

ICS 07.040

CCS A 77

备案号: XXXX-XXXX

CH

中华人民共和国测绘行业标准

CH/T XXXXX—XXXX

对地观测卫星激光测高数据质量评价 指标及方法

Evaluation indicators and methods for laser altimetry data quality of earth
observation satellite

(报批稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中华人民共和国自然资源部

发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 缩略语.....	2
5 质量元素及子元素.....	2
5.1 质量元素.....	2
5.2 质量子元素.....	3
6 质量评价方法.....	4
6.1 数据有效性.....	4
6.2 设备工作状态.....	4
6.3 激光足印影像质量.....	4
6.4 激光光斑影像质量.....	6
6.5 波形数据质量.....	8
6.6 光子数据质量.....	10
6.7 空间参考与时间系统.....	11
6.8 几何位置精度.....	11
6.9 环境影响因子.....	13
7 评价结果汇总.....	15

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测绘分技术委员会（SAC/TC 230/SC2）归口。

本文件起草单位：自然资源部国土卫星遥感应用中心、自然资源部测绘标准化研究所、国家测绘产品质量检验检测中心、上海技术物理研究所、住房和城乡建设部遥感应用中心、中国测绘科学研究院。

本文件主要起草人：李国元、唐新明、陈继溢、刘小强、张训虎、么嘉棋、周晓青、刘诏、薛玉彩、张静、郭金权、黄庚华、高小明、冯铁惠、樊文锋、文汉江、张宁、杨雄丹、尹粟、周平。

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，同时在极地冰盖测量、植被高度及生物量估算、云高测量、海面高度测量以及湖泊水库水位测量等方面都可以发挥重要作用。最近几年，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激光测高仪取得试验成功并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也已发射即将投入使用，更先进的陆海激光高程测量卫星也在规划中。

数据质量评价是卫星数据产品深化应用的基础，针对国产卫星激光测高的特点，特制定对地观测卫星激光测高数据质量评价方法及指标。本文件与《CH/T XXXX-XXXX 对地观测卫星激光测高几何检校技术规范》、《CH/T XXXX-XXXX 对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》和《CH/T XXXX-XXXX 对地观测卫星激光测高数据产品》配套使用。

对地观测卫星激光测高数据质量评价指标及方法

1 范围

本文件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。
本文件适用于对地观测卫星激光测高数据产品的质量评价。

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 24356 测绘成果质量检查与验收

CH/T 1021-2010 高程控制测量成果质量检验技术规程

CH/T XXXX-XXXX 对地观测卫星激光测高数据产品

CH/T XXXX-XXXX 对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

3 术语和定义

CH/T XXXX-XXXX《对地观测卫星激光测高数据产品》和 CH/T XXXX-XXXX《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

影像清晰度 image clarity

影像上各细部纹理及其边界的清晰程度。

3.2

激光光斑质量 laser spot quality

激光能量的空间分布与设计值的偏差。

3.3

波形强度 waveform intensity

激光回波的能量大小。

3.4

波形峰度 waveform kurtosis

波形概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数。

3.5

波形偏度 waveform skewness

波形数据分布偏斜方向和程度的度量。

3.6

光子背景噪声率 background photon noise ratio

光子体制激光测高仪单脉冲单位时间内接收到的噪声光子占总光子数的比例。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AOD: 气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth)

APD: 雪崩光电二极管 (Avalanche Photon Diode)

BPP: 激光光束参数积(Beam Parameter Product)

CGCS2000: 2000 国家大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000)

CST: 中国国家标准时间/北京时间 (Chinese Standard Time)

HDF: 层次数据格式, 为一种可以高效存储不同类型数据的文件格式 (Hierarchical Data Format)

SNR: 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio)

UTC: 协调世界时 (Coordinated Universal Time)

XML: 可扩展标记语言 (Extensible Markup Language)

5 质量元素及子元素

5.1 质量元素

对地观测卫星激光测高数据评价以一系列的质量元素为评价依据,每个质量元素又可分为若干个质量子元素,质量元素与质量子元素应符合 GB/T 24356 的相关规定。对地观测卫星激光测高数据评价的质量元素应满足表 1 的规定。

根据技术设计、成果类型和用途等具体情况,可扩充或调整。扩充或调整质量元素应经过生产委托方批准,并适用于构建对地观测卫星激光测高数据质量评价体系。对地观测卫星激光测高数据产品级别按照 CH/T XXXX- XXXX《对地观测卫星激光测高数据产品》中表 2 的规定。

