

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法
作者： 单强, 姜卫平, 陈渠森, 刘凯, 张明远, 邹小伟
DOI: 10.13203/j.whugis20240117
收稿日期: 2024-10-14
网络首发日期: 2024-10-16
引用格式: 单强, 姜卫平, 陈渠森, 刘凯, 张明远, 邹小伟. 基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240117>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240117

引用格式：

单强, 姜卫平, 陈渠森, 等. 基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240117 (SHAN Qiang, JIANG Weiping, CHEN Qusen, et al. Multi-station Fusion GNSS-IR Water Level Monitoring Based on Robust Estimation Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240117)

基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法

单强¹ 姜卫平^{1,2} 陈渠森^{1,2} 刘凯¹ 张明远¹ 邹小伟¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北, 武汉, 430079

2 湖北珞珈实验室, 湖北, 武汉, 430079

摘要：全球导航卫星系统干涉反射测量 (Global Navigation Satellite System-Interferometric Reflectometry, GNSS-IR) 技术是一种有效的“遥感水位计”，能够检索海洋、河流、湖泊、水库等在全球参考基准下的水位信息。然而，当测站观测环境复杂、接收卫星信号能力受限时，GNSS-IR 技术可能面临水面反射信号信噪比序列的数量和长度不足的问题，从而导致单一测站水位监测的反演精度降低。为此，本文提出一种基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法，将面向同一水体的所有测站卫星弧段反演点进行联合优化定权，削弱各测站反演离群粗值的影响，提高水位监测模型的鲁棒性和稳定性。为验证融合方法的效果，本文利用山西西龙池抽水蓄能电站上水库 3 个接收不同区域水面反射信号的监测站数据开展了实验。实验结果表明，面对抽蓄电站日变化达 18.7 m 的水位骤升骤降过程，融合水位反演结果与水位计实测数据相关系数高达 0.983，而且多测站融合水位结果精度显著优于单测站水位监测，融合反演结果的相对精度为 0.06，较单个测站监测结果提高了 30% - 70%。

关键词：GNSS 反射测量；水位监测；稳健估计；信噪比

Multi-station Fusion GNSS-IR Water Level Monitoring Based on Robust Estimation Method

SHAN Qiang¹ JIANG Weiping^{1,2} CHEN Qusen^{1,2} LIU Kai¹ ZHANG Mingyuan¹ ZOU Xiaowei¹

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The Global Navigation Satellite System-Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) technique is an effective "remote sensing water level gauge", capable of retrieving water level information for oceans, rivers, lakes,

收稿日期：2024-10-14

基金项目：武汉市知识创新专项基础研究项目 (2022010801010107)；湖北珞珈实验室开放基金 (220100048)；湖北省科技重大专项 (2022AAA002)。

第一作者：单强，博士生，研究方向为 GNSS-IR 水位反演。qiangshan@whu.edu.cn

通信作者：陈渠森，博士，副研究员。chenqs@whu.edu.cn

and reservoirs against the global reference frame. However, when the observation environment of the station is complicated and the capacity of receiving satellite signals is limited, the number and length of the signal-to-noise ratio sequences of the water surface reflections are insufficient, which reduces the inversion accuracy of GNSS-IR water level monitoring at a single station. **Methods:** Therefore, the paper proposes a GNSS-IR multi-station fusion water level monitoring method based on robust estimation. It reduces the influence of outlier rough values of all stations by optimizing the inversion points of satellite arcs of all stations. In order to verify the effectiveness of the proposed method, we carried out experiments using data from three monitoring stations receiving reflective signals from different water surface in the upper reservoir of the Xilongchi pumped storage power station. **Results:** The results show that the correlation coefficient between the fused water level inversion results and water level gauge measurements is as high as 0.983 for the sudden rise and fall process of the pumped storage power station, which has a daily water level change of 18.7 m. Moreover, the accuracy of the fusion water level results from multiple stations is significantly better than that of single-station water level monitoring. The relative accuracy of the fusion inversion results is 0.06, which is 30% - 70% higher than that of the single station monitoring results. **Conclusions:** It indicates that the method significantly enhances the performance of GNSS-IR water level monitoring in scenarios with insufficient single-station data, and improves the robustness and stability of the water level monitoring model.

Key words: GNSS reflectometry; Water level monitoring; Robust estimation method; Signal-to-noise ratio

全球导航卫星系统干涉反射 (Global Navigation Satellite Systems -Interferometry Reflectometry, GNSS-IR) 是利用全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) L 波段直射信号和地表介质反射信号之间干涉延迟的遥感技术。得益于 GNSS 卫星星座的广覆盖和 GNSS 设备应用的持续增长, 为 GNSS-IR 技术应用提供了丰富的数据源。其中, GNSS-IR 水位监测是导航卫星从传统应用拓展到“GNSS+”的创新应用, 2000 年 GNSS 接收机被证实是一种有效实用的“遥感水位计”^[1], 与传统水位计相比, 非接触式的测量方式受洪水、淤泥干扰较小, 并能够以高精度、高时空分辨率提供绝对基准下的水位监测服务。

自 2013 年 Larson 等首次将 GNSS-IR 用于水位监测领域以来^[2], 大量学者针对 GNSS-IR 误差识别与修正、多频多系统数据融合算法和机器学习/人工智能辅助 GNSS-IR 算法开展了深入研究。在 GNSS-IR 误差识别与修正方面: 文献[3]在 GNSS-IR 空间几何关系物理模型中增加了水面变化率改正项, 这是 GNSS-IR 动态水位监测的理论基础。文献[4]和文献[5]针对对流层误差引起的信号弯曲和延迟误差, 利用映射函数、全球温度气压湿度 (Global Pressure and Temperature 2 wet, GPT2w) 模型等建立了相应的改正模型。文献[6]分析了不同跟踪方式接收机 L2P 信号水位反演的性能, 提出半无码信号跟踪接收机 L2P 信号的“双峰”误差改正方法。文献[7]提出抗差估计方法确定观测值的最优权重, 实现对水面高度反演粗差值的识别与剔除。在多频多系统数据融合算法方面: 文献[8]利用单一测站在选定时间窗口内接收的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和格洛纳斯卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GLONASS) 所有频段反演结果, 采用最小二乘法联合估计水位值和水位变化率。随后, 文献[9]采用鲁棒回归方法求解 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗反演结果组成的状态转移方程集, 提高了精度和时间采样。文献[10]以 Lomb-Scargle Periodogram (LSP) 频谱结果的局部峰值进行定权, 采用加权迭代最小二乘融合算法结合 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗四系统 SNR 观测数据, 以 10 min 时间分辨率检索测站 BRST 的潮汐结果。文献[11]发现了多频多系统反演序列间的频间偏差与信号波

长线性相关,进一步提出了顾及频间偏差的多系统融合方法。在机器学习/人工智能辅助 GNSS-IR 算法方面:学者通过包括循环神经网络^[12]、Transformer 神经网络模型^[13]、GA-BP 神经网络^[14]等算法预训练 SNR 序列,提取隐含的样本特征,提高了 GNSS-IR 水位反演的数据量和精度,但机器学习/人工智能方法效果与积累的反演结果数量高度相关,训练样本较小时,模型出现过拟合现象导致结果失真。

