引文格式:唐卫明,张思宇,邓辰龙,等.单北斗接收机网络RTK增强定位服务性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):904-913.DOI:10.13203/j.whugis20240157

Citation:TANG Weiming,ZHANG Siyu,DENG Chenlong,et al.Analysis and Evaluation of Network Real-Time Kinematic Positioning Performance Based on Standalone BDS Receivers[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(5):904-913.DOI:10.13203/j.whugis20240157

单北斗接收机网络RTK增强定位服务性能分析

唐卫明[1] 张思宇[1,2] 邓辰龙[3] 戚克培[1] 聂肖虎[4]
邹 璇[1] 李洋洋[1] 刘邢巍[5] 曾树林[5]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079
2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
3 武汉理工大学航运学院,湖北 武汉,430063
4 中国石化销售股份有限公司华中分公司,湖北 武汉,430015
5 重庆市地理信息和遥感应用中心,重庆,401147

摘 要:网络实时动态差分(network real-time kinematic,NRTK)技术作为北斗卫星导航系统高精度定位的主要手段,已广泛应用于生产生活中的各领域,国产单北斗定位终端研制与推广的需求日益增强。利用武汉大学自主研发的NRTK数据处理软件PowerNetwork对单北斗接收机的NRTK服务性能进行系统分析和评估。以司南M300 Pro单北斗接收机为例,在武汉市4个站点进行数据采集,对基准站间模糊度解算、误差改正数生成和流动站用户定位3个方面的服务性能进行了综合评估。结果表明,基准站间模糊度解算中3条基线的宽巷模糊度和原始模糊度残差的平均标准差均优于0.1周,能够可靠确定模糊度;在误差改正数生成中,可视卫星对的电离层延迟误差精度优于1.00 cm,非弥散误差精度优于0.50 cm;在流动站用户端,模糊度固定率和正确固定率分别为99.72%和96.55%,且定位精度在水平方向可达1 cm,高程方向优于5 cm。单北斗接收机在上述3个方面的服务性能与多系统GNSS接收机的性能并无明显差异,流动站最终定位结果能够满足高精度测绘作业的需要。

关键词:单北斗接收机;网络RTK;性能评估;基准站间模糊度解算;流动站用户定位

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-19

DOI:10.13203/j.whugis20240157 **文章编号**:1671-8860(2026)05-0904-10

Analysis and Evaluation of Network Real-Time Kinematic Positioning Performance Based on Standalone BDS Receivers

TANG Weiming[1] *ZHANG Siyu*[1,2] *DENG Chenlong*[3] *QI Kepei*[1] *NIE Xiaohu*[4]
ZOU Xuan[1] *LI Yangyang*[1] *LIU Xingwei*[5] *ZENG Shulin*[5]

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
4 Central China Branch of SINOPEC Sales Co., Ltd., Wuhan 430015, China
5 Chongqing Geomatics and Remote Sensing Center, Chongqing 401147, China

Abstract: **Objectives**: With the completion and operation of BeiDou navigation satellite system (BDS), it can provide all-time, all-weather and high-accuracy positioning, navigation and timing services to global users. Network real-time kinematic (NRTK) technology, as the primary means of high-precision positioning for BDS, has been widely used in various fields. And the demand for development and promotion of the domestic standalone BDS receivers has been increasingly growing in recent years. **Methods**: The data of standalone BDS receivers are process by PowerNetwork, which is a NRTK software developed indepen-

基金项目:广西科技重大专项(桂科AA24263029);湖北省重大攻关项目(2023BAA02601);国家重点研发计划(2022YFB3904601);中央高校基本科研业务费专项(WUT:2024IVA047);湖北省技术创新计划重点研发专项(2023BAB068)。

第一作者:唐卫明,博士,教授,主要从事GNSS实时动态应用开发和系统集成研究工作。wmtang@whu.edu.cn

dently by Wuhan University, to analyze and evaluate the NRTK performance. Sinan M300 Pro standalone BDS receiver is used to collect data at four stations in Wuhan City, and then the performance in three aspects, namely the ambiguity resolution between reference stations, generation of regional augmentation products, and real-time positioning for rover stations, are comprehensively evaluated. For ambiguity resolution, the ionospheric-free three-carrier ambiguity resolution method is used to process the three-frequency observations of BDS-2, while the B1I+B3I dual-frequency observations of BDS-2+BDS-3 are processed by the Melbourne - Wübbena method. For regional augmentation products, the corrections including dispersive and non-dispersive errors for the rover station are obtained by linear interpolation algorithm. In the positioning, Kalman filter is employed to determine the float ambiguity, and then the optimal position of rover station is obtained after the ambiguity is processed by least squares ambiguity decorrelation adjustment algorithm. **Results:** The experimental results show that the average standard deviation of the wide-lane ambiguity and the original double-difference ambiguity residuals of the three baselines is better than 0.1 cycle, which can determine the ambiguity reliably. In terms of augmentation performance, the accuracy of ionospheric delay and non-dispersive errors for all visible satellite pairs are better than 1.00 cm and 0.50 cm, respectively. For real-time positioning, the fixed rate and the correctly fixed rate of ambiguity for rover are 99.72% and 96.55%, respectively. And the root mean square values in the horizontal and elevation directions are better than 1 cm and 5 cm, respectively. **Conclusions:** The service performance of the domestic standalone BDS receivers in the above three aspects is not significantly different from that of multi-system GNSS receiver, and the final positioning accuracy can meet the needs of high-precision surveying and mapping.