表 1 质量元素

质量元素	代码	描述	适用的产品级别
数据有效性	01	评价卫星激光测高数据格式的正确性、内容的完整性	所有类型数据产品
设备工作状态	02	评价数据获取过程中各类仪器设备温度的状态是否正常	L1 级
激光足印影像质量	03	评价激光足印相机拍摄的地物影像质量是否正常	L2 级及以上产品
激光光斑影像质量	04	评价激光足印相机拍摄的激光光斑影像质量是否正常	L2 级及以上产品
波形数据质量	05	评价线性体制激光发射和接收的波形数据质量是否正常	线性体制激光测高数据产品, L2 级及以上产品
光子数据质量	06	评价光子体制激光背景噪声率、信噪比是否合格	光子体制激光测高数据产品 L2 级及以上产品
空间参考与时间系统	07	评价激光测量数据采用的空间坐标系统和时间系统是否符合要求	L2 级及以上产品
几何定位精度	08	评价激光测高足印中心点几何精度是否满足要求	L2 级及以上产品
环境影响因子	09	评价外部环境对激光测高数据质量的影响程度	L2 级及以上产品

5.2 质量子元素

对地观测卫星激光测高数据质量子元素应满足表 2 的规定。根据技术设计、成果类型和用途等具体情况，可扩充或调整。扩充或调整质量子元素应经过生产委托方批准，并适用于构建对地观测卫星激光测高数据质量评价体系。

表 2 质量子元素

代码	质量元素	质量子元素	描述
01	数据有效性	格式	观测数据生成文件的格式正确性
		数据	观测数据生成文件的数据完整性
02	设备工作状态	监视相机状态参数	监视相机拍摄到光轴信息的状态
		探测器工作温度	卫星运作时探测器组件内部的温度情况
03	激光足印影像质量	云量	激光足印影像中云覆盖百分比
		灰度级分布	激光足印影像灰度级的分布
		影像清晰度	激光足印影像细部纹理及其边界的清晰程度
		无效像元占比	激光足印影像中无效像元占总体的比重
		影像信噪比	激光足印影像的信噪比值
04	激光光斑影像质量	激光光斑形状特征	激光光斑影像长半轴、扁率和方位角的大小
		最大强度值	激光光斑影像内的最大强度值
		总强度值	激光光斑影像内的总强度值
		可用像素数	激光光斑影像内的可用像素数量
		质心位置	激光光斑影像中的质心位置
05	波形数据质量	背景噪声阈值	描述波形数据背景噪声值的阈值
		背景噪声标准差	描述波形数据背景噪声值的标准差
		波形偏度	表征波形数据分布偏斜的方向和程度
		波形峰度	表征波形数据波峰的扁平程度
		波形强度信息熵	波形的信息熵大小
		波形信噪比	波形的信噪比大小
		波峰数	波形分解后各个分量的峰值数量
		振幅	波形分解后各个分量的振幅大小
06	光子数据质量	半高脉宽	波形分解后各个分量在振幅一半处对应的宽度
		光子背景噪声率	单脉冲单位时间内接收到的噪声光子数量
07	空间参考与时间系统	光子信噪比	噪声光子与信号光子的占比
		空间参考	测量数据采用的坐标系统和高程系统
08	几何位置精度	时间系统	测量数据采用的时间系统
		平面精度	平面坐标值与其真值的接近程度
09	环境影响因子	高程精度	高程值与其真值的接近程度
		大气改正	激光足印几何定位的大气延迟改正
		潮汐改正	激光足印几何定位的潮汐改正
		地形坡度	激光足印范围内地形的坡度大小

表 2（续）

代码	质量元素	质量子元素	描述
		地表粗糙度	激光足印范围内地表的粗糙度大小
		地表反射率	激光足印范围内地物对激光脉冲的反射率大小
		气溶胶光学厚度	激光穿过大气时气溶胶的光学厚度值

