引文格式：马成, 凡艳伟, 张澄. 北斗三号双频长基线单历元解算性能评估[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 91-95. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.05.022

北斗三号双频长基线单历元解算性能评估

马　成[1]，凡艳伟[1]，张　澄[1]
（1. 青海省基础测绘院，青海 西宁 810000）

摘　要：为详细评估北斗三号（BDS-3）长基线定位性能，以MGEX跟踪站组成的3条长基线为基础，进行BDS-3双频、BDS-3与Galileo兼容频率双频组合长基线解算实验。实验结果表明，123 km和209 km长基线水平定位精度均优于3 cm，高程精度均优于5 cm，模糊度固定率均在96%以上，模糊度固定初始时间均在40 min以内；248 km长基线整体水平定位精度优于5 cm，高程精度优于8 cm，模糊度固定率在93%以上，模糊度固定初始时间在60 min以内；BDS-3与Galileo兼容频率双频组合定位性能比BDS-3单独定位有所提升，水平定位精度优于2 cm，高程精度优于4 cm，模糊度固定率在99%以上，模糊度固定初始时间在7 min以内。

关键词：BDS-3；双频；长基线；定位性能
中图分类号：P228.41　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0091-05

Single Epoch Solution Performance Evaluation of BDS-3 Dual-frequency Long Baseline

MA Cheng[1], FAN Yanwei[1], ZHANG Cheng[1]
(1. Qinghai Provincial Institute of Basic Surveying and Mapping, Xining 810000, China)

Abstract: In order to evaluate the BDS-3 long baseline positioning performance in detail, based on the three long baselines composed of MGEX tracking stations, we carried out the BDS-3 dual-frequency, BDS-3 and Galileo compatible frequency dual-frequency combination long baseline solution experiments. Experimental results show that the horizontal positioning accuracy of 123 km and 209 km long baselines are better than 3 cm, the elevation accuracy are better than 5 cm, the ambiguity fixation rates are above 96%, and the initial times for ambiguity fixation are within 40 min. The horizontal positioning accuracy of 248 km long baseline is better than 5 cm, the elevation accuracy is better than 8 cm, the ambiguity fixation rate is above 93%, and the initial time for ambiguity fixation is within 60 min. The dual-frequency combined positioning performance of BDS-3 and Galileo compatible frequency has improved compared with BDS-3 single positioning performance. The horizontal positioning accuracy is better than 2 cm, the elevation accuracy is better than 4 cm, the ambiguity fixation rate is above 99%, and the initial time for ambiguity fixation is within 7 min.

Key words: BDS-3, dual-frequency, long baseline, positioning performance

随着北斗三号（BDS-3）正式开通服务，其定位性能受到越来越多学者的关注，其中精密相对定位精度与可靠性是评价BDS-3定位性能的重要指标之一[1-4]。建设完成后的BDS-3在轨工作卫星共计30颗，可播发B1C、B1I、B2a、B2b和B3I等5个频率的信号，极大地增加了BDS-3多频组合定位的多样性[5-10]。通常为保证相对定位精度与可靠性，解算基线距离被设置在30 km以内，随着解算基线长度的增加，定位精度将降低[11]。然而，长基线解算性能也是不能忽略的重要内容，由参考文献[11]可知长度为100~500 km的基线为长基线，国内部分学者对长基线的定位算法和精度进行了研究分析，如高扬骏[12]等针对利用经典TCAR算法解算中长基线模糊度难固定的问题，改进了TCAR算法，不仅可以顾及电离层延迟影响，而且具有良好自适应抗差特性，对提升窄巷模糊度固定正确率效果明显；赵立都[13]、张海平[14]等分别对BDS-3中长基线定位性能和滤波算法进行了研究，并通过实验验证了其定位性能与算法的优越性；高旺[15]等提出了一种BDS-3/Galileo多频弱电离层组合的中长基线RTK定位方法，该方法各方面均比常规双频无电离层组合模型提升10%以上。针对BDS-3多频信号的优势以及对BDS-3中长基线单历元解算性能评估较少的问题，本文基于MGEX跟踪站组成的3条不同长度的长基线数据，采用非差非组合模型进行了

收稿日期：2021-12-06；修回日期：2022-04-10。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR201709260285）。
第一作者简介：马成（1987—），工程师，从事测绘工程工作，E-mail: mashufanglml@163.com。

