



引文格式:邓垦,周佩元,杜兰,等.多系统单频紧组合GNSS-R测高方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(1):146-155.
DOI:10.13203/j.whugis20220785
Citation:DENG Ken,ZHOU Peiyuan,DU Lan,et al.GNSS-R Altimetry Method with Multi-system Single-Frequency Tight Integration[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(1):146-155.DOI:10.13203/j.whugis20220785

多系统单频紧组合GNSS-R测高方法

邓垦^{1,2} 周佩元^{1,3} 杜兰¹ 蔡巍^{1,4}

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 77120部队,四川 成都,610000

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

4 西安测绘总站,陕西 西安,710054

摘要:全球卫星导航系统反射测量(global navigation satellite system-reflectometry,GNSS-R)技术可以同时接收导航卫星直射信号和来自水面的反射信号,进而利用伪距、载波相位和信噪比信息实现高时空分辨率的水面高度反演。由于岸基设备特别是单频设备在部分受限环境中观测量不足,导致基于载波相位处理的GNSS-R实时测高性能降低,因此提出了一种利用GNSS重叠频率B1C/L1/E1信号的紧组合模型以提升单频GNSS-R的测高性能。首先,从天线极化方式的角度对差分系统间偏差(differential inter-system bias,DISB)进行评估和分析。结果表明,对于左圆极化天线和右圆极化天线组成的短基线,在使用同型号接收机时可以忽略DISB的影响。然后,基于实测北斗三号卫星导航系统/全球定位系统(global positioning system,GPS)/伽利略(Galileo)系统数据评估了多系统紧组合模型下的GNSS-R测高性能。实验结果表明,相比于松组合模型,多系统紧组合模型能够显著减少安装环境对设备的限制,特别是在单系统反射信号观测量不足4个的条件下,紧组合模型GNSS-R水面高度反演在保证厘米级精度的条件下成功率仍高达约94%,从而有效提升恶劣观测条件下GNSS-R测高性能。

关键词:GNSS反射测量;差分系统间偏差;反射信号;多系统紧组合

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-12-21

DOI:10.13203/j.whugis20220785

文章编号:1671-8860(2024)01-0146-10

GNSS-R Altimetry Method with Multi-system Single-Frequency Tight Integration

DENG Ken^{1,2} ZHOU Peiyuan^{1,3} DU Lan¹ CAI Wei^{1,4}

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Troops 77120, Chengdu 610000, China

3 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China

4 Xi'an Mapping Terminus, Xi'an 710054, China

Abstract: Objectives: Global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R) technology can receive direct navigation satellite signals and reflected signals from the water surface at the same time. The code, carrier-phase and signal-to-noise ratio information are used to retrieve water surface height. Due to the observations of shore-based devices, especially single-frequency devices, are insufficient in the partially confined environment, the performance of GNSS-R technology based on carrier-phase processing is degraded. Therefore, we propose a tight integration model of overlapping frequency B1C/L1/E1 signals in global navigation satellite system to improve the performance of GNSS-R. **Methods:** Differential inter-system bias (DISB) is evaluated from the point of view of the antenna polarization mode, and the altimetry performance

基金项目:中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2023-3-5);国家自然科学基金(42204041)。

第一作者:邓垦,硕士生,研究方向为全球导航卫星系统遥感。dengken531@qq.com

通讯作者:杜兰,博士,教授。dulan2015@qq.com

of GNSS-R based on tight integration model is assessed. **Results:** The results show that: (1) There is no obvious relationship between the polarization mode of the antenna and DISB, and GNSS-R using the homogeneous receivers can ignore the effect of DISB. (2) Both the loose and tight integration model can achieve the fixed rate of 99.75% and the standard deviation is less than 1 cm in the good satellite visual environment. When the number of visible satellites in a single navigation satellite system is less than 4, the tight integration model can still achieve the fixed rate of 94%, and the standard deviation is less than 1 cm. **Conclusions:** The tight integration model can significantly reduce the limitations of the installation environment on GNSS-R device.

Key words: GNSS-reflectometry; differential inter-system bias; reflected signals; multi-system tight integration

随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)应用的不断深化和扩展,利用 GNSS 反射测量(GNSS-reflectometry, GNSS-R)技术进行地表遥感活动已成为近年来 GNSS 应用领域的研究热点之一。GNSS-R 技术由于其全天候、全天时、多信号源、宽覆盖等优势^[1],目前已广泛应用于海面高度和波高^[2-6]、海面风场^[7]、积雪^[8-9]和土壤植被^[10-13]等相关地表参数的遥感探测。其中,海面高度遥感最早于 1993 年提出^[14],和验潮站相比,GNSS-R 测高技术具有小型化、低成本和高时空分辨率的特点,可以直接获取全球坐标参考框架下的高精度海面高度信息,不仅在海面高度测量和监测方面具有重要应用价值,还是海洋大地测量基准、海洋测绘、海洋重力场反演等新兴领域的研究热点^[15]。

GNSS-R 水面测高技术主要通过测量 GNSS 直射信号和水面镜面反射信号之间的时间延迟,根据天线、卫星和水面的空间几何关系反演天线至水面的高度。一般使用特制接收机或传统大地测量型接收机接收 GNSS 信号^[1],前者主要通过波形相关处理获取时间延迟,数据处理复杂且设备价格相对昂贵。后者通常配置一个右圆极化天线和一个左圆极化天线分别接收 GNSS 直射信号和反射信号,将大地测量型接收机所记录的两路伪距和载波相位信息作为原始观测量,通过固定载波相位整周模糊度解算直射反射信号间的时间延迟。GNSS-R 的整周模糊度解算可类比 GNSS 定位的相关算法,因此数据处理算法相对简单,且设备成本低。

