

引文格式:余锐,刘洋,王清泉,等.长时序多模多频GNSS-IR潮位反演综合比较分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(12):2210-2222.DOI:10.13203/j.whugis20240057



Citation: YU Rui, LIU Yang, WANG Qingquan, et al. Comprehensive Comparative Analysis of Long-Term, Multi-mode, and Multi-frequency GNSS-IR Tide Inversion[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(12):2210-2222. DOI:10.13203/j.whugis20240057

长时序多模多频GNSS-IR潮位反演 综合比较分析

余 锐^{1,2,3} 刘 洋^{1,2,3} 王清泉^{1,2,3} 高建伟^{1,2,3}
张 郁^{1,2,3} 胡羽丰^{4,5}

1 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司,广东 广州,510060

2 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心,广东 广州,510060

3 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室,广东 广州,510060

4 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

5 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

摘要:海平面变化对海岸生态环境和人类生存发展有着重要影响,对海平面进行监测是全球气候变化和海洋灾害监测的重要内容。利用全球导航卫星系统干涉反射测量(global navigation satellite system interferometric reflectometry, GNSS-IR)技术分析了4大卫星导航系统11个频段的数据,反演了中国香港HKQT和美国西雅图SC02测站2018—2022年长时序的潮位结果,并进行了潮汐调和分析和长期变化趋势估计。结果表明,不同频段反演海面高的精度有所差异,经过海面动态误差改正后,精度在10 cm左右,不同接收机和不同环境会导致同一频段有不同的精度表现。海面动态改正能有效降低GNSS-IR潮位反演误差,以无偏均方根误差计算其平均精度提升了20.5%。通过多模多频数据提高了海面高反演的时间分辨率,并在一定程度上提升了数据的精度和连续性。潮汐调和分析结果表明,11个频段的振幅结果能够与验潮站结果很好地吻合,总体差异小于1 cm。但是,部分频段部分潮汐项的相位结果存在较大差异,这与单一频率潮位反演结果的时间分辨率较低有关。长期趋势分析结果表明,香港近海存在约6.0 mm/a的海平面上升,西雅图近海存在约4.0 mm/a的海平面下降,与验潮站结果吻合较好。试验结果不仅评估了多模多频GNSS-IR技术在监测海平面变化上的性能,而且揭示了海平面的长期变化趋势,这对于海洋灾害监测和海洋学研究具有一定的参考意义。

关键词:海平面;长时序;多模多频;GNSS-IR;趋势变化

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-04-24

DOI:10.13203/j.whugis20240057

文章编号:1671-8860(2024)12-2210-13

Comprehensive Comparative Analysis of Long-Term, Multi-mode, and Multi-frequency GNSS-IR Tide Inversion

YU Rui^{1,2,3} LIU Yang^{1,2,3} WANG Qingquan^{1,2,3} GAO Jianwei^{1,2,3}
ZHANG Yu^{1,2,3} HU Yufeng^{4,5}

1 Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

2 Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China

3 Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China

4 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

5 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: Objectives: Sea level changes have significant impacts on coastal ecosystems and human survival

基金项目:国家自然科学基金(42041006);陕西省自然科学研究计划(2024JC-YBMS-197);长安大学中央高校基本科研业务费(300102263203);广州市资源规划和海洋科技协同创新中心(2023B04J0301,2023B04J0191);广东省重点领域研发计划(2020B0101130009);广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金(2020B121202019);广州市城市规划勘测设计研究院科技基金(RDI2220201029)。

第一作者:余锐,硕士,高级工程师,研究方向为大地测量、变形监测数据处理、海洋测绘。375745905@qq.com

通讯作者:胡羽丰,博士,副教授。yfhu@chd.edu.cn

and development. Monitoring sea level is an essential part of global climate change and marine disaster surveillance. **Methods:** This study uses global navigation satellite system interferometric reflectometry (GNSS-IR) technology to analyze data from 11 frequency bands across four major satellite navigation systems, inverting for long time series of tidal level results from 2018 to 2022 at HKQT station in Hong Kong, China, and at SC02 station in Seattle, USA, and performs tidal harmonic analysis and estimates long-term change trends. **Results:** The results indicate that the accuracy of sea level inversion varies among frequency bands. After correcting for dynamic sea level errors, the accuracy is around 10 cm. Different receivers and environments can lead to varying accuracy performances in the same frequency band. Dynamic sea level correction effectively reduces GNSS-IR sea level inversion errors, with an average precision improvement of 20.5% in terms of unbiased root mean square error. Multi-mode multi-frequency data can enhance the temporal resolution of sea level inversion, and improve the accuracy and continuity of data. Tidal harmonic analysis shows that the amplitude results across 11 frequency bands align well with the tide gauge results, with overall differences less than 1 cm. However, some frequency bands show significant phase discrepancies in certain tidal components, related to the lower temporal resolution of single-frequency sea level inversion results. Long-term trend analysis indicates a sea level rise of about 6.0 mm/a near Hong Kong, and a sea level decline of about 4.0 mm/a near Seattle which aligns well with tide gauge results. **Conclusions:** The findings of this paper not only assess the performance of multi-mode multi-frequency GNSS-IR technology in monitoring sea level changes, but also reveal long-term trends in sea level. It can provide valuable references for marine disaster monitoring and oceanographic research.

Key words: sea level; long-term data; multi-mode and multi-frequency; GNSS-IR; trend change

在全球变暖背景下,海平面不断上升已对沿海低海拔地区的生态环境和社会经济的可持续发展带来了严重威胁。海平面变化是全球气候变化的指示器,同时也是海洋灾害(如海啸、风暴潮等)监测的重要方面。传统海平面监测方法是利用安置在岸边的验潮站监测潮位变化,但该方法需要定期人工维护,且在风暴潮期间可能出现工作故障。卫星测高作为一种星基海面高测量方法,具有覆盖范围广、测量值可归算至地心坐标系的优点,但无法测量近岸地区海面且空间分辨率较低(数十千米)^[1]。近年来,地基全球导航卫星系统干涉反射测量(global navigation satellite system interferometric reflectometry, GNSS-IR)技术已在积雪深度^[2-6]、土壤湿度^[7-9]、冻土冻融形变^[10-13]和潮位变化^[14-16]等地表关键参量反演中获得了巨大的成功。GNSS-IR 潮位监测技术不仅具有全天候连续运行的优点,而且能够获得海平面的绝对高度,是对现有验潮站和卫星测高技术的有力补充。

地基 GNSS-IR 技术最早是由美国的 Larson 团队提出,其原理是利用 GNSS 反射信号和直射信号干涉形成的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)信号来反演地表参数,最初成功应用于积雪深度测量^[17]和地表土壤湿度反演^[18]。后来,利用安置于岸边的大地测量接收机,文献[19]采用

GPS-IR 技术成功反演了美国西雅图 SC02 测站近 4 个月的潮位变化,经验潮站实测数据检验,其精度达到了分米级。文献[20]则比较了 GPS 和 GLONASS 两种系统一个月的潮位反演结果,发现两者精度比较接近。文献[21]首次将北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)3 频 SNR 数据应用于海面反演,获得了 10 d 的 BDS 潮位测量结果。为了提高 GNSS-IR 潮位反演的精度,有学者在 Larson 的基础上提出了一系列优化方法,如滑动窗口法^[22]、小波分析法^[23-25]、海面动态误差改正^[26]、大高差对流层延迟改正^[27]都取得了一定效果。文献[28]使用 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 4 大系统的数据联合反演了近 200 d 的潮位变化,结果表明,联合多模多频 GNSS 可以有效提高潮位反演的时间分辨率和精度。文献[29]通过高仰角数据质量控制的方法增加了 GNSS-IR 潮位可用观测值数量,提升了潮位反演值的时间分辨率。文献[30]发现在 GNSS-IR 潮位反演中,不同频段间存在明显的频间偏差。文献[31]则提出了 GNSS-IR 潮位反演的抗差估计方法,有效降低了潮位反演误差。

