引文格式:吴子恒,郭斐,张治宇.双天线多系统实时厘米级GNSS-R水面测高方法及性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(6):1130-1137.DOI:10.13203/j.whugis20250035

Citation: WU Ziheng, GUO Fei, ZHANG Zhiyu. Dual-Antenna Multi-system Real-Time Centimeter-Level GNSS-R Water Surface Altimetry Method and Performance Analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(6): 1130-1137.DOI:10.13203/j.whugis20250035

双天线多系统实时厘米级GNSS-R水面测高方法及性能分析

吴子恒[1] 郭 斐[1] 张治宇[1]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:全球导航卫星系统反射(global navigation satellite system-reflectometry,GNSS-R)是一种被动式遥感技术,具有高时空分辨率、低成本等优势。针对传统岸基单天线干涉法在小尺度水域测高精度低、连续性差的问题,提出一种基于相对定位原理的上下视双天线实时厘米级GNSS-R水面测高方法。通过多系统组合解基线向量的方式,反演水面高度变化,并在实验场开展了长期连续运行测试。结果表明,上下视天线的模糊度平均固定率达到93.97%,测高均方根误差平均为2.39 cm,相较于传统单天线GNSS-R测高有显著优势。此外,对比分析了单系统和多系统组合测高性能,采用多系统组合的测高方法相较于使用单北斗卫星导航系统和GPS+Galileo,在测高连续性上分别提升了85.1%和209.2%,在测高精度上分别提升了17.9%和69.5%,为中小尺度水域的实时连续高精度水位变化监测提供了新的技术途径。

关键词:GNSS-R;水面高度反演;多系统GNSS;反射信号;实时

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-14

DOI:10.13203/j.whugis20250035 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1130-08

Dual-Antenna Multi-system Real-Time Centimeter-Level GNSS-R Water Surface Altimetry Method and Performance Analysis

WU Ziheng[1] *GUO Fei*[1] *ZHANG Zhiyu*[1]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: Global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R), as a passive bistatic radar configuration, offers unique advantages in high spatiotemporal resolution, cost efficiency, and global signal availability. These merits have propelled its widespread applications across marine remote sensing (e.g., sea surface altimetry, wind speed retrieval) and terrestrial monitoring (e.g., soil moisture estimation, ice sheet characterization). Particularly, GNSS-R-based water surface altimetry has garnered significant scientific attention due to its capacity for non-contact, all-weather monitoring, with extensive investigations conducted globally on coastal zones, inland lakes, and river systems. While existing studies have demonstrated its technological potential, critical challenges persist in conventional shore-based single-antenna implementations, including suboptimal accuracy (typically decimeter-level) and discontinuous observations under dynamic small-scale water conditions. **Methods**: We present a real-time centimeter-level GNSS-R water surface altimetry method employing a top-bottom dual-antenna geometry based on relative positioning principles. By resolving baseline vectors through multi-GNSS constellation combinations (BeiDou satellite navigation system (BDS)/global positioning system (GPS)/Galileo) and leveraging the geometric relationship between the receiver antennas and the water surface, the system achieves continuous inversion of

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB3910005);国家自然科学基金(42425003);中央高校青年教师科研创新能力支持项目(SRICSPYF-ZY2025002)。

第一作者:吴子恒,硕士,主要从事GNSS反射技术及其应用研究。zihengwu@whu.edu.cn

通信作者:郭斐,博士,教授。fguo@sgg.whu.edu.cn

height variations. The methodology was rigorously validated through 12-month continuous operational trials at an instrumented test site. **Results:** The dual-antenna system achieved a 93.97% mean ambiguity resolution success rate, with altimetric performance characterized by a root mean square error of 2.39 cm and standard deviation of 2.06 cm. These metrics demonstrate the system's capability for stable long-term monitoring in small-to-medium water bodies, outperforming traditional single-antenna approaches. Multi-constellation integration (BDS/GPS/Galileo) enhanced temporal continuity by 85.1% and 209.2% relative to standalone BDS and GPS+Galileo systems respectively, while simultaneously improving altimetric precision by 17.9% and 69.5%. The combined configuration further reduces environmental dependency for equipment deployment and enhances spatiotemporal resolution in spatially constrained scenarios. **Conclusions:** The proposed framework enables cost-effective water level monitoring through minimal adaptation of existing GNSS infrastructure. Field validation under meteorological extremes (e.g., storm events) confirms operational robustness, positioning this technology as a viable solution for precision hydrometry in reservoirs, rivers, and lakes.