Key words: standalone BDS receivers; network real-time kinematic (NRTK); performance evaluation; ambiguity resolution between reference station; positioning of rover

北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)的全面建成开启了高质量服务全球、造福人类的新时代[1-5]。北斗地基增强系统是BDS的重要组成部分,可在服务区域内提供广域米级、区域厘米级以及后处理毫米级定位服务精度[6-8]。网络实时动态差分(network real-time kinematic,NRTK)技术作为区域差分增强系统,能够让用户在较大的空间范围内实时获取均匀且高精度的定位结果,其卓越的性能使其在测绘、精密导航等众多领域得到应用,是目前应用最广泛的GNSS精密定位技术之一[9-10]。近年来,国产单北斗定位终端的研制与推广需求日益增强,国内市场已有数款能够独立接收BDS信号的单北斗终端产品,鉴于其信号捕获方式的改变,单北斗接收机的NRTK定位服务性能可能发生改变,因此有必要开展单北斗接收机的NRTK增强定位服务性能分析评估工作。

NRTK技术的数据处理主要包括基准站间双差模糊度固定、误差改正数生成和用户端高精度定位服务。显然,基准站间模糊度快速可靠固定是至关重要的,国内外学者对其展开大量研究。文献[11]和文献[12]分别提出了一种NRTK基准站间的整周模糊度单历元解算和快速确定的方法;文献[13-15]充分利用电离层约束模型和对流层约束信息解决了NRTK系统初始化过程中模糊度解算固定时间长、可靠性低的问题。上述研究工作主要针对GPS系统或包含其在内的多系统NRTK基准站间模糊度解算。随着BDS的不断完善和发展,许多学者使用BDS数据开展相关研究。文献[16]介绍了基于几何相关模型的三频相位模糊度解算(three-carrier ambiguity resolution, TCAR)和基于几何无关模型的TCAR (geometry-free TCAR, GF TCAR)方法,并采用BDS三频数据分析了模糊度固定性能;为了解决GF TCAR方法估计的电离层延迟不准确导致原始模糊解算失败的问题,文献[17]提出了一种无电离层TCAR方法(ionospheric-free TCAR, IF TCAR),并使用BDS数据验证了所提方法的模糊度解算性能;文献[18]利用BDS三频观测数据,实现了精密单点定位模糊度快速固定。上述研究成果为基准站间模糊度解算奠定了坚实的算法基础,为单北斗接收机的性能评估提供了有力的支撑。

基准站间模糊度固定后,就可根据基准站间模糊度、基准站坐标计算获得基准站间的双差残余误差,通常称之为综合误差。传统方法一般通

过线性插值获取用户位置处的综合误差,文献[19]对传统方法进行了改进,将综合误差划分为弥散误差和非弥散误差,其中弥散误差包括一阶电离层延迟误差,非弥散误差包括对流层延迟误差、高阶电离层延迟误差和轨道误差,该方法不仅提升了综合误差内插法的精度,更便于流动站计算出所有频率的误差改正数。电离层延迟内插改正效果是影响NRTK定位的主要因素之一,许多学者对其内插模型进行了深入研究和探讨[20-21],常见的内插模型主要包括线性内插模型、距离相关内插模型、低阶曲面模型、线性组合模型、最小二乘配置模型和克里金插值法等。