反射信号的数量和质量受到环境和设备等多种因素影响,其载波相位整周模糊度解算相对困难。针对使用大地测量型接收机的岸基 GNSS-R 水面测高技术的整周模糊度解算,已经有了很多研究成果,测高的实时性、可靠性不断提升^[16-20]。文献[16]提出了 GNSS 潮汐计的概

念,利用全球定位系统(global positioning system, GPS)单差相位观测量解算出 20 min 一组的海面高度、钟差、相位模糊度参数,测高精度约 3.5 cm;文献[17]利用外接原子钟方法消去钟差参数,实现了 1 s 时间分辨率高精度测高;文献[18]提出了逐历元双差算法,消除了电离层、对流层的影响,基于 GPS L1、L2 信号载波相位实现了 1 s 时间分辨率的高精度测高;针对粗糙水面反射信号连续性差的问题,文献[19]使用了宽巷组合观测量进一步提升了整周模糊度的解算性能;文献[20]提出了一种依赖 GNSS 振幅和相位观测的连续相位跟踪算法,可有效提升粗糙海面相干相位的连续性。以上研究主要基于单系统,反射信号观测数量受限,因此设备安装地点需要选取卫星可视性良好的环境,这一点对于低成本单频设备尤为重要。

随着多 GNSS 系统在兼容互操作方面的建设和发展,各大卫星导航系统增加了多个重叠频率信号,有效提升了可观测卫星数量。构建多系统紧组合的 GNSS-R 测高模型将极大提升反射信号的可用性,增加冗余观测量,减少 GNSS-R 对环境的要求。因此,本文基于北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system with global coverage, BDS-3)/GPS/伽利略(Galileo)系统重叠频率信号 B1C/L1/E1 开展湖面测高实验。首先分析了多系统左圆极化天线数据中的差分系统间偏差(differential inter-system bias, DISB)的特性,对比了左、右圆极化天线数据之间 DISB 的差异;然后评估了松、紧组合 GNSS-R 模型在 3 种不同卫星可视环境下的水面测高性能。

1 多系统紧组合 GNSS-R 测高方法

1.1 GNSS-R 空间几何模型

图 1 为 GNSS-R 技术的空间几何原理图,其

设备主要由两个标准的大地测量型接收机(一个左圆极化天线和一个右圆极化天线)组成。两个天线垂直安装以确保天线相位中心位于同一铅锤线上(或其他已知几何关系),右圆极化天线用于接收GNSS直射信号,左圆极化天线用于接收GNSS反射信号。两个天线分别与一个接收机连接以独立记录直射信号和反射信号的伪距和载波相位观测量。

根据镜面反射原理,反射信号经过水面反射后,相干分量被左圆极化天线所接收。因此,左圆极化天线可以看成其位于水面以下的镜像位置。左圆极化天线的镜像和右圆极化天线构成短基线,通过GNSS双差解算以精确获取基线的长度 b ,再根据空间几何关系计算出水面至左圆极化天线相位中心的高度 h :

$$h = \frac{b-d}{2} \quad (1)$$

式中, d 为右圆极化天线和左圆极化天线相位中心的距离,可在设备安装时精准设置。

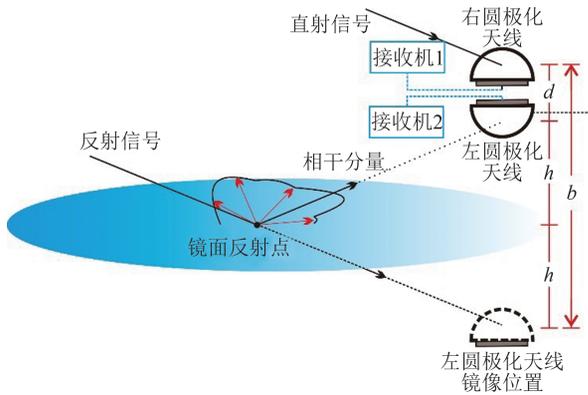


图1 GNSS-R技术空间几何原理图

Fig. 1 Geometry of GNSS-R Technology

1.2 DISB估计模型和紧组合模型

以BDS和GPS双系统为例,假设在重叠频率上GNSS-R的右圆极化天线 r 和左圆极化天线 l 同时观测到 m_B 颗BDS卫星和 n_G 颗GPS卫星。对于地基GNSS-R左右圆极化天线间的短基线,组成双差观测方程时,卫星端、接收机端钟差和电离层延迟、对流层延迟等误差可以忽略。当分别选择BDS卫星1和GPS卫星1作为参考星时,可以得到传统的双差松组合模型:

$$\begin{cases} \lambda\varphi_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + \lambda N_{rl}^{1_B 1_B} + \epsilon_{rl}^{1_B 1_B} \\ \lambda\varphi_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + \lambda N_{rl}^{1_G 1_G} + \epsilon_{rl}^{1_G 1_G} \\ P_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + e_{rl}^{1_B 1_B} \\ P_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + e_{rl}^{1_G 1_G} \end{cases} \quad (2)$$

式中, λ 为重叠频率的载波波长; φ 是以周为单位

的载波相位观测量; P 是以米为单位的伪距观测量; ρ 为卫星和接收机之间的几何距离; N 为双差整周模糊度; ϵ 和 e 分别为相位和伪距噪声; $j=2,3,\dots,m_B$; $i=2,3,\dots,n_G$ 。

在松组合模型的基础上增加两颗参考卫星的双差观测方程,可以进一步得到用于估计DISB的DISB-float模型^[21]:

$$\begin{cases} \lambda\varphi_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + \lambda N_{rl}^{1_B 1_B} + \epsilon_{rl}^{1_B 1_B} \\ \lambda\varphi_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + \lambda N_{rl}^{1_G 1_G} + \epsilon_{rl}^{1_G 1_G} \\ P_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + e_{rl}^{1_B 1_B} \\ P_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + e_{rl}^{1_G 1_G} \\ \lambda\varphi_{rl}^{1_B 1_G} = \rho_{rl}^{1_B 1_G} + \lambda \tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G} + \epsilon_{rl}^{1_B 1_G} \\ P_{rl}^{1_B 1_G} = \rho_{rl}^{1_B 1_G} + d_{rl}^{BG} + e_{rl}^{1_B 1_G} \end{cases} \quad (3)$$