BDS-3四种双频组合以及BDS-3/Galileo重叠频率组合解算实验。

1 BDS-3长基线定位模型

双差观测模型在基线解算中具有独特优势，是基线解算中常用的定位模型。模型一般表示为[13]：

$$\begin{cases}\Delta\nabla P_i=\Delta\nabla\rho+\gamma_i\Delta\nabla I_1+\Delta\nabla T+\Delta\nabla\sigma_{P_i}\\ \Delta\nabla\Phi_i=\Delta\nabla\rho-\gamma_i\Delta\nabla I_1+\Delta\nabla T-\lambda_i\Delta\nabla N_i+\Delta\nabla\varepsilon_{\Phi_i}\end{cases}\tag{1}$$

式中，$\Delta\nabla$ 为双差算子；P_i 为伪距观测值；Φ_i 为载波相位观测值；I_1 为一阶电离层延迟；γ_i 为一阶电离层系数；T 为对流层延迟；λ_i 为波长；N_i 为整周模糊度；σ_{P_i} 为伪距观测噪声；ε_{Φ_i} 为载波相位观测噪声。

双频组合一般表示为[13]：

$$\begin{cases}\Delta\nabla P_{(i,j)}=\dfrac{if_1\Delta\nabla P_1+jf_2\Delta\nabla P_2}{if_1+jf_2}\\ \Delta\nabla\Phi_{(i,j)}=\dfrac{if_1\Delta\nabla\Phi_1+jf_2\Delta\nabla\Phi_2}{if_1+jf_2}\end{cases}\tag{2}$$

式中，i、j 为频率；f_1、f_2 为对应的组合系数。

2 数据解算分析

2.1 数据与数据处理方案

为详细评估BDS-3长基线单历元解算定位性能，本文选取4个MGEX跟踪站2021-01-01—2021-01-07的BDS-3多频实测数据，组成了3条不同长度的基线。POTS-LEIJ组成长度约为123.51 km的长基线，POTS-WARN组成长度约为209.16 km的长基线，WTZZ-LEIJ组成长度约为248.31 km的长基线，具体信息见表1。

表1 BDS-3长基线测站详细信息

测站	位置	接收机类型	天线类型	频率	采样间隔/s
LEIJ	Germany	JAVAD TRE_3 DELTA	LEIAR25.R4	B1C/B1IB2a/B3I	30
POTS	Germany	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	B1C/B1IB2a/B3I	30
WARN	Germany	BKG/AL/G3	JAVAD TRE_3 DELTA	B1C/B1IB2a/B3I	30
WTZZ	Germany	JAVAD TRE_3 DELTA	LEIAR25.R3	B1C/B1IB2a/B3I	30

对数据进行预处理，限于篇幅未增加图表说明，4个测站数据质量较优，其中123.51 km长基线BDS-3卫星解算数均值为7颗，209.16 km长基线为7颗，248.31 km长基线为6颗，均能满足定位要求，因此卫星可用性和选取测站BDS-3卫星数据质量对定位精度影响可忽略不计。

数据解算软件利用上海天文台GNSS分析中心研发的Net_Diff软件，采用非差非组合模型进行3种长度的长基线解算实验。由于BDS-3的B2a和B3I频率较接近，因此只对BDS-3的B1C/B2a、B1C/B3I、B1I/B2a以及B1I/B3I四种双频组合进行解算。同时，为验证其他导航系统与BDS-3重叠频率组合定位的兼容性，本文选择Galileo的E1E5a频率进行组合定位，增加了B1CB2a/E1E5a组合解算实验。具体解算参数设置见表2。

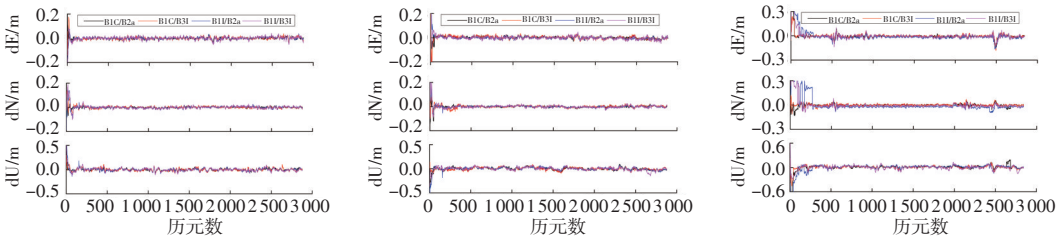
表2 BDS-3长基线解算参数设置

参数	处理方式
截止高度角	10°
对流层模型	GPT2_5w SAAS VMF1
星历	广播星历
基线处理模式	Long Baseline
周跳探测	GF+MW
坐标真值	SNX文件

