

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。

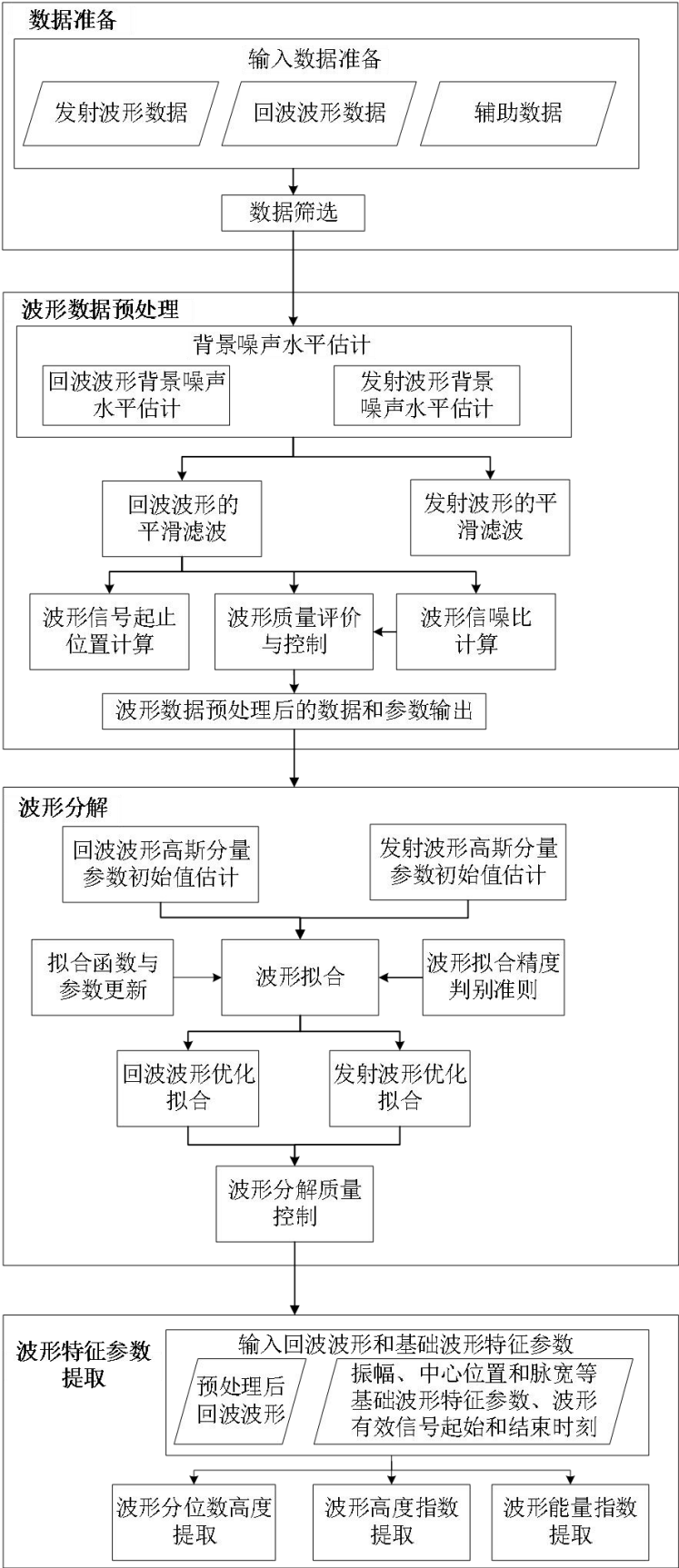


图1 对地观测卫星线性体制激光全波形数据处理技术流程

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：

- 回波波形中存在地物返回信号；
- 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：

- 计算回波波形所有采样点幅值的平均值 $\overline{W_f}$ ；
- 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；
- 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 ；
- 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：

- 寻找幅值大于7.2.2.1 c)中 Th 值的回波波形；
- 计算回波波形最大幅值；
- 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；
- 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：

- 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：

- 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）；
- 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

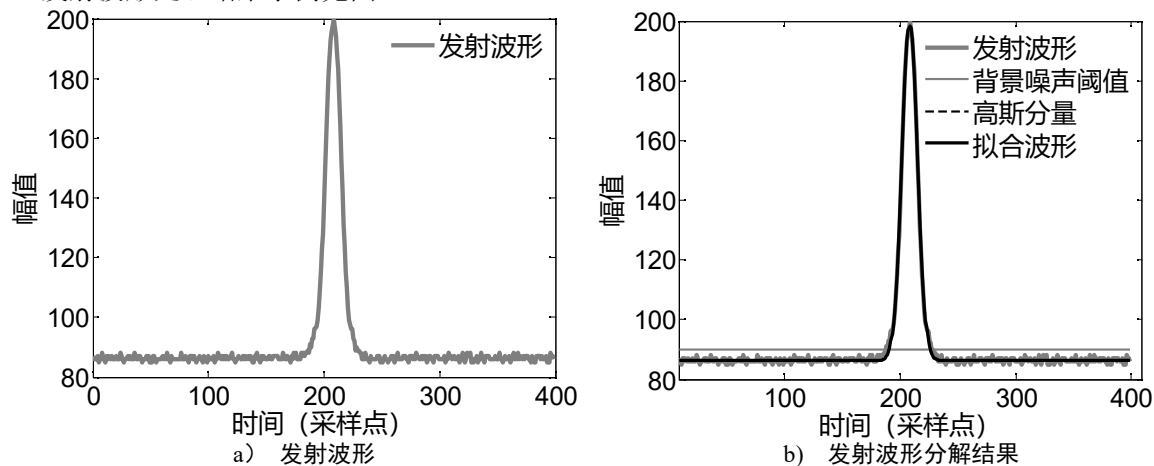
(资料性)