式中, d_{rl}^{BG} 为伪距DISB; $\tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G} = N_{rl}^{1_B 1_G} + b_{rl}^{BG}$ 表示融合参数, $N_{rl}^{1_B 1_G}$ 为双差整周模糊度, b_{rl}^{BG} 为载波相位DISB。由整周模糊度的特性可知, $N_{rl}^{1_B 1_G}$ 为整数,因此 $\tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G}$ 的小数部分与 b_{rl}^{BG} 的小数部分一致。

当整周模糊度正确固定时,通过式(3)能够精确地估计BDS/GPS重叠频率的 $\tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G}$ 和 d_{rl}^{BG} 。首先将天线的真实坐标代入以消去未知参数 ρ ,使用最小二乘算法对浮点模糊度进行求解;然后使用最小二乘模糊度降相关平差(least-square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)方法固定模糊度;最后使用固定后的模糊度求解 $\tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G}$ 和 d_{rl}^{BG} 的固定解。

已有研究表明,同频率间的相位和伪距DISB具有时域上的稳定性^[5,22],当接收机和天线型号不变时,即使实验地点发生改变,由式(3)计算得到的 $\tilde{N}_{rl}^{1_B 1_G}$ 的小数部分和 d_{rl}^{BG} 仍可以视为已知常数代入,则有双差观测方程的紧组合模型^[21]:

$$\begin{cases} \lambda\varphi_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + \lambda N_{rl}^{1_B 1_B} + \epsilon_{rl}^{1_B 1_B} \\ \lambda\varphi_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + \lambda N_{rl}^{1_G 1_G} + \epsilon_{rl}^{1_G 1_G} \\ P_{rl}^{1_B 1_B} = \rho_{rl}^{1_B 1_B} + e_{rl}^{1_B 1_B} \\ P_{rl}^{1_G 1_G} = \rho_{rl}^{1_G 1_G} + e_{rl}^{1_G 1_G} \\ \lambda\varphi_{rl}^{1_B 1_G} - \lambda \hat{N}_{rl, decimal}^{1_B 1_G} = \rho_{rl}^{1_B 1_G} + \lambda \hat{N}_{rl, integer}^{1_B 1_G} + \epsilon_{rl}^{1_B 1_G} \\ P_{rl}^{1_B 1_G} - \hat{d}_{rl}^{BG} = \rho_{rl}^{1_B 1_G} + e_{rl}^{1_B 1_G} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\lambda \hat{N}_{rl, decimal}^{1_B 1_G}$ 为融合参数估值的小数部分,即相位DISB的小数部分; $\lambda \hat{N}_{rl, integer}^{1_B 1_G}$ 为融合参数估值的整数部分; \hat{d}_{rl}^{BG} 为伪距DISB估值。

对比式(2)和式(4)可以看出,相较于传统的松组合模型,紧组合模型可以增加冗余观测数,理论上可以提升GNSS-R的测高性能,若单系统

可观卫星数不足 4 颗时,优势更加明显。若存在多 GNSS 系统的信号,例如 B1C/L1/E1 信号,除了在式(4)的基础上增加 E1 信号的伪距和载波相位双差观测方程外,仅需要增加 BDS 和 Galileo 系统两颗参考卫星间消去 DISB 的双差观测方程。

对于短基线而言,未知参数 ρ 可以进一步分解为基线 b 在东北天坐标系中的 3 个分量^[23]。因此,通过式(4)可以估计出基线的长度 b ,再结合式(1)可算出水面高度。

2 左/右旋圆极化信号间 DISB 特性分析

相位和伪距 DISB 的正确评估是采用紧组合模型的前提,本节对其进行实验分析。

2.1 实验配置及数据来源

实验选在郑州某高校的平坦无遮挡的篮球场。为了评估极化天线和接收机类型对 DISB 估值的影响,采集设备同时配置了两类接收机,即两个 Septentrio Mosaic-X5 接收机和两个司南 K803 接收机,分别与左圆极化天线(朝向下)和右圆极化天线(朝向上)相连接,实验配置如图 2 所示。为了尽可能减少左圆极化信号受到的多路径影响,两天线的相位中心距离为 0.211 m,同时将天线设置在贴近地面的位置,使信号的镜面反射点压缩在天线附近,以减少反射区范围。

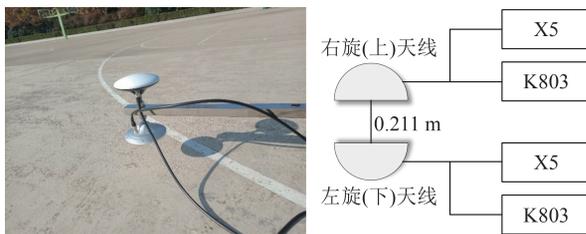


图 2 短基线配置

Fig. 2 Configuration of Short Baseline

实验共采集 5 h 数据,采集时间为 2022-11-15T03:00—08:00(GPS 时),采样间隔为 1 s,信号接收频率为 1 575.42 MHz,包括 B1C/L1/E1 信号。利用该时段的实测数据,针对两天线和两类接收机,分别配置设计了两组零基线和两组短基线,实验数据集和部分参数配置分别见表 1 和表 2。

2.2 实验与分析

首先对比不同类型接收机配置下的零基线

表 1 实验数据集

Tab. 1 Experimental Dataset

数据集	基线	接收机	天线类型	信号类型	收集时间
1	零基线 (上-上)	X5- K803	右-右圆 极化		
2	零基线 (下-下)	X5- K803	左-左圆 极化	B1C/ L1/E1	2022-11-15 T03:00—08:00 (GPS 时)
3	短基线 (上-下)	K803- X5	右-左圆 极化		
4	短基线 (上-下)	X5-X5	右-左圆 极化		

