

ICS 07. 040

CCS A 77

CH

中华人民共和国测绘行业标准

CH/T XXXXX—XXXX

对地观测卫星激光几何检校技术规范

Technical specification for laser geometric calibration of earth observation satellite

报批稿

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

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 缩略语	1
5 总体要求	2
5.1 空间参考	2
5.2 时间系统	2
5.3 检校周期	2
5.4 检校成果	2
5.5 检校精度	2
6 检校过程	2
6.1 技术流程	2
6.2 任务设计	3
6.3 控制获取	4
6.4 参数解算	5
6.5 参数精度验证	7
7 过程记录与资料归档	7
7.1 过程记录	7
7.2 参数文件命名	7
7.3 资料归档	7
附录 A (资料性) 外业作业记录表示例	9
附录 B (资料性) 激光指向检校参数和激光测距检校参数记录表示例	11
附录 C (资料性) 激光指向检校参数和激光测距检校参数精度验证结果记录表示例	12

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、武汉大学、自然资源部第一大地测量队、中国科学院上海技术物理研究所、中国航天科技集团公司第五研究院第五〇八研究所。

本文件主要起草人：唐新明、谢俊峰、莫凡、窦显辉、李少宁、李松、唐洪钊、李国鹏、黄庚华、陈辉、王春辉、胡芬、欧阳斯达、祝小勇、薛玉彩。

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即将发射，更先进的陆海激光高程测量卫星也在规划中。

在轨几何检校是实现高精度卫星激光测高的必要途径，但目前国内尚没有对地观测卫星激光在轨几何检校技术规范。针对国产卫星激光测高的特点，为满足卫星激光测高技术快速发展的需要，特制定对地观测卫星激光几何检校技术规范。本文件与《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质量评价指标及方法》和《对地观测卫星激光测高数据产品》配套使用。

对地观测卫星激光几何检校技术规范

1 范围

本文件规定了对地观测卫星激光几何检校的总体要求、检校过程、过程记录与资料归档。

本文件适用于对地观测卫星线性体制激光测高仪在轨几何检校(以下简称几何检校)作业,激光测高卫星或装载激光测距载荷卫星可参照使用。

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

GB/T 36100-2018 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法

CH/T XXXX- XXXX 对地观测卫星激光测高数据产品

3 术语和定义

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

3.1

地面探测器 ground energy detector

放置于激光足印范围内,用于响应特定波长的激光信号,能够反映到达地面的激光波束的能量分布和光斑大小等信息的感应器。

3.2

激光指向参数 laser pointing parameters

激光出光光轴相对于卫星本体的安装角度值。

3.3

激光测距参数 laser ranging parameter

根据激光渡越时间计算得到的激光出光点至地面反射点的距离参数。

3.4

激光指向检校参数 laser pointing calibration parameter

激光实际指向参数与激光指向参数的系统差值。

3.5

激光测距检校参数 laser ranging calibration parameter

激光实际测距参数与激光测距参数的系统差值。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件：

BODY：卫星本体坐标系 (Body Coordinate)

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

CST：中国国家标准时间 (China Standard Time)

ICRF：国际天球参考框架 (International Celestial Reference Frame)

ITRF：国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame)

WGS84：世界大地测量系统 (World Geodetic System -1984 Coordinate System)

5 总体要求

5.1 空间参考

5.1.1 坐标系采用 CGCS2000。必要时，采用经批准的其他坐标系。

5.1.2 高程系采用 1985 国家高程基准。采用其他高程基准时，应与 1985 国家高程基准建立联系。

5.2 时间系统

5.2.1 时间系统为 CST。

5.2.2 卫星上传数据和过程数据的时间系统采用累积秒记录。

注：累计秒是指以某一时刻为基准起算到当前时刻的累积时间，以秒为单位。

5.3 检校周期

应每年至少检校1次，6个月检校1次为宜。激光测高精度明显异常时应及时检校。

5.4 检校成果

几何检校成果为激光指向检校参数和激光测距检校参数。

5.5 检校精度

激光指向检校参数精度应优于 $(\delta + 1)''$ ，激光测距检校参数精度应优于 $(\rho + 0.1)\text{m}$ ， δ 为卫星平台的姿态测量精度， ρ 为激光测高仪经过实验室标校后的距离测量精度。

6 检校过程

6.1 技术流程

几何检校技术流程见图1。

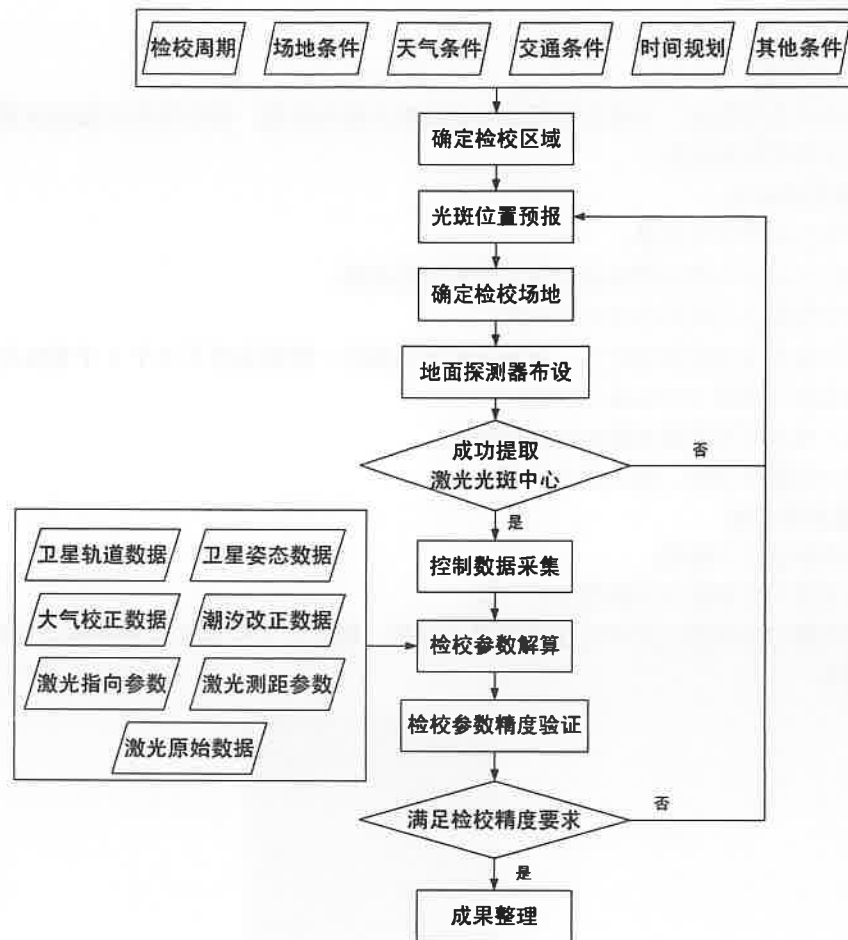


图1 几何检校技术流程

6.2 任务设计

6.2.1 方法选取

几何检校方法有：地面探测器检校法、机载相机成像检校法、角反射器检校法、平坦地形检校法、波形匹配检校法、地形匹配检校法以及相关方法的结合等。应根据对地观测卫星激光测高载荷特性及精度要求选取合适的检校方法，宜采用地面探测器检校法。

6.2.2 场地条件

地势应平坦，地形坡度小于 2° ，无建(构)筑物遮挡。

6.2.3 天气条件

激光测高仪过境期间，应无云，避开雨、雪、冰雹等极端天气。

6.2.4 交通条件

地面设备应方便运输至检校区域。

6.2.5 时间规划

利用卫星在轨运行时按照一定频率记录卫星星体在空间中位置状态的数据，预估卫星星下点轨迹。参考检校准备情况、天气预报信息等，规划检校作业时间。

6.2.6 其他条件

卫星侧摆角应小于 2° ，若无特殊情况，一般不侧摆。为尽量减少姿态测量随机误差对检校参数的影响，应采用多个时间和多点综合检校的策略，一般应不少于3个时间段、3个几何检校地面控制点。

6.3 控制获取

6.3.1 光斑位置预报

根据卫星轨道预报数据、卫星姿态预报数据和激光指向参数，预报激光在检校区域内的位置坐标，作为布设地面探测器阵列场地。

6.3.2 地面探测器设计

地面探测器应满足以下要求：

- a) 探测能量响应范围应覆盖激光地面光斑能量范围；
- b) 探测能量输出量化等级不少于 8 级；
- c) 在不同激光发射能量情况下，地面探测器的响应一致性偏差不大于 1 个量化分层；
- d) 探测波长已采用 532nm 或 1064nm；
- e) 具备不受太阳等背景光影响的滤波功能；
- f) 具备自动置平功能，置平度小于 2° 。

