**引文格式**:侯金华,贺凯飞,石文文,等.结合质量控制与频间偏差改正的GNSS-IR海面高度反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2013-2024.DOI:10.13203/j.whugis20230325

**Citation**:HOU Jinhua,HE Kaifei,SHI Wenwen,et al.GNSS-IR Sea Level Retrieval Combining Quality Control with Inter-Frequency Bias Correction[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(10):2013-2024.DOI:10.13203/j.whugis20230325

# 结合质量控制与频间偏差改正的GNSS-IR海面高度反演

侯金华[1] 贺凯飞[1] 石文文[1] 王 硕[1]

1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院,山东 青岛,266580

**摘 要**:全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)干涉反射测量(interferometric reflectometry,IR)技术已被证实可用于海面测高。为提升GNSS-IR海面高度反演精度,在常用信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)频谱质量控制方法的基础上,提出考虑频谱峰值尖锐程度的质量控制新方法,联合对初始反演结果进行质量控制;利用质量控制新方法定权与频间偏差改正建立顾及频间偏差的二阶动态海面改正模型,实现对初始反演结果的多频多系统数据融合与误差改正。通过处理美国SC02和中国香港HKQT两个测站GNSS数据,实验结果表明:使用了质量控制新方法可有效控制粗差出现,较未使用前精度普遍提升1 cm以上;使用顾及频间偏差的二阶动态海面改正模型对初始反演结果进行处理,反演精度提升3 cm以上,在观测环境、数据质量良好的情况下,GNSS-IR海面高度反演精度可达厘米级,但在风速超过20 m/s情况下,反演结果较差;在较大时间窗条件下,所建模型比一阶模型具有更优的动态海面改正效果,反演精度则比未顾及频间偏差模型有明显提升。

**关键词**:GNSS-IR;SNR;海面高度;质量控制;频间偏差;动态海面改正

**中图分类号**:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-04-24

**DOI**:10.13203/j.whugis20230325 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2013-12

# GNSS-IR Sea Level Retrieval Combining Quality Control with Inter-Frequency Bias Correction

*HOU Jinhua*[1] *HE Kaifei*[1] *SHI Wenwen*[1] *WANG Shuo*[1]

1 College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

**Abstract**: **Objectives**: Global navigation satellite system (GNSS) interferometric reflectometry(IR) technique has been proved to be able to monitor sea level. Improving accuracy is the key to GNSS-IR sea level retrieval based on signal-to-noise ratio (SNR) data. **Methods**: We propose a new quality control method considering the sharpness of spectrum peak on the basis of the common SNR spectrum quality control methods, and those methods jointly control the quality of the initial retrievals. Then, a second-order dynamic sea surface correction model considering inter-frequency bias is established by combining the new quality control method used for weighting with inter-frequency bias correction, achieving multi-frequency and multi-system data fusion and error correction of initial retrievals. **Results**: The GNSS data collected from SC02 in USA and HKQT in Hong Kong, China was processed in the experiment. The accuracy of initial retrievals is generally improved by more than 1 cm after using the new quality control method. The second-order dynamic sea surface correction model considering inter-frequency bias is applied to initial retrievals and improves accuracy by more than 3 cm. When the observation environment and data quality are favorable, the accuracy of GNSS-IR sea level retrieval reach centimeter level, but the retrievals are poor when the wind

**基金项目**:国家自然科学基金(42174021);山东省自然科学基金(ZR2021MD060)。

**第一作者**:侯金华,硕士,主要从事GNSS-R海洋遥感方向的研究。s20160039@s.upc.edu.cn

**通信作者**:贺凯飞,博士,教授。kfhe@upc.edu.cn

speed is more than 20 m/s. Under the circumstance of larger time window, the proposed model has better dynamic sea surface correction effect than the first-order model, and the retrieval accuracy is significantly improved than the model without taking into account the inter-frequency bias. **Conclusions**: The new quality control method can effectively control the occurrence of gross errors. The second-order dynamic sea surface correction model considering inter-frequency bias has better correction effect than the conventional first-order model and the model without considering the inter-frequency bias.

**Key words**: GNSS-IR; SNR; sea level; quality control; inter-frequency bias; dynamic sea surface correction

海平面的变化与地球气候及人类生产生活息息相关[1]。与验潮站、船舶测量、卫星测高等海平面高度测量技术相比,全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)干涉反射测量(interferometric reflectometry,IR)技术具有全天候、低成本、可测量海平面绝对变化等优点,将成为海平面变化监测、海洋潮汐研究等领域的重要手段。

1993年,文献[2]提出使用GPS反射信号测量海面高度的思想,随后十几年,GNSS反射信号逐渐被应用在海面风场反演[3]、土壤湿度探测[4]、雪深反演[5]等领域。但对于海面测高领域,绝大多数学者均用反射信号伪距[6-8]与载波相位观测量[9-10]反演海面高度,直到2011年,文献[11]提出利用干涉条纹技术反演水位,即GNSS-IR,使得GNSS-IR技术从土壤湿度反演拓展到水位测量领域,通过对信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)振荡频率的提取,来反演接收机天线到海平面的垂直距离,因此SNR数据振荡频率的提取是反演的关键。2013年,文献[12]提出使用Lomb-Scargle周期图(Lomb-Scargle periodogram, LSP)对SNR数据进行频谱分析,减少非均匀采样对于频谱分析的影响;文献[13]利用逆建模的方法也能够很好地提取SNR的振荡频率;为了提升反演结果时间分辨率,文献[14]采用小波变换方法提取SNR数据的瞬时频率。此外,利用小波去噪[15]、循环神经网络谱分析[16]、Transformer神经网络模型[17]等方法对SNR原始数据处理也可以提升反演效果。

但是,GNSS-IR海面高度反演过程中各种影响因素的存在导致反演结果存在许多误差,使得测量精度降低。2013年,文献[18]发现海面高度变化引起的误差,并提出利用SNR频谱分析后的初始反演高度拟合海面高度变化率来改正该误差,即动态海面改正,2017年该团队又提出利用潮汐分析公式拟合潮波曲线改进了上述算法[19],而文献[20]在2014年提出了动态SNR测高反演原理,将海面高与海面高度变化率同时作为未知数进行最小二乘方法解算,这种改正方法目前应用比较广泛。文献[21]发现大气折射引起信号弯曲,并基于气象数据利用折射改正公式改正卫星高度角偏差;文献[22]发现对流层延迟误差并采用VMF1映射函数模型和GPT2w对流层延迟模型进行改正;文献[23]在利用大坝GNSS监测站进行水位反演时发现频间偏差,并给出了频间偏差的特性,此外该团队还研究了GPS L2P(Y)信号的特殊误差源[24]。

目前,质量控制方法大多是采用频谱峰值信噪比、峰值次峰值比等,而实际频谱分析中考虑频谱峰值尖锐程度将更加直接地衡量频谱频率的集中程度,误差改正中大多均未考虑海面垂向加速度影响、频间偏差影响。为此,本文在提出质量控制新方法的基础上,建立顾及频间偏差的二阶动态海面改正模型,实现多频多系统反演结果联合处理,旨在实现更高精度的GNSS-IR海面高度反演,实验采用了美国SC02和中国香港HKQT两个GNSS测站的数据。

