引文格式: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),2026,51(5):944-954.DOI:10.13203/j.whugis20240117

Citation: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,2026,51(5):944-954.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[1,3,4] 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

3 常州市测绘院,江苏 常州,213003

4 常州市地理信息智能技术中心,江苏 常州,213003

摘 要:全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)干涉反射(interferometric reflectometry,IR)测量技术是一种有效的"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、接收卫星信号受限时,GNSS-IR测量技术接收的水面反射信号信噪比序列数量不足,导致单一测站水位反演精度降低。为此,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。为验证所提方法的有效性,利用中国山西省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实验。结果表明,在面对抽水蓄能电站日变幅达18.7 m的水位快速升降过程时,融合水位反演结果与水位计实测数据相关系数高达0.983,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-IR;水位监测;稳健估计;信噪比

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-14

DOI:10.13203/j.whugis20240117 **文章编号**:1671-8860(2026)05-0944-11

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

SHAN Qiang[1,3,4] *JIANG Weiping*[1,2] *CHEN Qusen*[1,2] *LIU Kai*[1]
ZHANG Mingyuan[1] *ZOU Xiaowei*[1]

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

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

3 Changzhou Surveying and Mapping Institute, Changzhou 213003, China

4 Changzhou Geospatial Information Intelligence Technology Center, Changzhou 213003, China

Abstract: **Objectives**: As an effective "remote sensing water level gauge", the global navigation satellite system (GNSS)-interferometric reflectometry (IR) technique, with its advantages of wide coverage, high precision and strong anti-interference ability, has become an important means for retrieving water level information in oceans, rivers, lakes, and reservoirs against the global reference frame. However, in practical applications, 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 (SNR) sequences of the water

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,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

surface reflections are insufficient, which reduces the inversion accuracy of GNSS-IR water level monitoring. Especially when dealing with special scenarios such as rivers with a narrow reflection area on the water surface, or pumped storage power stations with significant daily fluctuations in water level, a single GNSS station often encounters problems such as insufficient number and limited length of the SNR sequences of the reflected water surface signals, making it difficult to comprehensively reflect the characteristics of water level changes. **Methods:** Therefore, We propose a GNSS-IR multi-station fusion water level monitoring method based on robust estimation. This method fully utilizes the redundant observational data from multiple measurement stations in the same water area by IGG Ⅲ equivalent weight function and reduces the influence of outlier rough values of all stations by optimizing the inversion points of satellite arcs of all stations. **Results:** To verify the effectiveness of the proposed method, experiments are conducted using data from three monitoring stations in the upper reservoir of the Xilongchi pumped storage power station, each receiving reflected signals from different water surface areas. Actual water level gauge measurements at a 1 h sampling rate are collected and converted to the WGS-84 reference frame for comparison. The results show that, for the sudden water level fluctuation process with a daily variation of 18.7 m, the correlation coefficient between the fused inversion results and the gauge measurements reaches as high as 0.983. The standard deviation between the multi-station fusion results and the measured data is 1.13 m, with a relative accuracy of 0.06. Compared with single-station inversion results, the accuracy of the proposed fusion method improves by 30% to 70%, effectively compensating for the insufficient inversion points observed in single-station results during certain periods. **Conclusions:** It is demonstrated that the proposed method significantly enhances the performance of GNSS-IR water level monitoring in scenarios with insufficient single-station data, while significantly improving the robustness and stability of the water level monitoring model. The research results provide crucial technical support for advancing the application of GNSS-IR technology to a broader spectrum of remote sensing fields, facilitating its practical deployment in complex hydrological monitoring scenarios.

Key words: GNSS-IR; water level monitoring; robust estimation method; SNR

全球导航卫星系统(global navigation satellite systems, GNSS)是一种利用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,该技术为GNSS干涉反射(GNSS interferometry reflectometry, GNSS-IR)测量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。GNSS接收机被证实可作为有效实用的"遥感水位计"[1],相较于传统水位计,其非接触式测量方式受洪水、淤泥干扰较小,并能在绝对基准下提供高精度、高时空分辨率的水位监测服务。