2.2 BDS-3解算性能分析

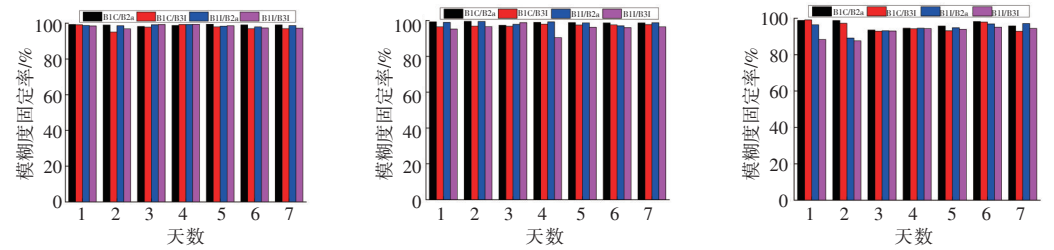
为对比分析BDS-3不同长度长基线双频单历元解算定位性能，本文选取定位误差、均方根误差（RMSE）即定位精度、首次模糊度固定时间、模糊度固定率作为评估指标，限于篇幅，定位误差分析选取第一天定位结果进行分析。由3种长度长基线全部单历元定位误差序列（图1）可知，每种长度基线E、N、U方向定位误差都需要一个收敛时段，这个时段是模糊度固定过程，且基线长度越长，定位误差序列波动越大；而BDS-3的B1C/B2a、B1C/B3I、B1I/B2a以及B1I/B3I四种双频组合定位误差序列趋势与波动范围基本一致。由3种长度长基线每天的模糊度固定率（图2）可知，B1C/B2a的模糊度固定率最优，B1I/B3I最差，B1C/B3I和B1I/B2a相当；随着基线长度的增加，模糊度固定率有所下降，但除个别天数外，123 km长基线模糊度固定率均在98%以上，209 km长基线模糊度固定率均在95%以上，248 km长基线模糊度固定率均在92%以上。由3种长度长基线每天的模糊度固定初始时间（图3）可知，123 km长基线每天的模糊度固定初始时间较稳定，而另外两条长基线模糊度固定初始时间波动较大，除个别情况外，3种长基线模糊度固定初始时间总体在30 min以内。由3种长度长基线每天E、N、U方向的定位精度（图4）

可知，各种长度长基线不同天定位精度有较明显起伏变化，且BDS-3四种双频组合长基线单历元解算精度略有差别；对于123 km和209 km长基线定位，BDS-3四种双频组合长基线E方向定位精度优于8 cm，N方向定位精度优于6 cm，U方向定位精度优于14 cm；对于248 km长基线定位，4种双频组合长基线E方向定位精度优于8 cm，N方向定位精度优于9 cm，U方向定位精度优于14 cm。



