

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

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 数据源 2

 5.4 辅助参数 2

 5.5 处理精度要求 2

6 处理过程 2

 6.1 技术流程 2

 6.2 数据准备 3

 6.3 参数准备 4

 6.4 数据预处理 4

 6.5 激光几何定位 4

 6.6 激光足印影像处理 8

7 质量控制和结果记录 9

 7.1 质量控制 9

 7.2 结果记录 9

8 成果整理与资料归档 9

 8.1 成果整理 9

 8.2 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。

GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收

CH/T 8024 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 术语和定义

CH/T 8024、CH/T XXXX-XXXX 《对地观测卫星激光测高几何检校技术规范》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

激光渡越时间 laser transit time

激光从出光点至接收点的传输时间。

3.2

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。

3.3

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。

3.4

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。

4 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)

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。

5.2 时间系统

5.2.1 时间系统为 CST。

5.2.2 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: 累积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 数据源

5.3.1 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。

5.3.2 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。

5.3.3 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。

5.3.4 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。

5.3.5 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。

5.3.6 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。

5.4 辅助参数

5.4.1 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。

5.4.2 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。

5.4.3 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。

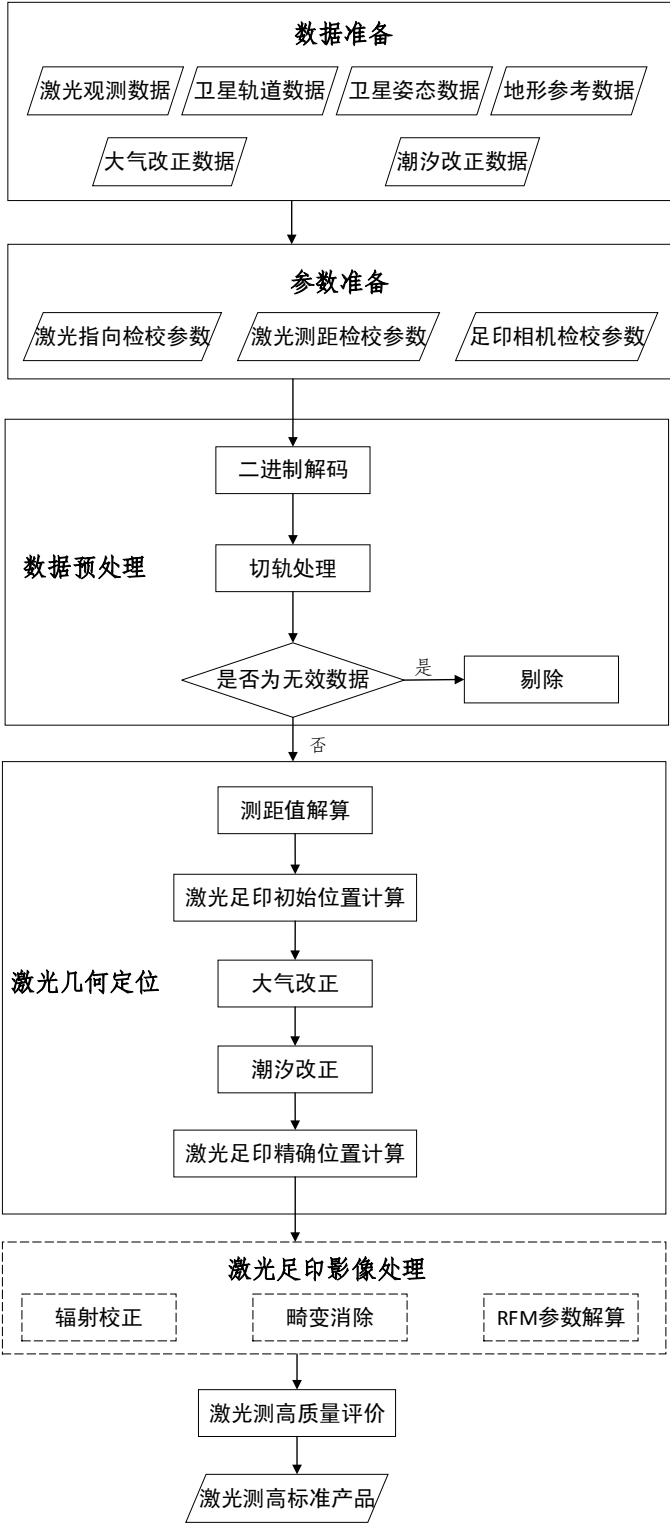
5.5 处理精度要求

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。

6 处理过程

6.1 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

6.2 数据准备

按照 5.3 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。

6.3 参数准备

按照 5.4 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。

6.4 数据预处理

6.4.1 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。

6.4.2 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

6.4.3 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

6.5 激光几何定位

6.5.1 测距值解算

6.5.1.1 阈值探测模式

阈值探测模式下的测距值解算方法如下：

- 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的前沿所在时刻的时间差值换算得到激光测距值；
- 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。