自文献[2]首次将GNSS-IR用于水位监测以来,大量学者围绕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引入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[4-5]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GLONASS所有频段反演结果,采用最小二乘法联合估计水位值及其变化率;文献[9]采用鲁棒回归方法求解由GPS、GLONASS、Galileo和北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)反演结果构建的状态转移方程集,提高了精度和时间采样;文献[10]以Lomb-Scargle周期(Lomb-Scargle periodogram,LSP)图谱分析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BDS 4个系统信噪比(signal-to-noise ratio, 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,学者们通过循环神经网络[12]、Transformer神经网络[13]、遗传算法和反向传播算法相结合的神经网络模型[14]等算法预训练SNR序列,提取隐含的样本特征,提高了GNSS-IR水位反演的数据量与精度。然而,机器学习/人工智能方法的效果与积累的反演结果数量高度相关,在训练样本较小时,模型易出现过拟合现象,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。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],部分场景下的岸基GNSS测站仅能接收单一GPS、单一BDS或特定卫星系统的数据,无法充分利用所有系统和频率的数据源,同样导致单个测站水位反演值较少。

值得注意的是,岸基GNSS接收机往往并非单独部署,而是通过构建观测网络实现对水域及水利设施的全面监测,这为GNSS-IR高精度水位监测提供了多测站的冗余观测数据。然而,目前关于如何利用多测站数据反演水位的研究仍较为有限。为此,本文提出一种基于稳健估计的多测站数据融合GNSS-IR水位反演方法,综合各测站在统一绝对基准下的水位反演信息,抑制所有测站水位反演结果中错误观测值的影响,获得水位的最优估计。为了验证所提方法的反演效果,本文选用中国山西省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SNR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

岸基GNSS接收机同时接收来自卫星的直射信号与经水面反射后的反射信号,两路信号因传播路径不同而产生路程延迟D,如图1所示。该延迟导致低高度角范围的SNR观测序列呈现

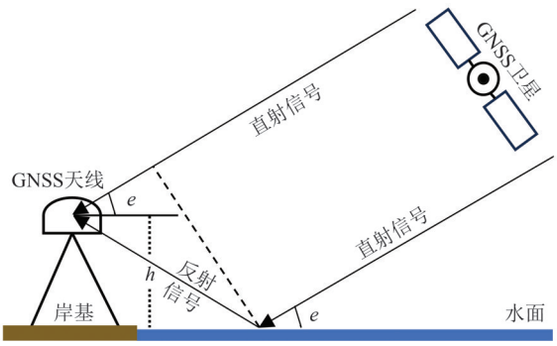


图1 GNSS-IR水位监测原理图

Fig. 1 Monitoring Diagram of GNSS-IR Water Level

明显的周期振荡特征,其计算式为:

$$D=2h\sin e \tag{1}$$

式中,h为真实反射高度;e为卫星高度角。

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R_{SNR}[17],其计算式如下:

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

式中,A、ϕ_0分别为SNR残差序列的振幅、相位;λ为不同频段的信号波长;$\bar{h}$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。在静态水位假设下,如果令$t=\sin e$,$\bar{f}=\frac{2\bar{h}}{\lambda}$,那么式(2)可以简化为如下标准余弦函数形式:

$$R_{\mathrm{SNR}}=A\cos(2\pi\bar{f}t+\phi_0) \tag{3}$$

式中,$\bar{f}$为瞬时频率,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SNR残差序列的频率$\bar{f}$,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,而SNR残差序列识别的瞬时频率$\bar{f}$包含水位高度变化误差。因此,文献[3]将高度角变化率和水位高度变化率两个动态变化参数引入式(3),将静态水位假设的瞬时反射高度值$\bar{h}$转换为真实反射高度h,得到水位反演的动态改正计算式[2]:

$$\bar{h}=\frac{\tan e}{\dot{e}}\dot{h}+h \tag{4}$$

式中,$\dot{e}$、$\dot{h}$分别为高度角、水位高度变化率。然后,得益于GNSS设备可以同时获取天线相位中心绝对位置的能力,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:

$$H_w = H_A - h \tag{5}$$

式中,H_A为天线相位中心绝对高度。

1.2　SNR残差序列频率识别方法

目前,GNSS-IR水位监测领域常用的SNR残差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。

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]。针对采样时间非均匀的SNR残差序列,该方法可以有效提取序列的弱周期信号,抑制不均匀时域造成的虚假信号,并且能够给出不同频率分量的虚警概率和显著性。LSP功率谱$P_{\mathrm{SNR}}(f)$可以表示为:

$$P_{\mathrm{SNR}}(f)=\frac{1}{2N}\left\{\frac{\left[\sum_{i=1}^{N}R_{\mathrm{SNR}}\cos\left(2\pi f(d_i-\tau)\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\cos^2\left(2\pi f(d_i-\tau)\right)}+\frac{\left[\sum_{i=1}^{N}R_{\mathrm{SNR}}\sin\left(2\pi f(d_i-\tau)\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\sin^2\left(2\pi f(d_i-\tau)\right)}\right\} \tag{6}$$

