doi: 10.6046/zrzyyg.2022239

引用格式:娄燕寒,廖静娟,陈嘉明. Sentinel – 3A 卫星测高数据监测长江中下游河流水位变化[J]. 自然资源遥感,2023,35 (3):221 – 229. (Lou Y H, Liao J J, Chen J M. Monitoring water level changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River using Sentinel – 3A satellite altimetry data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3):221 – 229.)

Sentinel - 3A 卫星测高数据监测长江中下游河流水位变化

娄燕寒^{1,2,3},廖静娟^{1,2},陈嘉明^{1,4}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室,北京 100094; 2. 可持续发展大数据 国际研究中心,北京 100094; 3. 中国科学院大学,北京 100049; 4. 波恩大学

大地测量学和地理信息研究所,波恩 53115,德国)

摘要:河流水位是了解水循环和水资源变化状况的重要参数。新型雷达高度计技术是提取河流水位变化的有利工具。为了验证新型雷达高度计 Sentinel – 3A/SRAL 数据监测河流水位的能力,提高其提取河流水位变化的精度,以 长江中下游干流为研究对象,利用重心偏移法、阈值主波峰重跟踪算法(阈值取 50% 和 80%)、重心主波形重跟踪 算法和多回波波峰一致重跟踪算法对 Sentinel – 3A/SRAL L2 级数据进行波形重跟踪,提取了长江中下游干流各区 域 2016—2021 年间河流水位,并对比不同算法获取水位的精度,得到最优重跟踪算法,从而提取了 12 条轨道过境 区域的水位变化信息,分析了水位变化规律。结果表明,重心偏移法算法是提取河流水位精度最好的重跟踪算法, 各区域虚拟水位与实测水位相比具有最大相关系数(达 0.968)、最小均方根误差(达 0.680 m); 2016—2021 年间 长江中下游干流水位总体呈上升趋势,年内水位变化呈现明显的季节性。

关键词: Sentinel - 3A; 波形分类; 波形重跟踪; 长江; 水位变化

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097 - 034X(2023)03 - 0221 - 09

0 引言

内陆水系是人类赖以生存的重要淡水资源。河流和水库中的水是全球饮用水、农业灌溉和工业用水的主要来源^[1]。监测全球河流、湖泊和水库的水位对于更好地了解气候变化下的水文过程至关重要^[2]。

卫星雷达测高技术是一种用于确定海洋大地水 准面和估算海面地形变化的空间技术^[3]。星载雷 达测高技术自 2010 年以来不断创新,在 CryoSat - 2 发射之前,卫星雷达测量都是低分辨率模式(low resolution mode,LRM),CryoSat - 2 是首个使用合成 孔径雷达(synthetic aperture Radar,SAR)模式的测 高卫星^[1],广泛应用于陆地水体,尤其是湖泊水位 年际变化分析。Sentinel - 3 是首个在全球范围内使 用 SAR 模式和开环跟踪模式的测高卫星^[4],与 Cryo-Sat - 2 相比受地形影响更小,数据质量更高,并具有 良好的全球覆盖和较高的时空分辨率,因此在监测 内陆水体水位方面具有巨大潜力^[1]。

当雷达高度计监测河流水位时,其足迹同时触 及水面和陆地。由于水深较浅和河流周围环境的影 响,回波波形噪声较大且常被污染,导致高度计至被 测水面的距离不准确^[5],因此,需要对波形数据进 行重跟踪处理以获取距离改正值,从而提高水位提 取的精度^[6-11]。目前,针对不同的回波波形已经开 发了多种重跟踪算法进行重跟踪处理,算法主要有 全波形重跟踪算法和基于子波形重跟踪算法2类。 全波形重跟踪算法又称为物理重跟踪算法,包括重 心偏移法(off - center of gravity method, OCOG)^[12]、 阈值法^[13]、β参数法^[14]和 Ice -1 算法^[15]等,适用 于几乎所有雷达高度计数据,对冰面波形(单峰波 形)表现出较高的精度^[16],适用于回波噪声小且地 形平坦的水体,如大型湖泊、宽大河流。基于子波形 重跟踪算法又称经验重跟踪算法,包括改进阈值 法^[17]、狭窄主波峰重跟踪^[11]、多回波波峰一致重跟踪 (the multiple waveform perstistent peak, MWaPP)^[18]和 50% 阈值法结合 Ice - 1 重跟踪算法(50% threshold and Ice -1 combined, TIC)^[19]等,同样适用于几 平所有雷达高度计数据,对复杂多波峰波形表现