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

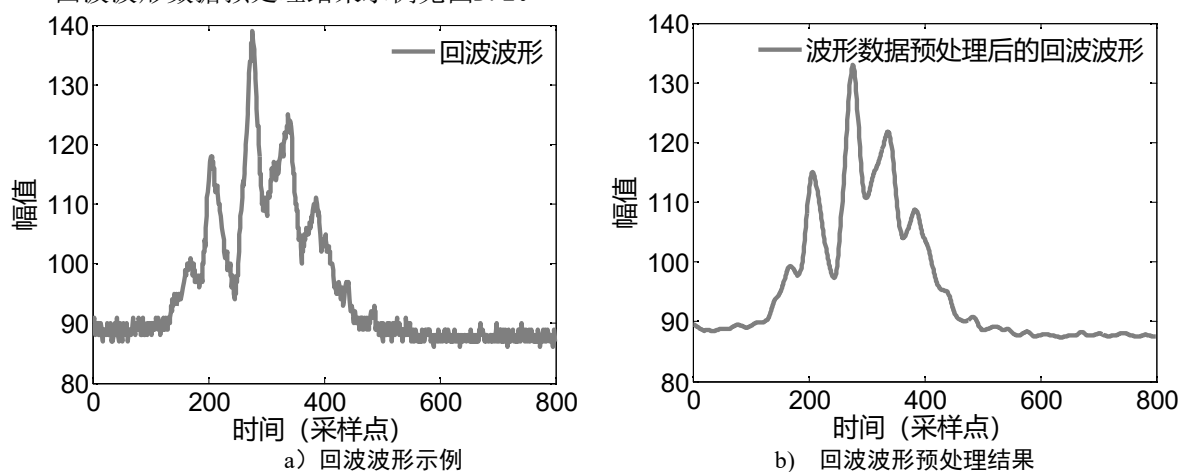
发射波形处理结果示例见图D.1。



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

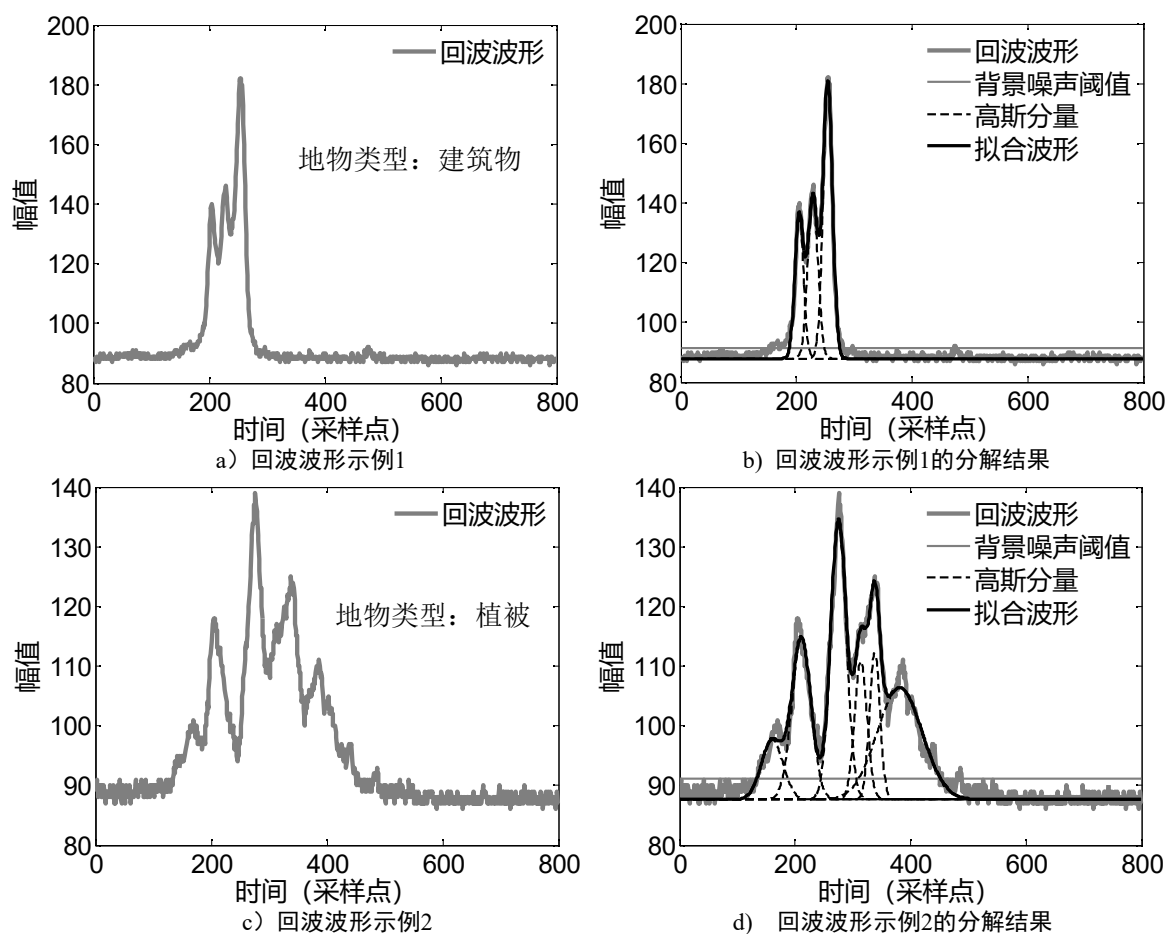
回波波形数据预处理结果示例见图D.2。



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

