

地基北斗多信息海面高反射测量方法及精度分析

郝睿贤, 杨 飞, 陈维聪, 李志才, 王 磊, 杨 锐, 张雅竣

The reflectometry method and accuracy analysis of the sea surface height based multi-observation from BDS

HAO Ruixian, YANG Fei, CHEN Weicong, LI Zhicai, WANG Lei, YANG Rui, and ZHANG Yajun

引用本文:

郝睿贤, 杨飞, 陈维聪, 等. 地基北斗多信息海面高反射测量方法及精度分析[J]. 全球定位系统, 2025, 50(2): 46–53. DOI: [10.12265/j.gnss.2024208](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024208)

HAO Ruixian, YANG Fei, CHEN Weicong, et al. The reflectometry method and accuracy analysis of the sea surface height based multi-observation from BDS[J]. *Gnss World of China*, 2025, 50(2): 46–53. DOI: [10.12265/j.gnss.2024208](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024208)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024208>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[北斗全频段GNSS-R水位反演研究](#)

Research on BeiDou full-band GNSS-R water level inversion

全球定位系统. 2023, 48(3): 52–56, 92

[北斗卫星导航系统在一体化智能安全头盔中的应用](#)

Application of BDS in an integrated intelligent safety helmet

全球定位系统. 2021, 46(3): 111–115

[基于观测量校正的星载GNSS-R海面风速快速反演方法](#)

A fast spaceborne GNSS-R sea surface wind speed retrieval method based on observation correction

全球定位系统. 2021, 46(6): 90–97

[北斗卫星导航系统在近海无人水下航行器路径跟踪方面的应用](#)

BDS application of offshore UUV path tracking

全球定位系统. 2021, 46(2): 98–103

[库区GNSS-R精细化反演水面高度及其验证研究](#)

Retrieving water surface height with high accuracy and reliability based on GNSS-R in reservoir area and its validation

全球定位系统. 2022, 47(1): 43–48

[基于GPS信噪比观测值的水位反演研究](#)

Research on water level inversion based on GPS SNR data

全球定位系统. 2020, 45(1): 105–109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

地基北斗多信息海面高反射测量方法及精度分析

郝睿贤¹, 杨飞¹, 陈维聪¹, 李志才¹, 王磊², 杨锐¹, 张雅竣¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘 要: 随着北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 的不断发展, 基于 BDS 干涉反射测量 (BDS Interferometric Reflectometry, BDS-IR) 的海面高反演受到了越来越多的关注. 本文介绍了基于 BDS 信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 信号、载波相位三频组合以及载波伪距单频组合的海面高反演方法, 并分析了信号种类、信号频点对 BDS-IR 海面高反演的影响. 基于 AT01 测站的 120 d BDS 观测数据反演结果表明, SNR 反演模型、载波相位三频组合反演模型与载波伪距单频组合反演模型的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 0.199 m、0.189 m 和 0.204 m, 偏差 (Bias) 分别为 0.126 m、0.067 m 与 0.130 m; SNR 反演模型的表现最好, 载波相位三频组合反演模型优于载波伪距单频组合反演模型; BDS 各个频点都具有较高的反演精度, 其中 RMSE 分布在 0.16~0.19 m; 除去 S7I 频点日均反演点数量仅为 5.5 个, 其余频点日均反演点为 50 个左右, 可以满足高精度海面平面监测的需求; 北斗二号 (BeiDou-2 Navigation Satellite System, BDS-2) 与北斗三号 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 具备相当的反演精度, 其 RMSE 分别为 0.163 m 与 0.185 m.

关键词: 北斗卫星导航系统 (BDS); 干涉反射测量; 水位反演; 信噪比 (SNR); 三频载波

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2025)02-0046-08

0 引 言

水位监测在防灾减灾、水资源管理和生态环境保护中扮演着关键角色. 及时、准确的水位监测有助于预测和预警洪涝灾害, 确保水库、河流等水体的安全运行, 从而减少潜在的人员伤亡和财产损失^[1]. 然而, 传统的水位监测手段 (如: 水尺监测, 雷达水位计等) 存在人力、造价成本较高等缺点, 而卫星测高技术则存在时间分辨率较低等问题^[2]. GNSS 全时段向全球免费播发 L 波段信号, 基于信号的干涉反射特征, Larson 等^[3]提出利用全球导航定位系统干涉反射测量 (Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry, GNSS-IR) 技术可以用于高精度水位监测, 具有低成本、高时间分辨率、长期连续等特点, 具备较大的发展潜力^[4-5].