丰富可靠的卫星弧段检索值是保证 GNSS-IR 水位监测精度的关键。随着应用场景更加泛在,水面反射区域狭小的河流^[15]、日际水位波动变化的抽水蓄能电站等场景下,经水面反射的多路径信号较少,单个测站可用弧段反演数量不足,可能无法全面反映水位变化特征。与此同时,接收机对于不同卫星系统信号的接收能力也会影响 GNSS-IR 反演点数量,由于建设时间、建设要求等因素^[16],一些场景下的岸基 GNSS 测站仅能接收单 GPS、单北斗或者某些设定卫星系统的数据,无法完全利用 GNSS 所有系统和频率的数据源,同样也会造成单个测站的水位检索值较少。

幸运的是,往往岸基 GNSS 接收机并不是单个安装,而是通过构建观测网络为水域、水利设施等提供全面监测。这也为 GNSS-IR 高精度水位监测提供了多个测站的冗余观测数据,然而,如何利用多个测站数据反演水位研究较少。为此,本文提出了一种基于稳健估计的多测站数据融合 GNSS-IR 水位反演方法,综合利用所有测站在统一绝对基准下的水位反演信息,并抑制所有测站水位反演集中“错误观测值”的影响,得到水位的最佳估计。为了验证方法的反演效果,本文选用西龙池抽水蓄能电站上水库 GPS 变形监测系统的 3 个监测站(S071、S171、S191)进行数据处理,分析不同 δSNR 序列频率识别方法的差异,并评估多测站数据融合 GNSS-IR 反演方法的水位监测性能。

1 原理与方法

1.1 GNSS-IR 动态理论模型

如图 1 所示,岸基 GNSS 接收机接收的卫星直射信号和水面反射信号存在路程延迟 D ,该延迟导致低高度角范围的 SNR 观测序列呈现明显的周期振荡特征。当利用 GNSS-IR 技术监测水位时,为了有效提取 SNR 观测序列的振荡特征,通常采用二阶多项式拟合、去除 SNR 序列中直射信号的趋势项,得到 SNR 残差序列(δSNR)。 δSNR 可以表示路程差 D 的函数^[17],如下所示:

$$\delta SNR = A \cos\left(\frac{2\pi D}{\lambda} + \phi_0\right) = A \cos\left(\frac{4\pi \bar{h}}{\lambda} \sin(e) + \phi_0\right) \quad (1)$$

式中, A 和 ϕ_0 为 δSNR 序列的振幅(单位:Volts/Volts)和相位; λ 为不同频段的信号波长(单位:m); \bar{h} 为静态水位假设下 GNSS 天线相位中心至水体反射面的瞬时反射高度(单位:m); e 为卫星高度角(单位:弧度)。在静态水位假设下,如果令 $t = \sin(e)$, $\bar{f} = \frac{2\bar{h}}{\lambda}$,那么式(1)可以简化为标准的余弦函数形式,如下所示:

$$\delta SNR = A \cos(2\pi \bar{f} t + \phi_0) \quad (2)$$

瞬时频率 \bar{f} 包含 GNSS 天线相位中心至水体反射面的垂直距离,因此如何获取有效的水位信息转化成为如何准确识别低高度角范围 δSNR 序列的频率 \bar{f} ,具体的频率识别方法将在后续内容给出。

自然界的水位并非静止不动的,这导致静态水位假设并不适用,从 δSNR 序列识别的瞬时频率 \bar{f} 包

含水位高度变化误差，文献[3]引入高度角变化率 $\dot{e} = \frac{de}{dt}$ 和水位高度变化率 $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ 两个动态变化参数至公式（2），将静态水位假设的瞬时反射高度值 \bar{h} 转换至动态水位的真实反射高度 h ，实现水位反演的动态改正^[2]，如下所示。

$$\bar{h} = \frac{\tan(e)}{\dot{e}} \dot{h} + h \quad (3)$$

然后，得益于 GNSS 设备可以同时获取天线相位中心绝对位置 H_A 的能力，将 GNSS-IR 技术测量的真实反射高度 h 转换至绝对基准上，得到绝对水位高度结果 H_w ，转换关系为：

$$H_w = H_A - h \quad (4)$$

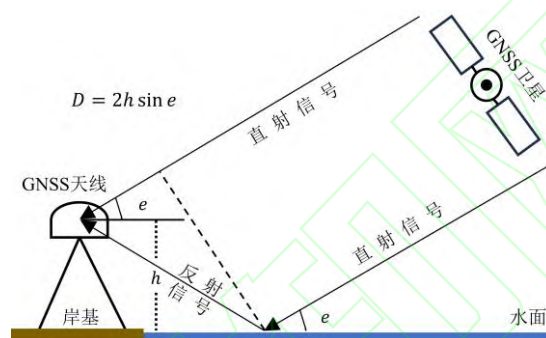


图1 GNSS-IR 水位监测原理图

Fig.1 Schematic diagram of GNSS-IR water level monitoring

1.2 δSNR 序列频率识别方法

目前，GNSS-IR 水位监测领域常用的 δSNR 序列频率提取方法包括 LSP 分析方法^[2]和小波时频分析方法^[18]等，接下来对这两种方法进行详细介绍。

1.2.1 LSP 分析方法

LSP 分析方法是基于最小二乘拟合的谱估计分析方法，也是 GNSS-IR 水位监测领域应用最广泛的一种频率提取方法^[19]。针对 t 非均匀采样的 δSNR 序列，它可以有效提取序列的弱周期信号，抑制不均匀时域所造成的虚假信号，并且能够给出不同频率分量的虚警概率和显著性。对于 SNR 残差序列 $\delta SNR(t_i), i = 1, 2, 3, \dots, N$ ，LSP 功率谱 $P_{\delta SNR}(f)$ 可以表示为：

$$P_{\delta SNR}(f) = \frac{1}{2N} \left\{ \frac{[\sum_{i=1}^N \delta SNR(t_i) \cos 2\pi f(t_i - \tau)]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2 2\pi f(t_i - \tau)} + \frac{[\sum_{i=1}^N \delta SNR(t_i) \sin 2\pi f(t_i - \tau)]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2 2\pi f(t_i - \tau)} \right\} \quad (5)$$

式中， τ 为时间平移不变量。随后，为了解决水位变化场景中一段 δSNR 长序列对应一个主要频率不合理的问题，利用高度角滑动窗口或时间滑动窗口将一段 δSNR 长序列划分为几段 δSNR 序列的窗口 LSP (WinLSP)方法被提出，使得一段 δSNR 长序列时间内能够得到多个主要频率，即一段 δSNR 长序列能够反演多个反射高度值^[20]。

1.2.2 小波时频分析方法

小波时频分析方法可以同时识别 δSNR 序列时间尺度和频率尺度的特征，是 GNSS-IR 近年新兴的频率提取方法^[18]。在水位变化场景下，该方法通过有限长或者快速衰减的“母小波”，能够有效识别非平稳 δSNR 序列的时变频率，提高监测精度。针对上述 SNR 残差序列 $\delta SNR(t_i), i = 1, 2, 3, \dots, N$ ，小波时频