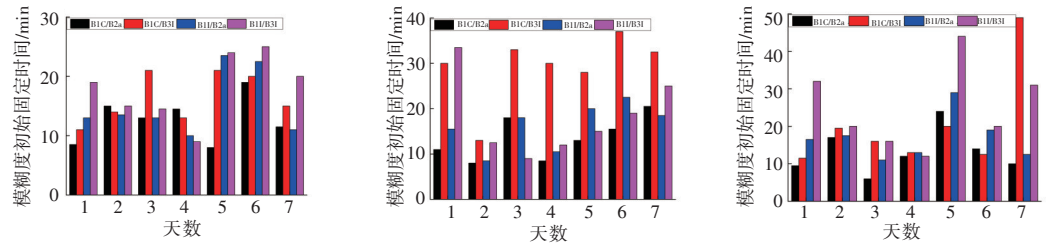
a 123 km　　b 209 km　　c 248 km

图1　3种长度长基线第一天定位误差序列



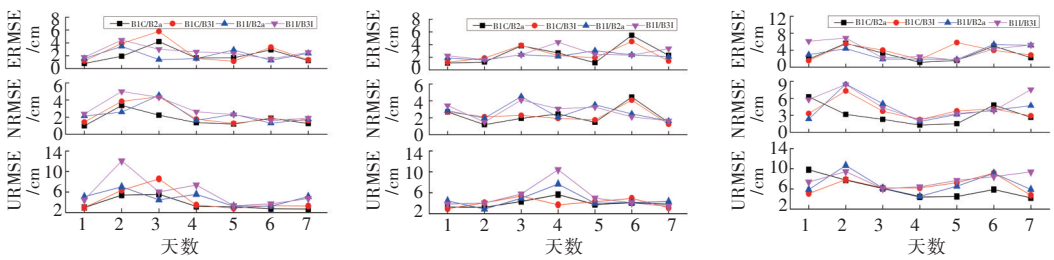
a 123 km　　b 209 km　　c 248 km

图2　3种长度长基线7 d模糊度固定率



a 123 km　　b 209 km　　c 248 km

图3　3种长度长基线7 d模糊度固定初始时间



a 123 km　　b 209 km　　c 248 km

图4　3种长度长基线7 d定位精度

由于单天定位性能指标存在差异，不能精确反映BDS-3三种长基线定位性能，因此本文进一步计算了3种长基线7 d模糊度固定率、模糊度固定初始时间和定位精度的平均值（表3），计算时去除了与变化趋势不太相符的值。由表3可知，123 km长基线BDS-3的B1C/B2a和B1I/B2a双频组合E方向定位精度优于2 cm，其余两种组合E方向定位精度优于3 cm；B1I/B3I组合N方向定位精度优于3 cm，其余3种组合N方向定位精度优于2 cm；B1C/B2a组合U方向定位精度优于3 cm，B1C/B3I组合U方向定位精度优于4 cm，其余两种组合U方向定位精度优于5 cm。B1C/B2a、B1I/B2a、B1I/B3I组合模糊度固定率在98%以上，B1C/B3I组合模糊度固定率在97%以上；B1C/B2a和B1I/B2a组合模糊固定初始时间在30 min以内，其余两种组合模糊固定初始时间在40 min以内。209 km长基线BDS-3四种双频组合除B1C/B2a组合N方向精度优于2 cm外，其余组合E方向和N方向定位精度优于3 cm，B1C/B2a和B1C/B3I组合U方向定位精度优于4 cm，其余两种组合U方向定位精度优于5 cm。B1C/B2a、B1I/B2a组合模糊度固定率在

98%以上，B1C/B3I组合模糊度固定率在97%以上，B1I/B3I组合模糊度固定率在96%以上；B1C/B2a组合模糊固定初始时间在30 min以内，其余3种组合模糊固定初始时间在40 min以内。248 km长基线定位精度明显比上述两种长基线定位精度低，B1C/B2a组合E方向定位精度优于3 cm，其余3种组合E方向定位精度优于4 cm；B1C/B2a组合N方向定位精度优于3 cm，B1C/B3I和B1I/B2a组合N方向定位精度优于4 cm，B1I/B3I组合N方向定位精度优于5 cm；B1C/B2a组合U方向定位精度优于6 cm，B1C/B3I和B1I/B2a组合U方向定位精度优于7 cm，B1I/B3I组合U方向定位精度优于8 cm。B1C/B2a模糊度固定率在96%以上，B1C/B3I模糊度固定率在95%以上，B1I/B2a模糊度固定率在94%以上，B1I/B3I模糊度固定率在93%以上；B1C/B2a和B1I/B2a组合模糊固定初始时间在30 min以内，B1C/B3I组合模糊固定初始时间在40 min以内，B1I/B3I组合模糊固定初始时间在60 min以内。

表3 3种长基线7 d模糊度固定率、模糊度固定初始时间和定位精度的平均值

基线长度/km	频率	RMSE/cm			模糊度固定率/%	模糊固定初始时间/min
		E	N	U		
123	B1C/B2a	1.70	1.49	2.95	98.99	23.50
	B1C/B3I	2.08	1.95	3.17	97.63	34.67
	B1I/B2a	1.85	1.96	4.45	98.71	27.67
	B1I/B3I	2.30	2.64	4.45	98.20	39.17
209	B1C/B2a	2.03	1.86	3.75	98.70	28.83
	B1C/B3I	2.08	2.00	3.84	97.20	36.50
	B1I/B2a	2.21	2.41	4.12	98.51	35.00
	B1I/B3I	2.68	2.50	4.34	96.52	30.83
248	B1C/B2a	2.52	2.61	5.48	96.46	28.83
	B1C/B3I	3.33	3.35	6.22	95.31	30.83
	B1I/B2a	3.01	3.51	6.35	94.56	29.83
	B1I/B3I	3.67	4.51	7.55	93.17	58.50

