ICS 07. 040
CCS A77

CH

中华人民共和国测绘行业标准

XX XXXXX—XXXX

对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

Technical specification for laser altimetry data processing 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、定义和缩略语 1
4 总体要求 2
4.1 空间参考 2
4.2 时间系统 2
4.3 数据源 2
4.4 辅助参数 2
4.5 处理精度要求 2
5 处理过程 2
5.1 技术流程 2
5.2 数据准备 3
5.3 参数准备 4
5.4 数据预处理 4
5.5 激光几何定位 4
5.6 激光足印影像处理 8
6 质量控制和结果记录 9
6.1 质量控制 9
6.2 结果记录 9
7 成果整理与资料归档 9
7.1 成果整理 9
7.2 资料归档 9
附录A（资料性）激光观测数据 10
附录B（资料性）卫星姿态数据 11
附录C（资料性）卫星轨道数据 12
附录D（资料性）大气改正 13
D.1 大气效应改正技术流程 13
D.2 折射引起的大气延迟距离改正模型 13
附录E（资料性）潮汐改正 16
E.1 潮汐改正 16
E.2 海潮改正 16
E.3 海潮负荷潮改正 17
E.4 固体潮改正 17
E.5 极潮改正 18

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、武汉大学、中国科学院空天信息创新研究院、中国地质大学(北京)、东北林业大学、中科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、湖南科技大学、中国人民解放军战略支援部队信息工程大学。

本文件主要起草人：唐新明、莫凡、李国元、谢俊峰、陈继溢、刘诏、金涛勇、朱广彬、王成、康志忠、邢艳秋、黄庚华、李旭、周辉、周平、李少宁、范大昭、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。

数据处理是获取高质量激光测高产品的必要途径，但目前国内尚没有对地观测卫星激光测高数据处理规范。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测高数据处理技术规范。本文件与《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。

对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

1 范围

本文件规定了对地观测卫星激光测高数据处理的总体要求、处理过程、质量控制、成果整理和资料归档。

本文件适用于对地观测卫星线性体制激光测高初级或标准产品生产。

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。

CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范

CH/T xxxx-xxxx 对地观测卫星激光几何检校技术规范

CH/T xxxx-xxxx 对地观测卫星激光测高数据产品

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

CH/T 8024-2011、CH/T xxxx-xxxx 《对地观测卫星激光几何检校技术规范》和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。

3.1.1

激光渡越时间 laser transit time

激光从出光点至接收点的传输时间。

3.1.2

波形分解 waveform decomposition

通过高斯分解等算法提取激光回波中波形分量的振幅、中心位置、标准差（脉宽）等特征参数的过程。

3.1.3

卫星姿态数据 satellite attitude data

在轨运行时，按照一定频率记录卫星星体在空间中三轴指向状态的数据。

3.1.4

卫星轨道数据 satellite ephemeris data

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。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BODY：卫星本体坐标系(Satellite 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)

DSM：数字表面模型(Digital Surface Model)

FWHM：半高全宽(Full Width at Half Maximum)

HDF：一种可以存储不同类型图像和数码数据的文件格式（Hierarchical Data Format)

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)

RFM：有理函数模型(Rational Function Model)

4 总体要求

4.1 空间参考

4.1.1 坐标系采用 CGCS2000。必要时，采用经批准的其他坐标系。

4.1.2 高程基准采用 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。

4.2 时间系统

4.2.1 时间系统为 CST。

4.2.2 卫星下传数据和过程数据中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。

4.3 数据源

4.3.1 激光观测数据

根据卫星数据格式文档，解包卫星下传的激光原始二进制数据，包含激光测高仪的工程数据、波形数据和足印相机图像数据等激光观测数据，其中工程数据包含激光测高仪的状态标识、时间码、激光渡越时间粗值、足印相机的工程数据等。激光测高系统记录的信号数据完备性要求如下：

a） 如果激光测高系统只具备记录波形前沿所在时刻的能力，应记录对应阈值处发射波形和回波波形的前沿所在时刻；

b） 如果激光测高系统具备记录波形前沿和后沿所在时刻的能力，应记录对应阈值处发射波形前、后沿和回波波形前、后沿所在的时刻；

c） 如果激光测高系统具备记录全波形回波的能力，应记录发射波形和回波波形。

激光观测数据见附录 A。

4.3.2 卫星姿态数据

卫星姿态数据形式为四元数或欧拉角。卫星姿态数据见附录 B。

4.3.3 卫星轨道数据

卫星轨道数据包含卫星瞬时坐标与速度。卫星轨道数据见附录 C。

4.3.4 地形参考数据

激光观测数据对应区域的数字高程模型，格网应不大于30m，精度优于10m。

4.3.5 大气改正数据

获取激光观测数据对应区域的大气数据，利用大气改正算法，计算激光传输过程中测距的改正量，大气改正算法见附录D。

4.3.6 潮汐改正数据

采用潮汐改正算法精确计算激光观测数据对应区域的潮汐改正参数，潮汐改正算法见附录E。

4.4 辅助参数

4.4.1 激光指向检校参数

经在轨几何检校处理后符合要求的卫星激光指向检校参数。

4.4.2 激光测距检校参数

经在轨几何检校处理后符合要求的卫星激光测距检校参数。

4.4.3 足印相机检校参数

包括辐射检校参数和几何检校参数。辐射检校参数为相机每个探元的亮度值改正系数。几何检校参数为相机内部畸变改正参数和安装偏置角度。

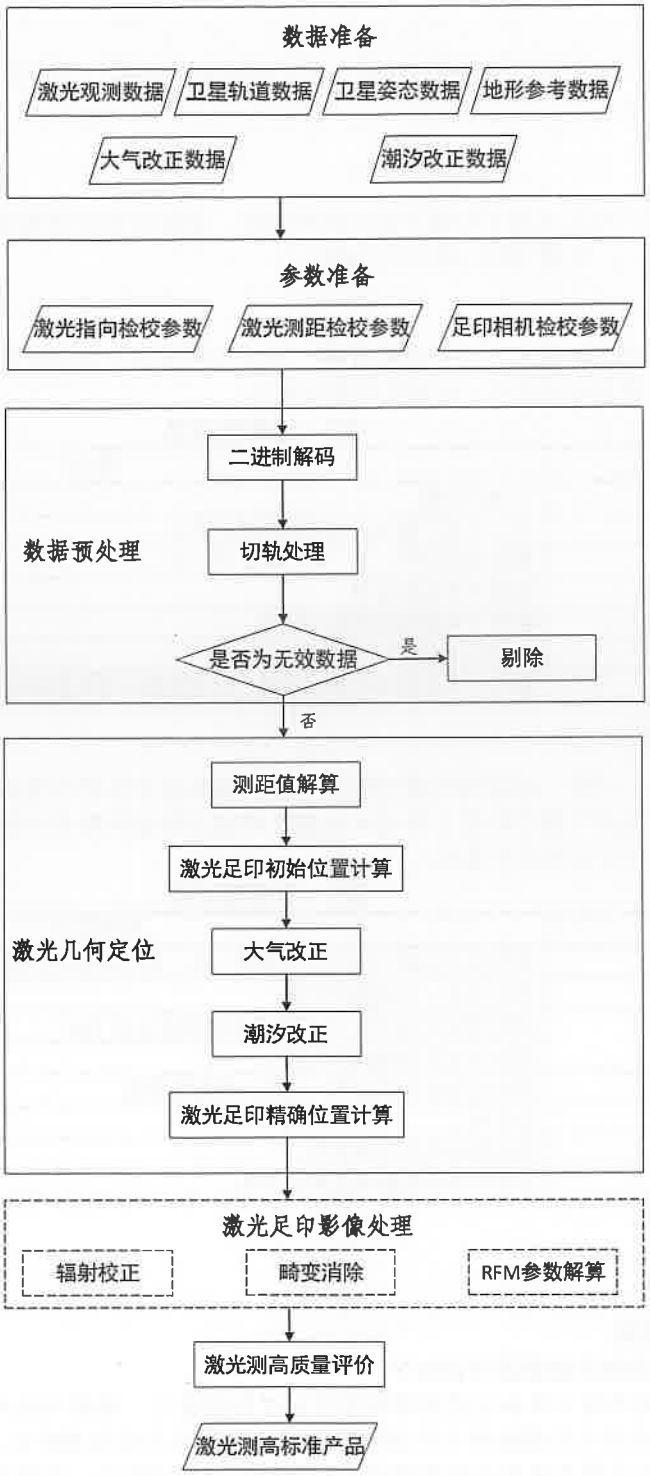
4.5 处理精度要求

激光测高数据处理精度按照CH/T xxxx-xxxx 《对地观测卫星激光测高数据产品》中7.2的要求。

5 处理过程

5.1 技术流程

激光测高数据标准产品处理技术流程见图1。



注：图中虚线框表示可选。

图1　激光测高数据标准产品处理技术流程

5.2　数据准备

按照 4.3 的要求，准备激光观测数据、卫星轨道数据、卫星姿态数据、地形参考数据、大气改正数据和潮汐改正数据。

5.3 参数准备

按照 4.4 的要求，准备激光指向检校参数、激光测距检校参数、足印影像检校参数。

5.4 数据预处理

5.4.1 二进制解码

按照星上编排格式解码卫星下传的原始二进制数据，获取各类观测数据（例如时间数据、波形数据、足印影像数据等），存储为HDF5格式的文件。

5.4.2 切轨处理

根据激光测量数据时间信息，切分测量数据，形成与任务指令相匹配的多轨数据，保存数据获取时间、概略地理位置等元数据信息。元数据信息见表 1。

表1 元数据信息

元数据项	描述
卫星编号	卫星的简称
累计秒	星上从某个基准时刻开始的累计秒数
获取时间	数据获取的年、月、日、时、分、秒
轨道编号	数据下传的轨道号
接收站	数据下传的地面接收站编号
卫星侧摆角度	卫星朝垂轨方向摆动的角度
概略地理坐标	由星上实时获取的姿态数据、轨道数据计算的概略地理坐标

5.4.3 无效数据剔除

在激光脉冲传输、反射、接收等测量过程中，初步筛选由于外界环境或者激光器硬件造成的数据丢失或者误码。按照载荷方提供的星上格式和仪器工作状态标记判断原始测量数据是否存在丢失、损坏、乱码等问题。数据有效性要求见表2。