分析方法公式为:

$$\psi_{b,a}(t_i) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t_i - b}{a}\right) \quad (6)$$

$$WT_x(b, a) = \langle \delta SNR(t_k), \psi_{b,a}(t_k) \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Delta \sin(e_k) \sum_{k=1}^N \delta SNR(t_k) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t_k - b}{a}\right) \quad (7)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示内积, $\psi_{b,a}(t_i)$ 表示母小波函数, $\bar{\psi}(\)$ 表示 $\psi(\)$ 的共轭函数, $\psi_{b,a}(t_k)$ 表示子小波函数, a 表示缩放因子, 决定母小波的宽窄变化, b 表示平移参数, 决定母小波的位置。小波分析能识别出一段 δSNR 长序列中所有高能量频率区域, 反演结果数量显著提升。

1.3 多测站融合的 GNSS-IR 水位监测方法

为了综合利用多个 GNSS 设备对同一水面区域进行水位监测时的所有反演结果, 本文基于稳健估计方法进行多测站融合, 首先选定合适的水位估计时间窗口 T 以保证时段内有足够多的检索点, 并能够反映水位变化特征, 该窗口内的水位变化可以认为是线性变化, 然后确定该窗口内的待求水位值 H_{w0} 对应的基准历元 t_0 , 那么其他历元的水位值 H_{wj} 可以用基准水位值 H_{w0} 表示, 如下所示:

$$H_{wj} = H_{w0} + (t_k - t_0) \dot{h} \quad (8)$$

假设在该水位估计时间窗口内共有 m 个 GNSS 测站的结果, 其中第 a 个测站有 S_a 个反演成功的水位结果, 那么在该时间窗口内建立如下的观测方程^[21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_{1,1} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{1,1})}{\dot{e}_{1,1}} - (t_{1,1} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A1} \\ \bar{h}_{1,2} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{1,2})}{\dot{e}_{1,2}} - (t_{1,2} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A1} \\ \dots \\ \bar{h}_{1,S_1} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{1,S_1})}{\dot{e}_{1,S_1}} - (t_{1,S_1} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A1} \\ \bar{h}_{2,1} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{2,1})}{\dot{e}_{2,1}} - (t_{2,1} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A2} \\ \bar{h}_{2,2} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{2,2})}{\dot{e}_{2,2}} - (t_{2,2} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A2} \\ \dots \\ \bar{h}_{2,S_2} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{2,S_2})}{\dot{e}_{2,S_2}} - (t_{2,S_2} - t_0) \right] \dot{h} + H_{A2} \\ \dots \\ \bar{h}_{m,1} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{m,1})}{\dot{e}_{m,1}} - (t_{m,1} - t_0) \right] \dot{h} + H_{Am} \\ \bar{h}_{m,2} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{m,2})}{\dot{e}_{m,2}} - (t_{m,2} - t_0) \right] \dot{h} + H_{Am} \\ \dots \\ \bar{h}_{m,S_m} = -H_{w0} + \left[\frac{\tan(e_{m,S_m})}{\dot{e}_{m,S_m}} - (t_{m,S_m} - t_0) \right] \dot{h} + H_{Am} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, \bar{h}_{m,S_m} 、 $\tan(e_{1,S_m})$ 、 \dot{e}_{1,S_m} 分别代表第 m 个测站第 S_m 个可用弧段的静态水位假设瞬时高度值, 高度角的正切值, 高度角的变化率; H_{Am} 代表第 m 个测站的 天线相位中心绝对位置, 其他符号的含义以此类

推。为了便于讨论，上式可以简写为：

$$\bar{L} = BX + d \quad (10)$$

式中，观测值矩阵 $\bar{L} = \begin{bmatrix} \bar{h}_{1,1} \\ \bar{h}_{1,2} \\ \dots \\ \bar{h}_{1,S_1} \\ \bar{h}_{2,1} \\ \bar{h}_{2,2} \\ \dots \\ \bar{h}_{2,S_2} \\ \dots \\ \bar{h}_{m,1} \\ \bar{h}_{m,2} \\ \dots \\ \bar{h}_{m,S_m} \end{bmatrix}$ ，系数矩阵 $B = \begin{bmatrix} -1 & \frac{\tan(e_{1,1})}{\dot{e}_{1,1}} - (t_{1,1} - t_0) \\ -1 & \frac{\tan(e_{1,2})}{\dot{e}_{1,2}} - (t_{1,2} - t_0) \\ \dots & \dots \\ -1 & \frac{\tan(e_{1,S_1})}{\dot{e}_{1,S_1}} - (t_{1,S_1} - t_0) \\ -1 & \frac{\tan(e_{2,1})}{\dot{e}_{2,1}} - (t_{2,1} - t_0) \\ -1 & \frac{\tan(e_{2,2})}{\dot{e}_{2,2}} - (t_{2,2} - t_0) \\ \dots & \dots \\ -1 & \frac{\tan(e_{2,S_2})}{\dot{e}_{2,S_2}} - (t_{2,S_2} - t_0) \\ \dots & \dots \\ -1 & \frac{\tan(e_{m,1})}{\dot{e}_{m,1}} - (t_{m,1} - t_0) \\ -1 & \frac{\tan(e_{m,2})}{\dot{e}_{m,2}} - (t_{m,2} - t_0) \\ \dots & \dots \\ -1 & \frac{\tan(e_{m,S_m})}{\dot{e}_{m,S_m}} - (t_{m,S_m} - t_0) \end{bmatrix}$ ，未知参数向量 $X = \begin{bmatrix} H_{w0} \\ \dot{h} \end{bmatrix}$ ，

常数矩阵 $d = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_1 \\ \dots \\ H_1 \\ H_2 \\ H_2 \\ \dots \\ H_2 \\ \dots \\ H_m \\ H_m \\ \dots \\ H_m \end{bmatrix}$ 。水位反演观测值 \bar{L} 之间相互独立，以 LSP 谱分析结果为例，结果可靠性与峰噪比

(Peak-to-Noise, P/N) 这一指标密切相关^[10]，因此水位反演观测值根据 P/N 值定权：

$$P = \text{diag}(p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,S_1}, \dots, p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{m,S_m}) \quad (11)$$

式中， p_{m,S_m} 表示第 m 个测站第 S_m 个可用弧段的反演结果的 P/N 值。根据加权最小二乘原理，可得：

$$\begin{cases} X^{(0)} = [B^T P B]^{-1} [B^T P (\bar{L} - d)] \\ V^{(0)} = B X^{(0)} - (\bar{L} - d) \\ \sigma^{(0)} = \sqrt{\frac{V^{(1)T} P V^{(1)}}{S - 2}} \end{cases} \quad (12)$$

式中， $S = S_1 + S_2 + \dots + S_m$ 表示水位反演结果的总数， $X^{(0)}$ ， $V^{(0)}$ ， $\sigma^{(0)}$ 为初次估计的未知参数、残差和单位权中误差，这也是后续稳健估计选权迭代法的初始输入值。为了抵抗不同设备、环境条件下的异常粗差结果的影响，本文采用 IGGIII 等价权函数识别不同观测值的误差类型并加以区分^[22]，如公式

(13) 所示：

$$\bar{p}_i = \begin{cases} p_i & |u_i| \leq c_0 \\ p_i \cdot \frac{c_0(c_1 - |u_i|)^2}{|u_i|(c_1 - c_0)^2} & c_0 < |u_i| \leq c_1 \\ 0 & c_1 < |u_i| \end{cases} \quad (13)$$