目前,GNSS-IR 潮位反演大多利用单系统单频数据,多模多频 GNSS 潮位反演的研究较少且反演时段都较短,一般为数天至数月,缺乏长时

序的结果分析。针对这一不足,本文利用中国香港和美国西雅图2018—2022年5 a长时序的多模多频GNSS数据进行了潮位反演,综合分析比较了不同系统、不同频段的潮位反演结果和频间差异,充分验证多模多频GNSS潮位反演的不确定性。利用长时序海面高数据估计了中国香港和美国西雅图近海的海平面变化趋势,为气候变化下的香港邻海海平面变化提供初步结果。

1 GNSS-IR 潮位反演原理

GNSS-IR 潮位测量的原理如图1所示,GNSS卫星直射信号经过海面反射后被接收机接收,反射信号与直射信号在接收机天线内干涉形成SNR数据。通过低阶多项式将SNR序列中的趋势变化(由直射信号随高度角变化引起)去除后,剩下的SNR可表示为^[32]:

$$\text{SNR} = A \cos\left(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin e + \phi\right) \quad (1)$$

式中,A为振幅;φ为相位(单位:°);e为卫星高度角(单位:°),H为接收机天线相位中心到海面的垂直距离,即反射高度(单位:m);λ表示波长。

利用GNSS-IR技术进行潮位反演的关键是确定反射高度,即SNR的频率 $\frac{2H}{\lambda}$ 。GNSS记录

$$p_x(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^N X(t_j) \cos(2\pi f(t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2(2\pi f(t_j - \tau))} + \frac{\left(\sum_{j=1}^N X(t_j) \sin(2\pi f(t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2(2\pi f(t_j - \tau))} \right] \quad (2)$$

式中,N为采样点个数; $p_x(f)$ 为频率为f的信号的功率; t_j 为离散数据的采样时间;τ为时间平移不变量,由频率f和式(3)共同决定:

$$\tau = \frac{1}{4\pi f} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=1}^N \sin(4\pi f t_j)}{\sum_{j=1}^N \cos(4\pi f t_j)} \right) \quad (3)$$

利用式(2)和式(3)以一定的频率间隔就可以得到对应的Lomb-Scargle功率谱图。

GNSS反射信号在高度角较低时,受到对流层折射影响导致信号路径弯曲^[34],引起观测到的反射信号入射角与实际入射角度偏离(图1),该角度变化量计算式为^[35]:

$$\Delta e = \frac{510}{1.4T + 492} \times \frac{P}{1010.16} \cot\left(e + \frac{7.31}{e + 4.4}\right) \quad (4)$$

的SNR数据在时间上是均匀采样的,但在式(1)中SNR是自变量 $\sin e$ 的函数,由于e不是均匀采样的,由此导致式(1)的SNR是不均匀的。因此,适用于非均匀采样的LSP(Lomb-Scargle periodograms)方法^[33]被用于对SNR进行频谱分析,进而确定SNR的峰值频率和反射高度 H_{LSP} 。

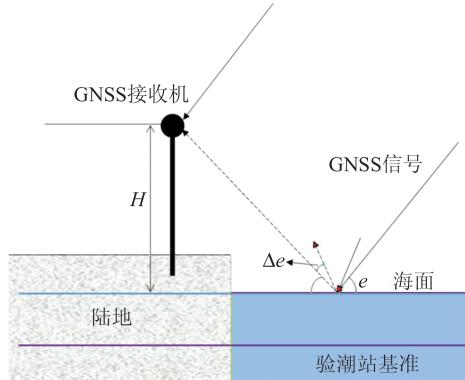


图1 GNSS-IR潮位测量原理
Fig. 1 Principle of GNSS-IR Tidal Level Measurement

对于连续等间隔的时域信号,利用傅里叶变换可以获得良好的频谱结果,但以 $\sin e$ 为自变量的SNR不是等间隔信号,这种不等间隔性在进行傅里叶变换时会产生虚假信号。为了解决非等间隔时间序列的频谱分析问题,Lomb-Scargle方法应运而生。对于时间序列 $X(t_j)$ ($j=1, 2, \dots, N$),其功率谱可定义为关于频率f的函数:

$$p_x(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^N X(t_j) \cos(2\pi f(t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2(2\pi f(t_j - \tau))} + \frac{\left(\sum_{j=1}^N X(t_j) \sin(2\pi f(t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2(2\pi f(t_j - \tau))} \right] \quad (2)$$

式中,Δe为角度变化量(单位:');T为温度(单位:℃);P为大气压(单位:hPa)。本文使用GPT2w模型^[36]计算大气参数 T_0 和P,然后通过式(4)估算对流层引起的卫星高度角变化,进而改正卫星高度角,最后使用式(1)来计算反射高度。

在通过式(1)求取反射高度时,一般假设反射面短期内无明显变化,然而海面时刻处于动态变化中,因此需要考虑海面动态误差的影响,真实的反射高度与LSP方法得到的初始反射高度 H_{LSP} 的关系式如下^[12]:

$$H_{\text{LSP}} = H + \dot{H} \frac{\tan e}{\dot{e}} \quad (5)$$

式中, \dot{H} 是反射高度变化率(单位:m/s),与海面高度变化率符号相反,大小相等; \dot{e} 是卫星高度角的变化率(单位:rad/s)。对于海面高度变化

率的求解,本文采用文献[37]的谐波分析方法,结合最小二乘拟合法求解主要潮汐项的振幅和相位,本实验的主要潮汐项包括日潮和半日潮,潮汐项的周期见表 1。谐波分析方法^[37]公式如下:

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (6)$$

式中, $y(t)$ 表示潮位观测值,即海面高(单位:m); y_0 为平均潮位面(单位:m); N 为分潮数量(本文

为 8 个); ω_n 为已知的分潮的角频率(单位: $^\circ/h$), A_n 和 ϕ_n 分别为分潮的振幅(单位:m)和初始相位(单位: $^\circ$)。

为了得到海面变化率,首先利用 GNSS-IR 方法得到原始海面高数据去拟合式(6),并利用最小二乘法求解表 1 中所列潮汐项的振幅和相位,即式(6)中的拟合系数。在得到拟合系数后,令 $y(t)$ 对 t 求导,即可得到反射高度变化率 \dot{H} 。

表 1 潮汐拟合所使用的主要分潮周期信息

Tab. 1 Information of the Major Tidal Periods Used for Tidal Fitting

统计项	分潮项							
	K1	O1	Q1	P1	M2	K2	N2	S2
周期/h	23.935	25.819	26.868	24.066	12.421	11.967	12.658	12.000