6.3.3 地面探测器布设

布设方案应满足以下要求：

- a) 布设方位与卫星星下点轨迹方位一致；
- b) 布设范围应包络激光足印位置预报最大误差，激光足印应落在地面探测器阵列内，布设方式见图 2；

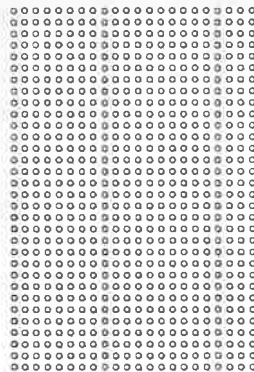


图 2 地面探测器布设方式

- c) 根据卫星激光足印大小设置地面探测器布设间距，光斑内应至少有 5×5 个地面探测器被卫星激光触发；
- d) 地面探测器布设宜调整在同一水平面。

6.3.4 激光光斑中心提取

6.3.4.1 预处理

根据被触发探测器阵列数据，结合卫星激光光斑呈不规则圆形或椭圆形、能量呈高斯分布等特性，剔除误触发异常点，对缺失点采用邻近插值进行补值，得到完整真实能量阵列值。

6.3.4.2 光斑中心计算

计算预处理后的能量阵列中心，作为几何检校地面控制点。

6.3.5 地面探测器坐标测量

采用GNSS RTK或其他高精度测量手段，实测被激光触发的地面探测器坐标，空间坐标系按照5.1的规定执行。

6.4 参数解算

6.4.1 几何检校模型

根据卫星平台质心、激光器发射位置、GNSS天线以及地球椭球面的相对位置偏移和旋转几何关系，构建几何检校模型，矩阵形式见公式(1)。

$$\begin{pmatrix} X_{spot_GCP} \\ Y_{spot_GCP} \\ Z_{spot_GCP} \end{pmatrix}_{ITRF} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF} + R_{ICRF}^{ITRF} R_{BODY}^{ICRF} \begin{bmatrix} \Delta X_{ref} \\ \Delta Y_{ref} \\ \Delta Z_{ref} \end{bmatrix} + (\rho_0 + d\rho_{atm} + \Delta\rho) \begin{pmatrix} \cos(\beta + \Delta\beta) \cos(\alpha + \Delta\alpha) \\ \cos(\beta + \Delta\beta) \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ \sin(\beta + \Delta\beta) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$\begin{pmatrix} X_{spot_GCP} \\ Y_{spot_GCP} \\ Z_{spot_GCP} \end{pmatrix}_{ITRF}$ ——地面实测的ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标，即几何检校地面控制点，

X_{spot_GCP} 、 Y_{spot_GCP} 和 Z_{spot_GCP} 分别为几何检校地面控制点的笛卡尔三维坐标，获取方法见6.3；

$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF}$ ——ITRF卫星质心的笛卡尔三维坐标；

R_{ICRF}^{ITRF} ——ICRF向ITRF的转换矩阵；

R_{BODY}^{ICRF} ——BODY向ICRF的转换矩阵；

$\begin{pmatrix} \Delta X_{ref} \\ \Delta Y_{ref} \\ \Delta Z_{ref} \end{pmatrix}$ ——激光发射参考点与卫星质心间在BODY的固定偏移量；

ρ_0 ——激光测距值；

$d\rho_{atm}$ ——大气改正值；

$\Delta\rho$ ——激光测距检校参数；

α ——激光指向参数之一，激光出光轴在本地坐标系 XOY 面投影与 X 轴正方向的夹角；

β ——激光指向参数之一，激光出光轴与其在 XOY 面的投影线的夹角；

$\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ ——激光指向检校参数。

6.4.2 激光指向检校参数与激光测距检校参数解算

结合几何检校模型，基于最小二乘原理，求解激光指向与激光测距检校参数。公式(1)的误差方程为公式(2)。

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = - \begin{pmatrix} X_{spot_GCP} \\ Y_{spot_GCP} \\ Z_{spot_GCP} \end{pmatrix}_{ITRF} + \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF} + R_{ICRF}^{ITRF} R_{BODY}^{ICRF} \begin{bmatrix} \Delta X_{ref} \\ \Delta Y_{ref} \\ \Delta Z_{ref} \end{bmatrix} + (\rho_0 + d\rho_{atm} + \Delta\rho) \begin{pmatrix} \cos(\beta + \Delta\beta) \cos(\alpha + \Delta\alpha) \\ \cos(\beta + \Delta\beta) \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ \sin(\beta + \Delta\beta) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

F ——几何检校模型误差方程；

$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix}$ ——几何检校模型误差方程在 X 、 Y 和 Z 上的分量。

分别对 α 、 β 和 ρ 求偏导，线性化后的几何检校模型见公式(3)。

$$\begin{cases} X_{spot_GCP} = X_s + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F}{\partial \rho} d\rho \\ Y_{spot_GCP} = Y_s + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F}{\partial \rho} d\rho \\ Z_{spot_GCP} = Z_s + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F}{\partial \rho} d\rho \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial \beta}$ 和 $\frac{\partial F}{\partial \rho}$ —— F 分别在 α 、 β 和 ρ 上的偏导系数；

$d\alpha$ 、 $d\beta$ 和 $d\rho$ —— F 在 α 、 β 和 ρ 上的偏导量，即激光指向检校参数和激光测距检校参数的改正量。

误差方程式见公式(4)。

$$\begin{cases} v_X = \frac{\partial F_X}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_X}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F_X}{\partial \rho} d\rho - l_X \\ v_Y = \frac{\partial F_Y}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_Y}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F_Y}{\partial \rho} d\rho - l_Y \\ v_Z = \frac{\partial F_Z}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_Z}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F_Z}{\partial \rho} d\rho - l_Z \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

v_X 、 v_Y 和 v_Z ——误差项分别在 X 、 Y 和 Z 方向上的分量；

$\frac{\partial F_X}{\partial \alpha}$ 、 $\frac{\partial F_X}{\partial \beta}$ 和 $\frac{\partial F_X}{\partial \rho}$ —— F 的 X 轴分量分别在 α 、 β 和 ρ 上的偏导系数；

$\frac{\partial F_Y}{\partial \alpha}$ 、 $\frac{\partial F_Y}{\partial \beta}$ 和 $\frac{\partial F_Y}{\partial \rho}$ —— F 的 Y 轴分量分别在 α 、 β 和 ρ 上的偏导系数；

$\frac{\partial F_Z}{\partial \alpha}$ 、 $\frac{\partial F_Z}{\partial \beta}$ 和 $\frac{\partial F_Z}{\partial \rho}$ —— F 的 Z 轴分量分别在 α 、 β 和 ρ 上的偏导系数；

l_X 、 l_Y 和 l_Z ——常数项。

误差方程式的矩阵形式见公式(5)。

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_X}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_X}{\partial \beta} & \frac{\partial F_X}{\partial \rho} \\ \frac{\partial F_Y}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_Y}{\partial \beta} & \frac{\partial F_Y}{\partial \rho} \\ \frac{\partial F_Z}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_Z}{\partial \beta} & \frac{\partial F_Z}{\partial \rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ d\rho \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_X \\ l_Y \\ l_Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

公式(5)缩写形式为公式(6)。

$$V = AX - L \dots\dots\dots(6)$$

法方程式见公式(7)。

$$(A^T A)X = A^T L \dots\dots\dots(7)$$

式中：

A^T —— A 转置。

法方程式的解见公式(8)。

$$X = ((A^T A))^{-1} A^T L \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$((A^T A))^{-1}$ —— $((A^T A))$ 求逆。

激光指向检校参数与激光测距检校参数解算是一个迭代计算的过程，通过公式(8)得到激光指向检校参数与激光测距检校参数的改正量，迭代三次为宜。

6.5 参数精度验证

6.5.1 激光指向检校参数

根据卫星激光三次以上检校作业得到激光指向检校参数，激光指向检校参数指向夹角的中误差为激光指向检校参数精度验证结果。计算方法按照GB/T 36100-2018的要求。

6.5.2 激光测距检校参数

计算几何检校地面控制点高程与激光实测高程的中误差作为激光测距检校参数精度，计算方法按照GB/T 36100-2018的要求。

6.5.3 符合性判定

激光指向检校参数精度和激光测距检校参数精度满足5.4的要求，提供给数据生产系统使用；激光指向检校参数精度和激光测距检校参数精度不满足5.4的要求，判定检校失败，应重新检校，直到满足精度要求。

7 过程记录与资料归档

7.1 过程记录

几何检校期间，作业人员应做好过程记录。

- a) 检校控制获取：几何检校外业作业期间，记录被触发探测器情况，外业作业记录表示例见附录A；
- b) 检校参数解算：几何检校完成后，记录激光指向检校参数和激光测距检校参数，记录表示例见附录B；
- c) 检校精度验证：精度验证完成后，记录激光指向检校参数和激光测距检校参数精度验证情况，记录表示例见附录C。

7.2 参数文件命名

激光指向检校参数和激光测距检校参数文件命名方式为：AAAA_YYYYMMDD_LasCaliPara.txt，激光检校精度验证文件命名方式为：AAAA_YYYYMMDD_LasCaliAcc.txt，其中AAAA表示卫星名称缩写，YYYYMMDD为YYYY年MM月DD日。

7.3 资料归档

资料归档包括：

- a) 激光指向检校参数和激光测距检校参数文件；
- b) 激光指向检校参数和激光测距检校参数精度验证结果文件；
- c) 检校精度验证报告按照 GB/T 18316 的要求编写；

附录 A

(资料性)

外业作业记录表示例

外业作业期间，记录地面探测器被触发情况以及被触发地面探测器控制信息情况，被触发地面探测器记录表示例见表 A.1，被触发的地面探测器控制信息记录表示例见表 A.2。