收稿日期: 2022-06-10;修订日期: 2022-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目"合成孔径干涉雷达高度计数据湖泊水位高精度反演模型研究"(编号:41871256)资助。 第一作者:娄燕寒(1999-),女,硕士研究生,研究方向为微波遥感(资源与环境)。Email: louyanhan20@ mails. ucas. ac. cn。

通信作者:廖静娟(1966 -),女,研究员,研究方向为微波遥感。Email: liaojj@ radi. ac. cn。

出较高的精度,多用于处理反射面复杂的内陆 水体。

在本研究中,以长江中下游流域为研究区,利用 Sentinel-3A/SRAL L2级波形数据开展长江中下游 干流的水位提取。为了对比全波形重跟踪算法和子 波形重跟踪算法在提取河流水位方面的适用性,本 研究选取了全波形重跟踪算法中的 OCOG 法及子 波形重跟踪算法中的主波峰峰值重跟踪算法(narrow primary peak retracker, NPPR)(包括阈值主波峰 重跟踪算法(narrow primary peak threshold retracking, NPPTR)(阈值取 50% 和 80%)、重心主波形重 跟踪算法(narrow primary peak OCOG retracker, NP-POR)、MWaPP 算法 5 种重跟踪算法进行对比,分别 对 Sentinel - 3A/SRAL L2 级波形数据进行波形重跟 踪处理,并利用水位站点实测数据进行精度验证,选 择5种算法中适用于河流水位提取的最优重跟踪算 法,提取长江中下游干流2016—2021年的水位变化 信息,从而分析水位变化规律。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

本研究选择长江中下游区域作为研究区,其地 理范围为 E111°~123°,N27°~34°,干流河道自宜 昌至河口全长约1 893 km^[20],地跨湖北、湖南、江 西、安徽、江苏、浙江和上海等7个省级行政区。长 江中下游流域地形平坦,面积约80万 km²,以长江 为中心的水系发达支流众多,如汉江(1532 km)、湘 江(817 km)、沅江(993 km)以及赣江(758 km)等。 长江中下游位于中低纬度地区,属亚热带季风气候, 全年温暖湿润,年均气温为14~18℃,降水量在 1000~1500 mm 左右。在本研究中,主要以长江干 流为主要研究对象,开展河流水位的提取,研究区概 况如图1所示(其中红色字体为轨道编号)。



SI 研究区域の及留区同長け数据復三小息度 Fig. 1 Overview of the study area and data coverage of Radar altimeter

1.2 数据源

1.2.1 雷达高度计数据

本研究使用的雷达高度计数据为 Sentinel – 3A/SRAL L2 级波形数据(下载地址: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)。Sentinel – 3A 测 高卫星由欧洲空间局(European Space Agency,ESA) 于 2016 年 2 月 16 日发射升空,搭载 SRAL 高度计, 轨道高度为 814.5 km,采用 Ku 波段和 C 波段,空间 分辨率为 300 m,重访周期为 27 d,足迹点直径为 2 (0.25)km。本文选取该高度计 2016—2021 年 038, 089,095,146,152,203,260,266,309,323,360,366 这 12 条过境长江中下游地区的轨道,开展长江干流 水位提取。长江干流与过境的高度计形成的水位虚 拟站如图 1 所示,共有 12 个虚拟水文站点,分别对 应 12 条过境轨道。

1.2.2 辅助数据

本研究获取了长江中下游地区水文站点水位实 测数据,用于验证高度计提取河流水位的精度。获 取的水位实测数据包括大通、当涂、汉口、湖口、九 江、螺山、马家潭、沙市、西河驿及枝城水文站点 2016—2021年单天实测水位数据,来源为长江实测 水文站点及千里眼水雨情查询系统(http://113. 57.190.228;8001/#!/web/Report/RiverReport)。

此外,本研究还获取了中国流域片及长江中下 游流域掩模数据(下载地址: https://download.csdn.net)用于提取长江中下游地区干流的边界范围。

2 研究方法

本研究采用的技术流程如图 2 所示: ①利用中 国流域片及长江中下游流域掩模数据提取长江中下 游干流边界; ②利用 Sentinel - 3A 轨道数据提取过 境轨道落在长江干流上的水位观测点(虚拟水位 站); ③针对获取的水位观测点进行目视解译, 剔除 明显的水位异常波形数据;④采用 OCOG 算法、线 性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)和朴 素贝叶斯分类器^[21]相结合的方法分别对波形进行 分类,去除多波峰波形的噪声; ⑤采用 OCOG, NP-POR, NPPTR05, NPPTR08 及 MWaPP 这 5 种波形重 跟踪算法对波形分类后优选的 Sentinel - 3A 波形数 据进行重跟踪,辅以大气延迟改正、固体潮改正、极 潮改正及大地水准面至椭球体改正以获取沿轨观测 水位: ⑥采用高斯柯西混合分布函数对轨道单点噪 声进行去噪处理,求解单日沿轨均水位,开展水位提 取精度验证,对比分析5种波形重跟踪算法提取水 位的精度,优选出最优重跟踪算法;⑦利用优选出 的最优重跟踪算法提取河流水位,构建河流水位变 化时间序列,探讨长江中下游河流水位变化趋势,分 析水位变化特征。