Key words: GNSS-R; water surface altimetry; multi-system GNSS; reflected signal; real-time

随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)技术的发展,各国学者开始对GNSS系统的反射信号开展研究,证明了GNSS反射测量(GNSS-reflectometry,GNSS-R)技术的可行性[1],并将GNSS-R技术用于水平面高度反演,取得了较好的效果。经过近30年的发展,GNSS-R技术已经广泛用于水面测高[2,3]、海面粗糙度[4]、海面波高[5]、海面盐度[6]、海面风速[7,8]和海冰覆盖[9]等海洋遥感领域,以及土壤湿度和温度[10,11]、土壤盐分[12]、陆地植被覆盖[13]、积雪厚度[14]和地表地形研究[15]等陆地遥感领域。

GNSS-R水面测高技术是当前国内外GNSS-R技术研究的热点领域之一,具有成本低、时空分辨率较高、观测时段不受限制和信号源丰富等优势。传统的水面测高技术包括卫星雷达测高和验潮站等存在着成本高、建设周期长等问题。而GNSS-R水面测高技术的出现弥补了传统水位测量技术的空缺[16],为水位监测提供了更多的选择。目前,GNSS-R水面测高技术存在着两种技术路线:利用直反射信号的干涉信息[17-20]或使用信号传播延迟的几何关系[21-24]反演反射面信息,在GNSS-R水面测高领域均有广泛研究和应用。

GNSS-R干涉测高技术是利用直射信号和反射信号在接收机内发生干涉,对干涉产生的功率波形进行处理计算,获取传播路径的时间延迟,从而计算反射点到天线的垂直距离[25]。LARSON等[26]使用了单天线的GPS接收机在海岸边进行了GNSS-R海平面高度反演实验,与验潮站相比其结果的均方根(root mean square,RMS)达到了5 cm以下,证明了使用GNSS-R进行持续的海平面观测的可行性。LÖFGREN等[27]利用分布在全球的5个GNSS观测站的信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)数据进行了全球海平面的高度变化反演,其反演结果和验潮站数据相关系数(R)值达到了0.89～0.99,精度达到6.2～43 cm。JIN等[28]首次使用了北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)的SNR数据进行了海面高度反演,获得的反演结果和验潮站结果的R值达到0.83～0.91,均方根误差(RMS error,RMSE)达到了0.6 m。HOLDEN等[29]利用SNR方法采用10年的GNSS观测数据对湖面水位变化进行了持续监测,其结果精度达到了12 cm。

另一种GNSS-R测高技术分支则是使用两根天线分别接收直射信号和反射信号,根据接收机和水面的几何关系,利用伪距码、载波相位观测值等观测量反演出水面高度[30,31]。目前常用的基于几何关系的GNSS-R测高技术是先提取出一组观测质量较好的完整卫星弧段,构建相应的观测方程求解模糊度,再代入测站的几何关系确定水面到反射天线的距离。MARTIN-NEIRA等[2]在桥上基于GNSS-R载波相位观测值进行了水面高度反演实验,其水面高度反演结果精度达到了10 cm。王娜子等[32-33]研究了岸基双天线条件下的GNSS-R逐历元单差和双差算法,以及宽巷组合的方式对双天线岸基GNSS-R观测方程进行组合,对平静湖面进行测高,精度均达到了4 cm。ZHANG等[34]利用了BDS的地球静止轨道卫星的反射信号进行了沿海的载波相位海面测高实验,其结果精度达到了3 cm。HE等[35]开展了船载GNSS-R测高实验,使用频谱分析的方式帮助载波相位模糊度解算,结果RMSE达到了3.0 cm。然而,上述方

法主要是从观测数据中选取部分相同系统共视卫星的完整弧段进行解算,导致不同系统测高结果一致性较差,且难以实现实时处理。因此,本文提出一种基于相对定位原理的上下视双天线实时厘米级GNSS-R水面测高方法,整体求解直反射天线之间的基线向量,实现对水面高度的实时连续观测,并开展了水面连续测高实验,评估本文方法的连续测高性能。

1 双天线实时厘米级GNSS-R水面高度反演方法

双天线GNSS-R方法使用两根接收天线分别接收GNSS直射信号和反射信号,其中直射天线采用右旋圆极化方式,反射天线采用左旋圆极化方式。双天线GNSS-R几何关系如图1所示。