## 1 原理与方法

### 1.1 GNSS-IR海面高度反演原理

当GNSS信号发生反射时,GNSS-IR海面高度反演示意图如图1所示,直射信号与反射信号之间的路径差为$\Delta\rho$,卫星高度角为$e$,因此,天线相位中心到海面的垂直距离$h$与$\Delta\rho$存在几何关系:

$$\Delta\rho = 2h\sin e \tag{1}$$

若接收机天线固定在海岸上,则可将天线相位中心到起算基准面距离视为一个常数$L_{\text{const}}$,因此可反演海面高度$h_{\text{SL}}$:

$$h_{\text{SL}} = L_{\text{const}} - h \tag{2}$$

式中,常数$L_{\text{const}}$与GNSS系统框架基准、站高等因素有关,反演过程误差源不会对其产生影响。

信噪比表达式[25]可表示为:

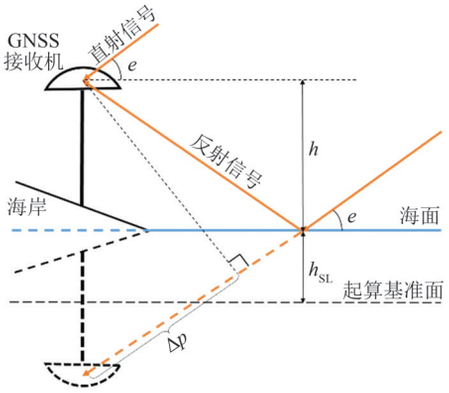



图1　GNSS-IR海面高度反演示意图

Fig. 1　Diagram of GNSS-IR Sea Level Retrieval

$$S=A_d^2+A_r^2+2A_dA_r\cos\Delta\varphi \tag{3}$$

式中,$A_d$、$A_r$分别为直射信号、反射信号的振幅;$\Delta\varphi$为反射信号相对于直射信号的相位差。

常用二阶多项式去掉趋势项$A_d^2+A_r^2$,则去趋势项的SNR序列为$\mathrm{d}S=2A_dA_r\cos\Delta\varphi$。由于涉原理可知$\Delta\varphi$与路径差$\Delta\rho$存在定量关系,代入式(1)得[12]:

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\rho=\frac{4\pi h}{\lambda}\sin e \tag{4}$$

式中,$\lambda$为载波相位波长。以$\sin e$为自变量,$\mathrm{d}S$为因变量,则$\mathrm{d}S$振荡频率$f_{\mathrm{SNR}}$中含有海面高度信息。假设海平面高度不随时间变化,则[9]:

$$\tilde{h}=\frac{f_{\mathrm{SNR}}\lambda}{2} \tag{5}$$

式中,$\tilde{h}$为静态海面下接收机天线相位中心至海平面的垂直距离。

一般来说,卫星高度角$e$随时间等间隔采样,则$\sin e$为非等间隔采样,因此,为了分析非均匀信号的频谱,常采用LSP谱分析法[12]。

### 1.2　考虑频谱峰值尖锐程度的质量控制方法

对一段SNR序列使用LSP法频谱分析后,需要对SNR序列的频谱进行质量控制,以保证获取正确的反演结果,常见频谱质量控制方法[26]有:频谱峰值与频谱幅值的均值之比,记为Index1;频谱峰值与频谱次峰值之比,记为Index2;频谱幅值的大小,记为Index3。

信号频谱分析时,频谱峰值越尖锐,说明信号频率越集中;反之,若频谱峰值越平缓,说明信号频率越发散,在SNR序列频谱分析中则体现在振荡性不明显,海面多路径效应较少,反演误差较大,以上3种频谱质量控制方法不能直接有效衡量这种情况。因此,本文提出考虑频谱峰值尖锐程度进一步衡量反演结果质量。图2所示为一段SNR序列的频谱示意图,频谱中可接受反演高度(频率)误差$\Delta h$为基础,选取频谱峰值$\tilde{h}$附近处频谱数据,即图2中红色区域,进行二阶多项式拟合,即:

$$P(h)=Ah^2+Bh+C \tag{6}$$

则二次项系数$A$应为负值,且其绝对值越大,峰值频率越尖锐,因此用$A$来控制结果质量,记为Index4。本文将使用质量控制指标Index1~Index4联合控制反演结果质量。

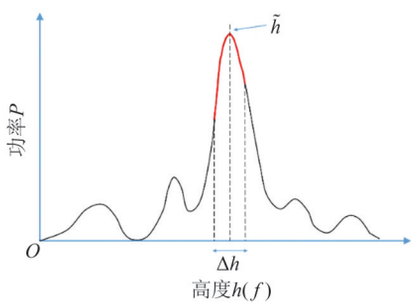
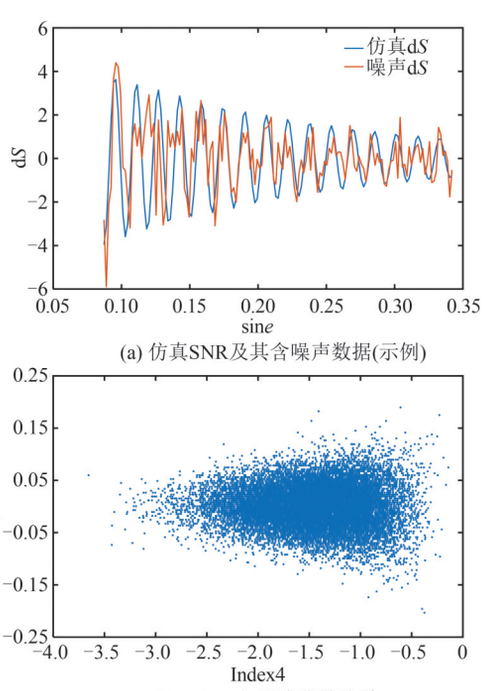



图2　SNR序列频谱示意图

Fig. 2　Diagram of SNR Sequence Spectrum

本文仿真数据说明反演误差与Index4之间的关系,拟合一段振荡$\mathrm{d}S$数据,固定频率($h$=6 m),选取高度角5°~20°,随机产生噪声,其中一组含噪声$\mathrm{d}S$(见图3(a)),利用LSP法反演结果,反演了20 000个SNR数据,选取$\Delta h$为0.5 m,得出残差与Index4之间关系(见图3(b)),当Index4绝对值越大时,反演误差越小,且图中所示绝大多数Index4小于−0.3。




(a) 仿真SNR及其含噪声数据(示例)

