

激光与光电子学进展

基于 BDS-3/GPS 多频数据的 GNSS-R 海面高度反演方法研究

明眉*, 岳东杰, 朱少林

河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100

摘要 随着北斗三号(BDS-3)系统的完善与投入使用,本文基于BDS-3/GPS多频信噪比数据提出了两种全球导航卫星系统反射测量(GNSS-R)海面高度反演改进方法,即基于最高峰与次峰关系剔除粗差方法和最优频段改正方法。通过印度洋附近马约特岛的MAYG测站2020年年积日(DOY)333~337天连续5天观测数据验证该方法的有效性。结果表明,基于最高峰与次峰关系剔除粗差方法可以提高潮位反演精度,GPS频段总体提高了9.16%,BDS频段总体提高了17.34%,但是会导致反演结果数量降低。而最优频段改正方法可以在增加反演结果数量的同时提高精度,被改正的GPS S1C、S2W频段反演精度总体分别提高了26.54%、22.89%,BDS S1X、S2I、S6I和S7I 5天的潮位反演RMSE分别降低了61.36%、34.23%、47.68%和55.38%,并且精度提高程度较前者更高。

关键词 海洋光学; 全球卫星导航系统反射测量; BDS-3; 多频数据; 海面高度反演; 信噪比

中图分类号 P228

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213017

Research on GNSS-R Tide Height Inversion Method Based on BDS-3/GPS Multi-Frequency Data

Ming Mei*, Yue Dongjie, Zhu Shaolin

School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China

Abstract With the completion and use of BDS-3, this paper proposes two improved methods for retrieving tide surface height from global navigation satellite system reflectometry (GNSS-R) based on the BDS-3/GPS multi-frequency signal to noise ratio data, namely, method of eliminating gross errors based on the relationship between the highest peak and the second peak and the method of optimal frequency band. The effectiveness of the method is verified by the observation data of 333–337 consecutive 5 days of accumulated days (DOY) in 2020 at the MAYG station on Mayotte near the Indian Ocean. The results show that the method of removing gross errors based on the relationship between the highest peak and the second peak can improve the accuracy of tide level inversion. The GPS frequency band is increased by 9.16% and the BDS frequency band is increased by 17.34%, but it will reduce the number of inversion results. The optimal frequency band correction method can improve the accuracy while increasing the number of inversion results. The inversion accuracy of the corrected GPS S1C and S2W frequency bands is increased by 26.54% and 22.89%, respectively. In BDS S1X, S2I, S6I, and S7I, the 5-day tide level inversion root-mean-square error decreased by 61.36%, 34.23%, 47.68%, and 55.38% respectively. The accuracy improvement is higher than the former.

Key words ocean optics; global navigation satellite system reflectometry; BDS-3; multi-frequency data; tide surface height inversion; signal to noise ratio

1 引言

随着全球气候变暖现象的加剧,冰川融化导致海平面高度上升,潮位监测变得更加重要,使用验潮仪和水尺记录潮位是验潮站传统的潮位监测方法,但是由

于地壳运动的影响,这种方法的结果存在误差。全球卫星导航系统反射测量(GNSS-R)是一种使用全球卫星导航系统(GNSS)卫星反射信号的波形、幅值、相位和频率等参量的变化来反演反射面物理特性的技术^[1-2]。目前在雪深探测、反演土壤湿度、植被变化、风

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

通信作者: *mmei2019@163.com

暴雨等领域都得到了广泛的应用,并取得了较高的监测精度^[1-5]。随着我国的北斗导航系统和其他 GNSS 系统的日益成熟,可观测频段逐渐增多,GNSS-R 技术在监测地球表面物理特性方面具有全天候、成本低、信号资源丰富等优势,在潮位监测方面已经取得了不少研究成果。如:文献[6]利用 GPS-R 技术在湖面开展了水位测量研究工作,实验结果取得了 ± 3 cm 的水位监测精度^[6];文献[7]使用单颗卫星信噪比(SNR)观测值研究海平面潮位变化,取得了 ± 27 cm 的监测精度^[7];文献[8]为获取测站 1 天、15 天、1 年的潮位变化,对岸基连续运行参考站(CORS)的 SNR 观测数据进行处理,可知使用 GNSS-R 技术得到的潮位信息与验潮站实测值高度相关,相差约为 10 cm^[8];文献[9]对 GNSS 各个系统的不同频段的信噪比数据进行处理,将虚警概率(PROB)作为衡量频谱分析的可靠性指标,但并没有详细分析 PROB 与潮位反演结果精度的相关性。