表 2 部分实验参数配置

Tab. 2 Part of the Experimental Parameter Configuration

参数	配置及策略
地面材质	水泥地
左圆极化天线距离地面高度/m	0.1
观测量信噪比要求/dB-Hz	≥ 30
截止高度角/(°)	15
采样间隔/s	1
观测值随机模型	高度角相关模型
卫星轨道	广播星历
模糊度求解方式	单历元估计浮点解,LAMB- DA 求解固定解
对流层、电离层	不考虑

情况,即数据集 1 和数据集 2。图 3 和图 4 分别给出右圆极化天线和左圆极化天线的 B1C-L1/B1C-E1 相位 DISB 小数部分(后文简称为相位 DISB)和伪距 DISB 估值时序。由图 3、4 可以看出,左、右圆极化天线解算出的相位和伪距 DISB 解算结果稳定且十分接近,其中相位 DISB 的均值相差小于 0.01 周,伪距 DISB 的均值相差小于 0.1 m,远小于噪声,表明天线极化方式相同的配置下,DISB 均值只与接收机有关。但是,左圆极化信号受到的噪声和多路径影响明显更大,其 DISB 标准差是右圆极化天线零基线解的 2~3 倍。

然后对比不同类型接收机配置下的短基线情况,即数据集 3。图 5 给出相应的 B1C-L1/B1C-E1 相位和伪距 DISB 估值时序。由图 5 可以看出,在右-左圆极化天线配置下,重叠频率 B1C-L1/B1C-E1 的相位和伪距 DISB 和单天线零基线配置下结果近似,相位 DISB 的均值相差约 0.01 周,伪距 DISB 的均值相差不到 0.1 m,小于噪声的影响。验证了在在天线极化方式不同的短基线配置下,DISB 均值只与接收机有关,但 DISB 标准差明显高于零基线配置,其相位和伪距 DISB

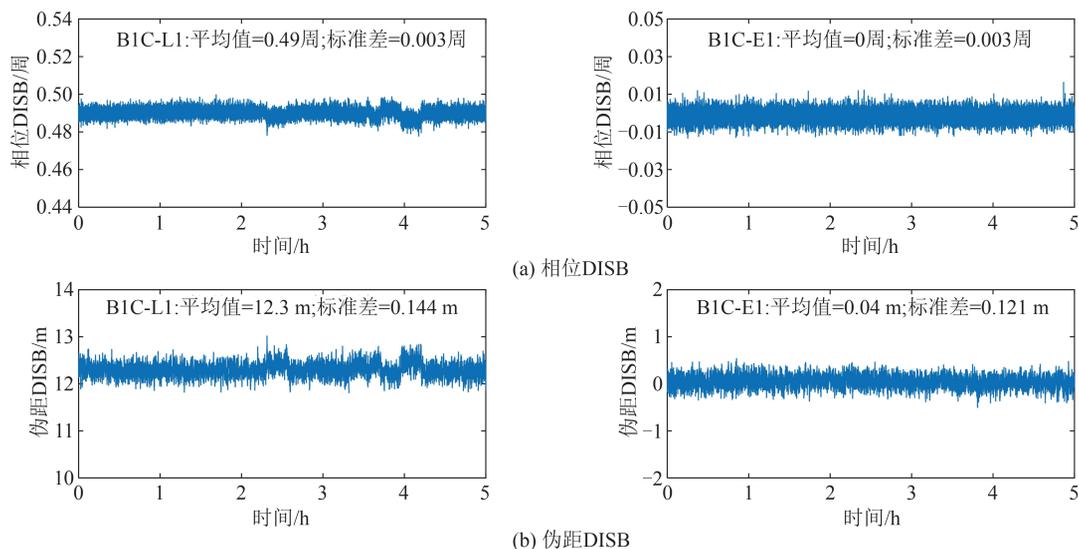


图3 不同接收机右圆极化零基线相位与伪距DISB

Fig. 3 Phase and Code DISB of Inhomogeneous Receivers in the Right-Hand Zero-Baseline

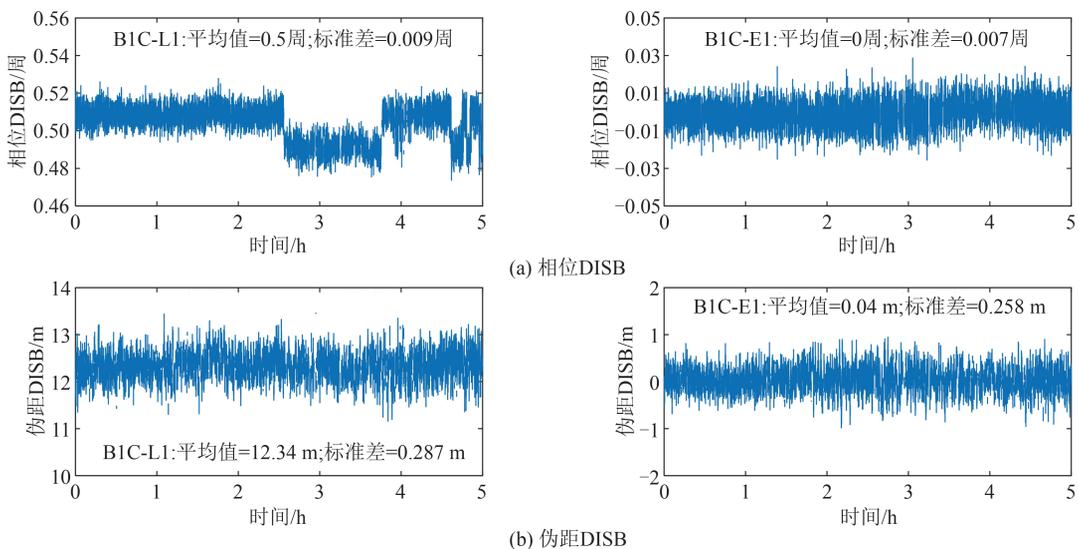


图4 不同接收机左圆极化零基线相位与伪距DISB

Fig. 4 Phase and Code DISB of Inhomogeneous Receivers in the Left-Hand Zero-Baseline