(b) Index4与反演残差关系

图3　仿真SNR数据及其反演结果误差

Fig. 3　Simulation SNR Data and Its Errors of Retrievals

### 1.3 动态海面改正

由于海平面是时刻变化的,因此在求取$\tilde{h}$时应当对其进行动态改正,动态海面改正模型表达式为[18]:

$$\tilde{h}=\frac{\tan e}{\dot{e}}\dot{h}+h \tag{7}$$

式中,$\dot{e}$与$\dot{h}$分别为卫星高度角变化率与海面高度变化率,因此动态海面改正的关键为$\dot{h}$的求取。

常见的动态海面改正方法有经典改正法[19]和最小二乘动态改正法[20]。经典改正法是根据式(5)求取的$\tilde{h}$序列拟合求得$\dot{h}$;最小二乘法动态改正是将$\dot{h}$和$h$同时作为未知数进行解算,一般选取固定大小的时间窗内观测值进行最小二乘平差,以第$i$窗口为例,列观测方程为:

$$\tilde{\boldsymbol{H}}_i=\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{X}_i \tag{8}$$

$$\begin{cases}\tilde{\boldsymbol{H}}_i=[\cdots\ \tilde{h}_{i,j}\ \cdots]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}\vdots & \vdots\\ 1 & \dfrac{\tan e_{i,j}}{\dot{e}_{i,j}}+\Delta t_{i,j}\\ \vdots & \vdots\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{X}_i=[h_i\ \dot{h}_i]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{9}$$

式中,$j$表示窗口内观测值下标;$\Delta t_{i,j}$表示窗口内第$j$个观测值的历元与该窗口历元$t_{i,0}$之差$t_{i,j}-t_{i,0}$,$t_{i,0}$一般取时间窗的中值。

式(8)为一阶动态海面改正模型,它仅考虑了海面的垂向变化速度,未考虑海面垂向变化加速度,导致影响了一定的反演精度[27],对此,文献[28]在式(8)的基础上考虑海面垂向加速度,改进了$\boldsymbol{A}_i$与$\boldsymbol{X}_i$,即:

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}\vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & \dfrac{\tan e_{i,j}}{\dot{e}_{i,j}}+\Delta t_{i,j} & \dfrac{\tan e_{i,j}}{\dot{e}_{i,j}}\Delta t_{i,j}+\Delta t_{i,j}^2\\ \vdots & \vdots & \vdots\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{X}_i=[h_i\ \dot{h}_i\ \ddot{h}_i]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{10}$$

式中,$\ddot{h}$为海平面垂向变化加速度,观测方程与式(8)一致,则将该模型定义为二阶动态海面改正模型。最终利用最小二乘平差法解算:

$$\boldsymbol{X}_i=(\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{A})^{-1}(\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\tilde{\boldsymbol{H}}_i)$$

式中,$\boldsymbol{P}_i$表示观测值权重。则观测值改正数为$\boldsymbol{V}_i=\tilde{\boldsymbol{H}}_i-\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{X}_i$,精度评定参数中误差$\sigma_0^{(i)}$为:

$$\sigma_0^{(i)}=\sqrt{\frac{\boldsymbol{V}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{V}_i}{r_i}}$$

式中,$r_i$表示$i$时间窗的自由度。中误差表示反演结果的不确定度。

### 1.4 频间偏差改正

文献[23]在使用水库测站进行水位反演时,发现了不同频率信号的反演值之间存在着明显的偏差,通过将该偏差与波长对比研究之后发现该偏差与波长之间存在着明显地线性关系,这种偏差定义为频间偏差。频间偏差$\delta\tilde{h}$可表示为:

$$\delta\tilde{h}=a\times\delta\lambda \tag{11}$$

式中,$\delta\lambda$表示为不同频率载波波长之差;$a$表示线性系数,一般不同测站具有不同的参考值。

以L1频点反演结果为基准,则$k$频点反演值偏差改正为:

$$\tilde{h}_\delta^k=\tilde{h}^k-a\times\delta\lambda=\tilde{h}^k-a(\lambda_k-\lambda_1) \tag{12}$$

式中,$\tilde{h}^k$表示$k$频点的静态海面高度;$\tilde{h}_\delta^k$表示$k$频点频间偏差改正后的静态海面高度;$\lambda_k$与$\lambda_1$分别表示$k$与L1频点的波长。

### 1.5 顾及频间偏差二阶动态海面改正模型

对同时段同颗卫星数据进行反演时,则不同SNR类型反演出不同结果,因此可先以某一频段为基准进行频间偏差改正,结合SNR频谱质量控制Index4加权求取该时段,$\Delta h$选取0.5 m。为了根据§1.2所提4种质量控制方法确定不同SNR反演结果权重,本文利用§1.2仿真数据,每500个点为一组,求取每组数据的均方误差与质量控制指标平均值之间的关系,一般来说,权的选取与方差成反比,均方误差代替方差,以Index1~Index4大小为权,如图4所示,横坐标取Index1~Index4的倒数,它们与均方误差成线性关系越好,则确权效果越好,由图4可知,Index3、Index4确权效果较好,计算相关系数可得Index4确权效果最优,因此不同SNR类型反演的结果可由Index4绝对值所确权重加权。因此,针对多频多系统反演结果,将不同系统的初始反演结果统一存放至一个时间窗内,利用最小二乘平差计算,观测方程有更多的多余观测,实现多频多系统反演结果融合。本文结合质量控制新方法与频间偏差改正改进了二阶动态海面改正模型中的$\tilde{H}_i$,即建立顾及频间偏差二阶动态海面改正模型:

$$\tilde{\boldsymbol{H}}_{i_\delta}=\boldsymbol{A}_iX_i \tag{13}$$

$$\tilde{\boldsymbol{H}}_{i_\delta}=\begin{bmatrix}\vdots\\ \dfrac{\sum\limits_k^N p_{i,j,k}\left[\tilde{h}_{i,j}^k-a(\lambda_k-\lambda_1)\right]}{\sum\limits_k^N p_{i,j,k}}\\ \vdots\end{bmatrix}$$

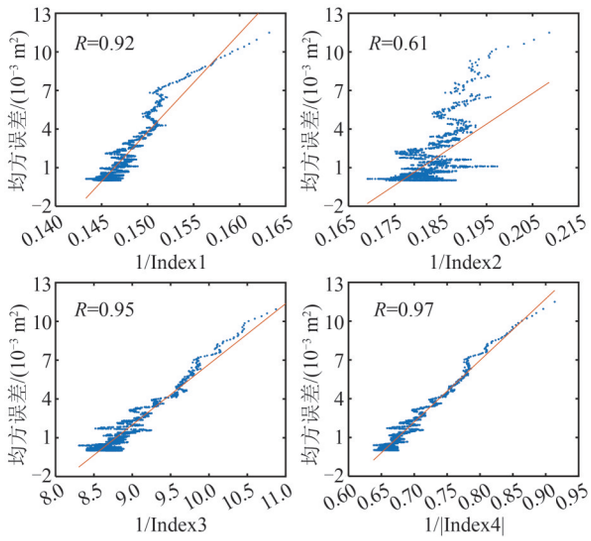



图 4　不同质量控制方法与均方误差的关系

Fig. 4　Relationship Between Different Quality Control Methods and Mean Square Error