6 质量评价方法

6.1 数据有效性

6.1.1 格式

激光测高数据主体文件应采用 HDF 格式，元数据文件应采用 XML 格式。如果存储格式正确且能有效读取，评价为合格，否则不合格。

6.1.2 数据

激光测高数据应包括卫星轨道和姿态数据、激光光斑影像、激光足印影像、波形/光子数据及其他辅助数据。如果数据完整，评价为合格，否则不合格。

6.2 设备工作状态

6.2.1 监视相机状态

监视相机状态质量评价应符合表 3 的规定。根据数据文件中监视相机质量评价标志判断相机工作状态，进而判断数据是否可用。

表 3 监视相机状态质量评价

监视相机状态	质量控制标识	描述
状态正常	0	监视相机监视到光轴信息
状态异常	1	监视相机未监视到光轴信息

6.2.2 探测器工作温度

探测器工作温度状态应符合表 4 的规定。记录激光测高仪工作状态时的探测器温度，判断激光测高仪是否处于正常工作状态。

表 4 探测器工作温度状态质量评价

探测器温度	质量控制标识	描述
>温度阈值	0	仪器温度处于正常工作范围
≤温度阈值	1	仪器温度超出正常工作范围
注：温度阈值由卫星载荷制造方确定。		

6.3 激光足印影像质量

6.3.1 云量

6.3.1.1 统计激光足印范围内是否有云，判断激光数据是否受云影响。激光足印范围内云量应符合表 5 的规定。

表 5 激光足印范围内云量质量评价

激光足印范围云量	质量控制标识	描述
无云	0	激光足印范围内无云覆盖，激光数据不受云影响
有云	1	激光足印范围内有云覆盖，激光数据受云影响

6.3.1.2 统计激光足印影像上的云量占比，判断足印影像成像质量，确定足印影像是否可用。激光足印影像云量参数应符合表 6 的规定。

表 6 激光足印影像云量质量评价

激光足印影像云量	质量控制标识	描述
云量<20%	0	激光足印影像上云覆盖很少，质量较好，可以使用
40%≥云量≥20%	1	激光足印影像上云覆盖较多，质量一般，不建议使用
云量≥40%	2	激光足印影像上云覆盖很多，质量较差，不可用

注：激光足印影像云量是指云覆盖区域像元占影像总像元的百分比。

6.3.2 灰度级分布

灰度级分布用于评价激光足印影像可识别特征的数量，反映激光足印影像成像质量。灰度级分布大小按公式(1)计算。

$$\sigma_{gray} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (v_i - \frac{1}{L})^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

σ_{gray} ——灰度级分布，无量纲；

v_i ——灰度级为 i 所对应的频次，其中 $i = 1, 2, \dots, L$ ；

L ——足印影像灰度级。

灰度级分布参数可根据仪器成像机理以及灰度级分布理论最大值、最小值，量化为 0~1 之间的数值。

6.3.3 影像清晰度

影像清晰度用于衡量激光足印影像上各细部影纹理及其边界的清晰程度。影像清晰度按公式(2)计算。

$$T = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \left(I(i, j) - \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I(i, j) \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

式中：

T ——影像清晰度；

$I(i, j)$ ——表示影像第 i 行、第 j 处的像元灰度值；

M ——影像总行数；

N ——影像总列数。

影像清晰度参数可根据仪器成像机理以及灰度级分布理论最大值、最小值，量化为 0~1 之间的数值。

6.3.4 无效像元占比

无效像元比是像元值为空或者异常值的像元占总像元数的比值，该参数为 0~1 之间的数值。当足印影像无效像元占整幅影像的比值超过 30%时，则判定影像质量较差。

6.3.5 影像信噪比

激光足印影像信号与其噪声标准差之比为激光足印影像信噪比，按公式(3)计算。

$$SNR_l = 10 \lg \frac{L_l}{\sigma_l} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

SNR_l ——激光足印影像信噪比，单位为分贝（db）；

L_l ——激光足印影像灰度的均值，无量纲；

σ_l ——激光足印影像灰度的标准差，无量纲。

影像信噪比质量评价应符合表 7 的规定。

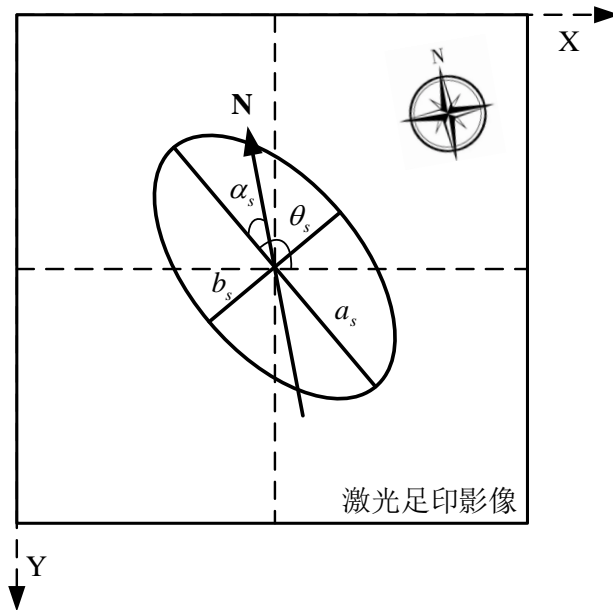
表 7 影像信噪比质量评价

影像信噪比	质量控制标识	描述
$\geq 30\text{db}$	0	激光足印影像整体质量较好
$< 30\text{db}$	1	激光足印影像可能由于成像错误、过曝等原因，存在较多的噪声，整体质量较差