综上所述，BDS-3双频定位精度将随基线距离的增加而降低，但定位精度都在厘米级，模糊度固定率都在93%以上，除个别情况外，模糊固定初始时间都在40 min以内，而无论哪种长基线定位，B1C/B2a双频组合定位精度均最优。

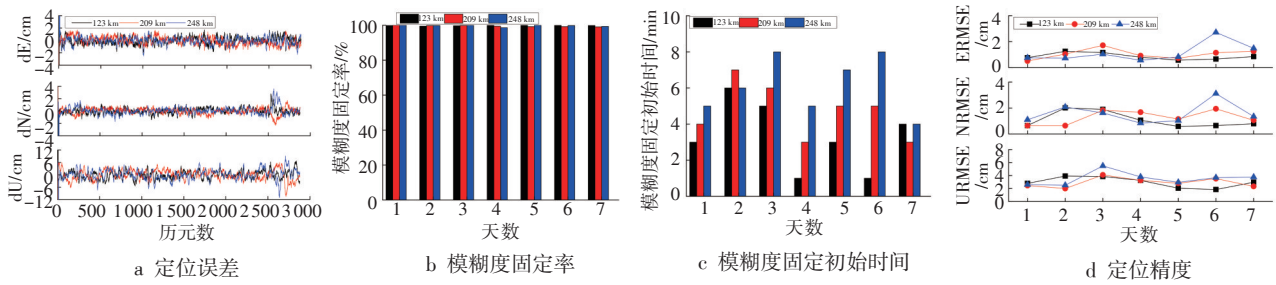
2.3 BDS-3与Galileo组合解算性能分析

为分析其他定位系统的加入对BDS-3长基线定位性能的影响，本文统计了BDS-3的B1C/B2a与Galileo系统兼容频率E1E5a组合长基线定位误差、模糊度固定率、模糊度固定初始时间和定位精度（图5），定位误差分析选取第一天定位结果进行分析。如图5所示，BDS-3与Galileo组合3种长度长基线定位误差序列比BDS-3单独定位误差序列更加平滑，误差波动范围更小，且没有明显的收敛过程；模糊度固定率均接近100%；模糊度固定初始时间整体在9 min以内；E方向整体定位精度优于4 cm，N方向整体定位精度优于5 cm，U方向整体定位精度优于8 cm。

本文进一步统计了BDS-3与Galileo组合3种长基线7 d模糊度固定率、模糊度固定初始时间以及定位精度的平均值（表4），计算时去除了与变化趋势不太相符的值，可以看出，BDS-3与Galileo组合定位精度、模糊度固定率以及模糊度固定初始时间随着基线长度的增加而变差，但相差不明显；123 km长基线

表4 BDS-3与Galileo组合3种长基线定位性能指标平均值

基线/km	RMSE/cm			模糊度固定率/%	模糊固定初始时间/min
	E	N	U		
123	0.86	0.94	2.79	99.81	4.83
209	1.04	1.28	2.73	99.53	5.43
248	0.89	1.34	3.21	99.64	6.33



a 定位误差 b 模糊度固定率 c 模糊度固定初始时间 d 定位精度

图5 BDS-3与Galileo组合3种长度长基线定位性能指标

E、N方向定位精度优于1 cm，U方向定位精度优于3 cm，模糊度固定率优于99%，模糊度固定初始时间在5 min以内；209 km长基线E、N方向定位精度优于2 cm，U方向定位精度优于3 cm，模糊度固定率优于99%，模糊度固定初始时间在6 min以内；248 km长基线E方向定位精度优于1 cm，N方向定位精度优于2 cm，U方向定位精度优于3 cm，模糊度固定率优于99%，模糊度固定初始时间在7 min以内。

3　结　语

本文基于欧洲地区4个MGEX跟踪站组成的3条长基线，进行了BDS-3双频组合以及BDS-3与Galileo兼容频率双频组合单历元解算实验，得到以下结论：

1）BDS-3的B1C/B2a、B1C/B3I、B1I/B2a、B1I/B3I双频组合长基线定位性能较优，但随着基线长度的增加，定位性能将降低；123 km和209 km长基线水平定位精度均优于3 cm，高程精度均优于5 cm，模糊度固定率均在96%以上，模糊度固定初始时间均在40 min以内。