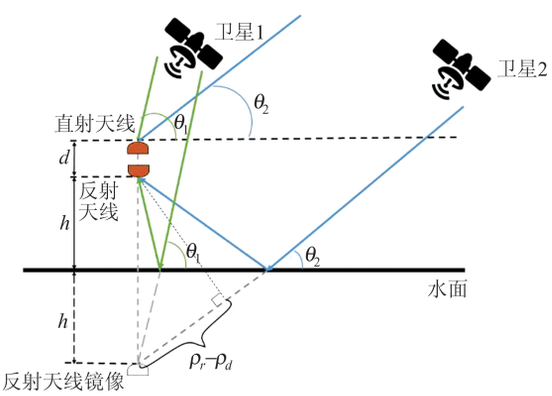


图1 双天线GNSS-R水面测高几何关系

Fig. 1 Dual-Antenna GNSS-R Water Surface Altimetry Geometry

图1中的水面反射可近似看作镜面反射,左旋天线经过水面可以投影出一个虚拟位置,因此其几何关系可表示为:

$$\rho_r-\rho_d=(2h+d)\sin\theta \tag{1}$$

式中,ρ_r和ρ_d分别表示反射信号和直射信号经过的路径长度;h表示左旋天线相位中心到水面的垂直距离;d表示两根天线相位中心之间的垂直距离;θ表示卫星的高度角。

根据直射信号和反射信号所经过的路径延迟,可构建伪距和载波相位双差观测方程:

$$\Delta\nabla P_i=\Delta\nabla\rho_i+c\delta_p+\Delta\nabla\sigma_{\text{trop}}+\Delta\nabla\sigma_{\text{ion}}+\Delta\nabla n_{P_i} \tag{2}$$

$$\lambda_1\Delta\nabla\varphi_i=\Delta\nabla\rho_i+c\delta_\varphi+\Delta\nabla\sigma_{\text{trop}}-\Delta\nabla\sigma_{\text{ion}}-\lambda_1\Delta\nabla N_i+\Delta\nabla n_{\varphi_i} \tag{3}$$

式中,$\Delta\nabla$表示双差计算算子;ρ_i表示直射信号和反射信号的路径差;P_i和φ_i分别表示当前时刻的伪距和载波相位观测值;c为光速;δ_p和δ_φ分别表示伪距和相位的时延;λ_1表示信号波长;$\Delta\nabla\sigma_{\text{trop}}$和$\Delta\nabla\sigma_{\text{ion}}$分别表示对流层(troposphere,trop)和电离层(ionosphere,ion)的延迟误差;n表示多路径效应和随机噪声;N_i表示整周模糊度。由于直射和反射天线之间的距离很短,其传播路径基本一致,因此,可忽略电离层和对流层延迟的影响,可将式(2)和式(3)简化为:

$$\Delta\nabla P_i=\Delta\nabla\rho_i+\Delta\nabla n_{P_i} \tag{4}$$

$$\lambda_1\Delta\nabla\varphi_i=\Delta\nabla\rho_i-\lambda_1\Delta\nabla N_i+\Delta\nabla n_{\varphi_i} \tag{5}$$

组成双差观测方程后,首先使用宽窄巷组合和电离层残差组合对原始卫星观测数据进行周跳探测和修复。其次使用Kalman滤波模型对上述观测方程进行模糊度解算,在k时刻的状态方程包括当前时刻三维基线向量$\boldsymbol{b}_k$以及双差整周模糊度$N_{\Delta\nabla}$,可表示为:

$$\boldsymbol{X}_k=\left[\boldsymbol{b}_k^{\mathrm{T}}\ N_{\Delta\nabla}^{i,1}\cdots N_{\Delta\nabla}^{i,i+1}\cdots N_{\Delta\nabla}^{i,n}\right]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

使用Kalman滤波逐历元求解状态方程中的位置参数,得到整周模糊度浮点解。使用最小二乘模糊度去相关平差(least-squares ambiguity decorrelation adjustment,LAMBDA)方法对模糊度进行固定,获得模糊度固定解并求解出$\boldsymbol{b}_k$[36]。取基线向量中的垂直方向分量等于式(1)中的$2h+d$,即可计算出水面高度的值。数据处理流程如图2所示。