6.4 激光光斑影像质量

6.4.1 激光光斑形状特征

激光光斑形状特征包含长半轴、短半轴、方位角、偏心率等参数。光斑影像方位角示意图见图 1，长半轴可反映激光光斑的大小、距离跨度，可通过载荷坐标系框架、激光光斑坐标系框架和卫星轨道之间的几何关系计算出方位角大小。结合激光光斑外场检校结果，实现激光光斑特征参数质量控制。



标引序号说明：

α_s ——激光光斑的方位角，单位为度（°）；

θ_s ——激光光斑长半轴的倾角，单位为度（°）；

a_s ——激光光斑的长半轴，单位为像素；

b_s ——激光光斑的短半轴，单位为像素。

图 1 光斑影像方位角

激光光斑的长半轴、短半轴通过椭圆拟合确定。激光光斑的扁率 e_s 按公式(4)计算。

$$e_s = \frac{a_s - b_s}{a_s} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

e_s ——激光光斑的扁率，无量纲；

a_s ——长半轴，单位为像素；

b_s ——短半轴，单位为像素。

激光光斑形状特征质量评价应符合表 8 的规定，通过外业布设地面探测器或对足印影像上的激光光斑影像进行定量分析得到。

表 8 光斑形状特征质量评价

质量控制标识	描述
0	长半轴在设计误差允许范围内，扁率大于 0.6，判断激光光斑质量为优
1	长半轴在设计误差允许范围内，扁率大于或等于 0.2 且小于或等于 0.6，判断激光光斑质量较好
2	长半轴不在设计误差允许范围内，判断激光光斑质量较差

6.4.2 激光光斑内最大强度值、总强度值和可用像素数

激光光斑内影像的最大强度值、可用像素数和总强度值用于评价激光光斑的数据质量。最大强度值的表达式见公式（5），可用像素数的表达式见公式（6），总强度值的表达式见公式（7）。

$$I_{\max} = \max(I(i, j)) \dots\dots\dots (5)$$

$$K_{\text{count}} = \text{Count}(I(i, j)), I(i, j) \geq \frac{1}{e^2} I_{\max} \dots\dots\dots (6)$$

$$K_{\text{all}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j), I(i, j) \geq \frac{1}{e^2} I_{\max} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

I_{\max} ——激光光斑内影像的最大强度值，无量纲；

K_{count} ——激光光斑内影像的可用像素数，单位为个；

K_{all} ——激光光斑内影像的总强度值，无量纲。

6.4.3 激光光斑质心位置

采用灰度重心法提取光斑质心，激光光斑质心位置坐标按公式（8）和公式（9）计算。必要时，结合激光光斑外场检校结果，实现光斑质心位置变化参数质量控制。

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)} \dots\dots\dots (8)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N j \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

x_0 ——激光光斑质心横坐标，单位为像素；

y_0 ——激光光斑质心纵坐标，单位为像素。

激光光斑质心位置质量评价应符合表 9 的规定。

表 9 光斑质心位置质量评价

质量控制标识	描述
0	质心位置参数在正常误差限范围内
1	质心位置参数超出正常误差限范围内

6.5 波形数据质量

6.5.1 背景噪声标准差和背景噪声阈值

根据波形特征，选取波形开始或者结尾部分设定个数的样本，计算波形背景噪声平均值和背景噪声标准差。背景噪声阈值利用背景噪声平均值和背景噪声标准差计算。背景噪声标准差和背景噪声阈值一般用于评价激光回波波形质量，按公式（10）、公式（11）和公式（12）计算。

$$\mu_n = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} w_i \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (w_i - \bar{w})^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$B = \mu_n + N_B \sigma_n \dots\dots\dots (12)$$

式中：

μ_n ——背景噪声平均值，单位为毫伏（mV）；

n_s ——选取的波形噪声样本区的样本数，单位为个；

w_i ——波形噪声样本区第 i ($i=1,2,\dots,n_s$) 个样本波形强度值，单位为毫伏（mV）；

σ_n ——背景噪声标准差，单位为毫伏（mV）；

N_B ——背景噪声标准差的倍数，一般取值 4~4.5；

B ——背景噪声的阈值，单位为毫伏（mV）。

波形背景噪声标准差和背景噪声阈值质量评价应符合表 10 的规定。

表 10 背景噪声标准差和背景噪声阈值质量评价

质量控制标识	描述
0	背景噪声标准差和背景噪声阈值均小于或等于阈值，判断激光波形质量较好
1	背景噪声标准差或背景噪声阈值大于阈值，判断波形数据质量一般
2	背景噪声标准差和背景噪声阈值均大于阈值，判断波形数据质量较差
注： 随机统计数百个波形的背景噪声标准差和背景噪声阈值，将其均值作为经验阈值。	