式中, \bar{p}_i 表示第*i*个观测值的等价权; $|u_i|$ 为标准化残差,数值每个观测值的改正值与中误差的比值; c_0 、 c_1 为相应的调和系数,通常,调和系数的取值为 $c_0 = 1$ 、 $c_1 = 2.5 \sim 3.0$ [22]。在本文的计算中,我们采用不同组合的调和系数进行计算,发现这些结果差异不大,因此我们将调和系数确定为 $c_0 = 1$ 、 $c_1 = 2.5$ 。如公式所示,标准化残差小于 c_0 的正常段仍然采用原始权阵;残差显著较大的淘汰段采用零权(或近似零权)处理;其他残差采用降权方法进行估计[7]。每次计算确定新的权阵后继续迭代,直至满足终止条件为止,本文的终止条件为:

$$|v_i^k| \leq \varepsilon \quad (14)$$

式中, v_i^k 为第*i*个参数第*k*次迭代的残差, ε 为终止阈值,在本文实验中设置为0.001m。图2为多测站融合的GNSS-IR水位监测方法基本流程图,具体步骤如下:

步骤1: 结合菲涅尔有效反射区域确定低高度角范围,提取各个测站有效的SNR序列和高度角序列,利用二次多项式拟合方法剔除直射信号导致的趋势项,得到SNR残差序列;

步骤2: 设置模型约束条件,利用LSP分析/小波时频分析识别SNR残差序列的频率,并通过质量控制保留有效的频率分析结果;

步骤3: 输入精确的测站高,统一不同测站的水位基准;

步骤4: 在同一水位估计窗口内,将加权最小二乘方法估计的水位初值代入IGGIII等价权函数计算新权,连续迭代满足终止条件为止,输出最终水位估计结果。

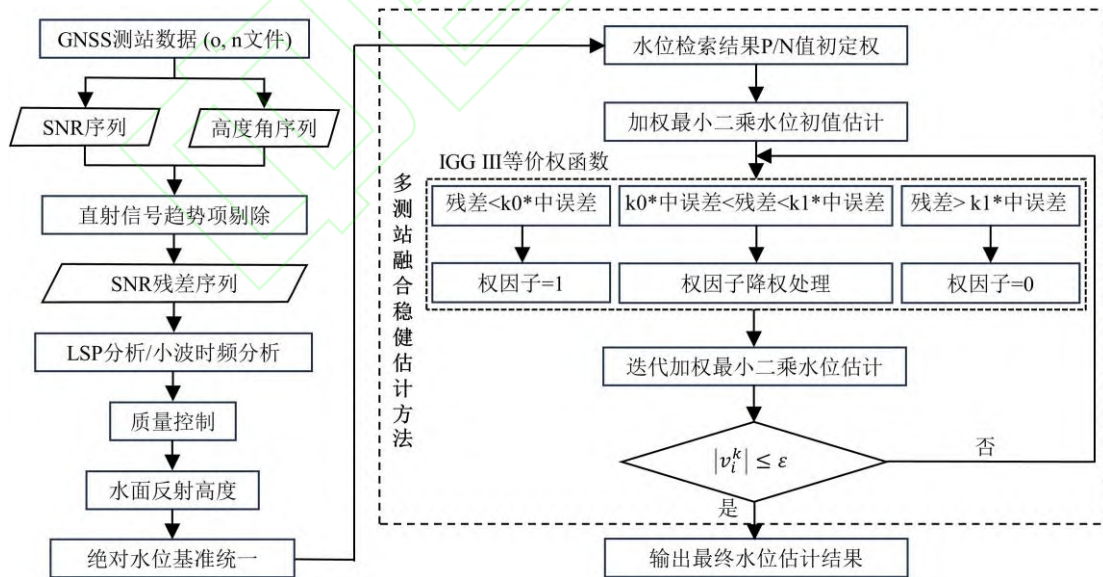


图2 多测站融合的GNSS-IR水位监测方法流程图

Fig.2 The flowchart of GNSS-IR water level monitoring method with multi-station fusion

2 实验与结果

2.1 数据来源与预处理

西龙池抽水蓄能电站是中国第一个高水头的抽水蓄能电站，其中上水库东西方向和南北方向跨度约 500 m，总库容 469 万立方米，正常蓄水位 1492.5 m，死水位 1467 m，通过最大消落深度 25.5 m 的库内水的蓄放实现能量转移，成为山西电网不可或缺的调峰电源。本文实验数据选取西龙池上水库 GPS 变形监测系统的 3 个监测站（S071、S171、S191）2018 年 1 月采集的数据，测站面向库区视野开阔，无大型障碍物遮挡，能够同时接收来自水面的反射信号和卫星直射信号。这些测站配备 TRIMBLE NETRS 大地测量型接收机和 TRM29659.00 天线，由于该系统建成时间较早，仅可以接收 GPS 的 L1/L2 频段数据，采样率为 5s。为了对比分析多测站融合反演的水位结果，收集了以工程坐标系为基准、采样时间为 1 h 的同期水位计实地测量结果，并利用实测水位和反演水位的平均值差值将其转换至统一的 WGS-84 基准下进行验证。

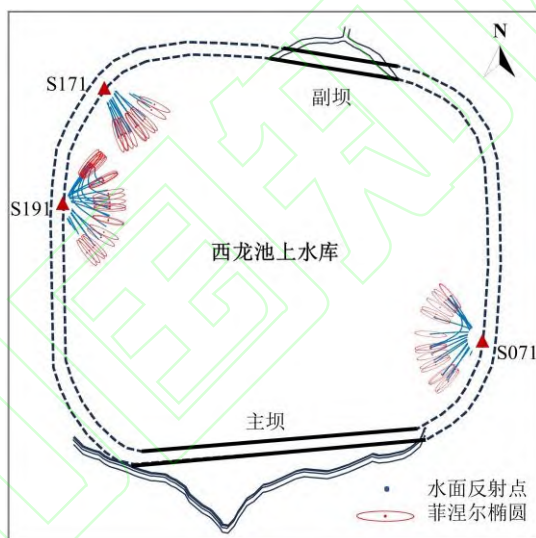


图3 西龙池上水库监测站分布图

Fig.3 Distribution of monitoring stations in the Upper Reservoir of Xilongchi

为了后续实验的开展，需要对西龙池上水库的 GPS 观测数据进行预处理，以筛选可用的 SNR 数据，得到有效的频率识别结果。预处理主要包括：

1) GNSS 原始观测文件一般最长以天为单位存储文件，这导致一段跨天连续扫过水面的卫星弧段被分为两段，造成 SNR 序列长度变短，不利于准确识别 SNR 序列中的频率。基于此，本文首先将跨天 SNR 观测数据进行合并以保证跨天连续卫星弧段的完整。然后，利用文献[4]和文献[5]的对流层误差改正模型对数据进行修正。

2) 结合菲涅尔反射区域和上水库水体边界确定不同测站的各自的水面反射高度、卫星高度角和方位角范围，如表 1 所示。当水面反射高度为 15m 时，不同测站能够接收反射信号的水面反射点和卫星高度角为 10° 的菲涅尔椭圆区域如图 3 所示，最远水面反射点距测站 85 m。水面反射高度最大约为 25 m，此时最远水面反射点距测站约为 141.8 m，能够保证反射信号落在水面上。然后，基于武汉大学 PANDA 高精度 GNSS 数据处理软件，采用短基线单频相对定位获取测站 S191、S171 和 S071 的绝对