对于经过对流层改正和海面高动态变化改正后的 GNSS-IR 海面观测值,本文将以验潮站实测潮位作为参考,计算各 GNSS 系统各频率的平均偏差(bias)、均方根误差(root mean square error, RMSE)以及消除偏差影响后的无偏 RMSE (unbiased RMSE, ubRMSE),并利用上述指标进行精度评定。此外,本文将使用适用于非均匀采样的 UTide 程序^[38]对 GNSS-IR 潮位结果进行潮汐调和分析,在移除调和分析确定的周期潮波变化后,计算海平面的长期变化趋势。

2 研究区域与数据

本文使用的中国香港 HKQT 测站的 GNSS 数据来自香港卫星定位参考站网,该站位于香港鲗鱼涌,坐标为($114^\circ 12'48''E$, $22^\circ 17'28''N$, 5.178 m),测站环境如图 2 所示。2017-01-18 HKQT 测站安装了 Trimble NetR9 接收机,具备了接收 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 卫星信号的能力。2023-04-12 接收机更换为 Trimble Alloy,天线为 Trimble 59800.0。本文采用 HKQT 测站 2018-01-01—2022-12-31 共计 5 a 的多系统多频 SNR 数据反演海面高,采样间隔为 1 s,包括 2 个 GPS 频段(L1 和 L5)、2 个 GLONASS 频段(G1 和 G2)、4 个 Galileo 频段(E1、E5a、E5b 和 E5)和 3 个 BDS 频段(B1、B2 和 B3),如表 2 所示。需要说明的是,BDS B3 频段从 2022-12-01 起才有数据记录。根据测站所处环境,为了避开地面反射信号,本文将卫星方位角和高度角分别设为 $[-60^\circ, 105^\circ]$ 和 $[5^\circ, 15^\circ]$,该设置可确保反射信号均来自海面。HKQT 测站所在位置共址建有验潮站 Quarry Bay,可以提供 1 min 采样率的实测潮位数

据,该数据将用于检验 GNSS-IR 潮位反演结果。



(a) HKQT 测站安置地点 (b) HKQT 测站接收机天线

图 2 HKQT 测站环境

Fig. 2 HKQT Station Status

本文使用的美国西雅图 SC02 测站 GNSS 数据来自美国边界观测站网,该站坐标为($123^\circ 0'27.36''W$, $48^\circ 32'46.32''N$, 15.032 m),安置在 San Juan 岛的 Friday 海湾,位于美国华盛顿州西雅图市西北方向 130 km,测站环境如图 3 所示。2015 年,SC02 测站的接收机更新为 Trimble NetR9,可以跟踪接收 GPS 和 GLONASS 信号,在 2019-10-25 又进行了硬件升级,具备了连续接收 GPS L2C 信号和 Galileo 系统信号的能力。本文采用 SC02 测站 2018-01-01—2022-12-31 共计 5 a 的多系统多频 SNR 数据反演海面高,采样间隔为 1 s,包括 2 个 GPS 频段(L1 和 L2C)、2 个 GLONASS 频段(G1 和 G2)和 4 个 Galileo 频段(E1、E5a、E5b 和 E5),具体信息见表 2。从图 3 中可知,SC02 测站除了西北方向为陆地,其他方向均为开阔水域,本文设置该站的卫星方位角和高度角分别为 $[50^\circ, 240^\circ]$ 和 $[5^\circ, 13^\circ]$ 。在 SC02 测站以西 345 m 分布有 NOAA 验潮站(ID:9449880),提供自 1996 年以来时间分辨率 6 min 的验潮数据,可用于 GNSS-IR 潮位反演结果的验证。



图3 SC02测站环境

Fig. 3 SC02 Station Status

表2 GNSS SNR频段信息

Tab. 2 GNSS SNR Frequency Band Information

系统	频段	波长/m
GPS	L1	0.190
	L2C	0.244
	L5	0.255
GLONASS	G1	~0.187
	G2	~0.241
Galileo	E1	0.190
	E5a	0.255
	E5b	0.248
	E5(E5a+E5b)	0.252
BDS	B1	0.192
	B2	0.248
	B3	0.236

3 海面高反演结果分析

3.1 多模多频反演结果

采用§2所述方法对HKQT和SC02测站多模多频的SNR数据进行解算,获得了两个测站多系统5 a长时序亚日尺度的潮位反演结果,结果已经进行了海面动态改正和对流层延迟改正。因为5 a结果数据过于密集,难以在图上清晰展示,本文仅截取一个月的数据作为例子展示。图4和图5分别展示了2022年12月(即年积日335—365)HKQT和SC02测站所有频段的潮位反演结果以及验潮站的实测数据。从图4和图5中可以看出,各系统各频段的GNSS-IR潮位反演结果在时序上均与实测值符合较好,能够准确捕捉潮汐的日变化和半日变化。

因为各系统的观测时间并不一致,将多系统GNSS-IR潮位反演值进行融合可以获取更为密集的潮位观测值,本文采用的融合方法分为两步:首先,在同一系统,对同一时刻的不同频段观测值取平均值;然后,组合不同系统的频段平均

观测值为新的融合潮位时间序列。图6和图7分别为HKQT和SC02测站GNSS-IR潮位反演结果与对应实测潮位的对比分析。从图6和图7中可以看出,各频段的GNSS-IR潮位反演结果均与实测结果符合较好,散点集中于1:1回归线附近。

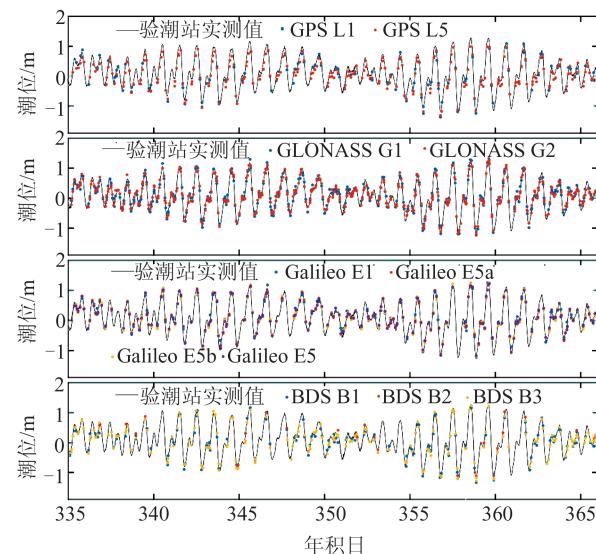


图4 HKQT测站2022年12月GNSS-IR潮位反演结果时间序列

Fig. 4 Time Series of HKQT GNSS-IR Tidal Level Inversion Results in December 2022

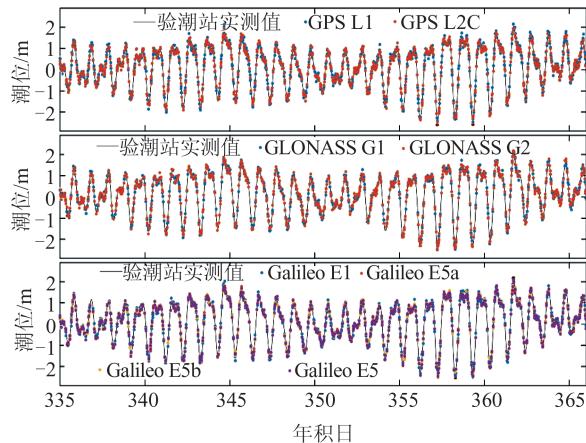


图5 SC02测站2022年12月GNSS-IR潮位反演结果时间序列

Fig. 5 Time Series of SC02 GNSS-IR Tidal Level Inversion Results in December 2022