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}\vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & \dfrac{\tan e_{i,j}}{\dot{e}_{i,j}}+\Delta t_{i,j} & \dfrac{\tan e_{i,j}}{\dot{e}_{i,j}}\Delta t_{i,j}+\Delta t_{i,j}^2\\ \vdots & \vdots & \vdots\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}_i=[\,h_i\ \dot{h}_i\ \ddot{h}_i\,]^{\mathrm{T}}$$

式中,$i$、$j$、$k$分别表示最小二乘窗口中间历元、一个SNR弧段中间历元(反演值历元)、SNR类型频点;$p_{i,j,k}$由Index4的绝对值确定。不同GNSS初始反演结果均纳入同一方程,利用最小二乘平差法解算,从而实现多频多系统反演数据融合。

因此,GNSS-IR海面高度反演流程主要分3部分:(1)数据预处理,包括根据高度角与方位角确定数据、SNR数据去趋势项等;(2)利用LSP法进行频谱分析,经质量控制后获得初始反演结果;(3)进行频间偏差改正、动态海面改正等误差改正,实现多频多系统数据融合,衡量反演精度。具体反演流程如图5所示。

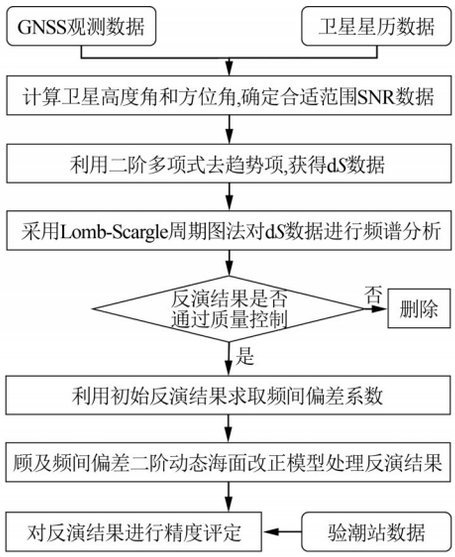



图 5　GNSS-IR海面高度反演流程图

Fig. 5　Flowchart of GNSS-IR Sea Level Retrieval

## 2　海面高度反演实验分析

### 2.1　数据来源

SC02站位于美国华盛顿州西北部星期五港,该测站安装有TRIMBLE NETR9型号接收机与TRM59800.80型号天线,可提供常规15 s采样间隔以及1 Hz及以上高采样率的观测值文件,本文采用2023年2月11日至3月15日期间(UTC)15 s采样间隔的观测值文件,年积日(day of year, DOY)为42—74,数据采集期间基本无自然灾害与恶劣天气。为对反演结果进行数据评估,采用距离SC02站约350 m远处验潮站提供的6 min时间分辨率的潮位数据。SC02站GNSS接收机位置与验潮站的相对位置如图6(a)所示,图6(b)为GNSS接收机,图6(c)为验潮设备。为保证选取的SNR数据来自海面反射且振荡性明显,坐标方位角选取45°～270°,卫星高度角选取5°～20°。




(a) SC02站与验潮站之间的相对位置



(b) SC02站GNSS接收机



(c) 验潮仪

图 6　SC02站与验潮站之间的位置及其仪器设备

Fig. 6　Position Between SC02 Station and Tidal Station and Their Instruments

HKQT站位于中国香港鲗鱼涌,隶属于香港卫星定位参考站网,2018年接收机为TRIMBLE

NETR9，2023年已更新为TRIMBLE Alloy，天线为TRM59800.00，观测数据采样间隔为1 s、5 s、30 s。本文采用2018年9月16日前后5 d的数据（DOY 256—260），选取5 s采样数据，9月16日台风“山竹”过境。为对反演结果进行评估，本文采用由政府间海洋学委员会提供的鲥鱼涌潮位数据，采样间隔为1 min。HKQT站位置及其接收机如图7所示。为保证选取SNR数据来自海面反射且振荡性明显，坐标方位角选取−60°（300°）～100°，卫星高度角选取5°～15°。

SC02站观测文件格式为RINEX2.11，HKQT站观测文件格式为RINEX3.02，均包含GPS、GLONASS和Galileo三系统，SNR类型及其相关参数见表1。




(a) HKQT站位置　　(b) 接收机设备

图7　HKQT站位置及其接收机

Fig. 7　Position and Receivers of HKQT Station

**表1　实验中所使用的GNSS观测文件SNR类型及其参数**

Table 1　SNR Types and Parameters of GNSS Observation File Used in the Experiment

| GNSS系统 | 频段 | 频率/MHz | 波长/m | SNR类型 |
|---|---|---|---|---|
| GPS | L1 | 1 575.42 | 0.190 3 | S1/S1C |
| | L2 | 1 227.60 | 0.244 2 | S2 |
| | L5 | 1 176.45 | 0.254 8 | S5/S5X |
| GLONASS | G1 | 1 602+$k$×9/16 | 约0.187 1 | S1/S1C/S1P |
| | G2 | 1 246+$k$×7/16 | 约0.240 5 | S2/S2C/S2P |
| Galileo | E1 | 1 575.42 | 0.190 3 | S1/S1X |
| | E5a | 1 176.45 | 0.254 8 | S5/S5X |
| | E5b | 1 207.14 | 0.248 3 | S7/S7X |
| | E5a+E5b | 1 191.795 | 0.251 5 | S8/S8X |

## 2.2　应用质量控制新方法的初始反演结果

确定实验数据后，先计算卫星高度角、方位角，然后利用大气折射改正模型改正卫星高度角，利用二阶多项式去趋势项从而得到去趋势项的SNR序列，最后使用LSP法对SNR序列进行频谱分析，且需要对每个频谱反演的结果进行质量控制。

常规质量控制则采用Index1～Index3联合确定，本文提出质量控制指标Index4后，必将使得反演结果数量下降，因此，实验确定了4种质量控制策略来验证Index4的可用性，如表2所示。

**表2　质量控制策略**

Table 2　Strategies of Quality Control

| 组合编号 | 指标类型 | 阈值设置 |
|---|---|---|
| 组合1 | Index1～Index3 | Index1＞4，Index2＞2<br>Index3＞0.02 |
| 组合2 | Index1～Index4 | Index1＞4，Index2＞2<br>Index3＞0.02，Index4＜−0.3 |
| 组合3 | Index1～Index4 | Index1＞3，Index2＞1.5<br>Index3＞0.02，Index4＜−0.3 |
| 组合4 | Index1～Index3 | Index1＞3，Index2＞1.5<br>Index3＞0.02 |

根据表2所确定的质量控制策略，反演得到初始结果，以三系统S1类型为例，如图8所示，使用验潮站数据对反演结果进行精度评估，评估结果见表3、4，精度评估指标有均方根误差（root mean square error，RMSE）、偏差、反演个数。图8显示，组合1相较于组合2、组合4相较于组合3有明显粗差，表4中组合1、组合4中的S5X、S8X的RMSE与偏差显著高于组合2、组合3，也说明在增加Index4的情况下能够有效克制粗差。由表3可知，在SC02站，组合2比组合1精度平均提升0.9 cm，组合3比组合4精度平均提升2.1 cm，组合3比组合2在反演数量平均提升123个的情况下，精度平均降低1.0 cm，组合4比组合1在反演数量平均提升168个的情况下，平均精度降低2.2 cm。由表4可知，在HKQT站，除去S5X、S8X，组合2比组合1精度平均提升0.6 cm，组合3比组合4精度平均提升5.6 cm，组合3比组合2在反演数量平均提升6个的情况下，精度平均降低0.5 cm，组合4比组合1在反演数量平均提升17个的情况下，平均精度降低4.8 cm。因此，Index4使得精度提升1 cm以上，且在有效剔除粗差的情