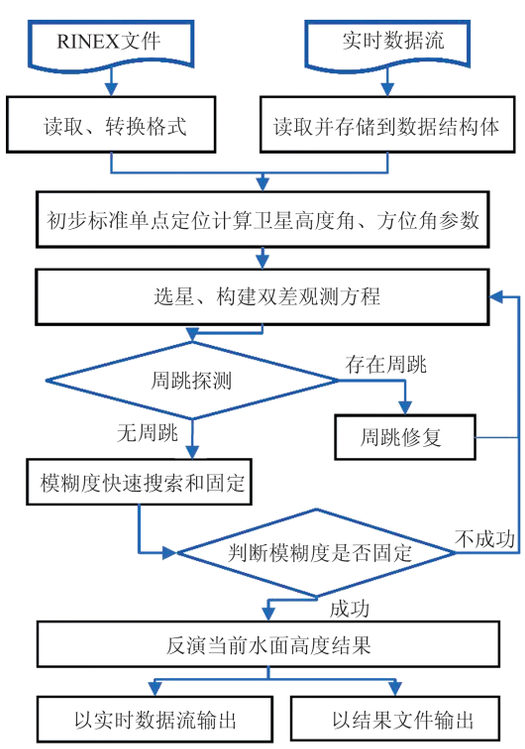
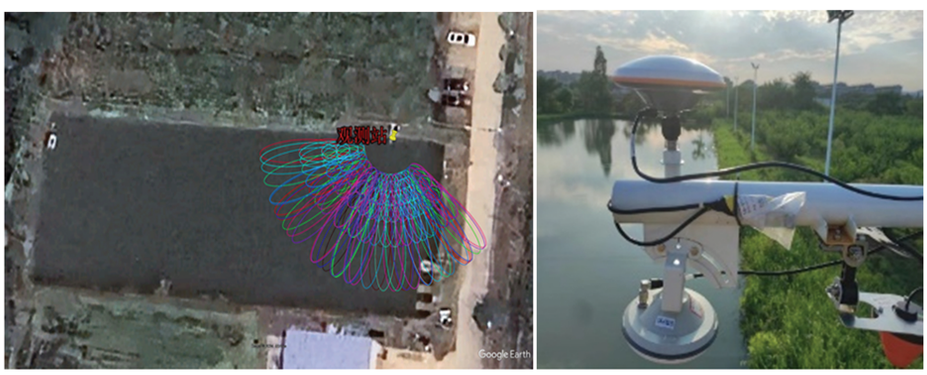


图2 GNSS-R水面测高算法流程图

Fig. 2 Flowchart of GNSS-R Water Surface Altimetry Algorithm

2　水面测高实验与结果

为了验证上文提出的测高方法的性能，本文开展了一组双天线实时厘米级 GNSS-R 连续测高实验。实验地点设置在中国江苏省无锡市某实验场内，实验场地开阔，没有树木、房屋等遮挡。实验水面为一个约 200 m×50 m 的长方形封闭水塘，GNSS-R 接收设备安装在距离水面约 4 m 的位置。采集设备包括一根右旋圆极化的上视天线和一根左旋圆极化的下视天线，分别接收卫星直射信号和反射信号，双天线 GNSS 接收机采集数据，数据处理芯片为北斗星通 UM982 板卡，并将观测文件实时存储到数据服务器上。同时，实验布置了一组毫米级雷达水位计，将其结果作为实验的参考真值。测站位置以及 GNSS-R 接收设备如图 3 所示。



(a) 实验设备布设环境　　(b) GNSS-R接收设备

图 3　实验设备布设环境和 GNSS-R 接收设备示意图

Fig. 3　Diagram of Experimental Equipment Setup Environment and GNSS-R Receiving Equipment

在图 3 中，利用初步实验数据绘制了当前测站的菲涅尔反射区[37]，根据菲涅尔反射区在卫星影像上的覆盖情况将反射信号的方位角阈值设置为 100°～270°，截止高度角设置为 25°，以确保反射信号均来自于水面上的反射点，防止来自不同的反射面上的反射信号对实验产生干扰。相关处理策略如表 1 所示。

表 1　GNSS-R 水面测高处理策略

Table 1　Processing Strategy of GNSS-R Altimetry

处理项	处理策略
参数估计方法	卡尔曼滤波
观测方差	高度角随机模型
残差检验	4σ
采样间隔/s	1
周跳探测与修复	宽窄巷组合＋电离层残差组合
卫星轨道信息	广播星历
模糊度固定方法	LAMBDA 方法
模糊度固定模式	连续
模糊度固定比值	2
截止高度角/(°)	25
方位角/(°)	100～270

在实验设备连续运行一段时间之后，本文选取了 2024-02-24—2024-02-29 年积日为 55—60 连续 6 d 的观测数据作为实验样例，使用相同的对照条件进行一组单双天线水面测高对比实验。单天线测高方法使用经典的 Lomb-Scargle 谱分析模型，并采取稳健回归策略反演水面高度[38]。其测高结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，在一段时间的初始化后，双天线实时厘米级 GNSS-R 水面测高方法所获得的测高结果的波动范围基本在 10 cm 以内，高度结果相对稳定，与毫米波雷达测高结果相比无明显系统偏差。而单天线结果时间分辨率明显不足，且精度相对较差。对单双天线的测高结果精度进行分析，并统计双天线测高方法的固定率，如表 2 所示。双天线实时水面测高方法的结果标准差（standard deviation，STD）平均值为 2.06 cm，RMSE 平均值为 2.39 cm，初始化时间平均值为 1.34 min，满足实时测高的要求。固定率平均可以达到 93.97%，验证了双天线方法可以实现对中小尺度水体水面高度的长时间持续稳定监测。单天线的测高结果 STD 平均值为 16.66 cm，RMSE 平均值为 14.62 cm，其误差远大于双天线测高法，主要原因是单天线干涉方法仅能利用低高度角数据，导致反射点落在水面上的有效观测值不足，测高效果不佳。