以验潮站实测值作为参考,计算了各个频段和融合结果的bias、RMSE和ubRMSE,用于评估GNSS-IR潮位反演的精度,统计结果见表3。从表3中可以看出,在HKQT测站,BDS B3频段结果的bias最小,接近于0,表明该频段反演结果几乎没有系统性偏差;与之相反的是,GNSS L5频段的bias最大,为9.8 cm,说明该频段的潮位反演

值明显低估了实际潮位; BDS B2 的 bias 同样较大, 为 -9.0 cm , 说明该频段的结果明显高估了实际潮位。其他 8 个频段反演结果的 bias 位于 $-4.9\sim3.0\text{ cm}$ 之间, 除了 GPS L1 和 BDS B1 的 bias 为正外, 其他 6 个频段的 bias 均为负值, 说明 GLONASS 和 Galileo 在本地区倾向于高估海平面变化。融合结果的 bias 仅为 -0.3 cm , 说明融合结果只是轻微高估了实际潮位。从 RMSE 来看, 同样是 BDS B3 表现最好, RMSE 仅为 7.6 cm , 表现最差的为 BDS B2, RMSE 高达 14.2 cm , 其他各频段包括融合结果的精度均在 10 cm 左右。ubRMSE 为移除了 bias 影响的均方根误差, 其结果更具参考价值。从 ubRMSE 可以看出, BDS B3 表现依然最好 (7.6 cm), 其他各频段和融合结果的 ubRMSE 相比于 RMSE 均有降低, 其值位于 $8.8\sim11.3\text{ cm}$ 之间, 精度较为均匀。经过系统偏差移除, GPS L5 和 BDS B2 的结果改善最为明显, ubRMSE 分别减小到 9.7 cm 和 11.0 cm , 相当于精度提升了 29.7% (4.1 cm) 和 22.5% (3.2 cm)。需要注意的是, 因为 BDS 观测值相对较少, 统计结果可能代表性不足, 这里仅供参考, 待后续积累更多观测值后方能进行充分检验。

在 SC02 测站, 除了 GLONASS 的两个频段的 bias 为负值 (-0.2 cm 和 -0.8 cm), 表明 GLONASS 轻微高估了实际潮位, 其他频段和融合结果的 bias 均为正值, 且在 $2.4\sim3.3\text{ cm}$ 之间, 说明轻微低估了实际潮位。RMSE 方面, 除了 GPS L1 最大为 11.1 cm , 其他频段包括融合结果的 RMSE 均小于 10 cm , 其中 Galileo E5a、E5b 和 E5 3 个频段的 RMSE 更是小于 8 cm 。由于 SC02 测站 bias 整体较小, 移除了 bias 影响后的 ubRMSE 变化不大, 改善最明显的 Galileo E5 精度仅提升了 6.4% 。综合 HKQT 和 SC02 测站的结果, 可以发现, 融合后的结果的 bias、RMSE 和 ubRMSE 均优于大部分的单频结果, 并且观测值数量明显增加, HKQT 测站融合后的潮位观测值数量相比于最多的 GLONASS G2 增加了 149.1% , 而 SC02 测站融合后的潮位观测值数量相比于最多的 GPS L1 增加了 140.0% , 说明了多系统多频融合有助于获取更为密集、精度较好的潮位观测值。

3.2 海面动态改正分析

海面动态误差是 GNSS-IR 潮位反演的主要误差源之一, 图 8 和图 9 展示了 HKQT 和 SC02 测站不同系统和频段 GNSS-IR 潮位反演结果进行海面动态改正前后的精度对比情况。从图 8

中可以看出, 在 HKQT 测站, 改正前后平均 bias 几乎无变化, 主要是因为在涨潮和落潮时的动态改正是符号相反的, 在 5 a 长时序的偏差统计中, 这两种状态下的动态改正在一定程度上相互抵消, 因此其平均 bias 无明显变化。但从 RMSE 的情况来看, 海面动态改正显著提升了 GNSS-IR 潮位反演精度, 其中 BDS B3 的改正效果最为明显。在海面动态改正前, BDS B3 的潮位 RMSE 为 11.0 cm , 改正后为 7.6 cm , 减小了 3.4 cm , 精度提升了 30.9% 。改正效果最小的为 GPS L5, 海面动态改正使 RMSE 降低了 1.9 cm , 精度提升了 12.3% 。统计结果显示, 经过海面动态改正, 11 个频率的 GNSS-IR 潮位反演结果平均 RMSE 减小了 2.4 cm , 平均精度提升了 18.4% ; 以 ubRMSE 为参考, 平均 ubRMSE 减小了 2.6 cm , 精度提升了 20.5% 。从图 9 中可以看出, 在 SC02 测站, 与 HKQT 情况类似, 改正前后 bias 无明显变化, 但经过海面动态误差改正后, RMSE 和 ubRMSE 均明显下降, 精度提升最显著的是 Galileo E5 频段, 其 RMSE 和 ubRMSE 分别降低了 7.8 cm 和 8.0 cm , 精度分别提高了 50.5% 和 52.7% , 所有频段结果平均 RMSE 和 ubRMSE 分别减小了 5.3 cm 和 5.6 cm , 精度分别提高了 36.3% 和 39.9% 。SC02 测站的动态改正效果相比于 HKQT 测站更为明显, 其原因可能是因为 SC02 测站的潮差 ($\sim 5\text{ m}$) 相比于 HKQT 测站 ($\sim 3\text{ m}$) 更大, 动态误差影响更为显著。以上结果充分说明了海面动态改正在 GNSS-IR 潮位反演中的重要性, 不论采用何种系统和频率, 海面动态改正都是十分必要的。

3.3 GNSS-IR 观测值数量分析

对于不同系统和不同频段, 因为卫星轨迹和数据质量的不同, 得到的潮位观测值数量也存在差异, 本节将分析单频潮位观测值数量差异。由表 3 可知, 在 HKQT 测站, GLONASS 系统的潮位反演值最多, 两个频段的观测值均超过 20 000 个; 其次为 GPS 和 Galileo 系统, 两种系统的潮位反演值在 10 000 个左右; 观测值最少的为 BDS 系统, 除了 2022-12-01 起才开始有观测值的 B3 频段, B1 和 B2 频段的潮位反演值分别为 3 479 个和 1 403 个, 明显少于其他系统; 在 SC02 测站, GPS L1 频段的观测值最多为 67 317 个, 其次为 GLONASS 的 2 个频段, 均超过 50 000 个, 2019 年 10 月后稳定跟踪的 GPS L2C 和 Galileo 频段的观测值数量约为 GPS L1 频段的一半, GPS L2C 观测值数量为 34 185 个, 而 Galileo 4 个频段的观测值均约为 30 000 个。

