



GNSS-IR用于近海岸绝对海平面变化监测研究

刘攀, 张双成, 王恒利, 江波, 武慧琳, 辛勇军, 王培源

引用本文:

刘攀, 张双成, 王恒利, 等. GNSS-IR用于近海岸绝对海平面变化监测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(6): 765–773.

Liu Pan, Zhang Shuangcheng, Wang Hengli, et al. GNSS-IR for Monitoring Absolute Sea Level Changes in Near-Coastal Areas[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(6): 765–773.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.08.271>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地基GNSS观测数据的贵州高原地区水汽层析精度分析

Accuracy Analysis of Water Vapor Tomography Based on Ground-Based GNSS Observation Data in Guizhou Plateau

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1162–1166 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.011>

融合CORS网与时序InSAR研究北京地区地面形变

Study on Land Subsidence by Combining CORS Network and Time Series InSAR in Beijing Area

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1123–1128 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.005>

一种GNSS定位结果质量评价指标

An Evaluation Indicator for the GNSS Positioning Quality

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1167–1171 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.012>

多轨道时序InSAR拟稳基准平差方法研究

Research on Quasi-Stable Datum Adjustment Method for Multi-Track Time Series InSAR

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1199–1204 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.018>

基于FFT和小波变换的台风天气GNSS ZTD周期特征分析

Typhoon Weather GNSS ZTD Cycle Characteristics Analysis Based on FFT and Wavelet Transform

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1032–1038 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.008>

GNSS-IR 用于近海岸绝对海平面变化监测研究

刘攀¹ 张双成¹ 王恒利¹ 江波¹ 武慧琳² 辛勇军¹ 王培源³

¹ 长安大学地质工程与测绘学院, 西安, 710054

² 自然资源部测绘标准化研究所, 西安, 710054

³ 中国科学院国家授时中心, 西安市, 710600

摘要: 采用融合 GNSS 干涉反射测量(GNSS-IR)与 GNSS 定位的新型监测方案, 以香港 7 个岸基站 10 a 以上观测数据为例, 开展近海岸绝对海平面变化监测研究。结果显示, 剔除精度较低的 HKSL 和 KYC1 站点后, 在其余站点每月平均相对海平面监测中, GNSS-IR 结果与验潮站数据一致性良好, 多数站点 RMSE 小于 6 cm, 相关系数大于 0.86, 海平面上升趋势与验潮站差异小于 1 mm/a (区域平均仅 0.036 mm/a); 在绝对海平面监测中, 引入动态大气校正(dynamic atmospheric correction, DAC)后, 岸基 GNSS 与卫星测高相应点区域平均速率差异由 -3.40 mm/a 缩小至 -0.76 mm/a, 趋势高度一致; 与香港验潮站 50 a 长时序绝对海平面数据对比, 偏差多数小于 1 mm/a, 且各站均处于区域绝对海平面监测的合理误差范围内。研究表明, GNSS-IR 与 GNSS 定位融合可有效弥补传统监测盲区, 为沿海海平面变化监测与风险评估提供可推广的新技术路径。

关键词: GNSS-IR; GNSS 定位; 海平面高度反演; 近海岸; 海平面变化

中图分类号: P228

文献标识码: A

在气候变暖的驱动下, 全球海平面呈现加速上升的趋势^[1]。在卫星测高技术诞生之前, 验潮站是进行海平面监测的主要手段, 如 Qu 等^[2]利用中国沿海 25 个验潮站数据, 在扣除了地面垂直运动影响后, 发现我国 1980—2016 年海平面的上升速率为 2.9 ± 0.8 mm/a; Jevrejeva 等^[3]利用全球 1 277 个验潮站数据, 在通过冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)对地面垂直形变(vertical land motion, VLM)改正后, 计算得到全球海平面上升速率为 1.9 ± 0.3 mm/a (20 世纪)和 1.8 ± 0.5 mm/a (1970—2008 年), 全球海平面上升加速率为 0.02 ± 0.01 mm/a² (1807—2009 年)。然而, 验潮站在绝对海平面监测中仍面临 VLM 改正依赖外部数据、参考基准不统一、空间覆盖有限等问题^[4]。1993 年卫星测高开始对全球海平面进行定期监测, 该技术凭借其全球范围、全天候监测的优势, 已成为现代海平面监测的重要手段。张琪等^[5]利用 1980—2019 年的卫星测高数据研究天津沿海的海平面变化, 结果表明, 最低潮位变化速率最大, 为 1.35 cm/a, 平

均潮差、最大潮差整体呈下降的趋势; 潘轶等^[6]利用多代卫星测高资料对中国 1993—2015 年南海海平面变化规律进行分析, 结果表明, 中国南海海平面呈上升趋势, 平均上升速率为 2.4 mm/a。虽然卫星测高能够进行全球范围的监测, 但由于其监测时间相对较短, 且在近海岸由于雷达回波受地面的污染和近岸海面高度校正项不精确的缘故, 导致其海岸区域结果不可靠^[7], 故而海岸带海平面监测中, 上述 2 种主流技术都受到很大的限制。

在传统海平面监测中, 通常在验潮站附近布设 GNSS 接收机, 以获取地面垂直形变信息并对验潮记录进行改正。随着 GNSS 技术的不断发展, 一种融合 GNSS 定位与遥感思想的交叉技术——GNSS 干涉反射测量(GNSS interferometric reflectometry, GNSS-IR)逐渐形成。该技术利用 GNSS 信号的干涉反射特性反演周围环境参数, 在海洋水位监测领域中的应用价值日益凸显, 并逐步拓展为基于 GNSS 的水文学研究方向^[8-10]。

