j=1}^N \hat{y}_j^2}{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2} \right] \dots\dots\dots (5)$$

式中：

SNR_f ——波形数据预处理后回波波形的信噪比；

$\hat{y}_j$ ——波形数据预处理后回波波形第 j 个采样点的幅值，其中 $j = 1, 2, \dots, N$ 。

8.6 波形质量评价与控制

8.6.1 波形数据预处理前的波形质量评价

按照 CH/T 3028-2023 中表 13 的方法进行波形数据预处理前的回波波形质量评价。

8.6.2 波形数据预处理后的波形质量评价

根据公式 (5) 计算得到波形数据预处理后的回波波形信噪比, 将此参数作为辅助波形质量评价指标。在此基础上, 分别计算平滑滤波前、后的回波波形背景噪声标准差, 波形数据预处理后的波形质量评价方法如下:

- 如果波形数据预处理后的回波波形信噪比不小于 15, 则判定滤波效果较好;
- 如果波形数据预处理后的回波波形与滤波前回波波形相比, 背景噪声标准差减小 20% 以上, 则判定回波波形去噪效果较好, 否则判定回波波形去噪效果较差。

8.6.3 波形数据预处理后的波形质量控制

对比回波波形采样点的幅值 y_j 和波形数据预处理后回波波形采样点的幅值 $\hat{y}_j$, 其中 $j = 1, 2, \dots, N$, 设置质量控制条件: 波形数据预处理后的回波波形与滤波前回波波形相比, 噪声标准差减小 20% 以上。波形数据预处理后的波形应满足该条件。

8.7 波形数据预处理后的数据和参数输出

按照 8.1~8.6 的要求完成处理后, 输出如下数据和参数:

- 高斯滤波核函数的均方根宽度参数、背景噪声平均值和标准差、回波波形的背景噪声阈值、回波波形有效信号的起始和结束时刻、波形信噪比;
- 波形数据预处理后的发射波形、回波波形;
- 其他。

9 波形分解

9.1 波形分解方法

全波形数据处理方法有高斯分解法、小波分解法和波形反卷积法等, 全波形数据处理方法见附录 B, 其中高斯分解法较为成熟且应用最为广泛, 波形分解宜采用高斯分解方法, 将回波波形分解成多个高斯分量, 每个高斯分量有三个参数: 振幅、中心位置、脉宽。发射波形经处理后得到一个高斯分量。

9.2 回波波形高斯分量参数初始值估计

9.2.1 高斯分量检测原理

对回波波形高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等参数进行初始值估计。单个高斯分量函数见公式 (6)。

$$M_i(t) = A_i e^{\frac{-(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$M_i(t)$ ——第 i 个高斯分量的高斯函数;

A_i ——第 i 个高斯分量的振幅;

T_i ——第 i 个高斯分量的中心位置;

σ_i ——第 i 个高斯分量的脉宽。

$M_i(t)$ 的一阶偏导数计算见公式 (7)。

$$\frac{\partial M_i(t)}{\partial t} = -A_i \frac{(t-T_i)}{\sigma_i^2} e^{\frac{-(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}} = -M_i(t) \frac{(t-T_i)}{\sigma_i^2} \dots\dots\dots (7)$$

$M_i(t)$ 的二阶偏导数计算见公式 (8)。

$$\frac{\partial^2 M_i(t)}{\partial t^2} = M_i(t) \left[\frac{(t-T_i)^2}{\sigma_i^4} - \frac{1}{\sigma_i^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

令 $\frac{\partial^2 M_i(t)}{\partial t^2} = 0$, 则满足 $\sigma_i = |t - T_i|$, 高斯分量存在两个拐点, 分别为 $t = T_i - \sigma_i$ 和 $t = T_i + \sigma_i$ 。

9.2.2 高斯分量的波峰检测

在波形数据预处理后回波波形起止点范围内搜索波形采样点的幅值局部最大值，且该幅值局部最大值应大于回波波形的背景噪声阈值 th_{noise} ，检测出波形数据预处理后回波波形中高斯分量的波峰，波峰按照公式（9）检测。

$$\hat{y}_{j-2} < \hat{y}_{j-1} \ \& \ \hat{y}_{j-1} \leq \hat{y}_j \ \& \ \hat{y}_j > \hat{y}_{j+1} \ \& \ \hat{y}_{j+1} > \hat{y}_{j+2} \ \& \ (\hat{y}_{j-2} > th_{noise}) \ \& \ \cdots \ \& \ (\hat{y}_{j+2} > th_{noise}) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$\hat{y}_{j-2}$ ——波形数据预处理后回波波形第 $j-2$ 个采样点的幅值；

$\hat{y}_{j-1}$ ——波形数据预处理后回波波形第 $j-1$ 个采样点的幅值；

$\hat{y}_{j+1}$ ——波形数据预处理后回波波形第 $j+1$ 个采样点的幅值；

$\hat{y}_{j+2}$ ——波形数据预处理后回波波形第 $j+2$ 个采样点的幅值。

如果波形数据预处理后回波波形第 j 个采样点的幅值满足公式（9），则第 j 个采样点为一个波峰，依次检测出波形数据预处理后回波波形中所有高斯分量的波峰，得到高斯分量初始的个数、每个高斯分量初始的中心位置 T_i 、振幅 A_i 。

9.2.3 高斯分量的拐点检测

在波峰位置两侧，利用离散点二阶导数的数值微分公式，计算波形数据预处理后回波波形的二阶导数，从波峰分别向左侧和右侧进行拐点检测，拐点幅值应大于回波波形的背景噪声阈值，检测出波峰位置两侧的奇偶拐点，奇偶拐点按照公式（10）检测。

$$\hat{y}_j'' \cdot \hat{y}_{j+1}'' < 0 \ \& \ \hat{y}_j > th_{noise} \ \& \ \hat{y}_{j+1} > th_{noise} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\hat{y}_j''$ ——波形数据预处理后回波波形第 j 个采样点的二阶导数值；

$\hat{y}_{j+1}''$ ——波形数据预处理后回波波形第 $j+1$ 个采样点的二阶导数值。

如果波形数据预处理后回波波形的第 j 个采样点满足公式（10），则该采样点视为拐点，依次检测出波峰位置两侧的奇偶拐点。

9.2.4 高斯分量的初始值估计

高斯分量的振幅为波峰对应的幅值，该幅值是奇偶拐点区间内波形数据预处理后回波波形最大幅值，根据该幅值对应的两个相邻奇偶拐点位置，第 i 个高斯分量的振幅按照公式（11）计算。

$$A_i = \max(\hat{y}(T'_{2i-1} : T'_{2i})) \dots\dots\dots (11)$$

式中：

T'_{2i-1} ——第 i 个高斯分量的奇拐点，也称为左拐点位置；

T'_{2i} ——第 i 个高斯分量的偶拐点，也称为右拐点位置；

$\hat{y}(T'_{2i-1} : T'_{2i})$ ——回波波形的 T'_{2i-1} 和 T'_{2i} 位置之间采样点对应的幅值。

第 i 个高斯分量的中心位置为 T_i ，对应脉宽则为 $|T'_{2i-1} - T_i|$ 和 $|T'_{2i} - T_i|$ 中的较小值。

如果该高斯分量的振幅是整个波形中的最大幅值，则应对高斯分量的中心位置和脉宽参数重新进行估计。

第 i 个高斯分量的中心位置计算见公式（12）。

$$T_i = (T'_{2i-1} + T'_{2i})/2 \dots\dots\dots (12)$$

第 i 个高斯分量的脉宽计算见公式（13）。

$$\sigma_i = |T'_{2i-1} - T'_{2i}|/2 \dots\dots\dots (13)$$

9.3 发射波形高斯分量参数初始值估计

输入发射波形数据，按照 9.2 的方法完成发射波形高斯分量参数初始值估计。

9.4 波形拟合

9.4.1 拟合函数与参数更新

9.4.1.1 拟合函数

回波波形拟合函数见公式（14）。

$$Y(t) = \varepsilon_b + \sum_{i=1}^n A_i e^{\frac{-(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$Y(t)$ —— t 时刻的幅值；

ε_b ——回波波形的背景噪声偏差；

n ——高斯分量个数，宜不超过 8。

9.4.1.2 参数更新

利用泰勒级数将公式（14）展开，取至一次项后得到公式（B.2），建立公式（B.13）的误差方程，选择 LM 算法进行参数迭代优化，高斯分量参数 X 更新的增量按照公式（15）计算，公式（15）中的 $f(X)$ 计算见公式（16）。

$$dX = (J(X)^T J(X) + \mu I)^{-1} J(X)^T f(X) \dots\dots\dots (15)$$

$$f(X) = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T - [Y_X(t_1), Y_X(t_2), \dots, Y_X(t_N)]^T \dots\dots\dots (16)$$

式中：

dX ——高斯分量参数 X 更新的增量；

X ——高斯分量参数值 $[A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n]^T$ ；

$J(X)$ ——高斯分量参数 X 对应的雅克比矩阵，计算见公式（B.3）～公式（B.12）；

$J(X)^T$ ——雅克比矩阵 $J(X)$ 的转置；

μ ——阻尼系数，取值大于 0；

I ——单位矩阵；

$f(X)$ ——回波波形幅值与模型函数 $Y(t)$ 在 $t_1, t_2, \dots, t_N$ 时刻得到的拟合波形幅值之间的残差；

$y_1, y_2, \dots, y_N$ ——回波波形第 1～N 个采样点幅值；

$t_1, t_2, \dots, t_N$ ——第 1～N 个波形采样点的时刻；

$Y_X(t_j)$ ——将当前高斯分量参数值 X 代入公式（14）中，得到 t_j 时刻拟合波形（或拟合函数）幅值， $j = 1, 2, \dots, N$ 。

9.4.2 波形拟合精度判别准则

波形拟合精度按照公式（17）判别。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Y(t_j) - y_j)^2} < \varepsilon \dots\dots\dots (17)$$

式中：

$Y(t_j)$ ——拟合波形第 j 个采样点的幅值；

ε ——设定的拟合精度，设置为拟合残差的 RMSE 阈值，宜取 4.5 倍的噪声标准差作为评价标准。

如果波形拟合结果满足公式（17）的判别条件，则波形拟合精度符合要求。

9.4.3 回波波形优化拟合方法

9.4.3.1 回波波形优化拟合技术要求如下：

- 高斯分量中心位置之间的间隔应大于发射波形的 FWHM；
- 高斯分量的最小振幅应大于设定阈值（宜取值 $N_B \cdot \sigma_{noise}$ ）；
- 高斯分量的最小脉宽应不小于发射波形的脉宽；
- 高斯分量个数应不超过最大个数限制（宜不超过 8）。

注：发射波形的脉宽和发射波形的 FWHM 之间的关系见公式 D.1。

9.4.3.2 将高斯分量参数初始估计结果作为公式（15）的输入参数，选择 LM 算法进行高斯分量参数的迭代优化。

9.4.3.3 设置拟合残差 RMSE 的阈值，宜取 $4.5\sigma_{noise}$ 。如果 RMSE 大于阈值，则根据计算的拟合波形和观测波形之间每个采样点残差最大值对应的位置，增加一个新的高斯分量，重复 9.4.3.2 的方法。

9.4.3.4 在波形拟合过程中，高斯分量应满足 9.4.3.1 的要求，否则：

- a) 剔除不满足 9.4.3.1 b) 和 c) 要求的高斯分量；
- b) 对于不满足 9.4.3.1 a) 的要求，高斯分量应合并；
- c) 如果合并后的高斯分量个数不满足 9.4.3.1 d) 的要求，则按照合并后各个分量的积分面积继续合并，将波形中最小的积分面积合并到距离其最近较大的积分面积，直至满足高斯分量个数不多于最大限定个数的条件。

9.4.3.5 如果高斯分量满足 9.4.3.4 b) 和 c) 的合并条件，则按照以下方法进行高斯分量合并：

- a) 如果一个高斯分量的面积小于等于相邻高斯分量面积的 5%，应将其剔除，否则将高斯分量合并，合并后的高斯分量面积计算见公式 (18)；

$$Area_{new} = Area_{i-1} + Area_i \dots \dots \dots (18)$$

式中：

$Area_{new}$ ——合并后的高斯分量面积；

$Area_{i-1}$ ——参与合并的第 $i-1$ 个高斯分量面积；

$Area_i$ ——参与合并的第 i 个高斯分量面积。

- b) 合并后高斯分量的振幅计算见公式 (19)，高斯分量的中心位置计算见公式 (20)，高斯分量的脉宽计算见公式 (21)。公式(20)和公式(21)中的 w_{i-1} 、 w_i 计算分别见公式(22)和公式(23)。

$$A_{new} = \max(A_{i-1}, A_i) \dots \dots \dots (19)$$

$$T_{new} = w_{i-1} \cdot T_{i-1} + w_i \cdot T_i \dots \dots \dots (20)$$

$$\sigma_{new} = w_{i-1} \cdot \sigma_{i-1} + w_i \cdot \sigma_i \dots \dots \dots (21)$$

$$w_{i-1} = Area_{i-1} / Area_{new} \dots \dots \dots (22)$$

$$w_i = 1 - w_{i-1} \dots \dots \dots (23)$$

式中：

A_{new} ——合并后的高斯分量的振幅；

A_{i-1} ——第 $i-1$ 个高斯分量的振幅；

T_{new} ——合并后的高斯分量的中心位置；

w_{i-1} ——参与合并的第 $i-1$ 个高斯分量的面积权重；

T_{i-1} ——第 $i-1$ 个高斯分量的中心位置；

w_i ——参与合并的第 i 个高斯分量的面积权重；

σ_{new} ——合并后的高斯分量的脉宽；

σ_{i-1} ——第 $i-1$ 个高斯分量的脉宽。

9.4.3.6 按照 9.4.3.1~9.4.3.5 的方法完成处理后，如果高斯分量个数有变化，应重复 9.4.3.2 的方法和 9.4.3.4~9.4.3.5 的方法，直至高斯分量个数不再变化。

9.4.3.7 完成优化拟合后，应输出回波波形中包含的高斯分量个数、每个高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数。波形分解输出参数见附录 C，全波形数据处理结果和波形特征参数提取结果示例见附录 D，其中回波波形数据预处理结果示例见 D.1.2，回波波形处理结果示例见 D.1.3。全波形数据和波形特征参数格式示例见附录 E。