式中,τ为时间平移不变量;f为频率;d_i为采样时间标记,$d_i=\sin e_i$;N为采样个数。为了解决水位变化场景中一段SNR残差序列对应一个主要频率的不合理问题,利用高度角滑动窗口或时间滑动窗口将一段SNR残差序列划分为几段窗口的LSP方法,因此WinLSP被提出,使得一段SNR残差序列中能得到多个主要频率,进而反演反射高度值[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SNR残差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SNR残差序列的时变频率,提高监测精度。小波系数的计算式为:

$$\psi_{b,a}(d_i)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{d_i-b}{a}\right) \tag{7}$$

$$W(b,a)=\left\langle R_{\mathrm{SNR}},\psi_{b,a}(d_i)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\Delta\sin(e_i)\sum_{i=1}^{N}R_{\mathrm{SNR}}\bar{\psi}\left(\frac{i\Delta d_i-b}{a}\right) \tag{8}$$

式中,〈 〉表示内积;$\psi(d_i)$表示母小波函数;$\bar{\psi}(\ )$表示$\psi(\ )$的共轭函数;$\psi_{b,a}(d_i)$表示子小波函数;$W(\ )$表示小波系数;a为缩放因子,决定母小波的宽窄变化;b为平移参数,决定母小波的位置。小波分析能识别出一段SNR残差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

为了充分利用多个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能够反映水位变化特征的检索点,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t_k的水位值H_{wj}可以用基准水位值H_{w0}表示,计算式为:

$$H_{wj}=H_{w0}+(t_k-t_0)\dot{h} \tag{9}$$

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q个测站有S_q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]:

$$\bar{h}_{m,S_m}=-H_{w0}+\left[\frac{\tan\left(e_{m,S_m}\right)}{\dot{e}_{m,S_m}}-(t_{m,S_m}-t_0)\right]\dot{h}+H_{Am} \tag{10}$$

式中,$\bar{h}_{m,S_m}$、$\tan\left(e_{m,S_m}\right)$、$\dot{e}_{m,S_m}$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、高度角的正切值及其变化率;H_{Am}代表第m个测站的天线相位中心绝对高度。为了便于讨论,式(10)可以简写为:

$$\bar{L}=BX+d \tag{11}$$

式中,$\bar{L}$为观测值矩阵;B为系数矩阵;未知参数向量$X=\begin{bmatrix}H_{w0}\\ \dot{h}\end{bmatrix}$;$d$为常数矩阵。水位反演观测值$\bar{L}$之间相互独立,以LSP方法分析结果为例,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:

$$P=\mathrm{diag}(p_{1,1},p_{1,2},\cdots,p_{1,S_1},\cdots,p_{m,1},p_{m,2},\cdots,p_{m,S_m}) \tag{12}$$

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:

$$\begin{cases}X^{(0)}=\left[B^{\mathrm{T}}PB\right]^{-1}\left[B^{\mathrm{T}}P(\bar{L}-d)\right]\\ V^{(0)}=BX^{(0)}-\left(\bar{L}-d\right)\\ \sigma^{(0)}=\sqrt{\dfrac{V^{(1)\mathrm{T}}PV^{(1)}}{S-2}}\end{cases} \tag{13}$$

式中,S为水位反演结果的总和;$\boldsymbol{X}^{(0)}$、$\boldsymbol{V}^{(0)}$、$\sigma^{(0)}$分别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],计算式为:

$$\bar{p}_i=\begin{cases}p_i, |u_i|\leqslant k_0\\ p_i\cdot\dfrac{c_0\left(c_1-|u_i|\right)^2}{|u_i|\left(c_1-c_0\right)^2}, k_0<|u_i|\leqslant k_1\\ 0, k_1<|u_i|\end{cases} \tag{14}$$

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,它是观测值改正值和中误差的比值;k_0、k_1为相应的调和系数,其取值通常为$k_0=1$、$k_1=2.5\sim3.0$[22]。本文采用不同组合的调和系数计算,结果差异不大,故选取调和系数为$k_0=1$、$k_1=2.5$。