标准差分别约为右圆极化天线零基线解的10倍和3倍。

最后对比同类型接收机(X5)配置下的短基线情况,即数据集4。图6给出相应的B1C-L1/B1C-E1相位和伪距DISB估值时序。由图6可以看出,同型号接收机在右-左圆极化天线配置下,相位和伪距DISB近似为0。

综上,天线的极化方式和DISB间无明显关联,因此使用同型号接收机建立紧组合GNSS-R测高模型时,可以忽略DISB的影响,使用不同型号接收机建立紧组合GNSS-R测高模型时,可将提前估计的DISB代入式(4)。但由于反射信号受到多路径影响严重,DISB估值的标准差较大,易导致DISB估值不准,可使用坐标已知的右圆

极化天线零基线进行估计。

3 单频紧组合GNSS-R水面测高性能评估

3.1 数据来源和预处理

实验选在郑州某高校的湖边,观测环境和观测设备如图7所示。安装地点为湖面东北侧的木制廊桥上,沿湖有部分建筑物和树木对低高度角卫星的可视性有遮挡,特别是南侧的半圆形建筑。为此,在数据预处理中,设置卫星截止高度角为 15° ,并剔除方位角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的观测数据(东北方向为非水面),以及方位角 $160^\circ\sim 200^\circ$ 且高度角在 30° 以下的的数据(朝南方向有遮挡)。

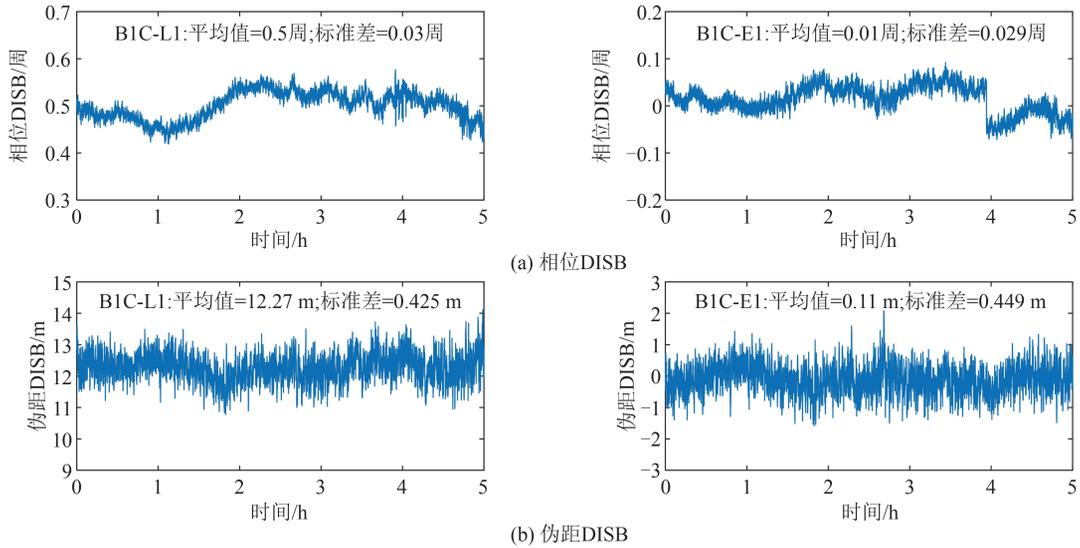


图 5 不同接收机右圆极化-左圆极化短基线相位与伪距 DISB

Fig. 5 Phase and Code DISB of Inhomogeneous Receivers in the Right-Left-Hand Short-Baseline

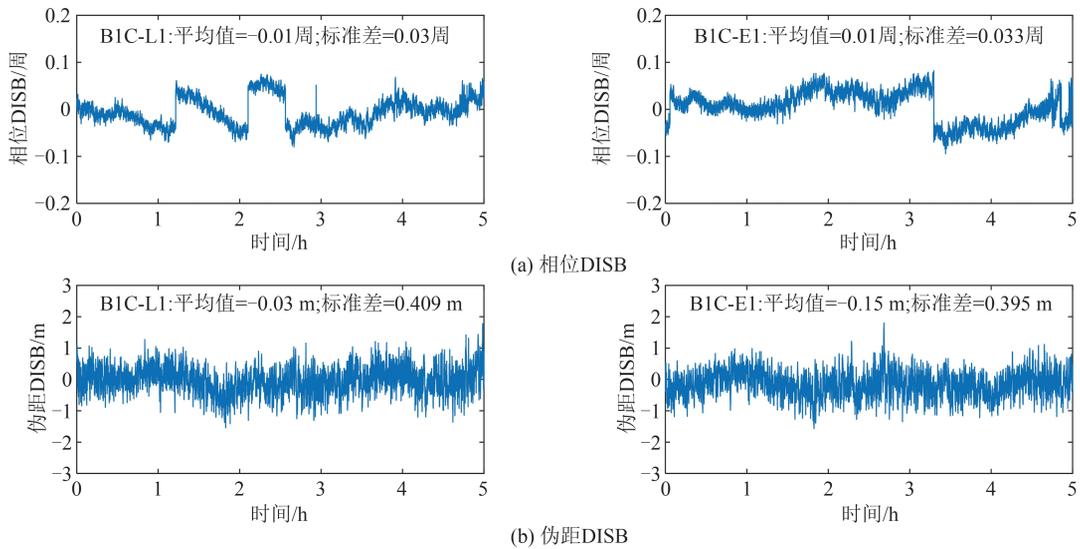


图 6 同型号接收机右圆极化-左圆极化短基线相位与伪距 DISB

Fig. 6 Phase and Code DISB of Homogeneous Receivers in the Right-Left-Hand Short-Baseline