收稿日期: 2025-08-05

项目来源: 国家自然科学基金(42474028, 42074041)。

第一作者简介: 刘攀, 硕士生, 主要研究方向为 GNSS 反射测量与应用, E-mail: 2024126024@chd.edu.cn。

通讯作者简介: 张双成, 博士, 教授, 主要研究方向为对地观测与防灾减灾, E-mail: shuangcheng369@chd.edu.cn。

目前研究多侧重于相对水位反演,而忽略了地面沉降对长期监测的影响。虽有研究开始结合 GNSS 定位与 GNSS-IR 监测不稳定平台的水位变化^[11-13],但针对近海岸绝对海平面融合监测的系统性研究仍较少。针对海岸带海平面监测中验潮站的 VLM 数据缺失或 GIA 改正精度较差、各验潮站高程基准不统一,以及卫星测高数据在近岸区域可靠性受限等问题,本研究选取香港区域 7 个岸基 GNSS 站 10 a 以上的 4 系统信噪比观测数据,采用 GNSS-IR 技术反演水位变化和 GNSS 定位技术计算绝对坐标框架下的高程变化,并就岸基 GNSS 站对海岸带相对海平面和绝对海平面变化速率分别进行讨论和研究,旨在探索 GNSS-IR 技术应用于海岸带绝对海平面监测这一新研究方向的可行性,为未来海岸带海平面监测体系提供创新性数据源与技术支撑。

1 方法原理与数据来源

1.1 原理与方法

1.1.1 GNSS-IR 技术反演海平面高度原理

GNSS-IR 技术利用直射信号与海面反射信号的干涉效应来反演海面高度。在低高度角下,剔除直射信号趋势项后的信噪比(SNR)残差序列呈现出周期性振荡特征。在实际计算中,首先针对低高度角观测受大气折射干扰的问题,引入 Bennett 折射模型修正观测高度角,以获取有效高度角^[14]。基于修正后的几何关系,利用 Lomb-Scargle 谱分析(LSP)提取的 SNR 振荡的主频率 f 与天线相位中心至海面的垂直距离 H 满足如下关系^[15]:

$$H = \frac{\lambda f}{2} \quad (1)$$

式中, λ 是信息频段的波长。

1.1.2 绝对海平面计算方法

岸基 GNSS 站获取绝对海平面高度变化的原理如图 1 所示。其中 SSH 为绝对海平面高度; R 为利用 GAMIT/GLOBK 软件解算并转换至 Topex/Poseidon 参考椭球下的测站大地高; H 为使用 GNSS-IR 技术反演出的海面与接收机天线相位中心的距离。由于天线相位中心与天线参考点之间的垂向距离几乎保持不变,且数值远小于潮位变化的幅度,在本次研究的精度需求框架下不考虑两者之间的差异。因此从图 1 的几何关系可得^[12]:

$$SSH = R - H \quad (2)$$

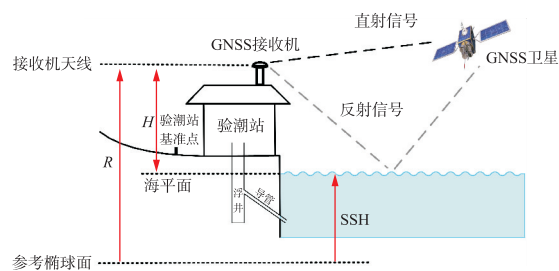


图 1 基于 GNSS-IR 的绝对海平面高度反演示意图
Fig.1 Schematic diagram of absolute sea level height inversion based on GNSS-IR

数据处理中,先利用四分位距(interquartile range, IQR)法剔除 H 与 R 序列中的粗差;随后,采用潮汐调和分析法消除 4 大分潮影响,并经高频滤波获取日、月平均海平面序列;最后,构建顾及季节性信号(年、半年周期)及加速度项的函数模型:

$$y(t) = y_0 + r_1 t + \frac{1}{2} r_2 t^2 + \sum_{i=1}^2 \{a_i \sin(\omega_i t) + b_i \cos(\omega_i t)\} + \epsilon(t) \quad (3)$$

式中, t 为时间; $y(t)$ 为观测的海平面高度; y_0 和 r_1 分别对应基准截距与线性变化速率; r_2 为加速度参数; a_i 和 b_i 为季节性信号(年周期、半年周期)的振幅系数; $\epsilon(t)$ 为服从 AR1(first-order autoregressive)统计特性的时间相关噪声项。参数解算依托 Hector 软件,在 AR1 噪声模型下利用极大似然估计(MLE)获取顾及有色噪声影响的海平面变化趋势。

1.2 数据来源

本研究以香港区域为实验区域,使用 GNSS 观测数据进行相对和绝对海平面测量,并分别选择相应的验潮站和卫星测高数据作为相对和绝对海平面的参考数据集开展研究。本文使用香港卫星定位参考站网的 GNSS 原始数据。在 GNSS 站点选择方面,除早先已有研究表明比较适于水位反演的 HKQT 和 HKPC 站点外,还选择了 HKSS、HKSL、HKLM、KYC1、HKWS 这 5 个具备一定水位反演能力的站点^[16],站点分布如图 2 所示。GNSS-IR 反演数据使用采样率为 5 s 的 4 系统卫星的信噪比(SNR)数据,数据的时长分析图如图 3 所示。参考验潮站使用香港天文台的鲗鱼涌、大埔滘、尖鼻咀 3 个验潮站每日平均结果。除 HKQT 站与鲗鱼涌验潮站并址外,其余 GNSS 站与对应验潮站之间均存在一定空间距离,这会在一定程度上导致两者相关性略有

下降。然而,由于研究区域范围相对较小,不同站点间的海平面变化总体一致,因此距离带来的影响相对有限。鉴于此,本文选取与各 GNSS 站距离最近的验潮站作为参考,用于精度评估,并在后文对空间距离引起的差异性进行进一步分析与讨论。