9.4.4 发射波形优化拟合方法

发射波形优化拟合应按照 9.4.3 的方法，但可不满足 9.4.3.1 的技术要求。完成发射波形优化拟合后，输出发射波形的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数。发射波形处理结果示例见附录 D.1.1。

9.4.5 波形分解质量控制

9.4.5.1 回波波形分解质量控制

按照 9.4.2 的方法，回波波形拟合残差应符合 5.2 的要求。如果满足此条件，则判定回波波形拟合效果好，否则判定回波波形拟合效果差。

9.4.5.2 发射波形拟合质量控制

按照9.4.2的方法，发射波形拟合残差应符合5.2的要求。如果满足此条件，则判定发射波形拟合效果好，否则判定发射波形拟合效果差。

10 波形特征参数提取

10.1 输入回波波形和基础波形特征参数

10.1.1 预处理后回波波形

输入波形数据预处理后的回波波形。

10.1.2 基础波形特征参数

按照第9章的方法完成处理后，输入以下参数：

- a) 发射波形和回波波形中的高斯分量个数和每个高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等波形基础特征参数（示例见D.2.1.1和D.2.1.2）；
- b) 回波波形的背景噪声阈值、回波波形有效信号的起始和结束时刻。

10.2 波形分位数高度提取

计算回波波形有效信号的起始时刻和结束时刻之间的有效信号总能量，即回波总能量。从回波波形有效信号的结束时刻开始，计算回波波形某一位置的回波能量累积值相对回波波形有效信号总能量占比的分位数，计算该分位数的对应位置与地面回波峰值位置之间的距离，得到波形分位数高度。

注：常用的波形分位数高度有25%、50%、75%以及100%，即 H_{25} 、 H_{50} 、 H_{75} 和 H_{100} ，其中50%的波形分位数高度 H_{50} 为HOME（示例见D.2.2）。

10.3 波形高度指数提取

10.3.1 波形全高

波形全高计算见公式（24）。

$$L_W = t_{End} - t_{Beg} \dots \dots \dots (24)$$

式中：

L_W ——波形全高；

t_{Beg} ——回波波形有效信号的起始时刻；

t_{End} ——回波波形有效信号的结束时刻。

波形全高参数提取结果示例见图D.7。

10.3.2 波形长度

波形长度计算见公式（25）。

$$L_D = T_{peakG} - t_{Beg} \dots \dots \dots (25)$$

式中：

L_D ——波形长度，可表征冠层高度；

T_{peakG} ——最后一个高斯分量的中心位置。

波形长度参数提取结果示例见图D.8。

10.3.3 波峰长度

波峰长度计算见公式（26）。

$$L_P = T_{peakG} - T_{peak0} \dots \dots \dots (26)$$

式中：

L_P ——波峰长度；

T_{peak0} ——第一个高斯分量的中心位置。

波峰长度参数提取结果示例见图D.9。

10.3.4 波形前缘长度

波形前缘长度计算见公式（27）。

$$L_L = T_{peak0} - t_{Beg} \dots \dots \dots (27)$$

式中：

L_L ——波形的前缘长度。

波形前缘长度参数提取结果示例见图 D. 10。

10.3.5 波形后缘长度

波形后缘长度计算见公式（28）。

$$L_T = t_{End} - T_{peakG} \dots \dots \dots (28)$$

式中：

L_T ——波形的后缘长度。

波形后缘长度参数提取结果示例见图 D. 11。

10.4 波形能量指数提取

10.4.1 计算回波波形有效信号的起始时刻至结束时刻之间的面积，得到回波总能量，结果示例见图 D. 12。

10.4.2 计算回波绝对能量与发射能量之比，得到回波相对能量，表征地表反射率，计算见公式（29）。

$$r_E = \frac{E_R}{E_T} \dots \dots \dots (29)$$

式中：

r_E ——回波相对能量；

E_T ——发射能量；

E_R ——回波绝对能量。

10.4.3 计算地面回波的能量累计值，得到地面回波能量，见公式（30），结果示例见图 D. 13。

$$e_G = \int_{t_{GBeg}}^{t_{GEnd}} A_G e^{\frac{-(t-T_G)^2}{2\sigma_G^2}} \dots \dots \dots (30)$$

式中：

e_G ——地面回波能量；

t ——回波波形采样点的时刻；

t_{GBeg} ——地面回波高斯分量的起始时刻；

t_{GEnd} ——地面回波高斯分量的结束时刻；

A_G ——地面回波高斯分量的振幅；

T_G ——地面回波高斯分量的中心位置；

σ_G ——地面回波高斯分量的脉宽。

注：如果激光光斑落在海面或者冰面，则地面回波的能量和相关参数可替换为海面或者冰面的能量和相关参数。

10.4.4 计算回波能量中去除地面回波能量值后的剩余值，得到冠层回波能量，结果示例见图 D. 14。

10.4.5 计算地面回波能量与冠层回波能量的比值，得到地表回波能量比例，见公式（31）。

$$r_G = \frac{e_G}{e_C} \dots \dots \dots (31)$$

式中：

r_G ——地表回波能量比例；

e_C ——冠层回波能量。

10.4.6 计算冠层回波能量占回波总能量的比例，得到冠层回波能量比例，见公式（32）。

$$r_C = \frac{e_C}{e_R} \dots \dots \dots (32)$$

式中：

r_C ——冠层回波能量比例；

e_R ——回波总能量。

11 过程记录

在对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理过程中，软件自动记录生成的筛选数据、波形数据预处理后的数据和参数、波形分解得到的基础波形特征参数、波形特征参数提取得到的专题波形特征参数。具体参数见表 C.1。

12 成果整理与资料归档

12.1 成果整理

12.1.1 波形相关数据和参数

整理下列波形相关数据及参数：

- 波形数据预处理后的发射波形和回波波形；
- 回波波形的高斯滤波宽度参数、背景噪声相关参数、回波波形有效信号起始和结束时刻；
- 发射波形和回波波形的高斯分量个数和高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数；
- 回波波形的分位数高度、高度指数和能量指数等专题波形特征参数；
- 其他。

12.1.2 技术总结和检查报告

技术总结按照CH/T 1001的要求编写，检查报告按照GB/T 18316的要求编写。

12.2 资料归档

归档介质为光盘、磁带或硬盘等，归档资料包括：

- a) 激光全波形数据和辅助数据；
- b) 波形的相关数据和参数；
- c) 技术总结和检查报告；
- d) 其他。

附录 A
(资料性)

激光全波形数据和辅助数据

卫星下传的激光原始二进制数据经过解包后得到激光全波形数据和辅助数据，激光全波形数据格式采用HDF5文件格式存储，包含发射波形数据、回波波形数据、辅助数据，激光全波形数据见表A. 1，辅助数据见表A. 2。

表A.1 激光全波形数据

数据项	单位	数据类型	示例	备注
光斑ID	—	无符号整型	706543945	
发射波形数据	—	整型	... 149 160 167 176 180 188 187 187 183 181 173 ...	以高分七号卫星激光测高仪为例，以0.5 ns的采样间隔所获得的各个时间的电压值或归一化的相对值
发射波形采样点数	个	无符号整型	400	
回波波形数据	—	整型	... 196 209 217 224 226 228 222 215 205 196 182 ...	以高分七号卫星激光测高仪为例，以0.5 ns的采样间隔所获得的各个时间的电压值或归一化的相对值
回波波形采样点数	个	无符号整型	800或1600	

表 A.2 辅助数据

数据项	单位	数据类型	示例	备注
累积秒	s	双精度浮点型	185109062.000	以高分七号卫星激光测高仪为例，列出各数据项数值示例
激光发射时刻	ns	双精度浮点型	264268.158	
激光同步触发 信号时刻	ns	双精度浮点型	2204.350	
激光发射波形 起点时刻	ns	双精度浮点型	4818.600	
回波波形起点时刻	ns	双精度浮点型	3351193.581	
激光渡越时间粗值	ns	双精度浮点型	3351193.740	

附录 B (资料性) 全波形数据处理方法

B.1 常用的全波形数据处理方法

常用的全波形数据处理方法有高斯分解法、小波分解法和波形反卷积法等，总体步骤一般为波形数据预处理和波形处理，对于不同的全波形数据处理方法，对应的波形处理过程有所差异。小波分解法适用于提取全波形数据中的弱回波信号，能够检测出信号细节；波形反卷积法适用于从全波形数据中分离并提取地物垂直分布，且波形反卷积无需先验知识，不需要对初始值进行估计；高斯分解法较为成熟且应用最为广泛，本文件采用高斯分解法进行全波形数据的处理。

B.2 高斯分解法

B.2.1 原理

假设理想波形为高斯混合模型，将回波波形表达为多个高斯函数的叠加，回波波形 y_j （其中 $j = 1, 2, \dots, N$ ， N 为波形总采样数）按照公式（14）的拟合函数表达。高斯分解包括波形数据预处理、初始值估计、波形拟合等过程。

根据公式（14），高斯模型函数的结果和回波波形之间的误差函数见公式（B.1）。

$$f_j(X) = y_j - Y_X(t_j), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.1})$$

式中：

$f_j(X)$ ——当前的 $[A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n] = X$ 时，回波波形幅值 y_j 与模型函数 $Y(t)$ 在 t_j 时刻得到的拟合波形幅值 $Y_X(t_j)$ 之间的误差；

t_j ——第 j 个回波波形采样点的时刻。

利用泰勒级数将公式（14）展开，并取到一次项后得到公式（B.2）。

$$f(X + dX) = f(X) + J(X)dX + O(\|dX^2\|) \quad (\text{B.2})$$

式中：

$f(X + dX)$ ——当 $[A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n] = X + dX$ 时，误差函数计算得到的拟合波形幅值；

$J(X)$ ——当前的 $[A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n] = X$ 时，计算得到的误差函数的雅克比矩阵；

$O(\|dX^2\|)$ ——比 dX^2 更高阶的无穷小量；

dX ——高斯分量参数更新的增量 $[dA_1, dT_1, d\sigma_1, \dots, dA_n, dT_n, d\sigma_n]^T$ ；

dA_1 ——高斯分量的振幅参数 A_1 更新的增量；

dT_1 ——高斯分量的中心位置参数 T_1 更新的增量；

$d\sigma_1$ ——高斯分量的脉宽参数 σ_1 更新的增量；

⋮

dA_n ——高斯分量的振幅参数 A_n 更新的增量；

dT_n ——高斯分量的中心位置参数 T_n 更新的增量；

$d\sigma_n$ ——高斯分量的脉宽参数 σ_n 更新的增量。

根据公式（B.1）中的误差函数 $f_j(X)$ ，每一个回波波形采样点 (t_j, y_j) ，均对应一个误差函数，设 $y = Y(t)$ ，对待求解的高斯分量参数 $A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n$ 求导，得到 $a_{j1}, b_{j1}, c_{j1}, \dots, a_{jn}, b_{jn}, c_{jn}$ ，其中 $j = 1, 2, \dots, N$ ，计算见公式（B.3）～公式（B.11）。

$$a_{j1} = \frac{\partial y}{\partial A_1} = e^{\frac{-(t_j - T_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (\text{B.3})$$

$$b_{j1} = \frac{\partial y}{\partial t_1} = A_1 \frac{(t_j - T_1)}{\sigma_1^2} e^{\frac{-(t_j - T_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (\text{B.4})$$

$$c_{j1} = \frac{\partial y}{\partial \sigma_1} = A_1 \frac{(t_j - T_1)^2}{\sigma_1^3} e^{-\frac{(t_j - T_1)^2}{2\sigma_1^2}} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$a_{j2} = \frac{\partial y}{\partial A_2} = e^{-\frac{(t_j - T_2)^2}{2\sigma_2^2}} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$b_{j2} = \frac{\partial y}{\partial t_2} = A_2 \frac{(t_j - T_2)}{\sigma_2^2} e^{-\frac{(t_j - T_2)^2}{2\sigma_2^2}} \dots\dots\dots (B.7)$$

$$c_{j2} = \frac{\partial y}{\partial \sigma_2} = A_2 \frac{(t_j - T_2)^2}{\sigma_2^3} e^{-\frac{(t_j - T_2)^2}{2\sigma_2^2}} \dots\dots\dots (B.8)$$

.....

$$a_{jn} = \frac{\partial y}{\partial A_n} = e^{-\frac{(t_j - T_n)^2}{2\sigma_n^2}} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$b_{jn} = \frac{\partial y}{\partial t_n} = A_n \frac{(t_j - T_n)}{\sigma_n^2} e^{-\frac{(t_j - T_n)^2}{2\sigma_n^2}} \dots\dots\dots (B.10)$$

$$c_{jn} = \frac{\partial y}{\partial \sigma_n} = A_n \frac{(t_j - T_n)^2}{\sigma_n^3} e^{-\frac{(t_j - T_n)^2}{2\sigma_n^2}} \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

$a_{j1}, b_{j1}, c_{j1}, \dots, a_{jn}, b_{jn}, c_{jn}$ ——每一个回波波形采样点 (t_j, y_j) 均对应一个误差函数, 对待求解的高斯分量参数 $A_1, T_1, \sigma_1, \dots, A_n, T_n, \sigma_n$ 分别求导得到的结果, 其中 n 为高斯分量个数, $j = 1, 2, \dots, N$ 。

按照公式 (B.2) ~ 公式 (B.11), 得到雅克比矩阵, 见公式 (B.12)。

$$J(X) = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{11} & \cdots & c_{1n} \\ a_{21} & b_{21} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & b_{N1} & \cdots & c_{Nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.12)$$

式中:

$J(X)$ ——高斯分量参数 X 对应的雅克比矩阵。

根据雅克比矩阵 $J(X)$, 建立误差方程, 见公式 (B.13)。

$$V = AdX - L \dots\dots\dots (B.13)$$

式中:

V ——误差项;

A —— $J(X)$;

dX —— $[dA_1, dT_1, d\sigma_1, dA_2, dT_2, d\sigma_2, \dots, dA_n, dT_n, d\sigma_n]^T$ 。