采集设备与估计 DISB 的实验相同,但仅保留 Septentrio Mosaic-X5 接收机,因此 DISB 为 0。信号接收频率为 1 575.42 MHz,采集了 1 h 的 B1C/L1/E1 信号数据,采集时间为 2022-10-28 T03:30—04:30(GPS 时),采样率为 1 s。左、右圆极化天线的相位中心相距 0.211 m,将两天线

设置在升降平台上。由于实验湖泊的水位在数据采集期间无变化,利用升降平台改变天线的高度可简单模拟水位的变化(升降幅度为 0.2 m)。左圆极化天线相位中心最低时距离水面为 1.4 m,最高时为 1.6 m,由激光测距仪测定(精度 ± 1.5 mm)。



图 7 实验环境和设备

Fig. 7 Data Acquisition Environment and Devices

3.2 实验与分析

分别使用松组合模型和紧组合模型进行水面高度解算。首先利用卡尔曼滤波逐历元估计模糊度浮点解,然后采用LAMBDA方法进行模糊度固定,最后根据模糊度固定率和固定解的精度对松紧组合GNSS-R的性能进行评估。

通过禁用设备的方位角设置了3组实验配置,以模拟不同的卫星可视环境。第一组直接使用预处理后的数据;第二组剔除了方位角 $290^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的卫星数据;第三组剔除了方位角 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的卫星数据。图8为3组配置下的左圆极化天线

的可视卫星天空图和数量。由图8可以看出,在1 h的实验时段内,第一组中BDS/GPS/Galileo系统的可视卫星数除个别历元外均保持在4颗以上,总的可视卫星数平均值为14.9颗。第二组中BDS/GPS/Galileo系统的可视卫星数量在观测的后半时段有明显的下降,出现了不足4颗的现象,总可视卫星数平均值为10.2颗。第三组中BDS/GPS/Galileo系统的可视卫星数大部分时段不足4颗,总的可视卫星数平均值为8.5颗。在整个观测时段内,总可视卫星数无论在何种配置下始终保持4颗以上。

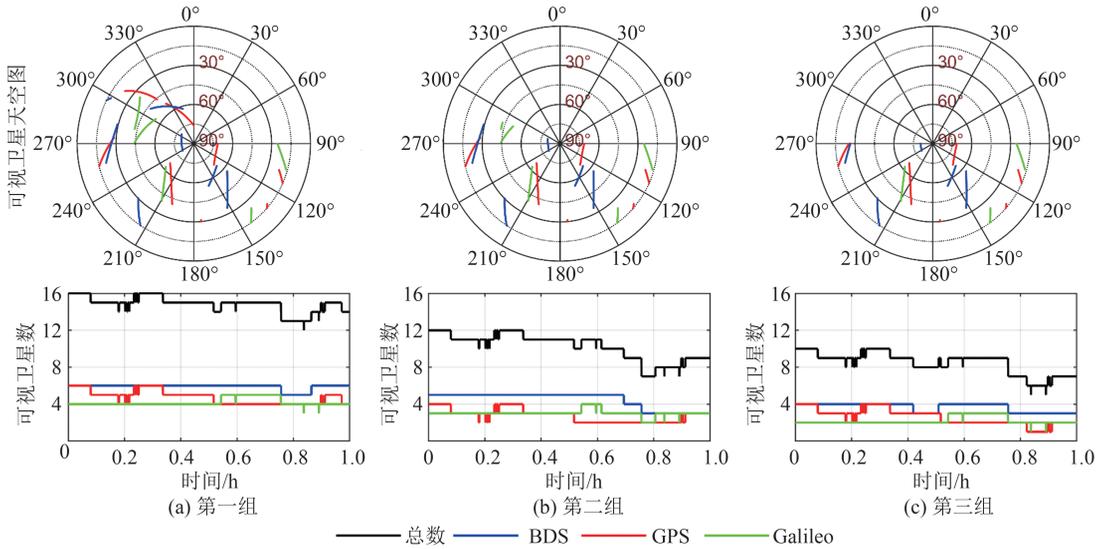


图8 可视卫星天空图(上)和可视卫星数(下)

Fig. 8 Skyplot (up) and Number (down) of Visible Satellites

图9、图10分别为松紧组合GNSS-R在3种环境配置下的测高时序和误差时序。由图9、10可以看出,在卫星可视性较好的环境下(第一组),松紧组合GNSS-R均能实时测量出水面高度的变化。随着卫星可视环境的变差(第二组),松组合GNSS-R的测高性能出现了明显的下降,紧组合GNSS-R的测高性能无明显变化。在可视性最差的环境下(第三组),松组合GNSS-R无法进行有效测高,紧组合GNSS-R除测量初始阶段约0.05 h时段内无固定解外,其余时段能够保证测高性能。

表3统计了3种配置下的模糊度固定率和精度指标,包括标准差、均方根误差、平均误差和最大绝对误差。由表3可知:(1)总体来看,无论哪种配置下的结果,其平均误差均近似为0,证明实验所配置的GNSS-R设备与测量水面高度真值所使用的激光测距仪之间无明显系统偏差。同时最大绝对误差均未超过3 cm,实时测量结果具