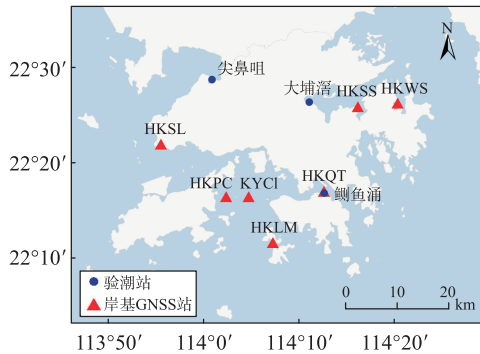


图 2 岸基 GNSS 站和验潮站分布

Fig.2 Distribution of shore-based GNSS stations and tide gauge stations



图 3 GNSS SNR 数据时长

Fig.3 GNSS SNR data duration

用于绝对海平面参考的卫星测高数据来自法国的 CLS(Collecte Localisation Satellites)机构通过 DUACS(Data Unification and Altimeter Combination System)多任务卫星高度计数据处理系统生成的海平面异常(sea level anomaly, SLA)每日数据,其空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$,以及来自 AVISO(Archiving, Validation

and Interpretation of Satellite Oceanographic Data)提供的平均海平面(mean sea surface, MSS)数据。其中,DUACS 提供的 SLA 产品在生成过程中已包含常规高度计改正项(潮汐改正、对流层/电离层改正、轨道改正等),且采用最优插值融合多颗卫星轨道形成日网格场。此外,由于海平面变化受大气效应的影响,且这种影响可达十余厘米^[17],为消除大气效应对岸基 GNSS 站绝对海平面测量结果的影响,使其与卫星测高产品保持一致,本研究使用了 AVISO 提供的动态大气校正(dynamic atmospheric correction, DAC)产品,其时间采样率为 6 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

如图 3 所示,除 KYC1 站(观测时长为 9 a)外,其余各站均具备 10 a 以上的 GNSS-IR 观测数据(其中 HKQT 站观测时长达到 16 a),已具备开展海平面长期变化趋势分析的能力。针对海岸带海平面监测所面临的挑战,本文融合 GNSS-IR 水位反演与 GNSS 定位技术,探索其在区域绝对海平面变化监测中的适用性与潜力,具体技术路线如图 4 所示。

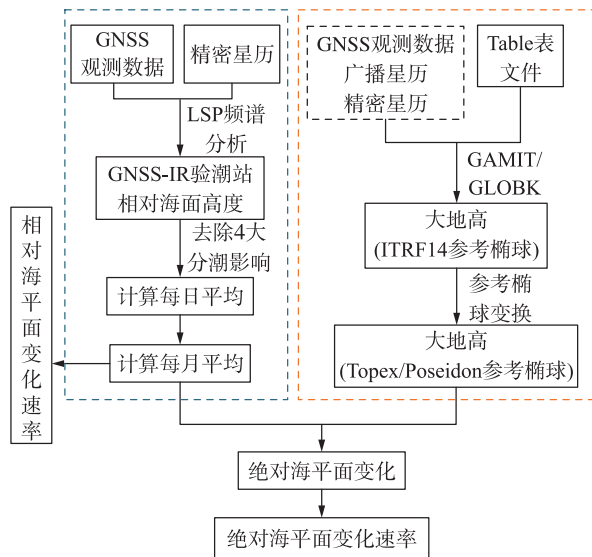


图 4 技术路线图

Fig.4 Technology roadmap

2 实验与分析

2.1 岸基 GNSS 站的相对海平面测量

本文选取的香港 7 个岸基 GNSS 站的站点周围环境和第一菲涅尔反射区如图 5 所示。为减少周围环境对水位反演的干扰,提高 GNSS-IR 水位反演质量,本研究根据第一菲涅尔反射区设置卫星高度角和方位角范围,并根据初步反演高

度设置大致反射高度,如表 1 所示。已有研究指出,在低高度角条件下,同时采用对流层路径延迟改正与高度角折射改正会引入额外误差^[18]。基于这一认识,本研究未使用基于映射函数的对流层延迟修正。为尽可能减弱大气折射对信号传播的几何影响,本研究仍对高度角进行折射弯

曲改正。该改正仅用于调整信号的入射方向,不涉及路径延迟,因此不会与对流层延迟模型发生重复修正。折射量由 Bennett 模型计算,从而获得更符合实际传播几何的有效高度角。最后,依托 Larson 的 gns sre fl 开源软件,通过 LSP 频谱分析方法进行水位高度反演^[19]。



图 5 各站点环境和第一菲涅尔区
Fig.5 Environment of each site and the first Fresnel zone

表 1 GNSS-IR 观测站点场景参数

Tab.1 GNSS-IR observation site scenario parameters

GNSS 站	反射高度/m	高度角范围/(°)	方位角范围/(°)
HKLM	11	1~7	190~250
HKPC	20	4~8	190~310
HKQT	7	4~9	0~105, 300~360
HKSL	98	4~8	170~260
HKSS	40	5~15	0~120
HKWS	65	5~12	0~150
KYCI	119	5~12	0~360

通过 GNSS-IR 技术反演得到时间不均匀分布的相对海平面高度变化序列后,使用 IQR 方法剔除粗差的影响。为去除 4 大分潮的影响,获取每日平均海平面序列,使用 python 的第三方库 utide 进行潮汐调和,分析,提取 4 大分潮分量并予以去除,然后计算每日和每月平均海平面高度时间序列。

