

文章编号: 1674-9057(2018)03-0507-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2018.03.020

基于 BDS-MR 的海平面测高技术

陈发德¹, 刘立龙^{1,2}, 黎峻宇¹, 黄良珂¹

(1. 桂林理工大学 a. 广西空间信息与测绘重点实验室; b. 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004;
2. 钦州学院, 广西 钦州 535011)

摘要: 利用 MAYG 站 BDS 和 GPS 的 L1 载波高度角小于 20° 的 SNR 数据对海平面高度进行反演, 并与验潮站实测海平面高度作对比分析, 得到在 2016 年年积日第 196 天的 BDS 反演结果与验潮站实测海平面高度的 MAE 优于 8 cm; BDS 在 2016 年第 191~196 天的反演结果的 RMSE 为 0.357; BDS、GPS 联合反演结果与验潮站实测海平面高度 RMSE 达到 0.286, 相关系数优于 0.856, BDS 能较好实现实时、连续监测海平面高度的变化, BDS 与 GPS 联合监测海平面高度提升了监测分辨率和精度, BDS-MR 进一步拓展了 GNSS 在海洋遥感领域监测的能力。

关键词: BDS; GPS; 海平面高度; SNR; 精度

中图分类号: P229.2

文献标志码: A

0 引言

平均海平面上升对人类存在着潜在的威胁, 监测和了解海平面高度对人类社会建设具有重要意义。目前海平面高度主要利用验潮站、浮标测高以及雷达卫星测高等手段来获取。验潮站虽有很高的测高精度, 但其主要分布在陆海边缘且集中在北半球, 空间分布十分有限。浮标测高是利用 GPS 的高精度定位技术提供浮标的高程, 但浮标分布范围有限, 不适合大范围海域的研究。雷达测高卫星具有较高的测量精度、良好的覆盖能力和绝对高度测量等优点, 弥补了传统验潮站在远海区域的缺陷, 在研究大尺度的全球海面变化特征方面具有独特优势, 但其对陆地边缘海面的监测精度较低^[1-3]。随着 GNSS 技术的不断发展与应用的深入推广, GNSS-R(global navigation satellite system reflectometry)遥感技术除了应用在海平面高度、海面风场、浪高和海面盐度方面, 还被广泛地应用于多个领域。GNSS-R 有很高的时间时空分辨率对实

时监测海平面高度具有重要意义, 但是由于其必须使用特殊的左极化和右极化两个 GNSS 接收机天线接收的数据才能进行有效处理, 在硬件上极大地限制了 GNSS-R 技术的开展与应用^[4]。基于此, GNSS-MR(global navigation satellite system multipath reflectometry)遥感技术利用常规 GNSS 接收机记录的信噪比或载波相位观测便可对降雪、土壤水分、植被生长、海平面高度变化等环境参数进行监测, 从而使得该技术成为 GNSS 遥感领域的最新研究热点。目前利用 GNSS-MR 技术进行地表环境监测在国内外已有一定的研究基础。文献[5-6]利用实测数据以及 PBO 测站观测数据对海平面高度进行反演, 结果表明 GPS 反演结果与验潮站数据有较强正相关性; 文献[7]对文献[5]的监测方法进行了改进, 使反演精度进一步得到提高; 文献[8]针对 GPS-MR 技术使用观测值不足的问题, 提出了一种基于 GPS 无几何距离的 L4 观测值进行雪深探测算法, 并得到了与基于 SNR 探测结果较一致; 文献[9]在国内首次开展了基于测量

收稿日期: 2017-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41664002)

作者简介: 陈发德(1992—), 男, 硕士, 研究方向: GNSS 技术及应用, fadechen666@163.com。

通讯作者: 刘立龙, 博士, 教授, hn_liulilong@163.com。

引文格式: 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.