Fig. 2 Flow chart of the study

2.1 波形分类

当雷达高度计监测水位时,其足迹同时触及水 面和陆地。长江中下游受季节因素、周边环境及部 分河道较为狭窄等的影响,部分近岸回波波形易受 到污染^[22-23]。本文获取的高度计回波数据如图 3 所示,回波波形多以似海洋波形和冰面波形为主,多 波峰波形中存在少量噪声波形。因此,需要通过波 形优选剔除噪声数据,提取质量较好的观测波形进 行后续的波形重跟踪改正,从而得到有效的河流年 均水位。



图 5 画 还 同 度 时 凹 放 成 形 Fig. 3 Waveform of Radar altimeter

首先,基于统计关系选择 K 均值聚类法,利用

OCOG 算法参数(振幅 A、宽度 W、波形重心位置 G_{cog})作为特征值对高度计波形数据进行无监督分 类,将回波波形分为似海洋波形、冰面波形、多波峰 波形,计算公式分别为:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2}}, \qquad (1)$$

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2\right)^2}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4} , \qquad (2)$$

$$G_{\rm cog} = \frac{\sum_{i=1+n}^{N-n} iP_i^2}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2} , \qquad (3)$$

式中: *P*_i 为回波波形功率; *N* 为波门数量; *n* 为波形 起始时刻和结束时刻剔除的偏差波形的数量。

并利用前人提出的 LDA 与朴素贝叶斯分类器 相结合的方法针对多波峰波形进行波形优选,去除 噪声轨迹。具体过程如下:

1)选择分类特征,包括 OCOG 算法的基本参数 (振幅 A、宽度 W、波形重心位置 G_{cog})、峰值度 Peakness、归一化回波功率均值 P_{mean} 、波形峰度 Kurt、波形偏度 Skew、左脉冲峰值 LTPP、右脉冲峰 值 ETPP。

2) 计算投影后的样本集 X_{p} , 首先计算类内散 度矩阵 S_{w} 和类间散度矩阵 S_{b} 为:

$$S_{w} = \sum_{x \in T_{0}} (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{0}}) (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{0}})^{\mathrm{T}} + \sum_{x \in T_{1}} (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{1}}) (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{1}})^{\mathrm{T}} , \qquad (4)$$

 $S_{b} = (\vec{\mu}_{0} - \vec{\mu}_{1}) (\vec{\mu}_{0} - \vec{\mu}_{1})^{T} , \qquad (5)$ $\vec{x} = [x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(n)}]^{T}$ $\vec{x} = [x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(n)}]^{T}$

$$J = \frac{\overrightarrow{w}^{\mathrm{T}} S_{\mathrm{b}} \overrightarrow{w}}{\overrightarrow{w}^{\mathrm{T}} S_{\mathrm{w}} \overrightarrow{w}} = \frac{\overrightarrow{w}^{\mathrm{T}} (\overrightarrow{\mu_{0}} - \overrightarrow{\mu_{1}}) (\overrightarrow{\mu_{0}} - \overrightarrow{\mu_{1}})^{\mathrm{T}} \overrightarrow{w}}{\overrightarrow{w}^{\mathrm{T}} [\sum_{x \in T_{0}} (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{0}}) (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{0}})^{\mathrm{T}} + \sum_{x \in T_{1}} (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{1}}) (\overrightarrow{x} - \overrightarrow{\mu_{1}})^{\mathrm{T}}] \overrightarrow{w}} \circ$$
(6)