表2 数据有效性

筛选项目	判断标准
原始数据状态	文件格式与星上编码格式说明一致，各个标志码正常
仪器工作状态	状态正常、仪器温度正常
激光测量状态	测距值无明显异常(卫星标称轨道高度±20 km)
	激光发射和回波波形正常
激光足印影像	激光足印影像无过曝、拉花、扭曲等情况
卫星侧摆角度	小于20°
卫星姿态数据	四元数数值无明显异常
卫星轨道数据	卫星轨道数据数值无明显异常

5.5 激光几何定位

5.5.1 测距值解算

5.5.1.1 阈值探测模式

阈值探测模式下的测距值解算方法如下：

a） 如果激光测高系统只具备记录波形前沿所在时刻的能力，根据对应阈值处发射波形的前沿所在时刻和回波波形的前沿所在时刻的时间差值换算得到激光测距值；

b） 如果激光测高系统具备记录波形前沿和后沿所在时刻的能力，根据对应阈值处发射波形前、后沿和回波波形前、后沿所在的时刻，计算发射波形前沿和后沿所在时刻的平均值，以及回波波形前沿和后沿所在时刻的平均值，两个平均值分别为发射波形和回波波形的对应时刻，根据两个时刻的时间差值换算得到激光测距值。

5.5.1.2 全波形探测模式

5.5.1.2.1 技术要求

全波形探测模式下的测距值解算应满足以下要求：

a） 高斯分量中心位置之间的间隔应大于发射波形的$FWHM$；

b） 高斯分量的最小振幅大于背景噪声阈值；

c） 高斯分量的最小标准差（即脉宽）大于发射波形的脉宽，其中发射波形的脉宽大小为$FWHM/\sqrt{8\cdot ln2}$；

d） 高斯分量个数不超过最大个数限制（一般不超过8）。

5.5.1.2.2 波形预处理

对回波波形进行预处理以实现去噪，波形预处理方法如下：

a） 给定N_{noise}，N_{noise}为进行噪声估计的样本数，计算$\bar{A}$（单位为毫伏），$\bar{A}$为整个回波波形幅值的平均值，统计回波波形结尾部分从最后一个样本开始小于平均值$\bar{A}$的样本个数N_{end}；

b） 判断回波波形结尾部分是否存在起伏，如果$N_{end} < N_{noise}$，则初步判断回波波形结尾部分存在起伏，宜选取回波波形开始部分N_{noise}个样本，否则选取结尾部分N_{noise}个样本，计算背景噪声的平均值和标准差；

c） 将背景噪声标准差的若干倍(一般取4.5倍)与背景噪声平均值相加作为背景噪声阈值；

d） 回波信号滤波处理宜采用高斯滤波，根据激光测高仪获取的回波波形整体信噪比的特点，设置高斯滤波器标准差值，确定回波波形平滑程度，如果回波波形信噪比高，高斯滤波器标准差值一般取不大于发射波形的$FWHM$，通过对回波波形的高斯滤波得到去噪后的回波波形。

5.5.1.2.3 波形分解与特征参数提取

波形分解与特征参数提取宜采用如下高斯分解方法：

a） 应对平滑去噪后回波波形中所有幅值大于背景噪声阈值的样本点进行峰值点、拐点的检测和匹配，得到回波波形中每个高斯分量的初始值，完成高斯分量初始值估计；

b） 根据高斯混合模型，将高斯分量初始值作为输入，通过迭代优化对回波波形进行拟合，拟合过程中高斯分量应满足5.5.1.2.1的要求，剔除不满足判别条件的高斯分量，通过迭代优化，实现回波波形分解，得到每个高斯分量的振幅、中心位置和标准差等波形特征参数；

c） 按照a)和b)的规定对发射波形进行处理，但不需要满足5.5.1.2.1的要求，得到发射波形中高斯分量的特征参数；

d） 根据回波波形中每个高斯分量的中心位置参数以及振幅参数，确定用于激光测距值解算的高斯分量；

e） 利用发射波形起始时刻计算发射波形高斯分量中心位置所对应的时刻，利用回波波形起始时刻计算对应回波波形中用于激光测距值解算的高斯分量中心位置所对应的时刻，根据两个时刻的时间差值换算得到激光测距值；

f） 如果没有从回波波形中分解出任何高斯分量，不应进行激光测距值解算。

高斯混合模型见公式(1)。

$$\omega(t) = \varepsilon + \sum_{i=1}^{n} A_i e^{\frac{-(t-t_i)^2}{2\epsilon_i^2}} \quad \text{.....(1)}$$

式中：

$\omega(t)$ ——全波形在t时刻的幅值；

t——时间；

ε——波形的背景噪声；

n——分解的高斯分量个数；

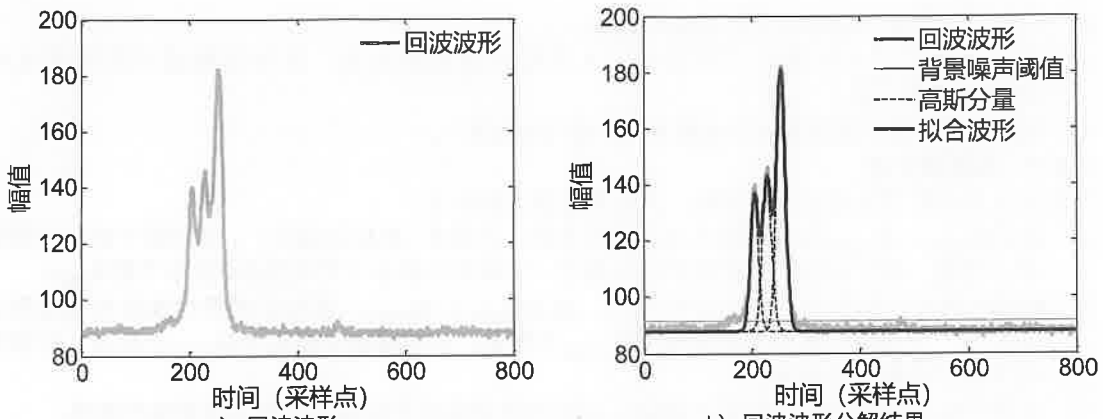
A_i——高斯分量的振幅；

e——自然常数；

t_i——高斯分量的中心位置；

ϵ_i——高斯分量标准差。

以高分七号卫星激光测高仪获取的全波形数据为例，进行波形分解与特征参数提取，结果见图2。



a） 回波波形　　b） 回波波形分解结果

图2　回波波形分解与特征参数提取处理样例

5.5.2　大气改正

卫星激光测高大气改正见公式(2)。

$$\rho_1 = \rho_0 - \Delta\rho - d\rho_{atm} \quad \text{.....(2)}$$

式中：

ρ_1——大气改正后的激光测距值；

$\Delta\rho$——激光测距检校参数；

ρ_0——激光测距值；

$d\rho_{atm}$——大气改正值，计算方法见附录 D。

5.5.3　激光发射指向

利用激光指向参数得到激光测距向量，见公式(3)。

$$\rho_2 = \rho_1 \begin{pmatrix} cos(\beta + \Delta\beta)\, cos(\alpha + \Delta\alpha) \\ cos(\beta + \Delta\beta)\, sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ \sin(\beta + \Delta\beta) \end{pmatrix} \quad \text{.....(3)}$$

式中：

ρ_2——向量形式的激光测距向量；

α——激光指向参数之一，激光出光轴在本体坐标系 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。

5.5.4　固定偏移量改正

利用激光发射参考点在BODY的固定偏移量，得到卫星BODY的激光测距向量，见公式(4)。

$$\rho_3 = \rho_2 + \begin{pmatrix} \Delta X_{ref} \\ \Delta Y_{ref} \\ \Delta Z_{ref} \end{pmatrix} \quad \text{.....(4)}$$

式中：

ρ_3——卫星 BODY 的激光测距向量；

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

5.5.5　计算 ICRF 的激光测距向量

BODY的卫星激光测距向量转化到ICRF，见公式(5)。

$$\rho_4 = R_{BODY}^{ICRF}\rho_3 \quad \text{.....(5)}$$

式中：

ρ_4—— ICRF 的激光测距向量；

R_{BODY}^{ICRF}——BODY向ICRF的转换矩阵，由卫星姿态数据计算得到，推荐使用精密姿态数据。

5.5.6 计算ITRF的激光测距向量

ICRF的卫星激光测距向量转化到ITRF，见公式(6)。

$$\rho_5 = R_{ICRF}^{ITRF}\rho_4 \quad (6)$$

式中：

ρ_5——ICRF的激光测距向量；

R_{ICRF}^{ITRF}——ICRF向ITRF的转换矩阵。

5.5.7 计算激光地面足印点的笛卡尔三维坐标

利用卫星精密轨道数据的位置向量，得到ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标，见公式(7)。

$$\begin{pmatrix} X_{spot} \\ Y_{spot} \\ Z_{spot} \end{pmatrix}_{ITRF} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF} + \rho_5 \quad (7)$$

式中：

$\begin{pmatrix} X_{spot} \\ Y_{spot} \\ Z_{spot} \end{pmatrix}_{ITRF}$——ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标；

$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF}$——ITRF卫星质心的笛卡尔三维坐标，由卫星轨道数据计算得到，推荐使用精密轨道数据。

5.5.8 构建激光测高几何模型

构建激光测高几何模型，见公式(8)，得到ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标。

$$\begin{pmatrix} X_{spot} \\ Y_{spot} \\ Z_{spot} \end{pmatrix}_{ITRF} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{ITRF} + R_{ICRF}^{ITRF}R_{BODY}^{ICRF}\left[\begin{pmatrix} \Delta X_{ref} \\ \Delta Y_{ref} \\ \Delta Z_{ref} \end{pmatrix} + (\rho_0 - \Delta\rho - d\rho_{atm})\begin{pmatrix} \cos\beta\cos\alpha \\ \cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta \end{pmatrix}\right] \quad (8)$$