除 HKQT 站与鲎鱼涌验潮站并址外,其余 GNSS 站与验潮站之间均存在一定空间距离。为评估空间距离对精度的影响,分别计算 HKQT 站与鲎鱼涌、大埔滘和尖鼻咀验潮站之间的每日与每月平均海平面的 RMSE 和相关系数(表 2)。以并址的鲎鱼涌站为基准可知,随距离增加,GNSS 与验潮站的差异略有增大:每日平均海平面差异为 0.7~2.5 cm,月平均差异为 0.6~1.7 cm。据此推断,研究区内其他站点的空间差异影响亦普遍在

表 2 HKQT 站与各验潮站 RMSE 和相关系数

Tab.2 RMSE and correlation coefficients for HKQT station and various tide gauge stations

GNSS 站	验潮站	距离	每日平均		每月平均	
			RMSE/ cm	相关 系数	RMSE/ cm	相关 系数
HKQT	鲎鱼涌	并址	5.4	0.94	3.0	0.97
	大埔滘	17.1 km	6.1	0.93	3.6	0.96
	尖鼻咀	22.8 km	7.9	0.86	4.7	0.90

0~2 cm 范围内,属可控水平。因此,本文选取各 GNSS 站邻近的验潮站进行精度评估,并以 HKQT 站为例进行重点分析。HKQT 站每日和每月平均海平面高度变化如图 6 和图 7 所示,为便于分析 HKQT 站与鲎鱼涌验潮站之间的一致性,分别绘制两者每日和每月平均的一致性散点图,如图 8 所示。可以看出, HKQT 站的散点在每日与每月尺度上均紧密分布于中心线两侧,仅有极少数离群点。总体来看,该站的 GNSS-IR 反演结果与并址验潮站高度一致,充分说明其水位反演质量稳定可靠,为长期海平面变化监测提供了坚实的依据。

为定量评估各岸基 GNSS 站的每日和每月平均海平面高度反演结果的精度,分别计算其相应的 RMSE 和相关系数,如表 3 所示。由表可知,反演质量最好的为 HKPC、HKQT 和 HKSS

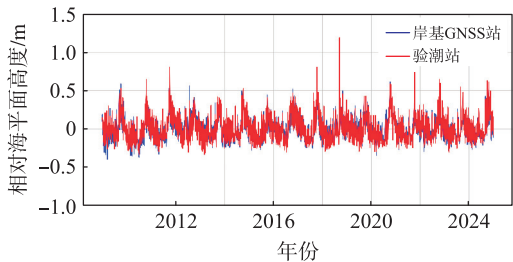


图 6 HKQT 站与验潮站每日相对海平面时间序列对比
Fig.6 Daily comparison of relative sea level time series between HKQT station and tide gauge station

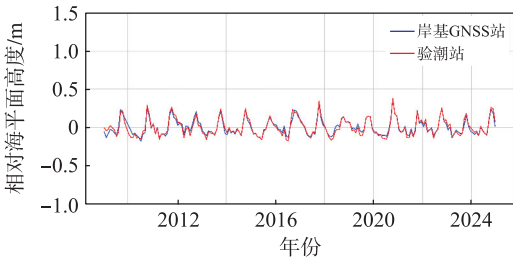
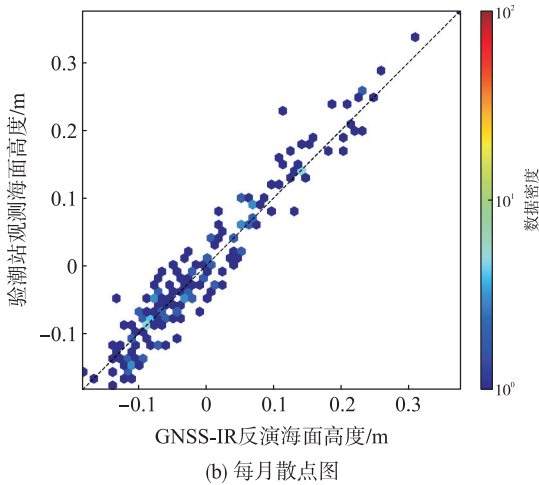
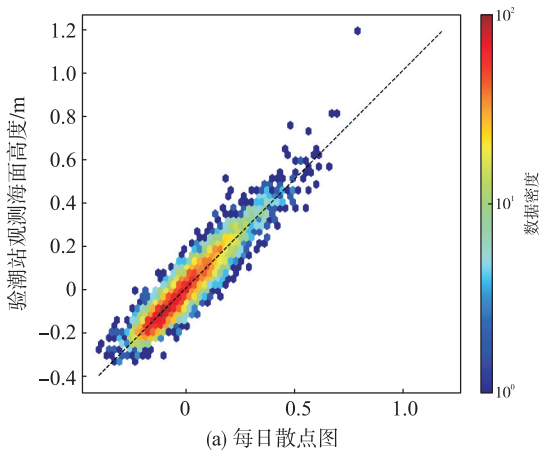


图 7 HKQT 站与验潮站每月相对海平面时间序列对比
Fig.7 Monthly comparison of relative sea level time series between HKQT station and tide gauge station



黑色点线代表直线 $y=x$,下同
图 8 HKQT 站与验潮站每日和每月相对海平面一致性散点图

Fig.8 Scatter plots of daily and monthly relative sea level between the HKQT station and the tide gauge station

表 3 各 GNSS 站每日和每月相对海平面反演精度
Tab.3 Accuracy of daily and monthly relative sea level inversion at each GNSS station

GNSS 站	验潮站	每日平均		每月平均	
		RMSE/cm	相关系数	RMSE/cm	相关系数
HKLM	鲗鱼涌	10.2	0.78	7.8	0.76
HKPC	鲗鱼涌	8.2	0.86	5.8	0.86
HKQT	鲗鱼涌	5.4	0.94	3.0	0.97
HKSL	尖鼻咀	22.8	0.36	18.9	0.30
HKSS	大埔滘	8.6	0.86	5.7	0.88
HKWS	大埔滘	13.3	0.69	10.7	0.63
KYC1	鲗鱼涌	17.6	0.39	14.6	0.28