文献[10]利用 GNSS-R 对 MAYG 站多模多频数据进行潮位监测研究,分析了 GPS、BDS、Galileo 三个系统所有频段信噪比 SNR 数据,结果表明使用 GNSS-R 技术进行多模多频潮位联合监测时不仅可以提升潮位值时间分辨率,而且潮位监测精度也得到了较好的保证。GNSS-R 潮位联合监测的结果与 Dzaoudzi 验潮站实测潮位数据相比,其均方根误差(RMSE)为 43.44 cm,但是由于 BDS 系统尚处于二号部署期间,BDS 信号频段只分析了 S1I、S7I 和 S6I,并且由于卫星数量较少,BDS 的反演精度低于其他系统^[10]。文献[11]提出使用小波变换分析方法获取 GNSS 信噪比序列的瞬时频率,计算得到瞬时潮位值,结果表明小波分析方法获取瞬时潮位值的精度可以达到分米级,并且反演潮位时间分辨率相比于经典法、加窗法得到很大的提高,但是这种方法不能脱离经典法单独使用^[11]。

本文将结合不同频段的反演结果精度和 PROB 分析两者之间的关系。BDS-3 系统于 2020 年 8 月建成,在 B1、B2 和 B3 三个频段提供 B1I、B1C、B2a、B2b 和 B3I 五个公共服务信号^[12],新增的信号 B2a、B1C 在多 GNSS 实验系统(MGEX)测站中可以被接收到,这为反演水位提供了更多的数据来源。本文使用印度洋附近马约特岛的 MGEX 测站 MAYG 站的 BDS-3 和 GPS 9 个频段 SNR 数据反演水位,提出了两种 GNSS-R 海面高度反演方法以提高反演精度,并对比分析了两种方法的优势与不足。

2 原理与方法

2.1 GNSS-R 反演潮位基本原理

多路径效应在常规的 GNSS 定位测量中通常被当作影响定位精度的主要误差源^[13],要求其尽可能小,因为多路径效应的存在,单天线卫星接收机不仅接收直射

信号,也接收经反射面反射的信号^[14],所以接收机中接收到的信号实际上是直射信号和反射后的合成信号。

随着 GNSS 卫星的运动,GNSS 直反射信号也在不断发生改变,干涉波形的特征参量随时间不断变化,而普通大地型测量接收机会将这些变化信息以 SNR 的形式记录,当信号功率为 P_R ,噪声功率为 N 时,SNR 表示为

$$R_{\text{SNR}} = P_R / N. \quad (1)$$

信噪比数据单位是 dB。在使用信噪比值反演潮位时,需要对其进行单位转换,转换为线性单位,表示为

$$R_{\text{SNR}(V/V)} = 10^{\text{SNR}(\text{dB})/20}. \quad (2)$$

Nieviski 等^[15]提出一种近地面直射反射组合信号功率表达式,即

$$P_c = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d P_r} \cos \varphi, \quad (3)$$

式中: P_c 为混合信号功率; P_d 为直射信号功率; P_r 为反射信号功率; φ 为直反射信号之间的相位延迟。则 SNR 可以写成

$$R_{\text{SNR}} = \frac{(P_d + P_r)}{N} + \frac{2\sqrt{P_d P_r} \cos \varphi}{N}. \quad (4)$$

由于反射信号在传播的过程中被极大地削弱,与直射信号相比功率很小,可以忽略,那么 SNR 就可以看作由两部分组成,第一部分主要包含直射信号 $\left[\frac{(P_d + P_r)}{N}, P_r \approx 0\right]$,第二部分主要包含反射信号 $\left(\frac{2\sqrt{P_d P_r} \cos \varphi}{N}\right)$,通常使用低阶多项式拟合的方法将 SNR 序列分割成这两个部分,图 1 为 GNSS-R 反演海面高度的基本原理,其中 RHCP 为右旋圆极化天线,由图 1 可知, φ 与高度角 θ 的关系为

$$\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \theta, \quad (5)$$

式中: h 表示接收机天线到反射面的垂直距离; λ 表示 GNSS 信号的波长。高度角 θ 随着时间变化,那么相位差也随着时间变化,其变化频率为

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \frac{d(\sin \theta)}{dt}. \quad (6)$$