5.5.9 计算激光地面足印点的大地坐标

ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标转换为大地坐标，见公式(9)、公式(10)、公式(11)和公式（12）。B_{spot_l}和H_{spot_l}的坐标应进行迭代计算：计算B_{spot_l}初值$arctan\left(\frac{Z_{spot}}{\sqrt{(X_{spot}^2+Y_{spot}^2)}}\right)$，带入公式（9）中计算$H_{spot_l}$，$H_{spot_l}$用于计算$B_{spot_l}$，将$B_{spot_l}$再带入公式（9）中计算$H_{spot_l}$，重复上述计算，迭代三次为宜。

$$\begin{pmatrix} B_{spot_l} \\ L_{spot_l} \\ H_{spot_l} \end{pmatrix}_{ITRF} = \begin{pmatrix} arctan\left(\frac{Z_{spot}(N+H_{spot_l})}{\sqrt{(X_{spot}^2+Y_{spot}^2)[N(1-e^2)+H_{spot_l}]}}\right) \\ arctan2(\frac{Y_{spot}}{X_{spot}}) \\ \frac{Z_{spot}}{sinB_{spot_l}} - N(1-e^2) \end{pmatrix}_{ITRF} \quad (9)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2sin^2B_{spot}}} \quad (10)$$

$$e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2} \quad (11)$$

$$arctan2\left(\frac{Y_{spot}}{X_{spot}}\right)=\begin{cases} arctan\left(\frac{Y_{spot}}{X_{spot}}\right) & X_{spot}>0 \\ arctan\left(\frac{Y_{spot}}{X_{spot}}\right) & X_{spot}<0, Y_{spot}\geq 0 \\ arctan\left(\frac{Y_{spot}}{X_{spot}}\right) & X_{spot}<0, Y_{spot}<0 \\ \frac{\pi}{2} & X_{spot}=0, Y_{spot}>0 \\ -\frac{\pi}{2} & X_{spot}=0, Y_{spot}<0 \\ undefined & X_{spot}=0, Y_{spot}=0 \end{cases} \quad \text{.....(12)}$$

式中：

$\begin{pmatrix} B_{spot_l} \\ L_{spot_l} \\ H_{spot_l} \end{pmatrix}_{ITRF}$ ——激光足印点的大地坐标，其中B_{spot_l}为纬度，L_{spot_l}为经度，H_{spot_l}为高程；

X_{spot}—— ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标中X轴坐标；

Y_{spot}—— ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标中Y轴坐标；

Z_{spot}—— ITRF激光地面足印点的笛卡尔三维坐标中Z轴坐标；

N——卯酉圈曲率半径；

e——地球椭球的第一偏心率；

a——地球椭球的长半轴；

b——地球椭球的短半轴。

5.5.10 潮汐改正

激光测高潮汐改正见公式(13)。

$$H_{spot}=H_{spot_l}-d\rho_{tides} \quad \text{.....(13)}$$

式中：

H_{spot}——潮汐改正后的高程值；

H_{spot_l}——潮汐改正前的高程值；

$d\rho_{tides}$——潮汐改正值，计算方法见附录 E。

5.6 激光足印影像处理

5.6.1 辐射校正

利用地面实验室标定的辐射检校系数对相机获取的原始亮度值进行改正，消除足印相机各个探元响应不一致造成的辐射差异，最大程度恢复地物纹理原有的辐射亮度或对比度。辐射校正方法如下：

a） 读取实验室标定的辐射检校系数；

b） 利用辐射检校系数，逐个像素对原始激光足印影像灰度值进行校正；

c） 生成辐射校正后的激光足印影像。

5.6.2 畸变消除

利用在轨检校的内部检校参数，构建无畸变影像与原始影像的坐标映射关系，对辐射校正后的影像进行重采样，消除或减弱卫星成像过程中的各类畸变，生成无畸变影像。畸变消除方法如下：

a） 使用激光足印相机传感器参数(像元大小，焦距等)构建无畸变影像像元排列方式；

b） 根据内部检校参数构建无畸变影像与原始影像的坐标映射关系；

c） 根据坐标映射关系，重采样生成无畸变激光足印影像。

5.6.3 RFM 参数解算

根据无畸变激光足印影像的严密几何定位模型，采用地形无关方法解算RFM参数：

a） 利用卫星姿态、轨道数据以及相机参数，构建无畸变激光足印影像的严密几何定位模型；

b） 结合激光测量的高程值，构建物方虚拟的立体控制格网，根据严密几何定位模型，计算物方格网点对应的像点坐标；

c） 利用格网点坐标及对应的像点坐标，拟合RFM参数。

6 质量控制和结果记录

6.1 质量控制

6.1.1 激光几何定位

使用30m格网全球DSM对整轨激光测高数据进行精度核查：

a） 未采用卫星精密轨道生产，判定数据不合格；
b） 未进行大气改正、潮汐改正，判定数据不合格；
c） 与DSM高差大于3m的点占整轨的20%以上，判定数据不合格；
d） 整轨数据与DSM高差的标准差大于15m，判定数据不合格。

6.1.2 激光足印影像处理

按照下列内容检查激光足印影像的几何定位精度与辐射质量：

a） 检查辐射校正后的激光足印影像是否亮度异常，目视效果是否正常；
b） 检查畸变消除的影像是否正常，检查畸变消除精度是否满足优于1个像素；
c） 检查RFM对严密模型的替代精度是否在限差(5‰)以内。

6.2 结果记录

在激光测高数据处理过程中，作业人员应做好生产记录，异常数据应登记在册。

7 成果整理与资料归档

7.1 成果整理

对地观测卫星激光测高数据处理成果包括：

a） 对地观测卫星线性体制激光测高初级或标准产品，与CH/T xxxx-xxxx《对地观测卫星激光测高数据产品》中的激光测高初级或标准产品一致；
b） 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。

7.2 资料归档

归档介质为光盘、磁带或硬盘等，归档资料包括：

a） 对地观测卫星线性体制激光测高初级或标准产品；
b）技术总结和检查报告。

附 录 A
（资料性）
激光观测数据

卫星下传的激光原始二进制数据经过解包后得到激光观测数据和其他辅助数据，激光观测数据采用HDF5文件格式存储，激光观测数据示例见表A.1。

表A.1 激光观测数据示例

数据项	单位	示例
累积秒	s	242136834.671432
激光渡越时间粗值	ns	3374328.0
发射波形数据	-	149 160 167 176 180 188 187 187 183 181 173 …
回波波形数据	-	196 209 217 224 226 228 222 215 205 196 182 …
激光足印影像数据	-	

附 录 B
（资料性）
卫星姿态数据

B.1 卫星在轨运行过程中，实时处理姿态信息并下传到地面，通过以四元数或欧拉角的形式记录数据，卫星姿态数据示例见表B.1。

表B.1 卫星姿态数据示例

数据项	单位	示例
累积秒	s	242136834.67143
四元数	-	0.4374462 0.844928 -0.066551
累积秒	s	242136834.67143
欧拉角	°	24.5421 75.8547 11.3281

B.2 卫星下传原始姿态测量数据，通过地面姿态处理后，获得精度更高的卫星精密姿态数据，精密姿态数据格式和内容与星上下传姿态数据一致，激光测高数据处理时，宜采用精密姿态数据，提升激光测高数据处理精度。精密卫星姿态数据示例见表B.2。

表B.2 精密卫星姿态数据示例

数据项	单位	示例
累积秒	s	242136834.67143
四元数	-	0.4374462 0.844928 -0.066551
累积秒	s	242136834.67143
欧拉角	°	24.5421 75.8547 11.3281

附 录 C
（资料性）
卫星轨道数据

C.1 卫星在轨运行过程中，实时处理轨道信息并下传到地面，卫星轨道数据示例见表 C.1。

表C.1 卫星轨道数据示例

数据项	单位	示例
累积秒	s	242136834.67143
瞬时坐标	m	6108785.7612 -2742386.4680 -1603015.6953
瞬时速度	m/s	976.3376898 -2092.4096464 7334.8073793

C.2 卫星下传原始轨道测量数据，通过地面轨道处理，获得精度更高的卫星精密轨道数据，精密轨道数据格式和内容与星上下传轨道数据一致，激光测高数据处理时，宜采用精密轨道数据，提升激光测高数据处理精度。精密卫星轨道数据示例见表C.2。

表C.2 精密卫星轨道数据示例

数据项	单位	示例
时间	年 月 日 时 分 秒	2021 9 3 12 13 54
瞬时坐标	m	6108785.7612 -2742386.4680 -1603015.6953
瞬时速度	m/s	976.3376898 -2092.4096464 7334.8073793

附 录 D
（资料性）
大气改正

D.1 大气效应改正技术流程

地球大气对激光测高仪发射的激光脉冲传输造成延迟影响是测距精度的主要误差来源之一，延迟主要由特定波长的激光在大气传输路径上的折射系数确定，与地球表面大气压力、柱状路径内水分子密度以及海拔和大气非静态力造成的重力变化相关，延迟量与观测角、大气参数关联，延迟改正模型可由天顶延迟与高度角相关的映射函数乘积表示。基于同步观测的激光测高仪大气效应改正技术流程见图D.1。推荐采用美国国家环境预报中心NCEP（National Centers for Environmental Prediction）提供的近36h延迟的全球0.25°空间分辨率、6h时间分辨率的再分析格网气象数据。

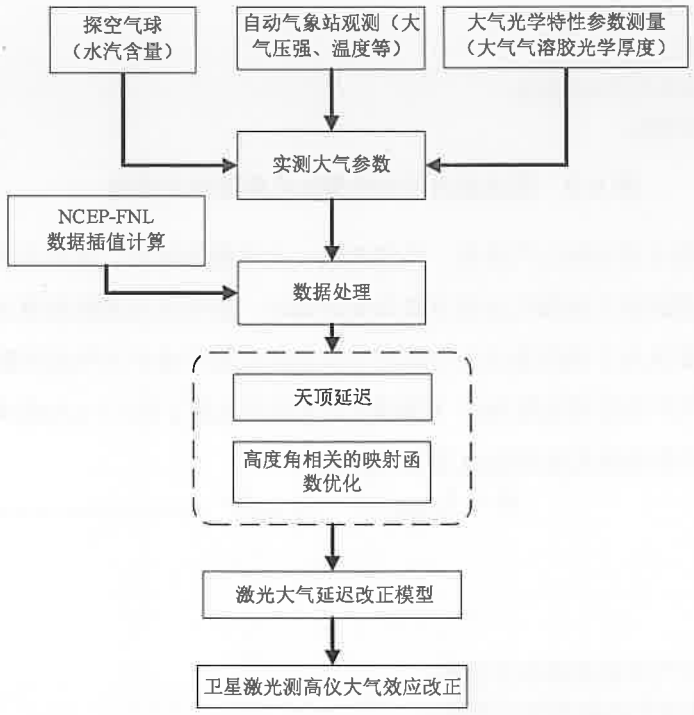
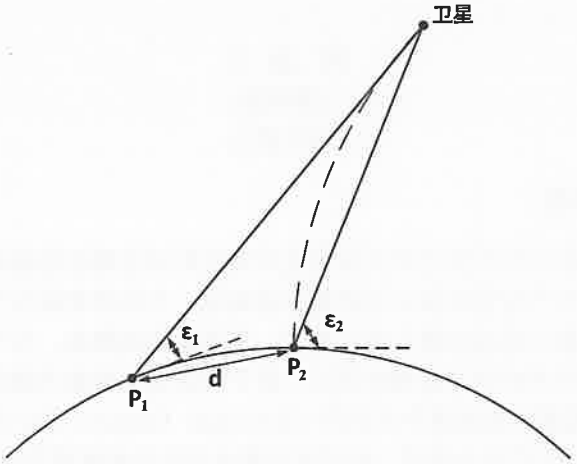