如式(14)所示,标准化残差小于k_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:

$$|v_i^w|\leqslant\varepsilon \tag{15}$$

式中,v_i^w为第i个参数第w次迭代的残差;ε为终止阈值,在本文实验中设置为0.001 m。

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:(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;(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;(3)输入精确的测站高,统一不同测站的水位基准;(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。

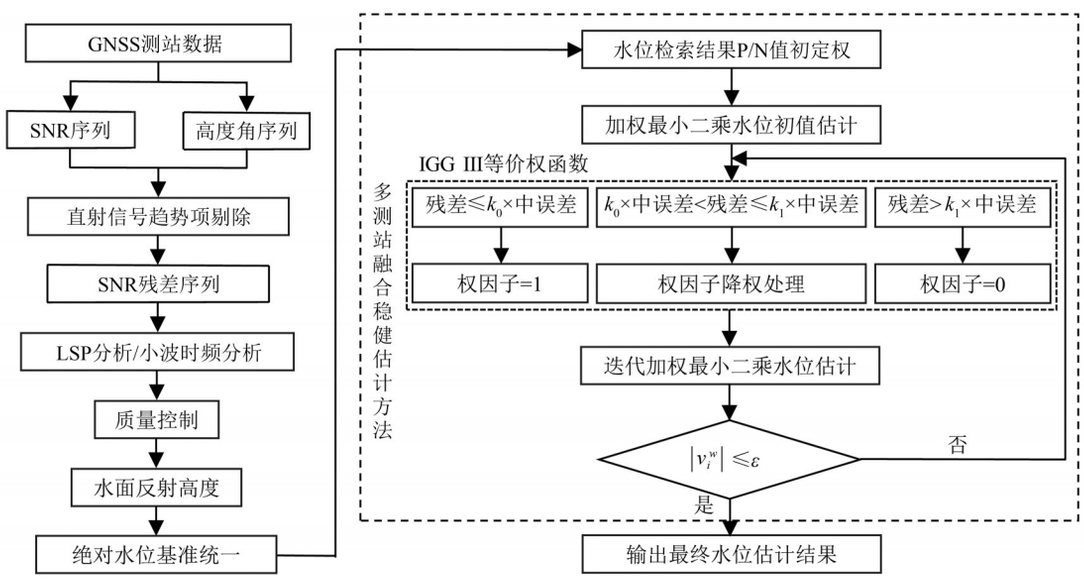


图2 多测站融合的GNSS-IR水位监测方法流程图

Fig. 2 Flowchart of GNSS-IR Water Level Monitoring Method with Multi-station Fusion

2 水位监测实验与结果

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m^3,正常蓄水位1 492.5 m,死水位1 467 m,通过最大消落深度25.5 m的库内水蓄放实现能量转移,成为山西电网不可或缺的调峰电源。本文实验选取2018年1月西龙池上水库GPS变形监测系统3个监测站(S071、S171、S191)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,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5 s。为了对比分析多测站融合反演的水位结果,本文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，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基准进行验证。

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，筛选可用的SNR数据，得到有效的频率识别结果。预处理流程主要包括：

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[4-5]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15 m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。

表1　测站S191、S171、S071的基本信息

Table 1　Basic Information of Stations S191, S171, and S071

测站	位置	水面反射高度范围/m	方位角范围/(°)	高度角范围/(°)
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]