B.2.2 波形数据预处理

B.2.2.1 常用的全波形数据平滑滤波方法

全波形数据预处理过程中, 常用的平滑滤波方法有高斯滤波、小波降噪、均值滤波方法等, 其中高斯滤波法能够较好地抑制全波形数据中的高斯白噪声, 且该方法较为成熟、稳定、应用最为广泛, 本文件采用高斯滤波法。

B.2.2.2 高斯滤波法

高斯滤波法见 8.2。

B.2.2.3 小波降噪法

B.2.2.3.1 小波降噪原理

将回波波形进行小波变换, 经小波变换后, 回波波形有效信号的小波系数幅值要大于噪声的系数幅值, 采用阈值的方法将回波波形有效信号系数保留, 将大部分噪声系数减小至 0。常见的阈值

函数有硬阈值法和软阈值法两种，选择其中一种阈值函数用于小波系数的处理，并对处理后获得的小波系数用逆小波变换进行重构，得到去噪后的回波波形。

B.2.2.3.2 小波降噪

小波降噪方法如下：

- a) 对含噪声的回波波形进行小波变换，得到小波系数向量；
- b) 设定小波系数阈值，幅值低于该阈值的小波系数置为0，高于该阈值的小波系数进行保留；
- c) 对处理后的小波系数进行小波逆变换，得到去噪后的回波波形。

B.2.2.4 均值滤波法

在回波波形中选择一定大小的邻域窗口，计算待处理采样点邻域内回波波形采样点幅值的平均值，并将该均值作为该采样点平滑滤波后的幅值，以同样的方式对回波波形的采样点进行遍历，完成对回波波形的平滑滤波处理。

B.2.2.5 回波波形平滑滤波步骤

计算背景噪声的均值和标准差，设置背景噪声阈值，对回波波形进行平滑滤波，具体步骤如下：

- a) 选取回波波形结尾背景噪声部分一定个数的采样点；
- b) 计算回波波形背景噪声的均值和标准差；
- c) 计算背景噪声阈值；
- d) 利用高斯滤波对回波波形进行平滑滤波。

具体计算过程见第8章。

B.2.3 高斯分量参数初始值估计

对波形数据预处理后的回波波形进行波峰检测，在检测到的每个波峰两侧，利用数值微分公式计算波形采样点的二阶导数，用于检测波峰两侧的拐点，回波波形采样点的幅值应大于设定噪声阈值。利用检测的回波波形的波峰和拐点，估计高斯分量参数初始值，具体计算过程见9.2和9.3。

B.2.4 波形拟合

完成高斯分量参数初始估计后，将结果代入公式(14)，采用迭代优化算法对回波波形进行优化拟合。拟合过程见9.4.3，回波波形分解质量控制见9.4.5，回波波形拟合完成后，实现对回波波形的分解处理，输出回波波形中的高斯分量个数以及高斯分量的振幅、中心位置和脉宽等参数。

输入发射波形数据，进行波形拟合，具体方法见B.2.2~B.2.4。

B.3 小波分解法

B.3.1 原理

从具有正则性、局部性和震荡性的基本小波函数中心出发，经伸缩和平移得到函数族，表达式见公式(B.14)。

$$h_{a,b}(t) = a^{-1/2} h\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0, \quad b \in R \dots\dots\dots (B.14)$$

式中：

$h_{a,b}(t)$ ——伸缩和平移后得到的函数族；

h ——小波基函数；

a ——小波函数空间尺度（也称为小波函数的缩放比例）；

b —— h 函数中心所在的位置（也称为小波函数的平移）。

常用的小波基函数有：Haar 小波、Daubechies 小波、Meyer 小波、Morlet 小波、Marr 小波等。选择小波基函数 h 后，将回波波形与 h 函数进行卷积，见公式(B.15)。

$$W_f(a,b) = \frac{1}{a} \int_{t_b}^{t_e} y(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \dots\dots\dots (B.15)$$

式中：

$W_f(a,b)$ ——小波系数；

t_e ——回波波形有效信号的结束时刻；

t_b ——回波波形有效信号的起始时刻；

$y(t)$ ——在 t 时刻回波波形的幅值。

对回波波形进行小波变换得到不同尺度的小波系数。在同一小波尺度下，根据小波分析得到小波系数向量，采用局部最大值法对小波系数向量进行峰值检测，得到该小波尺度的波形分量个数。在不同小波尺度下，根据小波分析结果逼近强度的对称性进行判断，找出最优峰值位置。

B.3.2 波形数据预处理

对回波波形估计背景噪声水平，采用高斯滤波对回波波形进行去噪。具体方法同B2.2。

B.3.3 小波基函数的选择

小波基函数选用Haar小波或Marr小波。

B.3.4 小波变换

选择递增的小波函数空间尺度，根据公式（B.15），将公式（B.14）的函数族与回波波形进行卷积，实现对波形数据预处理后回波波形的小波变换，得到不同尺度的小波系数，每一个空间尺度对应一个小波系数向量。

B.3.5 波峰检测

波峰检测方法如下：

- 寻找每一个小波系数向量的局部最大值，检测回波波形的波峰；
- 根据小波分析后结果逼近强度的对称性，在不同小波尺度下，对同一位置波峰进行逼近强度的对称性比较，寻找最优对称性；
- 最优对称性对应的峰值位置为最优；
- 重复b)～c)的步骤，得到回波波形在不同小波尺度下的最优峰值。输出波峰振幅大小和对应的时刻，完成回波波形中波峰信息的提取。

B.4 波形反卷积法

B.4.1 原理

接收的回波波形为发射脉冲与地表目标响应的卷积，通过反卷积得到地表响应信号。表达式见公式（B.16）。

$$y(t) = x_c(t) * h_c(t) \dots\dots\dots (B.16)$$

式中：

$y(t)$ ——在 t 时刻回波波形的幅值；

$x_c(t)$ ——地表目标响应；

$h_c(t)$ ——发射脉冲信号。

根据公式（B.16），求解 $x_c(t)$ 得到解卷积的结果。如果不存在系统噪声，地表目标响应根据上述公式得到。先进行噪声滤波，实现噪声去除。之后进行反卷积。采用非线性迭代的方法处理全波形数据。

B.4.2 波形数据预处理

对回波波形估计背景噪声水平，采用高斯滤波对回波波形进行去噪。具体方法同B2.2。

B.4.3 波形反卷积

宜采用非线性迭代方法，如Gold算法，进行波形数据预处理后回波波形的反卷积，根据波形数据预处理后回波波形反卷积的结果，利用局部最大值进行峰值检测，提取波峰振幅大小和对应的时刻信息。

附 录 C
(资料性)
波形分解输出参数

表 C.1 给出了全波形数据处理输出参数清单。

表 C.1 输出参数清单

输出参数	参数名称	单位	数据类型	说明
波形数据 预处理后 得到的数 据和参数	背景噪声平均值	—	单精度浮点型	选取波形的噪声样本，计算其平均值得到
	背景噪声标准差	—	单精度浮点型	选取波形的噪声样本，计算其标准差得到
	回波波形的背景噪声阈 值	—	单精度浮点型	计算波形背景噪声标准差的若干倍与背景 噪声平均值相加之和得到，倍数宜取值 为 4.5
	波形最小幅值，包括发射 波形和回波波形	—	单精度浮点型	波形的最小幅值
	波形最大幅值，包括发射 波形和回波波形	—	单精度浮点型	波形的最大幅值
	回波波形最大幅值对应 位置	样本 帧数	单精度浮点型	相对于回波波形第一个采样点的帧数，可 通过辅助数据换算得到对应的ns时刻
	高斯滤波设置宽度	ns	单精度浮点型	根据波形的信噪比情况和应用场景，设置 不同的高斯滤波核函数的RMS脉宽
	波形有效信号起始时刻 检测阈值	—	单精度浮点型	用于检测最顶部有效信号返回时刻，阈值 设置范围为：背景噪声平均值+ $N \cdot \sigma$ ， σ 为 背景噪声标准差，N取值范围宜为：3~4.5
	波形有效信号起始时刻	样本 帧数	单精度浮点型	检测到的最顶部有效信号返回时刻
	波形有效信号结束时刻 检测阈值	—	单精度浮点型	用于检测最底部有效信号返回时刻，阈值 设置范围为： $N \cdot \sigma$ ， σ 为背景噪声标准差， N取值范围宜为：3~4.5
	波形有效信号结束时刻	样本 帧数	单精度浮点型	检测到的最底部有效信号返回时刻
	波形数据预处理后发射 波形	—	单精度浮点型	经过背景噪声水平估计和平滑滤波后的发 射波形
	波形数据预处理后回波 波形	—	单精度浮点型	经过背景噪声水平估计和平滑滤波后的回 波波形 与对地观测卫星激光测高数据产品中2B 级产品的“m_Wf”回波波形参数字段对 应

表 C.1 输出参数清单（续）

输出参数	参数名称		单位	数据类型	说明
	回波波形信噪比		dB	单精度浮点型	计算回波波形信号与噪声之间的比率 与对地观测卫星激光测高数据产品中 2B级产品的“m_Wf_SNR”回波波形 信噪比参数字段对应
	波形数据预处理后回波波形的信噪比		dB	单精度浮点型	计算波形数据预处理后回波波形的信 噪比
	回波饱和标记		—	无符号整形	1表示饱和，0表示未饱和
波形分解后 得到的基础 波形特征参 数	高斯分量个数		个	无符号整形	经过波形分解后从波形中得到的高斯 分量个数 与对地观测卫星激光测高数据产品中 2B级产品的“m_Gauss_Num”回波波 形高斯分解个数参数字段对应
	高斯分量振幅		—	单精度浮点型	经过波形分解后从波形中得到的每个 高斯分量的振幅 与对地观测卫星激光测高数据产品中 2B级产品的“m_Gauss_A”回波波形 高斯函数幅值参数字段对应
	高斯分量中心位置		样本 帧数	单精度浮点型	经过波形分解后从波形中得到的每个 高斯分量的中心位置 与对地观测卫星激光测高数据产品中 2B级产品的“m_Gauss_Miu”回波波 形高斯分解均值位置参数字段对应
	高斯分量脉宽		样本 帧数	单精度浮点型	经过波形分解后从波形中得到的每个 高斯分量的脉宽 与对地观测卫星激光测高数据产品中 2B级产品的“m_Gauss_Sigma”回波 波形高斯函数标准差参数字段对应
	波 形 分 位 数 参 数	波形分位数高度	样本 帧数	单精度浮点型	计算回波波形中某一位置的能量积累 值相对有效信号总能量占比的分位数 该分位数的对应位置与地面回波峰值 位置之间的距离即为波形分位数高度

表 C.1 输出参数清单（续）

输出参数	参数名称		单位	数据类型	说明
波形特征 参数提取 后得到的 专题波形 特征参数	波形 高度 指数	波形全高	样本 帧数	单精度浮点型	计算回波波形有效信号的起始时刻和结束时刻之间的范围长度获取波形全高
		波形长度	样本 帧数	单精度浮点型	计算回波波形有效信号的起始时刻到最后一个高斯分量的中心位置之间的长度获取波形长度
		波峰长度	样本 帧数	单精度浮点型	计算第一个高斯分量的中心位置与最后一个高斯分量的中心位置之间的距离获取波峰长度
		波形前缘长度	样本 帧数	单精度浮点型	计算回波波形有效信号的起始时刻到波形分解后的第一个高斯分量的中心位置之间的距离获取波形前缘长度
		波形后缘长度	样本 帧数	单精度浮点型	计算波形分解后获得的地面高斯分量的中心位置与回波波形有效信号的结束时刻之间的距离获取波形后缘长度
	波形 能量 指数	回波总能量	—	单精度浮点型	计算回波波形有效信号的起始时刻至结束时刻之间的面积，得到回波总能量
		回波相对能量	—	单精度浮点型	计算回波绝对能量与发射能量之比，得到回波相对能量，表征地表反射率
		地面回波能量	—	单精度浮点型	计算地面高斯分量的能量累计值，得到地面回波能量
		冠层回波能量	—	单精度浮点型	计算回波能量中去除地面波峰能量值后的剩余值，得到冠层回波能量
		地面回波能量比例	—	单精度浮点型	计算地面回波能量与冠层回波能量的比值，得到地表回波能量比例
		冠层回波能量比例	—	单精度浮点型	计算冠层回波能量占回波总能量的比例，得到冠层回波能量比例

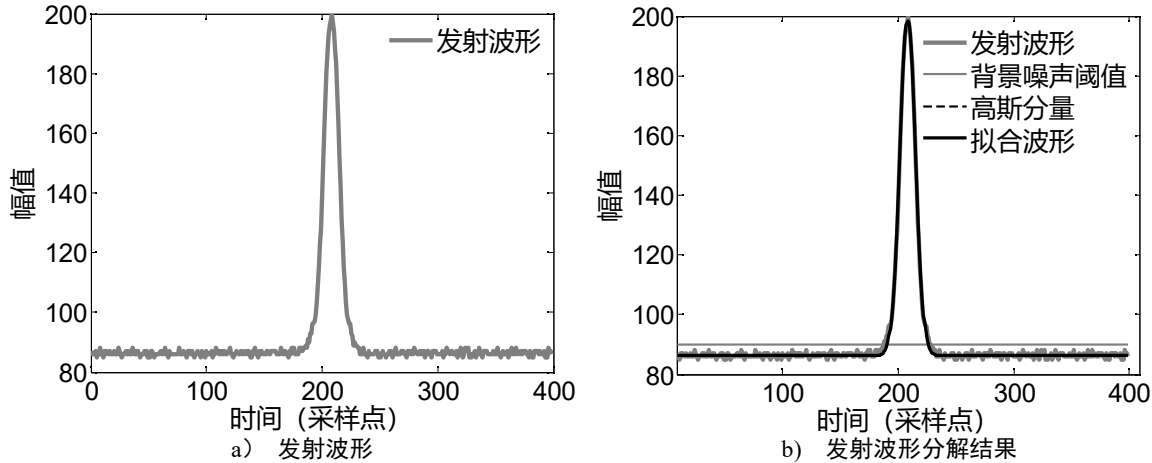
附录 D
(资料性)