图 D.1 基于同步观测的激光测高仪大气效应改正技术流程

D.2 折射引起的大气延迟距离改正模型

激光在大气传播过程中，由于大气折射的影响很大程度上限制了激光测高系统的距离观测精度，因此必须研究和分析大气的影响并加以修正。激光在大气中传播的路径与真空中的直线传播存在差异，几何路径示意图见图D.2。



标引序号说明：

P_2——卫星实际激光点；

P_1——真空条件下卫星理论激光点；

d——理论激光点与实际激光点直线距离；

ε_1——真空条件下卫星理论激光点的高度角；

ε_2——卫星实际激光点的高度角。

图 D.2　激光在大气中传播的几何路径示意图

大气对激光测距的影响主要包括大气折射、大气湍流、大气散射效应，其中大气折射效应作用导致的光束弯曲路径在对地观测激光测高仪主要表现为测距延迟，影响激光测距的最主要因素是大气折射延迟。大气延迟改正主要是为了消除激光在对流层中传递的过程中由于大气的折射导致的测距延迟误差。假设激光信号在大气中的传播速度为v，折射率n与真空中光速 c 有$v = c/n$的关系，激光信号经大气折射与真空中传播所产生的距离延迟值ΔL见公式(D.1)。

$$\Delta L = \int_{S_atm} n ds - \int_{S_vac} ds \quad \text{.....(D.1)}$$

式中：

ΔL——距离延迟值；

n——折射率；

$\int_{S_atm} ds$——激光在大气中的距离积分函数；

$\int_{S_vac} ds$——激光在真空中的距离积分函数；

s——距离。

一般大气延迟改正模型可表示为天顶延迟和与高度角有相关映射函数的乘积，公式(D.1)可以变形为公式(D.2)。

$$\Delta L = m(\varepsilon)\int_z^{\infty}(n-1)dz \quad \text{.....(D.2)}$$

式中：

$m(\varepsilon)$——是与入射角 ε 相关的映射函数；

$n-1$——天顶方向大气折射率；

$\int_z^{\infty} dz$——天顶方向距离积分；

z——天顶方向距离。

天顶方向大气改正就转化为求解大气折射率的积分。结合流体静力学方程和非理想气体公式推导出中性大气中干分量和湿分量的距离改正模型，见公式（D.3）。

$$\begin{cases}\Delta L_H = C_k k_1 g_m^{-1} P_{Surf} \frac{R}{\mathrm{M_d}} \\ \Delta L_W = C_k k_2 P_W \frac{R}{\mathrm{M_W}}\end{cases} \quad \text{(D.3)}$$

式中：

ΔL_H——干大气改正项；

C_k——常数值，取值为10^{-6}；

g_m——大气柱中重力的平均值；

$Psurf$——地表压强；

ΔL_W——湿大气改正项；

R——摩尔气体常量，$R = 8.31451\mathrm{J/(mol\cdot K)}$；

P_W——大气可降水量；

M_d、M_W——干、湿大气分子量，$M_d = 28.9644\mathrm{kg/kmol}$，$M_W = 18.0152\mathrm{kg/kmol}$。

其中$k1$、$k2$值与卫星载荷发射激光信号频率相关，见公式（D.4）。

$$\begin{cases}k_1 = C_{s1} + C_{s2}\frac{(C_{s3}+\lambda^{-2})}{(C_{s3}-\lambda^{-2})^2} + C_{s4}\frac{(C_{s5}+\lambda^{-2})}{(C_{s5}-\lambda^{-2})^2} \\ k_2 = C_{s6} + C_{s7}\lambda^{-2} + \times C_{s8}\lambda^{-4} + C_{s9}\lambda^{-6}\end{cases} \quad \text{(D.4)}$$

式中：

C_{s1}——常数值，取值为0.237134；

C_{s2}——常数值，取值为68.39397；

C_{s3}——常数值，取值为130；

C_{s4}——常数值，取值为0.45473；

C_{s5}——常数值，取值为38.9；

C_{s6}——常数值，取值为0.648731；

C_{s7}——常数值，取值为0.0174174；

C_{s8}——常数值，取值为3.5575×10^{-4}；

C_{s9}——常数值，取值为6.1957×10^{-5}；

λ——波长。

大气中的激光天顶延迟改正模型，见公式(D.5)。

$$d\rho_{atm} = \Delta L_H + \Delta L_W \quad \text{(D.5)}$$

由公式(D.3)和公式(D.5)可知，干大气和湿大气的延迟量求解还需要获取大气的地表压强和大气可降水量。

附 录 E
（资料性）
潮汐改正

E.1 潮汐改正

潮汐作用引起的激光测距误差应修正。潮汐改正包括由海潮、固体潮、极潮和负荷潮等引起的大地水准面偏移。

E.2 海潮改正

海潮是月球和太阳引潮力使海洋水面发生的周期性涨落现象。平均周期(即上一次高潮或低潮至下一次高潮或低潮的平均时间)为12小时25分钟。某一时刻海潮潮高可用分潮潮波的潮汐展开表示，常考虑4个半日周期潮汐和4个全日周期潮汐的叠加，每分潮潮波可用相应等潮图描述，即海潮模型。各分潮等潮图常用规范网格离散化提供的全球或者局部规则网格点上的振幅和迟角，即分潮调和常数，通过时间和位置信息，每点潮位可用网格点数据插值，见公式（E.1）。

$$\eta = \sum f_i h_i \cos(\sigma_i t + v_{oi} + u_i - g_i) \quad \text{(E.1)}$$

式中：

η——潮位；

f_i——分潮的交点因子；

h_i，g_i——第 i 个分潮的调和常数；

σ_i——分潮角速度；

t——时间；

v_{0i}——分潮天文初相位；

u_i——分潮的订正角。

其中，t时刻分潮天文初相位v_{0i}关系式见公式（E.2）。

$$v_0 = \mu_1\tau + \mu_2 s' + \mu_3 h' + \mu_4 p + \mu_5 N' + \mu_6 p' + \mu_0 \quad \text{(E.2)}$$

式中；

v_0——分潮初相位计算结果；

μ_1，μ_2，μ_3，μ_4，μ_5，μ_6. μ_0——杜德森系数；

τ——平太阴地方时；

s'——月球平经度；

h'——太阳平经度；

p——月球近地点平均经度；

N'——月球升交点平均经度；

p'——太阳近地点平均经度。

各平均经度见公式（E.3）。

$$\begin{cases} s' = 277.02 + 129.3848(Y - 1900) + 13.1764(n' + i + \frac{t}{24}) \\ h' = 280.19 - 0.2387(Y - 1900) + 0.9857(n' + i + \frac{t}{24}) \\ p = 334.39 + 40.6625(Y - 1900) + 0.1114(n' + i + \frac{t}{24}) \\ N' = 100.84 + 19.3282(Y - 1900) + 0.0530(n' + i + \frac{t}{24}) \\ p' = 281.22 + 0.0172(Y - 1900) + 0.00005(n' + i + \frac{t}{24}) \\ \tau = 15t - s + h' \end{cases} \quad \text{(E.3)}$$

式中：

Y——当前年份；

i——1900年至Y年的闰年数；

n'——从Y年1月1日0时起算至计算日0时间的总天数。

海潮改正主要利用海洋潮汐模型修改，一般选用全球海潮模型，模型提取分潮调和常数，根据以上公式可预报全球海域内任何地点、任何时间的潮汐水位高度，常用FES(Finite Element Solution)和GOT(Goddard Ocean Tide)模型。

E.3 海潮负荷潮改正

海洋潮汐负荷作用导致地球形变和重力场变化，由负荷作用导致的地球形变称为海潮负荷潮。

负荷潮汐形变计算一般先求地球对单位点质量负荷的响应函数，即 Green 函数；后利用 Green 函数对不规则负荷进行褶积积分。假设地球为球对称成层分布，不旋转，具有自引力并遵从应力应变 Hooke 定律的弹性体，且初始应力状态呈流体静压力平衡状态，由弹性力学中的平衡方程和 Poisson 方程，可解求表征地面负荷形变特征参数。计算步骤如下：

a) 输入计算点经纬度位置和时间，选取海洋潮汐模型，积分半径根据经验自动确定；

b) 在积分半径内，根据陆海边界模型，计算海洋上各流动点的海潮潮高；

c) 在积分半径内，根据 Green 函数公式，以及选取的地球模型和参考框架，计算海洋上各流动点的球面角距和 Green 函数；

d) 结合海水密度模型，积分半径内海洋上各流动点的潮高和 Green 函数，积分确定海潮负荷改正。

利用全球海潮模型提供的各主要分潮信息和负荷格林函数的全球褶皱积分，根据上述步骤可得任意时刻各分潮的负荷效应。全球海潮模型中，FES 模型和 GOT 模型分别提供了相应各分潮的负荷潮格网点等潮图。实际计算中，利用现有模型提供的负荷潮调和常数计算待求点位置负荷潮改正信息。

E.4 固体潮改正

月球和太阳作用海水每天两次涨落，导致固体地球表面的周期性涨落，这一变形就是固体潮。固体地球潮可用分潮的概念来表示，其中半日分潮的影响最大，振幅约为全日分潮中最大振幅的 2 倍。除了太阳和月亮对固体地球的影响外，其它天体对固体地球的影响几乎可以忽略。因此，卫星测高中固体地球潮的校正一般不采用分潮的方法，而是基于 Munk 和 Cartwright 在 1966 年提出的潮汐响应分析法，直接计算月亮和太阳的引潮位，然后得到其所引起的固体地球的形变量，见公式（E.4）和公式（E.5）。

$$\frac{V(\theta,\lambda,t)}{g}=\sum_m\sum_n c_n^{m*}(t)W_n^m(\theta,\lambda) \quad \text{(E.4)}$$

$$W_n^m(\theta,\lambda)=(-1)^m\left[\frac{2n+1}{4\pi}\cdot\frac{(n-m)!}{(n+m)!}\right]^{\frac{1}{2}}P_n^m(\cos\theta)^{im\lambda} \quad \text{(E.5)}$$

