引文格式：周秀一,王井利,李如仁,等. 基于BDS卫星信噪比反演海平面高度研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(7): 44-48. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.07.011

基于BDS卫星信噪比反演海平面高度研究

周秀一[1]，王井利[1*]，李如仁[1]，王继野[2]
（1. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院，辽宁 沈阳 110168；2. 中铁十九局集团矿业投资有限公司，北京 100161）

摘　要：为提高BDS卫星信噪比（SNR）信号海平面高度反演结果的精度，选取MAYG站2019年203—209年积日BDS卫星B2/B6/B7波段数据，以该站附近的验潮仪数据为真值，采用小波变换方法对BDS卫星各波段SNR信号进行滤波，利用LSP频谱分析法反演海平面高度，并与经典滤波方法的反演结果进行对比，探讨小波变换方法反演BDS卫星海平面高度的适用性。结果表明：①BDS各波段均可用于海平面高度反演；②小波变换方法反演结果精度优于经典多项式滤波方法，二者时间分辨率相当，结果精度均为亚米级；③BDS三波段可联合对海平面高度进行反演，且反演结果的时间分辨率将得到极大提升。

关键词：GNSS-R；BDS卫星；SNR；小波变换；海平面高度；验潮仪
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）07-0044-05

Research on Sea Level Height Inversion Based on BDS Satellite Signal-to-Noise Ratio

ZHOU Xiuyi[1], WANG Jingli[1], LI Ruren[1], WANG Jiye[2]
(1. School of Transportation Engineering and Surveying and Mapping, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
2. China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of BDS satellite signal-to-noise ratio(SNR) signal sea level height inversion results, we selected three bands data of BDS satellite B2, B6 and B7 from 203 to 209 years of MAYG station in 2019, and taking the tide gauge data near the station as the true value, used wavelet transform method to filter the SNR signal of each band of BDS satellite. Then, we used LSP spectrum analysis method to invert the sea level height, compared with the inversion result of classical filtering method, and discussed the applicability of wavelet transform method in the BDS satellite sea level height inversion. The results show that ①each band of BDS can be used for sea level height inversion. ②The accuracy of wavelet transform method is better than that of classical polynomial filtering method. The time resolution of the two is equivalent, and the accuracy of inversion result is equal. It is sub-meter level. ③The three-band BDS can jointly invert sea level height, and the time resolution of inversion result will be greatly improved.

Key words: GNSS-R, BDS satellite, SNR, wavelet transform, sea level height, tide gauge

海平面高度可用于海洋环流分析、潮汐模型建立、气象模型研究和海啸预警，是海洋科学研究中不可或缺的物理参数[1]。由于温室效应导致海面上升、海冰融化、海岸侵蚀等，严重威胁沿海地区安全[2]，因此监测沿海地区海平面高度具有重要意义。传统的海平面高度测量手段主要包括浮标、船舶与海面零星探空等方法，具有时空分辨率低、精度低、卫星成本高等特点[3]。20世纪90年代初 Martin-Neira M[4]提出利用GPS反射信号测高的PARIS概念；Larson K M[5]等首次将岸基GPS反射信号用于海平面监测；Löfgren J S[6]等利用全球分布的5个GNSS站进行海平面高度反演，反演结果与验潮仪实测的海平面高度相关系数可达0.89~0.99，潮位变化反演精度在4.3~6.2 cm之间；Roussel N[7]等对比了3个月的测高数据与验潮仪数据，相关系数达0.97，说明GNSS-R在反演海平面高度方面具有很强的潜力；王笑蕾[8]通过提取单历元信噪比（SNR）的瞬时频率反演潮位；杨雪滢[9]等利用多系统SNR数据，通过转换参考基准面和剔除反演结果粗差获得潮位变换时间序列，反演高度与实测数据呈现较好的吻合趋势；Tabibi S[10]等利用位于南极GNSS接收站的SNR信号进行海平面高度反演，通过限制相位移动和引进动态滤波解算二阶高度变换率的方法，减小海冰影响，以提高浅水区域和极地海洋潮汐模型的精度。随着我国BDS建设的不断完善，将其应用于海平面高度测量成为可能。JIN S G[11]等首次结合BDS的SNR数据和三频码相位来估计海平面变化，并与验潮