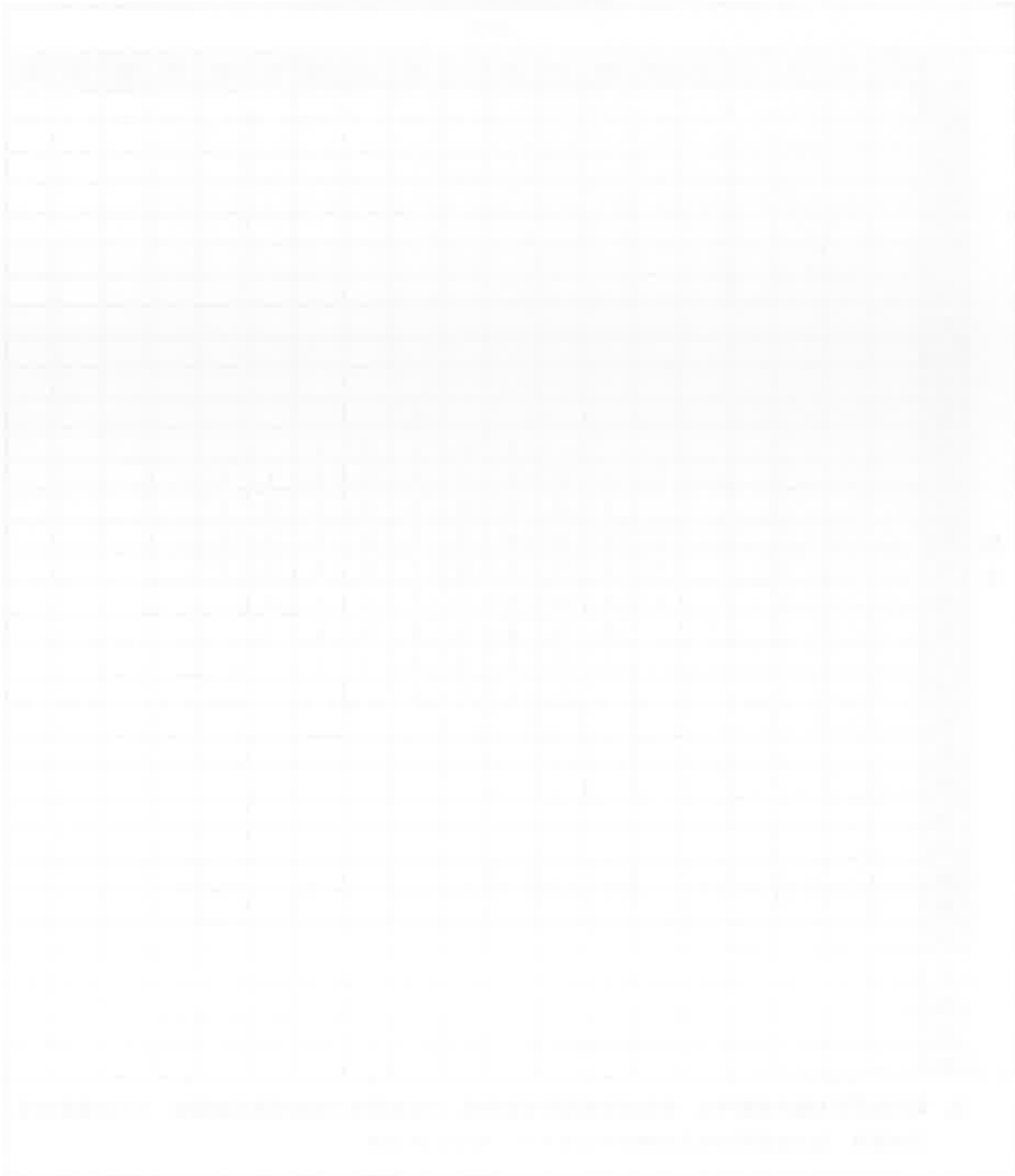
表 A.1 被触发地面探测器记录表示例

		行号																		
		08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
列号	13																			
	14																			
	15																			
	16																			
	17																			
	18																			
	19																			
	20																			
	21																			
	22																			
	23											1								
	24									1	2	1	2	1						
	25							1	2	4	4	3	3	2	1	1				
	26							1	4	5	6	5	4	3	2	1				
	27						1	3	5	6	7	7	5	4	2	1				
	28						1	3	5	7	8	7	6	5	2	1				
	29						1	3	5	6	7	7	5	4	2					
	30							2	4	5	5	5	4	2	1					
	31							1	3	3	3	2	1	1						
	32								1	1	1	1								
	33																			
	34																			
	35																			
	36																			
	37																			
	38																			
39																				
40																				
41																				
42																				
43																				
44																				

注：最大能量值大致在表格中心，灰色表格填写行号和列号，白色表格填写地面探测器能量值。以 8 档能量的地面探测器、最大能量值的地面探测器的行号为 17、列号为 28 为例。

表 A.2 被触发的地面探测器控制信息记录表示例

序号	点号	纬度(°)	经度(°)	高程(m)	备注
1	A221	42.475256	112.261273	145.61	



附录 B

(资料性)

激光指向检校参数和激光测距检校参数记录表示例

激光指向检校参数和激光测距检校参数记录表示例见表 B.1。

表 B.1 激光指向检校参数和激光测距检校参数记录表示例

参数	示例
激光指向检校参数(°)	$\alpha = 0.547312, \beta = 0.817842$
激光测距检校参数(m)	$\rho = 0.05$
注：激光指向检校参数保留小数点后六位，激光测距检校参数保留小数点后两位。	

附录 C

(资料性)

激光指向检校参数和激光测距检校参数精度验证结果记录表示例

激光指向检校参数精度检验结果记录表示例见表C.1。激光测距检校参数精度验证结果记录表示例见表C.2。

表C.1 激光指向检校参数精度检验结果记录表示例

序号	检校日期	检校结果(°)	指向夹角(°)
1	9.13	0.547312, 0.817842	0.984081
2	9.18	0.547621, 0.817748	0.984175
3	9.23	0.547902, 0.817636	0.984238

注：激光指向检校参数精度：0.23”；是(√)/否()满足精度要求。

表C.2 激光测距检校参数精度验证结果记录表示例

序号	激光测量高程(m)	验证数据高程(m)
1	485.25	485.29
2	494.37	494.31
3	491.14	491.19

注：激光测距检校参数精度：0.01 m；是(√)/否()满足精度要求。

《对地观测卫星激光几何检校技术规范》

编制说明

行业标准项目名称： 对地观测卫星激光几何检校技术规范

行业标准项目编号： 201933002

送审行业标准名称： 对地观测卫星激光几何检校技术规范

（此栏送审时填写）

报批行业标准名称： 对地观测卫星激光几何检校技术规范

（此栏报批时填写）

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： 二〇二二年六月

对地观测卫星激光几何检校技术规范

编制说明

一、 工作简况

1. 任务来源

2019年11月15日，自然资源部下达了《自然资源部办公厅关于印发2019年度自然资源标准修订工作计划的通知》（自然资办法[2019]49号），本标准是自然资源部发布的2019年自然资源卫星应用行业标准计划项目之一，项目编号：201933002，标准计划名称《对地观测卫星激光几何检校技术规范》。本标准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。

2. 目的意义

卫星激光测高仪发射升空后，受发射时的震动、太空失重等环境因素影响，卫星激光测高仪指向与测距均会发生一定变化。后续若需要将对地观测卫星数据广泛应用于各行业，首先需要对其开展在轨几何检校试验。然而，对地观测卫星激光几何检校由于受卫星姿态、轨道位置、大气延迟效应、潮汐、光行差等因素影响，检校方法流程复杂，检校精度难以保证。经对地观测卫星激光几何检校处理后得到的激光指向与测距参数，可用于精确解算出全球激光足印三维坐标，不仅可以为光斑应用提供精确地理位置，而且可以作为“高程控制”辅助光学影像提升无控测图精度。

测绘地理信息行业对对地观测卫星激光几何检校标准和相应的技术规范提出了迫切的需求。《测绘地理信息科技发展“十三五”规划》（2016-2020年）提出要“开展超高分辨率立体测绘卫星、激光测高卫星、干涉雷达卫星、

重力卫星等后续卫星测绘指标论证与仿真系统研发，对辐射信号传输、相机系统、星上数据处理系统等进行建模和仿真，形成卫星测绘应用指标体系。开展多星组网联合数据获取技术研究。”自然资源部《自然资源科技创新发展规划纲要》（自然资发〔2018〕117号）提出要：“拓展天空地海一体化立体监测遥感技术，发展多类型高端卫星；突破卫星遥感定量调查与评价关键技术，开展卫星遥感定量调查与评价关键技术研究，构建基于光学、雷达、多光谱、高光谱等遥感卫星观测的自然资源调查监测应用技术体系”。其中星载激光对地观测技术作为天空地海一体化立体监测遥感技术中的重要一环，由本标准对相关工作内容、技术流程与技术要求进行规定。

在国家大力发展对地观测卫星激光测高技术的背景下，形成规范化的卫星激光几何检校流程，有助于促进其技术进步，形成良好的行业应用，为更好地服务国民经济建设，具有重要的意义。

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牵头，由湖南科技大学、武汉大学、自然资源部第一大地测量队、中国科学院上海技术物理研究所、中国航天科技集团公司第五研究院第五〇八研究所等作为参编单位共同完成。编制组成员包括总体技术负责人和长期从事激光几何检校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	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	
2	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	
3	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	

4	窦显辉	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	李少宁	湖南科技大学	负责部分内容的起草与审查工作	
6	李松	武汉大学	负责部分内容的起草与审查工作	
7	唐洪钊	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责相关内容编写与协助通稿工作	
8	李国鹏	自然资源部第一地形测量大队	参与标准技术内容编制	
9	黄庚华	中科院上海技术物理研究所	参与标准起草及资料的搜集	
10	陈辉	自然资源部国土卫星遥感应用中心	参与标准起草及资料的搜集	
11	王春辉	中国航天科技集团公司第五研究院508所	负责部分内容的起草与审查工作	
12	胡芬	自然资源部国土卫星遥感应用中心	参与标准技术内容编制	
13	欧阳斯达	自然资源部国土卫星遥感应用中心	参与标准技术内容编制	
14	祝小勇	自然资源部国土卫星遥感应用中心	参与标准起草及资料的搜集	
15	薛玉彩	自然资源部国土卫星遥感应用中心	参与标准技术内容编制	