位置，以便于统一测站间绝对水位基准。

3) 与水位相关的 SNR 序列的频率提取结果需要严格的质量控制，本文采用峰噪比和频谱幅值 2 个指标进行质量控制，其中峰噪比阈值设置为 3，频谱幅值阈值设置为 5 Volts/Volts。

表 1 测站 S071、S171、S191 的高度、方位角和高度角范围
Tab.1 Position, and the range of heights, azimuth, and elevation for stations S191, S171, and S071

测站	位置	水面反射高度范围	方位角范围	高度角范围
		(m)	(°)	(°)
S191	(113°16'42",38°32'32")	(5, 30)	(35, 135)	(10, 30)
S171	(113°16'44",38°32'36")	(5, 30)	(110, 150)	(10, 30)
S071	(113°17'02",38°32'26")	(5, 30)	(205, 345)	(10, 30)

2.2 实验结果分析

首先,我们采用不同的方法识别 δSNR 序列频率，以测站 S071 在 2018 年 DOY16 采集的 PRN 09 卫星 L1 频段的升轨低高度角 SNR 序列为例进行说明。图 4 (a) 绘制了 SNR 的残差序列图，图中也可以看出序列具有显著的振荡特征。为了确保从每一段 SNR 残差序列获得正确的周期信息，采用 WinLSP 方法选择 10° 高度角窗口、5° 高度角的滑动增幅来截取 SNR 残差序列，如图 4 (a) 划分为窗口 1、窗口 2 和窗口 3，图 4 (b) 分别对 3 个窗口 SNR 残差序列利用 LSP 方法识别序列的频率。窗口 1 的 SNR 残差序列识别的主要频率对应的静态水位假设反射高度为 15.66 m，振幅为 5.6 Volts/Volts，峰噪比为 4.28；窗口 2 的 SNR 残差序列识别的主要频率对应的静态水位假设反射高度为 17.27 m，振幅为 5.4 Volts/Volts，峰噪比为 3.66；窗口 3 的 SNR 残差序列识别的主要频率对应的静态水位假设反射高度为 19.79 m，振幅为 5.2 Volts/Volts，峰噪比为 3.36，随着时间的增加，序列识别出的静态水位假设瞬时反射高度逐渐增大。同样的，利用小波时频分析方法对该卫星弧段进行分析，图 4 (c) 展示了小波时频分析的结果，白线为小波分析后的高能量区域拟合曲线，由图可知该方法能够识别与高度角对应的瞬时反射高度信息，通过小波时频结果中高能量的区域也能看出随着高度角增加（时间增加），静态水位假设瞬时反射高度逐渐增大。在小波时频分析第一个高能量区域内高度角 15° 对应的静态水位假设瞬时反射高度为 15.67 m，与使用 WinLSP 方法的高度角范围(10°,20°]的窗口 1 结果相差 1 cm，小波时频分析第二个高能量区域内高度角 25° 对应的静态水位假设瞬时反射高度为 19.89 m，与使用 WinLSP 方法的高度角范围(20°,30°]的窗口 3 结果差距为 10 cm，这也对比验证了两种方法识别频率结果的一致性和准确性。由于小波时频分析方法涉及到更复杂的计算，耗费时间较长，相比而言利用 WinLSP 方法识别反射高度频率的时间效率更高，因此后续的结果是基于 WinLSP 结果进行计算的。

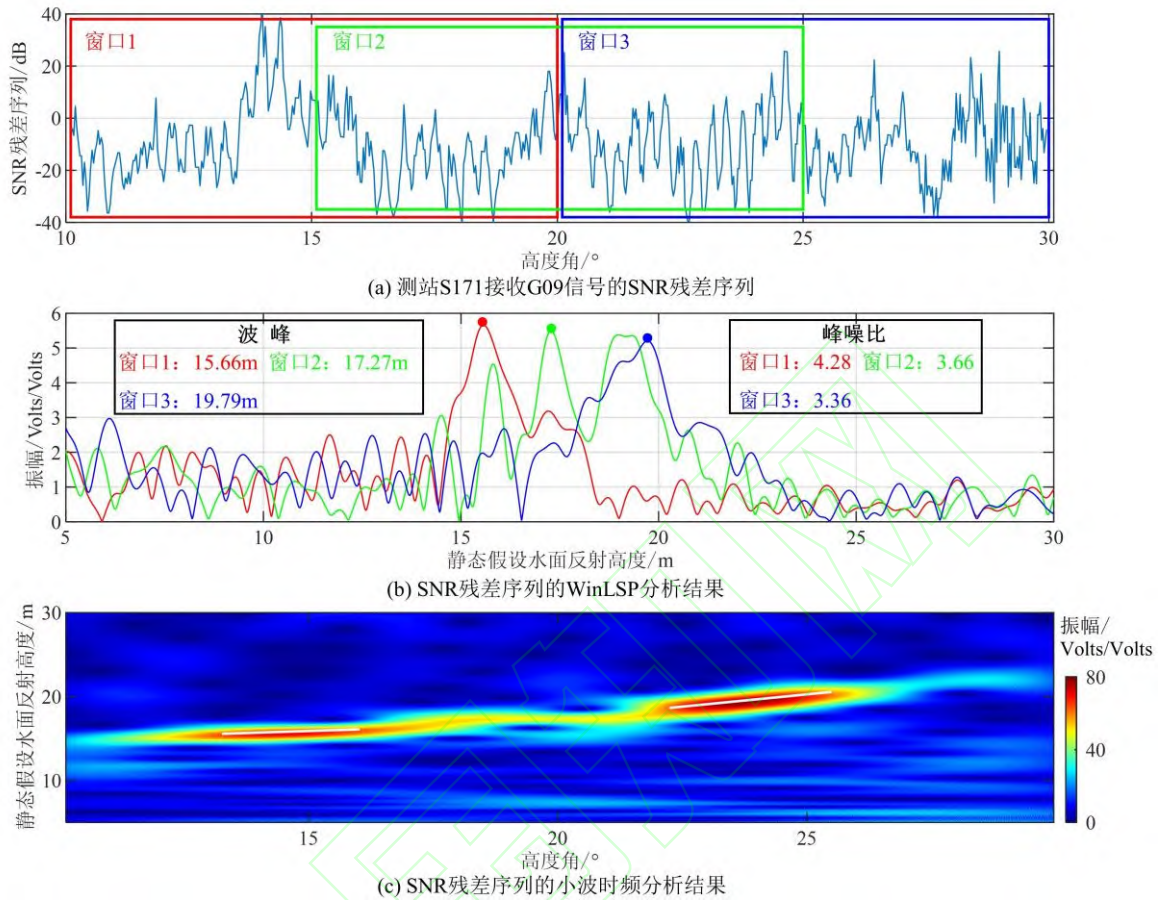


图4 2018年DOY16测站S071采集的PRN09号卫星L1频段SNR残差序列及提取的反射高度

Fig.4 L1-band SNR residual sequence and reflection height extraction from PRN09 satellite collected at DOY16 station S071 in 2018