型接收机的 GPS-MR 技术进行雪深研究, 结果表明基于信噪比观测值的 GPS-MR 技术可用于雪深探测, 与实测雪深数据相比其探测精度约为 10 cm 左右。GNSS-MR 处于初步研究阶段, 存在诸多关键问题亟待解决, 以实现 GNSS-MR 全天候监测全球地表环境参数变化。

目前对海平面高度进行反演的大多数是利用 GPS 的 SNR, 鲜有使用其他系统监测。随着中国北斗导航卫星系统(BDS)的建成和快速发展^[9-10], 它成为了监测全球海平面变化的新导航卫星系统。本文详细探讨了 GNSS-MR 反演海平面高度原理, 利用 MAYG 站 BDS 和 GPS 的 L1 载波高度角小于 20° 的 SNR 数据对海平面高度进行反演, 并与验潮站实测海平面高度进行验证分析。本文研究内容为 BDS-MR 监测海平面高度变化提供了一定的参考价值, 具有很强的实际意义和应用价值。

1 BDS 简介

北斗卫星导航系统(BDS)为我国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统, 是除美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 之后第三个成熟、稳定的卫星导航系统, 且将致力于为全球用户提供稳定、可靠、优质的区域定位、导航和定时(PNT)卫星导航服务。目前超过 19 颗 BDS 卫星正在运行, 包括对地静止地区轨道(GEO)卫星, 倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和中地球轨道(MEO)卫星。据悉, 2015 年开始我国发射了全球覆盖性卫星, 力争 2020 年建成卫星全球覆盖星座。北斗卫星全球覆盖星座不仅能提供全球性、全天时、全天候的高精度导航定位, 且将采用北斗卫星自主导航^[9-10]。自主导航实时地监测导航电文的完好性优点增强了卫星导航系统的生存能力, 这对实现 BDS-MR 全天候监测全球海平面变化具有很强的实际意义与价值。

2 GNSS-MR 反演海平面高度原理

GNSS 多路径效应是制约 GNSS 高精度定位的主要误差源, 多路径效应是由直射信号与反射信号的相位不同引起的, 其相位的变化随卫星位置变化而在变化, 而形成干涉图样, 该干涉图样会以振幅的形式记录在信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)中, 用分贝数(dB)表示, 通常用于评估 GNSS 观测

信号质量和噪声特性。图 1 为 GNSS-MR 反演海平面高度原理图, 其中, h 为天线相位中心到瞬时海平面的距离, θ 为直射信号与瞬时海平面的夹角。

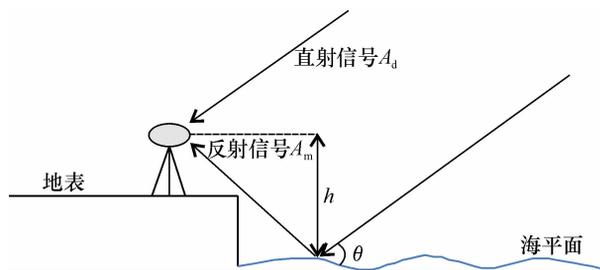


图 1 GNSS-MR 监测海平面高度变化

Fig. 1 Diagram of GNSS-MR for monitoring sea level variation

研究表明, SNR 值变化主要与卫星信号发射功率、天线增益、卫星到接收机的距离和多路径效应等因素相关。在高度角较高的情况下, 天线增益增大使 SNR 值变高; 在高度角较低的情况下, 由于天线增益减小和多路径效应使 SNR 值骤减。由此可知, 低高度角下的 SNR 受多路径影响严重(图 2), 故可用 SNR 值来评估多路径影响程度及其误差建模。反之, 多路径效应会直接影响 SNR 的变化, 通过 SNR 的频谱分析可获得引起多路径反射的地表环境参数, 即基于 SNR 的 GNSS-MR 反演地表环境参数技术。

对于一般的测量接收机, 为了有效接收直射信号而抑制多路径反射信号, 直射信号 A_d 与多路径反射信号 A_r 的振幅存在以下关系:

$$A_d \gg A_r, \quad (1)$$

式中, A_d 与 A_r 的振幅合成于信号 A_c 中。

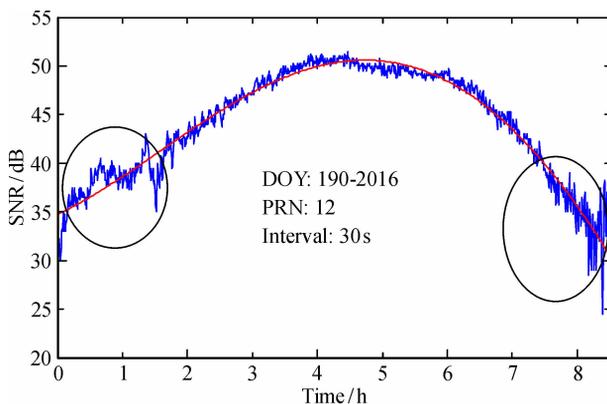


图 2 BDS 卫星的 SNR 变化

Fig. 2 SNR variations of BDS from 0000 UTC to 0800 UTC

$$A_c^2 = SNR^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \psi, \quad (2)$$