有较高的精度。(2)在卫星可视环境较好(第一组)时,松组合GNSS-R和紧组合GNSS-R均能实现99.75%的固定率,均方根误差小于1 cm,两种模型无明显差异。(3)随着可视环境变差(第二组),松组合GNSS-R的模糊度固定率受限于可视卫星数,降为60.62%,而紧组合GNSS-R仍能保持99.53%的固定率,且均方根误差比松组合减少了约0.4 cm。(4)在可视环境最差的第三组配置中,松组合GNSS-R由于BDS/GPS/Galileo单系统卫星数量太少无法完成测高解算,而紧组合GNSS-R依然实现了94.75%的固定率,且均方根误差未超过1 cm。

4 结语

本文基于BDS/GPS/Galileo重叠频率B1C/L1/E1信号进行了紧组合GNSS-R水面测高实验。结论如下:

1)天线的极化方式与相位和伪距DISB无明显

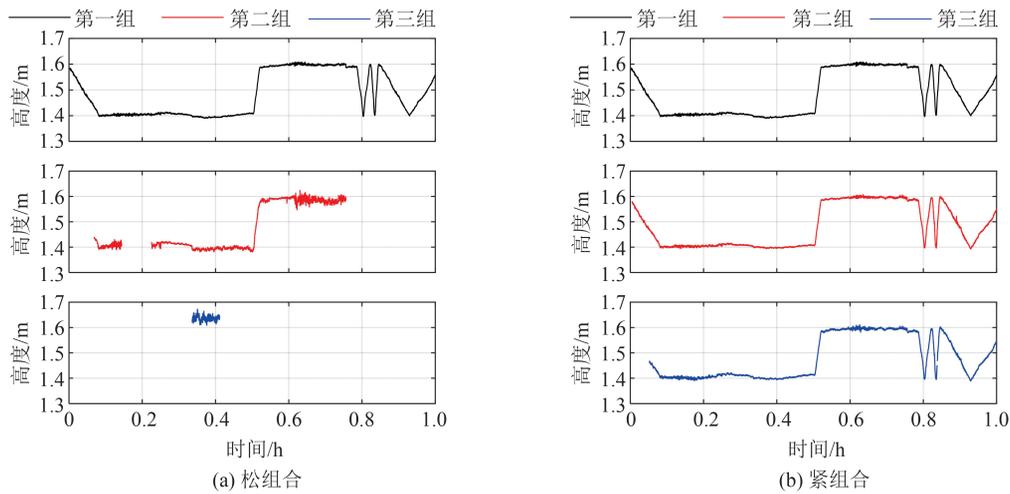


图 9 不同配置下 GNSS-R 的水面测高结果

Fig. 9 Height Results Measured by GNSS-R in Different Configurations

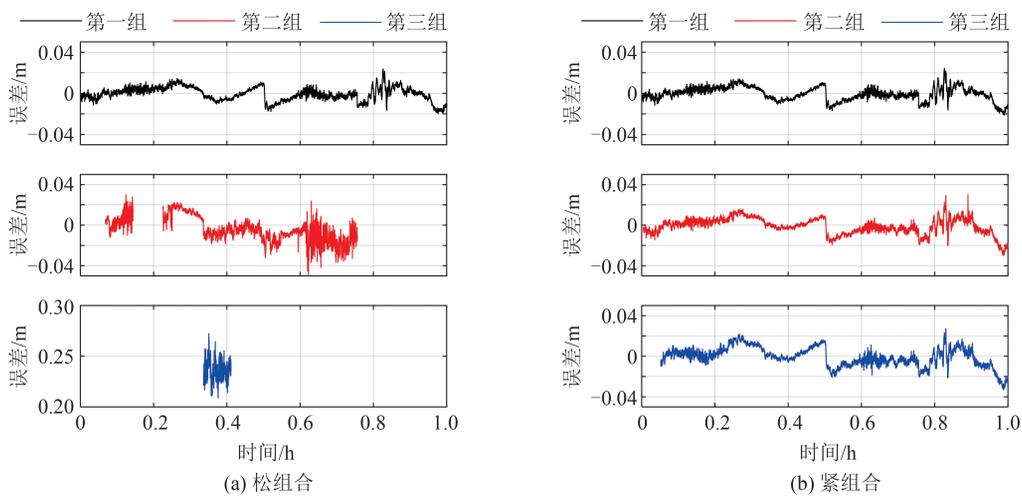


图 10 不同配置下 GNSS-R 的水面测高误差

Fig. 10 Height Errors Measured by GNSS-R in Different Configurations

表 3 3 种配置条件下模糊度固定率和测高结果精度指标

Tab. 3 Fixed Rate and Precision Indexes of Altimeter Results

配置 条件	松组合					紧组合				
	固定率/%	标准差 /m	均方根 误差/m	平均误 差/m	最大绝对 误差/m	固定率/%	标准差 /m	均方根 误差/m	平均误差 /m	最大绝对 误差/m
第一组	99.75	0.006	0.007	-0.001	0.024	99.75	0.006	0.007	0	0.024
第二组	60.62	0.010	0.012	-0.001	0.030	99.53	0.006	0.008	-0.001	0.030
第三组						94.75	0.007	0.010	-0.001	0.027

显关联,即对于同型号接收机而言,紧组合 GNSS-R 可以忽略 DISB 的影响。但由于直反射信号间的路径差异会导致 DISB 估值的标准差明显增大,影响 DISB 估值的精度,因此使用不同接收机时,可提前使用右圆极化天线零基线对 DISB 进行估计。

2)在卫星可视性较差的环境中,紧组合模型能显著提升 GNSS-R 的测高性能。特别是单 GNSS 系统卫星数难以满足 4 颗的条件下,紧组

合 GNSS-R 仍能实现 90% 以上的固定率,标准差小于 0.01 m,精度优于单系统单频 GNSS-R 测高的精度。此外,该结果同激光测距仪现场测量结果之间无明显系统偏差。

实验结果验证了紧组合模型可以极大地减少安装条件对 GNSS-R 的限制,拓展其在沿海、沿湖环境中可选择的安装地点。由于实验条件有限,本文仅基于平静湖面采集和处理了 BDS/GPS/Galileo 重叠频率 B1C/L1/E1 信号数据,紧