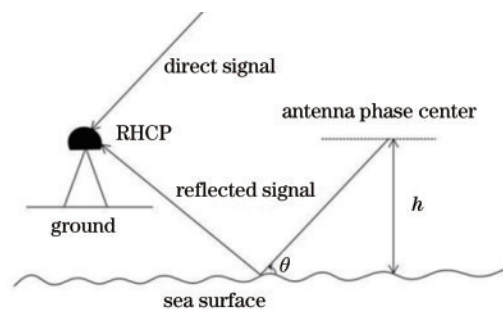


图 1 GNSS-R 反演海面高度原理
Fig. 1 GNSS-R inversion of tide surface height

Chew 等^[16]研究发现,卫星反射信号与高度角存在正(余)弦关系为

$$R_{\text{SNR}-m} = A_m \cos(2\pi ft + \phi), \quad (7)$$

式中: $t = \sin \theta$; $R_{\text{SNR}-m}$ 表示干涉信号的信噪比,即经分离直射分量后的 SNR 残差序列; A_m 表示干涉信号的多路径干涉幅度。频率 f 的公式为

$$f = \frac{2h}{\lambda}. \quad (8)$$

频率 f 可以通过对 $R_{\text{SNR}-m}$ 进行频谱分析获得,对 $R_{\text{SNR}-m}$ 频谱分析时自变量为高度角正弦值,为非均匀采样,所以本文使用 Lomb-Scargle 周期(LSP)谱分析方法来分析 $R_{\text{SNR}-m}$, 获得反射信号的主频率 f , 根据式(8)计算得到水面到接收机天线的垂直反射距离 h 。

2.2 Lomb-Scargle 周期图

对于时域序列 $X(t_j), j=1, 2, \dots, N$, 其功率谱^[17]表示为

$$P(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left\{ \sum_{j=1}^N [X(t_j) - \bar{X}] \cos 2\pi f(t_j - \tau) \right\}^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 2\pi f(t_j - \tau)} + \frac{\left\{ \sum_{j=1}^N [X(t_j) - \bar{X}] \sin 2\pi f(t_j - \tau) \right\}^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 2\pi f(t_j - \tau)} \right\}, \quad (9)$$

式中: $P(f)$ 是频率为 f 的周期信号的功率; \bar{X} 是序列 $X(t_j)$ 的平均值; σ^2 是序列 $X(t_j)$ 的方差; τ 为时间平移不变量。

2.3 虚警概率

通过 Lomb-Scargle 算法计算得到 $R_{\text{SNR}-m}$ 频率信息的同时,还可以获取得到表征 Lomb-Scargle 频谱分析结果可靠性因子——虚警概率^[10],其公式为

$$P_{\text{PROB}} = 1 - [1 - \exp(-P)]^M, \quad (10)$$

其中,

$$M = 2N_f / O, \quad (11)$$

式中: P 为频谱分析得到的频谱图中峰值的功率; O 为过采样因子(Lomb-Scargle 算法中需要输出的参数); N_f 为频谱分析后频谱图中频率 f 的个数。

一般来说,PROB 值较低的情况表明 Lomb-Scargle 频谱分析的可靠性较高,而 PROB 值较高时频谱分析结果可靠性较低,出现虚假峰值的可能性较大,从而容易产生错误的潮位反演结果^[9],但是潮位反演精度不只与频谱分析的可靠性有关。

3 实验分析

3.1 实验数据及方案

本文选取位于印度洋附近马约特岛的 MGEX 测站 MAYG 站,测站可以接收多个卫星系统的信号,安装了 Trimble TRM59800.00 天线(不带天线罩),该天线与 Trimble NetR9 GNSS 接收机相连,接收机观测

数据采样间隔为 30 s,并且距离 MAYG 测站不远处安置有验潮数据采样率为 1 min 的 Dzaoudzi 验潮站,本文选择 Dzaoudzi 验潮站 1 min 采样率的验潮站实测潮位作为参考数据。本文选取 MAYG 测站 2020 年年积日(DOY)333~337 天的 GPS 和 BDS 观测数据,表 1 列出了 MAYG 站 GPS 和 BDS-3 系统的频段数据类型信息。

表 1 MAYG 站 GPS、BDS-3 卫星系统数据类型
Table 1 MAYG station GPS and BDS-3 satellite system data type

Satellite system	Frequency band	Frequency / MHz	Channel / code	Type of SNR
GPS	L1	1575.420	C/A	S1C
	L2	1227.600	Z tracking and similar (AS on)	S2W
			L2C(M+L)	S2X
BDS-3	L3	1176.450	I+Q	S5X
	B1	1561.098	I	S1I
	B2	1207.140	I	S7I
	B2a	1176.450	D+P	S5X
	B1C	1575.420	D+P	S1X
	B3	1268.520	I	S6I

本文使用 BDS-3 新增的 B2a 和 B1X 频段数据反演潮位信息,对比分析不同频段反演潮位的精度,使用三种方案对比分析反演潮位精度:方案一,不使用精度改进方法,按照潮位反演一般流程获取潮位反演值;方案二,根据 LSP 谱分析的峰值与次峰的关系去除粗差;方案三,根据 PROB 选择精度最优频段,以该频段反演结果为依据对其他频段反演结果进行改正。分别对这三种方案处理结果从精度和时间分辨率两个方面对比分析,精度指标选择 RMSE,其计算公式为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{h} - \bar{h})^2}{n}}, \quad (12)$$