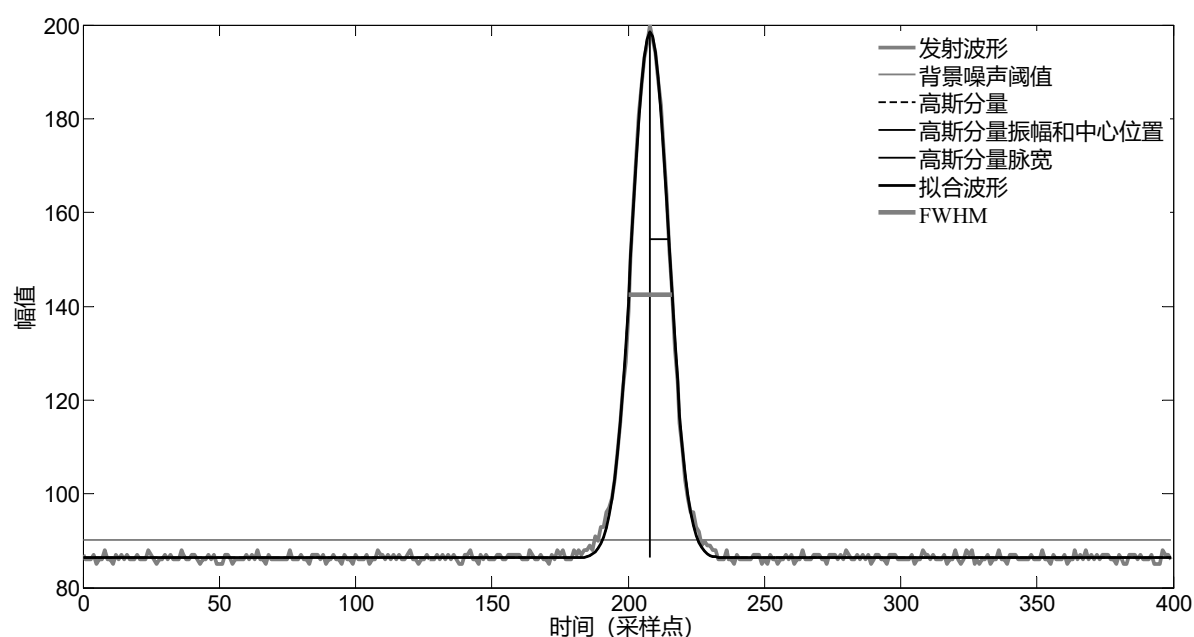
D.2 波形特征参数示例

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）。

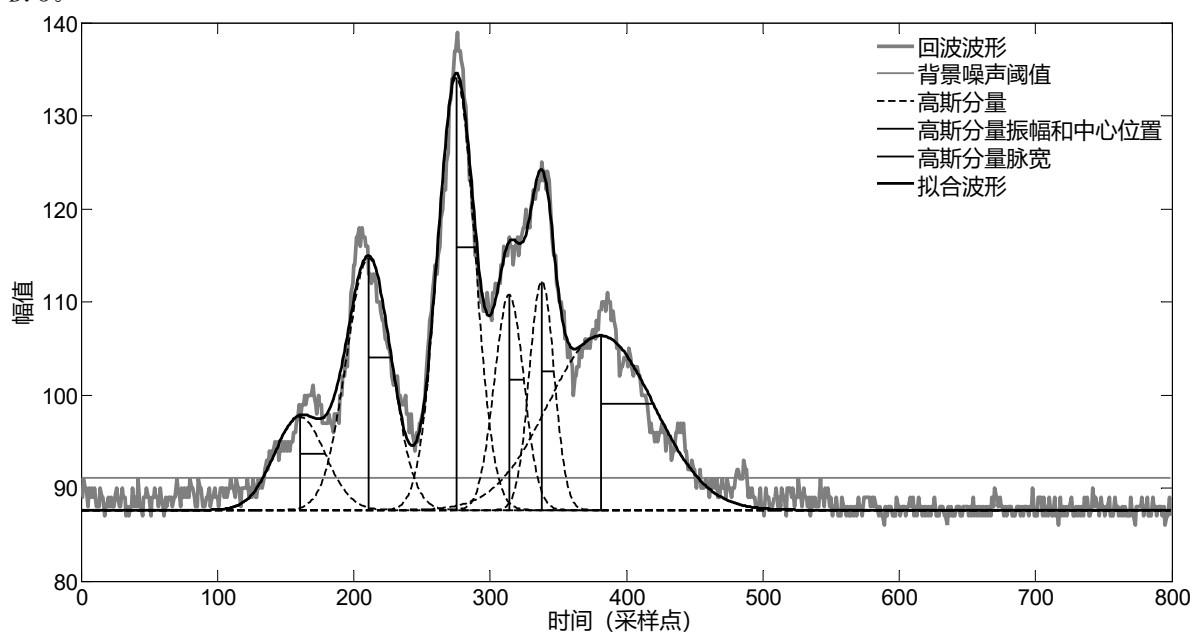
$$FWHM = 2\sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma_e \approx 2.355 \cdot \sigma_e \dots\dots\dots (D.1)$$