为了进一步探究不同 GNSS 系统数据对本文方法的贡献和影响，使用了 2023-12-12 年积日 316 的实测数据，统计了不同卫星系统的卫星数量，如图 5 所示。由于 GPS 和 Galileo 的卫星数量

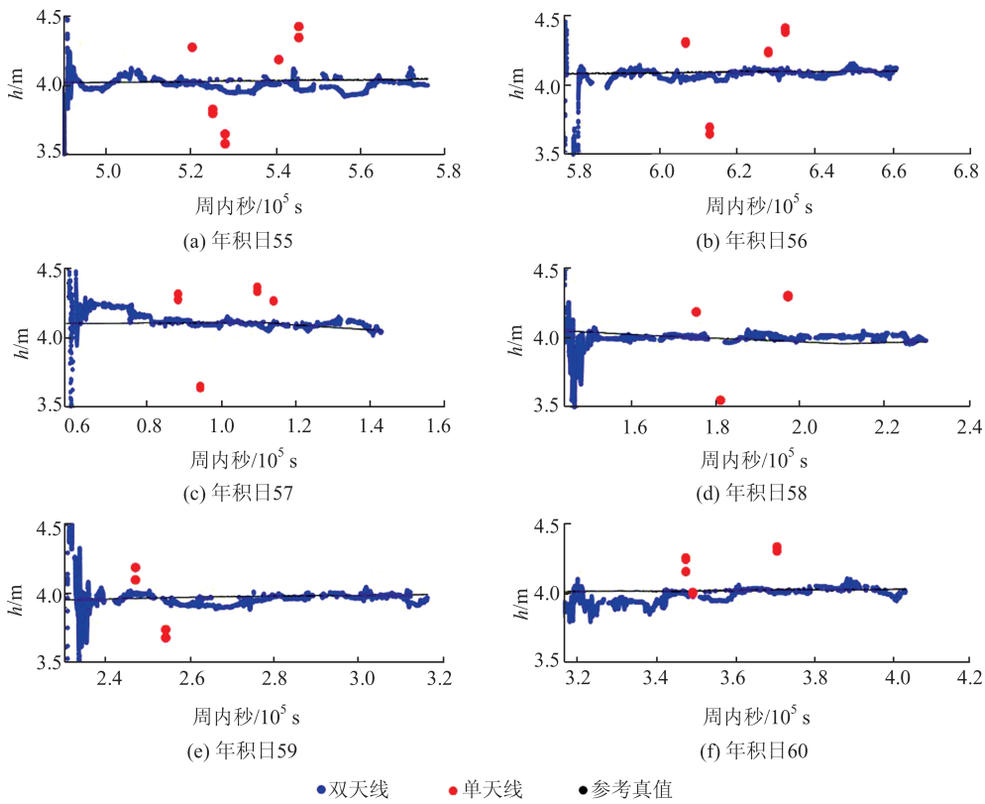


图4 单/双天线GNSS-R水面测高结果

Fig. 4 Single- and Dual-Antenna GNSS-R Water Surface Altimetry Results

表2 单/双天线GNSS-R水面测高结果误差及固定率

Table 2 Single- and Dual-Antenna GNSS-R Water Surface Altimetry Result Error and Fix Rate

年积日	双天线				单天线	
	STD/cm	RMSE/cm	初始化时间/min	固定率/%	STD/cm	RMSE/cm
55	2.98	3.15	0.87	91.75	16.74	18.64
56	1.88	1.96	1.63	95.11	14.48	13.22
57	1.95	2.06	1.15	94.64	19.22	15.86
58	2.04	2.35	1.23	93.88	14.69	16.41
59	2.09	2.21	1.80	94.01	11.87	11.49
60	2.43	2.58	1.35	94.41	10.95	12.10
平均值	2.06	2.39	1.34	93.97	16.66	14.62