图5为测站S191、S171和S071经过质量控制之后WinLSP方法反演的静态假设水位瞬时高度，黑色线条表示水面反射高度基准下的水位计测量结果，S191、S171和S071的每天的平均反演点位数分别为173、96和139个。但从图5可以看到，单一测站的结果无法覆盖所有时段，因此进一步统计了每天各时段不同测站的反演结果数量，如图6所示，整体来看在测站S191每天的10-13h时段，测站S171每天的2-3h、6-8h、11-14h、17-19h时段，测站S071每天11-15h、16-17h时段内平均反演点数量不足以进行后续的数据解算，而同时使用3个测站融合处理时，整体来看仅有12-13h反演点数量较少。图5还表明不同测站的反演结果与水位计测量结果的趋势基本保持一致，其中测站S071的反演结果与水位计实测结果的标准差为1.93m，测站S171的反演结果与水位计实测结果的标准差为1.92m，测站S191的反演结果与水位计实测结果的标准差为1.76m，这是由于此时水位瞬时高度包含水位动态变化误差，这也是测站GNSS-IR反演结果偏移水位计测量结果的主要原因。在水位变化较为平缓的时期，理论上水位动态变化误差为零，但在图中可以看出仍有一些GNSS-IR反演结果偏离水位计测量结果，使用本文稳健估计选权迭代法可以有效剔除这些粗差结果。

表 2 测站 S191、S171、S071 的每天的平均反演点位数量和精度
 Tab 2 Average number of inversion points per day and accuracy for stations S191, S171, and S071

测站	平均反演点位数量(个/天)	标准差(m)
S191	173	1.76
S171	96	1.92
S071	139	1.93

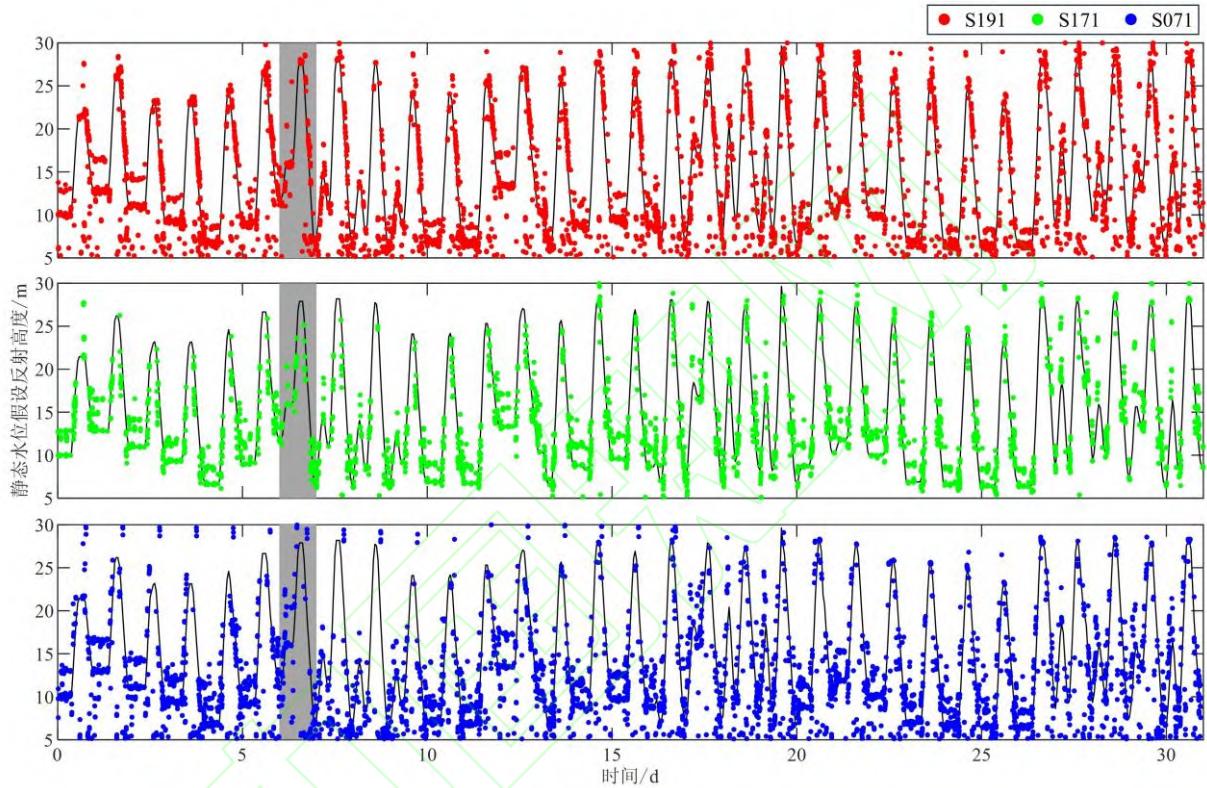


图 5 测站 S191、S171 和 S071 的水面反射高度

Fig.5 Reflection heights from inversions at stations S191, S171 and S071

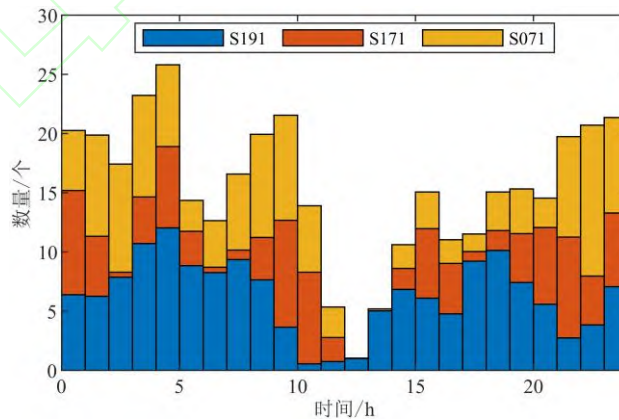


图 6 不同测站各时段反演结果的数量

Fig.6 Statistics on the number of inversion results by time period at different stations

采用本文提出的多测站融合的 GNSS-IR 水位监测方法，设置水位估计时间窗口 T 为 1h， t_0 为每个水位估计时间窗口的中间时刻，将西龙池上水库每个时间估计窗口内所有测站的结果组成超定方程组

求解真实水位结果。在整个时间估计窗口内，包含 GPS L1 和 L2 信号同期观测水位反演结果，对于同一测站观测的同一卫星，L1 和 L2 信号反演结果的方程系数是相同的，在融合过程中为了防止超定方程组的系数矩阵秩亏，设置所有测站的反演点数量满足大于 3 个时进行后续处理。以 2018 年 DOY007 的多测站融合水位结果为例，如图 7 所示，由于反演点结果数量的限制，DOY007 的 0-1h、12-13h 和 15-16h 没有得到最终真实水位结果。通过图 7 还可以得到，2018 年 DOY007 多测站融合的真实水位结果与水位计测量结果较为一致，标准差为 1.26 m，偏移较大的水位反演结果出现在水位快速变化的阶段。利用稳健估计对多测站进行数据融合同时引入了精度评价因子-单位权中误差 σ ，本文统计了融合结果的单位权中误差分布，如表 3 所示，所有结果的中误差均值为 0.26m，在结果分析中我们可以利用这一指标剔除不符合精度较差的最终结果。