全波形数据处理结果和波形特征参数提取结果示例

D.1 全波形数据处理结果示例

D.1.1 发射波形处理结果示例

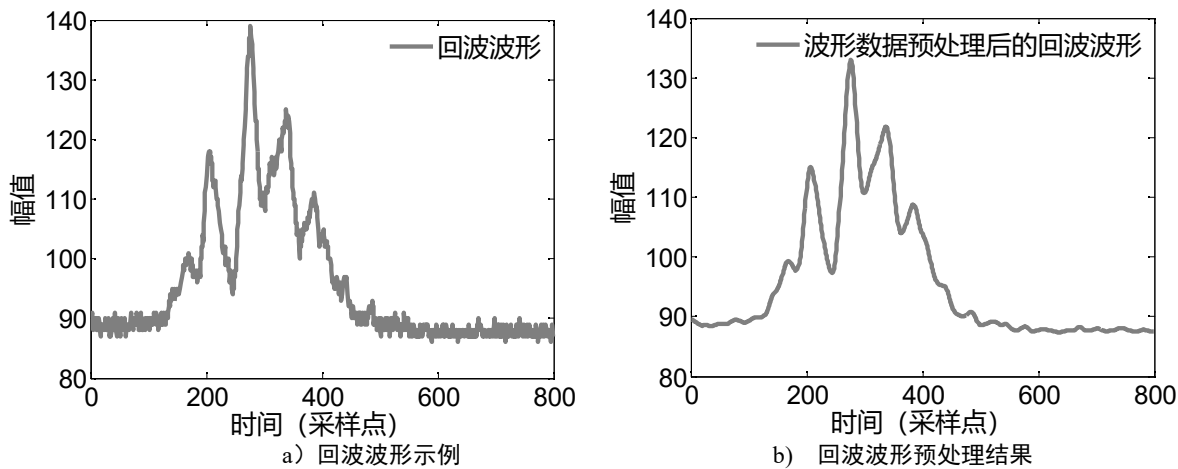
发射波形处理结果示例见图D.1。



图D.1 发射波形处理结果示例

D.1.2 回波波形数据预处理结果示例

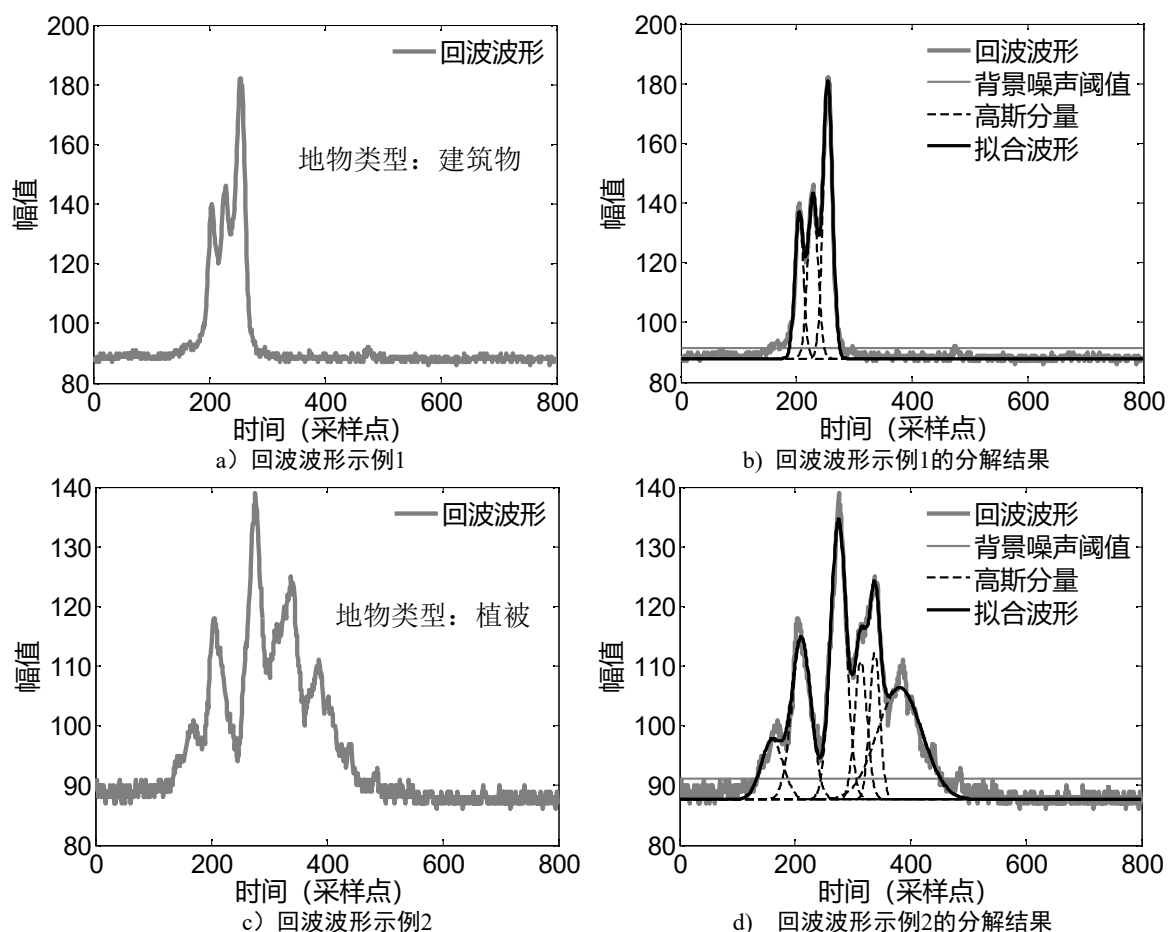
回波波形数据预处理结果示例见图D.2。



图D.2 回波波形数据预处理结果示例

D.1.3 回波波形处理结果示例

回波波形处理结果示例见图D.3。



图D.3 回波波形处理结果示例

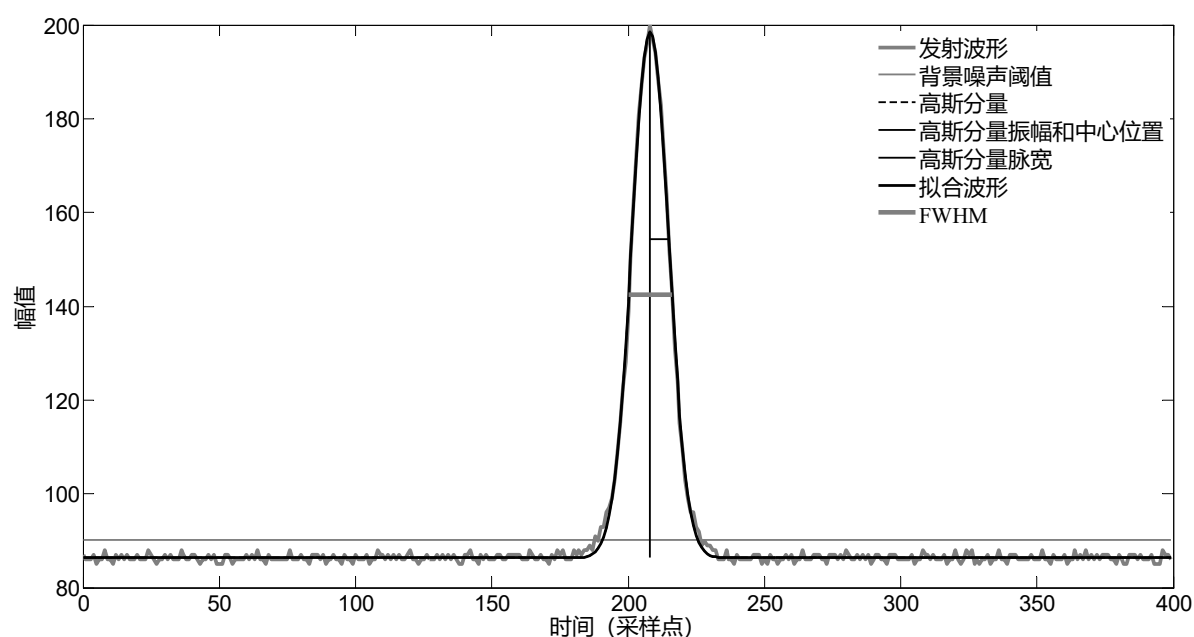
D.2 波形特征参数示例

D.2.1 基础波形特征参数示例

D.2.1.1 发射波形的基础波形特征参数示例

根据D.1的波形处理结果，得到发射波形高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数，发射波形的基础波形特征参数示例见图D.4。发射波形只有1个高斯分量，高斯分量的脉宽设为 σ_e ，则FWHM与 σ_e 的关系见公式(D.1)。

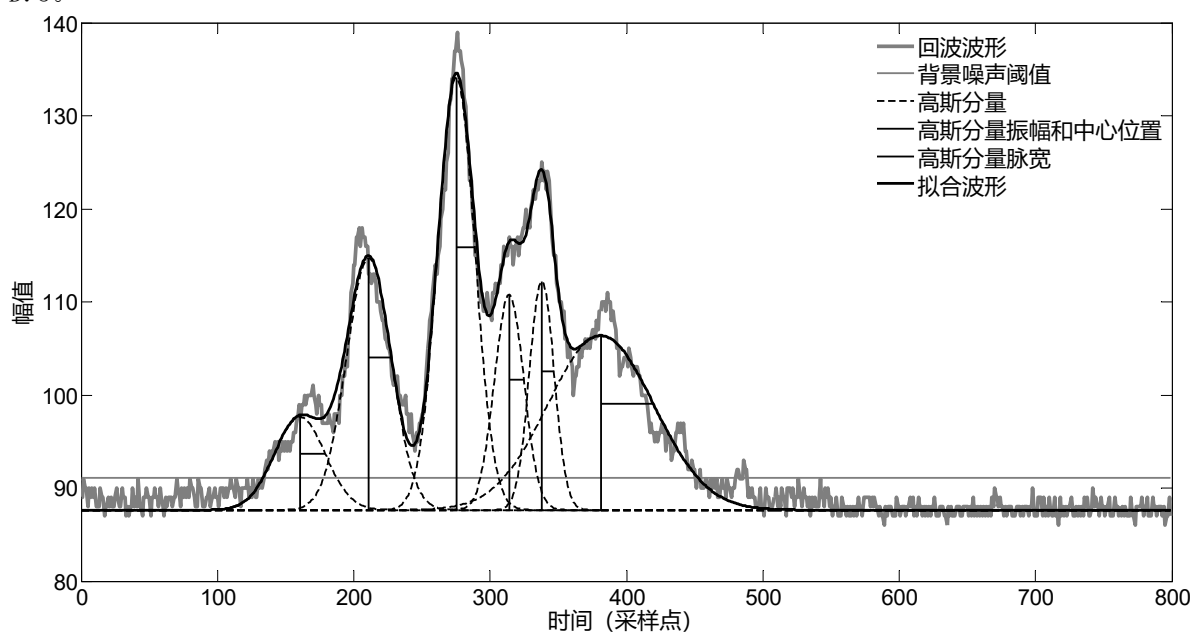
$$FWHM = 2\sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma_e \approx 2.355 \cdot \sigma_e \dots \dots \dots (D.1)$$



图D.4 发射波形的基础波形特征参数示例

D. 2. 1. 2 回波波形的基础波形特征参数示例

回波波形的基础波形特征参数示例如图D. 5所示。根据D. 1的波形处理结果，得到回波波形中每个高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数，回波波形的基础波形特征参数示例见图D. 5。

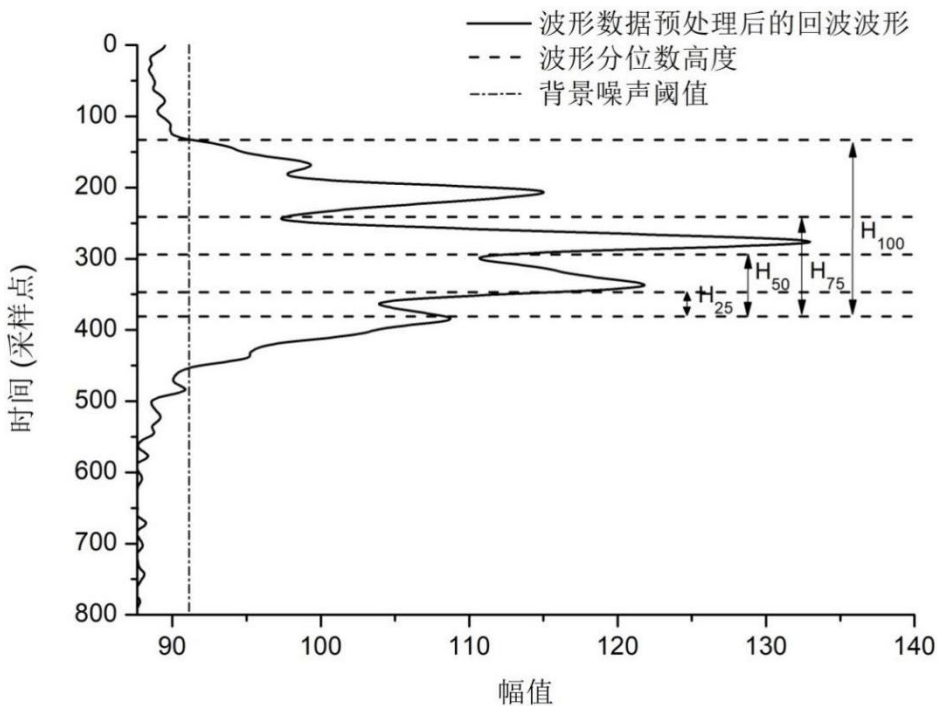


图D.5 回波波形的基础波形特征参数示例

D. 2. 2 专题波形特征参数示例

D. 2. 2. 1 波形分位数高度示例

在回波波形的基础波形特征参数提取的基础上，进行波形分位数高度提取，波形分位数高度示例见图D. 6。图D. 6中依次标记了 H_{25} 、 H_{50} 、 H_{75} 、 H_{100} 的位置。