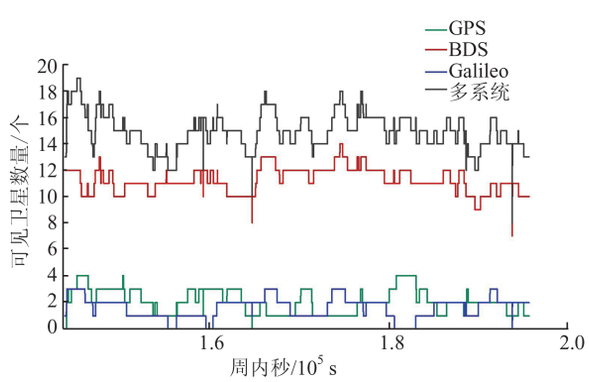


图5 不同系统可见卫星数量

Fig. 5 Numbers of Visible Satellites in Different Systems

不足以单独解算测高结果,因此本文分别使用GPS+Galileo双系统、BDS单系统以及GPS+Galileo+BDS多系统3种不同的卫星系统组合在解算方法和处理策略均相同的情况下,进行GNSS-R水面高度反演实验,测高结果如图6所示。图6中黑色散点为雷达测高仪监测数据插值所获得的参考真值。结合图5和图6可以发现,图6中存在的测高结果中断部分是由可见卫星减少造成的,且该区域BDS的可用卫星数量多于GPS+Galileo,因此使用BDS系统的测高结果明显优于GPS+Galileo。统计图6中各系统组合测高结果的精度以及输出固定解的历元数,得到的结果见表3。可以看出,在相同的测量时间段,多系统测高结果的固定解数量增加到14 512个,可以认为多系统组合测高的连续性相较于BDS和

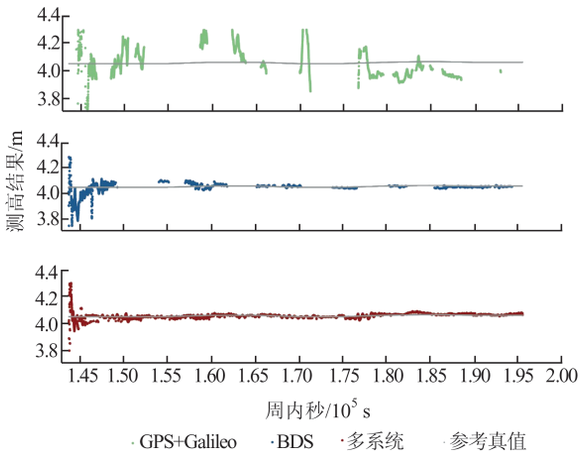


图 6　不同系统组合下的 GNSS-R 水面测高结果

Fig. 6　GNSS-R Water Surface Altimetry Results with Different System Combinations

表 3　不同系统组合下的 GNSS-R 水面测高结果精度分析

Table 3　Accuracy Analysis of GNSS-R Water Surface Altimetry Results Under Different System Combinations

系统组合	RMSE/cm	STD/cm	固定解历元数/个
GPS+Galileo	8.40	7.74	4 694
BDS	3.12	2.96	7 838
多系统	2.56	2.35	14 512

GPS+Galileo 分别提升了 85.1% 和 209.2%。多系统的测高结果 RMSE 为 2.56 cm，相较于 BDS 和 GPS+Galileo 分别提升了 17.9% 和 69.5%，证明了使用多系统的水面测高方式能够有效缓解单系统观测量少的场景下的测高问题，降低了低成本设备对安装环境的依赖，可以在特定环境下提高 GNSS-R 水面测高的时空分辨率。

为了进一步验证本文方法的可靠性，探究在强风、降水等复杂条件下的可用性，选取中国湖北省武汉市东湖开放水域场景进行进一步实验，实验当天天气为大雨转小雨，风力 5～7 级，对数据进行解算，水面测高结果如图 7 所示。可见本文方法实时测高在较为恶劣的天气环境下，虽然出现了较为频繁的解算中断现象，但仍然对水位变化有较好的响应，进一步证明了本文方法在不同应用场景下的稳定性和可靠性。

3　结　语

本文面向内陆水体的精细水面监测的需求，对 GNSS-R 水面测高方法展开研究，针对传统岸基单天线干涉法在小尺度水域测高精度低、连续性差的问题，提出一种基于相对定位原理的上下视双天线实时厘米级 GNSS-R 水面测高方法，并

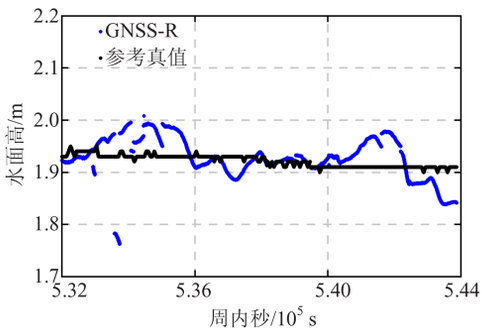


图 7　强风降雨条件下的水面测高结果

Fig. 7　GNSS-R Water Surface Altimetry Results Under Strong Wind and Rainfall Conditions