目前,许多文献评估了NRTK定位性能。文献[9]比较分析了GPS/Galileo紧组合及单系统处理策略在开阔环境及遮挡环境下NRTK的定位性能;文献[10]使用DREAMNET软件对GPS/BDS/GLONASS的NRTK定位性能进行了深入分析,结果表明,多系统的定位精度可达水平0.006 m、高程0.015 m,不依赖GPS系统的BDS和BDS/GLONASS在内的6种组合方式皆可达到水平0.01 m、高程0.025 m的定位精度;文献[22-24]研究了使用不同的电离层矫正模型用于提升NRTK的定位性能。以上研究主要针对多系统数据进行定位性能分析,已有许多文献使用多系统接收机的北斗数据开展相关研究。文献[25-26]的实验结果表明,BDS-3单系统流动站可实现厘米级定位;BDS-3的引入进一步提升了BDS-2的定位精度;文献[27]从频率角度详细分析BDS系统用户端模糊度固定率和定位精度,指出在BDS-3使用B1C+B2a和B1I+B3I信号提供虚拟基准站服务时,用户终端NRTK固定率在95%以上,水平精度和高程精度分别控制在1 cm和2 cm以内。BDS-2+BDS-3的B1I+B3I组合处理效果最佳,在东(E)、北(N)方向的精度优于0.5 cm,天(U)方向的精度优于1.5 cm。

如上所述,NRTK的相关文献主要是基于多系统接收机的多频多模数据或BDS数据,有关国产单北斗接收机数据及其NRTK性能分析的文献较少。本文选用湖北省武汉市内布设的4个安装有单北斗接收机的站点,采集相应的BDS卫星观测数据,对基准站间模糊度解算、误差改正数生成以及流动站用户定位3个方面的服务性能展开系统分析,以期对单北斗接收机的NRTK增强定位服务性能进行综合评估,为单北斗接收机实际测绘作业和相关研究提供参考。

1 实验与数据处理

1.1 实验与数据采集

为评估和分析单北斗接收机的NRTK增强定位服务性能,本文在武汉市选取了4个静态站并安装了上海司南的M300 Pro接收机,该接收机内置了已通过单北斗产品认证的北斗导航芯片。4个静态站分别命名为JXZF、WDKJ、DSCZ和YHYY,其位置分布如图1所示,其中,JXZF、WDKJ、DSCZ站点为基准站,并构建基准站网;YHYY站点为流动站。基准站网中基线JXZF-WDKJ、WDKJ-DSCZ、DSCZ-JXZF的距离分别为14.8 km、22.1 km和32.6 km。接收机采样间隔和卫星截止高度角分别设置为1 s和10°,从2024-02-01起开展了连续一个月的单北斗数据采集工作,经数据处理与分析发现,每天的定位结果基本一致。由于篇幅限制,本文选取2024-02-06,即年积日(day of year,DOY)037,仅呈现4个站点在一天的分析结果。

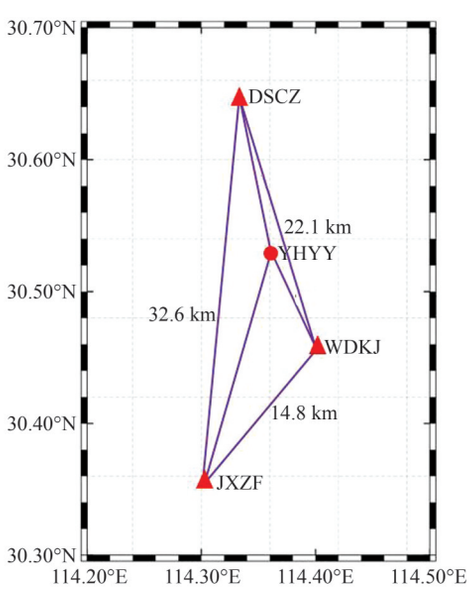


图1 武汉市4个测站的位置分布

Fig. 1 Distribution of Four Static Stations in Wuhan City

1.2 数据处理方法

首先,使用武汉大学自主研发的PANDA数据处理软件[28]对采集的单北斗数据进行处理,获取了4个站点精确的绝对坐标作为本文实验的参考坐标;然后,利用武汉大学自主研发的Power-Network软件[29]对采集的单北斗数据进行NRTK数据处理。