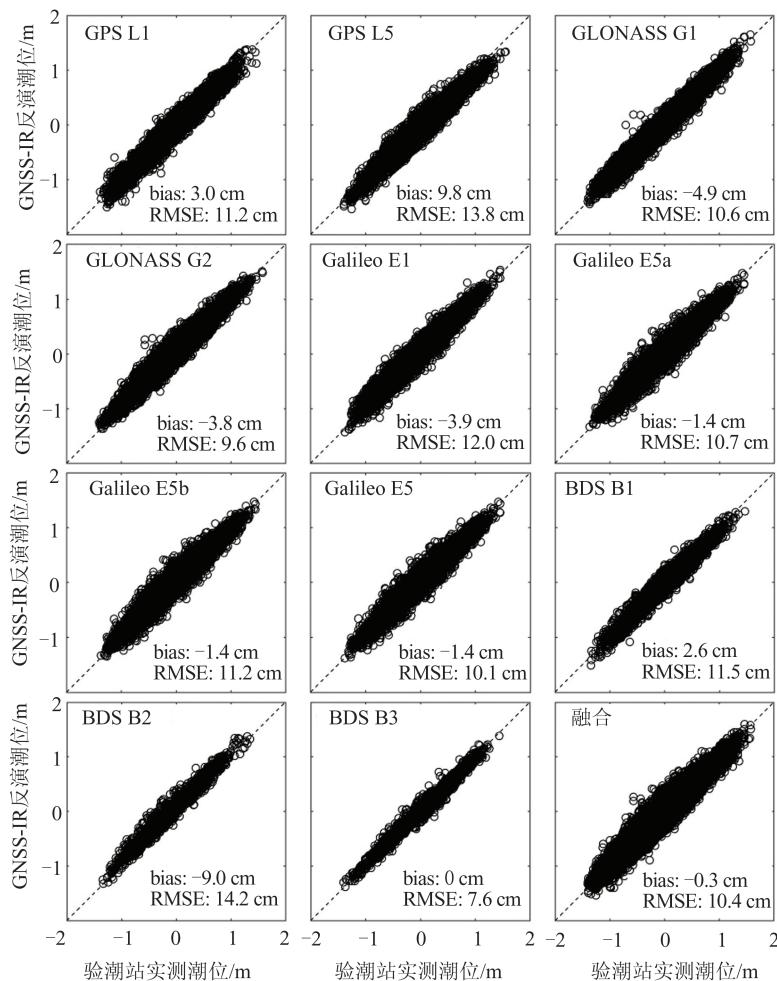


图6 HKQT测站多模多频GNSS-IR潮位反演结果与验潮站实测结果对比

Fig. 6 Comparison Between the Results of Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR Tide Level at HKQT Station and the Tide Gauge Measurements

图10显示了HKQT测站多模多频GNSS-IR潮位反演值数量的日变化情况。由图10可以看出, GLONASS系统的潮位单天观测值数量在10~20个之间, 只有少数天数量低于5个, G1和G2频段的平均单天观测值数量分别为13.1个和15.3个; GPS和Galileo的单天观测值数量基本都在10个以下, 平均单天观测值数量在5~7个之间, 仅为GLONASS的一半左右; BDS系统相对于其他系统, 单天观测值更少, B1和B2的平均单天观测值数量分别为1.9个和0.8个, 而B3频段的平均单天观测值数量为5.9个, 与GPS和Galileo较为接近。单天观测值数量过少不仅会导致潮位反演的分辨率较低, 而且也可能会影响结果的质量和稳定性。本文单天观测值数量差异的主要原因是, 海面在HKQT测站东北, 而GPS、Galileo和BDS的卫星轨道倾角均在55°左右, 其卫星信号反射点轨迹在北半球测站的北方向上有缺失, 而GLONASS卫星的轨道倾角为

64.8°, 其在北方向上的覆盖度更好。图11显示了SC02测站多模多频GNSS-IR潮位反演值数量的日变化情况。由于SC02测站水域更为广阔, 有效反射的方位角更大, 且不存在GPS信号在北方向上的覆盖问题, 所以GNSS系统的单频单天观测值数量显著多于HKQT测站, 具体来说, GPS L1平均单天观测值数量为36.9个, GPS L2C的平均单天观测值数量为29.3个, GLONASS和Galileo的单频平均单天观测值分别约为29个和25个。由此可以得知, 在利用GNSS-IR技术监测海面高时, 需要综合考虑卫星轨道和反射点轨迹, 选择观测值较多的地点建站。

4 潮汐调和分析和海面高变化趋势

基于潮汐运动的周期性, 对于长时序潮位观测值, 通常采用调和分析方法, 将潮位变化分解为多个分潮的线性组合, 通过求解各个分潮的振

幅和相位来确定研究区域的潮汐特性,进而进行潮汐预报。本文利用UTide程序对HKQT和SC02测站GNSS-IR的5 a潮位观测序列进行了调和分析,估计了47个分潮项的调和常数(即分潮振幅和迟角)。为了对比,同样也对验潮站实测潮位进行了调和分析,同样获得了分潮项的振幅和迟角。为了评估调和分析的整体精度,本文

利用各频段和融合结果的调和分析常数计算2018—2022年的潮位，并与验潮站调和分析常数计算得到的潮位进行比较，统计RMSE(见表4和表5)作为调和分析的精度指标。需要说明的是，因为HKQT测站BDS B3潮位观测序列仅有1 a，因此未对该频段进行调和分析和长期变化趋势分析。

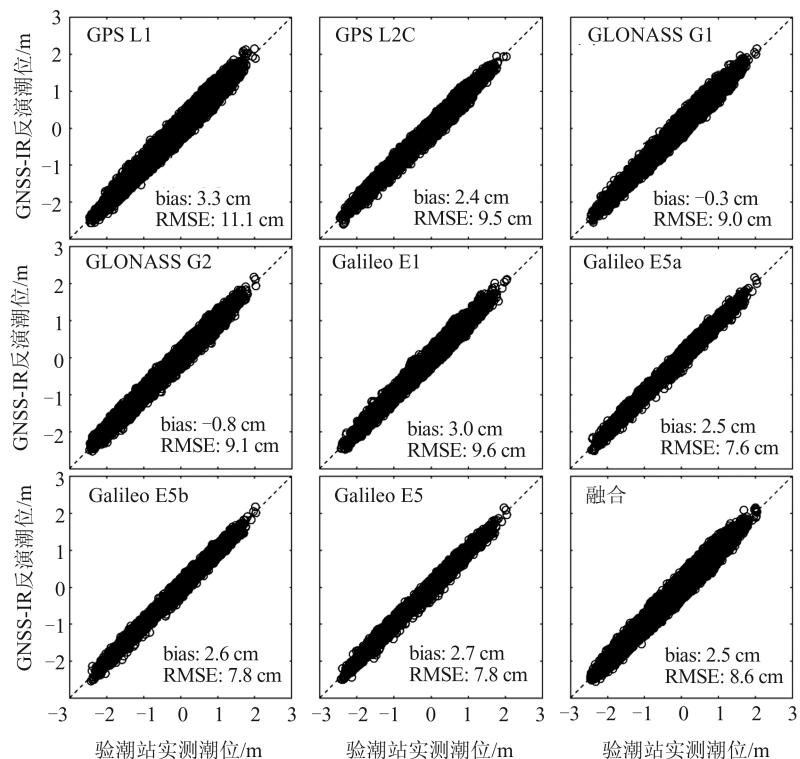


图7 SC02测站多模多频GNSS-IR潮位反演结果与验潮站实测结果对比

Fig. 7 Comparison Between the Results of Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR Tide Level at SC02 Station and the Tide Gauge Measurements

表3 海面动态改正后的多模多频GNSS-IR潮位反演结果精度统计

Tab. 3 Accuracy Statistics of Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR Tidal Level Inversion Results After Sea Surface Dynamic Correction