开展了一组连续测高实验，结论如下：

1）使用双天线实时 GNSS-R 水面测高方法对连续 6 d 的测高数据进行解算，其测高结果 STD 平均值为 2.06 cm，RMSE 平均值为 2.39 cm，固定率平均值达到 93.97%，可以满足对中小尺度水体水面高度的长时间持续稳定监测。相较于单天线测高方法，本文方法在小尺度水面上时空分辨率有显著提升。

2）探究了不同系统组合模式下的测高性能。多系统组合模式相较于 GPS+Galileo 双系统模式和 BDS 单系统的连续性分别提升了 85.1% 和 209.2%，测高精度分别提升了 17.9% 和 69.5%，证明了组合模式可以降低设备对安装环境的依赖，在特定环境下提高 GNSS-R 水面测高的时空分辨率。

随着 GNSS 变形监测站在水库、湖泊等水文监测领域的广泛建设并投入使用，本文提出的 GNSS-R 测高方法仅需在 GNSS 监测站的基础上稍作改动即可投入使用，进一步压缩了成本。同时，初步验证了本文方法在强风、降水等复杂水域环境下的实时测高能力，为水库、河流、湖泊等中小尺度内陆水域的高度变化监测提供了更多的选择。

参　考　文　献

[1] 刘经南，邵连军，张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2007，32(11)：955-960.
LIU Jingnan，SHAO Lianjun，ZHANG Xunxie. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2007，32(11)：955-960.

[2] MARTIN-NEIRA M，CAPARRINI M，FONT-ROSSELLO J，et al. The PARIS Concept：An Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry

Using GPS Reflected Signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 142-150.

[3] 贺匀峤. 高精度GNSS-R海面测高基带信号处理研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
HE Yunqiao. High Precision GNSS-R Sea Surface Altimetry Based and Signal Processing Research[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022.

[4] HOSEINI M, SEMMLING M, NAHAVANDCHI H, et al. On the Response of Polarimetric GNSS-Reflectometry to Sea Surface Roughness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(9): 7945-7956.

[5] LI Z, GUO F, ZHANG X H, et al. Analysis of Factors Influencing Significant Wave Height Retrieval and Performance Improvement in Spaceborne GNSS-R[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 64.

[6] BAN W, ZHANG K F, YU K G, et al. Detection of Red Tide over Sea Surface Using GNSS-R Spaceborne Observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5802911.

[7] WANG X L, HE X F, SHI J, et al. Estimating Sea Level, Wind Direction, Significant Wave Height, and Wave Peak Period Using a Geodetic GNSS Receiver[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113135.

[8] LI Z, GUO F, CHEN F D, et al. Wind Speed Retrieval Using GNSS-R Technique with Geographic Partitioning[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 4.

[9] HU Y, JIANG Z H, LIU W, et al. GNSS-R Sea Ice Detection Based on Linear Discriminant Analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5800812.

[10] CAMPS A, PARK H, PABLOS M, et al. Soil Moisture and Vegetation Impact in GNSS-R Tech-Demosat-1 Observations[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016.

[11] ZHU Y F, GUO F, ZHANG X H. Spaceborne GNSS-R Soil Moisture Retrieval from GPS/BDS-3/Galileo Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2024, 29(1): 10.

[12] WU X R, XIA J M, JIN S G, et al. Is Soil Salinity Detectable by GNSS-R/IR?[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.

[13] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, ACEVO R, et al. Study of Maize Plants Effects in the Retrieval of Soil Moisture Using the Interference Pattern GNSS-R Technique[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010.

[14] ZHANG Z Y, GUO F, ZHANG X H, et al. Physical Modeling and Compensation for Systematic Negative Errors in GNSS-R Snow Depth Retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5800612.

[15] WANG T L, JOHNSON J T, BRINGER A, et al. Surface Roughness and Spectral Analysis Using Airborne LiDAR Digital Elevation Models (DEMs) for Modeling and Calibration/Validation of GNSS-R Land Returns[C]//General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, Sapporo, Japan, 2023.

[16] MARTÍN-NEIRA M. A Pasive Reflectometry and Interferometry System (PARIS) Application to Ocean Altimetry[EB/OL]. (1993-01-01)[2025-01-04]. https://spotlight.unavco.org/how-gps-works/gps-basics/reflected-gps-signals_files/Martin-Neira-PARIS-1993.pdf.

[17] CARRENO-LUENGO H, CAMPS A, RAMOS-PÉREZ I, et al. Experimental Evaluation of GNSS-Reflectometry Altimetric Precision Using the P(Y) and C/A Signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1493-1500.