基准站间模糊度解算采用基于无电离层模型的三频载波模糊度解算方法[17]处理BDS-2三频观测数据,具体处理策略如下:(1)固定双差

超宽巷模糊度:首先采用 Melbourne-Wübbena(MW)组合方法确定 BDS-2 系统的双差超宽巷模糊度 $\nabla\Delta N_{(0,-1,1)}$,其中括号内的数值分别对应 B1I(1 561.098 MHz)、B2I(1 207.14 MHz)和 B3I(1 268.52 MHz)观测值的系数;(2)固定双差宽巷模糊度:根据已知参考站精确坐标直接反算两组线性无关的无电离层组合模糊度 $\nabla\Delta N_{(1,-f_2/f_1,0)}$ 和 $\nabla\Delta N_{(1,0,-f_3/f_1)}$,其中 f_1、f_2 和 f_3 分别表示 B1、B2 和 B3 观测值的频率;(3)由于上文确定的 3 组模糊度线性无关,故可采用线性组合方式计算双差宽巷模糊度 $\nabla\Delta N_{(1,0,-1)}$ 的浮点值,并采用历元间平滑取整方式进行固定;(4)固定双差原始模糊度:将无电离层组合模糊度及对流层残差作为状态参数参与卡尔曼滤波解算,获取精确的无电离层组合模糊度,依据其与宽巷模糊度的线性关系得到原始双差模糊度 $\nabla\Delta N_{(1,0,0)}$ 浮点解,最后,通过直接取整获取其固定解。此外,BDS-2+BDS-3 系统的 B1I+B3I 双频观测数据也进行了模糊度解算,其解算过程与上述处理方法唯一不同之处在于直接采用 MW 组合方法解算双差宽巷模糊度 $\nabla\Delta N_{(1,0,-1)}$。

在生成误差改正数的过程中,首先需要利用固定的原始双差模糊度得到 3 条基准站间基线的弥散误差和非弥散误差改正数,然后以基准站 WDKJ 为主参考站、以 JXZF 和 DSCZ 为辅参考站,通过线性内插算法得到流动站 YHYY 处的弥散误差和非弥散误差改正数。为评估流动站处所生成的改正数的精度,考虑到 YHYY 站坐标已精确确定,可将其作为监测站,同步得到该站相对主参考站 WDKJ 的弥散误差和非弥散误差,作为误差改正数的参考值。最后,将流动站处生成的改正数与对应的改正数参考值进行对比,评估误差改正数的性能。

NRTK 的流动站定位解算可以直接利用生成的误差改正数,对基线 WDKJ-YHYY 的双差观测值进行改正,采用卡尔曼滤波得到模糊度浮点解,并采用最小二乘模糊度降相关平差(least squares ambiguity decorrelation adjustment,LAMBDA)算法搜索得到模糊度固定解,进而得到流动站 YHYY 的坐标最优解。同时,此坐标解将与其事先得到的精确坐标值进行比较,以获取该流动站在 E、N、U 方向的定位误差。

2　基准站间模糊度解算性能分析

2.1　BDS-2 三频宽巷模糊度解算

在 BDS-2 三频模糊度解算中,IF TCAR 方法涉及超宽巷模糊度 $\nabla\Delta N_{(0,-1,1)}$ 的解算。由于此模糊度具有长达 4.8 m 的长波长,3 条基线的超宽巷模糊度可以完全正确固定,因此,本文不再讨论超宽巷模糊度解算结果,仅主要展示和分析 BDS-2 宽巷模糊度结果。

在 3 条基准站间基线共视卫星中,将 BDS C07 作为参考卫星,并从 BDS 地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)卫星及中圆地球轨道(medium earth orbit,MEO)卫星中各选取一颗非参考卫星,即 C02、C09 和 C12,分别组成卫星对 C02-C07、C09-C07 和 C12-C07。基于 IF TCAR 方法解算 3 条基线的 BDS-2 三频观测数据,并以上述 3 对卫星为例,得到 B1I-B3I 宽巷模糊度残差,该残差经过历元间平滑处理,如图 2 所示。由图 2 可以看出,所有卫星对的宽巷模糊度残差均能快速收敛。

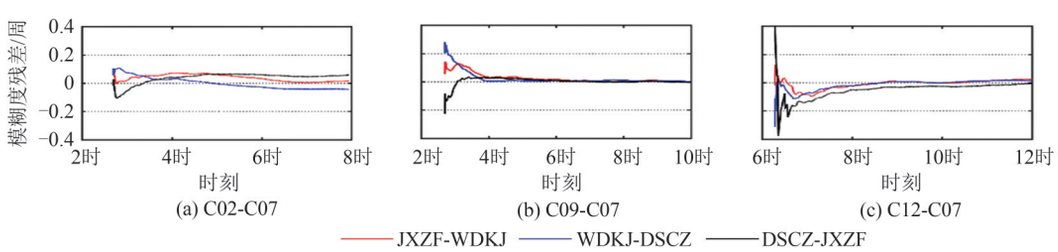


图 2　基于 IF TCAR 方法解算 BDS-2 三频数据所得的宽巷模糊度残差

Fig. 2　Optimal Wide Lane Ambiguity Residual by IF TCAR Method with Triple Frequency Data of BDS-2

将宽巷模糊度浮点解残差首次低于±0.15 周的时间记为收敛时间,进而对 3 条基线中同一卫星对的收敛时间求平均值,获得该卫星对的平均收敛时间。经计算,卫星对 C02-C07、C09-C07 和 C12-C07 的平均收敛时间分别为 1.0 s、309.3 s 和 601.0 s。同时,统计模糊度收敛后残差的标准差,进而对 3 条基线中同一卫星对的标准差求平均值,获得该卫星对的平均标准差。经计算,3 个卫星对的平均标准差分别为 0.033 周、0.027 周和 0.033 周。