收稿日期：2022-03-15；修回日期：2022-05-16。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（51774204）。
第一作者简介：周秀一（1991—），硕士研究生，主要研究方向为GNSS技术及应用，E-mail：1187510800@qq.com。
通信作者：王井利（1971—），教授，硕士生导师，主要研究方向为GNSS技术及应用，E-mail：849552618@qq.com。

仪观测值进行比较，结果表明由SNR数据得到的海平面变化具有很好的一致性，相关系数为0.83~0.91，RMSE小于0.6 m，优于BDS码组合结果；杨东凯[12]等在威海地区开展BDS反射信号技术研究，证明了利用BDS反射信号探测海风海浪比浮标具有更好的可行性；陈发德[13]等利用BDS的SNR数据进行反演，反演结果的RMSE为0.357，并联合GPS、GLONASS的SNR数据，采用多项式方法验证多模GNSS-R监测海平面的可行性和有效性[14]。目前，基于GNSS的海平面高度反演多采用双天线载波相位测高和单天线接收SNR信号的经典滤波方法，而针对BDS数据并采用新滤波方法的海平面高度反演鲜有研究。本文选取MAYG站2019年203—209年积日BDS卫星B2/B6/B7波段数据，以该站附近的验潮仪数据为真值，采用小波变换方法对BDS各波段SNR信号进行滤波，利用LSP频谱分析法反演海平面高度，并与经典滤波方法进行对比，以探讨小波变换方法反演BDS海平面高度的适用性。同时，通过BDS多波段联合反演，以提升BDS卫星海平面高度反演的时间分辨率。

1　基于SNR的GNSS-R海平面高度反演原理

1.1　GNSS-R反演海平面高度经典模型

SNR是反映信号质量的指标[15]，主要受多路径效应、天线增益和接收机噪声的影响，且在卫星高度角较低时，多路径效应成为影响SNR的主要因素[16]。MAYG站BDS C25卫星B2波段第203天观测数据的SNR趋势变化见图1，采样频率为30 s/次，SNR数据趋势呈抛物线状，在卫星高度角较高时SNR数据波动较小，在卫星高度角较低时SNR数据波动较大，主要是由于卫星高度角较低时受多路径效应影响较大，且该段SNR（红色圈内）携带较多的反射面信息，因此可选择高度角较低时的SNR数据反演反射面特性。

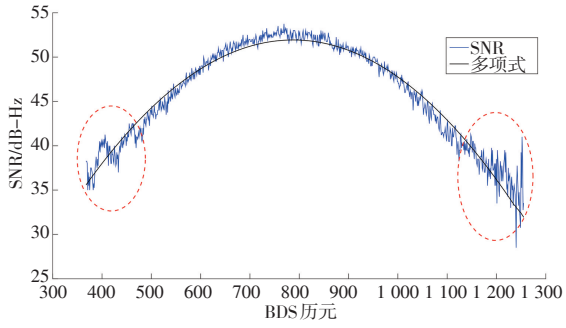


图1　BDS C25卫星B2波段SNR信号多项式拟合图

岸基GNSS-R海平面反演原理见图2，H、h分别为接收机架设高度和接收机相位中心到反射面的高度，Δh为海平面高度，θ为卫星高度角。接收机的直、反射信号干涉产生复合SNR可表示为：