近年来, 随着 GNSS-IR 水位反演技术进一步发展, 国内外学者开展了大量的研究. Larson 等^[3]首次

基于大地测量型接收机的 SNR 数据进行水位反演, 验证了利用 GNSS-IR 技术监测海平面变化的可行性. Zheng 等^[6]对多 GNSS 测站 MAYG 2017—2019 年观测数据进行分析评估. 针对反演过程中的误差问题, Löfgren 等^[7]分析了 5 个沿海 GPS 站点的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 数据, 并在已知海潮周期的条件下, 计算拟合潮波函数 $\dot{H}$, 结果表明在大潮差站点采用该方法计算海面动态改正时, 精度得到了提升. Larson 等^[8]进一步改进了海面变化速率的计算方法. 通过拟合频谱分析结果中的潮波曲线来计算 $\dot{H}$. Roussel 等^[9]提出了另一种方法, 利用最小二乘法估计海面高度及其变化速率. 此外, 考虑到对流层对 GNSS 信号的传播路径的折射效应, Santamaría-Gómez 等^[10]提出了一种利用经验模型改正信号高度角的方法. Williams 和 Nievinski^[11]利用全球温度与气压模型 GPT2w 对对流层延迟误差进行了校正, 提升了 6~40 cm 的反演精度. 王笑蕾等^[12]针对频间偏差

收稿日期: 2024-12-13

资助项目: 国家自然科学基金 (42204022, 42074036); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2024ZKPYDC02, 2024CXCY010, 2042023kf0003)

通信作者: 杨飞 E-mail: yangfei@cumtb.edu.cn

进行了改正. Zhang 等^[13] 利用经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 方法分离 SNR 信号, 有效抑制了反演噪声. 近年来研究表明载波相位与伪距同样具备测高能力. Masaru 等^[14] 提出了基于 GPS 双频组合观测值 L4 组合反演积雪厚度的方法. Yu 等^[15] 提出使用 GPS L1、L2、及 L5 3 个频率的相位组合观测值的方法进行雪深反演. 这种基于载波和伪距的测高技术也被证实同样适用于海面高的反演^[16].

北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 信号为 GNSS 遥感的诸多应用提供了新的数据源, 有力地推动了 GNSS 技术的进一步发展^[17-21]. 当前基于 SNR、载波相位和伪距观测值进行海面高反演开展了许多理论研究^[22], 然而, 针对这三种反演技术的分析对比, 尤其是针对 BDS 的相关研究较为匮乏. 对这三种反演技术的全面分析将进一步为后续研究提供精度参考, 具有重要的研究意义. 因此, 本实验利用 AT01 测站 2023 年 1 月 1 日到 4 月 30 日的三种 BDS 观测值数据, 基于 IR 技术, 从反演模型类型、信号频点已经两代 BDS 反演性能差异等角度, 全面地对 BDS-IR 水位反演的性能进行评估.

1 原理与方法

对于 BDS 观测, 存在三种基本观测值可用于进行水位反演: SNR 值、载波相位以及伪距观测值, 基于这三种观测值, 存在多种反演模型. 在本次研究中, 考虑到多场景下的水位反演应用, 选取了三种理论反演精度较高的模型, 分别是基于 SNR 残差值的频谱分析反演、适用于 SNR 值缺失场景下的载波相位三频组合反演, 以及单频接收机场景下的载波/伪距单频组合反演.

1.1 基于 SNR 残差值的频谱分析反演模型

在低高度角下, BDS 测站观测到的 SNR 值是直射信号与反射信号干涉的结果, 通常可以表示为

$$\text{SNR} = \sqrt{A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \Delta\phi} \quad (1)$$

式中: A_d 与 A_r 分别为直射信号与反射信号的振幅; $\Delta\phi$ 为二者相位差, 可以表示为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \theta \quad (2)$$

式中: h 为反射高度; θ 为高度角; λ 为波长.

对于直射信号部分, 可以通过二次多项式拟合剔除, 而反射信号部分则由于经过反射以及天线增益原因导致信号强度较小, 可以忽略. 则经过去趋势后的 SNR 残差序列 δSNR 可以表示为

$$\delta\text{SNR} = 2A_d A_r \cos \Delta\phi \quad (3)$$

对于残差序列, 其角频率为

$$\omega = \frac{d\Delta\phi}{d(\sin \theta)} = \frac{4\pi h}{\lambda} = 2\pi f \quad (4)$$

那么 h 可以表示为

$$h = \frac{\lambda f}{2} \quad (5)$$

因此, 只需要经过 LSP 频谱分析法得出残差序列的主频 f 就能得出 h , 结合 BDS 测站的精确坐标, 就能反演出水面的高度.

1.2 载波相位三频组合反演模型

载波相位观测值可以表示为

$$L_i = \rho - I(f_i) + T + M_{Li} - \lambda_i N_i \quad (6)$$

式中: L_i 为频点 i 下的载波相位观测值; ρ 为卫星与接收机之间的几何距离; $I(f_i)$ 为 i 频点下载波电离层延迟; T 为对流层延迟; M_{Li} 为频点 i 载波多路径误差; N_i 为整周模糊度.

对于反射测量来说, 反射高度信息存在于 M_{Li} 中, 因此需要提取 L_i 中的多路径部分. 在三频的观测条件下, 通过组合可以提取出多路径部分^[15]:

$$M_{1,2,3} = \lambda_3^2(L_1 - L_2) + \lambda_1^2(L_2 - L_3) + \lambda_2^2(L_3 - L_1) \quad (7)$$

类似于 SNR, 对多路径信息进行线谱, 通过对 Lomb-Scargle 谱分析 (Lomb-Scargle Periodogram, LSP) 得到信号 f . f 与 h 存在明显的线性关系, 表示为

$$h = af + b \quad (8)$$

式中: a 、 b 为系数, 通常通过仿真、拟合得到. 对于 BDS, 三频组合通常采用 B1C(1 575.42 MHz)、B2a(1 176.45 MHz) 与 B3I(1 268.52 MHz), 该组合对应的系数 a 、 b 分别为 0.120 7 与 -0.250 0.