式中： A_c 为合成信号的振幅； $\cos \psi$ 为直射信号与反射信号夹角的余弦值。结合图2、式(1)和式(2)可得：直射信号决定着合成信号的总体变化趋势，即 SNR 观测值的整体趋势项（图2）。通常可采用低阶多项式来消除趋势项 A_d 。SNR 整体趋势项呈抛物线形式，可采用二次多项式进行拟合；SNR 两端（卫星升起和降落）出现较大波动的原因主要是低角度下受多路径影响。将整体趋势项消除后可得到低角度下受多路径影响所形成的 SNR 残差序列。

图3为 BDS 的 PRN12 号卫星在消除趋势项后的 SNR 残差序列，其截止卫星高度角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。其残差序列可为反演地表参加提供重要的参数输入。

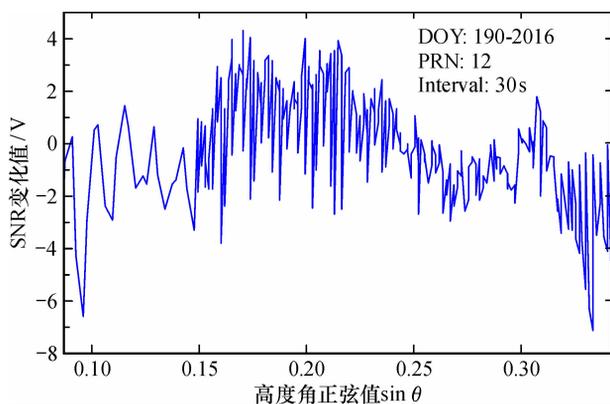


图3 去除趋势项的 SNR 残差序列
Fig. 3 SNR variations with removal detrend

受低角度多路径所致的 SNR 残差序列可表示为

$$A_r = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin \theta + \varphi\right), \quad (3)$$

式中： h 为接收机天线相位中心到地面反射点的垂直距离； λ 为载波波长； θ 为卫星高度角， t 和 f 可分别记为 $t = \sin \theta$ ， $f = 2h/\lambda$ ，则上式可记为

$$A_r = A \cos(2\pi f t + \varphi), \quad (4)$$

其中：待估参数 h 包含于 f 中，高度角 θ 是随时间变化的已知量。图3中横轴 $\sin \theta$ 是随高度角变化的已知量，但其是非等间隔采样，致使观测序列无法整周期阶段截断，因快速傅里叶变换 FFT 无法解决非等间隔采样问题，可使用 L - S (Lomb-Scargle) 谱分析方法^[14]进行处理。

通过对图3的 SNR 残差序列进行 L - S 谱分析

可得到式(4)中的频率 f ，由 $f = 2h/\lambda$ 可算得海平面到天线相位中心距离 h ，再将 h 转换为与验潮站相同基准下的海面高度，从而实现基于 GNSS - MR 监测海平面高度的变化。其反演过程如图4所示。

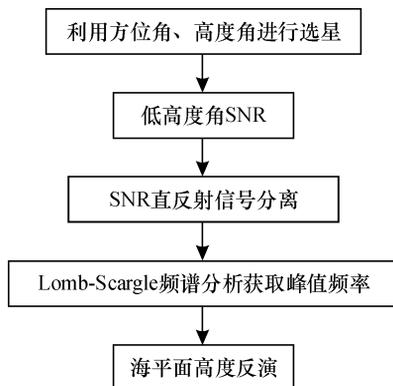


图4 GNSS - MR 监测海平面高度流程图
Fig. 4 Flow chart of monitoring sea level variation based on GNSS - MR