况下,可更有效地保持反演数量。若要获得更高时间分辨率的反演结果,可在降低Index1、Index2合适阈值的情况下,保证Index3、Index4不变,提升反演个数,且精度损失不大。不同测站的数据质量、观测环境不同,需要长期观测来设置合适阈值。

图9实测分析了Index4绝对值与残差的相关性,可知,Index4绝对值越大,残差越小,反演结果精度越高,呈明显正相关性,这与仿真结果基本保持一致。因此,考虑频谱峰值尖锐程度的指标Index4,可在确定频谱峰值的基础上有效衡量单个反演结果的质量,因此在对同一卫星不同SNR类型反演结果时,采用Index4绝对值加权。

### 2.3　顾及频间偏差的二阶动态海面改正结果

#### 2.3.1　频间偏差分析

同一卫星不同SNR类型可反演出不同结果,由表3、4可知,同一系统不同SNR类型的反演结果存在一定偏差,同一SNR类型不同系统存在的偏差大致相等,这种偏差最大可达分米级,这验证了频间偏差的存在。SC02站选取质量控制策略组合2,为保证台风前后更多数据点,则HKQT站选取质量控制策略组合3。以L1频率信号为基准,研究偏差随波长差变化的情况(见图10),两个测站反演的初始结果偏差与波长差基本呈线性关系,SC02站相关系数为97%,HKQT站相关系数为91%,拟合求取频间偏差系数$a$,其中SC02站为2.156,HKQT站为1.743。

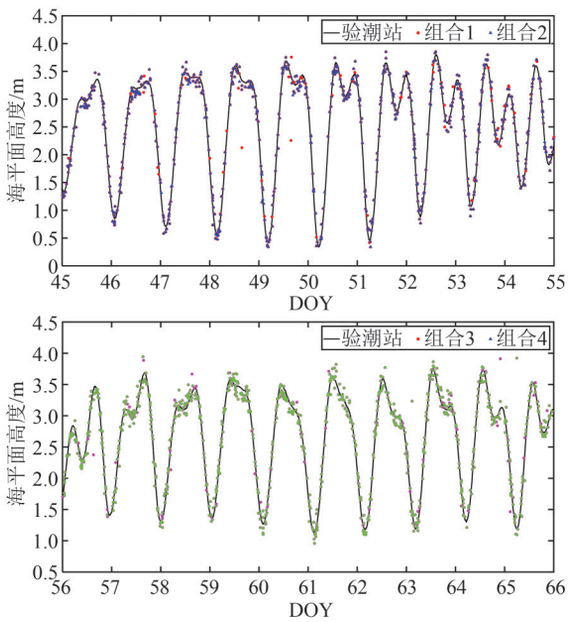



图8　不同质量控制策略部分初始反演结果(GNSS S1)

Fig. 8　Partial Initial Retrievals Under Different Strategies of Quality Control (GNSS S1)

**表 3　SC02站不同质量控制策略初始反演结果精度分析**

Table 3　Accuracy Analysis of Initial Retrievals Under Different Quality Control Strategies at SC02 Station

| GNSS系统 | SNR类型 | RMSE/cm | | | | 偏差/cm | | | | 反演数量/个 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 |
| GPS | S1 | 15.56 | 14.71 | 16.97 | 20.34 | −0.40 | −0.38 | 0.59 | 1.23 | 792 | 762 | 1 113 | 1 240 |
| | S2 | 20.99 | 19.91 | 21.05 | 24.09 | 13.16 | 12.82 | 13.56 | 13.75 | 1 174 | 1 161 | 1 325 | 1 379 |
| | S5 | 20.42 | 20.34 | 20.56 | 21.19 | 14.57 | 14.52 | 14.67 | 15.20 | 873 | 869 | 912 | 946 |
| GLONASS | S1 | 12.13 | 11.60 | 13.38 | 15.56 | 1.99 | 1.61 | 1.48 | 2.15 | 625 | 558 | 711 | 810 |
| | S2 | 26.36 | 22.52 | 23.79 | 30.10 | 17.90 | 17.05 | 17.38 | 18.08 | 1 005 | 978 | 1 060 | 1 132 |
| Galileo | S1 | 14.63 | 13.70 | 15.16 | 17.15 | 1.61 | 0.84 | 1.10 | 2.21 | 514 | 440 | 591 | 723 |
| | S5 | 22.15 | 22.00 | 22.15 | 22.48 | 14.90 | 14.94 | 14.93 | 14.78 | 879 | 867 | 925 | 979 |
| | S7 | 23.73 | 23.24 | 24.01 | 24.54 | 15.11 | 15.39 | 15.76 | 15.62 | 897 | 882 | 947 | 980 |
| | S8 | 23.53 | 23.37 | 23.62 | 24.09 | 18.12 | 17.99 | 18.21 | 18.44 | 840 | 804 | 842 | 927 |

#### 2.3.2　反演结果分析

根据§2.2所提及两测采用的质量控制策略,对GPS、GLONASS、Galileo反演结果联合平差,实验对比分析了3种动态海面改正模型:顾及频间偏差一阶动态海面改正模型,$\tilde{H}_i$的改进与模型(13)一致;顾及频间偏差二阶动态海面改正模型;未顾及频间偏差二阶动态海面改正模型(10)。SC02站动态海面改正的时间窗选取4 h,窗口步长选取20 min,反演结果如图11所示;HKQT站动态海面改正的时间窗选取6 h,窗口步长选取20 min,反演结果如图12所示。两测站反演结果的精度分析见表5。

分析SC02站实验结果,该测站期间观测环境良好,无恶劣天气。图11(a)显示顾及频间偏差二阶动态海面改正模型的结果与验潮站数据高度吻合,反演结果的RMSE为3.85 cm,偏差为0.30 cm,相关系数99.87%,反演个数为2 278,与表3对比,较单SNR类型初始反演结果精度提升60%以上;图11(b)展示了顾及频间偏差一阶动态海面改正模型的部分时段实验结果,相较于二