6.5.2 波形偏度和波形峰度

波形偏度和波形峰度用于评价波形呈正态分布的程度。波形偏度是波形分布的三阶中心矩，用于衡量波形分布的不对称或者倾斜程度。波形峰度是波形分布的四阶中心矩，用于衡量波形分布与正态分布相比的陡峭或扁平程度。波形偏度和波形峰度一般用于评价激光发射波形，按公式(13)、公式(14)和公式(15)计算。

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \dots\dots\dots (13)$$

$$SK = \frac{n \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^3}{(n-1)(n-2)\sigma_n^3} \dots\dots\dots (14)$$

$$K = \frac{1}{n\sigma_n^4} \sum_{i=1}^{n_s} (w_i - \bar{w})^4 - 3 \dots\dots\dots (15)$$

式中：

\bar{w} ——波形样本平均值；

SK ——波形偏度，无量纲；

n ——波形采样个数，单位为个；

K ——波形峰度，无量纲。

波形偏度系数和波形峰度系数质量评价应符合表 11 的规定。

表 11 波形偏度系数和波形峰度系数评价

质量控制标识	描述
0	波形偏度和波形峰度系数波动范围均小于或等于阈值，判断发射波形质量较好
1	波形偏度或波形峰度系数波动范围大于阈值，判断发射波形数据质量一般
2	波形偏度和波形峰度系数波动范围均大于阈值，判断发射波形数据质量较差
注：以标准的高斯正态分布叠加激光测高仪的本底噪声，计算激光发射波形的波形偏度、波形峰度，将其作为经验阈值。	

6.5.3 波形强度信息熵

波形强度平均信息熵用于评价激光波形数据质量。波形强度平均信息熵按公式（16）计算。

$$\bar{H} = E(-\log_2 P_i) = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \dots\dots\dots (16)$$

式中：

\bar{H} ——波形强度平均信息熵，单位为比特（bit）；

E ——数学期望运算；

P_i ——经标定后回波数据中第 i 级强度值出现的概率（ $i=1,2,\dots,n$ ， n 为强度值的总级数）。

波形强度信息熵质量评价应符合表 12 的规定。

表 12 波形强度信息熵质量评价

质量控制标识	描述
0	波形强度信息熵参数大于等于阈值，数据质量较好
1	波形强度信息熵参数小于阈值，数据质量较差
注：计算数百个激光足印点的回波强度信息熵，将其均值作为阈值。	

6.5.4 波形信噪比

波形信噪比用于评价波形信息量大小，按公式（17）计算。

$$SNR_w = 10 \lg \frac{w_{\max} - \mu_n}{\sigma_n} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

SNR_w ——波形信噪比，单位为分贝（db）；

w_{\max} ——波形强度值的最大值，单位为毫伏（mV）。

波形信噪比质量评价应符合表 13 的规定。

表 13 波形信噪比质量评价

质量控制标识	描述
0	信噪比参数大于 20，数据质量非常好
1	信噪比参数介于 10 和 20 之间，数据质量比较好
2	信噪比参数小于 10，数据质量较差
注：计算数百个激光足印点的回波强度信噪比，将其均值作为阈值。	

6.5.5 波峰数、振幅和半高脉宽

波峰数、振幅和半高脉宽用于评价激光受地形、地物影响的程度。通过高斯分解将波形分解为若干个高斯分量的和，高斯分量个数为波峰数，高斯分量的峰值为振幅，高斯分量的标准差为半高脉宽。高斯分解见公式（18）。

$$w(t) = \varepsilon + \sum_{m=1}^{n_w} A_m e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2}} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- t ——波形的时刻；
- $w(t)$ —— t 时刻波形的振幅值；
- n_w ——波峰数，即高斯分量的数量；
- m ——高斯分量的序号， $m = 1, 2, \dots, n_w$ ；
- A_m ——第 m 个高斯分量的振幅；
- t_m ——第 m 个高斯分量振幅对应的时刻；
- σ_m ——第 m 个高斯分量的标准差；
- e ——自然常数；
- ε ——波形背景噪声偏差估计。

波峰数、振幅和半高脉宽质量评价应符合表 14 的规定。

表 14 波峰数、振幅和半高脉宽质量评价

质量控制标识	描述
0	回波波峰数等于 1，半高脉宽与发射脉宽相当，表明地面平坦，地物较少，用于高程控制点质量较好
1	回波波峰数等于 1，半高脉宽大于发射脉宽，表明地面坡度较大或，不宜用于高程控制点
2	回波波峰数大于或等于 2，表面地面有高程分层，存在建筑或树木，不宜用于高程控制点，可用于树高或建筑高度提取