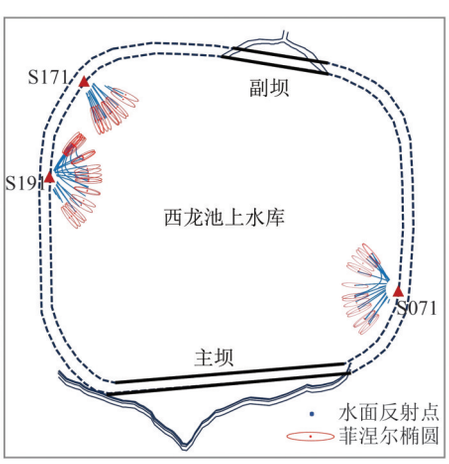


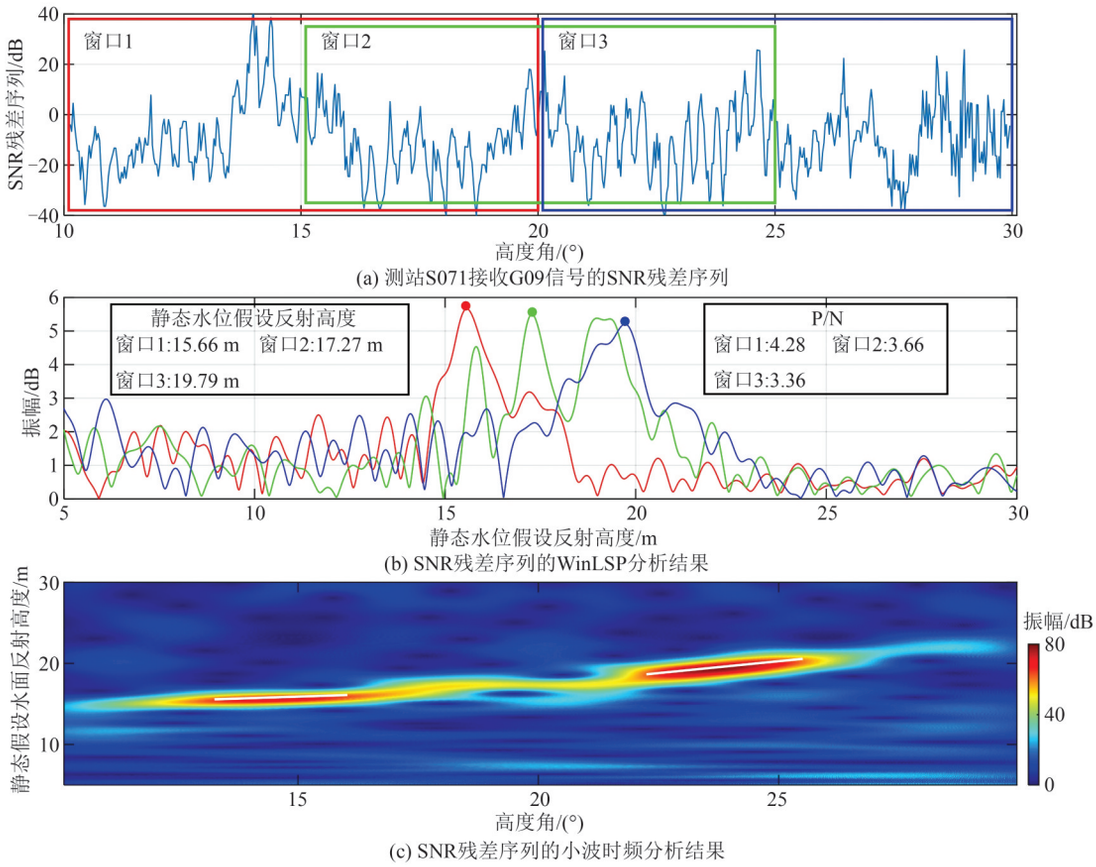
图3　西龙池上水库监测站分布图

Fig. 3　Distribution of Monitoring Stations in the Upper Reservoir of Xilongchi

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P/N和频谱幅值两个指标进行质量控制，其中P/N阈值设置为3，频谱幅值阈值设置为5 dB。

2.2　实验结果分析

首先，采用不同的方法识别SNR序列频率，以测站S071在2018年年积日（day of year，DOY）16采集的G09卫星L1频段的升轨低高度角SNR残差序列为例。图4(a)绘制了SNR的残差序列图，可以看出序列具有显著的振荡特征。为了确保从各段SNR残差序列获得正确的周期信息，采用WinLSP方法选择5°高度角窗口的滑动增幅来截取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WinLSP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 dB，P/N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 dB，P/N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 dB，P/N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。同样地，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4(c)可以看出：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



(a) 测站S071接收G09信号的SNR残差序列

(b) SNR残差序列的WinLSP分析结果

(c) SNR残差序列的小波时频分析结果

图4 2018年DOY 16测站S171采集的G09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 G09 Satellite Collected at DOY 16 Station S171 in 2018

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,因此后续的结果基于WinLSP结果进行计算。

图5为测站S191、S171和S071经过质量控制之后WinLSP方法反演的静态水位假设瞬时高度,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量分别为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时—13时,测站S171每天的2时—3时、6时—8时、11时—14时、17时—19时,测站S071每天11时—15时、16时—17时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时—13时反演点数量较少。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1.93 m,测站S171的反演结果与水位计实测结果的标准差为1.92 m,测站S191的反演结果与水位计实测结果的标准差为1.76 m,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5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。

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1 h,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最终水位反演结果。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