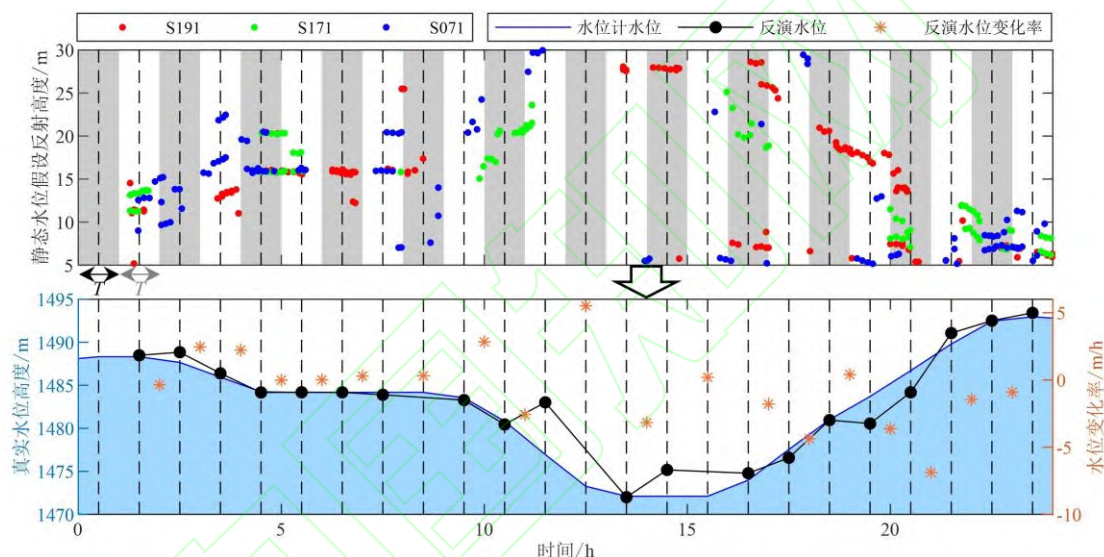


图 7 西龙池 2018 年 DOY007 的多测站融合水位结果

Fig.7 Multi-station fusion water level results for Xilongchi in 2018 DOY 007

为了进一步分析多测站融合的 GNSS-IR 水位反演结果的精度和可靠性，本文基于水位计实地测量结果进行对比验证，如图 8 所示为 2018 年 1 月份水位结果，其中黑色线条为水位计测量结果，红色点位为多测站融合反演结果，融合反演结果和水位计测量结果的一致性较高，它们之间的标准差为 1.13 m，相较于单测站 S191、S171 和 S071 采用本文稳健估计方法进行反演时 1.47 m，1.92 m 和 1.84 m 的水位监测精度，结果的可靠性大大提高。对比文献[23]分析的沿海不同潮差的 GNSS-IR 反演结果精度，5 个测站反演的相对精度（定义为反演水位标准差与水位高度差之比）均在 0.024 到 0.1 之间，潮差最大为 7.72m 的台站反演结果标准差为 43cm。由于大幅度快速变化的水面导致水面粗糙度增加，从而使得反射信号功率和信噪比振荡幅度下降，这是造成 GNSS-IR 反演结果标准差较大的主要因素。而西龙池上水库平均每天经历 18.70 m 的水位上升和下降的持续变化，相对精度为 1.13 m/18.7m=0.06 的水位监测结果能够较为真实的反应水位变化特征。

如图 9 所示，本文进一步绘制了多测站融合反演结果与水位计实测结果关系，相关性数值为 0.983，相比于单一测站，提高最终反演结果数量的同时提高了结果的可靠性，表明多测站融合结果与实测水位结果高度相关，多测站融合 GNSS-IR 数据融合方法能够有效反应西龙池抽水蓄能电站的水位变化趋

势，为水库长期的变形特征分析提供了基础数据。

表 3 最终反演的单位权中误差分布

Tab 3 Distribution of errors in unit weights for the final result					
中误差 σ 区间/m	<0.1	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5
比例/%	26.4	53.1	73.0	84.2	90.5

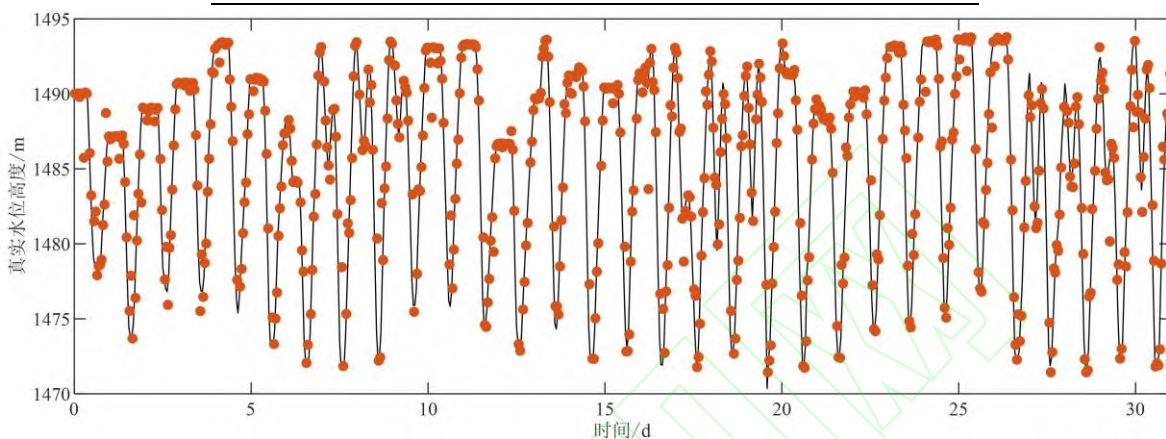


图 8 2018 年 1 月水位计测量与最终反演水位时间序列

Fig.8 Time series diagram of multi-station fusion inversion results and water level gauge measurements for January 2018

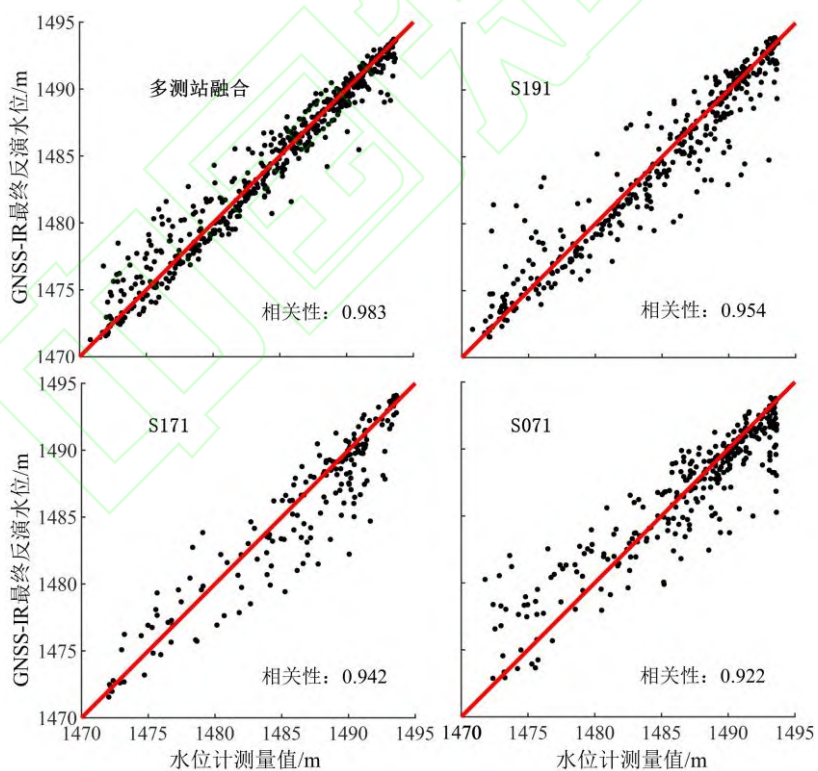


图 9 多测站融合、单测站 S191、单测站 S171 和单测站 S071 反演结果与水位计实测结果关系图

Fig.9 Correlation of multi-station fusion, S191, S171, and S071 inversion results with water level gauge measurements