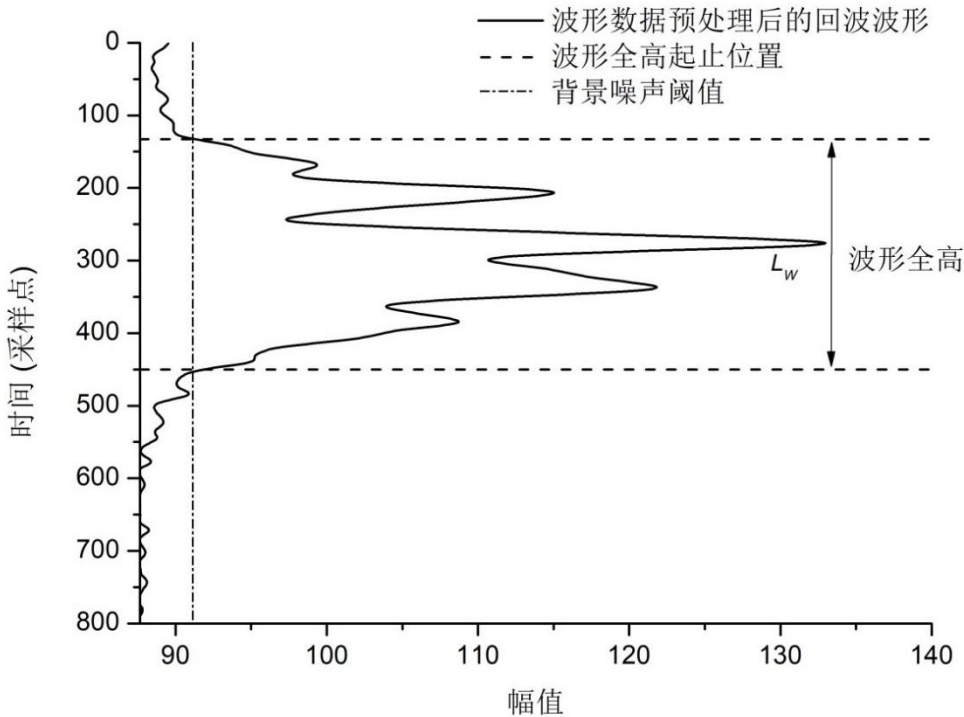
注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.6 波形分位数高度示例