式中:

θ,λ——计算点纬度和精度；

$V(\theta,\lambda,t)$——与时间和位置有关的引潮力位；

g——重力加速度；

n和m——分别为球谐展开的阶和次；

$c_n^{m*}(t)$——时间的函数，由月亮和太阳的位置决定，*表示共轭复数；

$P_n^m(\cos\theta)$——缔合勒让德函数；

i——虚数单位。

$V(\theta,\lambda,t)/g$即为天体对固体地球引力潮位所产生的潮汐形变量。考虑到月亮和太阳引力潮位量级的不同，对于月亮引起的潮汐形变，一般只计算 $n=2$和$n=3$ ，对于太阳引起的潮汐形变一般只计算 $n=2$。计算步骤如下：

a) 获取站点、月球、太阳的地心位置，可输入时间后通过模型得到；

b) 根据步骤 a)的结果计算日潮、半日潮以及纬度引起的位移修正，并考虑由于地幔黏滞性导致的在日潮带和长期潮带的同相修正；

c) 将步骤 b)的各项结果相加，获得潮汐改正在三个方向上的具体值；

d) 对最终结果进行永久潮汐改正。

经过上述计算可得固体潮修正值后从原始的坐标值中将其扣除。

E.5 极潮改正

由地球自转产生的地球离心力使地球发生形变称为极潮，其位移取决于观测瞬间地球自转轴与地壳的交点位置随时间而变化，地球自转引起的离心力位见公式（E.6）。

$$V=\frac{1}{2}\left[r^2\left|\vec{\Omega}\right|^2-(\vec{r}\cdot\vec{\Omega})^2\right] \quad \text{(E.6)}$$

式中，

V——地球自转引起的离心力位；

r——底面点到地球质心的径向距离；

$\vec{r}$——底面点到地球质心的平均径向距离；

$\vec{\Omega}$——地球的旋转平均角速度，见公式（E.7）。

$$\vec{\Omega}=\Omega(m_1\hat{x}+m_2\hat{y}+(1+m_3)\hat{z}) \quad \text{(E.7)}$$

式中：

Ω——地球旋转平均角速度；

m_1、m_2——描述瞬时地球旋转极相对于平均极点的时间相关偏移(通过最新的极移数据经过模型拟合得出)；

$\hat{x}$、$\hat{y}$、$\hat{z}$——坐标轴单位矢量；

m_3——旋转速率的变化率。

忽略m_3的变化(误差低于毫米级)，m_1、m_2在离心力位中的一阶扰动，见公式（E.8）。

$$\nabla V(r,\theta,\lambda)=-\frac{\Omega^2r^2}{2}sin(2\theta)\,(m_1\,cos\,\lambda+m_2\,sin\,\lambda) \quad \text{(E.8)}$$

式中：

(r,θ,λ)——分别为向径，余纬和经度；

ΔV——使用潮汐勒夫数h_2和ι_2，见公式（E.9）。

$$S_r=h_2\frac{\nabla V}{g},S_\theta=\iota_2\partial\theta\nabla V,S_\lambda=\frac{\iota_2}{g\,sin\,\theta}\partial\lambda\nabla V \quad \text{(E.9)}$$

式中：

S_r、S_θ、S_λ——分别是径向、经向和纬向极潮值；

h_2、ι_2——潮汐勒夫数。

参照国际地球自转服务IERS(International Earth Rotation Service)，极潮改正的最终公式为公式（E.10）。

$$\begin{cases}S_r=-33\,sin\,2\,\theta(m_1\,cos\,\lambda+m_2\,sin\,\lambda)\\S_\theta=-9\,cos\,2\,\theta(m_1\,cos\,\lambda+m_2\,sin\,\lambda)\\S_\lambda=9\,sin\,2\,\theta(m_1\,sin\,\lambda-m_2\,cos\,\lambda)\end{cases} \quad \text{(E.10)}$$

IERS 各版本给出了不同平均极移计算方法。

《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》

编制说明

行业标准项目名称：对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

行业标准项目编号：201933003

送审行业标准名称：对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

（此栏送审时填写）

报批行业标准名称：对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

（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

对地观测卫星激光测高数据处理技术规范

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：201933003，标准计划名称《对地观测卫星激光测高数据处理技术规范》。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

对地观测卫星激光测高数据处理主要是利用激光测距信息进一步获取地物目标精确的三维坐标。然而，星载激光测高数据由于受姿态指向、轨道位置、大气延迟效应、潮汐、光行差等因素影响，处理流程复杂，处理流程尚没有形成统一的技术规范，处理精度难以保证。经卫星激光测高数据处理后得到的全球足印三维坐标是一种重要的地面参考数据，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。同时，还可以为其他行业提供数据支撑，例如海冰厚度监测、植被森林冠层高度提取，应用前景广阔。

测绘地理信息行业对对地观测卫星激光测高数据处理标准和相应的技术流程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，本标准开展有针对性的研究，对星载激光测高数据处理的工作内容、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，形成规范化的激光测高数据处理流程，有助于促进其技术进步，形成良好的行业应用，促进星载激光测高技术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，由武汉大学、中国科学院空天信息创新研究院、中国地质大学(北京)、东北林业、中科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、湖南科技大学、中国人民解放军战略支援部队信息工程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激光数据处理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	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	

3	李国元	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责技术内容把关	
4	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和内容修订研究工作	
5	陈继溢	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责激光数据预处理和足印数据处理等部分编写	
6	刘　诏	自然资源部国土卫星遥感应用中心	负责激光波形数据处理等部分编写	
7	金涛勇	武汉大学	参与标准技术内容编制	
8	朱广彬	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统稿	
9	王　成	中国科学院空天信息创新研究院	参与标准起草及资料的搜集	
10	康志忠	中国地质大学（北京）	参与标准起草及资料的搜集	
11	邢艳秋	东北林业大学	参与标准起草及资料的搜集	
12	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	
13	李　旭	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	
14	周　辉	武汉大学	负责部分内容的起草与审查	
15	周　平	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	
16	李少宁	湖南科技大学	负责部分内容的起草与审查	
17	范大昭	战略支援部队解放军信息工程大学	负责相关内容编写与协助统稿	
18	傅征博	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测高数据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测高数据处理领域生产作业单位、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 28 个，回函并有建议

或意见的单位数11个。共收到111条意见，其中采纳意见97条，部分采纳意见9条，未采纳意见5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。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标准内审会，编制组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。2022年2月，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，形成标准送审稿。

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测试中心、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. 编制原则

（1）全面性

对地观测卫星激光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，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，凝练测高数据处理技术中规范流程。旨在保证标准内容规范、对实际工作有指导作用，为形成统一而全面的行业技术规范，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。

（2）适用性

本标准与同期申报的《对地观测卫星激光几何检校技术规范》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。本标准是在上述对地观测卫星激光几何检校技术标准基础上，对经检校后的卫星激光测高数据处理作业相关规范和约定的补充完善，对共同完善卫星激光测高仪对地观测系列标准体系起到积极作用。

（3）可操作性

对地观测卫星激光数据处理涉及较多新技术，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。该技术规范明确清晰地介绍了各流程，对于技术人员而言具有较强的可操作性。

（4）先进性

作为指导和规范生产作业的技术标准，应具有先进性与可继承性。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

GLAS 作为全球首个对地观测星载激光载荷，由于发射时间较早，国内外学者对其研究较多。美国得克萨斯州大学的 B. E. Schutz 针对 GLAS 数据开展了从测距到地面几何坐标解算的研究。Herring 等对 GLAS 激光大气延迟改正进行了介绍。Carabajal 等针对 SLA 激光测高数据几何坐标解算、高程精度验证进行了研究，总结比较全面，但由于 SLA 获得的激光足印光斑较大、硬件水平受限，处理结果并没有实现业务化应用。

国内王成团队针对 GLAS 测高数据处理开展了研究，并参考国外学者现有成果，给出了 GLAS 数据处理流程。唐新明等人根据卫星激光测高严密几何模型，分析我国资源三号 02 星激光测高的各项误差来源，在激光指向角粗标定后对资源三号激光数据进行了处理。谢俊峰等人针对资源三号 02 星激光测高数据，开展了几何检校和测高数据处理工作，检校后处理精度优于 1 米。李国元等人对资源三号 02 星激光测高仪的精度进行了理论分析，对其在航天测绘中的应用进行了试验。在技术方法上，国内外学者在对地观测卫星激光测高数据处理开展了一些研究，对地观测卫星激光测高数据处理技术较为成熟。

但是在对地观测卫星激光测高数据处理规范方面，没有形成统一的数据处理标准和相应的技术流程规范。在具体的业务化生产中，不利于产品的分发和进一步深化应用，无法应对未来国产激光测高数据大规模业务化处理。各行业用户得到的激光产品精度存在不一致等情况，可能会严重滞后这些数据的应用

与推广，影响我国激光遥感事业的发展。因此，迫切需要开展对地观测卫星激光测高数据处理规范研究，推动我国对地观测卫星激光测高发展。

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，《对地观测卫星激光几何检校技术规范》等与卫星激光测高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测高数据处理的作业流程、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测高数据处理流程，明确在业务化生产过程中的技术执行步骤，用于指导卫星激光测高数据业务化生产。