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。

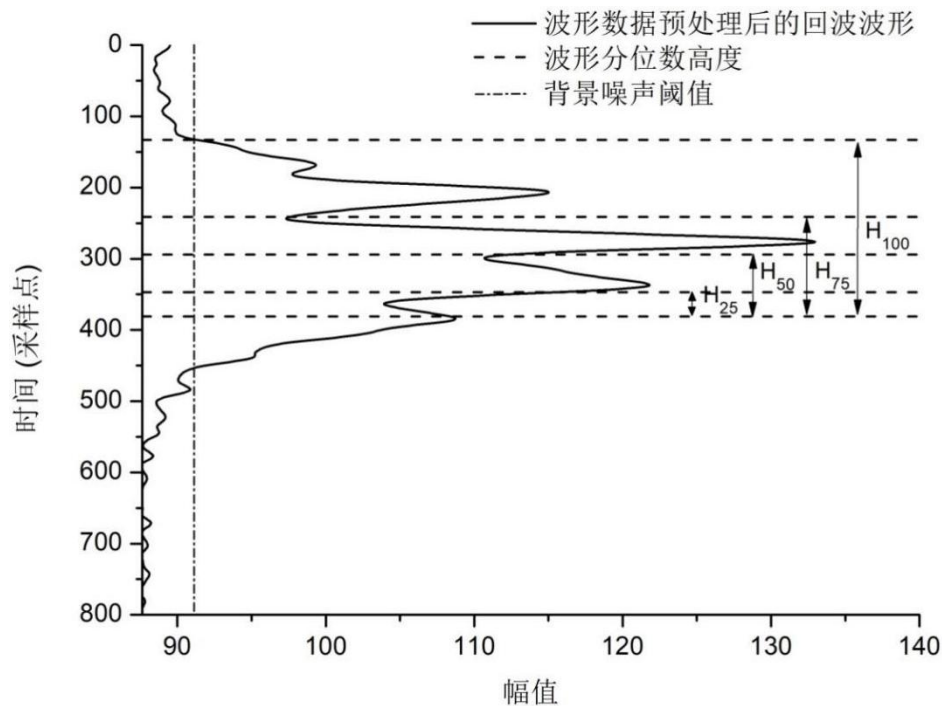


图D.5 回波波形的基础波形特征参数示例

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。



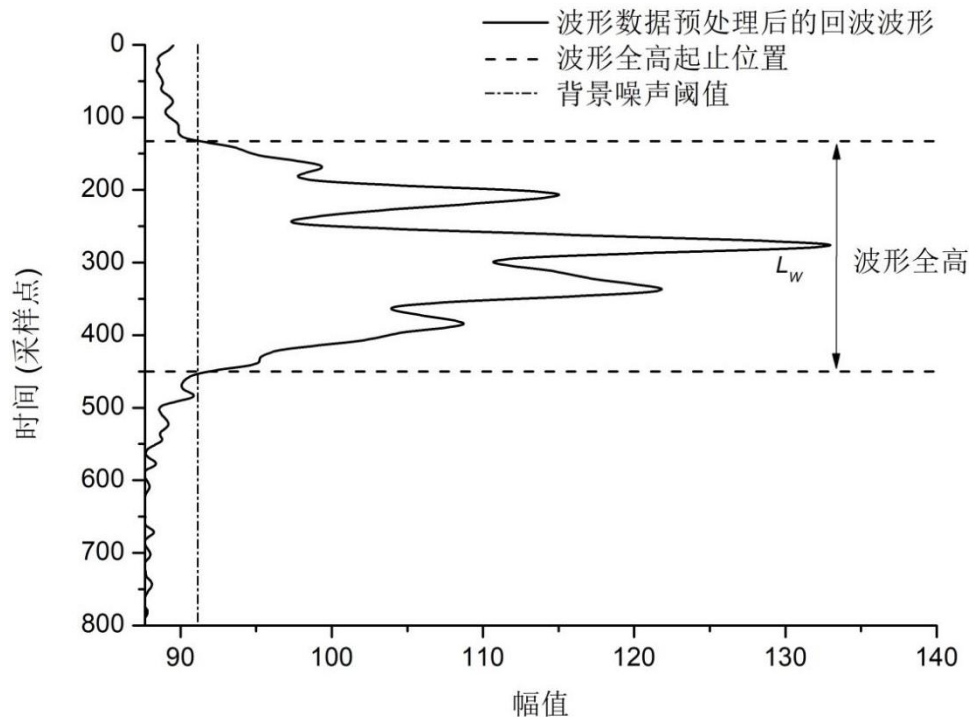
注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