站,它们与邻近验潮站之间的每日平均 RMSE 均小于 10 cm,每月平均 RMSE 均小于 6 cm,且每日和每月的相关系数均大于 0.86。HKLM 和 HKWS 站的反演质量居中,其每日平均的 RMSE 为 10.2~13.3 cm,每月平均的 RMSE 为 7.8~10.7 cm,相关系数均大于 0.6。相比之下,反演质量最差的为 2 个反射高度较高的站点 HKSL 和 KYC1(HKSL 为 98 m,KYC1 为 119 m),它们与邻近验潮站之间的每日平均 RMSE 为 17.6~22.8 cm,每月平均 RMSE 为 14.7~18.9 cm,相关系数为 0.28~0.39,这一现象与 Nikolaidou 等^[20]的结论一致,即在 SNR 数据采样率一定的情况下,随着反射高度的增加,信号混叠问题会逐渐加剧,从而导致反演精度下降。此外,每日与每月精度评估指标的排序表现出高度一致性,表明通过潮汐调和与分析去除主要分潮后,序列中的周期性误差已得到有效抑制。考虑到长期海平面变化研究的特性,下文将重点聚焦于月平均尺度的趋势分析。

在相对海平面的年平均海平面变化速率计算中,由于海平面的观测数据之间并不完全相互独立,采用简单的线性回归计算趋势会低估趋势的不确定性,且已有研究表明 AR1 噪声模型为每月海平面变化速率最佳模型^[18]。为此,本文利用 Hector 软件,依据 § 1.1 中定义的 AR1 模型,通过极大似然估计法对月平均海平面数据进行解算,相对海平面变化结果如表 4 所示。

研究表明, HKQT 和 HKSS 站的相对海平面呈上升趋势,变化速率分别为 1.32 mm/a 和 0.71 mm/a,与邻近验潮站的差值分别为 0.95 mm/a 和 0.92 mm/a。其余 5 个站点则表现为海平面下降趋势,变化速率为 -1.95~-0.26 mm/a,与邻近验潮站的差值范围为 -2.01~

表 4 岸基 GNSS 站与验潮站相对海平面变化速率的比较

Tab.4 Comparison of relative sea level change rates between shore-based GNSS stations and tide gauge stations

GNSS 站	时间范围	GNSS 站相对海平面变化 速率/mm·a ⁻¹	验潮站相对海平面变化 速率/mm·a ⁻¹	GNSS 站与验潮站相对海平面变化 速率差值/mm·a ⁻¹
HKLM	2016—2024 年	-1.03±4.10	-0.84±2.70	-0.19
HKPC	2014—2024 年	-0.26±2.63	0.63±1.97	-0.89
HKQT	2009—2024 年	1.32±2.09	0.37±1.21	0.95
HKSL	2013—2024 年	-4.85±7.80	8.88±3.00	-13.73
HKSS	2013—2024 年	0.71±2.64	-0.21±2.06	0.92
HKWS	2013—2024 年	-0.82±3.43	-0.21±2.06	-0.61
KYC1	2017—2024 年	-1.95±5.60	0.06±3.32	-2.01

-0.89 mm/a。其中,在精度分析中表现最差的 2 个站 HKSL 和 KYC1,其海平面下降速率最大,不确定度也最高,且与邻近验潮站的差值最为显著。这表明反演结果的精度直接影响了海平面变化速率计算的可靠性。

基于结果可靠性,考虑排除 HKSL 和 KYC1 站,其余 5 个站与邻近验潮站之间的差值为 ±1 mm/a之内,区域平均相对海平面差值仅为 0.036 mm/a。这一结果表明,数据质量较高且观测条件适宜的 GNSS 站点在长期相对海平面变化监测中具有良好的可靠性。

2.2 岸基 GNSS 站的绝对海平面测量

为准确监测和分析绝对海平面变化趋势,本研究使用 GAMIT/GLOBK 软件进行坐标序列解算,数据处理策略与文献[21]基本一致,并将解算结果由 ITRF14 参考框架转换至卫星测高所采用的 Topex/Poseidon 参考椭球面。鉴于近岸测高点易受陆地回波等噪声的影响,而距离过大又可能引入不同海域水文特征所带来的偏差^[12],在岸基 GNSS 站周围限定约 100 km 的搜索范围以获取候选测高网格点。随后利用 2 组时间序列的 RMSE 进行匹配判别。相较于仅采用相关系数,RMSE 同时反映整体偏差与变化一致性,更适用于绝对海平面序列的对比,因此最终选择 RMSE 最小的网格点作为参考位置。为消除大气压效应对海平面高度的影响,使岸基 GNSS 站与卫星测高数据保持一致性,对岸基 GNSS 站的绝对海平面高度序列进行 DAC 改正。HKQT 站的最终结果如图 9 所示,DAC 改正前后的一致性散点图如图 10 所示。从图 10 可知,HKQT 站测得的绝对海平面高度与相应卫星测高点具有良好的一致性,且经过 DAC 改正后,散点分布于中心线两侧呈现出更高的对称性。为定量评估岸基 GNSS 站与卫星测高结果之间的相关程度,计算其相应的 RMSE 和相关系数,如表 5 所示。