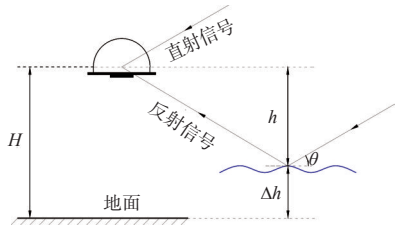


图2　GNSS-R反演海平面原理图

$$\mathrm{SNR}^2 \approx A_\mathrm{d}^2 + A_\mathrm{m}^2 + 2A_\mathrm{d}A_\mathrm{m}\cos\varphi \tag{1}$$

$$\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda}\sin\theta \tag{2}$$

式中，A_d、A_m分别为直、反射信号的振幅；φ为信号的相位差；λ为信号波长。

$\sin\theta$与φ之间呈线性关系，由此可得：

$$\frac{d_\varphi}{d_{\sin\theta}} = 2\pi\frac{2h}{\lambda} = 2\pi f \tag{3}$$

式中，f为信号频率。

对复合SNR信号进行滤波后，即可得到SNR反射信号，SNR反射信号的残差序列为：

$$d_\mathrm{SNR} = A\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin\theta + \varphi\right) \tag{4}$$

由于$\sin\theta$为非等间距采样，因而观测序列无法整周期截断，无法采用快速傅里叶变换，可通过LSP方法获取f值，公式为：

$$Px(f) = \frac{1}{2\delta^2}\left\{\frac{\left[\sum(X_i-\bar{X})\cos\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum\cos^2\omega(t_i-\tau)} + \frac{\left[\sum(X_i-\bar{X})\sin\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum\sin^2\omega(t_i-\tau)}\right\} \tag{5}$$

式中，$\bar{X}$、δ^2分别为观测序列的均值和方差；ω为角频率。

$$\tan(2\omega\tau) = \sum\sin(2\omega t_i)/\sum\cos(2\omega t_i) \tag{6}$$

通过式（5）、（6）可从每段SNR序列中提取一个f值；再利用$h=\frac{\lambda f}{2}$可解算天线相位中心到海平面的距离，进而由$\Delta h = H - h$求解海平面高度。

1.2　基于小波变换理论的海平面高度反演原理

小波实际上是一个限制了时间周期、值为0的波形，可表示为：

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\varphi(t)\mathrm{d}t = 0 \quad \varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{7}$$

式中，$\varphi_{a,b}(t)$为小波基函数；a为不同尺度下的缩放因子；b为小波基函数的位移。

将信号函数$f(t)$与小波基函数做内积，得到小波分解关系式为：

$$W_f(a,b) = \left\langle f(t), \varphi_{a,b}(t)\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中，$W_f(a,b)$ 为小波分解系数；〈 〉为内积；$\bar{\psi}$ 为 ψ 的共轭。

实际应用中，由于外界信号几乎是非平稳的，因此常采用离散小波变换（DWT）。一维DWT可表示为：

$$\mathrm{DWT}(m,n)=\left\langle f,\varphi_{m,n}\right\rangle=a_0^{-\frac{m}{2}}\sum_{R=-\infty}^{\infty}f(k)\varphi^*\left(a_0^{-m}k-nb_0\right) \tag{9}$$

$$\varphi_{m,n}=a_0^{-\frac{m}{2}}\varphi(a_0^{-m}(k-nb_0a_0^m))\quad m,n\in Z \tag{10}$$

式中，$\varphi_{m,n}$ 为离散小波变换的冗余变换小波基函数。

a 为固定参数 a_0 的整数次幂，即 $a=a_0^m, a_0>1$，通过 m 得到不同宽度的小波基函数，$b=nb_0a_0^m$，$b_0>1, n\in Z$，b_0 为固定平移值。

通过小波变换对原始信号进行滤波处理，即分解原函数。假设原始信号函数表示为：

$$x(t)=s(t)+n(t) \tag{11}$$

式中，$s(t)$ 为有效函数，即有效信号；$n(t)$ 为噪声函数，即噪声信号。

小波基函数由实际情况确定，本文选择紧支撑标准正交db4小波作为小波基函数对原始SNR信号逼近，以MAYG站2019年第203天BDS C25号卫星SNR信号为例，利用小波变换时域与频域分析区分有效信号与噪声信号，共进行6层分解（图3）。SNR信号小波滤波结果见图4，a为近似系数，d为细节系数，对比发现，小波变换滤波后的信号趋势变化优于多项式滤波方法，SNR信号细节更突出（图5）。