6.6 光子数据质量

6.6.1 光子背景噪声率

光子背景噪声率用于评价光子体制激光测高数据质量。光子背景噪声率按公式（19）计算。

$$R_r = \frac{N_r}{n_r \times h_r} \times \frac{c}{2} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- R_r ——光子背景噪声率，单位为赫兹（Hz）；
- N_r ——相邻 r 束脉冲的总噪声数量，单位为个；
- n_r ——波束数，单位为个；
- h_r ——噪声光子所分布的窗口高度，单位为米（m）；
- c ——光速，单位为米每秒（m/s）。

光子背景噪声率质量评价应符合表 15 的规定。

表 15 光子数据背景噪声率质量评价

噪声率范围	描述
$\leq 1\text{MHz}$	噪声率较低，光子数据质量好
$1\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$	噪声率中等，光子数据质量一般
$> 10\text{MHz}$	噪声率较高，光子数据质量差

6.6.2 光子信噪比

光子信噪比用于评价光子体制激光测高数据质量，按公式（20）计算。

$$SNR_p = \frac{S_p}{R_p} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

SNR_p ——光子信噪比，无量纲；

S_p ——信号光子数量，单位为个；

R_p ——噪声光子数量，单位为个。

光子信噪比质量评价应符合表 16 的规定。

表 16 光子信噪比质量评价

光子信噪比范围	描述
(0, 3]	信噪比很低，难以识别信号，数据质量很差
(3, 40]	信噪比较低，信号和噪声区分不明显，数据质量较差
(40, 100]	信噪比中等，信号和噪声明显区分，数据质量较好
(100, ∞)	信噪比较高，很容易区分信号和噪声，数据质量很好

6.7 空间参考与时间系统

6.7.1 空间参考

检查数据坐标系统是否采用 CGCS2000，或采用经批准的其他坐标系是否附有必要性说明。

检查数据高程系统是否采用 CGCS2000 大地高，或采用经批准的其他高程系统是否附有必要性说明。

空间参考与时间系统质量评价应符合表 17 的规定。

表 17 空间参考质量评价

质量控制标识	描述
0	采用 CGCS2000，或采用经批准的其他坐标系附必要性说明，数据质量合格
1	未采用 CGCS2000，或采用经批准的其他坐标系未附必要性说明，数据质量不合格

6.7.2 时间系统

检查数据的时间系统是否采用 CST。

时间系统质量评价应符合表 18 的规定。

表 18 时间系统质量评价

质量控制标识	描述
0	采用 CST，或采用 CST 附必要性说明，数据质量合格
1	未采用 CST，未附必要性说明，数据质不量合格

6.8 几何位置精度

6.8.1 高程精度

选择位于平坦硬质地表或平静水面等区域的激光点，评价激光测高数据高程精度。以激光足印中心点为圆点、激光光斑形状特征为约束选择激光足印范围内不少于 10 个高程参考点，所选用的高程参考点的测量方法与精度应符合 CH/T 1021-2010 的相关要求，取该激光点对应的所有高程参考点的高程平均值作为实测高程值。参与评价的激光点数量一般为 20 个~50 个，激光点应分布均匀、位置明显，避免选择高程急剧变化处。激光点数量可根据激光足印光斑密度、覆盖范围等具体情况确定。所选激光点最大高程误差按公式（21）计算，所选激光点高程中误差按公式（22）计算。

$$d_{Z_{max}} = \max \left(\left| Z_i - \hat{Z}_i \right| \right) \dots\dots\dots (21)$$

$$Z_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2 / n} \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$d_{Z_{max}}$ ——最大高程差, 单位为米(m);

Z_i ——激光点对应的高程值, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$;

\hat{Z}_i ——激光点的实测高程值, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$ 。

Z_{RMSE} ——高程中误差, 单位为米(m);

n ——激光点个数。

激光测高数据高程精度质量评价应符合表 19 的规定。

表 19 激光测高数据高程精度质量评价

质量控制标识	描述
0	高程精度参数小于或等于阈值, 数据质量较好
1	高程精度参数大于阈值, 数据质量较差

6.8.2 平面精度

利用特征地物或地面实际布设的激光探测器或角反射器, 获得激光足印中心点实测坐标, 对激光点平面精度进行评价。用于获得激光足印中心点实测坐标的检查点测量方法与精度应符合 CH/T 1021-2010 的相关要求, 检查点的坐标系统应与激光测高坐标系统一致。参与评价的激光点数量一般为 10 个~20 个, 特殊困难条件下应不少于 5 个。激光测高数据在 X 方向和 Y 方向的最大平面坐标误差可用于反映激光测高数据平面位置与其真实平面位置之间的最大差异。

a) 最大平面坐标误差: 激光点的最大平面坐标误差按公式 (23)、公式 (24) 和公式 (25) 计算。

$$d_{X_{max}} = \max(|X_i - \hat{X}_i|) \dots\dots\dots (23)$$

$$d_{Y_{max}} = \max(|Y_i - \hat{Y}_i|) \dots\dots\dots (24)$$

$$d_{XY_{max}} = \max\left(\sqrt{(X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2}\right) \dots\dots\dots (25)$$