D. 2. 2. 2 波形高度指数示例

D. 2. 2. 2. 1 波形全高

图 D. 7 为波形全高参数提取结果示例。

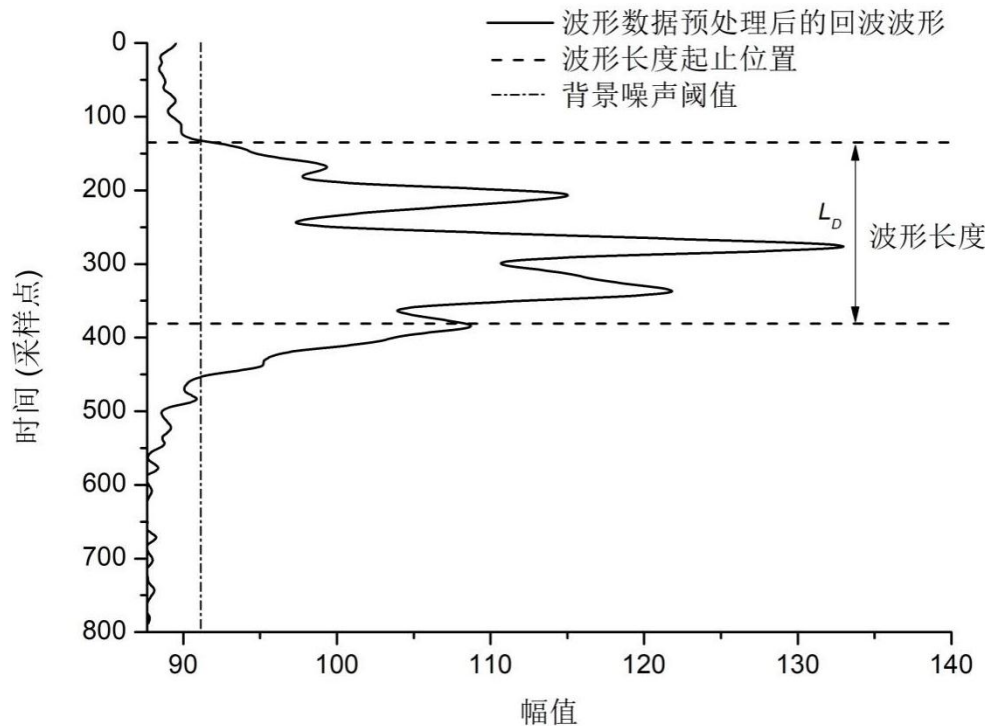


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.7 波形全高参数提取结果示例

D. 2. 2. 2. 2 波形长度

图 D. 8 为波形长度参数提取结果示例。

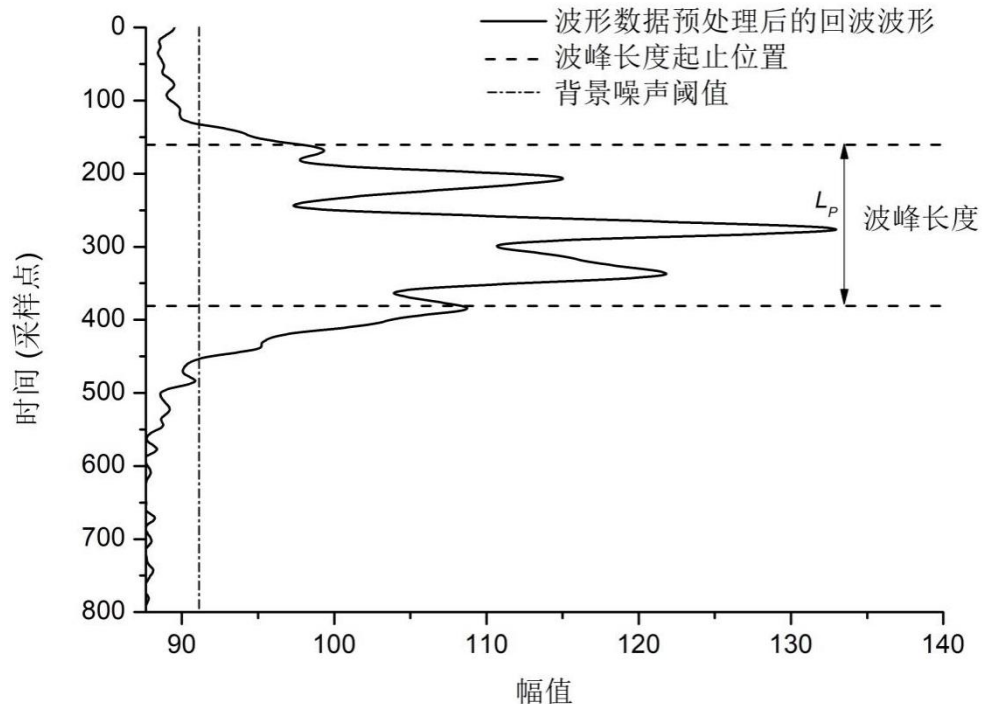


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.8 波形长度参数提取结果示例

D. 2. 2. 2. 3 波峰长度

图 D. 9 为波峰长度提取结果示例。

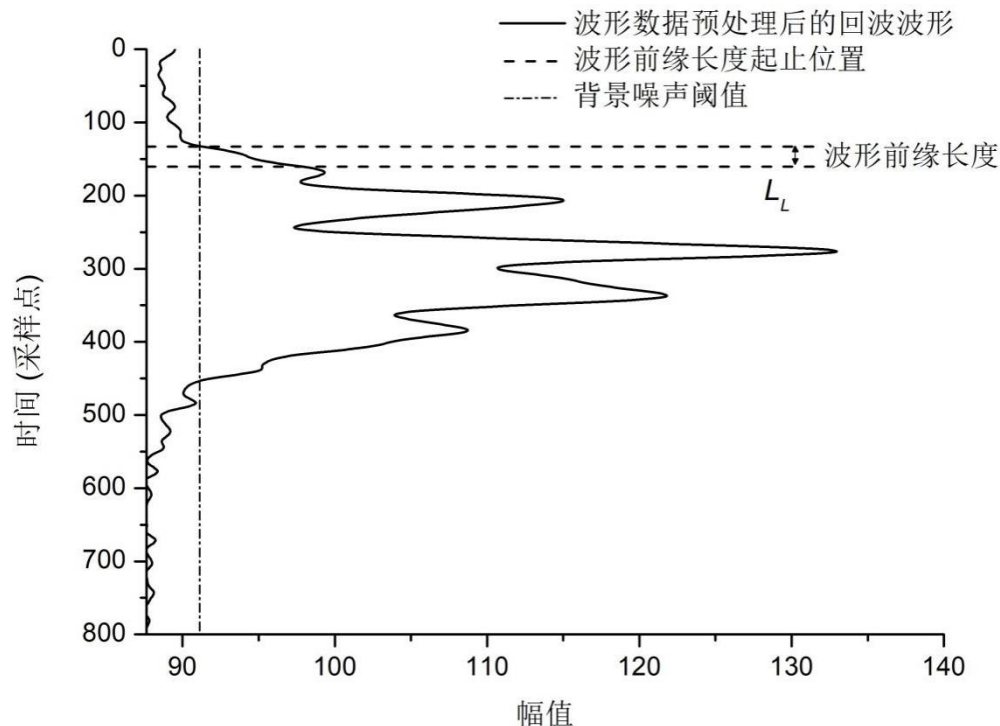


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.9 波峰长度提取结果示例

D. 2. 2. 2. 4 波形前缘长度

图 D. 10 为波形前缘长度参数提取结果示例。

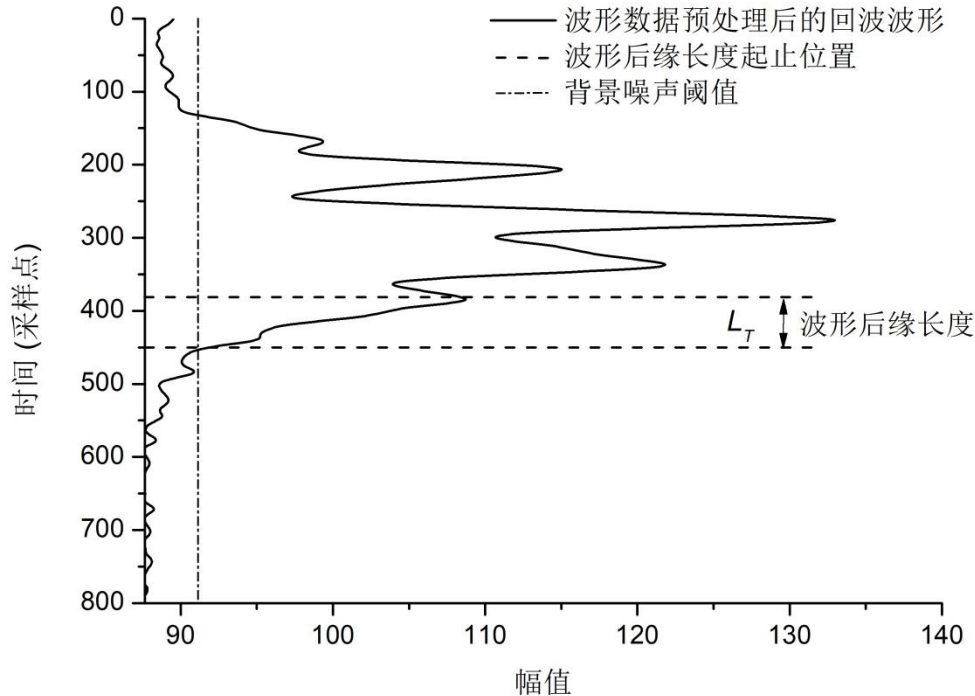


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.10 波形前缘长度参数提取结果示例

D. 2. 2. 2. 5 波形后缘长度

图 D. 11 为波形后缘长度参数提取结果示例。



注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

图 D.11 波形后缘长度参数提取结果示例

D. 2. 2. 3 波形能量指数示例

D. 2. 2. 3. 1 回波总能量

图 D. 12 为回波总能量示例。

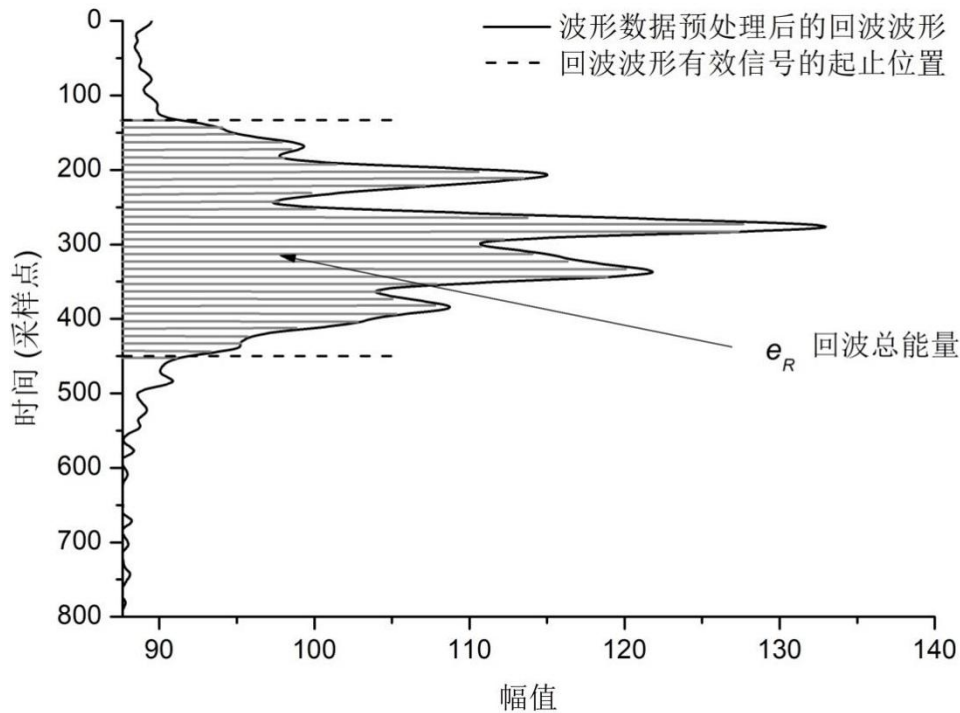


图 D.12 回波总能量示例

D. 2. 2. 3. 2 地面回波能量

图 D. 13 为地面回波能量示例。

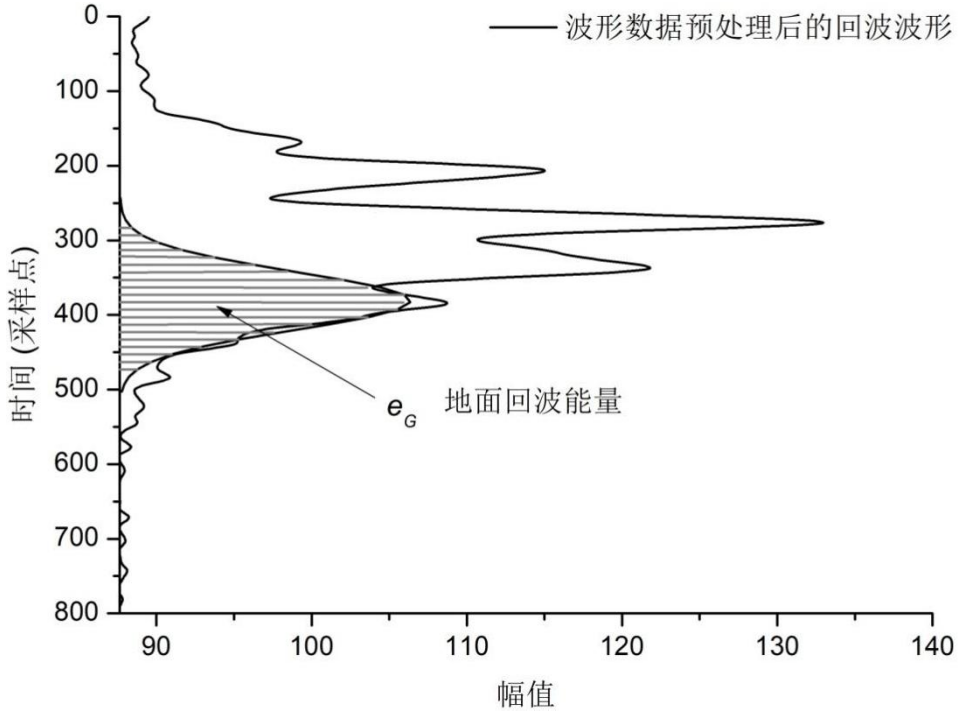


图 D.13 地面回波能量示例

D. 2. 2. 3. 3 地面回波能量和冠层回波能量

图 D. 14 为地面回波能量和冠层回波能量示例。

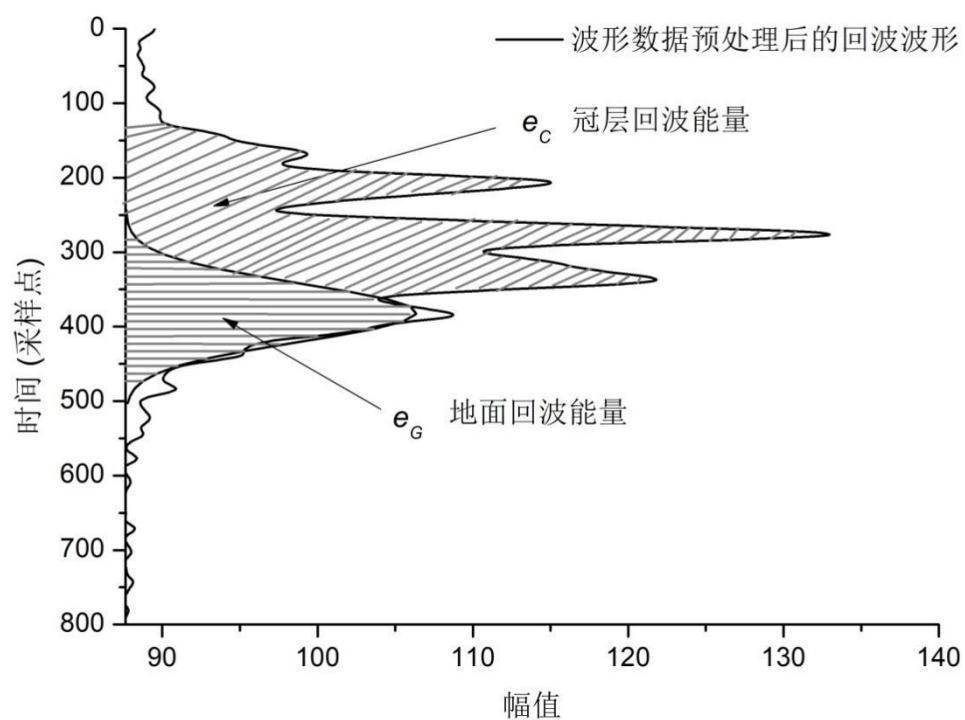
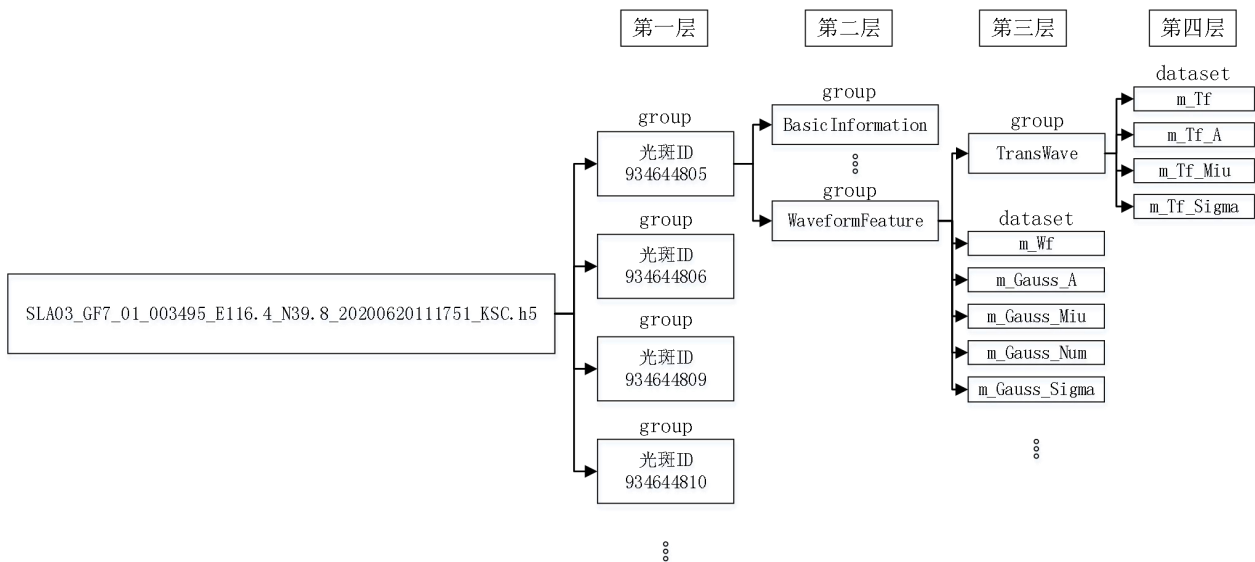


图 D.14 地面回波能量和冠层回波能量示例

附 录 E
(资料性)

全波形数据和波形特征参数格式示例

全波形数据和波形特征参数以HDF5文件格式存储,包含在对地观测卫星激光测高数据产品HDF5文件的第三层和第四层的字段中,对地观测卫星激光测高数据产品的全波形数据和波形特征参数格式示例见图E. 1。



图E. 1 对地观测卫星激光测高数据产品的全波形数据和波形特征参数格式示例

参考文献

- [1] CH/T 3027—2023 对地观测卫星激光测高数据产品
 - [2] CH/T 3030—2023 对地观测卫星激光几何检校技术规范
-

《对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范》

编制说明

行业标准项目名称：对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

行业标准项目编号：202033001

送审行业标准名称：对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

报批行业标准名称：对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

承担单位：自然资源部国土卫星遥感应用中心

当前阶段：☐征求意见 ☐送审稿审查 ☒报批稿报批

编制时间：二〇二三年 八月

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范

编制说明

一、概况

1.1 任务来源

2020年9月11日，自然资源部下达《自然资源部办公厅关于印发2020年度自然资源标准制修订工作计划的通知》（自然资办发[2020]43号），本文件是2020年自然资源卫星应用行业标准计划项目之一，项目编号：202033001，计划名称为《对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范》。本文件由全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分技术委员会归口，由自然资源部国土卫星遥感应用中心牵头起草。计划周期：24个月。

1.2 目的意义

近年来，随着资源三号02星、03星以及高分七号卫星的发射，这些卫星搭载了对地观测的线性体制激光测高仪，其中高分七号卫星搭载了具备全波形记录能力的激光测高仪，不仅能够辅助立体影像区域网平差处理，也有望在大型湖泊水位测量、极地冰盖高程测量、森林植被探测等方面发挥作用。

星载全波形激光雷达以密集的采样间隔记录激光发射和后向散射回波脉冲强度，经过处理后，其采集和存储的回波波形数据含有大量的地物信息。卫星线性体制激光波形数据处理方法较多，这些方法的处理流程根据不同的应用需求各不相同，非常不利于未来国产星载

激光雷达全波形数据处理与应用。为适应当前（如高分七号卫星激光测高全波形数据）以及未来国产（我国自主研制）对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理的技术要求和应用需求，本项目拟结合国产线性体制全波形激光特点，研究和制定一套从星上原始波形到波形参数提取的全波形数据处理的技术规范，对波形数据噪声滤除、波形分解、波形参数提取等技术环节的参数设置、处理方法进行规范，统一国产对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术流程，完善激光波形数据产品体系，提高星载激光波形数据的处理精度，从而为国产激光波形数据大规模业务化处理提供技术支撑。且拟申报项目积极响应行业发展趋势，有助于推动行业技术进步，更符合行业高质量发展需要。

1.3 主要起草人及工作分工

编制任务下达后，自然资源部国土卫星遥感应用中心为牵头单位，湖南科技大学、山东农业工程学院、中国科学院空天信息创新研究院、武汉大学、东北林业大学等共同成立了编制组。编制组成员包括总体技术负责人和长期从事卫星应用航天摄影测量、机载/星载激光测量专业领域的专业技术人员和专家分工合作开展标准各章节的编写，编制组主要人员组成及分工见表 1。

表 1 编制组人员分工

序号	姓名	单位	任务分工	备注
1	谢俊峰	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责标准框架结构的设计，主要技术内容修订研究工作	
2	唐新明	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责标准框架结构的设计，主要技术内容修订研	

			究工作	
3	刘 诏	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责标准框架结构的设计，主要技术内容修订研究工作	
4	莫 凡	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责规范技术路线确定、大纲框架规划、规范修改与审稿工作	
5	李国元	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责部分内容的起草与审查工作	
6	薛玉彩	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责部分内容的起草与审查工作	
7	李少宁	湖南科技大学	负责部分内容的起草与审查工作	
8	陈继溢	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责部分内容的起草与审查工作	
9	杨晨晨	山东农业工程学院	负责部分内容的起草与审查工作	
10	聂 胜	中国科学院空天信息创新研究院	负责部分内容的起草与审查工作	
11	倪文俭	中国科学院空天信息创新研究院	负责部分内容的起草与审查工作	
12	周 辉	武汉大学	负责部分内容的起草与审查工作	
13	王 成	中国科学院空天信息创新研究院	负责部分内容的起草与审查工作	
14	邢艳秋	东北林业大学	负责部分内容的起草与审查工作	
15	傅征博	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责部分内容的起草与审查工作	

1.4 主要工作过程

1.4.1 征求意见稿阶段

2020 年 10 月-2021 年 4 月，编制组开展了大量的调研工作，包括国内外有关现有标准，以及对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理的实际实施情况，开始起草标准草案。

2021 年 5 月-2022 年 5 月，以标准草案为基础，编制组又以电话、社交软件、电子邮件和视频会议的形式与测绘、林业、航天等领域生

产作业单位、大学、科研院所的多位技术专家和生产专家进行多次交流探讨，并根据专家意见对标准草案进行修改完善，于 2022 年 5 月完成了标准征求意见稿和编制说明。

2022 年 6 月-2022 年 8 月，按照全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分技术委员会标准化工作管理规定要求，征求意见稿发至卫星应用分技委全体委员、相关测绘单位和相关单位的专家，并在自然资源标准化信息服务平台开始广泛征求有关单位及专家的意见。收到的回函单位或专家数 23 个，回函并有建议或意见的单位或专家数 15 个。共收到 95 条意见，其中采纳意见 78 条，部分采纳意见 9 条，未采纳意见 8 条。编制组按照专家的意见对标准征求意见稿进行了详细的修改，形成送审讨论稿。

1.4.2 送审稿阶段

2022 年 9 月 15 日，由自然资源部国土卫星遥感应用中心在北京组织召开了标准预审会，来自中国科学院空天信息创新研究院、中国测绘科学研究院、清华大学、中国地质大学、国家卫星海洋应用中心、中国人民解放军战略支援部队信息工程大学、东北林业大学、黑龙江省测绘产品质量监督检验站、自然资源部测绘标准化研究所的 10 名专家参加预审会，专家对标准送审讨论稿和编制说明提出了针对性修改意见。2022 年 9 月-2023 年 4 月，编制组积极采纳预审会专家意见，并根据专家建议进行相关修改，形成了标准送审稿。

1.4.3 报批稿阶段

2023 年 5 月 26 日，全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分

技术委员会（SAC/TC 230/SC3）在北京组织召开了标准审查会，来自全国地理信息标准化技术委员会、中国林业科学研究院资源信息研究所、中国科学院空天信息创新研究院、自然资源部第一海洋研究所、中国测绘科学研究院、武汉大学、国家卫星海洋应用中心、西安测绘研究所、中国科学院上海技术物理研究所的 9 名专家参加审查会，专家对标准送审稿和编制说明提出了针对性修改意见。2023 年 6 月-2023 年 8 月，编制组积极采纳审查会专家意见，并根据专家建议进行相关修改，形成了标准报批稿。

二、标准编制原则和确定标准主要内容的依据

2.1 标准编制原则

（1）一致性与规范性

本文件与已经发布的 CH/T 3030-2023《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、CH/T 3029-2023《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》、CH/T 3027-2023《对地观测卫星激光测高数据产品规范》、CH/T 3028-2023《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法规范》等相关标准相互协调，保持标准内容间的一致性，避免新制定标准同已经颁布实施或正在报批的相关标准之间的冲突和矛盾。标准编制的所有阶段均遵守国家标准 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定，保证标准编制的规范性。