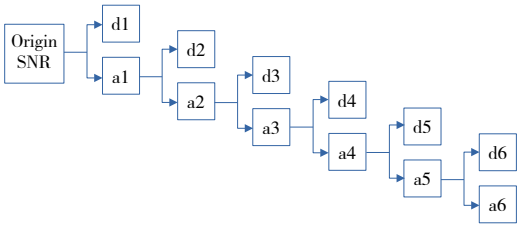


图3　信号分解模型图

2　算例验证

2.1　数据来源

为验证小波变换方法的有效性，本文选取MAYG站BDS数据进行海平面高度反演。MAYG站位于Mayotte岛(45.26°, −12.78°)，架设Trimble NETR9接收机，并配备采样率1 Hz的半球整流罩天宝TRM5980000扼流圈天线。距该站10 m处为Dzaoudzi验潮站，可提供1 min时间分辨率的验潮数据。由于海平面对于该站的有效方位区间为20°~170°，因此本文选择MAYG站2019年203—209积日BDS B2/B6/B7波段，方位角位于20°~170°区间且高度角位于0°~20°区间的数据，利

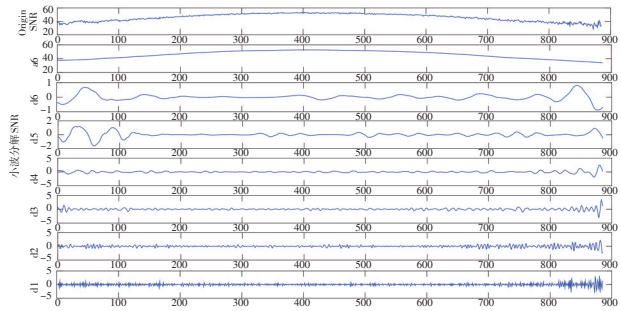


图4　BDS C25卫星B2波段SNR信号小波滤波结果

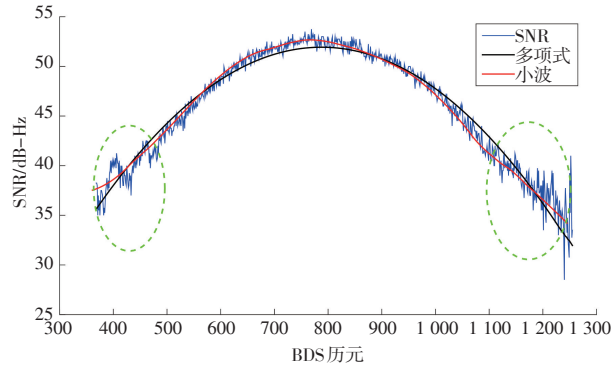


图5　BDS C25号卫星B2波段SNR信号多项式与小波拟合图

用BDS的SNR反演海平面高度。

2.2　基于小波变换的SNR海平面高度反演验证

选取MAYG站2019年203—209年积日BDS B2波段数据，分别采用经典多项式与小波变换方法对SNR信号进行滤波，通过LSP谱分析反演海平面高度；并以经典多项式方法反演结果为对比值，以验潮仪数据为真值，利用Spline样条插值函数进行插值，得到反演结果相对应时刻的验潮仪数据（图6），再分析验潮仪数据与反演结果的相关性（图7）。