式中: \hat{h} 表示潮位参考值; \bar{h} 表示反演得到的潮位值,由式(8)得到的 h 经高程基准转换得到与验潮站相同高程基准的潮位值 \bar{h} ; n 表示参与计算的反演潮位值的数量。

3.2 GNSS-R 反演潮位处理流程

最新版本 RTKLIB 软件可以解算北斗三号新增的 B2a 和 B1C 信号,使用该软件可以得到 MAYG 测站 GPS 和 BDS 系统不同频段的高度角、方位角以及信噪比数据,结合 MAYG 测站的实际观测环境,选择高度角区间为 $5^\circ \sim 18^\circ$,方位角区间为 $20^\circ \sim 170^\circ$ 的观测数据进行实验,并对 MAYG 测站观测数据进行筛选,区分观测序列的上升弧段和下降弧段,得到符合条件的不同频段 SNR 序列。根据反演潮位的处理步骤,使用

低阶多项式方法去除直射信号,获得反射信号 R_{SNR-m} 序列,然后对 R_{SNR-m} 序列使用 LSP 谱分析,获得主频率 f 。根据 f 与反演高度 h 的关系求得反演高度 h ,统一验潮站和 MAYG 站的高程基准,将反演高度 h 转换到验

潮站的高程基准,根据以往验潮站的观测数据得出潮位波动一般在 0~5 m,因此将超出此范围的潮位反演值视为粗差并剔除。图 2 为信噪比反演潮位信息流程图。

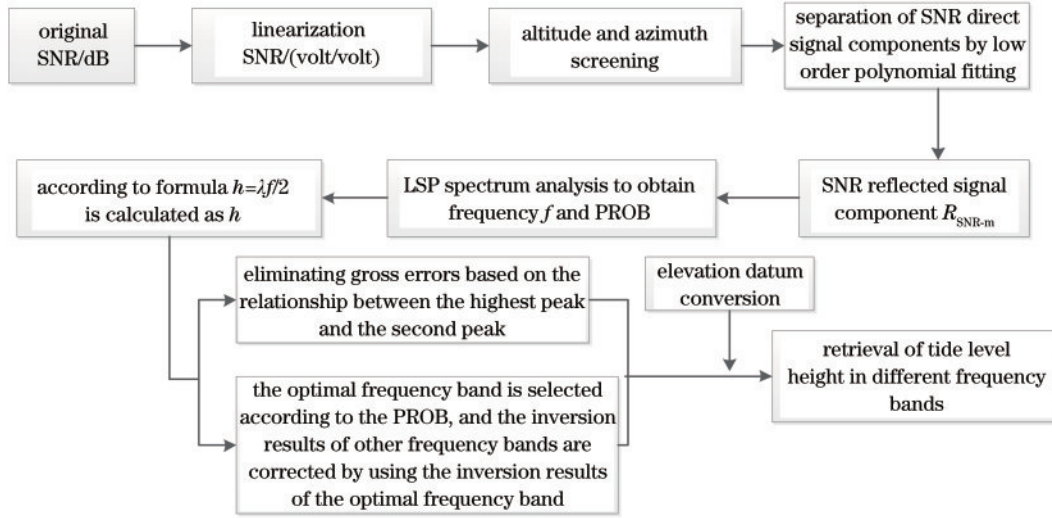


图 2 SNR 反演潮位流程图

Fig. 2 Flow chart of tide level inversion from SNR

3.3 实验精度分析

3.3.1 BDS-3/GPS 最优频段选择

接下来分析 PROB 与潮位反演精度的关系。图 3 为 2020 年年积日 333 天 GPS 系统不同频段反演结果

精度与 PROB 的分布图,可以得出,PROB 虽与反演精度总体上呈负相关,但是精度较低时 PROB 为 0 和精度较高时 PROB 为 1,因此,以 PROB 为衡量反演精度的指标不准确。然而分析不同频段的反演结果和