4. 主要工作过程

1) 征求意见稿阶段

2020年1月-2020年5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，以及对地观测卫星激光几何检校处理的实际实施情况，编制组开始起草标准草案。

2020年6月-2020年10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对地观测卫星激光几何检校领域生产作业单位、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，完成了标准征求意见稿和编制说明。

2020年11月-2021年4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。收到的回函单位数23个，回函并有建议或意见的单位数11个。共整理意见74条，其中采纳意见70条，部分采纳意见

3 条，未采纳意见 1 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。

2) 送审稿阶段

2021 年 6 月 16 日，由牵头单位组织召开了标准预审会，来自上海海事大学、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、自然资源部测绘标准化研究所、中国测绘科学研究院、河海大学、中国海洋大学、国家卫星海洋应用中心、中国自然资源航空物探遥感中心的专家参加预审会，专家对标准送审讨论稿和编制说明提出了针对性意见，意见主要集中在规范的适用范围、书写形式与内容逻辑性等方面。会后，编制组根据预审会专家提出的意见，对标准及其编制说明进行了认真修改，并于 2021 年 7 月形成送审稿。

2021 年 11 月，全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分技术委员会召开了内审会，汇报了预审会专家的意见修改情况，制定了下一步的工作计划。由于疫情等原因，标准编写进度滞后，后续编写组将加快编写进度，尽快上会评审。

3) 报批稿阶段

2022 年 3 月 8 日，受自然资源部委托，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组织召开了标准审查会，参加审查会的有中国测绘科学研究院、中国科学院测量与地球物理研究所、国家测绘产品质量检验检测中心、自然资源部测绘标准化研究所、陕西测绘地理信息局、黑龙江测绘地理信息局、四川测绘地理信息局、自然资源部重庆测绘院、武汉大学、同济大学的共 11 位专家。会议对标准送审材料进行了认真审查，给出了审查结论。

2022 年 6 月，编制组根据审查会意见，对标准送审稿进一步修改完善，形成标准报批稿。

二、 标准编制原则和确定标准主要内容的依据

1. 标准编制原则

a) 以需求为导向

面向国家重大战略和行业重点业务工作的需求，围绕测绘地理信息标准体系建设、测绘地理信息转型升级等目标，明确对地观测卫星激光几何检校技术的执行流程和方法，促进对地观测卫星激光几何检校的规范化生产。

b) 以现有卫星标准产品分级体系研究成果为基础

分析现有对地观测卫星激光几何检校技术方法，明确其与《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质量评价指标及方法》和《对地观测卫星激光测高数据产品》之间的联系与区别，确定对地观测卫星激光几何检校技术规范。

c) 适用可行

需要考虑长期业务化卫星激光在轨检校的可行性，未来国产激光测高卫星的发展趋势。

d) 科学性与系统性

对地观测卫星激光几何检校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，确定本标准的定位、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，凝练对地观测卫星激光几何检校技术中规范流程。旨在保证标准内容规范、对实际工作有指导作用，为形成统一而高效的行业技术规范，指导后续检校业务化作业，提高作业效率，并为未来技术留有发展空间。

e) 通用性与灵活性

对地观测卫星激光几何检校涉及较多新技术，实现的技术路线也差异较大，因此需要明确最基本、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激光业务化几何检校全过程的质量，又可以充分发挥不同技术、软件的特点。

f) 实用性与可继承性

作为指导和规范生产作业的技术标准，应具有实用性与可继承性。国内区域或旧的指标和要求有的必须调整以适应新技术的发展和境外作业的特点，有的必须保留和继承以保持测绘生产的延续性以及测绘成果的可靠性。

2. 国内外调研情况

由于硬件载荷研制具备一定优势，国外在对地观测卫星激光测高仪的检校具有一定的基础，开展了较多的研究工作。Luthcke 等人提出一种基于海平面的指向角检校方法，以海洋面为基准，通过卫星姿态机动扫描的方式实现指向误差校正，检校精度达到亚角秒。L. A. Magruder 等人提出了一种机载红外相机检校方法，在夜间卫星过顶时由飞机搭载红外相机同步捕获若干个激光光斑，通过与实际光斑对比来校正系统误差。Magruder 等人在布设地面探测器的基础上，另外增加了角锥棱镜(CCR)，该方法是在地面布设高低不平的 CCR，通过分析 CCR 在反射波中产生独特的信号来计算脚点定位。

国内部分科研院所在对地观测卫星激光测高仪在轨几何检校开展了研究工作，其中武汉大学和原国家测绘地理信息局取得了较多的成果。马跃等提出了对地观测卫星激光测高仪在轨姿态系统误差检校方法，该方法建立了姿态误差与地表先验信息的数学模型，通过卫星对大洋面进行姿态机动获取数据来校正

卫星在轨系统误差。岳春宇、范春波等从理论上推导了对地观测卫星激光测高仪定位误差传播模型。王建宇、平劲松、黄倩等对嫦娥一号搭载的我国首台对地观测卫星激光测高仪的相关误差指标进行了分解与计算，得出满足 $\leq 5\text{m}$ 的指标要求。谢俊峰等在分析国内外激光几何检校与处理的基础上，深入研究了激光测距误差分析、基于地面探测器捕获的能量光斑中心定位、基于地面探测器的单波束几何检校模型构建等技术，相关理论算法在2016年8月ZY-3 02星激光测高仪在轨几何检校试验中得到试验验证。验证结果表明，构建的基于地面探测器的检校模型，可以高精度实现国产激光测高仪参数检校，ZY-3 02星激光测高仪的测高精度由检校前100多米提升到检校后1米以内，使ZY-3 02测高数据能够作为高程约束参与1:50000测图业务中。谢俊峰团队于2020年6月和9月分别对我国GF-7卫星与ZY3-03星激光测高仪开展检校研究，检校后，使得GF-7卫星激光测高仪测高精度达到了0.1m，ZY3-03星激光测高仪精度达到了0.3m。其中GF-7卫星激光检校后数据可作为高程约束参与1:10000测图业务中。

目前，国内外的研究在具体方法上均取得了较大的进展，通过试验表明，具有较好的实践价值。对地观测卫星激光测高仪在轨几何检校是激光测高仪也将进入业务化运行的阶段，通过检校作业可有效检验载荷的基本状态，同时优化几何精度，满足业务化生产的需要。但对地观测卫星激光测高仪在轨几何检校涉及多项关键技术，不同技术又属于不同领域，多个相对独立的环节中包含多项技术标准，这些标准仍未形成统一的技术指标。这些都不利于对地观测卫星激光几何检校技术的发展、后续检校任务的开展和在行业内的推广应用。

本标准在制定过程中，广泛收集了相关国家标准和行业标准，作为本标准制定的参考和借鉴依据，主要包括：

GB/T 14950-2009 《摄影测量与遥感术语》

GB/T 17941 《数字测绘成果质量要求》

GB/T 18316 《数字测绘成果质量检查与验收》

GB/T 24356 《测绘成果质量检查与验收》

CH/T 3006-2011 《数字航空摄影测量 控制测量规范》

CH/T 8023-2011 《机载激光雷达数据处理技术规范》

GB/T 36100-2018 《机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法》

本标准充分借鉴以上技术标准，但是具有明显的差别。GB/T 14950-2009 是基本术语要求，是很多测绘标准的基础，用于解释本标准中的部分专业术语。GB/T 17941、GB/T 18316、GB/T 24356、CH/T 3006-2011 属于测绘产品、成果等行业基础标准，用来质量控制等。CH/T 8023-2011、GB/T 36100-2018 是航空机载激光数据处理的规范，对星载激光检校有一定的参考作用，但对对检校技术的介绍较少。

通过分析，可以发现现有标准难以满足对地观测卫星激光几何检校的技术要求，需要开展针对性的标准制定工作，以更好地指导相关作业。标准化的试验流程是国产卫星激光在轨检校走向业务化前提条件，构建对地观测卫星激光几何检校技术规范十分必要。

3. 主要技术内容的说明

3.1 标准的定位

在本标准编制过程中，《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》等与卫星激光检校的标准也处于报批阶段，各标准之间相互协调，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。本标准对对地观测卫星激光几何检校的作业流程、处理方法、精度指标和质量控制等方面进行了相应的规定，规范了对地观测卫星激光几何检校流程，明确在业务化生产过程中的技术执行步骤，用于指导卫星激光几何检校试验。

3.2 确定标准主要内容的依据

本标准的任务是规范并指导对地观测卫星激光几何检校作业环节，用于对地观测卫星激光几何检校试验。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，在编制过程中与国家卫星海洋应用中心、上海海洋大学、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、武汉大学、中国测绘科学研究院、国家基础地理信息中心、陕西测绘地理信息局、黑龙江测绘地理信息局、四川测绘地理信息局、海南测绘地理信息局、自然资源部重庆测绘院等有关单位的专家进行了多次的交流和探讨。同时充分利用主编单位的有利条件，总结凝练对地观测激光几何检校作业经验，开展了大量技术试验。这些都是本标准主要内容编制的重要依据。

3.3 已发射卫星激光系统

针对卫星激光测高仪的研究已进行了好多年，从已经公开的资料来看，国外卫星激光测高系统主要包括对地观测 ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 和 ICESat-2 卫星、对火星观测的 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) 系统、对空间小行星进行观测的 NLR (NEAR Laser Rangefinder) 系统、对月球观测的 CLEMENTINE 系统。ICESat 卫星装载的全球首台对地观测激光测高仪—GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)，其激光重复频率 40 Hz，足印直径 70 m，足印间距 170m。GLAS 经过在轨几何检校，高程测量精度优于