式中:

$d_{X_{max}}$ ——激光测高数据在 X 方向上的最大坐标误差, 单位为米(m);

X_i ——激光点在 X 方向上的坐标, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$;

\hat{X}_i ——激光点在 X_i 方向上实测的坐标, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$;

n ——检查点个数;

$d_{Y_{max}}$ ——激光测高数据在 Y 方向上的最大坐标误差, 单位为米(m);

Y_i ——激光点在 Y 方向上的坐标, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$

\hat{Y}_i ——激光点在 Y_i 方向上实测的坐标, 单位为米(m), $i=1,2,\dots,n$;

$d_{XY_{max}}$ ——激光测高数据最大平面坐标误差, 单位为米(m)。

b) 平面坐标中误差: 激光点的平面坐标中误差按公式 (26)、公式 (27) 和公式 (28) 计算。

$$X_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 / n} \dots\dots\dots (26)$$

$$Y_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n} \dots\dots\dots (27)$$

$$XY_{RMSE} = \sqrt{X_{RMSE}^2 + Y_{RMSE}^2} \dots\dots\dots (28)$$

式中：

X_{RMSE} ——激光测高数据在 X 方向上的坐标中误差，单位为米 (m)；

Y_{RMSE} ——激光测高数据在 Y 方向上的坐标中误差，单位为米 (m)；

XY_{RMSE} ——激光测高数据平面坐标中误差，单位为米 (m)。

激光测高数据平面精度质量评价应符合表 20 的规定。

表 20 激光测高数据平面精度质量评价

质量控制标识	描述
0	平面精度参数小于或等于阈值，数据质量较好
1	平面精度参数大于阈值，数据质量较差

6.9 环境影响因子

6.9.1 大气改正

用于评价是否改正大气层折射效应引起的激光测高误差。激光测高数据大气改正质量评价应符合表 21 的规定。

表 21 激光测高数据大气改正质量评价

质量控制标识	描述
0	大气延迟改正正常，数据质量较好
1	没有经过大气延迟改正或大气延迟改正值超出正常范围，数据质量较差

6.9.2 潮汐改正

用于评价是否改正地球潮汐效应引起的激光测高误差。激光测高数据潮汐改正质量评价应符合表 22 的规定。

表 22 激光测高数据潮汐改正质量评价

质量控制标识	描述
0	潮汐改正正常，数据质量较好
1	没有潮汐改正或者改正数值不在正常范围，数据质量较差

6.9.3 地形坡度

利用激光回波波形反演地形坡度，地形坡度按公式 (29) 计算。

$$\tan S_{footprint} = \frac{c}{2z \tan q_r} \sqrt{s_p^2 - s_l^2 - s_h^2} \dots\dots\dots (29)$$

式中：

$S_{footprint}$ ——地形坡度，单位为弧度 (rad)；

c ——光速，单位为米每秒 (m/s)；

z ——激光测高的高度，单位为米 (m)；

q_r ——激光束的半波宽发射角，单位为弧度 (rad)；

s_p ——接收脉冲的均方根脉宽，单位为秒 (s)；

s_l ——发射脉冲的均方根脉宽，单位为秒 (s)；

s_h ——接收器冲激响应均方根脉宽，单位为秒 (s)。

地形坡度质量评价应符合表 23 的规定。

表 23 地形坡度质量评价

质量控制标识	描述
0	地形坡度小于或等于 5 度，数据质量较好
1	地形坡度大于 5 度，数据质量较差

6.9.4 地表粗糙度

通过基于激光回波波形反演计算地表粗糙度，按公式(30)计算。

$$\Delta\xi = \frac{c}{2} \sqrt{s_p^2 - s_l^2 - s_h^2} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

$\Delta\xi$ ——地表粗糙度，单位为米（m）。

地表粗糙度质量评价应符合表 24 的规定。

表 24 地表粗糙度质量评价

质量控制标识	描述
0	地表粗糙度小于或等于 1m，数据质量较好
1	地表粗糙度大于 1m，数据质量较差

6.9.5 地表反射率

根据激光雷达方程，利用发射激光脉冲能量、激光回波脉冲能量和激光测高仪相关参数，计算地表反射率，按公式(31)计算。

$$\rho_{sur} = \frac{E_{echo} R^2 \cos(\Omega)}{E_{send} A \eta_{sys} \eta_{atm}^2} \dots\dots\dots (31)$$