继而对目标函数 J 求解最优化问题 $\vec{w}^* = \arg \max_{w}(J)$,即可获得转换向量 $\vec{w} = S_w^{-1}(\mu_0 - \mu_1)$ 。 将 \vec{w} 带入 $X_p = \vec{w}^T \vec{x}$ 得到投影后的新样本集 X_p 。 3) 波形分类, 根据朴素贝叶斯分类原理, 对于 待分类波形 $a = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, $z_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 为分类特征, 若 P($T_k \mid a$) = max { P($T_0 \mid a$), P($T_1 \mid a$) },则 $a \in T_k$, 其中 P($T_0 \mid a$) 和 P($T_1 \mid a$) 计算 公式分别为:

$$P(T_{j} \mid a) = \frac{P(a \mid T_{j}) P(T_{j})}{P(a)} (j = 0, 1) , \quad (7)$$

$$P(a \mid T_{j}) P(T_{j}) = P(z_{1} \mid T_{j}) P(z_{2} \mid T_{j}) \cdots P(z_{m} \mid T_{j}) =$$

$$P(T_{j}) \prod_{i=1}^{m} P(z_{i} \mid T_{j}) _{\circ} \qquad (8)$$

2.2 波形重跟踪

为了获取更加精确的河流水位,必须对分类后 的波形进行重跟踪,重新计算波形前缘中点,根据其 与原定中点的差值,获得距离改正值,从而对高度计 到被测水面的距离进行改正。本文选取2类共5种 重跟踪算法进行波形重跟踪处理,具体如下:

1) OCOG 算法^[12]。其基本思想是找到每个返回波形的重心,通过计算由波形值确定的矩形的重心和面积来确定波形的前缘中点,以此得到距离改正,从而实现对波形的重跟踪^[24]。

2) MWaPP 算法。假设沿轨所有观测点的波形 中,高度计至星下点水体的距离值相同,利用线性内 插得到1 cm 高度间隔的插值波形,取相邻4 个内插 波形的平均值以削弱陆地噪声信号污染,对每一个 平均波形提取主波峰在内的含7 个波门的子波形并 计算重心偏离振幅,首次超过 80% 振幅的位置即重 跟踪点。

3) NPPR 算法。假设主峰子波形为水面信号反 射峰值,利用回波波形的起始阈值和终点阈值提取 主波峰。NPPOR 采用子波形重心计算方法获取重 跟踪点,与 OCOG 算法类似^[12]; NPPTRO5 算法及 NPPTR08 算法,以 OCOG 算法为计算基础,根据主 波峰子波形的波门数、回波功率等变量给出 50% 及 80% 的阈值后去重跟踪点,具体的阈值选取因情况 而异^[18,25-26]。

不同的重跟踪算法获得重定点位置对比如图 4 所示,可以看出 5 种重跟踪算法(OCOG, MWaPP, NPPOR, NPPTR05 和 NPPTR08)均能对 Sentinel – 3A/SRAL 20 Hz 波形数据进行重跟踪处理。当波形 中水面前缘存在较大噪声时, OCOG 和 MWaPP 算法 的性能会受到较大的影响, 反之当波形中水面后缘 存在较大噪声时, NPPOR, NPPTR05 和 NPPTR08 算 法性能会受到较大影响。





2.3 卫星测高数据获取河流水位

对 Sentinel - 3A/SRAL 20 Hz 的 L2 级波形数据 用 2.2 节重跟踪算法获得改正后的观测距离^[27],获 得沿轨观测水位为:

$$H = H_{Alt} - R - H_{Geoid} - \Delta Cor \quad , \qquad (9)$$

式中: H为沿轨观测水位; H_{Ah} 为 Sentinel – 3A 卫星 的高度; R为重跟踪改正后的观测距离; H_{Geoid} 为大 地水准面高程; ΔCor 为各误差项修正值。 ΔCor 主 要包含 Sentinel – 3A 测高数据中自带的电离层误差 改正、干、湿对流层误差改正、潮汐误差改正、星下点 偏离误差改正5部分。

2.4 水位高程基准转换

Sentinel – 3A 数据运用了 WGS84 参考系统,而 长江中下游水文站点的实测水位数据采用了不同的 基准面,如枝城水文站实测水位基于吴淞(扬委)基 准面,西河驿水文站实测水位基于黄海水准面等。 为进行 2 种数据的对比分析,在进行水位精度验证 时要进行高程系统的转换。为将高度计数据与实测 数据变换到同一水平上,要以实测数据为基准,将高 度计数据减去两者之间的垂直偏差。然后,计算高 度计提取的长江中下游各轨道水位与对应实测水位 的相关系数 r 与均方根误差 RMSE,对比不同波形 重跟踪方法提取河流水位变化的精度。

3 结果与分析

3.1 提取水位的精度分析

Sentinel - 3A/SRAL L2 级数据经 5 种重跟踪算 法处理后获得长江中下游地区 2016—2021 年的干 流水位,水位提取结果与实测水位数据的相关性示 意图如图 5 所示(以 OCOG 算法为例)。