1.3 载波/伪距单频组合反演

考虑到部分情况下接收机不支持输出三频信号, 针对单频情况下的水位反演, 使用载波相位与伪距的组合来完成. 伪距观测值可以表示为

$$C_i = \rho + I(f_i) + T + M_{Ci} \quad (9)$$

载波与伪距的单频组合表示为

$$M_i = C_i - L_i = 2I(f_i) + M_{Ci} - M_{Li} + \lambda_i N_i \quad (10)$$

式中, 电离层误差可使用低通滤波进行剔除. 当周跳被修复后, N_i 可被视为常数.

与三频组合类似, 同样经过 LSP 频谱分析提取 f , 再通过公式 (8) 建立与 h 的关系. 对于 BDS 的单频组

合, 本次研究中选用 B1C(1 575.42 MHz) 频点, 对应的系数 a 、 b 分别为 0.095 1 与 0.001 6.

2 实验与结果

2.1 数据来源

本研究选取 AT01 观测站 (63.48°N, 162.00°W), 位于美国阿拉斯加州 St Michael 地区, 属于美国“地球透镜计划 (EarthScope)”中的板块边界观测网络 (plate boundary observatory, PBO) 研究计划. 观测站接收机型号为 SEPT POLARX5, 使用钢制三角支架浅支撑安置, 采用 SCIT 型号的天线罩, 配备 TRM159800.00 型号的天线, 接收机天线相位中心距离海平面的垂直距离大约为 12 m. 距离 AT01 测站约 74 km 处设有编号为 9468333 的验潮站 (63.87°N, 160.79°W), 由美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 运营和管理. 验潮站与 BDS 测站的地理位置关系如图 1 所示. 在本研究中, 此验潮站的数据将作为参考真值来评估 BDS 水位反演的精度.

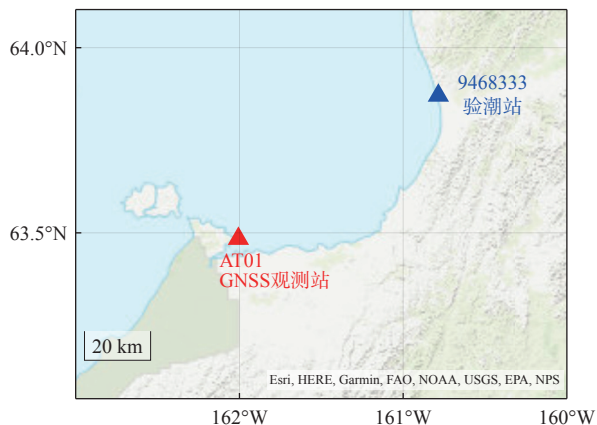


图 1 AT01 观测站与验潮站地理位置示意图

丰富的数据源是确保精度评估准确性的基础. AT01 测站能够接收到丰富的 BDS 卫星信号, 图 2 展示了 2023 年 1 月 1 日 BDS 卫星的天空轨迹图. 可以看到, 24 h 内接收到了 40 颗 BDS 卫星信号, 其中包含 3 颗地球静止轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星, 10 颗倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星以及 27 颗中地球轨道 (middle earth orbit, MEO) 卫星. 同时, 该观测站可接收 BDS 的 B1C、B1I、B2a、B2b 和 B3I 频点信号, 包含了北斗二号 (BeiDou-2 Navigation Satellite System, BDS-2) 以及北斗三号 (BeiDou-3 Navigation Satellite System,

BDS-3) 的所有频点, 因此选用此站可以全面地评估 BDS 各个卫星以及各个频点水位反演的性能.

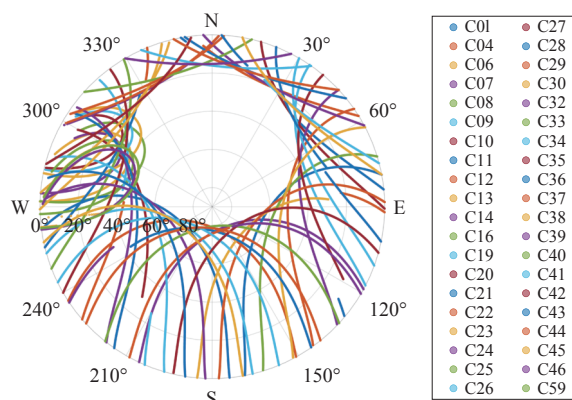


图 2 AT01 观测站 2023 年 1 月 1 日卫星天空轨迹图

反射信号主要来自于第一菲涅尔反射区, 因此第一菲涅尔反射区可被视为水位测量区域. 在水位反演中, 由第一菲涅尔反射区于水面的重叠区域来确定测站卫星高度角与方位角范围. 图 3 展示了 AT01 测站在高度角 5°、10°和 15°, 方位角 0°~220°范围内的第一菲涅尔反射区, 由此可以确定出反演的高度角范围为 5°~15°, 方位角范围为 0°~220°.