系统	频段	HKQT			SC02				
		观测值数量/个	bias/cm	RMSE/cm	ubRMSE/cm	观测值数量/个	bias/cm	RMSE/cm	ubRMSE/cm
GPS	L1	11 808	3.0	11.2	10.8	67 317	3.3	11.1	10.6
	L2C					34 185	2.4	9.5	9.2
	L5	14 365	9.8	13.8	9.7				
GLONASS	G1	24 006	-4.9	10.6	9.4	51 131	-0.2	9.0	9.0
	G2	28 007	-3.8	9.6	8.8	52 759	-0.8	9.1	9.1
Galileo	E1	9 956	-3.9	12.0	11.3	29 100	3.0	9.6	9.1
	E5a	13 102	-1.4	10.7	10.6	30 041	2.5	7.6	7.2
	E5b	13 165	-1.4	11.2	11.1	30 136	2.6	7.8	7.4
	E5	13 060	-1.4	10.1	10.0	30 008	2.7	7.8	7.3
BDS	B1	3 479	2.6	11.5	11.2				
	B2	1 403	-9.0	14.2	11.0				
	B3	2 354	0.0	7.6	7.6				
融合		69 779	-0.3	10.4	10.4	161 564	2.5	8.6	8.2

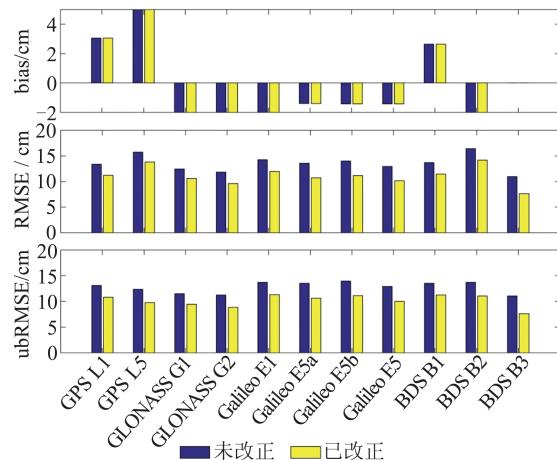


图8 HKQT测站海面动态改正前后多模多频GNSS-IR潮位反演精度对比

Fig. 8 Comparison of GNSS-IR Tidal Level Inversion Accuracy Before and After Sea Surface Dynamic Correction at HKQT Station

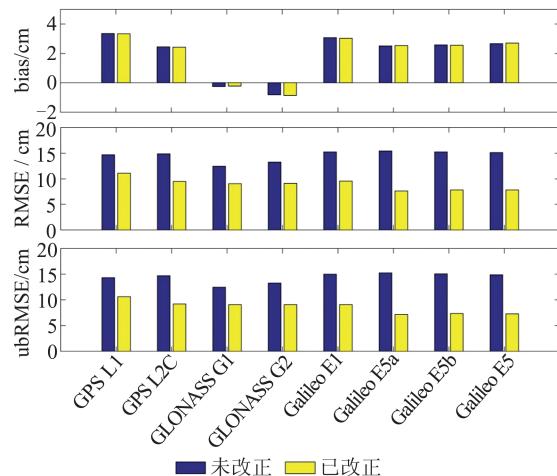


图9 SC02测站海面动态改正前后多模多频GNSS-IR潮位反演精度对比

Fig. 9 Comparison of GNSS-IR Tidal Level Inversion Accuracy Before and After Sea Surface Dynamic Correction at SC02 Station

表4和表5分别统计了HKQT和SC02测站GNSS-IR和验潮站方法获得的8个主要分潮项的振幅和迟角以及RMSE。从表4可以看出,在HKQT测站,GNSS-IR各个频段和融合的分潮结果总体能够与验潮站结果很好吻合,除了少数频段在K1分潮项上的振幅与验潮站结果差异大于2 cm外,其他频段的振幅差异基本都小于1 cm,表明GNSS-IR方法能够较好地捕获主要潮汐项。频段间的分潮振幅结果比较表明,BDS B1频段与验潮站的振幅结果差异最大(0~3 cm),GLONASS G1差异最小(基本小于1 cm),导致上述结果的原因与BDS观测值较少,GLONASS观测值较多有关。分潮项迟角结果显示GNSS-IR

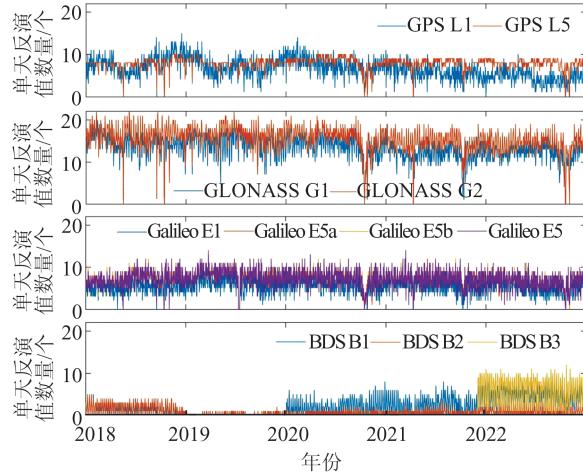


图10 HKQT测站多模多频GNSS-IR潮位反演值数量的时序变化

Fig. 10 Time Series of the Number of Tide Level Retrievals in Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR at HKQT Station

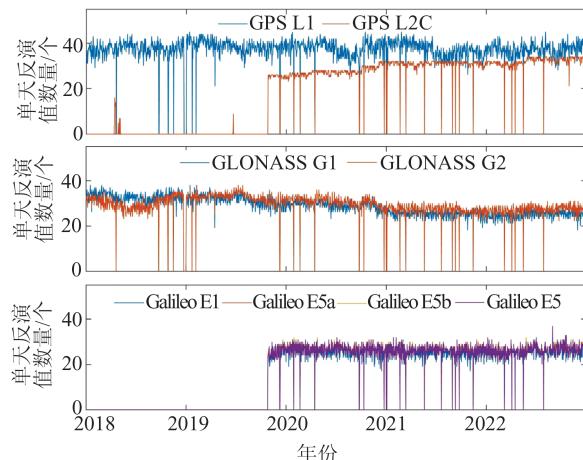


图11 SC02测站多模多频GNSS-IR潮位反演值数量的时序变化

Fig. 11 Time Series of the Number of Tide Level Retrievals in Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR at SC02 Station

总体上能够获取与验潮站结果接近的结果,但在部分频段部分分潮项上,迟角结果可能会存在较大差异($>3^\circ$),这主要是由单一频率的GNSS-IR潮位观测结果时间分辨率较低导致,而融合结果因为具有更高的时间分辨率,其相位结果要优于单频的相位结果。在HKQT测站,误差较大的为GPS L5和BDS B2频段,其RMSE均在11 cm左右,GLONASS系统的RMSE最小约为5 cm,其他频段的RMSE在7 cm左右,而融合结果的RMSE接近GLONASS的RMSE,说明融合结果具有较好的精度。从表5可以看出,相比于HKQT测站,SC02测站分潮结果与验潮站的分潮结果更为接近,其主要原因在于SC02测站具

有更多的观测值,因此在调和分析上精度更高,调和分析的 RMSE 也表明了这一点,各频段和融合结果的调和分析误差在 1~4 cm,显著低于 HKQT 测站的调和分析误差。同样地,SC02 测

站 GLONASS 系统的调和误差最小(~ 1 cm),融合结果的调和误差(2.6 cm)略高于 GLONASS,但明显优于其他系统,再次说明了融合结果的调和分析具有较好的精度。