由于拟合直线斜率及决定系数 R² 直接反映了 高度计数据与实测数据的符合程度,斜率与 R² 越接 近于1,证明2种数据相关性越强。因此,综合考虑 高度计12条轨道获取的水位与对应实测水位的拟 合情况发现:095,203及266这3条轨道表现相对 一般,具体表现在095轨道与203轨道过境区域2 种数据的拟合直线斜率均小于0.8,095轨道与266 轨道2种数据的决定系数 R²均小于0.70;其余9 条轨道的高度计获取水位与实测水位均表现出较好 的相关性,具体表现在各拟合直线斜率介于0.826~ 1.042之间,各 R²介于0.749~0.936之间。其中 260轨道表现最好,高度计获取水位与实测水位的 拟合直线斜率为0.970,决定系数 R²为0.936,展现

出较强的相关性。

表1为不同重跟踪算法在不同轨道的水位提取 结果与实测数据的具体对比统计数据,包括均方根 误差 RMSE、相关系数r以及最终提取的有效单天 水位个数d。实验结果表明,5种波形重跟踪算法 均适用于提取河流水位,且与其他几种重跟踪算法 相比,基于全波形的传统 OCOG 重跟踪算法提取的 河流水位效果较好。OCOG 算法更适用于提取河流 水位具体表现为:在保证提取的单天水位个数的前 提下,12条过境长江中下游干流的 Sentinel – 3A 轨 道中有10条轨道(038,089,095,146,152,203,260, 266,309,360)水位提取结果的 RMSE 较小,其中360 轨道高度计获取水位与实测水位的 RMSE 最小,达到 0.680 m; 9 条轨道(038,146,152,203,260,266, 309,360,366)水位提取结果的相关系数 r 较高,其

中 260 轨道高度计获取水位与实测水位的相关系数 r 值最大,达到 0.968。

表 1 不同重跟踪算法得到的 Sentinel – 3A/SRAL 高度计水位与实测水位比较结果

Tab.1 Comparison of Sentinel - 3A/SRAL altimeter water levels obtained by different

re – tracking algorithms and in – situ water level

算法	指标	038	089	095	146	152	203	260	266	309	323	360	366
MWaPP	<i>RMSE</i> /m	1.545	1.524	1.708	1.695	1.256	1.338	0.872	1.601	1.246	0.553	1.074	1.681
	r	0.897	0.915	0.631	0.818	0.937	0.627	0.965	0.686	0.930	0.953	0.901	0.864
	d	54	51	42	29	70	45	51	52	60	57	58	53
	<i>RMSE /</i> m	1.442	1.439	1.630	1.638	1.205	1.389	0.859	1.427	1.261	0.719	1.105	1.475
NPPOR	r	0.924	0.902	0.707	0.882	0.944	0.662	0.965	0.769	0.929	0.937	0.886	0.916
	d	60	43	35	34	70	45	47	57	58	58	60	51
	<i>RMSE /</i> m	1.462	1.459	1.730	1.616	1.223	1.605	0.867	1.407	1.284	0.610	1.028	1.630
NPPTR05	r	0.921	0.892	0.642	0.892	0.944	0.561	0.963	0.771	0.930	0.950	0.892	0.873
	d	60	46	38	35	73	49	49	57	59	58	59	58
NPPTR08	<i>RMSE /</i> m	1.333	1.667	1.714	1.844	1.202	1.572	0.864	1.476	1.255	0.676	1.048	1.579
	r	0.934	0.916	0.686	0.868	0.944	0.578	0.964	0.734	0.932	0.930	0.890	0.880
	d	58	50	37	38	65	45	48	55	59	57	60	54
OCOG	<i>RMSE /</i> m	1.145	1.409	1.469	1.469	1.201	1.197	0.841	1.158	1.126	0.881	0.680	1.565
	r	0.952	0.866	0.667	0.891	0.941	0.840	0.968	0.824	0.940	0.893	0.941	0.891
	d	61	45	43	47	63	45	45	57	58	58	60	47

与 MWaPP, NPPOR, NPPTR05 和 NPPTR08 只利 用主波峰子波形的重跟踪算法相比, 传统的基于全 波形的 OCOG 重跟踪算法在保证单天水位个数的 前提下, 提取的水位数据相关性更好, *RMSE* 更小, 水位精度更高。原因可能是长江中下游干流河面较 宽, 周围地形平坦, 获取的高度计数据多为冰面波 形, 噪声波形较少质量较高(如图 3 所示)。且本文 经波形分类与波形优选已将高度计数据中的噪声波 形剔除。针对数据质量较高的波形数据, 利用全波 形数据的传统重跟踪算法获得的重定点比利用主波 峰子波形数据获得的重定点更为准确, 更加靠近实 际的波形前缘中点(5 种算法重定点位置对比见图 4)。因此利用了全波形数据的传统 OCOG 重跟踪 算法提取的河流水位精度更高,与实测水位的相关 性更好。