为进一步分析不同类型卫星对的整体表现,针对每条基线,统计所有可视GEO卫星与参考卫星C07所组成卫星对的宽巷模糊度收敛时间及残差标准差,并计算其平均值作为其收敛时间及标准差,类似可得该基线其他类型卫星对的收敛时间及标准差,最后统计所有3条基线收敛时间及标准差的平均值,结果见表1。由表1可知,对所有基线而言,不同类型卫星对收敛时间的平均值均小于500 s,说明不同类型卫星均能快速收敛。此外,不同类型卫星对的标准差的平均值基本一致,均优于0.03周,且其差异均小于0.01周,说明不同类型卫星的宽巷模糊度解算性能是一致的,利用IF TCAR方法能够可靠地确定宽巷模糊度。

表1 所有可视BDS-2卫星对的宽巷模糊度残差的收敛时间及其统计指标

Table 1 Convergence Time and Statistical Metrics of Wide Lane Ambiguity Residuals for BDS-2 Satellite Pairs

基线	长度/km	收敛时间/s			标准差/周		
		GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO
JXZF-WDKJ	14.8	2.7	183.0	203.3	0.026	0.026	0.039
WDKJ-DSCZ	22.1	24.0	666.5	186.7	0.022	0.025	0.017
DSCZ-JXZF	32.6	140.3	526.3	231.0	0.032	0.012	0.027
平均值		55.7	458.6	207.0	0.027	0.021	0.028

2.2 BDS-2+BDS-3双频宽巷模糊度解算

将BDS-2的C06为参考卫星,并从3条基准站间基线共视的BDS-3 IGSO和MEO卫星中分别选取C39和C45为非参考卫星,以这两个卫星对为例,基于MW组合方法解算BDS-2和BDS-3的B1I+B3I双频数据,得到的宽巷模糊度残差如图3所示。由图3可以看出,相较于卫星对C45-C06,卫星对C39-C06中3条基线的模糊度残差变化幅度较小,能更好地收敛到0。卫星对C39-C06和C45-C06的平均标准差分别为0.043周和0.069周,与图3中呈现的相一致。两组卫星对模糊度残差的平均标准差均未超过0.1周,说明利用MW组合方法能可靠地确定BDS-2+BDS-3的宽巷模糊度。

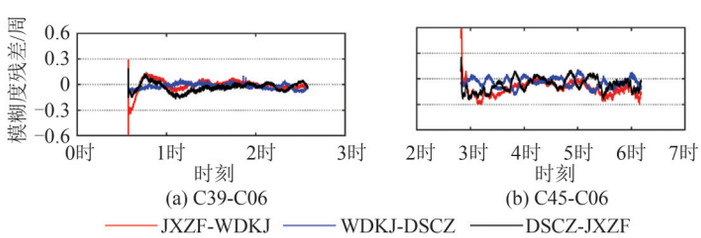


图3 基于MW组合方法解算BDS-2和BDS-3的B1I+B3I双频数据所得的宽巷模糊度残差

Fig. 3 Wide Lane Ambiguity Residual by MW Method with B1I+B3I Dual Frequency Data of BDS-2 and BDS-3

为进一步分析BDS-2+BDS-3系统中两类卫星对的整体表现,采用与表1相同的统计方式,计算3条基线所有可视卫星与参考卫星C06的宽巷模糊度残差的收敛时间、标准差及其平均值,结果见表2。由表2可知,对所有基线而言,两类卫星对收敛时间的平均值均小于200 s,表明所有可视卫星对均能快速收敛。两类卫星对的标准差的平均值相差不大,且均优于0.1周,这说明IGSO和MEO组成卫星对的宽巷模糊度解算性能是一致的,且利用MW组合方法得到的模糊度能够可靠确定。

对比图2和图3可以发现,在宽巷模糊度解算中,相较于IF TCAR方法,采用MW组合方法得到的宽巷模糊度残差波动幅度较大。对比表1和表2可以看出,IF TCAR方法的卫星对标准差的平均值均小于MW组合方法。上述结果均表明,IF TCAR方法优于MW组合方法。

表2 所有可视的BDS-3卫星对的宽巷模糊度残差收敛时间及其统计指标

Table 2 Convergence Time and Statistical Metrics of Wide Lane Ambiguity Residuals for BDS-3 Satellite Pairs