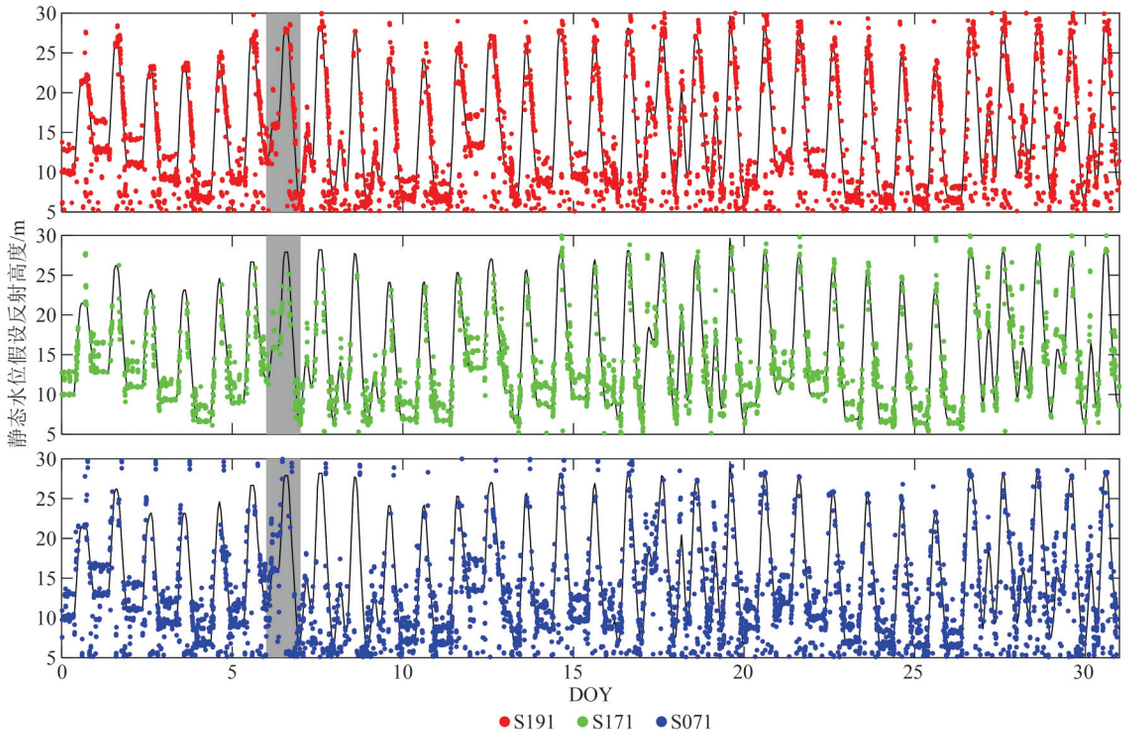


图5　测站S191、S171和S071的水面反射高度

Fig. 5　Reflection Heights from Inversions at Stations S191, S171 and S071

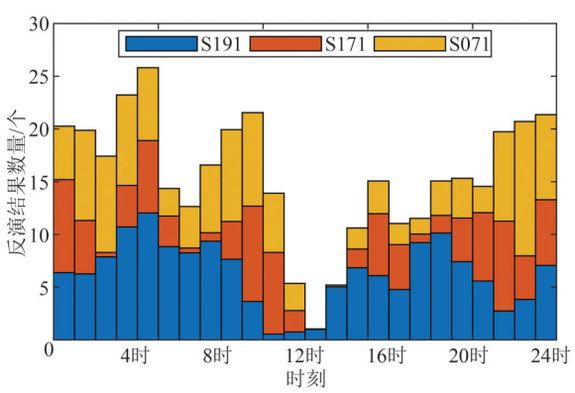


图6　不同测站各时段反演结果的数量

Fig. 6　Statistics on the Number of Inversion Results by Time Period at Different Stations

秩亏，设置所有测站的反演点数量大于3个时，才进行后续处理。以2018年DOY 7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不足，DOY 7的0时—1时、12时—13时和15时—16时没有得到最终水位反演结果。通过图7还可以得到，2018年DOY 7多测站融合的水位反演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，同时引入单位权中误差σ作为精度评价因子。本文统计了融合结果的单位权中误差分布，如表2所示，所有结果的中误差均值为0.26 m，在结果分析中，利用这一指标剔除最终结果中精度较差的结果。

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分别为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0.024～0.1之间，潮差最大为7.72 m的台站反演结果标准差为43 cm。GNSS-IR反演结果标准差较大的主要原因为大幅度快速变化的水面导致水面粗糙度增加，使得反射信号功率和信噪比振荡幅度下降。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，本文相对精度为0.06的水位监测结果能够较为真实地反映水位变化特征。