**表4 HKQT站不同质量控制策略初始反演结果精度分析**

Table 4 Accuracy Analysis of Initial Retrievals Under Different Quality Control Strategies at HKQT Station

| GNSS系统 | SNR类型 | RMSE/cm | | | | 偏差/cm | | | | 反演数量/个 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 | 组合1 | 组合2 | 组合3 | 组合4 |
| GPS | S1C | 11.37 | 11.06 | 10.99 | 26.01 | −2.03 | −3.62 | −3.74 | −0.81 | 53 | 41 | 54 | 90 |
| | S5X | 18.30 | 18.30 | 18.60 | 18.66 | 10.77 | 10.77 | 11.23 | 11.30 | 42 | 42 | 44 | 51 |
| GLONASS | S1C | 13.17 | 11.23 | 17.75 | 17.99 | −0.83 | −1.03 | 3.06 | 2.79 | 42 | 25 | 39 | 70 |
| | S1P | 11.84 | 9.78 | 9.78 | 13.31 | 0.26 | 2.34 | 2.34 | 1.65 | 56 | 34 | 34 | 63 |
| | S2C | 21.13 | 20.97 | 20.28 | 26.09 | 14.99 | 16.80 | 16.59 | 17.83 | 42 | 35 | 50 | 75 |
| | S2P | 19.04 | 17.97 | 17.46 | 30.72 | 13.50 | 13.88 | 13.75 | 17.80 | 65 | 56 | 64 | 87 |
| Galileo | S1X | 12.04 | 12.64 | 12.48 | 14.07 | 0.02 | 0.21 | 1.00 | 0.77 | 25 | 22 | 24 | 30 |
| | S5X | 44.91 | 20.09 | 20.21 | 39.58 | 21.96 | 14.90 | 15.30 | 17.69 | 29 | 25 | 27 | 39 |
| | S7X | 20.65 | 20.92 | 20.31 | 18.75 | 16.44 | 16.43 | 15.69 | 13.18 | 26 | 24 | 27 | 34 |
| | S8X | 52.75 | 24.41 | 24.82 | 44.90 | 28.70 | 19.77 | 20.56 | 23.48 | 25 | 21 | 23 | 36 |

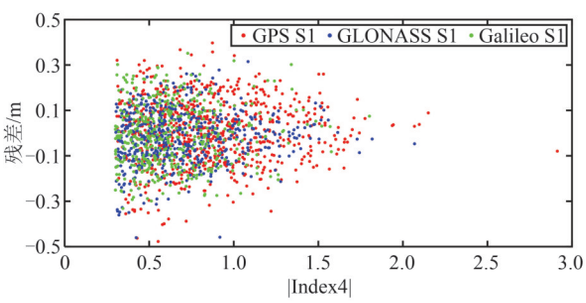



图9 残差随频谱峰值尖锐程度Index4绝对值变化情况

Fig. 9 Change of Residuals with the Absolute Value of Spectrum Peak Sharpness Index4

阶模型,在潮汐的波峰或波谷处改正效果较差,但较表3所示初始反演结果精度仍有较大提升,至少提升30%,因此,在顾及频间偏差的情况下,二阶模型较一阶模型具有更优的改正效果,精度约提升52%。图11(c)显示,在二阶动态海面改正模型中,未顾及频间偏差的改正结果明显比顾及频间偏差结果整体偏高于验潮站数据,偏高11.95 cm,无论是否顾及频间偏差,反演结果与验潮站的相关系数均为99.86%,说明了频间偏差的存在及其改正的必要性。

分析HKQT站实验结果,实验所用时段期有台风登陆香港,最高风速达118 km/h以上。如图12所示,因受台风影响,台风期间的观测数据质量不佳,导致反演结果较差,当风速达20 m/s以上时反演点数非常少,在10 m/s较大风速条件下,反演结果仍然良好。3种模型对比分析,顾及频间偏差二阶动态海面改正模型结果最佳,RMSE为7.20 cm,偏差为−0.66 cm,相关系数为0.986 7,反演个数为281,较表4中GNSS单SNR类型初始反演结果至少提升26%,较一阶模型精度提升39%,反演个数有所降低,较未改正频间偏差模型精度提升34%。一阶模型相较于二阶

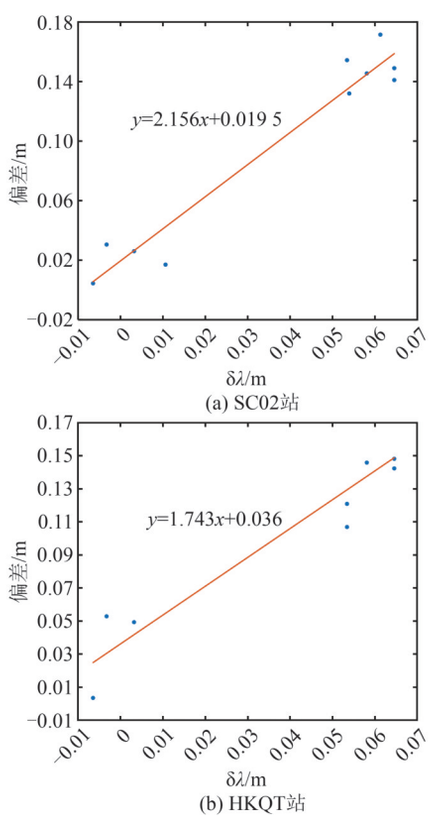
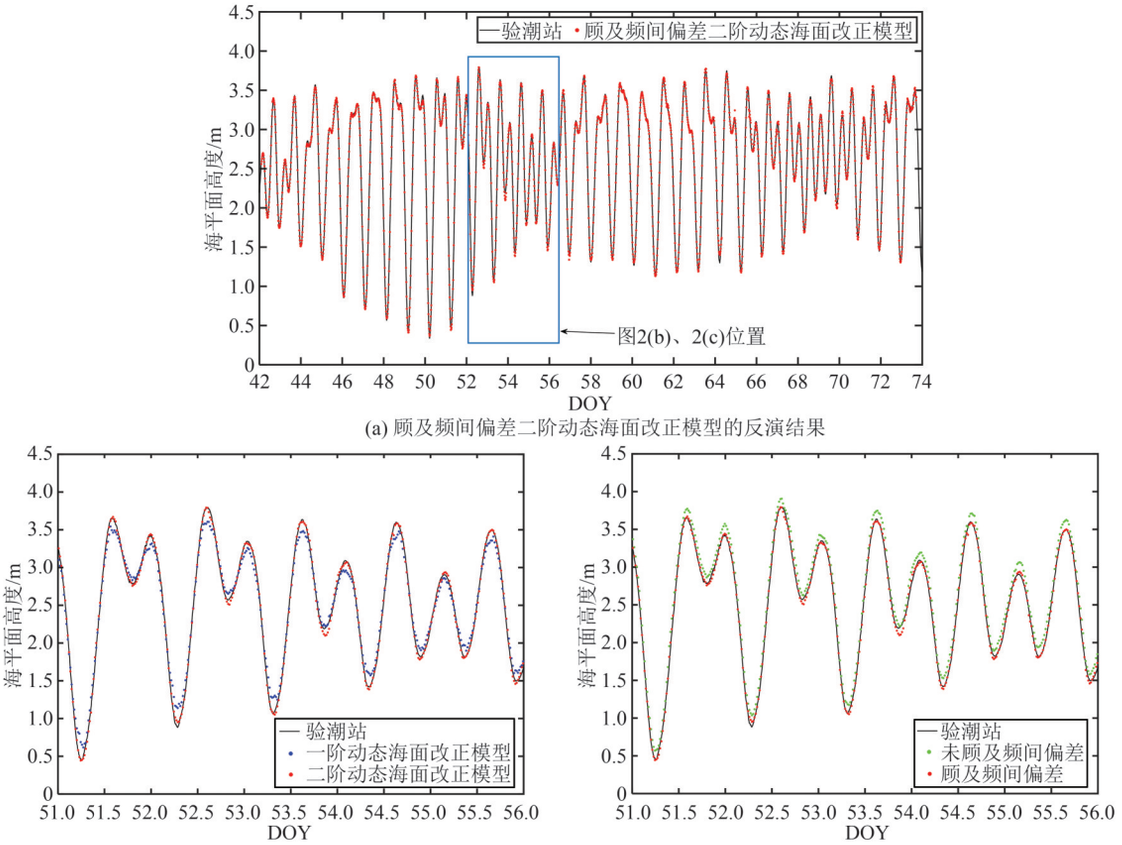