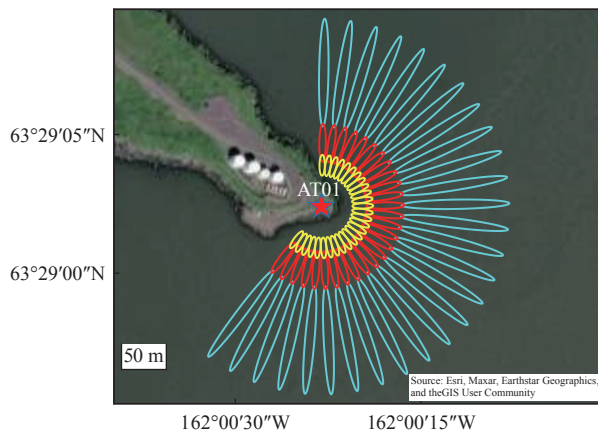


图 3 AT01 测站第一菲涅尔反射区

2.2 反演结果

本次实验选择 2023 年 1 月 1 日至 2023 年 4 月 30 日共 120 天的观测数据进行, 利用第 1 节中介绍的三种反演模型, 得到了基于 SNR 值、载波相位组合值以及载波伪距单频组合值的海面高反演结果. 图 4 展示了三种模型结果的散点分布以及对应验潮站的参考真值, 可以看到, 三种模型的反演得到的海面高约 -2~2 m, 其结果与验潮站所测数据具有较高的一致性, 表明其均能很好地完成海面高监测的任务.

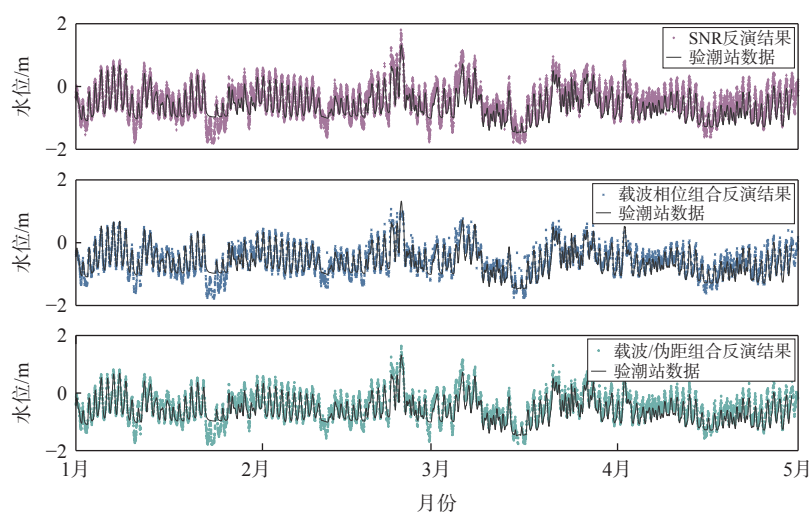


图4 三种反演模型得到的水位情况

3 分析讨论

3.1 三种反演模型的对比

三种模型得到了不同的反演结果,图5呈现了潮位反演值的散点密度图.其中潮位参考值由验潮站测量结果向 BDS-IR 测量时间插值得到.可以看到, BDS-IR 反演结果与潮位参考值呈现明显线性相关关

系,其散点密集分布于 $y=x$ 附近,印证了 BDS-IR 水位反演的能力.但同时可以看出,在低潮位部分散点分布相对离散,反演精度较低,这可能与潮位的快速变化有关.对于三种反演模型,都具备较高精度的海面高反演能力,三种模型反演结果与验潮站参考值的相关系数 R 分别为 0.945 24、0.926 13 和 0.944 68,均值 0.938 68.其中,基于 SNR 反演模型的表现最好.