15 cm，部分地区高程测量精度在 5 cm 左右。GLAS 在两极冰盖的厚度及特征分布测量、大比例尺的极地冰盖高程地图制作领域发挥了重要作用，同时也可用于森林、海洋和海冰的高度分布以及云层、气溶胶分布的测量中。

ICESat-2 卫星装载的唯一载荷 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) 是目前唯一的星载光子计数激光测高雷达，主要用于测量海冰变化、地表三维信息，并测量植被冠层高度用以估计全球生物总量。在南极冰面 88° 圈~300km 的长度上，基于 GPS 现场实测数据，验证了 ICESat-2 产品中 ATLO3 光子高程数据和 ATLO6 分段高程数据的精度和准确度分别优于 $5 \pm 13\text{cm}$ 和 $3 \pm 9\text{cm}$ 。火星观测系统 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)、水星观测系统 MLA (Mercury Laser Altimeter)、空间小行星观测系统 NLR (NEAR Laser Rangefinder)、月球观测系统 LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) 等卫星激光测高仪取得了较为成功地应用，这些激光系统的具体技术指标见表 2 所示。

表 2 国外卫星激光系统参数

系统		GLAS	ATLAS	MOLA-2	Clementine	NRL
基本参数	质量/kg	300	<10	25.85	2.37	5
	功率/w	330	--	34.2	6.8	20.7 (最高) 16.5 (平均)
发射及轨道信息	平台	ICESAT 卫星	ICESAT-2 卫星	火星探测器 MGS	月球探测器 Clementine	近地小行星探测器 NEAR
	发射时间	2003	2018	1996	1994	1996
	计划寿命/a	3	3	3	3	1
	轨道高度/km	600	500	400	640	50
	观测对象	极地冰盖、云、气溶胶	海冰、地表、植被冠层高度	火星	月球	Eros 小行星
激光器	型号	75mJ@1064nm 35mJ@532nm	0.2~1.mJ @532nm	Nd: YAG @1064nm	Nd: YAG @532/1064nm	Nd: YAG @1064nm
	脉冲宽度/ns	4	1	8	<10	12
	脉冲重复频率/HZ	40	10k	10	Continuous@1Hz 400shots@8Hz	1/8, 1, 2, 8
	单脉冲能量/mJ	75mJ@1064nm 35mJ@532nm	0.2~1.mJ @532nm	48	171mJ@1064nm 9mJ@532nm	>5

	光束 发散角/mrad	0.1	--	0.4	<0.5mrad@1064nm 4mrad@532nm	0.235
接收 系统	望远镜口径	Φ1.0m	Φ0.8m	Φ500m	与高分辨率相机共用 Φ12mm	Φ90mm
	视场角(FOV)	0.475mrad@1064nm 0.15mrad@532nm	--	0.85mrad	1mrad 总接收面积 0.5 mm ²	>0.9mrad
	光电转换器件	Si APD	Geiger-mode APD	Si APD	Si APD	Si APD
	时钟计数频率	1 GHz	--	100MHz	3-23MHz	480MHz
精度 指标	垂直 分辨率/m	1064nm:0.15 (冰、陆地) 532nm:75-200(云)	0.1	1	40	0.32
	水平 分辨率/m	1064nm:170 (沿径方向) 532nm:75-200 (云/气溶胶)	532nm: 17	沿径方向: 300 跨轨方向: 4000	100	500

我国第一颗卫星激光测高仪搭载在嫦娥一号上，激光重复频率为 1Hz，理论测距精度为 5m，主要用于获取月面三维高程数据；嫦娥二号搭载的激光测高仪是嫦娥一号激光测高仪的升级版，将激光重频由 1Hz 提高到 5Hz；嫦娥三号的激光测高仪在技术上有较大地突破，理论测距精度优于 0.2m。

资源三号 02 星于 2016 年 5 月 30 日成功发射，相较于 01 星，为了进一步提高地面高程测量精度，装载了试验性的激光测高载荷。资源三号 03 星于 2020 年 7 月 25 日成功发射，经过 02 星的测试验证，验证了激光测高载荷的有效性和可靠性，该星搭载了工程性的激光测高载荷。

2019 年 11 月 3 日 11 时 22 分，我国在太原卫星发射中心用长征四号乙运载火箭成功发射高分辨率对地观测系统重大专项高分七号卫星。高分七号卫星装载了双波束激光测高载荷，旨在有效保障卫星测高精度，为 1:10000 比例尺航天立体测绘奠定技术基础。我国目前的卫星激光测高载荷的具体指标如表 3 所示。

表 3 国内已发射的激光测高系统参数

系统		嫦娥一号卫星	资源三号02星	高分七号卫星	资源三号03星	碳卫星
基本参数	质量/kg	2350	2695	约2600	约2600	--
发射及轨道信息	发射情况	已发射	已发射	已发射	已发射	待发射
	发射时间	2007	2016	2019	2020	2022
	计划寿命/a	1	5	8	8	5
	轨道高度/km	200	505	505	505	500左右
	观测对象	月球	地球	地球	地球	地球
激光器	脉冲宽度/ns	5-7	优于7	优于7	4	优于7
	波束	单波束	单波束	2波束	单波束	5波束
	脉冲重复频率/HZ	1	2	3/6 (检校模式)	2	测距≥35, 气溶胶≥20
	单脉冲能量/mJ	150	210	≤180	180	--
	望远镜口径/mm	>120	210	600	210	--
	激光波长/nm	1064	1064	1064	1064.46	1064
	望远镜焦距/mm	538	600	--	--	--
	光斑大小/m	<200	50	30	45	25
	距离测量范围/km	(200±25)	不小于520km±20km	450~550	不小于520km±20km	不小于520km±20km
	探测概率	95%	≥95%	≥95%	≥95%	≥95%
精度指标	测距精度/m	5	优于1.0 (坡度<15deg)	优于0.3 (坡度<15deg)	优于1.0 (坡度<15deg)	优于0.3
	姿态稳定度	--	5×10 ⁻⁴ deg/s	2×10 ⁻⁴ deg/s	5×10 ⁻⁴ deg/s	5×10 ⁻⁴ deg/s

3.4 激光测高仪工作原理

激光测距是根据激光脉冲渡越的时间来获取距离值，根据波形确定激光脉冲的时间差，如图 1 所示。

$$\Delta t = T_{\text{接收}} - T_{\text{发射}} \quad (1)$$

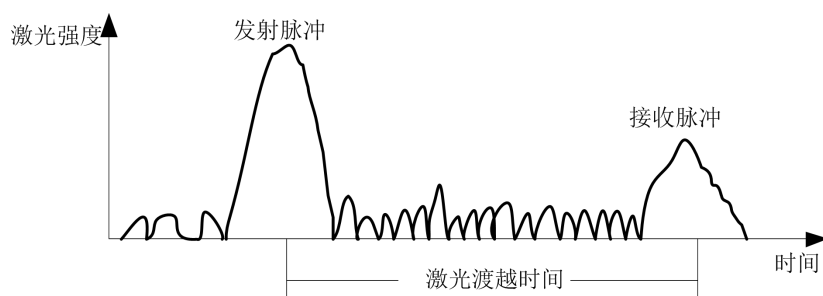


图 1 激光测距时间示意图

激光到观测表面的距离可表示为：

$$R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (2)$$

激光测高几何模型示意图如图 2 所示，卫星激光测高仪通过发射和接受激光脉冲的时间差来推算目标到卫星的距离，再根据卫星的姿态轨道参数解算出卫星到该目标处参考椭球的距离，从而得到目标距离参考椭球的相对高程信息。

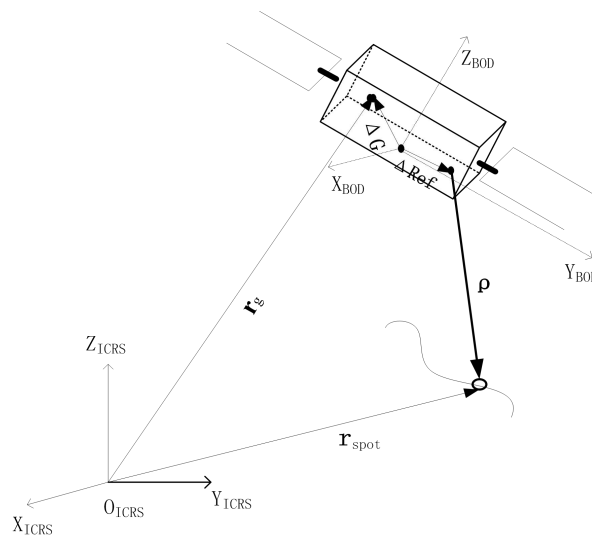


图 2 激光测高仪几何模型

3.5 卫星激光几何检校方法选取

激光测高仪工作过程中会存在指向、测距、姿态、轨道等误差。其中，姿态、轨道等误差是随机误差，指向与测距偏差中大部分包含系统误差。测距偏差对高程误差影响较大，对平面精度影响较少。由于卫星发射过程中的振动等影响，激光指向角与实验室的标定结果会存在差异，受时统、潮汐、大气延迟的影响，测距值也会存在误差，需要卫星几何检校对其进行重新标定。根据参考源获取方式不同，可将目前主要在轨几何检校方法归纳为基于人工地面标志

检校和基于自然地物检校两大类。其中，基于人工地面标志检校方法有地面探测器检校法、机载红外相机成像检校法、角反射器（Corner Cube Retroreflectors, CCR）检校法等。基于自然地物检校方法有平坦地形检校法、坡度地形检校法等。