（2）科学性与系统性

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理是借助卫星激光测

高仪开展天空地海一体化立体监测中重要的一项技术，应遵循测绘标准体系，确定本文件的定位、内容以及与其它标准的关系。标准编制过程中充分考虑到行业领域技术发展现状和实际工作需求，依托已有的技术优势和前期研究基础，不断总结经验，凝练测高数据处理技术流程。旨在保证标准内容规范、对实际工作有指导作用，形成系统化行业技术规范，指导后续作业生产，提高生产效率，并为未来技术留有发展空间，具备良好的先进性和科学性。

本文件是在《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》技术标准基础上，对卫星激光回波波形数据处理作业相关规范和约定的补充完善，适用于对地观测卫星线性体制激光测高数据处理中涉及的全波形数据处理，全波形数据处理后得到的预处理后的波形和基础波形特征参数用于《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》中的测距值解算。除此之外，本文件输出的专题波形特征参数是对《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》中全波形数据处理内容的进一步扩展。本文件参考了国内外卫星激光测高领域内的全波形数据处理理论、方法、技术以及应用等，并与国内相关专家学者不断进行技术交流、讨论和修改，以此开展对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术相关内容的编制。

（3）有效性与可靠性

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范，主要针对当前以及未来我国在轨卫星激光全波形数据处理，在本文件的编写过程中，充分考虑了国产对地观测卫星线性体制激光回波波形特性，以

及其测距原理等因素，综合制定了一套完全适用于国产卫星激光测高全波形数据处理的技术规范。本文件中的技术流程，有效保证了对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理的工作效率，用于规范激光测高数据处理的测距值解算，输出的预处理后波形和波形特征参数可用于对地观测卫星激光测高数据标准产品中的预处理后的波形数据和基础波形特征参数生产的输入，专题波形特征参数也可用于后续对地观测卫星激光测高数据专题产品的参数生产的输入。便于规范工作流程、保证成果有效性和可靠性。

（4）实用性和可扩展性

对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术规范，采用当前国内外最为成熟、技术可靠性最高、精度最优的相关技术方法，明确最基本、最普遍适用的技术指标和要求以进行规范和约定，使之既可控制整个对地观测卫星线性探测体制激光回波波形数据处理全过程的质量，又可以充分发挥不同技术、软件的特点。本文件编制过程中依据对地观测卫星的激光测高全波形数据处理的工作经验，能够满足未来一定时期内的对地观测卫星的激光测高全波形数据处理需求，具有可扩展性。

2.2 国内外调研情况

2.2.1 国内外技术发展现状

美国 NASA 在 2003 年 1 月发射升空的 ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) 卫星搭载了 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 测高载荷，GLAS 属于全球首个星载对地观测的全波形激光

雷达测高系统，它的主要任务为精确测量格陵兰岛和南极冰架的高程，除此以外，还可测量海冰、海洋、陆地高程，冰、水、地表粗糙度以及地表的冠层高度等。2010年2月，ICESat卫星上的最后一台激光器停止工作。

国内外很多学者对GLAS以及LVIS等传感器的全波形数据处理展开了相关研究。文献“利用大光斑的波形激光雷达和Landsat影像，从浓密冠层区域识别地面峰值点（Ground peak identification in dense shrub areas using large footprint waveform LiDAR and Landsat images）”中，提出滤波和聚类算法，结合插值高斯函数，从LVIS的回波波形中识别地面峰值位置。文献“采用维纳滤波器通过波形记录的激光雷达系统进行距离测量（Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter）”中，采用维纳滤波对波形信号实现噪声去除。文献“激光测高仪波形的分解（Decomposition of Laser Altimeter Waveforms）”中，将完整的地物回波看成是多个目标地物反射效果的叠加，对原始回波信号进行高斯分解，将每个光斑回波波形分解成多个单一的高斯回波进行了研究。文献“ICESat大光斑全波形激光测高数据的处理和应用（Processing and Application of ICESat Large Footprint Full Waveform Laser Range Data）”中，对全波形数据处理和应用进行了系统介绍。文献“（A linearly approximated iterative Gaussian decomposition method for waveform LiDAR processing）”中，选择LM算法对原始回波波形进行优化拟合，通过设置拟合残差RMSE的阈值来判断是否漏掉有效的高斯分量。文献“Gold——一种新

的用于波形激光雷达处理的反卷积优化算法（Gold—A novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing）”中，提出了一种非线性反卷积波形处理方式，对地物回波强度进行了放大，从而可以分解出更多细小的地物，但是这种方法对噪声敏感。如果预处理部分对波形数据的噪声信息判断不准确将会造成地物信息提取较大的误差。

国内一些科研院所针对全波形激光雷达数据处理开展相关研究，其中研究较多地集中在波形预处理及波形分解上。文献“高斯混合模型在星载激光全波形数据反演树高中的应用”，以及文献“激光测高卫星全波形数据的森林树高提取研究”，相继开展了从波形数据到地物相对高程提取的研究。文献“利用自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法”，文献“GF-7 星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波”，这两个文献研究了利用自适应滤波对回波进行噪声抑制，该方法有效改善了固定宽度高斯滤波方法造成的有效信号变形。文献“基于小波变换的 ICESAT—GLAS 波形处理”中，采用小波变换对波形数据进行去噪，根据不同的波形选取不同的小波基。文献“基于星载激光雷达波形数据和小波分析的波形长度提取”中，通过对波形进行小波分解，并用不同尺度的小波基对波形进行逼近以此判断波峰个数。文献“星载激光雷达数据处理与应用”中，对星载全波形激光雷达数据的处理和应用进行了归纳与总结，并将数据处理结果用于林业植被高度、森林生物量等方向研究。文献“全波形激光雷达的波形优化分解算法”，文献“森林冠层探测激光雷达的波形特征分析”，文献“星载激光雷达

森林探测进展及趋势”，文献“全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法”，以上 4 个文献研究，都对现有的波形数据方法进行了改进，针对特殊的回波波形取得了理想效果，提高了地物信息提取精度。文献“激光雷达回波模型辅助的坡地森林冠层高度反演”，文献“大光斑激光雷达坡度自适应的波形指数用于森林生物量的估计（Slope-adaptive waveform metrics of large footprint lidar for estimation of forest aboveground biomass）”，这两个文献研究，提出了一种模型辅助的坡地森林冠层高度反演算法，该方法以激光雷达回波信号截止点为参考，定义了新的波形高度指数，用于森林冠层高度反演。文献“一种结合反卷积和高斯分解的方法，用于大光斑卫星激光测高仪波形的叠加峰值位置提取（A Combined Deconvolution and Gaussian Decomposition Approach for Overlapped Peak Positions Extraction from Large Footprint Satellite Laser Altimeter Waveforms）”中，提出反卷积和高斯分解相结合的方法，从 GLAS 回波波形中提取叠加的峰值位置。

2.2.2 相关标准现状调研情况

总的来说，国内外学者在星载线性体制激光波形数据处理方法中开展了大量卓有成效的工作。但是，这些研究方法各异，侧重点各不相同。特别是针对国产星载激光波形数据，没有形成统一的波形数据处理技术标准，无法为未来国产激光波形数据处理规模化业务生产处理提供有效的技术支撑。目前与本文件具有相关性的标准有《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》、《对地观测卫星激光测高数据产品规范》、《对地观测卫星激

光测高数据质量评价指标及方法规范》。

2.3 主要技术内容的说明

2.3.1 标准的定位

本文件范围为对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理环节的工作内容、作业流程与技术要求等，是针对对地观测卫星激光数据处理流程中的全波形数据处理，可用于测距值解算，也用于对地观测卫星激光测高数据标准产品中的预处理后的波形数据和基础波形特征参数生产，全波形数据处理后得到的专题波形特征参数也可用于后续对地观测卫星激光测高数据专题产品的参数生产。

本文件与已经发布的《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》、《对地观测卫星激光测高数据产品规范》、《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法规范》等多个行业标准是系列标准，可配套使用。

2.3.2 确定标准主要内容的依据

为提高标准的实用性，编制组在标准制定前期进行了大量的调研、资料收集，以及技术试验等工作，在编制过程中自然资源部国土卫星遥感应用中心与中科院空天信息研究院、林科院资源信息研究所、中国地质大学、深圳大学、东北林业大学、自然资源部测绘标准化研究所、武汉大学、战略支援部队航天工程大学等有关单位的专家进行了多次交流和探讨。同时充分利用主编单位承担资源三号 02 星工程应用系统建设项目、高分七号卫星工程应用系统建设项目和资源三号 03 星工程应用系统建设项目任务的有利条件，总结国内外卫星激光

测高回波波形数据处理工作经验，并针对性补充了适合国内自主研制的卫星激光测高回波波形数据处理技术试验。最终从作业流程、方案设计、激光回波数据处理、激光回波数据处理质量控制等方面总结提炼实际生产要求和经验。形成了如下结论：

a) 对地观测卫星激光测高数据处理技术规范已经发布，其技术内容及要求能够满足国产卫星激光测高数据处理和产品生产需求。而本文件着重关注于对卫星激光下传的原始回波波形数据处理的规定，确保处理后的卫星激光回波波形数据以及提取的波形参数可满足各行业基本需求；

b) 主编单位和参编单位已在卫星激光波形数据处理技术研究、激光测距/定位相关数据处理及业务化生产中积累了大量的实际经验；参编人员邀请了在国产卫星激光测高仪制造、卫星激光测高数据处理以及卫星激光回波波形数据应用领域具有实际科研能力、实际工作经验的专家及同行；

c) 本文件的任务是规范并指导国产卫星激光全波形数据的处理，除了指导对地观测卫星激光数据处理中的回波波形处理环节外，生产得到的波形参数也可用于服务住建、林业等行业部门。在本文件编制阶段，CH/T 3030-2023《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、CH/T 3029-2023《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》、CH/T 3027-2023《对地观测卫星激光测高数据产品规范》、CH/T 3028-2023《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法规范》等多个对地观测卫星激光测高相关行业标准已经发布。从生产工序角度而言，《对

《对地观测卫星激光几何检校技术规范》是本文件的“并列”标准，它规定了对地观测卫星激光几何检校的总体要求、检校过程等，检校过程中提取激光测距值时，需要用到本文件生产的波形分解相关参数。对于《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》，本文件是在它的基础上，对卫星激光回波波形数据处理作业相关规范和约定的补充完善和扩展。《对地观测卫星激光测高数据产品规范》是本文件的“下游”标准，它规定了对地观测卫星激光测高数据产品的分级、构成、要求和检验。对于《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法规范》标准，它规定了对地观测卫星激光测高数据产品的质量评价指标及其计算、评价和汇总方法，本文件的波形信噪比计算参照了该标准，其他波形数据质量的相关内容也能为本文件提供一定参考。因此，能够辅助保障对地观测卫星激光几何检校、激光测高数据处理和产品生产是本文件主要内容编制的重要依据。

2.3.3 波形数据滤波方法的选择

波形数据滤波方法有高斯滤波、小波降噪、均值滤波、维纳滤波、傅里叶低通滤波等。下面简要介绍上述 5 种算法：

a) 高斯滤波。由于星载激光测高仪的波形数据噪声可认为是非零均值高斯白噪声，在频域中属于高频部分，因此可采用高斯函数进行滤波。高斯滤波就是对波形数据通过卷积运算进行加权平均的过程，滤掉波形中高频部分，经过高斯滤波平滑处理后降低噪声的影响；

b) 小波降噪。该方式是选择小波基函数，对波形信号进行小波变换，得到小波系数，信号经小波分解后小波系数较大，噪声的小波

系数较小，并且噪声的小波系数要小于信号的小波系数，通过选取一个合适的阈值，大于阈值的小波系数被认为是由信号产生，对其进行保留，小于阈值的则认为是由噪声产生，置为零从而达到去噪的目的；

c) 均值滤波。均值滤波属于线性滤波，是对每个待滤波的信号取值为邻域内信号平均值的过程。均值滤波在信号去噪的同时也破坏了信号的细节部分，不能很好地去除噪声；

d) 维纳滤波。维纳滤波是一种线性最小均方误差估计。线性指的是这种估计形式是线性的，最小方差则是我们后面构造滤波器的优化准则，也就是说，实际信号与估计量的差要有最小的方差。而维纳滤波就是要构造一种滤波器，使得观测信号通过滤波器后能够得到的输出是实际信号的最小均方误差估计；

e) 傅里叶低通滤波。该方式是通过傅里叶变换，对空间域的信号进行频域内的滤波器处理，低通滤波器滤除了高频成分，再用反傅里叶变换倒回到空间域内，从而实现对观测信号的噪声滤除。

相比较其他 4 种滤波方法，高斯滤波是较为成熟、使用更为广泛的平滑滤波方法，国外卫星激光测高全波形数据处理的官方算法流程中的预处理步骤中，使用的就是该平滑滤波方法。由于卫星激光测高仪获取的全波形数据包含的噪声可认为是非零均值的高斯白噪声，使用高斯滤波能够较好地抑制高斯白噪声，且该方法的稳定性更好，因此，对于卫星激光测高全波形数据的标准化处理流程而言，本文件选择更具普适性的高斯滤波方法进行对地观测卫星线性体制激光全波形数据的平滑滤波。

2.3.4 波形数据处理方法的选择

常用的波形数据处理算法有高斯分解、小波分解和波形反卷积等。

以下简要介绍上述 3 种算法：

a) 高斯分解。该方法是将回波波形表达为多个高斯函数的叠加，包括波形预处理、初始估计、波形拟合等过程；

b) 小波分解。该方法是将星载激光测高仪获取的回波波形与小波基函数进行卷积（也称为小波协方差变换），通过对回波波形进行小波变换，得到不同尺度下的小波系数，通过局部最大值法对小波系数向量进行峰值检测，从而得到该小波尺度下的波形分量个数。根据小波分析后逼近强度的对称性进行判断，找出最优的峰值位置；

c) 波形反卷积。一般而言，接收的波形可以认为是发射脉冲与地表目标响应的卷积，想得到地表响应信号，可以通过反卷积得到。该方法就是解卷积的过程，也可以称为反卷积。

上述 3 种方法的适用范围如下：

高斯分解法具有普适性，适用于卫星激光测高全波形数据的官方处理或者业务化处理；小波分解法适用于提取全波形数据中的弱回波信号，能够检测出信号细节；波形反卷积法适用于从波形数据中分离并提取地物垂直分布，且波形反卷积无需先验知识，也不需要初始值进行估计。