6.5.1.2 全波形探测模式

6.5.1.2.1 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：

- 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大于背景噪声阈值；
- 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 $FWHM/\sqrt{8 \cdot \ln 2}$ ；
- 高斯分量个数不超过最大个数限制（一般取6，最大不超过8）。

6.5.1.2.2 波形预处理

对原始回波波形进行预处理以实现去噪，波形预处理方法如下：

- 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} 为整个回波波形振幅值的平均值，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} ；
- 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；
- 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；
- 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原始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。

6.5.1.2.3 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：

- 应对平滑去噪后回波波形中所有振幅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；
- 根据高斯混合模型，将高斯分量初始值作为输入，通过迭代优化对原始回波波形进行拟合，拟合过程中高斯分量应满足6.5.1.2.1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；
- 按照a)和b)的规定对发射波形进行处理，但不需要满足6.5.1.2.1的要求，得到发射波形中高斯分量的特征参数；
- 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；
- 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；
- 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)。

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

式中：

$\omega(t)$ ——全波形在 t 时刻的振幅；

t ——时间；

ε ——原始波形的背景噪声；

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。

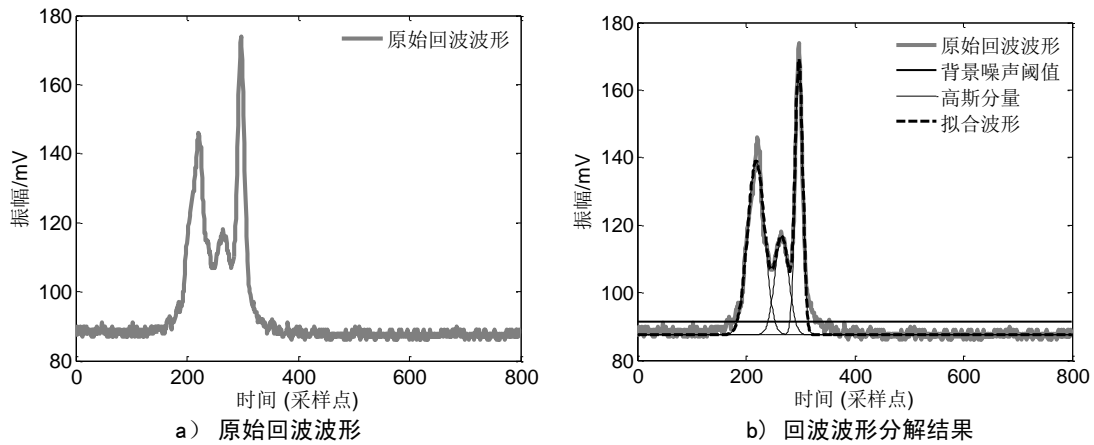


图2 回波波形分解与特征参数提取处理样例

6.5.2 大气改正

卫星激光测高大气改正见公式(2)。

$$\rho_1 = \Delta\rho + \rho_0 + d\rho_{atm} \dots\dots\dots(2)$$

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。

6.5.3 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)。

$$\rho_2 = \rho_1 \begin{pmatrix} \cos(\beta + \Delta\beta) \cos(\alpha + \Delta\alpha) \\ \cos(\beta + \Delta\beta) \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ \sin(\beta + \Delta\beta) \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

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。

6.5.4 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)。

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

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。

6.5.5 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)。

$$\rho_4 = R_{BODY}^{ICRF} \rho_3 \dots\dots\dots(5)$$

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。

6.5.6 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)。

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

式中：

ρ_5 ——ICRF 的激光测距向量；

R_{ICRF}^{ITRF} ——ICRF向ITRF的转换矩阵。

6.5.7 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)。

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

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。

6.5.8 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。

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

6.5.9 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 $\arctan\left(\frac{Z_{spot}}{\sqrt{(X_{spot}^2 + Y_{spot}^2)}}$ ，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。

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

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

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

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

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 ——卯西圈曲率半径;

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。

6.5.10 潮汐改正

激光测高潮汐改正见公式(13)。

$$H_{spot} = H_{spot_l} - d\rho_{tides} \dots\dots\dots (13)$$

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。

6.6 激光足印影像处理

6.6.1 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:

- 读取实验室标定的辐射检校系数;
- 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;
- 生成辐射校正后的激光足印影像。

6.6.2 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:

- 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;
- 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;
- 根据坐标映射关系, 重采样生成无畸变激光足印影像。

6.6.3 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:

- 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;
- 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。

7 质量控制和结果记录

7.1 质量控制

7.1.1 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。

7.1.2 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。

7.2 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。

8 成果整理与资料归档

8.1 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。

8.2 资料归档

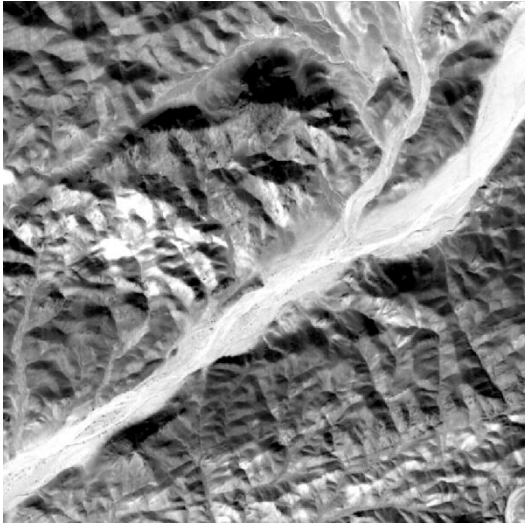
归档介质为光盘、磁带或硬盘等，归档资料包括：

- 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	mV	149 160 167 176 180 188 187 187 183 181 173 ...
回波波形数据	mV	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。