3 基于 BDS - MR 反演海平面高度算例分析

为了验证上述 GNSS - MR 技术反演海平面高度变化理论的有效性，利用位于 Mayotte 的 MAYG 站（纬度 -12.78° ，经度 45.26° ，高程 -16.35 m）的观测数据进行实验分析。MAYG 站的观测和导航数据可以在 IGS 官网下载，并利用其进行海平面反演。MAYG 站安装了 TRIMBLE NETR9 接收机和 TRM59800.00 天线，数据采样率为 1 Hz。由于 MAYG 站是多系统 GNSS 实验 (the Multi-GNSS Experiment, MGEX) 站之一，它可接收包括 GPS、GLONASS 以及 BDS 在内的 GNSS 观测和导航数据。为了验证 BDS - MR 反演海平面高度变化的精度，利用距离 MAYG 站约 10 m 远的 Dzaoudzi 验潮站实测数据和 BDS - MR 反演结果进行对比分析。根据接收机周围环境以及观测卫星的天空视图，对数据进行选择，使挑选出的反射信号全部为来自海平面的反射，其中提取的高度角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 、方位角为 $20^\circ \sim 80^\circ$ 和 $110^\circ \sim 170^\circ$ 。

利用 MAYG 站 2016 年年积日为第 190 ~ 196 天的 BDS、GPS 的 L1 载波上的 SNR 数据，通过 L - S 谱分析获取天线相位中心到海平面的垂直距离，最后归算成与验潮站相同基准下的海平面高

度。图5为年积日第191、193天的PRN09号BDS卫星SNR残差序列的L-S谱分析结果图。L-S频谱振幅的峰值对应的频率可由 $f = 2h/\lambda$ 来计算获取天线相位中心至海平面的距离。

通过分析MAYG站第196天的SNR数据获取的海平面高度变化,与Dzaoudzi验潮站获取的1 min分辨率的实测海面高度进行对比分析,对比结果见图6、表1、表2。两者的MAE分别为0.077、0.123 m;RMSE分别为0.093、0.068 m;相关系数R分别为0.96、0.96。由此可知,BDS-MR结果与验潮站实测海平面高度的MAE优于8 cm。由图7可知,BDS、GPS能监测海平面高度变化的有效卫星较少,其主要原因是接收机所接收到的经海面反射得到的卫星信号较少。为进一步分析BDS-MR监测海平面高度变化的有效性和连续性,利用第190~196天数据进行实验分析。

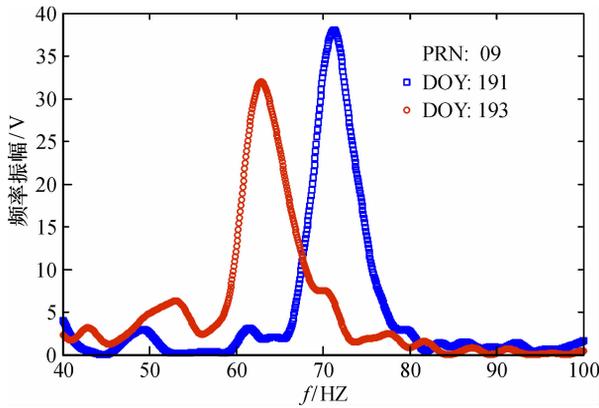


图5 L-S频谱分析

Fig. 5 L-S spectrum analysis results

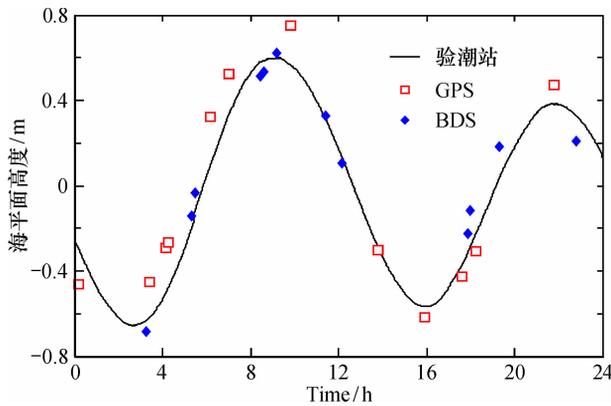


图6 年积日第196天BDS-MR、GPS-MR反演与验潮站实测海平面高度变化对比

Fig. 6 Sea level comparison of BDS-MR, GPS-MR inversion and tide gauge data results from 0000 UTC to 2400 UTC on DOY of 196

表1 BDS-MR反演海平面高度与实测海平面高度对比
Table 1 Sea level comparison of BDS-MR inversion results and tide gauge monitoring data