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。

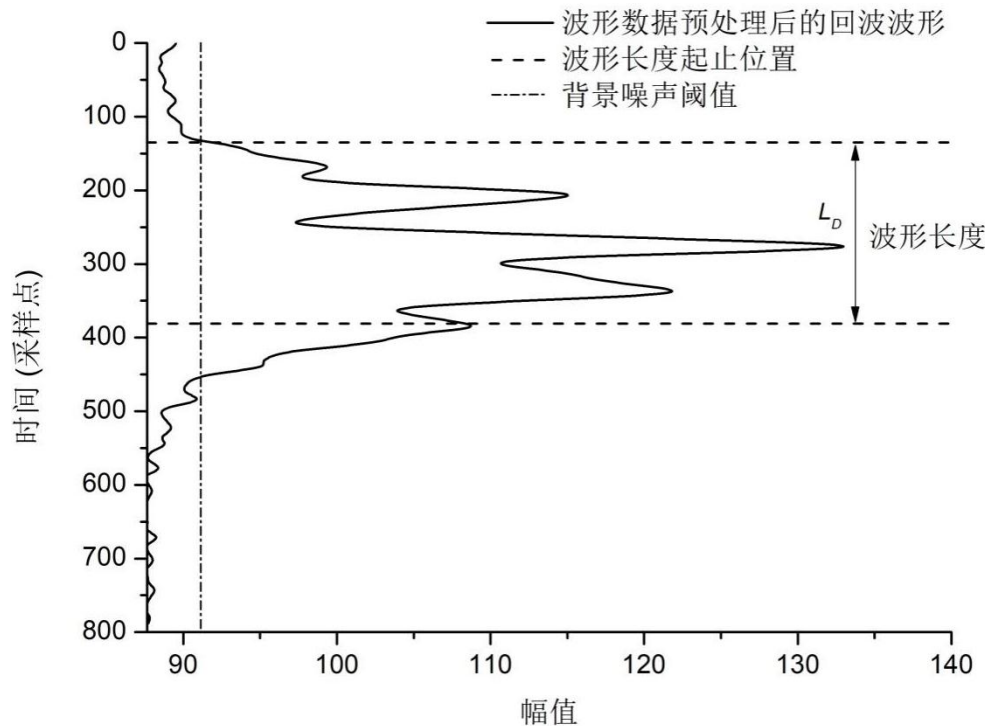


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

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。

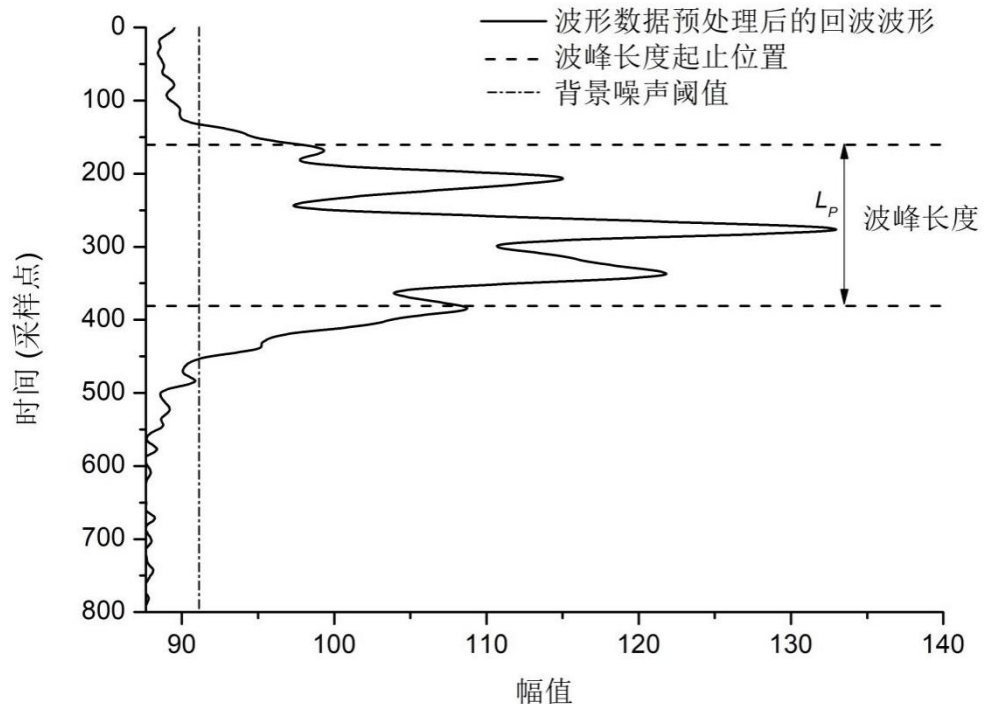