相比较其他两种方法，高斯分解方法较为成熟、应用最为广泛。该方法具有一定的普适性，得到的波形分解结果较为可靠，国外卫星激光测高全波形数据的处理通常也选择此方法，因此本文件主要采用

高斯分解法进行对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理，波形处理方法主要包括数据准备、数据预处理、波形分解、波形特征参数提取等步骤。

2.3.5 波形处理精度要求

参考国外卫星激光测高全波形数据处理中波形拟合标准差的精度要求，例如 ICESat 的 GLAS 卫星激光测高系统，它的算法在说明文档中规定，在波形拟合程序中，最小振幅阈值为背景噪声均值与 4.5 倍的背景噪声标准差之和，按照 GLAS 官方算法说明文档的附录 2 中算法的规定，对于陆地类型而言，最小振幅阈值为 0.05，而最大拟合标准差阈值为 0.06，对于拟合回波波形而言，一般是由背景噪声水平偏差（可视为背景噪声均值）和拟合的波形分量组成，去除背景噪声均值部分后，可推出波形拟合标准差阈值略大于 4.5 倍的噪声标准差。参考国内外卫星激光测高全波形数据处理相关研究，例如文献“Ground peak identification in dense shrub areas using large footprint waveform LiDAR and Landsat images”和文献“A linearly approximated iterative Gaussian decomposition method for waveform LiDAR processing”，一般将拟合残差的标准差设置为 3 倍的背景噪声标准差；文献“Processing and Application of ICESat Large Footprint Full Waveform Laser Range Data”中设置背景噪声阈值为背景噪声均值与 4 倍的背景噪声标准差之和，这与拟合标准差的设置有一定关联。综上，最终确定了本文件的精度指标，即一般情况下，波形拟合残差 RMSE 小于 4.5 倍的背景噪声标准差 ($4.5\sigma_{noise}$)。

2.3.6 波形优化拟合的技术要求

参考国内外卫星激光测高全波形数据处理流程中的波形优化拟合步骤，在回波波形优化拟合时，需要设置约束条件，剔除不满足要求的高斯分量，提高回波波形优化拟合结果的准确性。编制组考虑到国产对地观测卫星全波形激光测高仪硬件参数的特点和全波形数据的特点，设置了相应的约束条件。

2.3.7 波形处理的质量控制

卫星激光全波形数据处理过程中，数据准备、数据预处理、波形分解等环节均进行质量控制。“数据准备”步骤中，设置数据筛选条件；“数据预处理”步骤中设置预处理前、后质量评价和质量控制，评价波形预处理后的效果，并进行质量控制；“波形分解”步骤中，设置波形分解质量控制，对波形分解结果进行质量控制。

经过上述环节的质量控制，提取出的波形特征参数可供后续应用。

2.3.8 波形特征参数提取

卫星激光全波形数据处理后，能够得到发射波形和回波波形中高斯分量个数、每个高斯分量的振幅、中心位置、脉宽等基础波形特征参数，以及回波波形高斯滤波核函数的 RMS 宽度参数、背景噪声平均值和标准差以及背景噪声阈值、波形信号起始和结束位置。以这些参数为输入，提取波形分位数高度、波形高度指数、波形能量指数等高级波形特征参数，其中波形分位数高度常用的有 25%、50%、75% 以及 100% 的分位数高度，其中 50% 分位数高度相当于半波能量高度 HOME，常用来估计光斑内的森林生物量。波形分位数的取值建议和意义在于它与森林参数反演和地表展宽影响等具有一定关联。

编制组在参考了已有的波形特征参数基础上,结合国外卫星激光全波形数据处理后生产分级产品中的波形特征参数和质量评价参数等,完善了国内目前输出波形相关的特征参数。卫星激光全波形数据处理后,输出参数清单见本文件的附录 C,全波形数据处理结果和波形特征参数提取结果示例见本文件的附录 D,全波形数据和波形特征参数格式示例见本文件的附录 E。

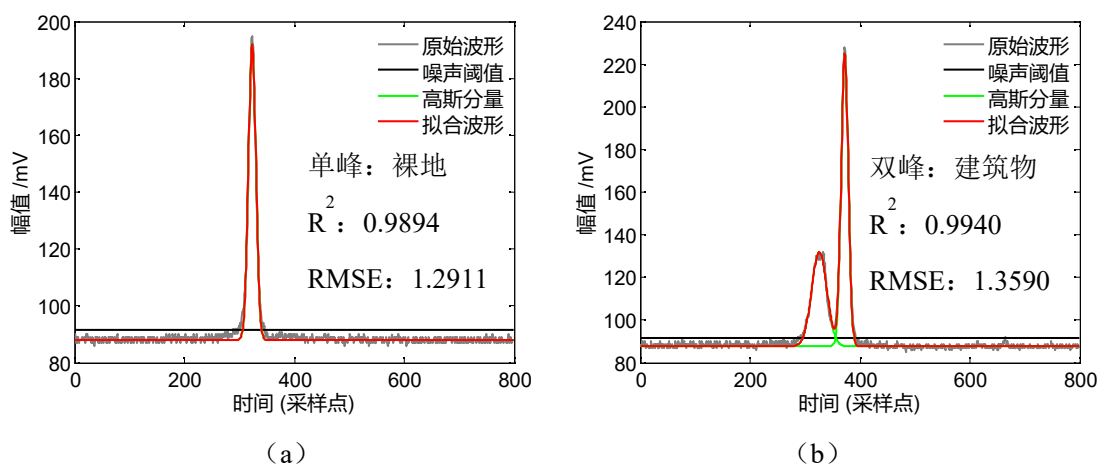
三、验证试验的情况和结果

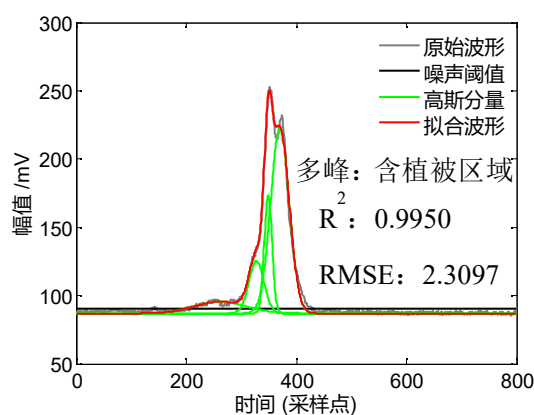
3.1 验证内容

本文件制定的是对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理的主要工作流程和技术要求,因此,要对处理过程和结果进行验证分析。

3.2 验证结果

针对高分七号的波形开展了全波形数据的处理试验,利用高斯分解方法,完成全波形数据分解处理,得到波形分量的振幅、中心位置和标准差波形参数,其中波形分量的中心位置用于后续激光足印点坐标解算。全波形数据分解试验结果样例如图 1 所示。





(c)

图 1 高七激光测高仪获取的全波形数据分解试验结果样例

选取一定数量的回波波形数据进行试验。以高分七号激光测高仪在辽宁过境获取的 6508 轨激光器 2 获取的回波波形数据分解结果为例，过境的有效光斑为 104 个，回波波形分解的拟合残差 RMSE 统计结果如图 2 所示。

从图 2 可看出回波波形分解的拟合残差 RMSE 数值在 5 以下的百分比达到 99.04%，满足波形处理精度要求的光斑数占比达到 94.2%，RMSE 的均值为 2.3169。

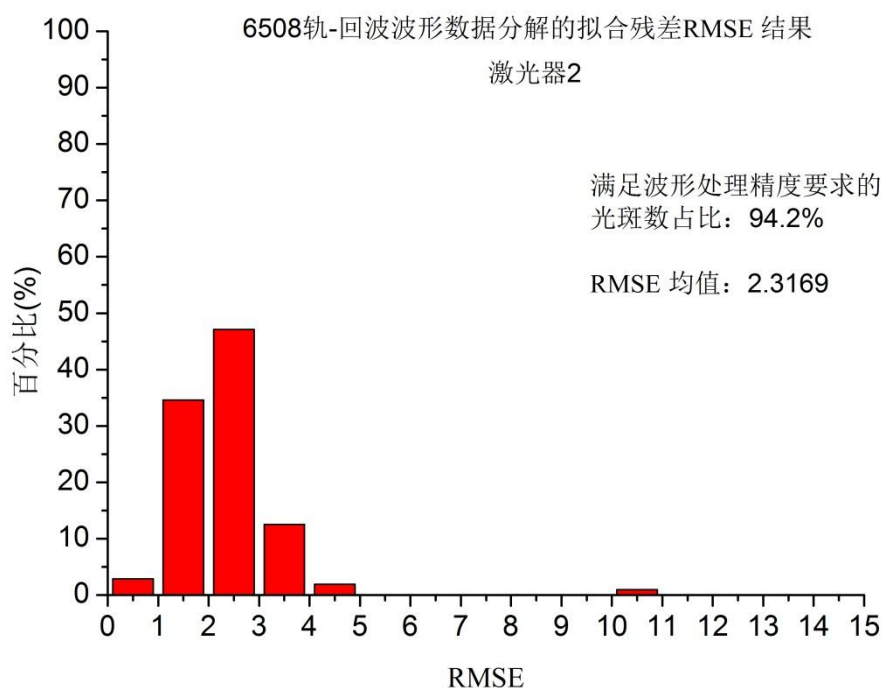


图 2 高分七号激光测高仪波形分解的 RMSE 统计结果

四、采用国际标准和国外先进标准的程度，以及与国际、国外同类标准水平的对比情况

经国家标准、行业标准共享服务平台检索，现在还没有相关国家标准、行业标准、国际标准、他国国家标准以及国外同类标准的记录情况，因此本文件填补了相关标准的空白。

五、与现行法规、标准的关系

本文件依据《中华人民共和国测绘法》、《中华人民共和国标准化法》修订，符合我国现行法律、法规有关规定。

作为卫星激光测高仪对地观测系列标准之一，本文件遵循现行法律法规要求，在制定过程中，与 CH/T 3030-2023《对地观测卫星激光几何检校技术规范》、CH/T 3029-2023《对地观测卫星激光测高数据

处理技术规范》、CH/T 3027-2023《对地观测卫星激光测高数据产品规范》、CH/T 3028-2023《对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法规范》等同步制定中的标准相互协调一致。本文件是 CH/T 3029-2023《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》中的全波形数据处理内容的完善和扩展，不仅适用于对地观测卫星线性体制激光测高数据处理涉及的全波形数据处理，得到的波形特征参数用于 CH/T 3029-2023《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》中的测距值解算。在此基础上，本文件输出的预处理后波形和波形特征参数也用于 CH/T 3027-2023《对地观测卫星激光测高数据产品规范》中的预处理后的波形数据和基础波形特征参数生产，专题波形特征参数可用于后续对地观测卫星激光测高数据专题产品的参数生产。同时，也保持与现有相关行业标准在基本技术指标和技术要求上的一致性。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无

七、废止现行有关标准的建议

无

八、实施标准的要求和措施建议

无

九、其他应予说明的事项

无

十、参考文献

- [1] GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收
- [2] CH/T 1001 测绘技术总结编写规定
- [3] CH/T 3028—2023 对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法
- [4] CH/T 3029—2023 对地观测卫星激光测高数据处理技术规范
- [5] CH/T 3027—2023 对地观测卫星激光测高数据产品
- [6] CH/T 3030—2023 对地观测卫星激光几何检校技术规范
- [7] 赵大力, 夏雪飞. 高斯混合模型在星载激光全波形数据反演树高中的应用[J]. 测绘与空间地理信息[J], 2019, 42(05): 57-60
- [8] 崔成玲. 激光测高卫星全波形数据的森林树高提取研究[D]. 中国矿业大学, 2016
- [9] 马跃, 李松, 周辉, 等. 利用自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3263-3268
- [10] 左志强, 唐新明, 李国元, 等. GF-7 星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200251
- [11] 邱 赛, 邢艳秋, 李立存, 等. 基于小波变换的 ICESAT—GLAS 波形处理[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 33-35
- [12] 唐福鑫, 李利伟, 王成. 基于星载激光雷达波形数据和小波分析的波形长度提取[C]. 第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会会议论文集, 2020
- [13] 王成, 习晓环, 骆社周, 等. 星载激光雷达数据处理与应用[D]. 科学出版社, 2015
- [14] 王滨辉, 宋沙磊, 龚威, 等. 全波形激光雷达的波形优化分解算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1859-1867
- [15] 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 森林冠层探测激光雷达的波形特征分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1670-1678
- [16] 庞勇, 李增元, 陈博伟, 等. 星载激光雷达森林探测进展及趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(03): 20-28
- [17] 李鹏程, 徐青, 邢帅, 等. 全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2262-2267
- [18] 汪垚, 倪文俭, 张志玉, 等. 激光雷达回波模型辅助的坡地森林冠层高度反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(03): 466-477

- [19] Zhuang, W., Mountrakis, G. Ground peak identification in dense shrub areas using large footprint waveform LiDAR and Landsat images[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8:10, 805-824
- [20] 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: 95-107
- [21] 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
- [22] Duong, V. H. Processing and Application of ICESat Large Footprint Full Waveform Laser Range Data[D]. Delft University of Technology, 2010
- [23] Mountrakis, G., LI, Y. G. A linearly approximated iterative Gaussian decomposition method for waveform LiDAR processing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 129: 200-211
- [24] Zhou, T., Popescu, S. C., Krause, K., et al. Gold—A novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*[J], 2017, 129: 131–150
- [25] Wang, Y., Ni, W. J., Sun, G. Q., et al. Slope-adaptive waveform metrics of large footprint lidar for estimation of forest aboveground biomass[J], *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 386-400
- [26] Zhang , Z. J., Xie, H., Tong, X. H., et al. A Combined Deconvolution and Gaussian Decomposition Approach for Overlapped Peak Positions Extraction from Large Footprint Satellite Laser Altimeter Waveforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020, 05 (13): 2286-2303