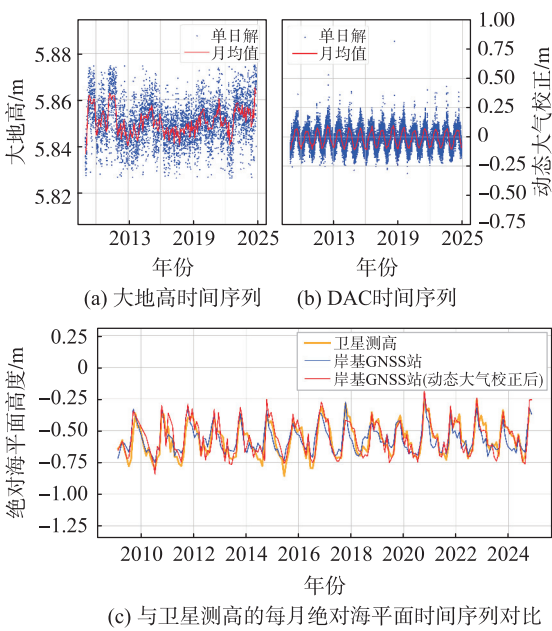


图 9 HKQT 站大地高、DAC 时间序列分析及与卫星测高的绝对海平面对比

Fig.9 HKQT station geoid height, DAC time series analysis and comparison with satellite-measured absolute sea level

由表可知,HKLM、HKPC、HKQT 和 HKSS 站的相关性相对较好,为 0.44~0.83;HKWS 站相关性较差,为 0.27;HKSL 和 KYC1 的相关性最差,为-0.21 和-0.20。这一结果与相对海平面变化的分析结果一致。经过 DAC 改正后,各站点与其卫星测高点的相关性均得到了提高,其中 RMSE 降低了 1.28~5.11 cm,相关系数提高了 0.07~0.34,且反射高度越高,改正效果越显著。

为进一步评估岸基 GNSS 站在绝对海平面监测方面的能力,采用前文所述的函数模型(式(3))对各站点的绝对海平面变化速率进行估计,结果如表 5 所示。由表可知,岸基 GNSS 站的绝对年平均海平面变化速率在进行 DAC 改正前后差异较大,尤其是 HKSL 和 KYC1 站,改正前后差值高达 5.29~7.05 mm/a,显著超出其他站点的变化幅度,说明这 2 个站噪声水平较高、数据质

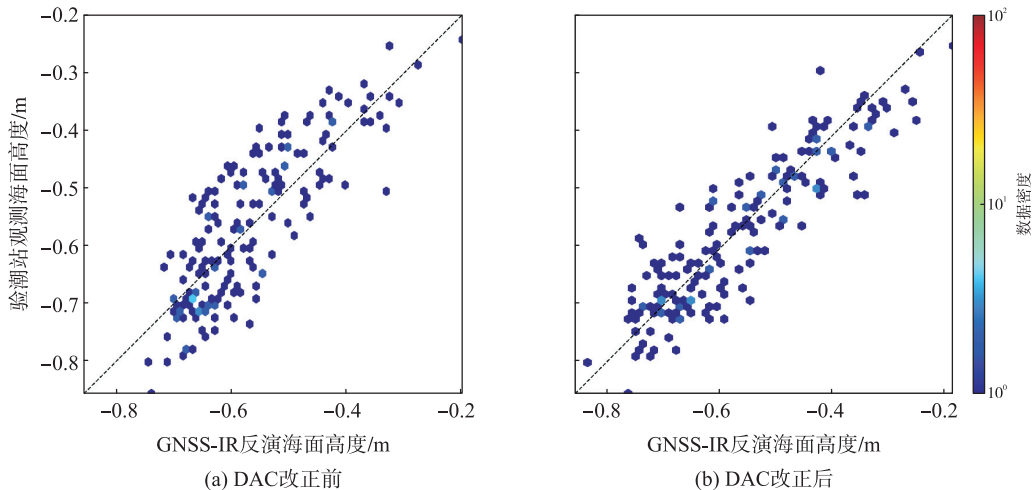


图 10 HKQT 站 DAC 改正前后与卫星测高每月绝对海平面一致性散点图

Fig.10 Consistency scatter plots of monthly absolute sea level between the HKQT station and satellite altimetry before and after DAC correction

表 5 岸基 GNSS 站与卫星测高的相关性及绝对海平面变化速率的比较
Tab.5 Comparison of the correlation between shore-based GNSS stations and satellite altimetry and the absolute sea level change rate

站名	大气校正前			大气校正后			卫星测高年平均海平面 变化速率/mm·a ⁻¹
	RMSE/cm	相关系数	绝对年平均海平面 变化速率/mm·a ⁻¹	RMSE/cm	相关系数	绝对年平均海平面 变化速率/mm·a ⁻¹	
HKLM	11.6	0.44	1.65±4.25	9.5	0.69	6.13±3.80	4.05±2.13
HKPC	11.3	0.54	0.37±2.87	8.8	0.74	2.36±2.77	5.19±1.67
HKQT	7.4	0.83	1.36±2.62	6.1	0.90	3.32±3.06	4.94±1.07
HKSL	26.0	-0.21	-3.31±8.15	20.9	-0.02	1.98±5.74	5.39±1.57
HKSS	11.1	0.57	2.67±2.99	8.2	0.79	4.99±2.94	4.57±1.43
HKWS	15.2	0.27	0.25±3.39	11.3	0.60	2.71±2.99	4.56±1.47
KYC1	19.2	-0.20	2.55±5.21	14.5	0.09	9.60±4.06	-0.50±2.46