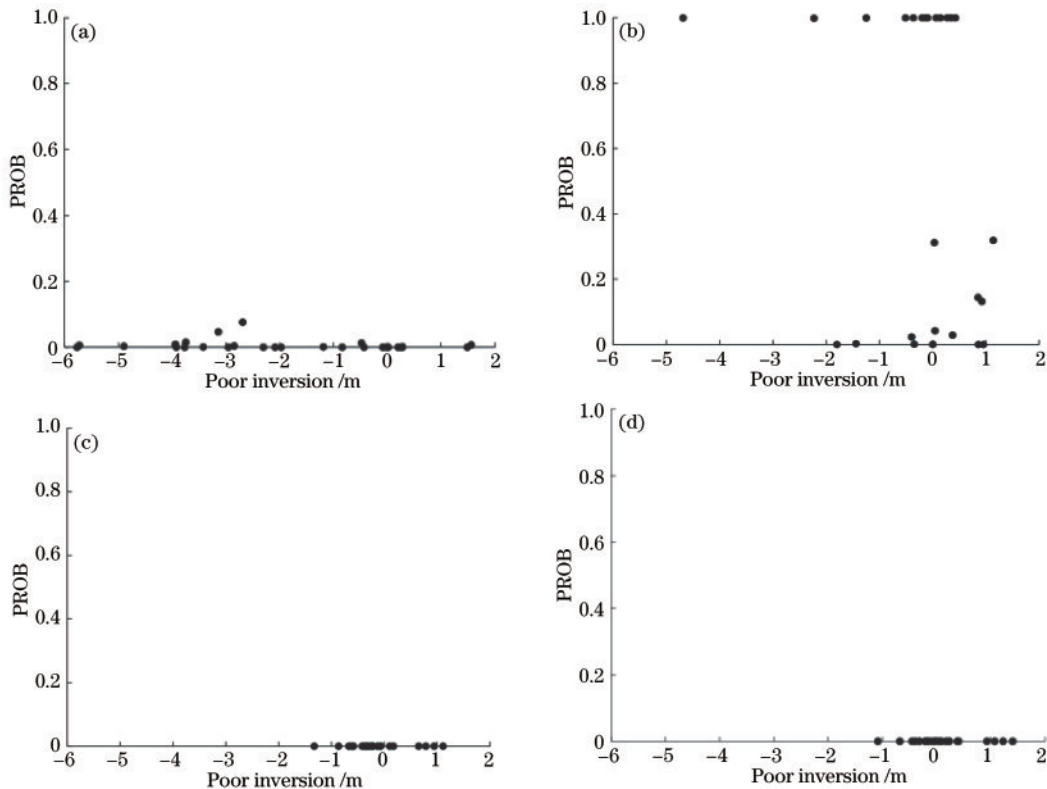


图 3 GPS 不同频段反演精度与 PROB 的关系。(a) GPS S1C; (b) GPS S2W; (c) GPS S1X; (d) GPS S5X

Fig. 3 Relationship between GPS inversion accuracy in different frequency bands and PROB. (a) GPS S1C; (b) GPS S2W; (c) GPS S1X; (d) GPS S5X

PROB 得出:精度总体较低的频段,PROB 在 0 至 1 之间散落分布;精度总体较高的频段,PROB 基本都为 0。从而可以通过总体 PROB 之和最小来判断最优反演频段。

本文提出一种利用最优频段潮位反演结果改正其他频段反演结果的方法。该方法的基本思路为:考虑潮位的变化是时间连续的,PROB 较高的频段反演的某时刻潮位值如果在最优频段相邻两个时刻反演的潮位值范围之外,则可以选择距离最优频段反演潮位范围最接近的峰值反演频率,并根据公式计算得到反演潮位值,反之,则不改变该时刻潮位反演结果。对 MAYG 站 GPS 和 BDS 9 个频段的 SNR 进行处理,获取每段 R_{SNR-m} LSP 谱分析的主频率和 PROB,并根据公式计算反演潮位值 h ,根据 PROB 和最小选择最优频段,得出 GPS S2X、S5X 和 BDS S5X 为最优频段,给出最优频段年积日 333~337 天的反演 RMSE 和反演结果数量统计表,如表 2 所示。最优频段 5 天的反演精度都比较高,说明 PROB 和最小确实可以将精度较好的频段挑选出来。

表 2 GPS S2X、S5X 和 BDS S5X 的反演精度

Table 2 Inversion accuracy of GPS S2X, S5X, and BDS S5X

Frequency band	DOY					5 days
	333 days	334 days	335 days	336 days	337 days	
GPS S2X	0.5732	0.5436	0.5829	0.5008	0.4755	0.5373
GPS S5X	0.5835	0.5760	0.5750	0.4741	0.4459	0.5348
BDS S5X	0.5699	0.5759	0.5447	0.7937	0.7401	0.6512