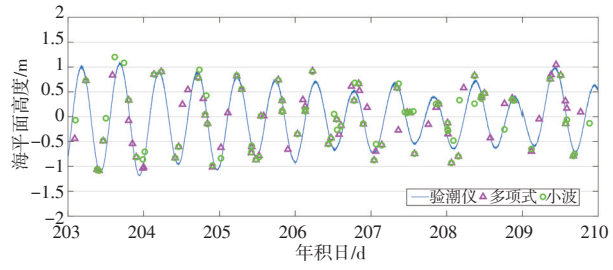


图6　BDS B2波段多项式与小波变换方法反演海平面高度

由图6可知，验潮仪数据在−1.18~1.08 m之间波动，多项式方法反演结果在−1.08~1.04 m之间波动，小波变换法反演结果在−1.08~1.20 m之间波动；由图7可知，采用多项式、小波变换方法的反演结果与真值的相关系数分别为0.89、0.90，均具有较强的相关性，说明两种方法均能较好地反映海平面变化，且小波变换方法的相关性优于多项式方法。多项式方法的MAE、RMSE分别为0.24 m、0.31 m，小波变换法的MAE、RMSE分别为0.20 m、0.27 m；多项式方法和小波变换方法反演后的有效点分别为89个、84个，时

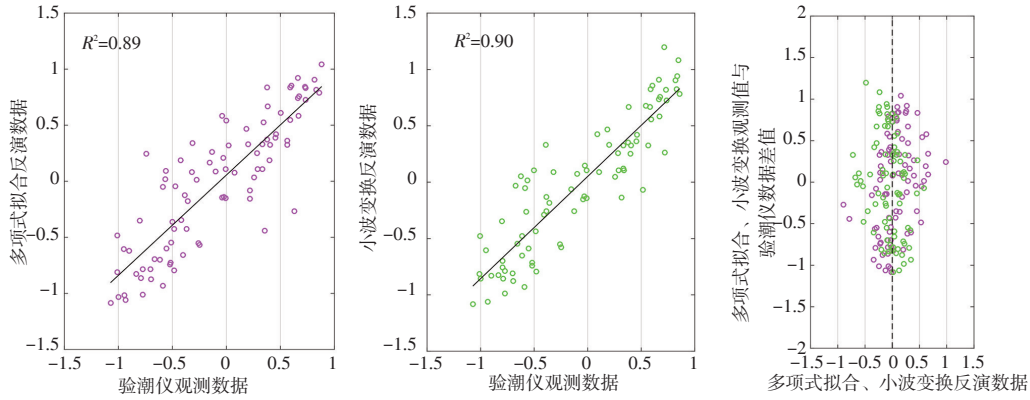


图7　BDS B2波段多项式与小波变换方法反演结果精度图/m

间分辨率分别为13个/d、12个/d，结果表明两种方法反演后结果的时间分辨率相当，精度均为亚米级，且小波变换方法反演结果的精度高于多项式方法。多项式方法和小波变换方法的误差范围分别为−0.895~0.985 m和−0.722~0.587 m。综上所述，在BDS卫星反演海平面高度的研究中，小波变换方法具有适用性，且滤波精度整体高于多项式方法，相关性更强。

2.3　基于小波变换的BDS各波段SNR海平面反演结果与精度分析

选取MAYG站2019年203—209年积日BDS B2/B6/B7波段数据，利用小波变换法对海平面高度进行反演，结果见图8；并以验潮仪数据为真值，利用Spline样条函数进行插值，得到反演结果对应时刻的验潮仪数据，再分析验潮仪数据与反演结果的相关性（图9）。

由图8可知，验潮仪数据在−1.18~1.08 m之间波动，BDS B2波段反演结果在−1.08~1.20 m之间波动，BDS B6波段反演结果在−1.16~1.21 m之间波动，BDS B7波段反演结果在−0.88~1.25 m之间波动；由图9可知，3个波段反演结果与真值的相关系数分别为0.91、0.90、0.95，均具有强相关性，说明3个波段的反演结果均能较好反映海平面变化情况。BDS B2波段