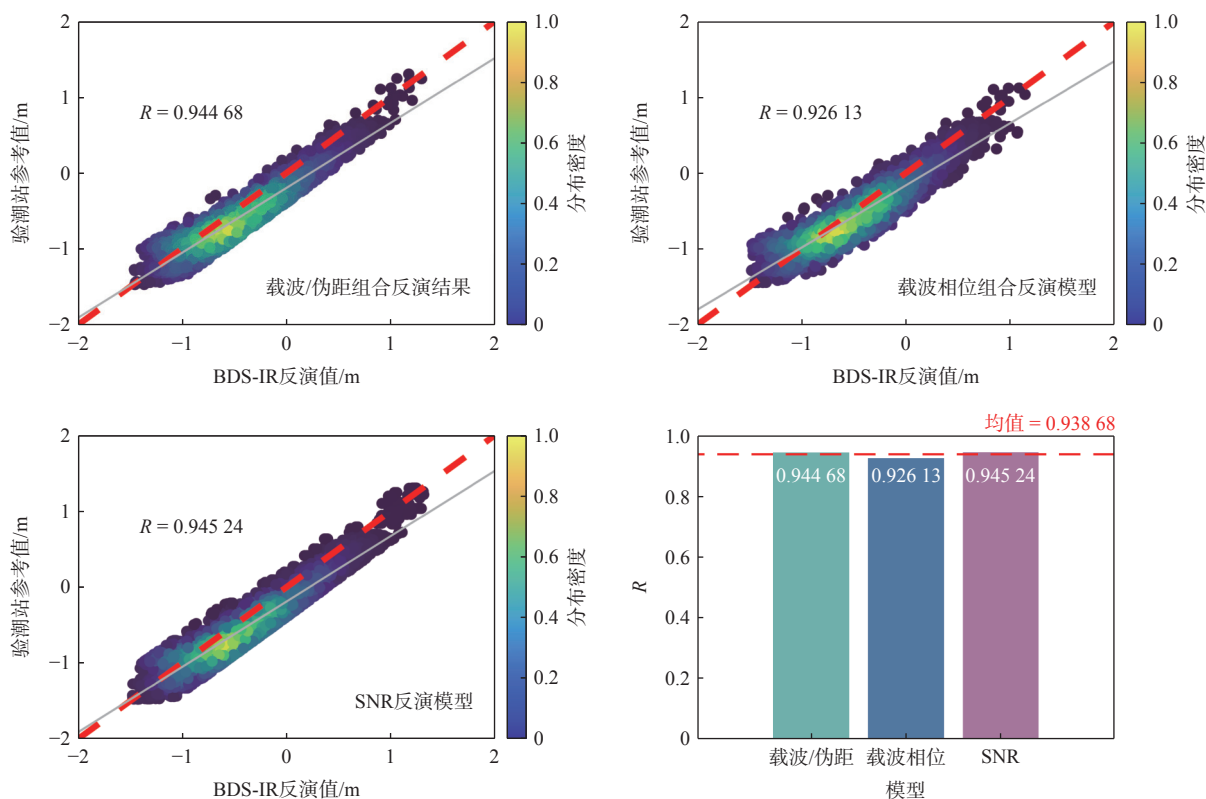


图5 三种反演模型结果散点对比图

表1展示了三种反演模型结果的 RMSE、Bias 以及和潮位参考值的相关系数 R .三种模型结果对应的 RMSE 分别为 0.199 m、0.189 m 和 0.204 m,三种

反演模型表现相当,其中三频载波组合反演模型表现最好.三种反演模型结果的 Bias 分别为 0.126 m、0.067 m 与 0.130 m,同样为三频载波组合反演模型表

现最优. 三种模型都具备较高的反演精度.

表 1 三种反演模型结果的 RMSE、Bias 和 R

模型	RMSE/m	Bias/m	R
SNR模型	0.199	0.126	0.945
三频载波组合模型	0.189	0.067	0.926
载波/伪距组合模型	0.204	0.130	0.945

图 6 展示了三种反演模型与验潮站参考值残差的直方分布图与箱型图. 可以看出, 三种反演模型的残差均符合正态分布, 其残差主要分布在 $-0.5 \sim 0.5$ m 之间, 三种反演模型残差的标准差分别为 0.156、0.198 和 0.157. 从箱型图来看, 载波相位组合反演法结果残差的分布范围更大, 存在部分残差的绝对值大于 0.5 m.

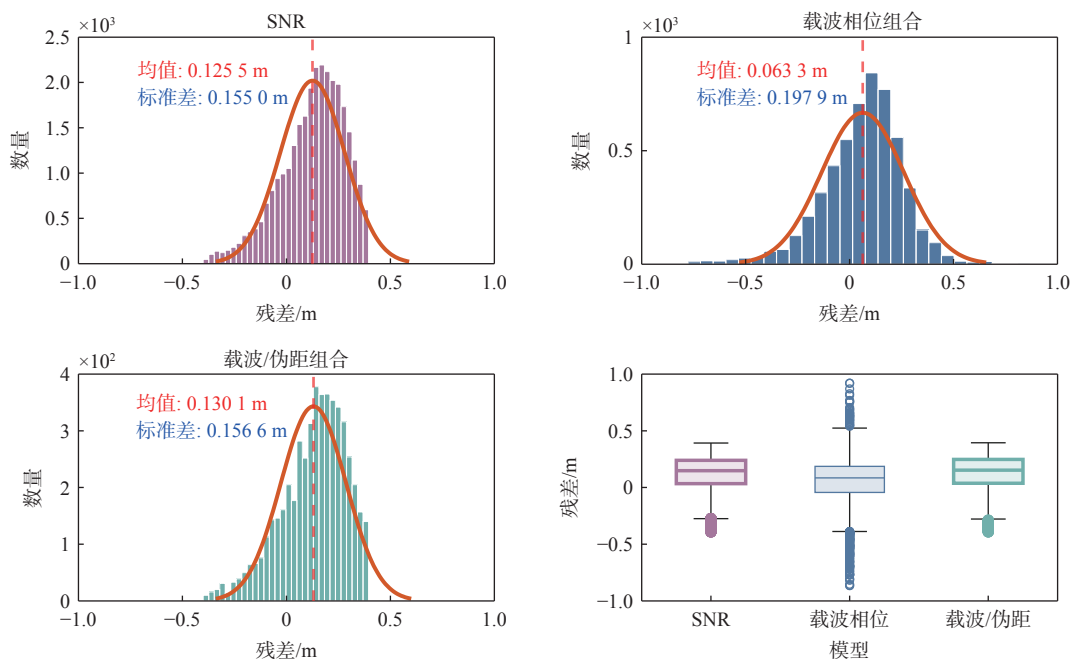


图 6 三种反演模型结果残差直方图及箱型图

经过上述的分析可以发现, 三种反演模型均能实现高精度的水位反演. 综合反演点数量与反演精度方面, 基于 SNR 的残差反演模型表现最好. 由于载波相位三频组合反演模型中对电离层延迟进行了剔除, 相比载波伪距单频组合反演模型有着更高的反演精度.