（1）基于人工地面标志检校

1) 地面探测器检校法

该方法是在检校场内按一定规则布设一系列可捕获卫星过顶时激光光斑红外信号的探测器。探测器最小可探测的能量阈值根据激光探测器实测情况设定，能量响应阈值为 $1\text{nJ}/\text{cm}^2$ 左右。当卫星过顶时，探测到激光信号超过阈值则处于“开”状态，否则状态为“关”，由被触发的探测器位置利用脚点坐标定位算法可以计算激光光斑质心的坐标，从而对激光测高仪误差进行检校。

2) 机载红外相机成像检校法

在检校场内按一定规则布设一系列红外发光二极管 (IR LED) 作为控制点，这些控制点阵列中心线平行于测高仪足印轨迹线，当夜间卫星飞过检校场时，由飞机搭载红外成像 CCD 相机进行同步飞行，通过航空摄影的方式对激光足印进行成像以捕获若干个激光光斑，相机进行曝光成像时，由于飞机的运动，控制点在影像中呈条纹状。根据获取的航空红外影像进行数据处理来获取激光光斑与控制点的位置关系并利用控制点地面坐标即可精确计算激光光斑质心的真实坐标，从而对系统误差进行标定。

3) 角反射器检校法

在布设地面探测器的基础上, Magruder 等人又使用了角反射器 (Corner Cube Retroreflector, CCR)。CCR 被放置在不同高度的杆子顶端，不同高度类似地

形起伏，会在回波中产生时间差。通过在回波中产生的独特信号，利用在数字波形中的时间信息和 CCR 回波强度信息，通过 CCR 信号分析程序来计算光斑质心位置。CCR 返回信号相对于地面返回信号的强度信息取决于 CCR 在光斑内的位置。

(2) 基于自然地物检校

1) 平坦地形检校法

该方法检主要基于平坦地形如海平面或者平坦陆地来实现指向角检校。首先采用卫星姿态机动方式，利用海洋扫描 (ocean scans, OS) 或对整条轨道采用机动方式 (“round”-the-world scans, RTWS) 来获取星载激光测高仪测距观测值，利用贝叶斯最小二乘差分纠正来减小高度计测距残差从而估计激光指向、测距、定时、轨道误差参数。海平面的高程在检校前通过雷达高度计测量值精确已知。

2) 坡度地形检校法

该方法通过波形分析来对激光测高系统的指向和测距偏差检校。在本体坐标系中，激光指向方向为 $[\sin Y \cos X, -\sin Y, -\cos Y \cos X]$ ，为了从距离残差估算指向误差，需要建立激光测距残差和 X、Y 指向偏差的关系。对于 GLAS，通过 Airborne Topographic Mapper (ATM) 来获取回波波形仿真所需要的激光脚点内高程分布。ATM 平均密度是每 3m^2 一个点。直径 70mGLAS 脚点内将有大约 1000 个 ATM 高程点来满足波形仿真所需的高程点密度。

表 4 几种激光几何检校方法对比

	基于人工地面标志检校法			基于自然地物检校法	
	地面探测器法	机载红外相机成像法	CCR方法	平坦地形检校法	坡度地形检校法

优点	<p>①不受时间限制，白天或夜间都可以进行；</p> <p>②探测系统具有自动性；</p> <p>③探测器扩展至时间测量系统，能对时间精度进行检校；</p> <p>④不需要卫星观测数据（包括测距值），可作为独立验证。</p>	<p>①能获得激光脚点光强分布；</p> <p>②能为回波波形提供一些参数参考；</p> <p>③不需要卫星观测数据（包括测距值），可作为独立验证；</p> <p>④检校精度比地面探测法略高些，两种方法可以互为补充互相验证。</p>	<p>①作为地面探测器法的辅助手段，且可以对时间精度进行检校；</p> <p>②通过独特的信号可以判断激光是否击中探测器阵列，以及判定哪一束激光击中探测器阵列。</p>	<p>①可以对整条轨道指向偏差进行统计分析且可以使测距误差和指向偏差相分离，单独对指向偏差进行修正；</p> <p>②通过卫星姿态机动方式可以获取大量观测值，为最小二乘提供观测数据；</p> <p>③检校精度对坡度、粗糙度不敏感。</p>	<p>①精度较高；</p> <p>②无需外业作业支持，无需购置探测器，成本较低；</p> <p>③提高检校频次；</p> <p>④该方法对卫星性能要求较低。</p>
缺点	<p>①设计探测器件并对探测器件进行检校测量；</p> <p>②脚点定位原理是建立在脚点光斑为规则圆形且激光光强分布为高斯分布；</p> <p>③受大气延迟和探测器的敏感度、位置、间距影响，对探测器的一致性要求高且成本较高；</p> <p>④布设上千个探测器，需要较大的人力。</p>	<p>①导航及相机曝光控制要求高；</p> <p>②只能在夜间且月亮处于地平线下时实施；</p> <p>③激光到达地表时，足印能量密度低造成对足印成像处理困难（该方法最大的难度），成功率较低。</p>	<p>①接收端会存在波形失真的现象；</p> <p>②检校场布设的特性，经度方向误差小，纬度方向误差大；</p> <p>③精度相比其它方法较低。</p>	<p>①需要星上数据和地表高程先验知识；</p> <p>②对卫星的敏捷性要求较高；</p> <p>③会引入额外的高频姿态噪声；</p> <p>④通过姿态机动方式获取大量观测值需要耗费较长时间[19]，大约为几分钟；</p> <p>⑤检校场选在海平面受潮汐和气压影响且平坦也仅是一般意义上，不是严格意义。</p>	<p>①波形仿真难度大；</p> <p>②对波形仿真的精度要求高；</p> <p>③对检校场的地形要求较高；</p> <p>④检校精度受坡度、粗糙度、表面反射率等环境因素影响。</p>

针对上述几种激光几何检校方法进行对比分析，总结各自的优缺点，如表所示。基于自然地物检校法无需外业支持，成本较低，但精度相对较低，无法满足高精度几何检校的需求。人工地面标志检校法精度高，能够满足高精度激光几何检校的需求，其中地面探测器法实施可行性更高，所以通常采用该方法进行卫星激光几何检校。

3.6 对检校场地的要求

基于地面探测器的卫星激光测高仪的检校需要临时检校场地，检校场地的

选取关系着参数检校的精度，同时也影响着检校作业的实施难易程度。从目前的研究来看，临时检校场的选取应基本满足以下要求：

- 由于激光波形受地形影响较大，为尽量减少干扰，检校场应选择平地地形，且候选的区域范围要大于铺设探测器的面积；
- 根据轨道预报星下点轨迹，尽量靠近星下点，偏摆角小于 5 度；
- 避免大气气溶胶的影响，卫星过境期间，检校区域无云或少云；
- 为了便于检校设备的运输和人员的安全等，临时检校场应铺设在郊区或者距离居民区不远处的野外，且应交通便利。

3.7 对激光几何检校精度的要求

激光测高的极限精度由载荷设计精度决定，但由于卫星发射过程中的震荡和在轨后的环境变化等原因，导致在轨后激光测高精度与载荷设计精度有较大差异。为了提升激光测高精度，使其接近或达到载荷设计精度，卫星几何检校是必须开展的技术环节。激光几何检校是在卫星在轨初期和业务化运行后周期性开展的工作，是卫星在轨后通过地面手段无限接近载荷设计精度的必要途径。

激光几何检校精度主要取决于控制点测量精度和检校算法精度。控制点测量精度与 GNSS 测量精度和激光地面探测器的质心提取精度相关，GNSS 测量精度影响检校的平面和高程精度，激光地面探测器的质心提取精度在检校精度的平面方向影响较大，总体上控制点测量精度要求优于 0.03m。检校算法精度涉及检校模型、大气校正、潮汐改正等多个过程，每个环节都存在误差，综合考虑各项误差，该部分精度要求优于 0.07m。

因此，要求激光几何检校高程精度优于 $\sigma_F + 0.1 \text{ m}$ ， σ_F 为线性体制卫星激光测高仪经过实验室标校后的距离测量精度，即载荷设计精度，高程精度计算方

法按照 GB/T 36100-2018 中 5.2 要求。

三、验证试验的情况和结果

a) 资源三号 02 星激光几何检校

采用 2016 年 8 月 9 日、8 月 14 日和 8 月 29 日三个检校场获取的激光足印中心坐标作为地面控制，先采用单检校场独立以及多检校场联合等不同组合方式对资源三号 02 星激光测高仪系统参数进行标定，再利用三个检校场数据对检校结果进行外推验证，从而反映各参数的检校精度，试验结果如表 5 所示。

表 5 三个区域的相互验证结果

外推参数	检查数据	平面位置误差/m		高程误差/m
		经度方向	纬度方向	
2016-08-09 检校结果	2016-08-14	6.25	-11.84	-0.39
	2016-08-29	-17.56	-9.260	0.779
2016-08-14 检校结果	2016-08-09	-5.710	12.556	0.851
	2016-08-29	-23.50	-2.670	0.891
2016-08-29 检校结果	2016-08-09	18.164	9.145	0.861
	2016-08-14	-24.158	5.211	0.360
多检校场 联合检校结果	2016-08-09	8.780	-0.235	0.491
	2016-08-14	7.7783	6.138	0.49
	2016-08-29	9.890	-4.998	-0.689