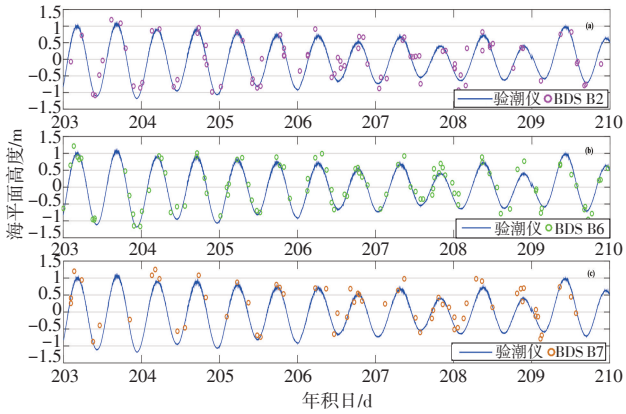


图8　BDS各波段反演结果

的MAE、RMSE分别为0.20 m、0.27 m，BDS B6波段的MAE、RMSE分别为0.15 m、0.18 m，BDS B7波段的MAE、RMSE分别为0.21 m、0.28 m；BDS B2、B6、B7波段反演后的有效点分别为84个、98个和62个，时间分辨率分别为12个/d、14个/d和9个/d，反演结果的精度均为亚米级。BDS B2、B6、B7波段的误差范围分别为−0.722~0.587 m、−0.675 m和−0.893 m。

2.4　基于小波变换的BDS三波段联合反演海平面高度结果与精度分析

BDS各单波段虽均可较好反映海平面变化情况，

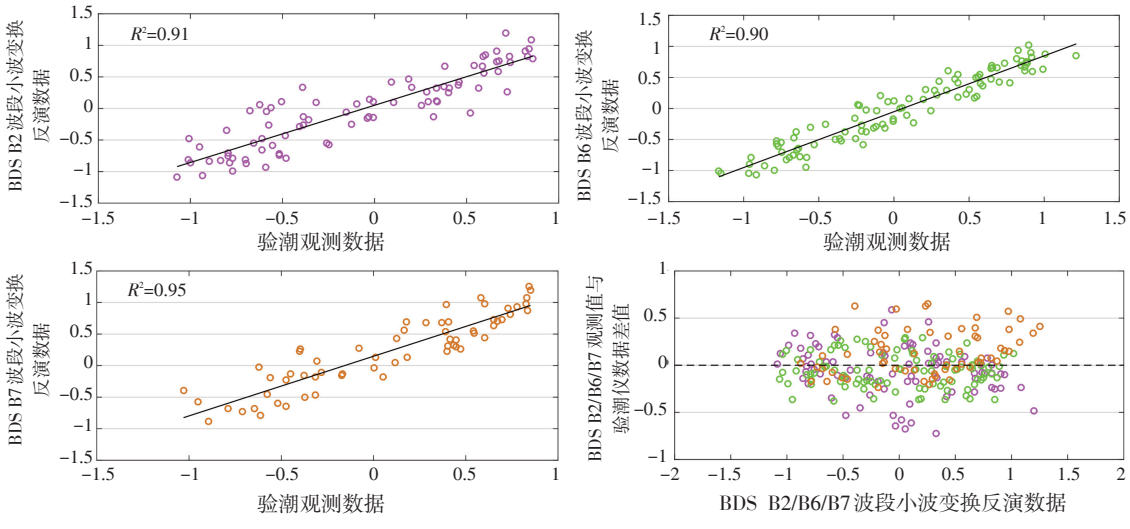


图9　BDS三种波段小波变换方法反演结果精度图/m

但有效反演值个数少，时间分辨率不高，原因在于接收的可用信号较少。为提高BDS卫星海平面高度反演的时间分辨率，对BDS卫星B2/B6/B7波段数据进行联合反演，结果见图10、11。联合反演结果的MAE为0.187 m，RMSE为0.24 m，相关系数为0.91，呈现强相关性，有效点为244个，时间分辨率为35个/d，联合反演结果的时间分辨率大幅提升。由此可得，基于小波变换的BDS三波段联合反演可提高海平面结果的时间分辨率。