[18] 胡媛, 钟李程, 陈行杨, 等. GNSS-R信噪比信号在海面测高技术的研究综述[J]. 全球定位系统, 2021, 46(4): 1-7.
HU Yuan, ZHONG Licheng, CHEN Xingyang, et al. A Summary of Research on GNSS-R Signal-to-Noise Ratio Signal Height Measurement Technology on the Sea[J]. *GNSS World of China*, 2021, 46(4): 1-7.

[19] CARRENO-LUENGO H, PARK H, CAMPS A, et al. Submeter Ocean Altimetry with GPS L1 C/A Signal[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012.

[20] HE Y Q, GAO F, XU T H, et al. Coastal Altimetry Using Interferometric Phase from GEO Satellite in Quasi-Zenith Satellite System[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 3002505.

[21] LOWE S T, KROGER P, FRANKLIN G, et al. A Delay/Doppler-Mapping Receiver System for GPS-Reflection Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(5): 1150-1163.

[22] CAMPS A, PARK H, VALENCIA I DOMÈNECH E, et al. Optimization and Performance Analysis of Interferometric GNSS-R Altimeters: Application to

the PARIS IoD Mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1436-1451.

[23] CARDELLACH E, FABRA F, NOGUÉS-CORREIG O, et al. GNSS-R Ground-Based and Airborne Campaigns for Ocean, Land, Ice, and Snow Techniques: Application to the GOLD-RTR Data Sets[J]. *Radio Science*, 2011, 46(6): 2011RS004683.

[24] BAI W H, SUN Y Q, FU Y, et al. GNSS-R Open-Loop Difference Phase Altimetry: Results from a Bridge Experiment[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(8): 1150-1157.

[25] DELOACH S R. GPS Tides: A Project to Determine Tidal Datums with the Global Positioning System[EB/OL]. (1995-05-01)[2025-01-04]. https://gge.ext.unb.ca/Pubs/TR181.pdf.

[26] 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.

[27] 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.

[28] JIN S G, QIAN X D, WU X. Sea Level Change from BeiDou Navigation Satellite System-Reflectometry (BDS-R): First Results and Evaluation[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 149: 20-25.

[29] HOLDEN L D, LARSON K M. Ten Years of Lake Taupō Surface Height Estimates Using the GNSS Interferometric Reflectometry[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(7): 74.

[30] 邓昱, 周佩元, 杜兰, 等. 多系统单频紧组合GNSS-R测高方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 146-155.
DENG Ken, ZHOU Peiyuan, DU Lan, et al. GNSS-R Altimetry Method with Multi-System Single-Frequency Tight Integration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 146-155.

[31] 邓昱. 岸基GNSS-R双天线水面高度反演关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2024.
DENG Ken. Research on Key Technologies of Shore-Based GNSS-R Dual-Antenna Water Surface Height Inversion[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2024.

[32] 王娜子, 鲍李峰, 高凡. 逐历元GNSS-R测高单差和双差算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(7): 795-802.
WANG Nazi, BAO Lifeng, GAO Fan. Improved Water Level Retrieval from Epoch-by-Epoch Single and Double Difference GNSS-R Algorithms[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(7): 795-802.

[33] 王娜子, 鲍李峰, 高凡. 宽巷组合下的cGNSS-R测高算法[J]. 测绘通报, 2016(8): 6-9.
WANG Nazi, BAO Lifeng, GAO Fan. An Algorithm for cGNSS-R Altimetry Based on the Wide-lane Combination[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(8): 6-9.

[34] ZHANG Y, LI B B, TIAN L M, et al. Phase Altimetry Using Reflected Signals from BeiDou GEO Satellites[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1410-1414.

[35] HE Y Q, GAO F, XU T H, et al. Accurate Tide Monitoring Using Shipborne GNSS-R Phase Altimetry: A Case Study[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2025, 22: 1500305.

[36] 何俊, 刘万科, 张小红. 北斗短基线三频实测数据单历元模糊度固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 361-365.
HE Jun, LIU Wanke, ZHANG Xiaohong. Single Epoch Ambiguity Resolution of BDS Triple Frequency Measured Data Under Short Baseline[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 361-365.

[37] CAMPS A. Spatial Resolution in GNSS-R Under Coherent Scattering[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(1): 32-36.

[38] 郭斐, 李佰瀚, 张治宇, 等. 利用GNSS反射信号监测海面高度变化: 基于法国BRST站2019—2021年数据[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 548-558.
GUO Fei, LI Baihan, ZHANG Zhiyu, et al. Change of Sea Surface Height Monitored by GNSS Reflected Signals-Based on Data from BRST Station in France from 2019 to 2021[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(3): 548-558.