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测高数据处理作业环节，用于对地观测卫星激光测高数据处理产品生产。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，总结凝练对地观测卫星激光测高数据作业经验，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 ATL03 光子高程数据和 ATL06 分段高程数据的精度和准确度分别优于 5±13cm 和 3±9cm。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。

$$\Delta t = T_{接受} - T_{发射} \tag{1}$$

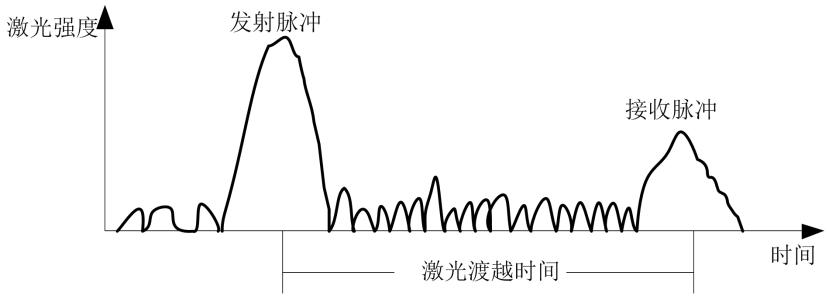


图 1 激光渡越时间示意图

激光到观测表面的距离可表示为：

$$R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \tag{2}$$

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。

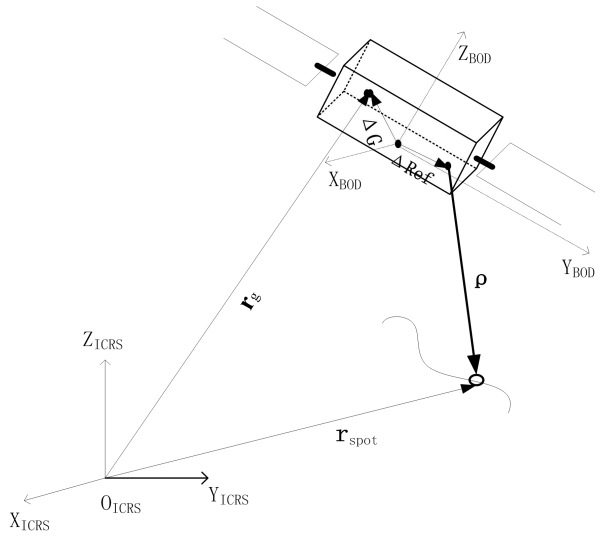


图 2 激光测高仪几何模型

3.5 对激光数据处理精度的要求

卫星激光是获取大范围地面高精度高程信息的有效手段之一，获取的地面信息主要包括平面和高程两个方面。由于激光的肉眼不可见，平面信息一般采用在轨几何检校对其进行控制，约束在合理的范围内，属于在轨几何检校的范

畴。因此在卫星激光数据处理的过程中，对平面精度不作要求。高程精度是卫星激光数据处理的关键，是评价激光数据质量的重要指标，因此在激光数据处理过程中主要对高程精度进行要求。

卫星激光数据处理的精度极限主要包括三部分：激光测高仪的载荷设计精度、激光在轨几何检校精度和卫星激光数据处理算法精度。激光测高仪的载荷设计精度是激光数据处理精度的天花板，理论上，无论地面采用任何方法都只能无限接近载荷设计精度，因此数据处理对这部分精度不作要求。激光在轨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，在编写组编写的另一个标准（同期上报）中已经做了要求，这里也不做要求。

卫星激光数据处理算法精度是本标准研究的主要内容，如标准所述，主要包括：处理模型、大气校正、潮汐改正等多个过程，每个环节都存在误差，综合考虑激光指向参数、激光测距值和各项改正参数中存在的随机误差，在光斑内地形坡度小于 15° 的平坦地面区域，对地观测卫星激光测高数据处理要求最终激光测高产品高程中误差优于℉+0.2 m，℉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，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

1.资源三号 02 星激光数据处理

2016 年 6 月 24 日，资源三号 02 星激光测高试验性载荷第一次开机获得轨道号为 382 的第 1 轨数据，获取时间段为：2016 年 6 月 24 日 11 点 57 分 5 秒至 12 点 1 分 0.5 秒，共有 472 个激光数据点，其中记录显示为无效的激光点为 14 个，无效数据中“回波检测异常”共 13 个，“传输异常”1 个；记录为有效数

据的激光点共 458 个。数据覆盖范围包括：蒙古国和我国的内蒙古、甘肃和青海，如图 3 所示。

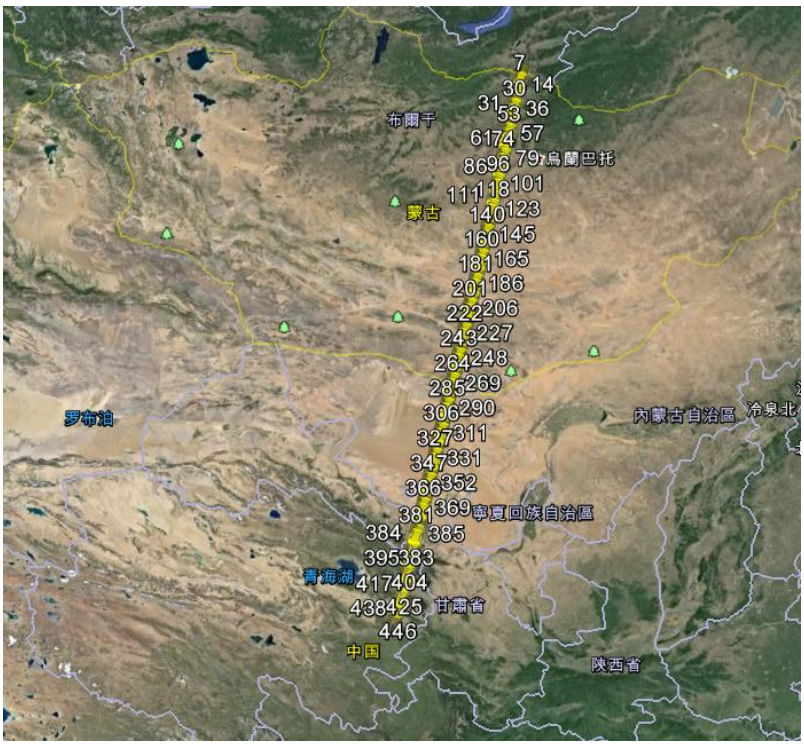


图 3　资源三号 02 星第一轨激光足印点在地图上的分布示意图

资源三号 02 星激光测高仪自 2016 年 6 月 24 日第一次开机获得第一轨激光测高数据以来，共获得了 190 轨数据，并进行了业务化处理，获得了约 3.2 万个高精度高程控制点，其分布如图 4 所示。基于本标准已经实现了目前资源三号 02 星所有激光测高数据的工程化处理。

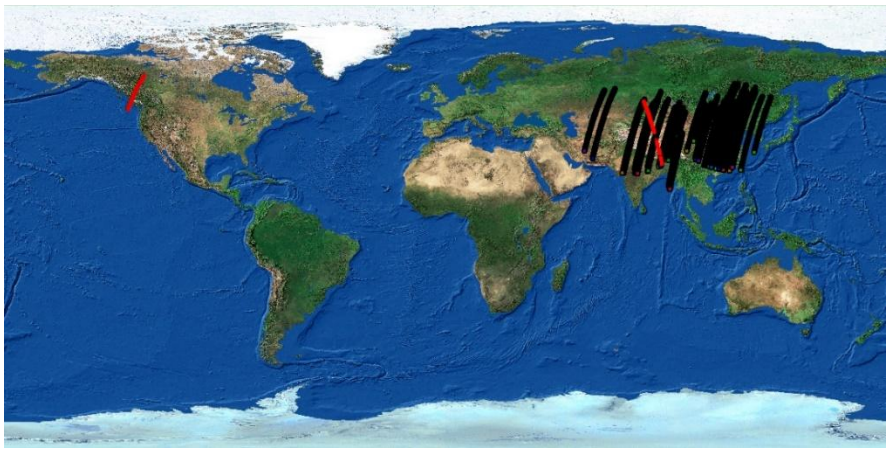


图 4　资源三号 02 星 44 轨激光测高数据分布示意图

资源三号 02 星激光测高仪每轨开机时间大约为 10 分钟，获得的点数在

800-1000 个左右。如图中红色的代表两轨比较特别的数据，其中位于中国境内的 1 轨为卫星夜间升轨时开机获得的激光测高数据，另一轨则位于境外的北美地区。

目前所有激光测高数据中硬件记录为有效的数据所占比例如图 5 所示。

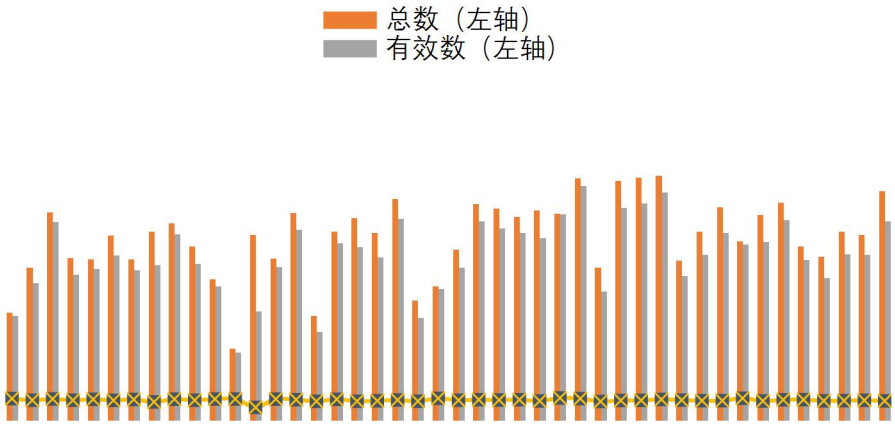


图 5　资源三号 02 星激光测高数据硬件记录有效的点数统计

对所有的资源三号 02 星激光测高数据处理完后，采用公开版的分辨率为 30mALOS 全球 DSM 数据 AW3D30 和 EGM2008 对激光点的高程进行统计分析。AW3D30 的高程基准为 ITRF2007+EGM2008，通过 EGM2008 模型将高程基准转换成 WGS84 大地高，然后与 02 星的 SLA 高程数据作差，取差值绝对值与 2000m、50m、10m、5m、2m 几个阈值进行统计。总体统计结果见图 6。

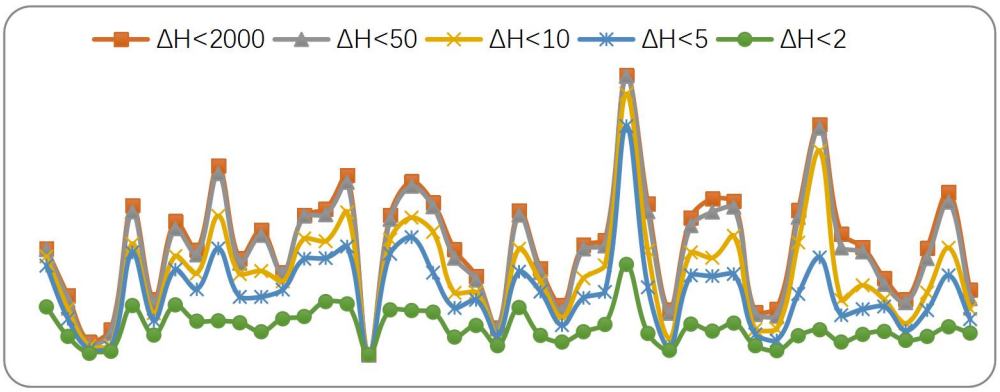


图 6　资源三号 02 星高程误差统计

资源三号 02 星仅有的激光测高数据中，高程精度与参考 DSM 高差小于 2m

的点所占比例为 10.37%，总数为 3661 个；小于 5m 的为 23.89%，总数 8435 个。选择资源三号 02 星的若干轨激光测高数据，采用 AW3D30 地形数据，统计了不同地形类别下的激光足印点高程误差，结果如表 4 和图 7 所示。