量较差。基于此,在后续的绝对海平面变化分析中,将不再对 HKSL 与 KYC1 站的结果进行讨论。

除 HKSL 与 KYC1 站外,其余 5 个岸基 GNSS 站在 DAC 改正前的绝对海平面变化速率范围为 0.27~0.83 mm/a,与对应卫星测高点的差值为 -4.82~1.90 mm/a,区域平均差值为 -3.40 mm/a。这表明在未进行 DAC 改正时,岸基 GNSS 站普遍低估绝对海平面变化趋势。DAC 改正后,5 个站点的绝对海平面变化速率增大至 2.36~6.13 mm/a,与卫星测高结果的差值缩小至 -2.83~2.08 mm/a,区域平均差值显著改善为 -0.76 mm/a。总体而言,DAC 改正有效提升了岸基 GNSS 站的绝对海平面反演精度,大部分站点改正后与卫星测高的长期趋势差异在 ±2 mm/a 以内,表现出较高的可靠性。

进一步将本研究 GNSS-IR 反演的 DAC 改正后的绝对海平面变化速率与文献[22]的验潮站长时序分析结果(鲎鱼涌验潮站为 2.33±0.17 mm/a,

大埔滘为 3.08±0.19 mm/a)进行对比。结果表明,与鲎鱼涌验潮站对照的 3 个 GNSS 站 HKLM、HKPC 与 HKQT 的差异分别为 3.80 mm/a、0.03 mm/a 与 0.99 mm/a。其中, HKPC 与 HKQT 的差异均小于 1 mm/a,与验潮站结果高度一致;HKLM 的偏差略大,可归因于其与鲎鱼涌验潮站间约 15 km 的空间距离以及局地水动力条件的差异。与大埔滘验潮站对照的 HKSS 与 HKWS 站的差异分别为 1.91 mm/a 与 0.37 mm/a,均处于相同变化量级,并与大埔滘验潮站的长期趋势相符。综合上述 5 个站点的对比结果可知,其绝对海平面变化速率均处于区域海平面监测的合理误差范围内(文献[22]中验潮站间最大速率差异达 7.87 mm/a),且考虑到 GNSS-IR 与验潮站在观测原理、观测时长(GNSS 站 10 a 左右,验潮站超 50 a)及空间位置上的差异,这一一致性水平进一步证明了本研究基于岸基 GNSS 站的绝对海平面变化监测方法具有较高的可靠性。

3 结 语

本文以香港地区 7 个岸基 GNSS 站为研究对象,融合 GNSS-IR 与 GNSS 定位技术,开展了近海岸相对及绝对海平面变化监测研究,主要结论如下:

1)GNSS-IR 技术可有效反演近岸相对海平面变化。在每月平均尺度上,GNSS-IR 与验潮站结果的一致性良好,多数站点 RMSE 小于 6 cm,相关系数大于 0.86。在长期趋势分析中,剔除数据质量不可靠的 HKSL 和 KYC1 站点后,其余站点与邻近验潮站的线性变化速率差值均小于 1 mm/a,区域平均差值仅 0.036 mm/a。这证实了该技术能够有效替代或补充传统验潮手段,用于捕捉近海岸海平面的相对变化特征。

2)GNSS-IR+GNSS 定位融合技术有效实现了近岸绝对海平面基准的统一。本研究通过引入 GNSS 垂直位移,将岸基相对海平面变化统一至绝对参考框架,并采用 RMSE 最小化原则进行岸基 GNSS 站点与卫星测高网格点的最优空间匹配。研究表明,DAC 改正对保证岸基 GNSS 监测与卫星测高结果的一致性具有重要作用。经 DAC 改正后,岸基 GNSS 结果的 RMSE 显著降低 1.28~5.11 cm。剔除数据质量不可靠的 HKSL 和 KYC1 站点后,其余站点的区域海平面年平均变化速率与卫星测高结果的差异由 -3.40 mm/a 缩小至 -0.76 mm/a。与香港验潮站 50 a 长时序绝对海平面数据对比,大部分站点偏差小于 1 mm/a,各站均处于区域绝对海平面监测的合理误差范围内。该结果验证了融合方法在弥补卫星测高近岸“盲区”缺陷、实现陆海基准统一及高精度海平面监测方面的有效性。

GNSS-IR 长期绝对海平面监测仍面临挑战,但未来应用前景广阔。目前,GNSS-IR 联合 GNSS 定位在长期绝对海平面监测中存在 3 项主要挑战:1)环境依赖性与系统误差。监测精度易受站点环境(如反射高度、周围地物)制约,特别是本研究中的 HKSL 与 KYC1 站,其结果可靠性显著降低。同时,GNSS 定位引入的天线相位中心与参考点非重合等因素,也可能引入系统性误差。2)观测时段有限,截至 2025-07,PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level)统计的最长记录为格陵兰 THU2 站 18.5 a(2006—2024 年),而超过 8 a 的测站仅占测站总数的约 25%,限制了其在趋势分析和加速度估计中的可靠性。3)计算与存储负担问题。为了保证反射高度较高或环境复杂站点的反演精度,可能需要提高数