表 4 HKQT 测站 GNSS-IR 潮位调和常数及 GNSS-IR 调和分析误差

Tab. 4 Harmonic Constants and Errors of GNSS-IR Tide Levels at HKQT Station

频段	分潮项																RMSE /cm	
	M2		K1		O1		S2		P1		N2		Q1		K2			
	振幅/ cm	迟角/ °																
L1	37.8	38.1	36.8	177	28.6	139	14.3	55	10.2	178	8.42	24.5	5.06	125	5.33	80.7	7.0	
L5	36.7	42.5	33.1	182	30.2	144	14.6	53.1	11.5	184	8.08	29.2	5.63	128	4.9	48.1	11.4	
G1	37.6	37.5	36.4	176	28.2	138	14.4	57	11.5	174	8.23	26.5	5.24	122	4.16	46.5	5.5	
G2	37.2	38.8	34.8	178	28.2	139	15	53.1	11.3	175	8.13	26.1	5.28	122	4.63	45.8	5.3	
E1	38.8	42.3	34.8	184	27.7	140	15.2	60.9	11.1	176	8.65	32.9	5.13	123	4.54	57.2	7.6	
E5a	37.9	43.7	34.8	182	28.1	142	14.7	62.1	11.2	177	8.42	32	5.18	125	5.69	62.2	7.4	
E5b	37.8	43.1	34.8	183	28.3	142	14.5	61.9	11.1	177	8.35	31.1	5.29	124	5.58	72.3	7.4	
E5	37.5	43.1	35.3	181	27.8	142	14.6	62	11.1	177	8.4	31	5.14	125	5.11	60	7.0	
B1	37.7	38.4	33.3	173	27.5	141	15.4	58.8	10.6	182	8.61	30.8	4.95	123	3.7	9.42	7.4	
B2	38	37.7	37.1	176	29.6	143	16.1	55.4	11.7	172	8.28	33.2	5.13	123	4.74	77.1	11.6	
融合	37.7	39.9	33.3	179	28.4	140	14.6	58.5	11.0	175	8.32	27.9	5.28	123	3.78	53.6	5.8	
实测	38.6	35.1	36.3	178	29	138	15.2	53.6	11.5	173	8.44	22.8	5.50	122	4.66	52.5		

表 5 SC02 测站 GNSS-IR 潮位调和常数及 GNSS-IR 调和分析误差

Tab. 5 Harmonic Constants and Errors of GNSS-IR Tide Levels at SC02 Station

频段	分潮项																RMSE /cm	
	M2		K1		O1		S2		P1		N2		Q1		K2			
	振幅/ cm	迟角/ °																
L1	55.8	10.56	76.1	280.6	43.1	257.9	13.2	35.57	23.3	278.3	12.1	342.7	7.25	250.1	3.66	46.96	3.7	
L2C	55.4	10.47	75.0	278.6	42.9	258.0	13.4	35.56	24.1	279.0	11.9	343.9	7.31	250.8	5.54	51.06	4.0	
G1	55.6	10.43	75.6	279.9	43.2	258.6	13.2	34.86	23.3	278.2	12.1	342.7	7.24	249.7	3.58	39.63	1.3	
G2	55.5	10.67	75.4	279.9	42.9	258.3	13.4	35.76	23.9	279.2	12.0	342.9	7.31	249.3	3.26	40.84	1.4	
E1	55.7	10.31	75.3	279.5	43.0	258.0	13.2	33.7	23.8	278.1	12.1	342.9	7.41	249.9	2.94	44.54	4.4	
E5a	55.6	10.5	75.4	279.8	42.8	258.2	13.4	35.35	24.1	279.0	11.9	342.7	7.33	251.0	3.56	54.96	3.5	
E5b	55.5	10.46	75.4	280.0	42.8	258.3	13.4	35.12	24.0	279.0	11.8	342.8	7.39	251.1	3.77	48.43	3.4	
E5	55.3	10.44	75.1	279.9	42.7	258.3	13.3	35.24	24.0	279.0	11.8	342.7	7.31	251.1	3.66	53.54	3.6	
融合	55.6	10.51	75.1	279.9	43.0	258.2	13.2	35.57	23.6	278.7	12.0	342.8	7.26	250.0	3.85	46.14	2.6	
实测	55.7	10.41	75.6	280.2	43.1	258.2	13.4	35.16	24.0	279.1	12.1	342.7	7.34	249.6	3.68	42.26		

对移除周期性潮波项的残余潮位观测结果进行线性回归分析,估计了海平面的长期变化速度,并对其进行了显著性检验,结果见表 6。从表 6 可以看出,在 HKQT 测站,GNSS L1、GLONASS G1、Galileo E1、BDS B2 4 个频段的 $p > 0.05$,说明海平面的线性变化趋势不显著;而其他 6 个频段和融合结果的线性趋势均十分显著且 $p < 0.05$,表明海平面存在显著的长期变化趋势,且为上升趋

势。基于通过显著性检验的结果估计海平面的上升速度在 4~6 mm/a 之间,其中,Galileo E5 频段和融合结果的趋势与验潮站回归分析结果(6.0 mm/a)最为吻合。上述结果表明,香港近海很可能存在较为强烈的海平面上升趋势。在 SC02 测站,除了 GNSS L1 和 GLONASS 两个频段的 $p > 0.05$,其他频段包括融合结果的 $p < 0.001$,说明线性趋势显著,其中,GNSS L2C 和 Galileo 的

4个频段表明西雅图近海海面处于上升趋势,上升速度在6.0~7.0 mm/a之间,而融合结果的线性回归表明海面以4.0 mm/a的速度下降,与验潮站的线性回归结果(-3.0 mm/a)更接近,分析原因,GPS L2C和Galileo的潮位观测值从2019年10月开始,相比于其他频段和融合结果,时序上

少了约2 a,因此其线性趋势与5 a的验潮站的海面变化趋势并不一致。HKQT和SC02测站线性趋势分析的结果表明了GNSS-IR技术在监测长期海平面变化方面的有效性,同时也说明了多系统多频GNSS-IR潮位融合有助于更为准确地估计海面变化。

表6 多模多频GNSS-IR反演潮位长期趋势拟合结果

Tab. 6 Long-Term Trend Fitting Results of Tidal Level of Multi-mode and Multi-frequency GNSS-IR Inversion

系统	频段	HKQT		SC02	
		斜率/(mm·a ⁻¹)	显著性检验 p	斜率/(mm·a ⁻¹)	显著性检验 p
GPS	L1	8.0	0.143 0	-1.0	0.087 1
	L2C			6.0	<0.001
	L5	5.0	<0.001		
GLONASS	G1	1.0	0.167 5	0	0.504 4
	G2	4.0	<0.001	-1.0	0.052
Galileo	E1	-1.0	0.233 2	7.0	<0.001
	E5a	5.0	<0.001	7.0	<0.001
	E5b	5.0	<0.001	7.0	<0.001
	E5	6.0	<0.001	7.0	<0.001
BDS	B1	5.0	0.004 8		
	B2	-4.0	0.108 1		
融合		6.0	<0.001	-4.0	<0.001
验潮站实测		6.0	<0.001	-3.0	<0.001

5 结语

本文首先利用GNSS-IR技术获取了HKQT和SC02测站5 a长时序多系统多频的潮位反演结果,然后进行了潮汐调和分析和海平面长期变化趋势估计,得到主要的结果和结论如下:

1) 利用单天线大地测量型接收机进行潮位反演时,不同频段反演海面高的精度有所差异,经过海面动态误差改正后,精度在10 cm左右,不同接收机和不同环境会导致同一频段有不同的精度表现。海面动态误差改正能有效降低GNSS-IR潮位反演误差,以ubRMSE计算平均精度可提升20.5%。通过多模多频数据融合可提高海面高反演结果的时间分辨率,并在一定程度上提高精度,但无法超越最优频段的反演精度。

2) 潮汐调和分析结果表明,GNSS-IR各个频段的分潮结果振幅能够与验潮站结果很好吻合,差异大多在1 cm以内;但是,GNSS-IR的迟角结果可能与验潮站结果有较大差异,这主要是由于部分频段的观测值分辨率较低有关。回归分析结果表明HKQT邻海海平面存在较为强烈的上升趋势,平均值在6.0 mm/a,SC02邻海海平面则存

在一定的下降趋势,平均值约为-4.0 mm/a,均与验潮站回归结果(6.0 mm/a和-3.0 mm/a)吻合较好。

本文全面分析比较了多模多频GNSS-IR潮位反演结果、分潮结果和长期趋势估计结果,表明了GNSS-IR技术在上述领域的应用潜力和不足。未来将通过更为稳健的方法融合多模多频GNSS-IR数据获取基准统一、高精度、高时间分辨率的潮位结果,进而改善分潮和长期趋势估计结果。

参考文献

- [1] Li Dawei, Li Jiancheng, Jin Taoyong, et al. Monitoring Global Sea Level Change from 1993 to 2011 Using TOPEX and Jason Altimeter Missions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1421-1424. (李大炜, 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.)
- [2] Larson K M, Nievinski F G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 41-52.
- [3] McCreight J L, Small E E, Larson K M. Snow

- Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western U. S [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6892–6909.
- [4] Zhang Shuangcheng, Dai Kaiyang, Nan Yang, et al. Preliminary Research on GNSS-MR for Snow Depth [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 234–240. (张双成, 戴凯阳, 南阳, 等. GNSS-MR 技术用于雪深探测的初步研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 234–240.)
- [5] Chen Liangyu, An Jiachun, Wang Zemin, et al. Assessment of GNSS-IR-Based Snow-Depth Retrievals Using Observations from Different Receivers with the Same Antenna [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(8): 1312–1321. (陈亮宇, 安家春, 王泽民, 等. 同天线不同接收机的GNSS-IR雪深反演分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1312–1321.)
- [6] Wang Jiatong, Hu Yufeng, Li Zhenhong, et al. Rapid Estimation of Snow Water Equivalent Using GPS-IR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1666–1676. (王佳彤, 胡羽丰, 李振洪, 等. 利用GPS-IR技术快速估计雪水当量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1666–1676.)
- [7] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 537–543.
- [8] Chew C, Small E E, Larson K M. An Algorithm for Soil Moisture Estimation Using GPS-Interferometric Reflectometry for Bare and Vegetated Soil [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 525–537.
- [9] Guo Fei, Chen Weijie, Zhu Yifan, et al. A GNSS-IR Soil Moisture Inversion Method Integrating Phase, Amplitude and Frequency [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 715–721. (郭斐, 陈惟杰, 朱逸凡, 等. 一种融合相位、振幅与频率的GNSS-IR土壤湿度反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 715–721.)
- [10] Liu L, Larson K M. Decadal Changes of Surface Elevation over Permafrost Area Estimated Using Reflected GPS Signals [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 477–489.
- [11] Hu Y F, Liu L, Larson K M, et al. GPS Interferometric Reflectometry Reveals Cyclic Elevation Changes in Thaw and Freezing Seasons in a Permafrost Area (Barrow, Alaska) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(11): 5581–5589.
- [12] Hu Y F, Wang J, Li Z H, et al. Ground Surface Elevation Changes over Permafrost Areas Revealed by Multiple GNSS Interferometric Reflectometry [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(8): 56.
- [13] Liu Shanwei, Liang Chengjia, Wan Wei, et al. A New GNSS-IR Method to Monitor Permafrost Freeze-Thaw Deformation Considering the Terrain Effect [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 77–89. (刘善伟, 梁承佳, 万玮, 等. 一种考虑地形影响的GNSS-IR冻土冻融形变监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 77–89.)
- [14] 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.
- [15] Zhou Dongxu, Feng Yikai, Zhang Huayi, et al. Analysis of Relative Sea Level Change of Tianjin Coast in Recent 25 Years Using Satellite Altimetry and GNSS Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 775–784. (周东旭, 冯义楷, 张化疑, 等. 联合卫星测高和GNSS观测的天津沿海近25年相对海平面变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 775–784.)
- [16] Hu Yuan, Chen Xingyang, Gu Wangwang, et al. Research on GNSS-R Sea Surface Altimetry Status and Common Methods [J]. *GNSS World of China*, 2020, 45(3): 96–103. (胡媛, 陈行杨, 顾旺旺, 等. GNSS-R海面测高现状及其常用方法研究进展[J]. 全球定位系统, 2020, 45(3): 96–103.)
- [17] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17502.
- [18] Larson K M, Small E E, Gutmann E D, et al. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24405.
- [19] 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.
- [20] Löfgren J S, Haas R. Sea Level Measurements Using Multi-frequency GPS and GLONASS Observations [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 50.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Wang Jie, He Xiufeng, Wang Xiaolei, et al. Application of Wavelet Analysis in Tidal by GNSS-IR [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(2): 82–89. (王杰, 何秀凤, 王笑蕾, 等. 小波分析在GNSS-IR潮位反演中的应用[J]. 导航定位学报, 2020, 8(2): 82–89.)
- [25] Hu Yuan, Yuan Xintai, Chen Xingyang, et al. GNSS-IR Model of Sea Level Altimetry Inversion Combining Wavelet Transform with Improved Burg Algorithm[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(1): 21–24. (胡媛, 袁鑫泰, 陈行杨, 等. 小波变换和改进Burg算法的GNSS-IR海面高度反演模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(1): 21–24.)
- [26] Wang Jie, He Xiufeng, Wang Xiaolei, et al. Comparative Analysis of Dynamic Correction Method in Tidal Monitoring by GNSS-IR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(8): 811–817. (王杰, 何秀凤, 王笑蕾, 等. GNSS-IR海潮监测的动态改正方法对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(8): 811–817.)
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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. (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(1): 68–76.)
- [30] Wang Xiaolei, He Xiufeng, Song Minfeng, et al. Analysis of Inter-Frequency Bias in Multi-mode Multi-frequency GNSS-IR Water Level 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.)
- [31] 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. (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.)
- [32] Larson K M. GPS Interferometric Reflectometry: Applications to Surface Soil Moisture, Snow Depth, and Vegetation Water Content in the Western United States [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016, 3(6): 775–787.
- [33] Lomb N R. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2): 447–462.
- [34] Santamaría-Gómez A, Watson C, Gravelle M, et al. Levelling Co-located GNSS and Tide Gauge Stations Using GNSS Reflectometry[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 241–258.
- [35] Bennett G G. The Calculation of Astronomical Refraction in Marine Navigation[J]. *Journal of Navigation*, 1982, 35: 255–259.
- [36] Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w) [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 433–441.
- [37] 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.
- [38] Codiga D L. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions [C]//Graduate School of Oceanography Technical Report, Rhode Island, USA, 2011.