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的关系，相关性系数

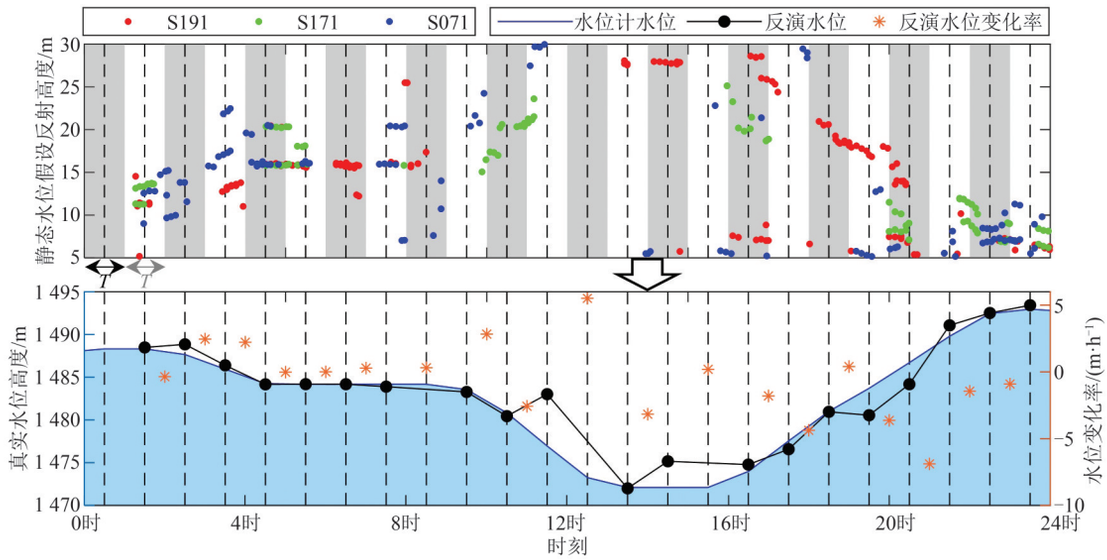


图7 西龙池2018年DOY 7的多测站融合水位结果

Fig. 7 Multi-station Fusion Water Level Results for Xilongchi in DOY 7, 2018

表2 最终水位反演结果的单位权中误差分布

Table 2 Distribution of Errors in Unit Weights for Final Result

统计项	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

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映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。

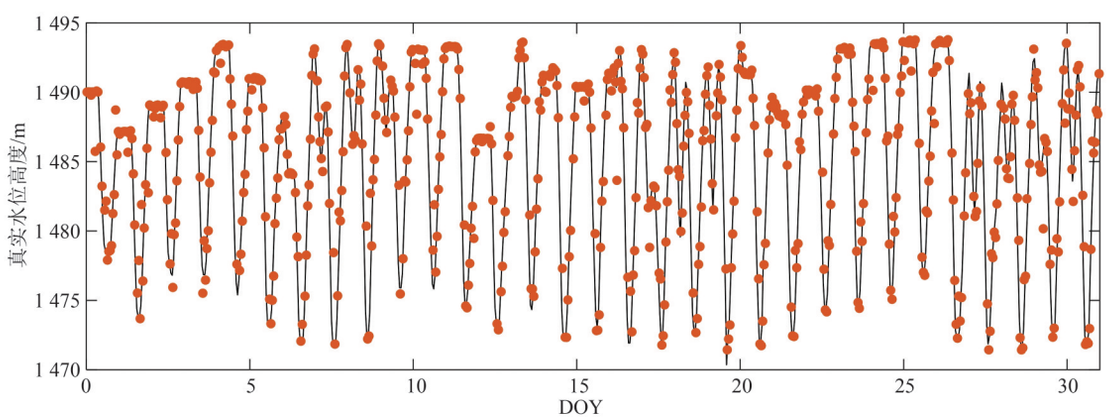


图8 2018年1月水位计测量与多测站融合反演水位时间序列

Fig. 8 Time Series Diagram of Multi-station Fusion Inversion Results and Water Level Gauge Measurements for January 2018

3 结 语

本文提出了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1 h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