式中：

- ρ_{sur} ——目标点的平均地表反射率，无量纲；
- E_{echo} ——接收回波脉冲能量，单位为毫焦（mJ）；
- R ——探测器到目标点之间的距离，单位为千米（km）；
- Ω ——等效散射角，单位为微弧度（ μ rad）；
- E_{send} ——发射脉冲能量，单位为毫焦（mJ）；
- A ——接收器（望远镜）的面积，单位为平方米（ km^2 ）；
- η_{sys} ——光学系统传输系数，无量纲；
- η_{atm} ——单程大气传输系数，无量纲。

6.9.6 气溶胶光学厚度 (AOD)

AOD 用于评价大气气溶胶单位截面积对激光脉冲的削弱能力。AOD 按公式（32）～（35）计算。

$$\tau = \int_{Z'}^{Z'+\Delta} S_{\alpha} \beta_{\alpha}(Z') dZ' \dots\dots\dots (32)$$

$$\beta_{\alpha}(Z') = \frac{T_m^{2(k_{radar}-1)}(Z') P_n(Z')}{I(Z) - 2S_{\alpha} \int_Z^{Z'} T_m^{2(k_{radar}-1)}(Z') P_n(Z') dZ'} - \beta_m(Z') \dots\dots\dots (33)$$

$$k_{radar} = S_{\alpha} / S_m \dots\dots\dots (34)$$

$$P_n(Z') = \beta_m(Z') T_m^2(Z') \dots\dots\dots (35)$$

式中：

- τ ——AOD，无量纲；
- Z' ——气溶胶顶高度，单位为千米（km）；
- Δ ——激光穿透气溶胶厚度，单位为千米（km）；
- S_{α} ——气溶胶的消光系数，单位为每米立体角（ $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ）；
- β_{α} ——气溶胶的后向散射系数，单位为每米立体角（ $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ）；
- T_m ——空气分子散射的透过率，无量纲；
- k_{radar} ——激光雷达比，无量纲；

P_n ——空气分子的有效后向散射系数，单位为每米立体角 ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)；

$I(Z)$ ——激光雷达接收望远镜到计算的气溶胶层层顶的双向透过率，无量纲；

S_m ——空气分子的消光系数，单位为每米立体角 ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)；

β_m ——空气分子的后向散射系数，单位为每米立体角 ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)；

Z ——接收望远镜所在高度，单位为千米 (km)。

AOD 质量评价应符合表 25 的规定。

表 25 气溶胶光学厚度质量评价

质量控制标识	描述
0	$\tau < 0.2$ ，激光几乎未受到大气散射的影响
1	$0.2 \leq \tau \leq 0.5$ ，激光受到大气散射的影响较小
2	$\tau > 0.5$ ，激光受到大气散射的影响较大

7 评价结果汇总

对地观测激光测高数据质量检验方式分为全检和抽检，其中数据有效性、足印影像质量、波形特征质量、空间参考与时间系统、环境影响因子应全检，设备工作状态、光斑影像质量、几何位置精度抽检，评价方法按照第 6 章的规定。各个质量元素/子元素评价指标检查完后应按表 26 进行汇总。

表 26 评价结果汇总表

代码	质量元素	质量子元素	检验方式		指标值
			全检	抽检	
01	数据有效性	格式	✓		
		数据	✓		
02	设备工作状态	监视相机状态参数		✓	
		探测器组件温度		✓	
03	激光足印影像质量	云量	✓		
		灰度级分布	✓		
		影像清晰度	✓		
		无效像元占比	✓		
		影像信噪比	✓		
04	激光光斑影像质量	质心位置		✓	
		最大强度值		✓	
		总强度值		✓	
		可用像素数		✓	
		质心位置		✓	
05	波形特征质量	背景噪声阈值	✓		
		背景噪声标准差	✓		
		波形偏度	✓		
		波形峰度	✓		
		波形强度信息熵	✓		
		波形信噪比	✓		
		波峰数	✓		
		振幅	✓		
		半高脉宽	✓		
06	光子数据质量	光子背景噪声率	✓		
		光子信噪比	✓		
07	空间参考与时间系统	空间参考		✓	
		时间系统		✓	
08	几何位置精度	平面精度		✓	
		高程精度		✓	

表 26 (续)

代码	质量元素	质量子元素	检验方式	指标值
09	环境影响因子	大气改正	✓	
		潮汐改正	✓	
		地形坡度	✓	
		地表粗糙度	✓	
		地表反射率	✓	
		气溶胶光学厚度	✓	