据采样率,从而显著增加计算与存储需求。尽管存在这些技术瓶颈,但随着误差改正模型的完善、载波相位反演算法的改进、岸基站长期连续观测资料的积累以及 GNSS-IR 数据库的建设,该技术在近海岸绝对海平面监测中仍具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Hamlington B D, Gardner A S, Ivins E, et al. Understanding of Contemporary Regional Sea-Level Change and the Implications for the Future[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(3)
- [2] Qu Y, Jevrejeva S, Jackson L P, et al. Coastal Sea Level Rise around the China Seas [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 454-463
- [3] Jevrejeva S, Moore J C, Grinsted A, et al. Trends and Acceleration in Global and Regional Sea Levels since 1807[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 113: 11-22
- [4] Cipollini P, Calafat F M, Jevrejeva S, et al. Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges[M]//Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components. Cham: Springer International Publishing, 2017
- [5] 张琪,陈燕珍,牛福新,等. 过去 40 年天津沿海海平面变化研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(5): 38-43 (Zhang Qi, Chen Yanzhen, Niu Fuxin, et al. A Study on the Coastal Sea Level Variation of Tianjin in last 40 Years[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(5): 38-43)
- [6] 潘轶,岳建平,宋亚宏,等. 1993—2015 年中国南海海平面变化的初步研究[J]. *地理空间信息*, 2017, 15(10): 9-13 (Pan Yi, Yue Jianping, Song Yahong, et al. Initial Research on Sea Level Change in the South China Sea from 1993 to 2015[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(10): 9-13)
- [7] Adebisi N, Balogun A L, Min T H, et al. Advances in Estimating Sea Level Rise: A Review of Tide Gauge, Satellite Altimetry and Spatial Data Science Approaches[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 208
- [8] 郑乃铨,陈鹏,陈灵秋,等. 基于 BDS 信噪比的潮位监测精度分析与评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(10): 995-999 (Zheng Naiquan, Chen Peng, Chen Lingqiu, et al. Analysis and Evaluation of Tide Level Monitoring Accuracy Based on BDS Signal-to-Noise Ratio[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(10): 995-999)
- [9] 祝会忠,桂宇强,沈伟凡,等. 基于 GNSS-IR 高度角偏差修正方法的研究与评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2025, 45(2): 111-115 (Zhu Huizhong, Gui Yuqiang, Shen Yifan, et al. Research and Evaluation of Correction Methods Based on GNSS-IR Elevation Angle Deviation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025, 45(2): 111-115)
- [10] Wan W, Guo Z Z, Karegar M A, et al. GNSS Hydrology: Defining a New Interdiscipline Integrating GNSS Hydrogeodesy and Remote Sensing[J]. *Innovation*, 2025, 6(10)

- [11] Li Y W, Xu T H, Guo H, et al. Estimation of Surface Water Level in Coal Mining Subsidence Area with GNSS RTK and GNSS-IR[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(20)
- [12] Peng D J, Feng L J, Larson K M, et al. Measuring Coastal Absolute Sea-Level Changes Using GNSS Interferometric Reflectometry[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4319
- [13] 王恒利, 张双成, 赵立都, 等. 普适性北斗/GNSS用于大型桥梁水位监测研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2026, 46(1): 123-130 (Wang Hengli, Zhang Shuangcheng, Zhao Lidu, et al. Monitoring Water Level in Large Bridge Structures Using Universal BDS/GNSS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(1): 123-130)
- [14] Bennett G G. The Calculation of Astronomical Refraction in Marine Navigation[J]. *Journal of Navigation*, 1982, 35(2): 255-259
- [15] 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
- [16] Chai H S, Chen K J. Facilitated Interferometric Reflectometry Evaluation and Its Application in Monitoring Three Typhoon Storm Surges in Hong Kong with Multi-GNSS Constellation[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3)
- [17] Carrère L, Lyard F. Modeling the Barotropic Response of the Global Ocean to Atmospheric Wind and Pressure Forcing-Comparisons with Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6)
- [18] Xu C, Wang X Z. Global Assessment of Linear Trend and Seasonal Variations of GNSS-IR Sea Level Retrievals with nearby Tide Gauges [J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(1): 126-137
- [19] Larson K M. Gnsirefl: An Open Source Software Package in Python for GNSS Interferometric Reflectometry Applications[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(4)
- [20] Nikolaidou T, Santos M C, Williams S D P, et al. Raytracing Atmospheric Delays in Ground-Based GNSS Reflectometry[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(8)
- [21] 陈晨. CORS站坐标时间序列数据噪声分析与周期性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019 (Chen Chen. Noise Analysis and Periodic Study of Coordinate Time Series Data in CORS Station[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019)
- [22] 刘聚, 暴景阳, 许军, 等. 中国香港验潮站1962—2017年水位相对变化分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2020, 45(7): 1065-1072 (Liu Ju, Bao Jingyang, Xu Jun, et al. Analysis of Relative Water Level Variations in Hong Kong, China from 1962 to 2017[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1065-1072)

GNSS-IR for Monitoring Absolute Sea Level Changes in Near-Coastal Areas

LIU Pan¹ ZHANG Shuangcheng¹ WANG Hengli¹ JIANG Bo¹

WU Huilin² XIN Yongjun¹ WANG Peiyuan³

¹ School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China

² Institute of Surveying and Mapping Standardization, MNR, Xi'an 710054, China

³ National Time Service Centre, CAS, Xi'an 710600, China

Abstract: This study proposed a novel monitoring scheme that integrates GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR) with GNSS positioning for monitoring coastal absolute sea level changes. Using over 10 years of observational data from seven coastal stations in Hong Kong as an example, research on absolute sea level change monitoring in nearshore areas was conducted. The results indicated that after excluding the stations HKSL and KYC1, which had lower data quality, the GNSS-IR-derived relative sea level changes from the remaining stations showed good agreement with tide gauge data in their monthly averages. For most stations, the RMSE was less than 6 cm, the correlation coefficient was greater than 0.86, and the difference in estimated sea level rise trends was less than 1 mm/a compared to tide gauges (with a regional average difference of only 0.036 mm/a). In absolute sea level monitoring, after applying the dynamic atmospheric correction (DAC), the difference in regional average rates between coastal GNSS and satellite altimetry at corresponding points was reduced from -3.40 mm/a to -0.76 mm/a, indicating highly consistent trends. Compared with 50-year long-term absolute sea level data from Hong Kong tide gauges, the deviations were mostly less than 1 mm/a, and all stations fell within reasonable error margins for regional absolute sea level monitoring. The research demonstrates that the fusion of GNSS-IR and GNSS positioning can effectively address traditional monitoring gaps, providing a scalable new technical approach for monitoring coastal sea level changes and conducting risk assessments.

Key words: GNSS-IR; GNSS positioning; sea surface height inversion; nearshore; sea level change