3.2 多频 BDS 反演精度的对比

不同频点信号的 BDS 信号具备不同的波长、调制方式等信息, 因此可能会导致不同的水位反演精

度. 图 7 中使用不同频点信号的 SNR 模型进行对比, 以评估各个频点信号水位反演的性能. AT01 测站共收到来自 BDS 6 个不同频点的信号, 分别是 B1C (S1P), B1I(S2I), B2a(S5P), B3I(S6I), B2b(S7D) 和 B2I(S7I), 图 7 展示了不同频点 SNR 反演模型结果的 RMSE 以及日均反演点数量. 反演结果的精度与反演点的数量可以综合评估频点的反演性能. 可以看到, 各个频点反演精度大致相当, RMSE 分布在 0.16~

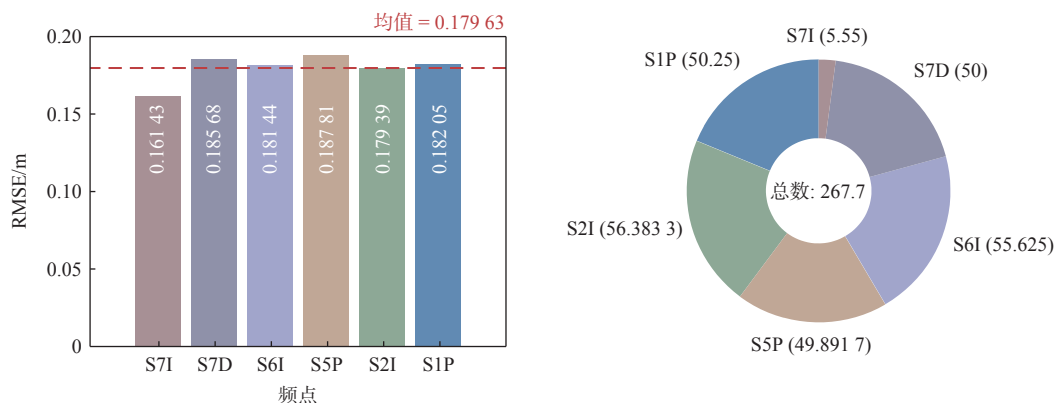


图 7 不同频点反演结果 RMSE(左图) 以及日均反演点数量(右图)

0.19 m 之间,均值为 0.180 m. 其中 S7I 反演精度最高, RMSE 为 0.161 m,但需要注意的是 S7I 信号的日均反演点仅有 5.55 个,因此并不能认为 S7I 为高质量的反演频点信号. 除去 S7I, S2I 为反演精度最高的反演频点信号, RMSE 为 0.179 m; 反演精度最差的频点信号为 S5P, RMSE 为 0.188 m. 从日均反演点个数来看,总体日均反演点个数为 267.7 个. 除去 S7I,其余 5 个频点的日均反演点数量为 50 个左右,其中 S5P 频点的数量最少,为 49.9 个; S2I 频点的数量最多,为 56.4 个.

图 8 展示了不同频点反演结果的残差直方图,可以看到 6 个频点的残差均为正态分布,符合统计规律. 其中, S7I 频点的结果最优,残差均值为 0.027 m,标准差为 0.159 m; 6 个频点中残差均值最高的为 S5P,达到 0.053 m,残差的标准差最大的为 S7D,为 0.181 m. 同时可以发现,6 个频点的反演结果均存在一定的系统偏差,其反演模型有待进一步改进.

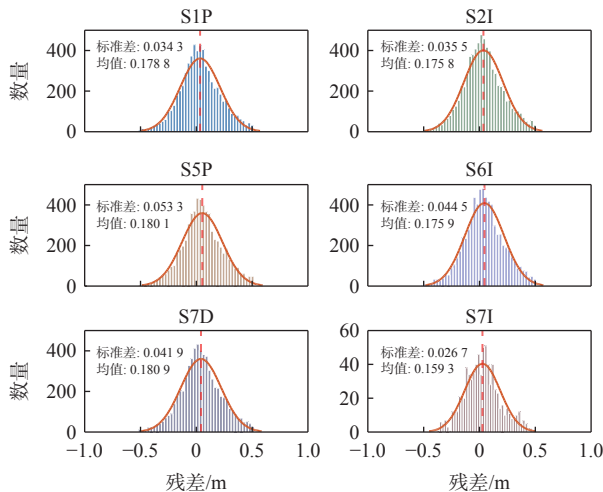


图 8 不同频点结果残差直方分布图

经过上述的对比分析,可以得出,尽管 S7I 频点呈现了最高的反演精度,但仅限于 BDS-2 卫星 (PRN 01~16) 播发,其可用弧段数量少于其他频点,因此导致其日均反演点数量仅有其他频点的十分之一,不能被视为高质量的反演频点. 其余 5 个频点尽管在精度上存在一定的差异,但整体上均能够满足水位监测的需求. 因此,对于 BDS-IR 水位反演来说,除去 S7I,其余频点均为高质量的反演频点,其反演结果的 RMSE 分布在 0.179~0.188 m 之间.