3.2 长江中下游干流水位变化分析

各轨道过境长江中下游干流的虚拟水位站点位 置及 2016—2021 年间最高最低水位情况如表 2 所 示。结果显示各轨道最高最低水位与其虚拟水位站 点位置密切相关,大致呈现自西向东依次递减的趋 势,且最高水位的递减趋势更为明显;各轨道过境 区域的最高水位基本出现在每年的 6—8 月,最低水 位基本出现在每年的 11 月—次年 4 月。

表2 各語	癿道虚拟水位站	点位置及2	2016—2021	年最高最低	水位情况
-------	---------	-------	-----------	-------	------

Tab. 2	Locations of virtual	water level stations	of each track a	and the highest an	d lowest water	levels from 2016 to 2021
--------	----------------------	----------------------	-----------------	--------------------	----------------	--------------------------

			-		
轨道编号	虚拟水位站点位置	最高水位/m	最高水位日期	最低水位/m	最低水位日期
038	E114°058′, N30°253′	28.360	2020 - 06 - 28	13.530	2019 - 11 - 25
089	E113°333', N29°664'	33.350	2020 - 06 - 05	18.811	2017 - 11 - 30
095	E114°947′,N30°416′	26.175	2020 - 06 - 05	19.210	2019 - 08 - 13
146	E114°547′, N30°666′	28.190	2016 - 07 - 09	13.600	2019 - 12 - 03
152	E116°063', N29°789'	21.659	2016 - 07 - 09	8.420	2019 - 12 - 03
203	E115°323',N30°078'	24.328	2020 - 06 - 13	18.401	2016 - 03 - 27
260	E116°188', N29°827'	22.495	2020 - 07 - 14	8.358	2019 - 12 - 11
266	E117°654′,N30°779′	16.190	2020 - 07 - 14	4.620	2019 - 12 - 11
309	E112°216', N30°178'	42.111	2020 - 07 - 17	30.198	2019 - 11 - 25
323	E118°393', N31°556'	12.140	2020 - 07 - 18	3.460	2019 - 12 - 15
360	E111°652′,N30°353′	48.289	2020 - 08 - 17	37.929	2018 - 12 - 05
366	E113°294', N29°626'	33.408	2020 - 07 - 21	18.970	2019 - 11 - 21

本文使用 OCOG 重跟踪算法,对 Sentinel - 3A/ SRAL L2 级波形数据进行全波形重跟踪,提取了过 境长江中下游干流的 12 条 Sentinel - 3A 轨道过境 区域2016—2021年的河流水位。提取的单天水位 结果与实测水位数据进行0均值化处理,相对水位 大于0m的观测点位水位值即1a中的水位高值, 小于0 m 的观测点位水位值即1 a 中的水位低值。 形成的长江中下游干流 2016—2021 年各区域水位

6

变化时间序列(相对水位)如图6所示。





Fig. 6 Time series of water level changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2016 to 2021

结合图 5-6 可以看出:①095,203 和 266 轨道 的过境区域2种水位数据的对比情况不太理想,符 合 3.1 节中针对高度计数据与实测数据的相关性分 析。原因可能是266轨道过境区域水位数据受周围 房屋建筑物影响较大;095 和 203 轨道这 2 个区域 虚拟水位点与获取实测数据的水文站点距离较远 (如图1所示),实际间隔距离大于20000m,实测 数据无法准确地反映该区域的实际水位状况。②每 年的 5—10 月长江中下游干流各区域水位相对较

高,其中6-9月水位上升幅度更为明显,这期间主 要为长江中下游地区的汛期,降水量为年降水量的 85%。而每年11月一次年4月长江中下游干流各 区域水位相对较低,这期间为长江中下游地区的非 汛期,降水量很少。③360和309轨道过境区域 2016—2021年间的长江干流水位呈现先下降后上 升的逐年规律性波动变化,河流水位总体呈现上升 趋势; 038, 146, 203, 152, 260, 089, 366, 323 和 266 轨道过境区域的长江干流水位在 2016—2018 年间 呈现逐年下降趋势,2018—2020年间呈现逐年上升 趋势,2021年水位相较于2020年同期水位偏低,河 流水位同样总体呈现上升趋势。