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

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。

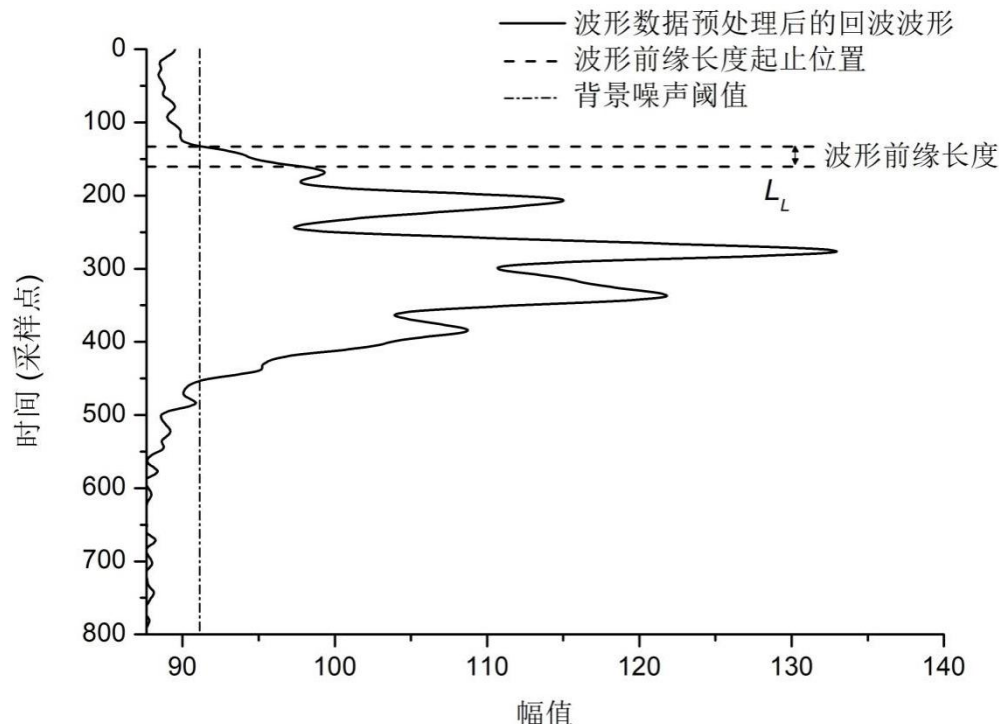


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

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。