组合模型还可以进一步扩展至其他 GNSS 公共频段信号组合(1 176.45 MHz、1 207.14 MHz), 进而提升多系统多频 GNSS-R 的测高性能。后续还需进一步对不同型号左圆极化天线条件下的 DISB 进行评估, 同时对不同实验环境(特别是沿海环境)、不同频率条件下紧组合模型对 GNSS-R 性能的影响进行更加细致的验证与评估。

参 考 文 献

- [1] Jin Shuanggen, Zhang Qinyun, Qian Xiaodong. New Progress and Application Prospects of Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS+R) [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1389-1398. (金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1389-1398.)
- [2] Wang Dongwei, Sun Yueqiang, Wang Xianyi, et al. Water Surface Altimetry Using BD-3 B2a Reflected Signal [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1878-1886. (王冬伟, 孙越强, 王先毅, 等. 使用 BD-3 B2a 反射信号测量水面高度[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(11): 1878-1886.)
- [3] Wang N Z, Xu T H, Gao F, et al. Sea Level Estimation Based on GNSS Dual-Frequency Carrier Phase Linear Combinations and SNR [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 470.
- [4] Bu J W, Yu K G. Significant Wave Height Retrieval Method Based on Spaceborne GNSS Reflectometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1503705.
- [5] Zhang Y, Li B B, Tian L M, et al. Phase Altimetry Using Reflected Signals from BeiDou GEO Satellites [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1410-1414.
- [6] Alonso-Arroyo A, Querol J, Lopez-Martinez C, et al. SNR and Standard Deviation of CGNSS-R and IGNSS-R Scatterometric Measurements [J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 183.
- [7] Wang Feng, Yang Dongkai, Li Jie, et al. Multi-satellite and Multi-parameter Observation Based on Reflected Signals from BeiDou GEO Satellites for Coastal Wind Speed [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(9): 961-968. (王峰, 杨东凯, 李杰, 等. 岸基多星多参数北斗 GEO 反射信号海面风速反演[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(9): 961-968.)
- [8] Zhou W, Liu Y, Huang L K, et al. Multi-constellation GNSS Interferometric Reflectometry for the Correction of Long-Term Snow Height Retrieval on Sloping Topography [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 140.
- [9] Zhang Shuangcheng, Dai Kaiyang, Nan Yang, et al. Preliminary Research on GNSS-MR for Snow Depth [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 234-240. (张双成, 戴凯阳, 南阳, 等. GNSS-MR 技术用于雪深探测的初步研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 234-240.)
- [10] Peng Xuefeng, Wan Wei, Li Fei, et al. The Suitability Analysis of Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 341-350. (彭学峰, 万玮, 李飞, 等. GNSS-R 土壤水分遥感的适宜性分析[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 341-350.)
- [11] Jia Y, Jin S G, Yan Q Y, et al. The Sensitivity Analysis on GNSS-R Soil Moisture Retrieval [C]// *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Hangzhou, China, 2021.
- [12] Ban W, Yu K G, Zhang X H. GEO-Satellite-Based Reflectometry for Soil Moisture Estimation: Signal Modeling and Algorithm Development [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(3): 1829-1838.
- [13] Zhou Xun, Zheng Nanshan, Ding Rui, et al. An improved Inversion Method of Forest Biomass Based on Satellite GNSS-R [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2022. 0654. (周勋, 郑南山, 丁锐, 等. 一种改进的星载 GNSS-R 森林生物量反演方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2022. 0654.)
- [14] Martín-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS) Application to Ocean Altimetry [J]. *ESA Journal*, 1993, 17: 331-355.
- [15] Chinese Academy of Sciences. *Marine Geodetic Datum and Underwater Navigation* [M]. Beijing: Science Press, 2022. (中国科学院. 海洋大地测量基准与水下导航[M]. 北京: 科学出版社, 2022.)
- [16] Löfgren J S, Haas R, Johansson J M. Monitoring Coastal Sea Level Using Reflected GNSS Signals [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2): 213-220.
- [17] Bao L F, Wang N Z, Gao F. Improvement of Data Precision and Spatial Resolution of CGNSS-R Al-

- timetry Using Improved Device with External Atomic Clock [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(2): 207-211.
- [18] Wang Nazi, Bao Lifeng, Gao Fan. Improved Water Level Retrieval from Epoch-by-Epoch Single and Double Difference GNSS-R Algorithms [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(7): 795-802. (王娜子, 鲍李峰, 高凡. 逐历元 GNSS-R 测高单差和双差算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(7): 795-802.)
- [19] Wang Nazi, Bao Lifeng, Gao Fan. An Algorithm for CGNSS-R Altimetry Based on the Wide-lane Combination [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(8): 6-9. (王娜子, 鲍李峰, 高凡. 宽巷组合下的 cGNSS-R 测高算法[J]. 测绘通报, 2016(8): 6-9.)
- [20] Liu W, Beckheinrich J, Semmling M, et al. Coastal Sea-Level Measurements Based on GNSS-R Phase Altimetry: A Case Study at the Onsala Space Observatory, Sweden [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5625-5636.
- [21] Chen G E, Li B F, Zhang Z T, et al. Integer Ambiguity Resolution and Precise Positioning for Tight Integration of BDS-3, GPS, Galileo, and QZSS Overlapping Frequencies Signals [J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 26.
- [22] Yuan H J, Zhang Z T, He X F, et al. Tight Integration of BDS-3/BDS-2/GPS/Galileo Observations Considering the New Overlapping DISBs and Its Application in Obstructed Environments [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(6): 2879-2891.
- [23] Löfgren J S, Haas R. Sea Level Measurements Using Multi-frequency GPS and GLONASS Observations [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 50.