4 结论

星载雷达测高技术在监测内陆水体水位方面潜 力巨大,选取合适的雷达高度计数据及波形重跟踪 算法可以有效提高获取水位的精度。本研究基于 Sentinel – 3A/SRAL 20 Hz 的 L2 级高度计数据进行 了波形分类及波形重跟踪处理,对比了多种重跟踪 算法所得的水位精度,并获取了长江中下游干流 2016—2021年的河流水位变化信息。得出如下主 要结论:

1) Sentinel – 3A/SRAL L2 级卫星测高数据可以 用于提取河流水位,且波形数据质量较高,对波形数 据进行波形分类和波形重跟踪可以有效提高高度计 数据提取河流水位的精度。

2) 对比基于全波形的 OCOG 算法与基于子波 形的 NPPTR05, NPPTR08, NPPOR 及 MWaPP 这 5 种 重跟踪算法,针对长江中下游 12 条 Sentinel – 3A 轨 道的过境区域进行水位提取。传统的 OCOG 重跟 踪算法为最佳算法,与实测水位相比具有最大相关 系数、最小均方根误差。

3)2016—2021 年长江中下游干流水位总体呈 上升趋势,年内水位变化呈现季节性,每年5—10 月 水位相对较高,为汛期,峰值一般出现在6—8 月; 每年11 月—次年4 月水位相对较低,为非汛期,峰 值一般出现在11—12 月左右。

对于河宽不同与周边环境不同的河流,回波波 形的质量不同,即便是同一种重跟踪算法表现也有 所差别,这需要选取不同类型的河流进行对比分析, 探讨适合河流水位提取的最优波形重跟踪算法。另 外,本研究未考虑不同卫星轨道提取水位的差异,以 及实测水位站点与轨道虚拟水位站点的距离对提取 水位精度的影响程度,这也是未来需要进一步开展 的研究。

参考文献(References):

- [1] Gao Q, Makhoul E, Escorihuela M J, et al. Analysis of retrackers' performances and water level retrieval over the Ebro River basin using Sentinel – 3[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6):718.
- Huang Q, Li X D, Han P F, et al. Validation and application of water levels derived from Sentinel 3A for the Brahmaputra River
 [J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62 (10): 1760 1772.
- [3] Detlef S, Anny C. Satellite altimetry over oceans and land surfaces

[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.

- [4] Kittel C M M, Jiang L, Tttrup C, et al. Sentinel 3 Radar altimetry for river monitoring: A catchment – scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel – 3A and Sentinel – 3B[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1):333 – 357.
- [5] 赵云,廖静娟,沈国状,等. 卫星测高数据监测青海湖水位变 化[J]. 遥感学报,2017,21(4):633-644.
 Zhao Y, Liao J J, Shen G Z, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellitealtimetry data[J]. Journal of Remote Sensing,2017,21(4):633-644.
- [6] Hwang C, Guo J Y, Deng X L, et al. Coastal gravity anomalies from retracked geosat/GM altimetry: Improvement, limitation and the role of airborne gravity data[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(4): 204-216.
- Bao L F, Lu Y, Wang Y. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19 (2):195 203.
- [8] Yang L, Lin M S, Liu Q H, et al. A coastal altimetry retracking strategy based on waveform classification and sub – waveform extraction [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33 (24):7806-7819.
- [9] Kleinherenbrink M, Ditmar P G, Lindenbergh R C. Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152:38 - 50.
- [10] Kleinherenbrink M, Lindenbergh R C, Ditmar P G. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking CryoSat SARIn waveforms [J]. Journal of Hydrology, 2015,521:119-131.
- [11] Jain M, Andersen O B, Dall J, et al. Sea surface height determination in the Arctic using CryoSat - 2 SAR data from primary peak empirical retrackers [J]. Advances in Space Research, 2015, 55 (1):40-50.
- [12] Wingham D J, Rapley C G, Griffiths H. New techniques in satellite altimeter tracking systems [C]//Proceedings of IGARSS. IEEE, 1986,86:1339-1344.
- [13] Davis C H. Growth of the Greenland ice sheet: A performance assessment of altimeter retracking algorithms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(5):1108-1116.
- [14] Martin T V, Zwally H J, Brenner A C, et al. Analysis and retracking of continental ice sheet Radar altimeter waveforms [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1983,88(c3):1608 - 1616.
- [15] Biswas N K, Hossain F, Bonnema M, et al. An altimeter height extraction technique for dynamically changing rivers of South and South – East Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 24 – 37.
- [16] 刘 琪,李 琼,魏加华,等. 星载高度计水位提取方法研究进展
 [J]. 南水北调与水利科技,2021,19(2):281-292.
 Liu Q,Li Q,Wei J H, et al. Research progress of water level extraction methods based on satellite altimeter [J]. South to North Transfer and Water Science and Technology,2021,19(2):281-292.
- [17] Lee H, Shum C K, Yi Y, et al. Laurentia crustal motion observed using TOPEX/POSEIDON Radar altimetry over land [J]. Journal of Geodynamics, 2008, 46(3-5):182-193.
- [18] Villadsen H, Deng X, Andersen O B, et al. Improved inland water