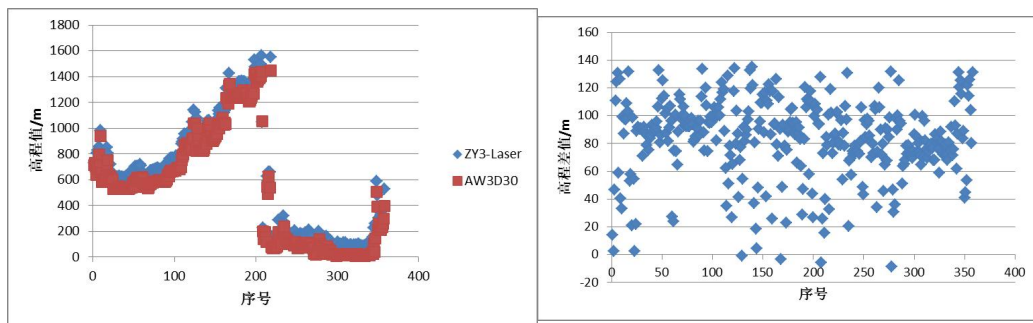
从上表可以看出，基于单个检校场数据检校后，利用其他检校场参考数据进行验证，平面精度优于 20m，最大高程精度优于 0.9m。利用三个检校场数据进行联合检校后进行验证，可以看出，平面精度优于 10 米，最大高程精度优于 0.7m，平面和高程精度较单场检校均有明显提升，表明单个检校场观测数据少，且无法兼顾系统误差参数随时间变化部分，因此检校精度相对较低，因此试验将联合检校参数作为最终检校结果。

以 AW3D30 数据为参考，随机挑选 8 轨资源三号 02 星激光数据，对比分析在不同地形坡度下激光高程精度在检校前后的变化情况。试验结果如表 6 所示。

为了更加直观，抽取其中第 944 和 1081 两轨检校前后结果对比如图 3~图 6 所示。

表 6 不同地形坡度下激光测高数据的相对高程精度统计

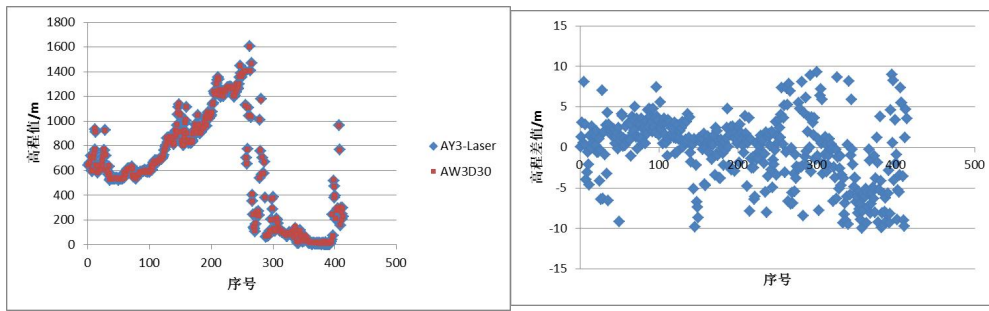
轨道号	对比	激光测高数据误差 (均值±中误差)			
		坡度<2°	2°<坡度<5°	5°<坡度<10°	坡度>10°
382	检校前	108.42±135.52	95.6±126.94	67.21±140.63	-23.2±157.53
	检校后	0.11±2.45	-0.71±3.33	-1.82±4.28	-1.05±5.76
914	检校前	92.3±111.38	73.89±114.68	91.2±158.65	9.31±211.65
	检校后	-0.72±2.02	-1.11±2.45	-3.12±5.04	0.80±5.31
944	检校前	99.1±106.62	107.6±116.18	83.53±143.85	23.5±172.64
	检校后	0.18±3.44	-1.11±4.24	-1.13±4.80	-0.56±4.80
960	检校前	99.54±141.12	76.38±151.36	-13.39±147.43	29.12±205.37
	检校后	-1.43±3.15	-1.79±3.58	-1.84±4.97	0.50±6.86
1005	检校前	72.11±93.81	70.69±91.49	35.85±97.87	43.89±159.84
	检校后	1.10±2.24	0.24±2.63	-0.87±4.64	1.82±5.29
1081	检校前	105.38±121.47	100.84±130.14	92.82±149.2	56.29±142.1
	检校后	0.40±2.83	-0.61±3.33	-2.16±5.10	0.89±5.57
1157	检校前	104.58±131.93	83.71±125.29	67.08±149.0	9.31±192.91
	检校后	1.09±2.51	-0.26±3.03	-2.20±4.95	-0.30±4.80
1385	检校前	92.75±122.14	85.34±127.11	58.14±153.74	45.29±189.07
	检校后	1.38±2.85	0.31±3.33	-2.17±4.76	0.77±5.92



a) 激光与参考高程值

b) 高程差值

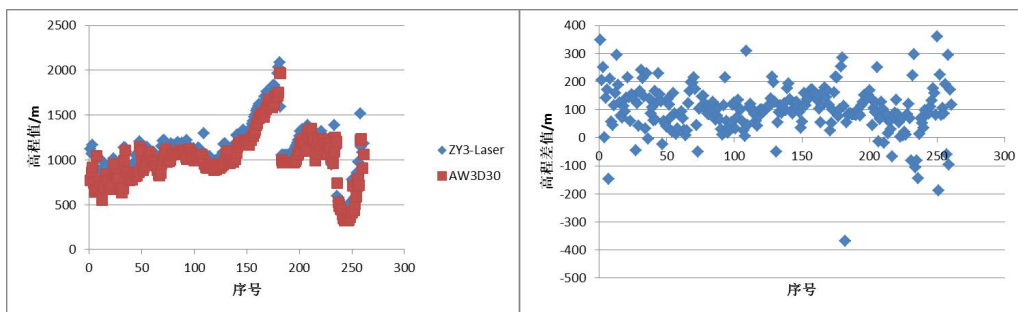
图 3 第 944 轨资源三号 02 星激光测高与 AW3D30 高程对比 (检校前)



a) 高程值

b) 高程差值

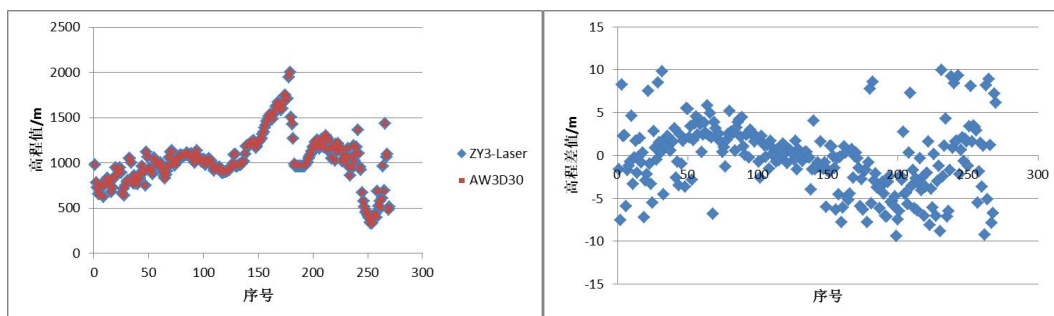
图4 第944轨资源三号02星激光测高与AW3D30高程对比(检校后)



a) 高程值

b) 高程差值

图5 第1081轨资源三号02星激光测高与AW3D30高程对比(检校前)



a) 高程值

b) 高程差值

图6 第1081轨资源三号02星激光测高与AW3D30高程对比(检校后)

为了进一步确定激光测高精度，试验采用外业实测的方式，利用RTK测量平坦地区激光足印范围内的地面高程信息，用于激光测高数据的绝对精度验证。这些控制点精度在5cm以内，能够更精确地评价检校后的激光测高精度。本试验测量了第1081轨9个激光光斑内的控制点数据，

由于检校前后平面位置变化较大，检校前激光测量高程精度由AW3D30参考评价，检校后以实测的控制点作为参考评价。检校前后激光高程数据与各自参

考数据的高程差值如图 7 所示，统计结果如表 7 所示。

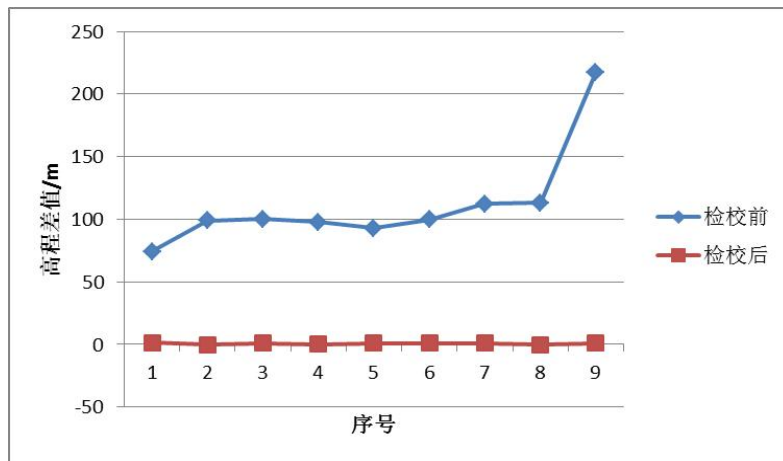


图 7 检校前后激光高程及其差值变化

表 7 检校前后激光测高值统计

序号	激光测量高程值/m		高程差值/m	
	检校前	检校后	检校前	检校后
1	980.92	892.95	74.34	1.38
2	985.71	897.74	99.14	-0.02
3	990.23	902.27	100.27	0.96
4	994.24	906.30	97.88	0.13
5	998.64	910.69	92.96	1.03
6	1007.49	919.54	99.56	0.84
7	1035.77	947.82	112.2	1.04
8	1052.10	964.16	113.07	-0.4
9	1178.04	1090.10	217.49	0.92
均值/m	-	-	111.88	0.74
中误差/m	-	-	116.47	0.86