基线	长度/km	收敛时间/s		标准差/周	
		IGSO	MEO	IGSO	MEO
JXZF-WDKJ	14.8	545.0	73.0	0.061	0.062
WDKJ-DSCZ	22.1	9.0	30.2	0.094	0.090
DSCZ-JXZF	32.6	40.0	1.7	0.089	0.073
平均值		198.0	35.0	0.082	0.075

2.3　BDS 原始模糊度解算

图 4 呈现了 3 组 BDS-2 卫星对的原始模糊度解算残差。由图 4 可以看出,所有卫星对整体上均能较好的收敛,但卫星对 C02-C07 中,基线 JXZF-DSCZ 在 5 时 30 分出现了周跳现象,导致滤波重新初始化。将原始模糊度残差首次低于±0.2 周的时间记为收敛时间,卫星对 C02-C07、C09-C07 和 C12-C07 的收敛时间分别为 154.3 s、1 238.7 s 和 26.7 s,相应卫星对的平均标准差分别为 0.055 周、0.050 周和 0.078 周。

采用与表 1 相同的统计方式,3 条基线所有可视卫星与参考卫星 C07 的原始模糊度残差的收敛时间、标准差及其平均值见表 3。由表 3 可知,不同类型卫星对中所有基线原始模糊度残差收敛时间的平均值均小于 300 s,表明所有卫星对均能快速收敛。同时,不同类型卫星对的标准差的平均值均优于 0.07 周,说明不同类型卫星对的原始模糊度均能可靠固定。

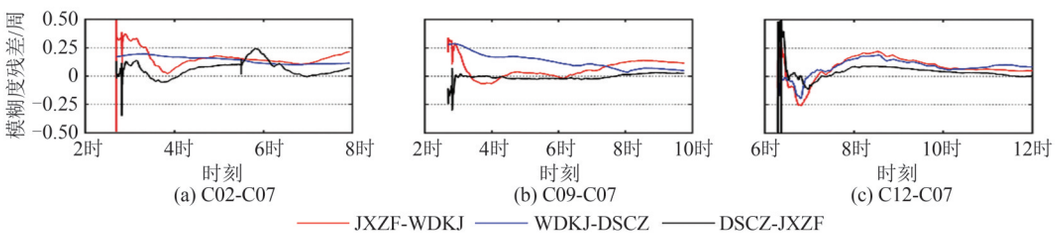


图 4　BDS-2 原始双差模糊度解算残差

Fig. 4　B1I Double-Differenced Ambiguity Residual of BDS-2 Data

表 3　所有可视的 BDS-2 卫星对的原始模糊度残差的收敛时间及其统计指标

Table 3　Convergence Time and Statistical Metrics of Ambiguity Residuals for BDS-2 Satellite Pairs

基线	长度/km	收敛时间/s			标准差/周		
		GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO
JXZF-WDKJ	14.8	40.7	66.0	1.0	0.027	0.062	0.098
WDKJ-DSCZ	22.1	1.0	33.0	133.0	0.031	0.048	0.063
DSCZ-JXZF	32.6	26.3	2.8	633.0	0.037	0.025	0.040
平均值		22.7	33.9	255.7	0.032	0.045	0.067

图 5 呈现了 2 组 BDS-2+BDS-3 卫星对的原始模糊度解算残差。从图 5 可以看出,两组卫星对均能快速收敛。据统计,卫星对 C39-C06 和 C45-C06 的平均收敛时间分别为 29.7 s 和 82.3 s,相应卫星对的平均标准差分别为 0.056 周和 0.024 周。3 条基线所有可视的 BDS-3 卫星与参考卫星 C06 的宽巷模糊度残差的收敛时间、标准差及其平均值见表 4。

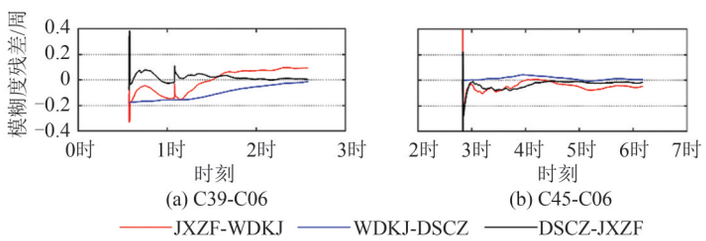


图 5　BDS-2 和 BDS-3 原始双差模糊度解算残差

Fig. 5　B1I Double-Differenced Ambiguity Residual of BDS-2 and BDS-3 Data

表 4　所有可视的 BDS-3 卫星对的原始模糊度残差的收敛时间及其统计指标

Table 4　Convergence Time and Statistical Metrics of Ambiguity Residuals for BDS-3 Satellite Pairs