2）248 km长基线定位性能略低于其他两种长基线，整体水平定位精度优于5 cm，高程精度优于8 cm，模糊度固定率在93%以上，模糊度固定初始时间在60 min以内。此外，该长基线大部分时间B1I/B3I组合定位模糊度初始固定时间超过30 min，这可能是导致B1I/B3I组合定位精度进一步降低的原因。

3）无论哪种长度的长基线定位，B1C/B2a组合定位性能最优，B1I/B3I组合定位性能最差，这可能是由B1I/B3I组合模糊度固定初始时间较长、模糊度固定率较低所致，B1C/B2a、B1C/B3I组合定位性能相当。

4）无论哪种长度的长基线定位，BDS-3与Galileo兼容频率双频组合定位性能比BDS-3单独定位都有所提升，水平定位精度均优于2 cm，高程精度均优于4 cm，模糊度固定率均在99%以上，模糊度固定初始时间均在7 min以内。

随着BDS-3的建设完成，其应用领域将逐渐扩大，因此其他模式下多频组合定位研究将是今后研究的热点，也是本文以后研究的重点。

参考文献

[1] 毛亚,王潜心,胡超,等. BDS-3卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):53-61

[2] 蔡洪亮,孟轶男,耿涛,等. 北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(10):1 493-1 500

[3] ZHU S L, YUE D J, HE L N, et al. Modeling and Performance Assessment of BDS-2/BDS-3 Triple-frequency Ionosphere-free and Uncombined Precise Point Positioning[J]. Measurement,2021,180:236-245

[4] ZHANG R,TU R, ZHANG P F, et al. Orbit Determination of BDS-3 Satellite Based on Regional Ground Tracking Station and Inter-satellite Link Observations[J]. Advances in Space Research,2021,67(12):362-371

[5] YANG Y, MAO Y, SUN B. Basic Performance and Future Developments of BeiDou Global Navigation Satellite System[J]. Satellite Navigation,2020(1):136-144

[6] LI R, WANG N B, LI Z S, et al. Precise Orbit Determination of BDS-3 Satellites Using B1C and B2a Dual-frequency Measurements[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 238-245

[7] LIU W K, WU M K, ZHANG X H, et al. Single-epoch RTK Performance Assessment of Tightly Combined BDS-2 and Newly Complete BDS-3[J]. Satellite Navigation,2021,2(1):336-342

[8] ZHU Y X, ZHENG K, CUI X Q, et al. Preliminary Analysis of the Quality and Positioning Performance of BDS-3 Global Interoperable Signal B1C&B2a[J]. Advances in Space Research,2021,67(8):458-465

[9] ZHANG P F, TU R, HAN J Q, et al. Characterization of Biases Between BDS-3 and BDS-2, GPS, Galileo and GLONASS Observations and Their Effect on Precise Time and Frequency Transfer[J]. Measurement Science and Technology,2021,32(3):156-163

[10] 李晓杰,刘晓萍,祖安然,等. 基本导航模式下BDS-3卫星地影期间的定轨精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(6):854-861

[11] 曹士龙,刘根友,王生亮,等. GPS超长基线解算的误差特性与精度分析[J/OL]. (2020-12-24)[2021-05-29]. https://kns.cnki.net/kns8/Detail?sfield=fn&QueryID=7&CurRec=1&recid=&FileName=WHCH20201223004&DbName=CAPJLAST&DbCode=CAPJ&yx=Y&pr=&URLID=42.1676.TN.20201224.1322.005

[12] 高扬骏,吕志伟,周朋进,等. 北斗中长基线三频模糊度解算的自适应抗差滤波算法[J]. 测绘学报,2019,48(3):295-302

[13] 赵立都,向中富,周银,等. 北斗三号中长基线定位性能分析[J]. 测绘科学技术学报,2020,37(6):556-561

[14] 张海平. 北斗三号中长基线RTK卡尔曼滤波算法[J]. 测绘科学,2020,45(12):28-33

[15] 高旺,潘树国,黄功文. 基于BDS-3和Galileo多频信号弱电离层组合的中长基线RTK定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(6):783-788