图10 两测站反演结果偏差与波长差之间的关系

Fig. 10 Relationship Between Retrievals Biases and Wavelength Differences at Two Stations

模型也在潮汐的波峰或波谷处改正效果较差,未顾及频间偏差的反演结果相较于顾及频间偏差结果整体高于验潮站数据,偏高8.05 cm,两种情况与验潮站数据的相关系数一致,验证了频间偏差改正的有效性。

图13为SC02站海面动态改正后的海面高度变化速度与加速度序列,具有较好的变化序列,进一步证明了顾及频间偏差二阶动态海面改正模型的有效性。此外,最小二乘平差的中误差可




(a) 顾及频间偏差二阶动态海面改正模型的反演结果

(b) 顾及频间偏差情况下一阶与二阶动态海面改正结果对比　(c) 二阶动态海面改正模型情况下顾及频间偏差前后反演结果对比

图 11　SC02站不同动态海面改正模型GNSS-IR海面高度反演结果

Fig. 11　GNSS-IR Sea Level Retrievals Based on Different Dynamic Sea Surface Correction Models at SC02 Station

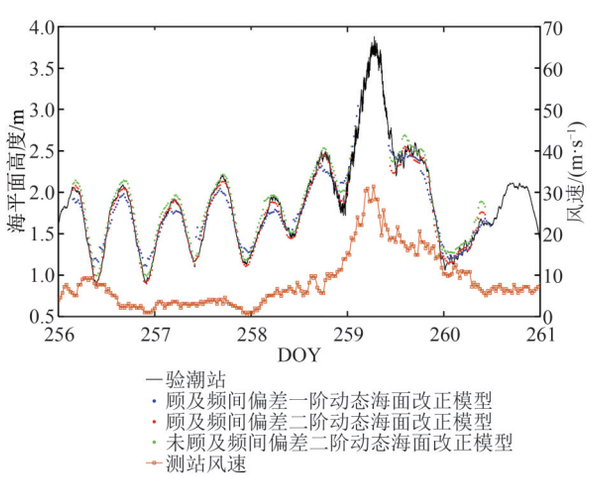



图 12　HKQT 站GNSS-IR海面高度反演结果及观测时段风速变化

Fig. 12　GNSS-IR Sea Level Retrievals and Wind Speed Variation in Observation Time at HKQT Station

以衡量反演结果的不确定度,在未知真值的情况下,一定程度上可以衡量反演海面高度的精度,较经典动态海面改正法具有更优的适用性。

为了进一步验证本文所建模型的可用性,防止因时间窗选取导致反演结果出现特殊性,图 14 画出了在不同时间窗下一、二阶动态改正模型的反演精度与数量变化情况。在时间窗较小时,一阶模型具有更多的反演数量,但精度相差不大,反演数量随着时间窗增大而增大并趋向于稳定,因为时间窗内初始反演值个数随着时间窗增大而变多,增大至某一值,基本所有时间窗均有多余观测,此时本文所用模型的反演数量保持稳定。当SC02站时间窗大于 3 h、HKQT 站时间窗大于 4 h时,二阶模型精度优于一阶模型,且一阶模型精度随着时间窗增大而变差,因为随着时间窗的增大,时间窗内海面潮位变化更加复杂,特别是在高潮位或低潮位附近,即潮位变化速度在时间窗内已不能简单作为匀速处理,因此这导致一阶模型的改正效果更差,而二阶模型考虑了海面变化的加速度,使得改正效果更优,但时间窗长度过长,海潮变化更加复杂,也导致二阶模型的精度逐渐降低。

综合来看,结合质量控制与频间偏差改正所建立的顾及频间偏差二阶动态海面改正模型可实现多频多系统反演数据融合,较初始反演结果精度提升 3 cm 以上,在数据质量与观测环境较好的情况下反演精度优于 5 cm,时间窗步长决定了反演结果的时间分辨率,实验中为 20 min。此外

**表5　两测站的反演结果分析**

Table 5　Retrievals Analysis at Two Stations

| 站点 | 动态海面改正模型 | RMSE/cm | 偏差/cm | 相关系数 | 反演数量/个 |
|---|---|---|---|---|---|
| SC02 | 顾及频间偏差一阶模型 | 8.04 | 0.34 | 0.997 3 | 2 278 |
| | 顾及频间偏差二阶模型 | 3.85 | 0.30 | 0.998 7 | 2 278 |
| | 未顾及频间偏差二阶模型 | 7.08 | 11.95 | 0.998 7 | 2 278 |
| HKQT | 顾及频间偏差一阶模型 | 11.85 | −0.21 | 0.968 2 | 293 |
| | 顾及频间偏差二阶模型 | 7.20 | −0.66 | 0.986 7 | 281 |
| | 未顾及频间偏差二阶模型 | 11.01 | 8.05 | 0.986 7 | 281 |

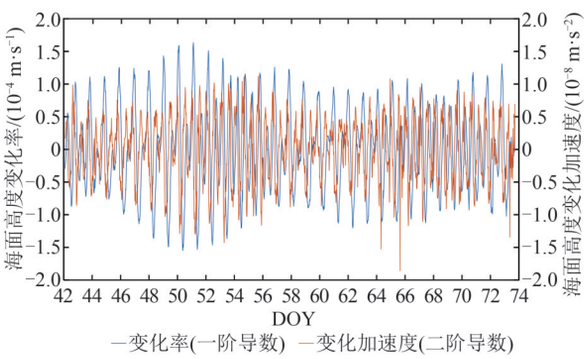



图13　SC02站顾及频间偏差二阶动态海面改正中海面变化率$\dot{h}$与变化的加速度$\ddot{h}$序列

Fig. 13　Sequence of Sea Surface Variation Rate $\dot{h}$ and Acceleration $\ddot{h}$ Sequences Using Second-Order Dynamic Sea Surface Correction Model Considering Inter-Frequency Bias at SC02 Station