3.3 BDS-2 和 BDS-3 的对比

BDS 目前在轨卫星分为 BDS-2 与 BDS-3 两代,两代导航卫星在数量、播发频段以及信号调制方式等方面存在不同,这可能会对水位反演的精度产生影

响. 如 2.1 中所描述, AT01 测站可以接收到来自 BDS-2 的 B1I (S2I)、B3I (S6I) 以及 B2I (S7I) 频点的信号,可以接收到来自 BDS-3 的 B1C (S1P)、B1I (S2I)、B2a (S5P)、B3I (S6I) 以及 B2b (S7D) 频点的信号. 图 9 展示了 BDS-2 与 BDS-3 系统基于 SNR 残差反演模型得到的水位反演结果对比图. 可以看出,相对于 BDS-2, BDS-3 得益于更多的卫星数量以及频点数量,提供了更丰富的反演数据,可用弧段数量明显多于 BDS-2. 但同时也带来了更多不稳定的反演值,反演的水位序列中存在更多的离群值,这导致了其精度的下降. 以验潮站的潮位作为参考值, BDS-3 反演水位序列的 RMSE 与 Bias 分别为 0.185 m 与 0.044 m,精度均低于 BDS-2 的 0.163 m 与 0.025 m.

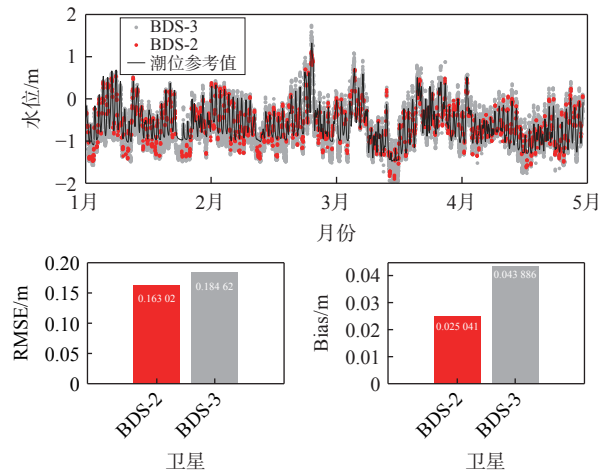


图 9 BDS-2 与 BDS-3 系统反演值对比

4 结 论

本研究利用 AT01 测站 2023 年 1 月 1 日至 2023 年 4 月 30 日共 120 天的 BDS 观测数据,基于三种水位反演模型细致地分析评估了 BDS-IR 水位反演的性能. 结果表明,三种反演模型均具备较高的反演精度,与验潮站的潮位参考值相比,其 RMSE 处于 0.21 m 以下, R 高于 0.9. 不同频点间, S7I 频点由于播发卫星数量较少导致其日均反演点数量较少. 除去 S7I,其余频点均具有较高的反演精度与丰富的反演点数量,反演结果的 RMSE 分布在 0.16~0.19 m, 5 个频点的日均反演点数量为 50 个左右. 对比了 BDS-2 与 BDS-3 水位反演的精度,相较于 BDS-3, BDS-2 反演的精度较高,其 RMSE 与 Bias 分别为 0.163 m 与 0.025 m. 但由于卫星数量较少,可用弧段数量较少导致其反演点数量远低于 BDS-3.

致谢: 感谢板块边界观测 (Plate Boundary Observatory, PBO) 网络提供的 BDS 观测数据; 感

谢美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供的验潮站数据.