表 4　资源三号 02 星激光测高数据高程精度统计表

（单位：有效点为个，其它为米）

轨道号	平地（2°以下）			丘陵（2°~6°）			山地（6°~25°）		
	有效点	均值	中误差	有效点	均值	中误差	有效点	均值	中误差
656	149	0.854	5.943	5	9.320	17.977	5	12.816	17.869
914	329	0.458	5.355	29	11.088	15.318	33	12.247	18.713
915	123	0.920	5.099	14	7.348	14.301	9	11.357	18.047
929	323	0.837	7.452	20	9.872	13.439	17	8.940	14.20
944	447	0.343	6.835	47	10.383	15.83	17	13.165	17.291
945	246	1.619	5.470	19	9.330	14.050	5	12.691	16.547
959	292	1.191	8.61	41	6.647	15.160	7	2.746	16.526
991	446	0.475	5.908	19	8.547	15.961	27	14.516	18.698
1035	275	1.578	6.289	35	9.882	15.661	31	12.026	15.371
1050	326	2.297	3.609	2	6.874	7.845	4	12.347	15.284
1051	307	0.146	6.436	45	7.395	15.128	37	9.524	16.008
1081	238	1.045	6.865	30	7.253	12.885	32	12.875	17.348
1263	251	0.917	5.272	7	7.816	14.671	11	9.377	17.487
1476	152	0.531	5.923	9	0.640	9.873	6	16.255	17.661
总均值		0.944	6.076		8.028	14.149		11.491	16.932

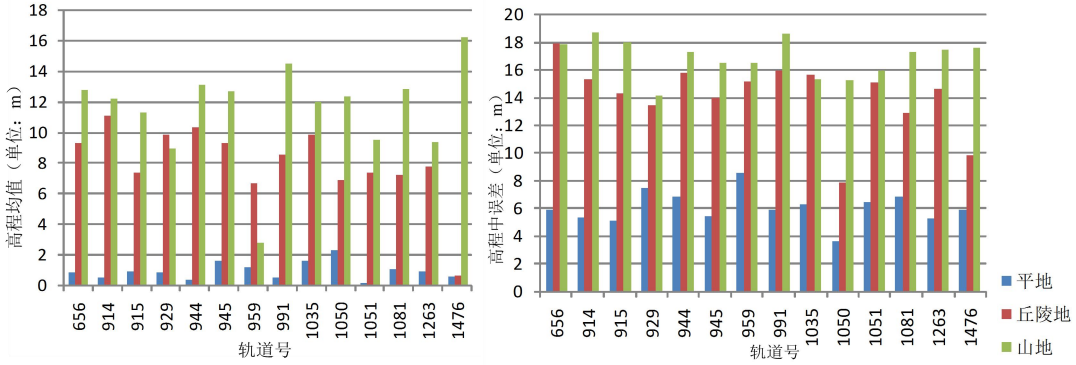


图 7　不同地形条件下资源三号 02 星激光高程精度示意图

2. 资源三号 03 星激光数据处理

资源三号 03 星于 2020 年 6 月 26 日首次开机，历时 16 分钟 04 秒，首次共

发射 1928 次脉冲，下传数据总体情况如表 5 所示。

表 5　下传数据情况表

轨道号	总点数	回波点数	无回波点数	有效率
900018	1928	1442	486	74.8%

资源三号 03 星激光数据包将多轨多次激光开机数据打包合并为一包数据下传至地面，其中可能包含多段覆盖全球的激光点数据，可能存在时间上、空间上的不连续，如首轨数据覆盖范围包括：俄罗斯、蒙古国、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、巴基斯坦以及我国内蒙古、新疆地区，如图 8 所示。