基线	长度/km	收敛时间/s		标准差/周	
		IGSO	MEO	IGSO	MEO
JXZF-WDKJ	14.8	50.0	23.0	0.052	0.074
WDKJ-DSCZ	22.1	1047.0	9.3	0.040	0.102
DSCZ-JXZF	32.6	35.0	1.5	0.018	0.048
平均值		377.3	11.3	0.037	0.075

由表 4 可知,BDS-2+BDS-3 系统中两类卫星对中所有基线原始模糊度残差收敛时间的平均值均小于 400 s,表明所有卫星对均能快速收敛。同时,卫星对的标准差的平均值均优于 0.08 周,说明所有卫星对的原始模糊度均能可靠固定。

综上,BDS-2 和 BDS-2+BDS-3 原始模糊度解算中,不同类型卫星对均能快速收敛,且能够可靠固定,该结果与多 GNSS 系统接收机原始模糊度的解算性能一致。

3 误差改正数生成性能分析

为了评估误差改正数性能,本文将线性内插获取的移动站YHYY处的电离层延迟及非弥散误差改正数与其对应参考值作差,得到BDS-2和BDS-2+BDS-3可视卫星对的改正数误差,其结果分别如图6和图7所示。由图6和图7可以看出,BDS-2和BDS-2+BDS-3的电离层延迟及非弥散误差的改正数误差在整体上均集中在0附近波动。

从图6可以看出,不同卫星对的电离层延迟改正数误差基本在2 cm范围内波动,且变化频率较大,尤其是卫星对C02-C07。相较电离层延迟的改正数误差,非弥散误差的改正数误差变化较为平缓。对于卫星对C12-C07而言,还存在较为明显的收敛过程,这主要是因为非弥散误差是以对流层延迟误差为主。据统计,此卫星对的电离层延迟误差和非弥散误差的最大值分别为3.20 cm和2.40 cm。此外,卫星对C02-C07、C09-C07、C12-C07的电离层延迟及非弥散误差的均方根(root mean square,RMS)分别为6.48 mm和5.23 mm、6.09 mm和2.90 mm、6.40 mm和4.95 mm。卫星对C02-C07的电离层延迟RMS是所有卫星对中最大的,这与上述分析结果相一致。

由图7可以看出,BDS-2和BDS-3可视卫星对的电离层延迟误差和非弥散误差的改正数精度相比BDS-2而言均有明显提升,其变化幅度较小,尤其是卫星对C39-C06非弥散误差的改正数已十分趋近于0。经统计,卫星对C39-C06和C45-C06的电离层延迟误差改正数的RMS分别为3.45 mm和5.56 mm,非弥散误差改正数的RMS分别为0.11 mm和2.09 mm。以上统计数据说明,利用内插算法生成的误差改正数与参考的误差改正数十分接近,表明在利用北斗地基增强系统的NRTK技术提供差分增强定位服务时,单北斗接收机数据是能够提供可靠的差分改正数产品的。

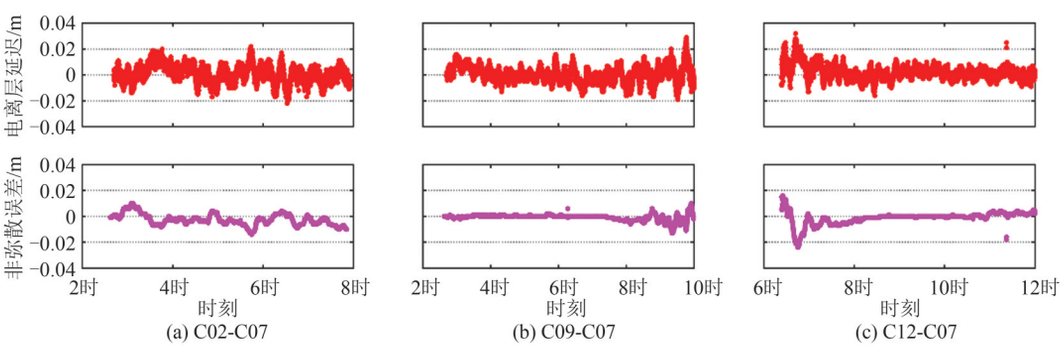


图6 BDS-2可视卫星对的电离层延迟及非弥散误差的改正数误差

Fig. 6 Residuals of Double Differenced Ionospheric Delays and Non-Dispersion Delays of BDS-2 Data