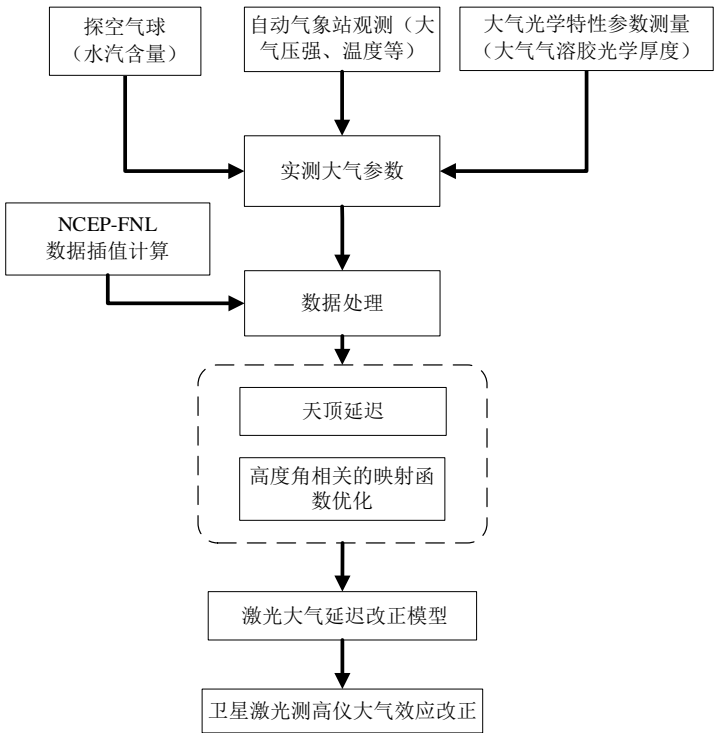
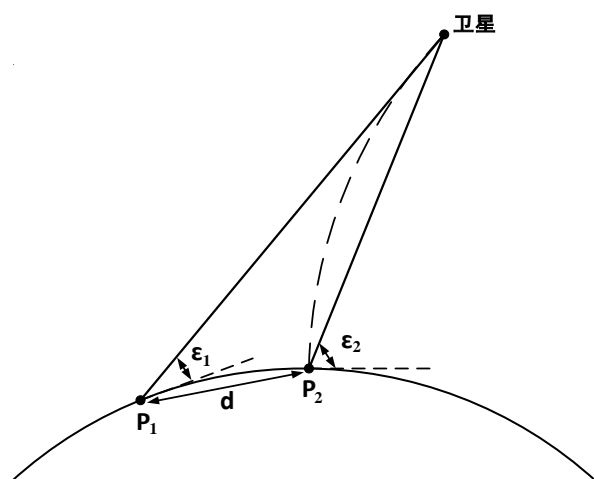


图 D.1 基于同步观测的激光测高仪大气效应改正技术流程

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)。

$$\Delta L = \int_{S_{atm}} n ds - \int_{S_{vac}} d \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

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)。

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

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）。

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

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；

P_{surf} ——地表压强；

ΔL_W ——湿大气改正项；

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

P_W ——大气可降水量；

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

其中 k_1 、 k_2 值与卫星载荷发射激光信号频率相关，见公式（D.4）。

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

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)。

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

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)。

$$\eta = \sum f_i \square_i \cos(\sigma_i t + v_{0i} + u_i - g_i) \dots\dots\dots (E.1)$$

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)。

$$v_0 = \mu_1 \tau + \mu_2 s' + \mu_3 \square' + \mu_4 p + \mu_5 N' + \mu_6 p' + \mu_0 \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

v_0 ——分潮初相位计算结果;

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_0$ ——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)。

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

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:

- 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;
- 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;
- 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;
- 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)。

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

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

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:

- 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;
- 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;
- 将步骤 b)的各项结果相加,获得潮汐改正三个方向上的具体值;
- 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)。

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

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)。

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

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)。

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

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 t_2 ,见公式 (E.9)。

$$S_r = \square_2 \frac{\nabla V}{g}, S_\theta = t_2 \partial \theta \nabla V, S_\lambda = \frac{t_2}{g} \frac{1}{\sin \theta} \partial \lambda \nabla V \dots\dots\dots (E.9)$$

式中:

S_r 、 S_θ 、 S_λ ——分别是径向、经向和纬向极潮值;

\square_2 、 t_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)。

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

IERS 各版本给出了不同平均极移计算方法。