3.3.2 不同方案反演结果分析

LSP 谱分析时得到的峰值通常有多个,当频谱分析可靠性较高时最高峰值往往高于其他峰值很多倍,而当最高峰值与其他峰值相差不大时可以看出该 R_{SNR-m} 序列中可能有多个主要频率,那么选择最高峰值的频率可能不是反演潮位所需要的,从而导致反演粗差的出现,本文根据最高峰和次峰的关系提出方案二:在 LSP 谱分析时如果最高峰小于次峰(小于最高峰值的最大峰值)的 2 倍,则认为该反演结果为粗差并剔除。使用该方案对 MAYG 测站 2020 年年积日 333~337 天的 BDS 和 GPS 不同频段的观测数据进行实验,考虑文章篇幅,只给出 GPS 反演结果。图 4 为方案一的 GPS 潮位反演结果,图 5 使用方案二的 GPS 潮位反演结果。从图 4 和图 5 可以得出,虽然方案二可以剔除大部分明显的粗差,但仍有部分粗差不能被剔除,并且这种剔除粗差方法会将精度较高的反演结果剔除,这是因为反演精度不只与频谱分析的可靠性有关。

由于方案二在剔除粗差的同时减少了反演结果数量,本文采用方案三方法,选择 MAYG 站 GPS 和 BDS 9 个频段的观测数据进行实验,使用 Matlab 软件编写算法实现。按照图 2 的数据处理流程进行实验,首先

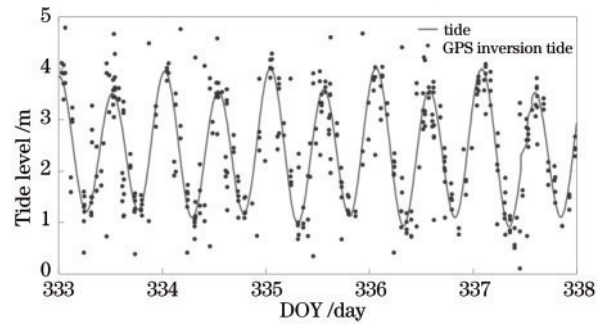


图 4 使用方案一的 GPS 潮位反演结果

Fig. 4 GPS tide level inversion result using scheme 1

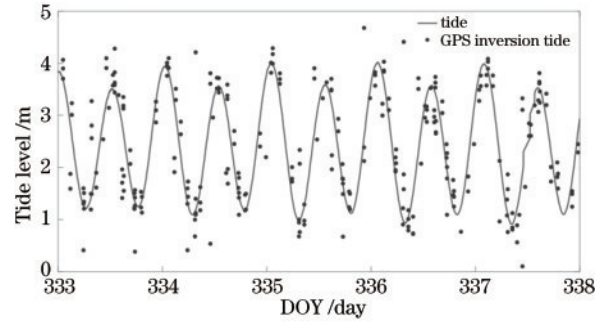


图 5 使用方案二的 GPS 潮位反演结果

Fig. 5 GPS tide level inversion result using scheme 2

按照潮位反演流程获得不同频段的频谱分析频率和 PROB,然后根据 PROB 总和最小选择最优频段,分析不同频段的 PROB 得出 GPS 的 S2X、S5X 和 BDS 的 S5X 虚警概率总和最小,因此将 GPS 的 S2X、S5X 和 BDS 的 S5X 作为最优频段改正其他频段(GPS S1C 和 S2W 频段和 BDS 的 S1X、S2I、S6I 和 S7I)。

为更详细地分析三种方案的精度和反演结果数量,表 3 为方案一 GPS 的 S1C、S2W 和 BDS 的 S1X、S2I、S6I、S7I 频段反演结果统计表,表 4 为方案二 BDS~3 和 GPS 9 个频段的 5 天反演结果统计表,表 5 为使用方案三 GPS 的 S1C、S2W 和 BDS 的 S1X、S2I、S6I、S7I 频段反演结果统计表。将表 3 和表 4 进行对比分析,可以得出,未加任何改正的方案一处理 GPS S1C 和 S2W 频段和 BDS-3 的 S1X、S2I、S6I 和 S7I 频段精度普遍较低,而且由于已知潮位变化范围,不在此范围的潮位反演值视为粗差被剔除,所以不加改正的 GPS S1C 和 S2W 和 BDS 的 S1X、S2I、S6I 和 S7I 频段反演结果数量较少。分析方案二的处理结果可以看出:方案二可以提高潮位反演的精度,GPS 频段总体提高了 9.16%,BDS 频段总体提高了 17.34%,BDS S7I 频段的精度提高程度最好, RMSE 降低了 15.16%,但是反演结果数量降低了 67.62%;BDS 5 天的反演结果数量总体降低了 49.00%,GPS 5 天的反演结果数量总体降低了 31.25%,精度较低的 GPS S1C 和 BDS S7I 频段反演数量减少得最多,分别减少了 67.24% 和 67.62%。将表 3 与表 5 进行对比分析,可