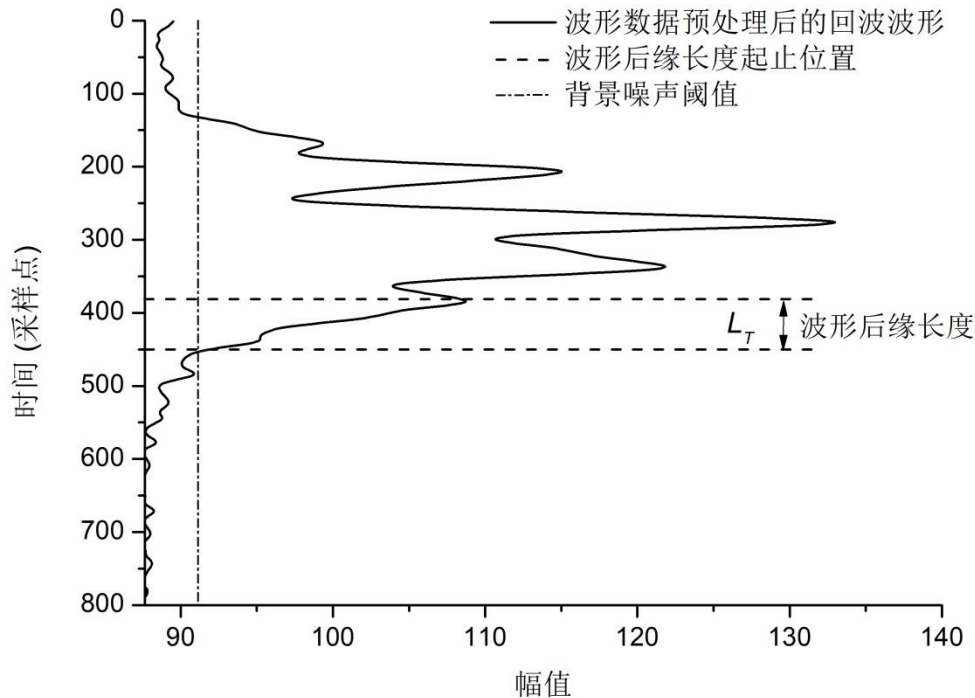


注：通过采样点时刻之间的间隔可换算得到距离（单位为 m）。

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。

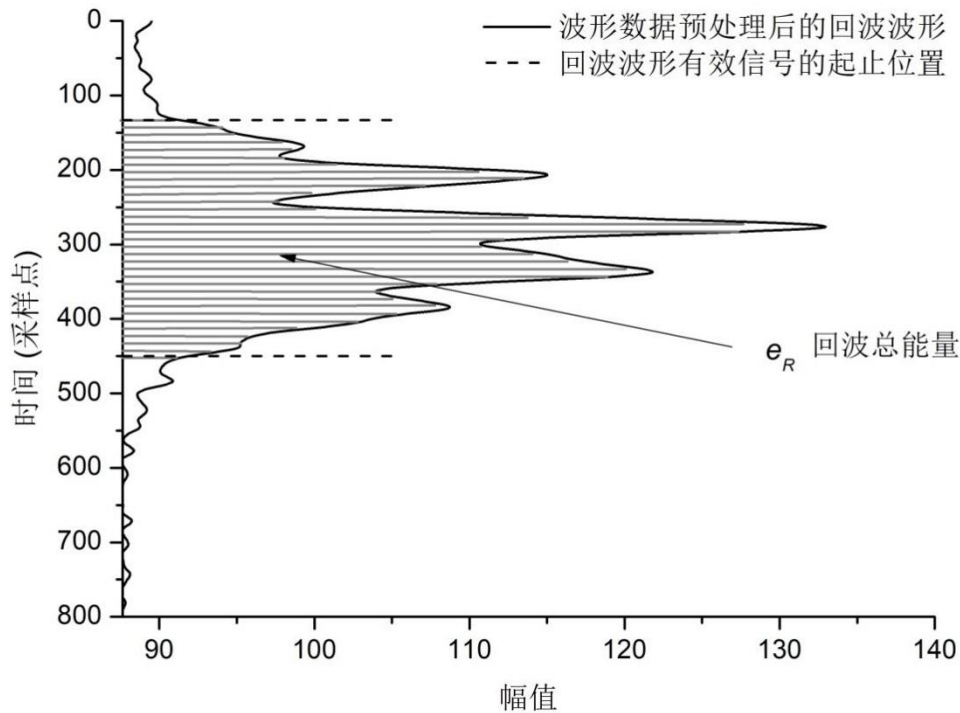


图 D.12 回波总能量示例

D. 2. 2. 3. 2 地面回波能量

图 D. 13 为地面回波能量示例。

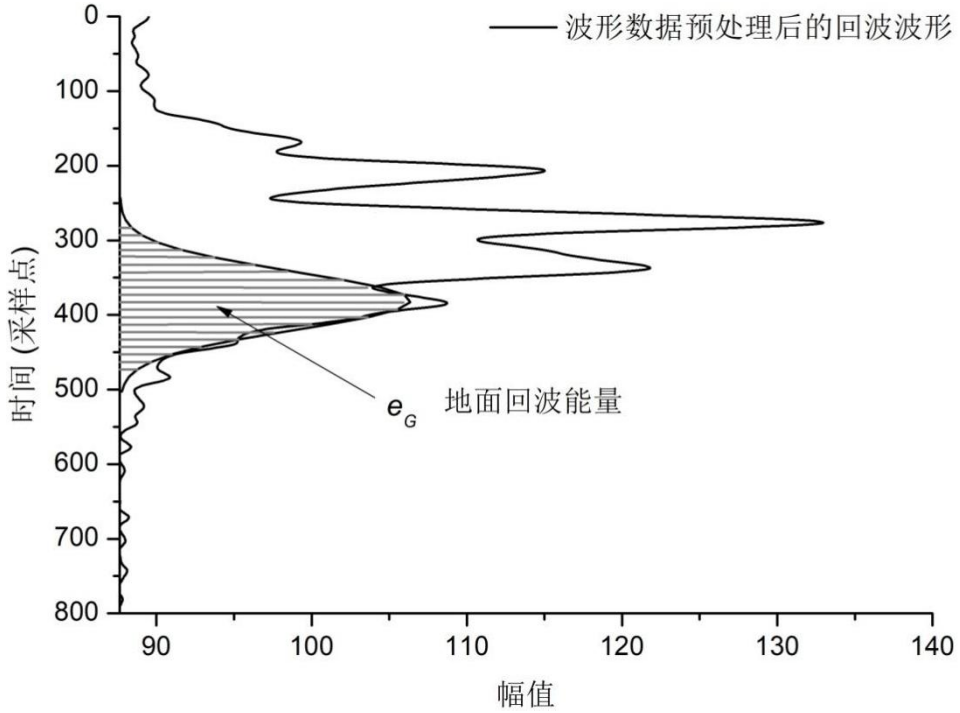