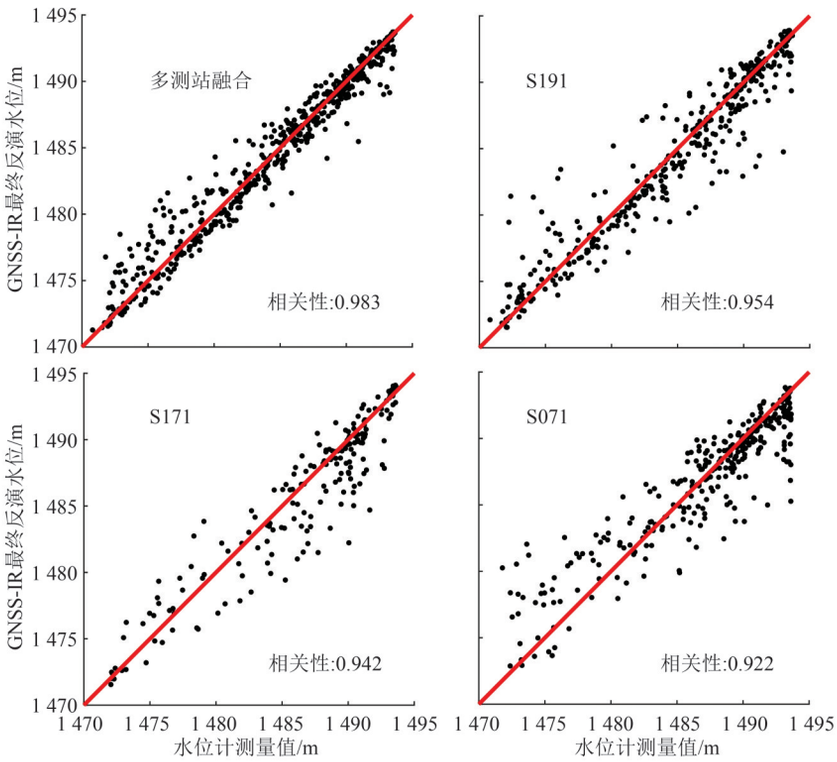


图9　多测站融合和单测站S191、S171、S071反演结果与水位计实测结果关系图

Fig. 9　Correlation of Multi-station Fusion, S191, S171, and S071 Inversion Results with Water Level Gauge Measurements

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] SANTAMARÍA-GÓMEZ A, WATSON C. Remote Leveling of Tide Gauges Using GNSS Reflectometry: Case Study at Spring Bay, Australia[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 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] 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(1): 122-130.
WANG Xiaolei, YANG Zeyi, HE Xiufeng, 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.

[7] 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(2): 195-205.
WANG Zeming, LI Haojun, SUN Yafeng. Robust Estimation of GNSS-R Tide Level Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(2): 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 L, HE X F, 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 D, JIN S G, 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: 4208510.

[11] 王笑蕾. 地基GNSS近地空间水环境遥感监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
WANG Xiaolei. Ground GNSS Remote Sensing for Near-Surface Water Environmental Parameters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.

[12] LIMSUPAVANICH N, GUO B F, FU X M. Application of RNN on GNSS Reflectometry Sea Level Monitoring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2022, 43(10): 3592-3608.

[13] 赵涛, 叶世榕, 罗敬琪, 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(1): 68-76.
ZHAO Tao, YE Shirong, LUO Xinqi, 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.

[14] PAN Y L, REN C, LIANG Y J, 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 S, 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 L, ZHANG Q, ZHANG S C. Sea Level Estimation from SNR Data of Geodetic Receivers Using Wavelet Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2018, 23(1): 6.

[19] LARSON K M, NIEVINSKI F G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 41-52.

[20] WANG X L, ZHANG Q, ZHANG S C. Water Levels Measured with SNR Using Wavelet Decomposition and Lomb - Scargle Periodogram[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 22.

[21] HOU J H, WANG N Z, HE K F, et al. Comparative Analysis of GNSS-IR Sea-Level Retrieval Methods[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5): 055116.

[22] 朱本鑫, 张胜凯, 肖峰, 等. 基于ICESat-2卫星测高数据的东南极Totten冰川流域高程变化研究[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(4): 48-53.
ZHU Benxin, ZHANG Shengkai, XIAO Feng, et al. Research on Elevation Change of the Totten Glacier Drainage Basin in East Antarctica Based on ICESat-2 Satellite Altimetry[J]. *Journal of Geomatics*, 2025, 50(4): 48-53.

[23] LÖFGREN J S, HAAS R, SCHERNECK H G. Sea Level Time Series and Ocean Tide Analysis from Multi-path Signals at Five GPS Sites in Different Parts of the World[J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 80: 66-80.