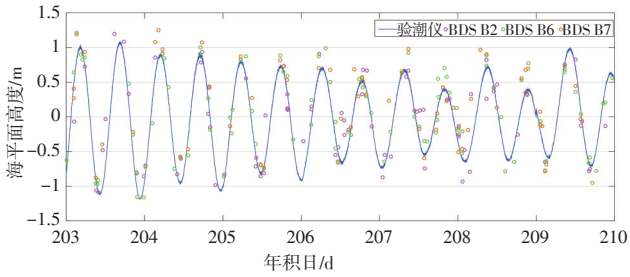


图10 BDS三波段联合反演结果图

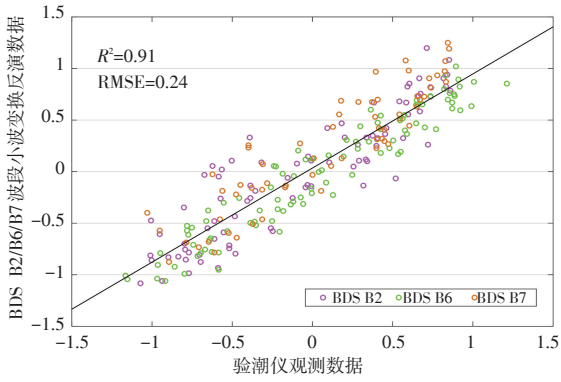


图11 基于小波变换的BDS三波段联合反演结果/m

3 结 语

本文采用小波变换法对BDS卫星各波段SNR信号进行滤波，利用LSP频谱分析法反演海平面高度，与经典滤波方法进行对比，以探讨小波变换法在BDS海平面高度反演中的适用性，并对反演结果的精度和时间分辨率进行了对比分析。

1）BDS各波段的海平面高度反演结果均与验潮仪数据呈强相关性，说明BDS各波段均可用于海平面高度反演。

2）小波变换法反演结果精度优于多项式方法，时间分辨率相当，反演结果精度均在亚米级，可知小波变换法适用于基于SNR反演海平面高度的研究。

3）BDS三波段联合反演结果与验潮仪数据呈强相关性，精度可达亚米级，且反演结果的时间分辨率比单波段有极大提升。因此，在后期BDS卫星反演海平面高度研究中，多系统多波段反演是提升时间分辨率的有效方法之一。同时，滤波方法的更新，为基于SNR反演海平面高度研究结果精度的提升创造了新的可能，拓展了BDS卫星的应用空间。

参考文献

[1] 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

[2] 骆黎明. 基于机器学习树模型的GNSS-R海面风场反演研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2019

[3] 刘立龙,封海洋,陈伟清,等. 基于GPS信噪比反演海平面高度研究[J]. 桂林理工大学学报,2017,37(4):629-634

[4] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System(PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. ESA Journal,1993,17:321-355

[5] 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):1 301-1 310

[6] 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

[7] 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

[8] 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

[9] 杨雪滢,陈鹏,郑乃铨,等. 利用GNSS多系统信噪比数据反演潮位高度[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集:S01卫星导航行业应用,2021

[10] 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,2020,248:263-274

[11] 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

[12] 杨东凯,王强,曹云昌,等. 基于北斗反射信号的海面有效波高探测[J]. 高科技与产业化,2014(10):81-83

[13] 陈发德,刘立龙,黎峻宇,等. 基于BDS-MR的海平面测高技术[J]. 桂林理工大学学报,2018,38(3):507-512

[14] 陈发德,刘立龙,黄良珂,等. 基于多模GNSS-MR海平面测高研究[J]. 地球物理学进展,2018,33(5):1 767-1 772

[15] 叶险峰. 基于GNSS信噪比数据的测站环境误差处理方法及其应用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2016

[16] 张京江,张双成,郭立峰. 利用地基GPS反演积雪深度[J]. 气象科技,2020,48(1):46-51