UTC	反演/m	真值/m	Bias/m
3.258	-0.681	-0.598	-0.083
9.192	0.624	0.596	0.027
8.625	0.534	0.593	-0.059
8.450	0.511	0.590	-0.079
5.325	-0.140	-0.098	-0.042
5.475	-0.032	0.006	-0.038
11.408	0.326	0.344	-0.017
12.142	0.104	0.183	-0.078
17.967	-0.114	-0.224	0.110
19.300	0.182	-0.034	0.216
17.883	-0.224	-0.283	0.058
22.833	0.208	0.327	-0.119
MAE			0.077
RMSE			0.093

表2 GPS-MR反演海平面高度与实测海平面高度对比
Table 2 Sea level comparison of GPS-MR inversion results and tide gauge monitoring data

UTC	反演/m	真值/m	Bias/m
4.175	-0.293	-0.499	0.206
4.258	-0.265	-0.426	0.161
6.175	0.323	0.011	0.312
0.175	-0.461	-0.383	-0.077 8
7.008	0.521	0.306	0.215
3.433	-0.452	-0.537	0.085
9.825	0.750	0.557	0.193 2
13.783	-0.303	-0.325	0.021
18.241	-0.307	-0.283	-0.0240
15.941	-0.616 8	-0.565	-0.051
17.633	-0.426	-0.386	-0.040
21.783	0.471 9	0.384	0.087
MAE			0.123
RMSE			0.068

基于BDS-MR和GPS-MR反演的海平面高度与验潮站实测数据在整体趋势有明显的一致性,证实BDS监测海平面高度的可行性。为进一步分析对比BDS与GPS反演的精度,结果见表3。

图8中黑色实线表示反演海平面验潮站实测海平面高度一致,BDS与GPS反演的结果比较集中分布在黑色实线附近,BDS反演海平面高度精度

表3 BDS-MR、GPS-MR反演精度

	MAE	RMSE	R
BDS	0.201	0.357	0.777
GPS	0.184	0.226	0.912
BDS/GPS	0.191	0.286	0.856

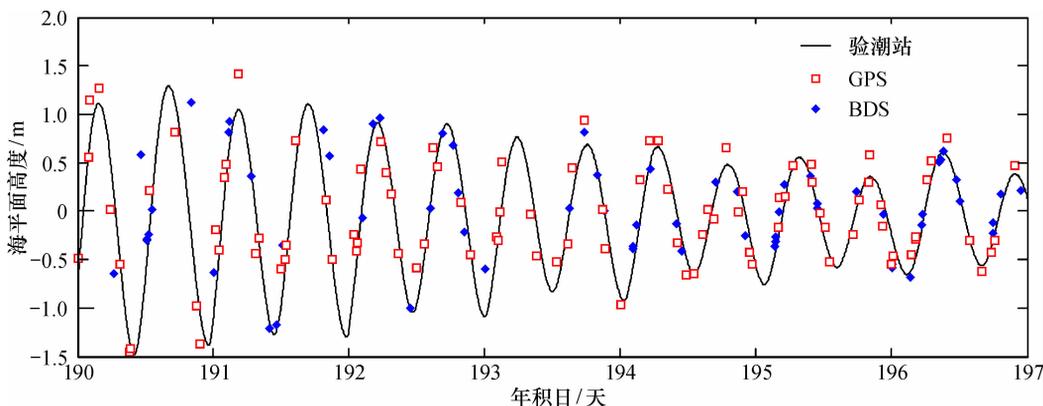


图7 年积日第190-197天 BDS-MR、GPS-MR 反演与验潮站实测海平面高度变化对比

Fig. 7 Sea level comparison of BDS-MR, GPS-MR inversion and tide gauge data results from DOY 190 to 197

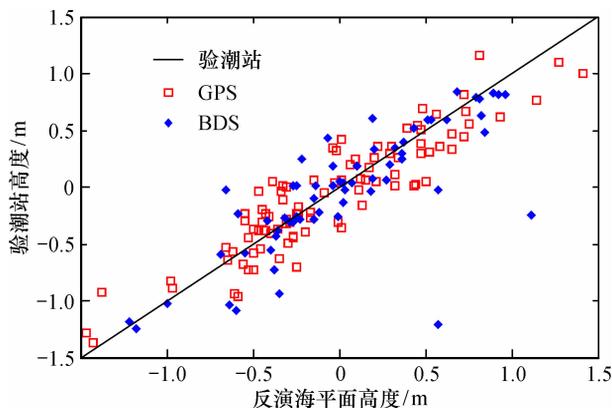


图8 反演海平面与实测海平面相关性分析

Fig. 8 Sea level correlation analysis between inversion models and tide gauge monitoring results