levels from SAR altimetry using novel empirical and physical retrackers [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537:234 – 247.

- [19] Huang Q, Long D, Du M, et al. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 211:112 - 28.
- [20] 许全喜,董炳江,张 为.2020 年长江中下游干流河道冲淤变化 特点及分析[J].人民长江,2021,52(12):1-8.
 Xu Q X, Dong B J, Zhang W. Characteristics and analysis of erosion and deposition changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2020 [J]. People's Yangtze River, 2021, 52 (12):1-8.
- [21] 廖静娟,薛 辉,陈嘉明.卫星测高数据监测青藏高原湖泊2010 年—2018 年水位变化[J]. 遥感学报,2020,24(12):1534 – 1547.

Liao J J, Xue H, Chen J M. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(12):1534-1547.

[22] Ayana E K. Validation of Radar altimetry lake level data and it's application in water resource management[D] The Netherlands: International Institute for Geo – Information Science and Earth Observation (ITC), 2007.

- [23] Arabsahebi R, Voosoghi B, Tourian M J. The inflection point retracking algorithm: Improved Jason – 2 sea surface heights in the Strait of Hormuz[J]. Marine Geodesy, 2018, 41(4):331–352.
- [24] 褚永海,李建成,张 燕,等. ENVISAT 测高数据波形重跟踪分析研究[J].大地测量与地球动力学,2005,25(1):76-80. Chu Y H,Li J C,Zhang Y, et al. Research on waveform re - tracking analysis of ENVISAT altimetry data[J]. Geodesy and Geodynamics,2005,25(1):76-80.
- [25] Jiang L, Nielsen K, Andersen O B, et al. CryoSat 2 Radar altimetry for monitoring freshwater resources of China [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 200:125 – 139.
- [26] Xue H, Liao J, Zhao L. A modified empirical retracker for lake level estimation using CryoSat - 2 SAR in data[J]. Water, 2018, 10 (11):1584.
- [27] 莫德丽,赵银军,陈国清,等.基于主波峰的自适应波形重跟踪 算法研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(10):1051-1056.

Mo D L, Zhao Y J, Chen G Q, et al. Research on adaptive waveform re – tracking algorithm based on main wave crest[J]. Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(10):1051–1056.

Monitoring water level changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River using Sentinel – 3A satellite altimetry data

LOU Yanhan^{1,2,3}, LIAO Jingjuan^{1,2}, CHEN Jiaming^{1,4}

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100094, China; 2. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Geodesy and Geoinformation,

University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract: River levels serve as a critical parameter for understanding the changes in water cycles and water resources. An advanced Radar altimeter is a favorable tool for extracting the changes in river levels. This study aims to verify the ability of the Sentinel – 3A/SRAL Radar altimeter to monitor river levels and improve the extraction accuracy of this Radar altimeter. With the main streams in the middle and lower reaches of the Yangtze River as the study area, this study conducted waveform retracking for the Sentinel – 3A/SRAL L2 data using the center – of – gravity offset method, the primary peak threshold retracking algorithm (thresholds: 50% and 80%), the primary waveform centroid retracking algorithm, and the multiple – echo peak consistency retracking algorithm. Then, this study extracted the river levels during 2016—2021 in the study area and obtained the optimal retracking algorithm by comparing the accuracy of different algorithms. Based on the optimal retracking algorithm, this study extracted the water level changes in transit areas of 12 satellite orbits to analyze the water level change patterns. The results show that the center – of – gravity offset method is the optimal retracking algorithm for extracting river levels with the highest accuracy. Compared with the measured water levels, the water levels simulated using the center – of – gravity offset method exhibited the highest correlation coefficient (up to 0.968) and the smallest root mean square error (up to 0.680 m). During 2016—2021, the water levels in the study area generally showed an upward trend, with significant intra – annual seasonal changes.

Keywords: Sentinel - 3A; waveform classification; waveform retracking; Yangtze River; water level change (责任编辑:陈理)