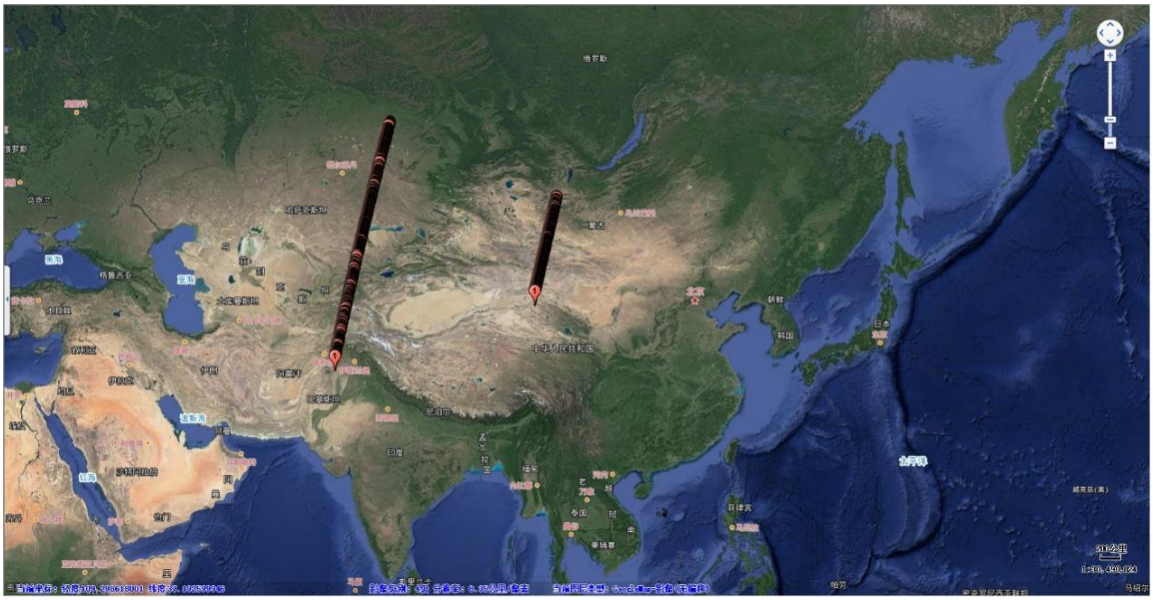


图 8　资源三号 03 星首轨激光数据分布图

受天气等因素影响，部分数据无效，剔除无效的测距数据后，计算每个激光点测距值如图 9 所示，测距范围为：495936.135m - 506360.535m。

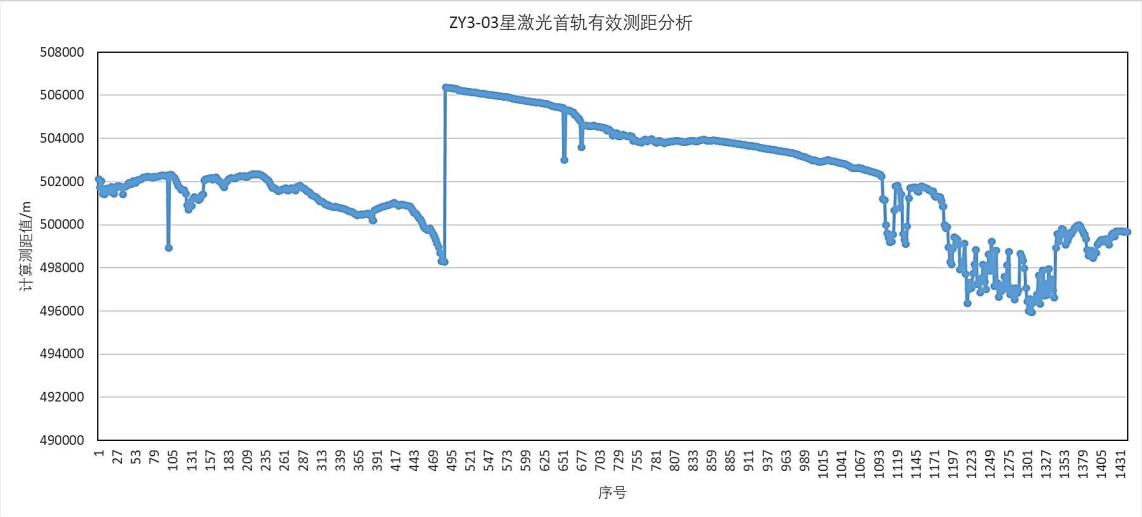


图 9　资源三号 03 星激光首轨有效测距分析

由于资源三号 03 星采用阈值法，且采用三通道波形前后缘匹配的方式，进行了测距计算，主要分为 3 类：

1）TH1：宽带高阈值通道

2）TH2：宽带低阈值通道

3）TH3：宽带宽阈值通道

由于地形影响，首轨数据中并非所有数据均采用 TH1 通道计算，各通道计算的数据量如表 6 所示。

表 6　通道计算数量

轨道号	总有效点数	TH1点数	TH2点数	TH3点数
900018	1442	1248	114	80

其中默认为 TH1 通道计算的测距精度最高，故得到最优测距有效率如表 7 所示。

表 7　最优测距有效率表

轨道号	总点数	有效点数	有效率	TH1点数	TH1有效率
900018	1928	1442	74.8%	1248	64.7%

卫星在轨后从第一轨开机至 2020 年 12 月 23 日，资源三号 03 星激光共开机 68 轨，其开机时刻激光星下点分布位置较为均匀，主要分布在亚洲、欧洲、

北美洲，南美洲地区。目前尚未在澳大利亚以及南极洲获取激光点数据。资源三号 03 星激光星下点轨迹分布如图 10 所示。

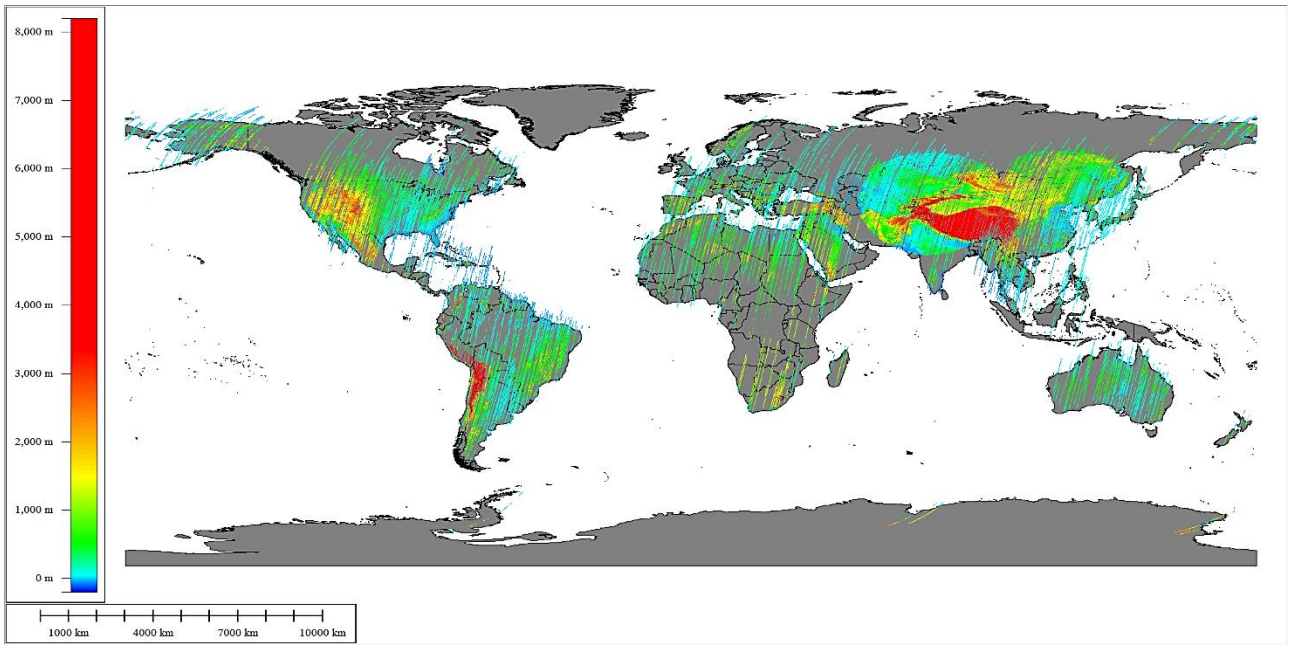


图 10　资源三号 03 星激光点数据分布示意图

针对 1300 轨资源三号 03 星激光，通过回波波形计算激光测距值，并利用激光测距，利用卫星激光数据处理软件解算出激光地面三维坐标，从而进行资源三号 03 星激光测量数据有效性分析，结果如表 8 所示。

表 8　资源三号 03 星激光测量数据有效性分析

总点数	无回波点数	有回波点数	测量有效比例
669778	281028	388750	58%

综上，可看出资源三号 03 星激光，在总点数近为 67 万个，测量无效数据点为约 28 万个，有效数据点约 39 万个，其测量有效率为 58%。截至 2021 年 9 月，共收到 2400 余轨激光数据，共开机近 240 万次，处理得到有效激光点 138 万个。

3. 高分七号卫星激光数据处理

2019 年 11 月 5 日，高分七卫星激光测高仪第一次开机获得轨道号为 32 的第一轨数据，其中波束 1 与波束 2 各获取有 242 个激光数据点。其中波束 1 有

效回波点数个 128，无回波激光点个 114，激光回波有效率为 52.9%；其中波束 2 有效回波点数个 101，无回波激光点个 141，激光回波有效率为 41.7%；数据位于俄罗斯贝加尔湖西边，覆盖范围包括：俄罗斯与蒙古国地区，如图 11 所示。

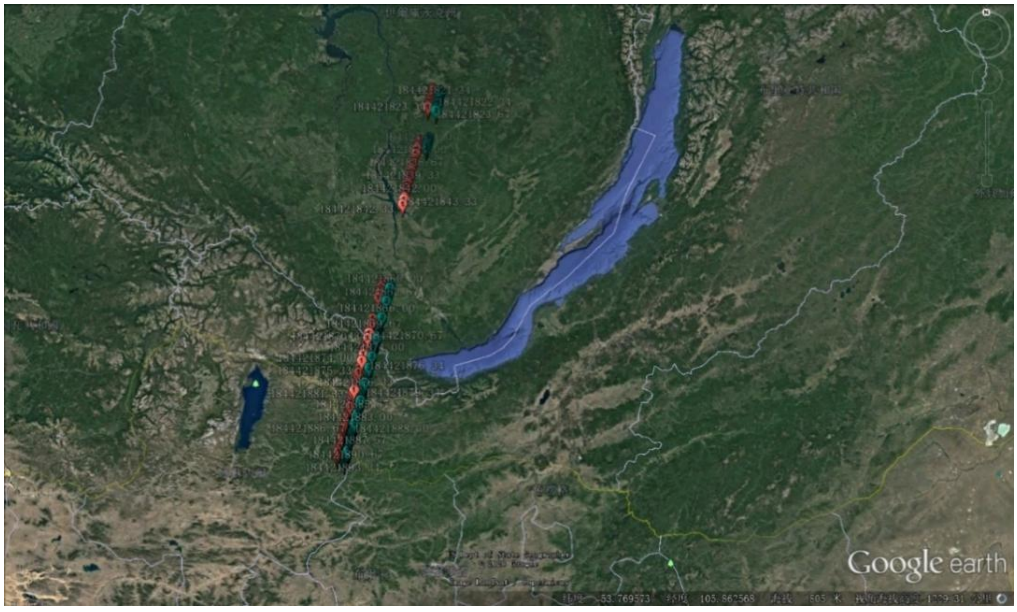


图 11　高分七卫星激光首轨激光点分布图，其中红色点为波束 1，黑蓝色为波束 2

卫星在轨后从第一轨开机至 2020 年 12 月 20 日，高分七卫星激光共开机约为 1300 轨，近 170 万个激光点，其开机时刻激光星下点分布位置较为集中，主要分布在亚洲、欧洲、北美洲，即板北半球中纬度地区。南半球主要在澳大利亚地区开机，其中在南极洲也有数轨激光开机。高分七卫星激光星下点轨迹分布图如图 12 所示。

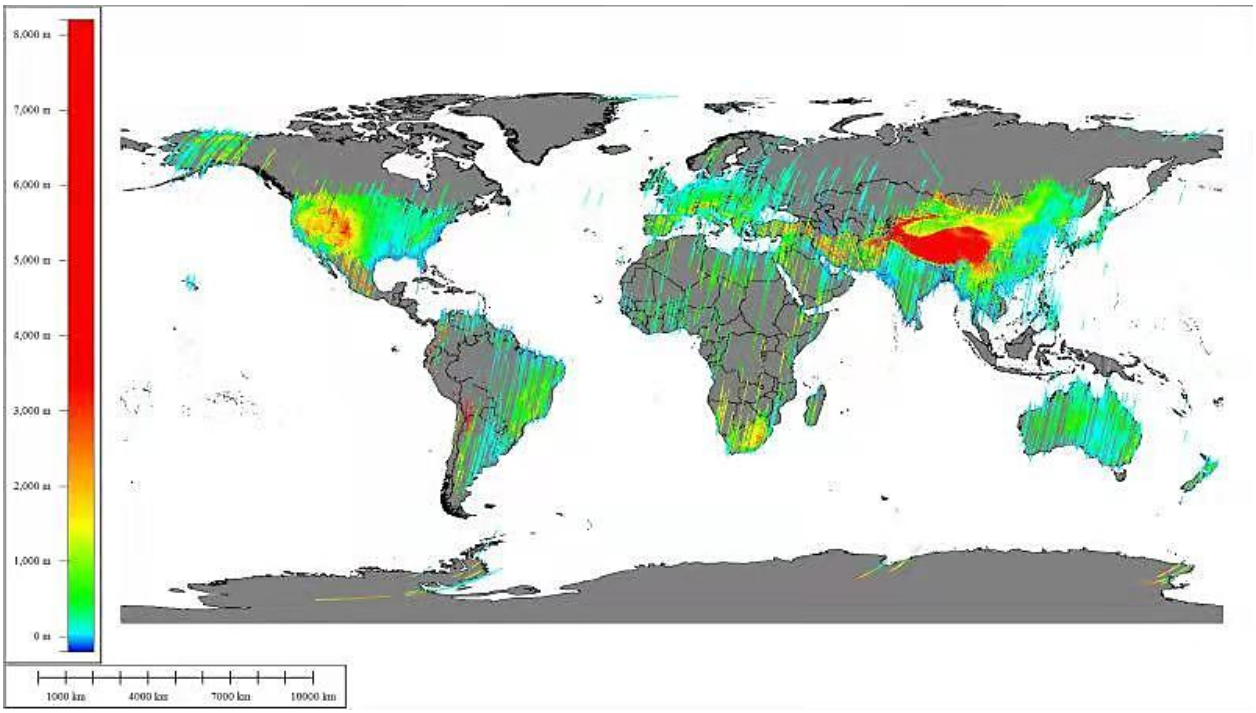


图 12　高分七号卫星激光点数据分布示意图

针对前 1300 轨激光，通过回波波形计算激光测距值，并利用激光测距，结合卫星激光数据处理软件解算出激光地面三维坐标，从而进行分七号卫星激光回波有效性分析。针对波束 1 与波束 2 分别统计结果如表 9 所示。

表 9　高分七号卫星激光前 412 轨激光数据有效性分析

波束	总点数	有回波点数	无回波点数	回波有效比例
波束1	848865	347788	501077	59%
波束2	848865	381632	467233	55%
合计	1697730	729420	968310	57%

综上，可看出高分七号卫星整体激光回波有效率约为 57%；其中波束 1 回波有效率为 59%，波束 2 回波有效率为 55%。截至 2021 年 9 月，开机近 240 万次，共收到 2400 余轨激光数据，经处理后得到 138 万个激光点。

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

目前，国内外并无关于对地观测卫星激光测高数据处理的相关标准。本标准编制过程既考虑了现有国家标准和行业标准规范，也考虑了我国卫星激光测

高产品应用需求，引用的相关标准和资料包括：

CH/T 8024-2011　机载激光雷达数据获取技术规范

CH/T xxxx-xxxx　对地观测卫星激光几何检校技术规范

CH/T xxxx-xxxx　对地观测卫星激光测高数据产品

五、与现行法规、标准的关系

本标准与现行法律、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。发挥本标准对对地观测卫星线性体制激光测高初级或标准产品生产的技术支撑作用，建议今后相关国家标准、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