表 3 使用方案一 GPS 的 S1C、S2W 和 BDS 的 S1X、S2I、S6I、S7I 频段反演结果统计表

Table 3 Statistics of inversion results of GPS S1C and S2W and BDS S1X, S2I, S6I, and S7I frequency band using scheme 1

Frequency band	Parameter	DOY					5 days
		333	334	335	336	337	
GPS S1C	Number of tide level inversion results	13	10	10	12	13	58
	RMSE /m	0.9330	1.0078	0.7564	1.0752	0.5612	0.8824
GPS S2W	Number of tide level inversion results	23	19	21	24	23	110
	RMSE /m	0.8161	1.0837	0.6990	0.8347	0.6480	0.8217
BDS S1X	Number of tide level inversion results	20	19	18	17	20	94
	RMSE /m	1.7340	1.5914	1.5013	1.6052	1.9647	1.6943
BDS S2I	Number of tide level inversion results	33	27	30	29	31	150
	RMSE /m	0.7671	1.0451	0.9666	1.0393	1.1435	0.9960
BDS S6I	Number of tide level inversion results	29	17	27	21	24	118
	RMSE /m	1.2424	1.4895	1.4975	1.4742	1.3968	1.4127
BDS S7I	Number of tide level inversion results	28	17	20	17	23	105
	RMSE /m	1.5133	1.7255	1.4970	1.3976	1.4962	1.5252

表 4 使用方案二 BDS 和 GPS 9 个频段的 5 天反演结果统计表

Table 4 Statistical of 5-day inversion results using 9 frequency bands of BDS and GPS in scheme 2

Frequency band	Number of tide level inversion results	RMSE /m
GPS S1C	19	1.0108
GPS S2W	60	0.7288
GPS S2X	98	0.5410
GPS S5X	98	0.5143
GPS	275	0.6205
BDS S1X	71	1.6384
BDS S2I	52	0.9340
BDS S5X	107	0.5618
BDS S6I	42	1.3413
BDS S7I	34	1.2940
BDS	306	1.1465

表 5 使用方案三 GPS 的 S1C、S2W 和 BDS 的 S1X、S2I、S6I、S7I 频段反演结果统计结果

Table 5 Statistics of inversion results of GPS S1C and S2W and BDS S1X, S2I, S6I, and S7I frequency band using scheme 3

Frequency band	Parameter	DOY					5 days
		333	334	335	336	337	
GPS S1C	Number of tide level inversion results	30	32	31	31	31	155
	RMSE /m	0.6267	0.6599	0.7441	0.5843	0.6135	0.6482
GPS S2W	Number of tide level inversion results	29	32	30	31	30	152
	RMSE /m	0.6842	0.7076	0.6433	0.5235	0.5921	0.6336
BDS S1X	Number of tide level inversion results	28	30	30	29	29	146
	RMSE /m	0.7394	0.6926	0.5184	0.6711	0.6362	0.6546
BDS S2I	Number of tide level inversion results	49	48	51	52	54	254
	RMSE /m	0.7526	0.5366	0.6235	0.7656	0.5627	0.6550
BDS S6I	Number of tide level inversion results	49	49	52	49	54	253
	RMSE /m	0.7482	0.5995	0.7720	0.7442	0.8056	0.7391
BDS S7I	Number of tide level inversion results	49	48	51	49	53	250
	RMSE /m	0.7922	0.5765	0.5556	0.7489	0.6983	0.6805

以得出:使用方案三处理得到的反演结果数量较多,5天9个频段反演结果数量为1575,相较于方案一的反演数量1000个,总体增加了57.50%;5天的GPS S1C频段反演精度总体提高了26.54%,GPS S2W频段反演精度总体提高了22.89%,BDS S1X、S2I、S6I、S7I频段总体精度分别提高了61.36%、34.23%、47.68%、55.38%;年积日336天S1C频段改正后RMSE降低了45.66%,但是年积日335天的改正程度很低,这是因为根据最优频段虽然可以将靠近真实潮位的峰值高度挑选出来,但是并不能对粗差进行剔除,所以335天的反演结果中仍存在与实际潮位相差较大的反演结果,导致RMSE只降低了3.02%。从表2可以看出,GPS年积日333~337天精度较好,BDS年积日333~335天精度较好,但是年积日336~337天BDS的S5X频段RMSE较高。结合表5中BDS的频段年积日336~337天的反演精度可以得出,方案三虽然可以在提高反演数量的同时提高精度,但是精度提高程度取决于最优频段的精度。

对表3~5的结果进行对比分析可以得出以下结论:相比于不使用精度改进方法的方案一,方案二可以提高潮位反演精度,但缺点是潮位反演数量的减少,降低了潮位反演的时间分辨率;方案三改进了方案二的缺点,可以在增加反演结果数量的同时提高反演精度,而且精度提高程度较方案二更高,但缺点是方案三不能对存在的所有粗差进行剔除,精度提高程度取决于最优频段的精度。