图 D.13 地面回波能量示例

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。

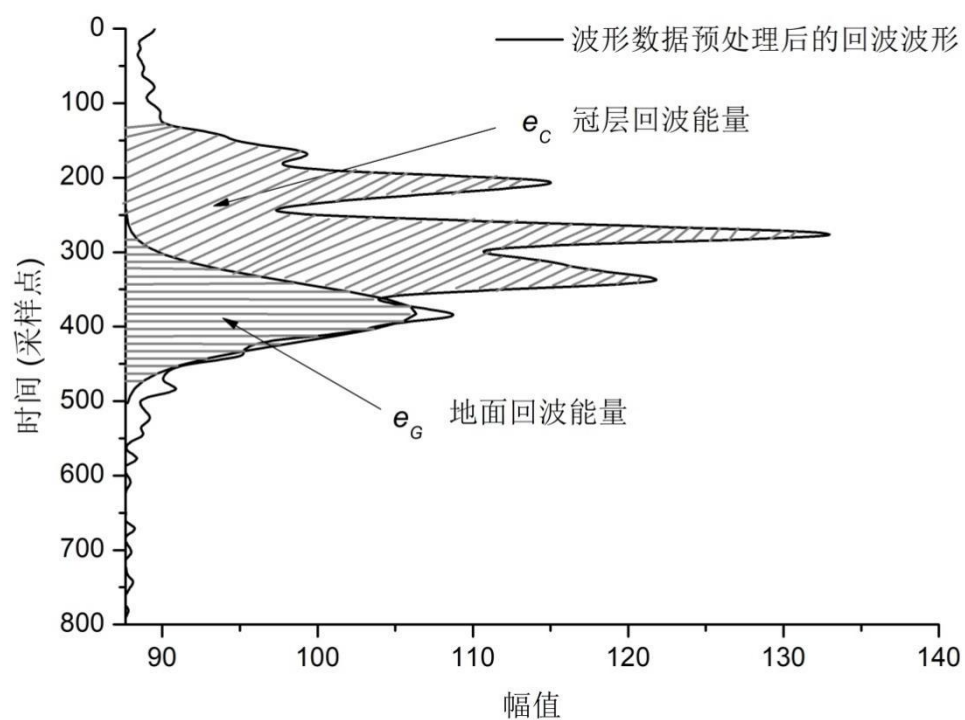
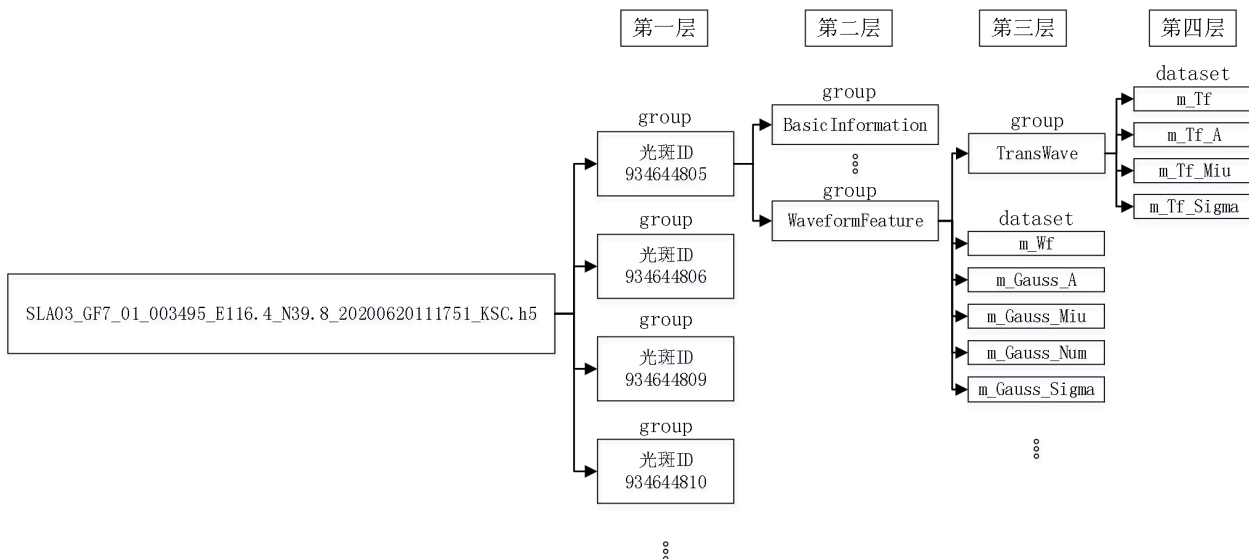


图 D.14 地面回波能量和冠层回波能量示例

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
-