与 GPS 反演海平面高度精度相当。由表 3 结果可算得, BDS 反演结果的 MAE 、 $RMSE$ 分别为 0.201、0.357; BDS、GPS 联合反演结果(对 BDS、GPS 各自反演结果进行等权处理)与验潮站实测海平面高度相关系数 R 达到 0.856。由此可得, BDS 能较好实现实时、连续监测海平面高度的变化; BDS-MR 反演海平面高度与 GPS-MR 反演精度相当; BDS 与 GPS 联合监测海平面高度提升了监测分辨率和精度。

4 结论

基于 BDS-MR 海平面测高技术的理论, 本文利用 MAYG 站 BDS 和 GPS 的 L1 载波高度角小于 20° 的 SNR 数据对海平面高度进行反演, 并与验潮站实测海平面高度作对比分析, 得到 2016 年年积日第 196 天的 BDS 反演结果与验潮站实测海平面高度的 MAE 优于 8 cm; BDS 在 2016 年年积日第

191~196 天的反演结果的 $RMSE$ 为 0.357; BDS、GPS 联合反演结果与验潮站实测海平面高度 $RMSE$ 达到 0.286, 相关系数优于 0.856, BDS 能较好实现实时、连续监测海平面高度的变化, BDS 与 GPS 联合监测海平面高度提升了监测分辨率和精度。BDS 与 GPS 联合监测海平面高度提升了监测分辨率和精度, BDS-MR 进一步拓展了 GNSS 在海洋遥感领域监测的能力。

国际 GNSS 服务组织 (IGS) 提供了 GNSS 观测数据, Intergovernmental Oceanographic Commission 提供了验潮仪观测数据, 在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 文汉江, 李洪超, 蔡艳辉, 等. 联合 Argo 浮标、卫星测高和 GRACE 数据研究海平面变化 [J]. 测绘学报, 2012, 41 (5): 696-702.
- [2] 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.
- [3] 吴富梅, 魏子卿, 李迎春. 大港验潮站潮汐分析与国家高程基准面变化 [J]. 测绘学报, 2015, 44 (7): 709-716.
- [4] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32 (11): 955-960.
- [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: 1031-1310.
- [6] 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.
- [7] Löfgren J S, Haas R, Schemneck H-G. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS site

- in different parts of the world [J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 80: 66 – 80.
- [8] Ozeki M, Heki K. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86 (3): 209 – 219.
- [9] 张双成,戴凯阳,刘凯,等. GPS – MR 技术用于降雪厚度监测研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4):1879 – 1884.
- [10] 杨元喜,李金龙,徐君毅,等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献 [J]. *科学通报*, 2011, 56 (21): 1734 – 1740.
- [11] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战 [J]. *测绘学报*, 2010, 39 (1): 1 – 6.
- [12] Jin S G, Jin R, Li D. Assessment of BeiDou differential code bias variations from multi-GNSS network observations [J]. *Annales Geophysicae*, 2016, 34 (2): 259 – 269.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 徐斌,杨涛,谭保华,等. 基于 Lomb-Scargle 算法的周期信号探测的模拟研究 [J]. *核电子学与探测技术*, 2011, 31 (6): 702 – 705.

Sea level change monitoring based on SNR of BDS

CHENG Fa-de¹, LIU Li-long^{1,2}, LI Jun-yu¹, HUANG Liang-ke¹

(1. a. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics; b. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Qinzhou University, Qinzhou 535000, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of the onshore the BDS and GPS SNR data which caused by multipath, the inversion principle of GNSS – R technology based on the BDS and GPS SNR data of the MAYG station to detect sea level variation is given in this paper. The retrieval result is consistent with the tide gauge with about several meters far from the MAYG station. The bias of BDS inversion result is better than 8 cm on the 196 day of 2016, and the RMSE is 0.357. The correlation coefficient of BDS, GPS combined inversion result is better than 0.85, and the RMSE reach 0.286. BDS can be real – time and continuously used to monitor the sea level variation. When BDS and GPS jointly monitor the sea level variation, it can enhance the monitoring resolution and accuracy can be improved. What's more, the BDS – MR can be used to extend GNSS ability in monitoring marine remote sensing field.

Key words: BDS; GPS; sea level; SNR; accuracy