从图 7 可以很明显看出，检校后激光高程测量值精度有大幅提升。表 7 给出了 9 个激光测量高程值与控制点相比较情况，激光高程均值和中误差由检校前的 $111.88 \pm 116.47\text{m}$ 降低到检校后 $0.74 \pm 0.86\text{m}$ ，精度提升了 2 个数量级。结果表明，检校后在平坦地区激光绝对高程精度优于 1m。

b) 资源三号 03 星激光几何检校

2020 年 9 月，国土卫星中心联合国内多家技术优势单位在内蒙古自治区锡

林郭勒盟开展了资源三号 03 星激光测高在轨几何检校试验，顺利获取激光测高技术参数，试验取得圆满成功。

联合资源三号 03 星激光测高仪 3 次外业成功检校结果，通过修正大气、潮汐误差、实现了对资源三号 03 星激光指向的在轨标定，标定后的指向角与安装指向角的差值结果如表 8 所示。

表 8 激光测高参数检校结果

检校阶段	Angle_X/°	Angle_Y/°	Angle_Z/°	Dis/m
地形检校	0.56144	-0.0442	-0.41109	-
外业检校	0.55776	-0.04336	-0.41177	0.2

上述结果可以看出，初始安装指向与外业检校指向相差甚大，经地形匹配检校后，激光指向相对更加接近于真实指向值（外业检校指向）。

外业检校期间，在非检校区域的平坦地形上（坡度小于 2°，地表为平地且没有地物或植被覆盖），采用 RTK 采集激光脚点地面高程作为地面验证控制数据，用于评估卫星激光绝对测高精度。

先后在苏尼特右旗附近选取了三轨激光，共 9 个激光点，这些点对应的位置如图 8 所示。



图 8 资源三号 03 星激光绝对精度验证点分布

以每个激光点为中心，在其周围±24m 范围内，以 3m 间隔利用 RTK 实测 81 个地面控制点（如下图所示，黄色图钉为地面控制点，红色图钉为资源三号 03 星激光点）。利用这些地面控制点点，采用三次样条内插出激光点实际高程进行精度验证对比，如图 9 所示。

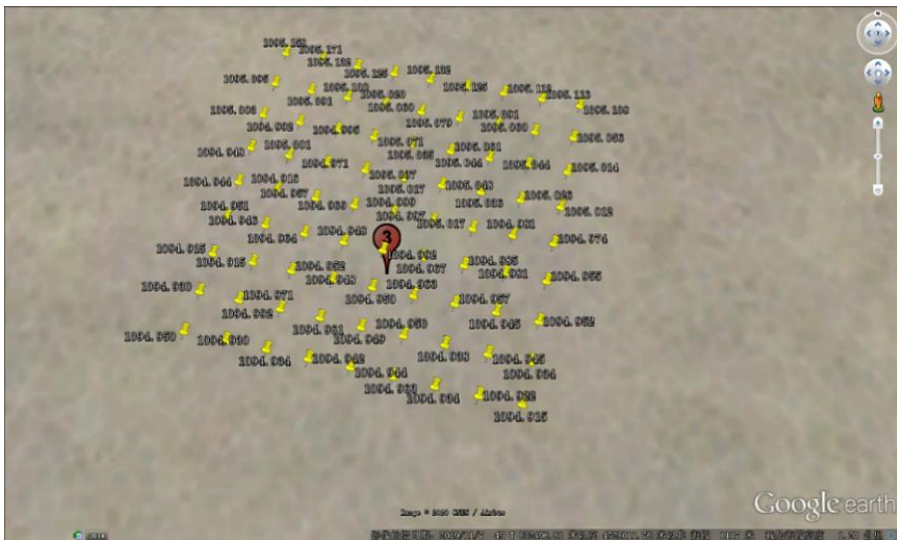


图 9 资源三号 03 星激光点及其周围地面控制点分布图

分别对上述 9 个激光点，采用同样的方式进行激光点对比验证，计算激光自身高程与高程点内插高程差值，结果如表 9 所示。

表 9 激光测高绝对精度验证结果

时间	点号	激光高程/m	实测高程/m	高程差/m
20200908	84800025.00	1007.388	1007.218	0.17
	84800025.50	1052.425	1052.183	0.242
20200913	85231950.50	1031.746	1031.27	0.476
	85231952.00	1071.313	1070.866	0.447
20200923	86095801.00	1073.457	1073.316	0.141
	86095801.50	1079.233	1079.174	0.059
	86095802.00	1074.747	1074.405	0.342
	86095803.00	1086.25	1086.5	-0.25
	86095803.50	1094.669	1094.992	-0.323
中误差/m				0.281

根据上述结果可以看出，经检校后，资源三号 03 星激光测高仪高程精度在平地地形精度优于 0.3m。

c) 高分七号卫星激光几何检校

2020 年 9 月，国土卫星中心联合国内多家技术优势单位在内蒙古自治区锡林郭勒盟开展了高分七号卫星激光测高在轨几何检校试验，顺利获取激光测高技术参数，试验取得圆满成功。

外业检校期间，在非检校区域的平坦地形上（坡度小于 2°，地表为平地且没有地物或植被覆盖），采用 RTK 采集了激光高程地面验证控制数据，其中，波束 1 验证控制数据 22 个，波束 2 验证控制数据 24 个，与激光测量高程数据对比结果如表 10 所示。

表 10 激光测高绝对精度验证

波束1				波束2			
序号	激光高程	控制高程	高程差值	序号	激光高程	控制高程	高程差值
1	1046.096	1045.923	0.173	1	1053.565	1053.690	-0.125
2	1043.427	1043.244	0.183	2	1056.531	1056.717	-0.186
3	1029.180	1029.043	0.137	3	1066.209	1066.471	-0.262
4	1074.190	1074.216	-0.026	4	1045.172	1045.254	-0.082
5	1084.580	1084.636	-0.056	5	1071.721	1071.717	0.004
6	1092.217	1092.287	-0.070	6	1079.265	1079.289	-0.024
7	1091.810	1091.818	-0.008	7	1080.026	1080.103	-0.077
8	1038.952	1038.865	0.087	8	1081.481	1081.606	-0.125
9	1040.736	1040.625	0.111	9	1088.015	1088.007	0.008
10	1040.756	1040.631	0.125	10	1076.137	1076.071	0.066
11	1050.801	1050.652	0.149	11	1074.432	1074.345	0.087
12	1050.023	1049.865	0.158	12	1078.353	1078.240	0.113
13	1051.554	1051.558	-0.004	13	1084.606	1084.564	0.042
14	1067.047	1066.953	0.094	14	1084.376	1084.315	0.061
15	1075.073	1074.972	0.101	15	1093.792	1093.675	0.117
16	1076.360	1076.292	0.068	16	1092.944	1092.921	0.023
17	1086.001	1086.007	-0.006	17	1101.480	1101.343	0.137
18	1089.925	1089.961	-0.036	18	1109.663	1109.637	0.026
19	1088.877	1089.012	-0.135	19	1118.486	1118.360	0.126
20	1118.686	1118.790	-0.104	20	1094.082	1093.979	0.103
21	1133.556	1133.612	-0.056	21	1121.161	1121.061	0.100
22	1136.435	1136.469	-0.034	22	1125.901	1125.848	0.053
AVE: 0.039 m RMSE: 0.097 m				23	1128.618	1128.691	-0.073
				24	1124.473	1124.414	0.059
				AVE: 0.007 m RMSE: 0.104 m			

可以看出，经过双波束激光在轨几何检校后，系统差抑制效果明显，波束 1 误差均值为 0.039 米，中误差为 0.097 米，波束 2 误差均值为 0.007 米，中误差为 0.104 米，控制点验证误差曲线如图 10 所示。

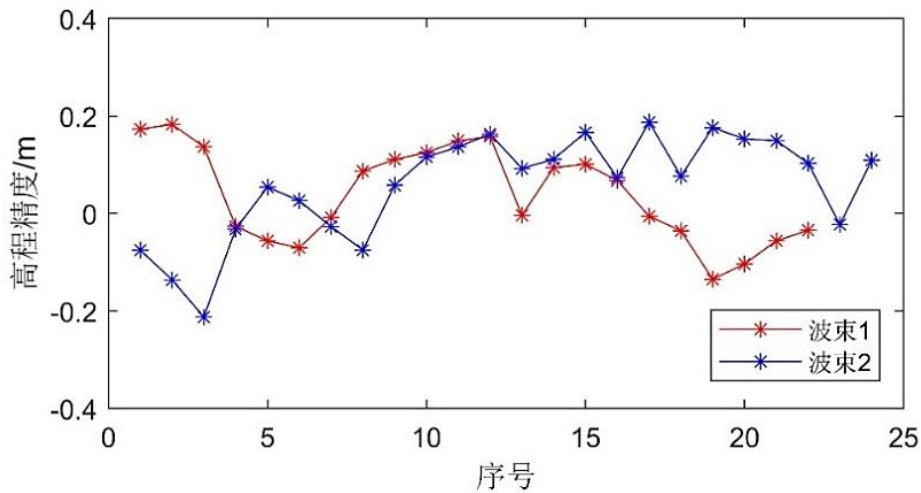


图 10 激光测高数据绝对精度验证

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

经国家标准共享服务平台检索，尚未有已经颁布执行的相关国际标准、他国国家标准记录情况。

五、与现行法规、标准的关系

本技术规定与现行法律、法规和强制性标准无不协调。

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

本标准颁布实施后，编制组将根据全国地理信息标准化技术委员会及其卫星应用分技术委员会的安排，积极做好标准的宣贯培训等工作。为发挥本标准

作为激光几何检校领域基础标准的作用，建议今后有关国家标准、行业标准制修订时，认真做好与本标准之间的协调。

九、其他应予说明的事项

无。