参考文献

- [1] 徐天河, 穆大鹏, 闫昊明, 等. 近 20 年海平面变化成因研究进展及挑战 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1294-1305.
- [2] 李大伟, 李建成, 金涛勇, 等. 利用多代卫星测高资料监测 1993~2011 年全球海平面变化 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2012, 37(12): 1421-1424.
- [3] LARSON K M, LOFGREN J S, HASS R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver[J]. *Advances in space research*, 2013, 51(8): 1301-1310. DOI: [10.1016/j.asr.2012.04.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017)
- [4] 周昕, 张双成, 张勤, 等. GNSS-IR 解译地表环境参数研究进展及展望 [J]. *全球定位系统*, 2023, 48(3): 12-23.
- [5] 张朋杰, 庞治国, 路京选, 等. GNSS-R 水位监测研究进展与其在我国水利行业应用展望 [J]. *全球定位系统*, 2024, 49(1): 34-44.
- [6] ZHENG N Q, CHEN P, LI Z. Accuracy analysis of ground-based GNSS-R sea level monitoring based on multi GNSS and multi SNR[J]. *Advances in space research*, 2021, 68(4): 1789-1801. DOI: [10.1016/j.asr.2021.04.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.024)
- [7] LOFGREN J S, HASS 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. DOI: [10.1016/j.jog.2014.02.012](https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.02.012)
- [8] LARSON K M, RAY R D, WILLIAMS S D P. A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge[J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2017, 34(2): 295-307. DOI: [10.1175/JTECH-D-16-0101.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1)
- [9] ROUSSEL N, RAMILLIEN G, FRAPPAT F, et al. Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver[J]. *Remote sensing of environment*, 2015, 171: 261-277. DOI: [10.1016/j.rse.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011)
- [10] SANRAMARIA-GOMEZ A, WATSON C. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at spring bay, Australia[J]. *GPS solutions*, 2017, 21: 451-459. DOI: [10.1007/s10291-016-0537-x](https://doi.org/10.1007/s10291-016-0537-x)
- [11] 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. DOI: [10.1002/2016JB013612](https://doi.org/10.1002/2016JB013612)
- [12] 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.
- [13] ZHANG S C, LIU K, LIU Q, et al. Tide variation monitoring based improved GNSS-MR by empirical mode decomposition[J]. *Advances in space research*, 2019, 63(10): 3333-3345. DOI: [10.1016/j.asr.2019.01.046](https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.046)
- [14] OZEKI M, HEKI K. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases[J]. *Journal of geodesy*, 2011, 86: 209-219. DOI: [10.1007/s00190-011-0511-x](https://doi.org/10.1007/s00190-011-0511-x)
- [15] YU K G, BAN W, ZHANG X H, YU X W. Snow depth estimation based on multipath phase combination of GPS triple-frequency signals[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2015, 53(9): 5100-5109. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2417214](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2417214)
- [16] JIN S G, QIANG 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. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2016.12.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.010)
- [17] LI W Q, FABRA C F, YANG D K, et al. Initial results of typhoon wind speed observation using coastal GNSS-R of BeiDou GEO satellite[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2016, 9(10): 4720-4729. DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2523126](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2523126)
- [18] SUN B, YANG L, WU X R, et al. Soil moisture inversion based on Beidou SNR and carrier phase combinations[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 202: 56-64.
- [19] WU J M, CHEN Y L, GAO F, et al. Sea surface height estimation by ground-based bds geo satellite reflectometry[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2020, 13: 5550-5559. DOI: [10.1109/JSTARS.2020.3024743](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3024743)
- [20] LIU S W, ZHANG J, WAN W, et al. A comprehensive evaluation of utilizing BeiDou data to estimate snow depths from two ground-based stations[J]. *GPS solutions*, 2022, 26(4): 118. DOI: [10.1007/s10291-022-01308-1](https://doi.org/10.1007/s10291-022-01308-1)
- [21] WANG F, YANG D K, ZHANG G D. et al. Coastal observation of sea surface tide and wave height using opportunity signal from Beidou GEO satellites: analysis and evaluation[J]. *Journal of geodesy*, 2022, 96: 17. DOI: [10.1007/s00190-022-01605-0](https://doi.org/10.1007/s00190-022-01605-0)
- [22] LIMSUPAVANICH N, GUO B F, FU X M. Improvement of coastal sea-level altimetry derived from GNSS SNR measurements using the SNR forward network and T-LSTM anomaly detection[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2022, 60: 1-13. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3186239](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3186239)

作者简介

郝睿贤 (2003—), 男, 研究方向为地基 GNSS 遥感与应用. E-mail: 2110200210@student.cumtb.edu.cn
杨飞 (1991—), 男, 副教授, 研究方向为 GNSS

高精度数据处理及地学应用. E-mail: yangfei@cumtb.edu.cn

陈维聪 (2002—), 男, 研究方向为地基 GNSS 遥感与应用. E-mail: 15959016794@163.com

The reflectometry method and accuracy analysis of the sea surface height based multi-observation from BDS

HAO Ruixian¹, YANG Fei¹, CHEN Weicon¹, LI Zhicai¹, WANG Lei², YANG Rui¹, ZHANG Yajun¹

(1. *College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China*)

Abstract: With the continuous development of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS), sea surface height retrieval based on BDS Interferometric Reflectometry (BDS-IR) has attracted increasing attention. In this paper, we introduce sea surface height retrieval methods based on BDS SNR, triple-frequency carrier phase combinations, and single-frequency carrier pseudorange combinations, and also analyse the effects of signal types and signal frequencies on BDS-IR sea surface height retrieval. Using 120 days of BDS observation data from the AT01 station, the retrieval results show that the RMSE of the SNR-based retrieval model, triple-frequency carrier phase combination model, and single-frequency carrier pseudo range combination model are 0.199 m, 0.189 m, and 0.204 m, respectively, with bias of 0.126 m, 0.067 m, and 0.130 m, respectively. The SNR-based model performs the best, and the triple-frequency carrier phase combination model outperforms the single-frequency carrier pseudo range combination model. All BDS frequencies demonstrate high retrieval accuracy, with the RMSE ranging between 0.16 m and 0.19 m. Excluding the S7I, which provides an average of only 5.5 retrieval points per day, the other frequencies produce about 50 retrieval points per day, meeting the requirements for high-precision sea level monitoring. BDS-2 and BDS-3 exhibit comparable retrieval accuracy, with RMSE of 0.163 m and 0.185 m, respectively. This study will further improve GNSS-IR water level monitoring technology and provide accuracy support for future research.

Keywords: BeiDou Navigation Satellite System (BDS); interferometric reflectometry; water level retrieval; SNR; triple-frequency carrier phase