3 结语

本文提出一种面向同一水域的多测站融合 GNSS-IR 水位监测方法，通过 WinLSP 分析或小波时频

方法识别 SNR 残差序列的频率, 并利用稳健估计方法设置等价权函数剔除反演粗差结果, 解决了单个测站的水位检索值较少不足以反映水位变化特征的问题。利用周日水位变化超过 18.70 m 的西龙池抽水蓄能电站 GNSS 监测站采集的数据验证了方法的有效性, 得到的主要结论如下: (1) 利用 WinLSP 方法和小波时频分析方法能够有效识别 SNR 残差序列的频率, 两种频率识别方法的结果一致性较高。

(2) 使用多测站融合 GNSS-IR 水位监测方法反演西龙池上水库水位, 融合结果与 1h 水位计测量结果的相关性高达 0.983, 与单一测站水位反演相比, 提高了结果的精度和可靠性。因此, 多测站融合 GNSS-IR 水位监测方法能够综合多测站信息, 提高水位反演的可靠性, 未来可以利用 GNSS 设备同时探究水利工程的长期变形特征和长期水位变化之间的响应关系。

参考文献

- [1] Anderson K D. Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(8): 1118-1127
- [2] Larson K M, Löfgren J S, Haas R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver[J]. *Advances in space research*, 2013, 51(8): 1301-1310.
- [3] Larson K M, Ray R D, Nievinski F G, et al. The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200-1204.
- [4] Santamaria-Gómez A, Watson C. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia[J]. *GPS solutions*, 2017, 21: 451-459.
- [5] Williams S D P, Nievinski F G. Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2017, 122(3): 2310-2327.
- [6] Wang X, Yang Z, He X, et al. Special Error Sources and Correction Methods for GPS L2P(Y) Signals in GNSS-IR Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 122-130. (王笑蕾, 杨泽艺, 何秀凤等. GPS L2P(Y)信号在 GNSS-IR 技术中的特殊误差源及改正方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49 (01): 122-130.)
- [7] Wang Z, Li H, Sun Y. Robust estimation of GNSS-R tide level monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(2): 195-205. (王泽明, 李浩军, 孙亚峰. GNSS-R 潮位监测抗差估计 [J]. 测绘学报, 2023, 52 (02): 195-205.)
- [8] Roussel N, Ramillien G, Frappart F, et al. Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver[J]. *Remote sensing of Environment*, 2015, 171: 261-277.
- [9] Wang X, He X, Zhang Q. Evaluation and combination of quad-constellation multi-GNSS multipath reflectometry applied to sea level retrieval[J]. *Remote sensing of environment*, 2019, 231: 111229.
- [10] Ye M, Jin S, Jia Y. Ten-minute sea-level variations from combined multi-GNSS multipath reflectometry based on a weighted iterative least-square method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-10.
- [11] Wang X, He X, Song M, et al. Analysis of inter-frequency bias in multi-mode multi-frequency GNSS-IR waterlevel retrieval and correction method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(11): 2328-2338. (王笑蕾, 何秀凤, 宋敏峰等. 多模多频 GNSS-IR 水位反演中的频间偏差分析及改正 [J]. 测绘学报, 2022, 51 (11): 2328-2338.)
- [12] Limsupavanich N, Guo B, Fu X. Application of RNN on GNSS Reflectometry Sea level monitoring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2022, 43(10): 3592-3608.
- [13] Zhao T, Ye S, Luo X, et al. A Data Quality Control Method for High Elevation Angle in GNSS-IR Tide Level Retrieval[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 68-76. (赵涛, 叶世榕, 罗歆琪等. GNSS-IR 潮位反演中高仰角数据质量控制方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49 (01): 68-76.)
- [14] Pan Y, Ren C, Liang Y, et al. Inversion of surface vegetation water content based on GNSS-IR and MODIS data fusion[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1):21.
- [15] Shan Q, Chen Q, Liu K, et al. GNSS-IR water level monitoring toward particular narrow scenarios: Application to South-to-North Water Diversion Project in China[J]. *Measurement*, 2024, 226: 114131.
- [16] Hein G W. Status, perspectives and trends of satellite navigation[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 22.
- [17] Sepúlveda I, Cao B, Haase J S, et al. Optimizing Simultaneous Water Level and Wave Measurements From Multi-GNSS Interferometric Reflectometry Over 1 Year at an Exposed Coastal Site[J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(6): e2022EA002767.
- [18] Wang X, Zhang Q, Zhang S. Sea level estimation from SNR data of geodetic receivers using wavelet analysis[J]. *GPS solutions*, 2019, 23: 1-14.
- [19] Larson K M, Nievinski F G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS solutions*, 2013, 17: 41-52.

- [20] Wang X, Zhang Q, Zhang S. Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb–Scargle periodogram[J]. *GPS solutions*, 2018, 22: 1-10.
- [21] Hou J, Wang N, He K, et al. Comparative analysis of GNSS-IR sea level retrieval methods[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5).
- [22] Wu J, Yang Y. Robust Estimation for Correlated GPS Baseline Vector Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, (03): 247-251. (吴江飞, 杨元喜. 相关 GPS 基线向量网的抗差估计 [J]. 测绘学报, 2001, (03): 247-251.)
- [23] Löfgren J S, Haas R, Scherneck H G. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world[J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 80: 66-80.

网络首发:

标题: 基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法

作者: 单强, 姜卫平, 陈渠森, 刘凯, 张明远, 邹小伟

收稿日期: 2024-10-14

DOI:10.13203/j.whugis20240117

引用格式:

单强, 姜卫平, 陈渠森, 等. 基于稳健估计的 GNSS-IR 多测站融合水位监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240117 (SHAN Qiang, JIANG Weiping, CHEN Qusen, et al. Multi-station Fusion GNSS-IR Water Level Monitoring Based on Robust Estimation Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240117)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

GPS L2P(Y)信号在 GNSS-IR 技术中的特殊误差源及改正方法

王笑蕾, 杨泽艺, 何秀凤, 宋敏峰

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 122-130.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230349>

多系统单频紧组合 GNSS-R 测高方法

邓垦, 周佩元, 杜兰, 蔡巍

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 146-155.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220785>

典型水循环参数星载 GNSS-R/SoOP-R 遥感探测的研究现状

吴学睿, 宋少辉, 马文骁, 郭鹏, 胡小工, 严哲

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 1-14.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220685>