4 结 论

随着北斗三号的投入使用,目前可以使用的北斗三号信号频段有5个,本文使用北斗三号新增的S1X、S5X频段反演潮位。通过使用三种方案处理MAYG站年积日333~337天GPS、BDS-3 9个频段的观测数据来反演潮位,得出以下结论:基于最高峰与次峰关系剔除粗差方法可以提高反演精度,GPS频段总体提高了9.16%,BDS频段总体提高了17.34%;但是反演结果数量降低,BDS 5天的反演结果数量总体降低了49.00%,GPS 5天的反演结果数量总体降低了31.25%,精度较低的GPS S1C和BDS S7I频段反演数量减少得最多,分别减少了67.24%和67.62%。虽然这种方法可以提高精度,但是因为最高峰与次峰的关系不能直接决定反演结果精度,仍有部分粗差不能被剔除,并且存在将精度较高的反演结果剔除的情况。最优频段改正方法使用MAYG站的GPS和BDS 9个频段的SNR数据进行验证,结果表明:该方法可以在提高反演数量的同时提高精度,5天9个频段反演结果数量相较于方案一总体增加了57.50%;反演结果数量5天的GPS S1C、S2W频段反演精度总体分别提高了26.54%、22.89%;年积日336天S1C频段改正后RMSE降低了45.66%,BDS S1X、S2I、S6I和S7I 5天

的潮位反演RMSE分别降低了61.36%、34.23%、47.68%和55.38%。北斗三号新增的B2a的S5X频段反演精度在BDS所有频段里精度最好,但是被改正的频段反演结果精度取决于最优频段的精度,由于最优频段的反演结果RMSE不为0,该方案不能对反演结果的所有粗差进行剔除。下一步的研究是充分利用多频多模GNSS-R反演潮位的优势,寻找潮位反演融合算法。

参 考 文 献

- [1] Gutmann E D, Larson K M, Williams M W, et al. Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: an evaluation at Niwot Ridge, Colorado[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(19): 2951-2961.
- [2] 苏晓容, 张云, 韩彦岭, 等. 岸基GNSS单天线潮位高度小波分析反演[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 87-93. Su X R, Zhang Y, Han Y L, et al. Inversion of tidal height with wavelet analysis based on shore-based GNSS single antenna[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(4): 87-93.
- [3] Larson K M, Small E E, Gutmann E, et al. Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3): 173-177.
- [4] Small E E, Larson K M, Braun J J. Sensing vegetation growth with reflected GPS signals[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(12): GL042951.
- [5] Peng D J, Hill E M, Li L L, et al. Application of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges[J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 47.
- [6] 吴继忠, 杨荣华. 利用GPS接收机反射信号测量水面高度[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(6): 135-138. Wu J Z, Yang R H. Measuring water surface height by using reflected signal of geodetic-quality GPS receiver[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6): 135-138.
- [7] Nakashima Y, Heki K. GPS tide gauges using multipath signatures[J]. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2013, 59(4): 157-162.
- [8] 张双成, 南阳, 李振宇, 等. GNSS-MR技术用于潮位变化监测分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1042-1049. Zhang S C, Nan Y, Li Z Y, et al. Analysis of tide variation monitored by GNSS-MR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1042-1049.
- [9] 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 X L. Ground GNSS remote sensing for near-surface water environmental parameters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [10] 贺正训. GNSS-MR技术用于潮位变化监测及软件设计[D]. 西安: 长安大学, 2019. He Z X. GNSS-MR technology for sea level change monitoring and software design[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [11] 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.

- Wang J, He X F, Wang X L, et al. Application of wavelet analysis in tidal by GNSS-IR[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(2): 82-89.
- [12] 尹志豪, 王广兴, 胡志刚, 等. 北斗三号观测数据质量分析[J]. *测绘科学*, 2020, 45(6): 37-45.
- Yin Z H, Wang G X, Hu Z G, et al. Data quality analysis of BDS-3 observables[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(6): 37-45.
- [13] 朱响. GNSS多路径效应与观测噪声削弱方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- Zhu X. Research on GNSS multipath effect and observed noise reduction method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [14] 黄良珂, 周威, 刘立龙, 等. 基于GPS新型L5信号的地表雪深反演研究[J]. *测绘通报*, 2019(7): 1-5, 11.
- Huang L K, Zhou W, Liu L L, et al. Research on surface snow depth retrieval of new L5 signals from GPS [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(7): 1-5, 11.
- [15] Nievinski F G, Larson K M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(2): 309-322.
- [16] 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.
- [17] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2): 447-462.