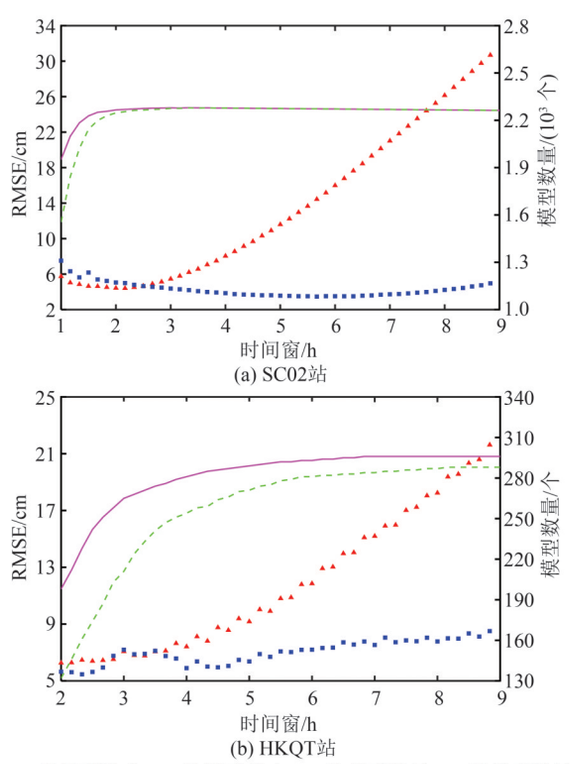



图14　不同时间窗下一、二阶模型反演精度与数量

Fig. 14　Retrievals Accuracy and Number of First-Order and Second-Order Models Under Different Time Windows

该模型反演数量也受初始反演个数与时间窗大小影响。

## 3　结　语

本文针对SNR频谱分析提出考虑频谱峰值尖锐程度的质量控制新方法，并结合质量控制新方法和频间偏差改正，在二阶动态海面改正的基础上建立了顾及频间偏差二阶动态海面改正模型，通过对美国SC02站和中国香港HKQT站数据进行的多频多系统GNSS-IR海面高度反演，可得如下结论：

1）在原有SNR频谱质量控制方法的基础上，与考虑频谱峰值尖锐程度的新方法联合对频谱进行质量控制，能够有效抵抗粗差影响，在加入Index4的情况下精度可提升1 cm以上，且该指标可更有效地保持反演数量。

2）顾及频间偏差二阶动态海面改正模型可实现多频多系统反演数据融合，较初始反演结果精度提升3 cm以上。SC02站的反演精度可达3.85 cm，说明在观测环境、数据质量良好的情况下，GNSS-IR海面高度反演精度可达厘米级；HKQT站观测期间有台风，在风速大于20 m/s时，严重影响反演结果，在10 m/s左右较大风速下，仍具有较好的反演结果。

3）顾及频间偏差二阶动态海面改正模型比一阶模型在海潮波峰或波谷处反演结果更好，而未顾及频间偏差模型与之相比则整体偏离验潮站数据，说明该模型具有更好的误差改正效果。对不同时间窗下的动态海面改正结果进行分析，在较大时间窗下二阶模型具有更高的精度，时间窗步长决定了模型反演结果时间分辨率。

GNSS-IR海面高度反演中，还存在对流层延迟引起的误差[22]、不同高度角SNR质量引起的误差[29]等，需要进一步研究并改正。本文通过研究多频多系统GNSS-IR海面高度反演，证明该反演技术有厘米级精度的潜力，说明GNSS-IR技术在

海平面高度变化监测领域的巨大潜能,对海洋监测、海平面变化研究具有重要意义。

致谢:感谢美国卫星导航系统与地壳形变观测研究大学联盟(http://pbo.unavco.org)和中国香港卫星定位参考站网(https://www.geodetic.gov.hk/)提供的公开GNSS数据,以及美国国家海洋和大气管理局(http://tidesandcurrents.noaa.gov)和政府间海洋学委员会(https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/)提供的公开验潮站数据。

## 参 考 文 献

[1] CAZENAVE A, CABANES C, DOMINH K, et al. Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes[J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1): 131-144.

[2] MARTIN-NEIRA M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.

[3] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964.

[4] 郑南山, 何佳星, 丁锐, 等. 基于轨迹聚类的GNSS-IR多系统组合土壤湿度估计方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 37-46.
ZHENG Nanshan, HE Jiaxing, DING Rui, et al. A GNSS-IR Multi-system Combination Soil Moisture Estimation Method Based on Track Clustering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 37-46.

[5] 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.
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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] GAO F, XU T H, MENG X Y, et al. A Coastal Experiment for GNSS-R Code-Level Altimetry Using BDS-3 New Civil Signals[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1378.

[9] LESTARQUIT L, PEYREZABES M, DARROZES J, et al. Reflectometry with an Open-Source Software GNSS Receiver: Use Case with Carrier Phase Altimetry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4843-4853.

[10] 王鑫,孙强,张训械,等. 中国首次岸基GNSS-R海洋遥感实验[J]. 科学通报. 2008(5): 589-592.
WANG Xin, SUN Qiang, ZHANG Xunxie, et al. China's First Shore-Based GNSS-R Ocean Remote Sensing Experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008(5):589-592.

[11] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, et al. Water Level Monitoring Using the Interference Pattern GNSS-R Technique[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011.

[12] 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.

[13] STRANDBERG J, HOBIGER T, HAAS R. Improving GNSS-R Sea Level Determination Through Inverse Modeling of SNR Data[J]. *Radio Science*, 2016, 51(8): 1286-1296.

[14] 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.

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

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

[17] 赵涛, 叶世榕, 罗欹琪, 等. GNSS-IR潮位反演中高仰角数据质量控制方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 68-76.
ZHAO Tao, YE Shirong, LUO Xinqi, et al. A Da-

ta 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] ROUSSEL N, FRAPPART F, RAMILLIEN G, et al. Simulations of Direct and Reflected Wave Trajectories for Ground-Based GNSS-R Experiments[J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(5): 2261-2279.

[21] SANTAMARÍA-GÓMEZ A, WATSON C. Remote Leveling of Tide Gauges Using GNSS Reflectometry: Case Study at Spring Bay, Australia[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 451-459.

[22] 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.

[23] 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.
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.

[24] 王笑蕾, 杨泽艺, 何秀凤, 等. GPS L2P(Y)信号在GNSS-IR技术中的特殊误差源及改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 122-130.
WANG Xiaolei, YANG Zeyi, HE Xiufeng, et al. Special Error Sources and Correction Methods for GPS L2P(Y) Signals in GNSS-IR Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 122-130.

[25] NIEVINSKI F G, LARSON K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation: Part Ⅰ: Formulation and Simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6555-6563.

[26] SONG M F, HE X F, WANG X L, et al. Study on the Quality Control for Periodogram in the Determination of Water Level Using the GNSS-IR Technique[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4524.

[27] TABIBI S, GEREMIA-NIEVINSKI F, FRANCIS O, et al. Tidal Analysis of GNSS Reflectometry Applied for Coastal Sea Level Sensing in Antarctica and Greenland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111959.

[28] 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.

[29] WANG X L, HE X F, ZHANG Q, et al. Angle Dependence Analysis Method to Determine SNR Arc Applied to GNSS-MR Sea Level Retrieval[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2021, 4(2): 14-26.