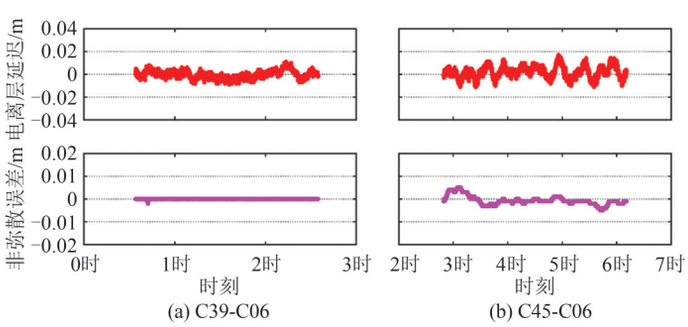


图7 BDS-2和BDS-3可视卫星对的电离层延迟及非弥散误差的改正数误差

Fig. 7 Residuals of Double Differenced Ionospheric Delays and Non-Dispersion Delays of BDS-2 and BDS-3 Data

此外,本文将每个历元所有可视卫星对的两类改正数的误差平均值作为该历元的改正数误差,在此基础上进一步统计了两类改正数的精度,RMS值结果如表5所示。由表5可以看出,BDS-2和BDS-2+BDS-3系统的电离层延迟误差的改正数精度均优于1.00 cm,非弥散误差的改正数精度更是优于0.50 cm,再次说明单北斗接收机数据能够提供与传统多系统GNSS接收机同样可靠的NRTK差分增强改正数产品。

表 5　BDS-2 和 BDS-2+BDS-3 系统的电离层及非弥散误差的改正数 RMS 值 /mm

Table 5　RMS Values of Ionospheric and Non-Dispersion Errors for BDS-2 and BDS-2+BDS-3 Systems /mm

误差类型	RMS	
	BDS-2	BDS-2+BDS-3
电离层延迟	9.98	7.15
非弥散误差	2.95	3.73

4　流动站用户定位性能分析

本文将利用 NRTK 产品计算得到流动站 YHYY 的定位结果,在此过程中,将模糊度组残差二次型的 Ratio 值大于 3 时的结果视为模糊度固定;将平面精度优于 5 cm、高程精度优于 10 cm 时视为模糊度正确固定。基于该判断标准,图 8 为流动站 YHYY 模糊度正确固定情况下 3 个方向的坐标误差序列。由图 8 可知,流动站 YHYY 的坐标误差序列在整体上均集中在 0 附近波动,平面 N、E 方向的误差基本在 2 cm 范围内波动,U 方向的误差基本在 5 cm 范围内波动。相较 U 方向误差,平面 N、E 方向的误差波动范围更小,表明平面方向的定位精度更高。此外,可以观察到 4 时至 5 时的模糊度未能正确固定,这可能是由于该时间段内电离层变化较为活跃所导致的。

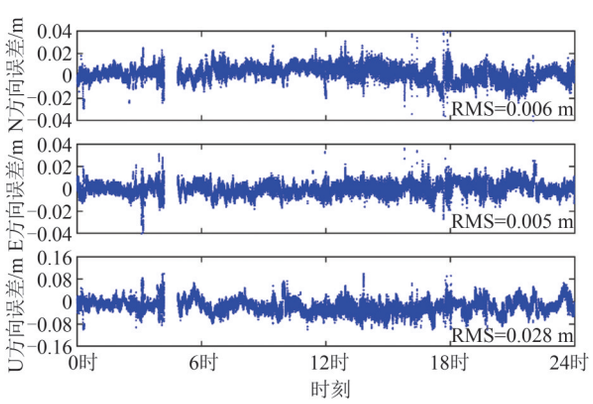


图 8　流动站 YHYY 在 3 个方向的坐标误差序列

Fig. 8　Coordinate Error Sequences of the Rover Station YHYY in Three Directions

此外,本文以模糊度固定率及模糊度正确固定率来评估模糊度的解算性能,其中模糊度固定率指模糊度固定的历元数占总历元数的百分比,而模糊度正确固定率则指模糊度正确固定的历元数占模糊度固定的历元数的百分比。经统计,模糊度固定解和正确固定解的占比以及 RMS 见表 6。由表 6 可知,流动站的模糊度固定率和模糊度正确固定率分别为 99.72% 和 96.55%,固定解和正确固定解的定位精度在水平方向均优于 2 cm,高程方向均优于 5 cm。上述结果表明,在 NRTK 流动站用户定位性能上,单北斗接收机与多系统 GNSS 接收机无显著差异,定位结果能够满足高精度测绘作业的需要。

表 6　流动站 YHYY 的固定解及正确固定解的精度统计

Table 6　Accuracy Statistics of the Fixed Solution and Correctly Fixed Solution of Rover Station YHYY

类型	比例/%	RMS/cm		
		N	E	U
固定解	99.72	1.14	1.19	4.35
正确固定解	96.55	0.64	0.50	2.81

5　结　语

为开展国产单北斗接收机的 NRTK 增强定位服务性能分析与评估工作,本文以司南 M300 Pro 单北斗接收机为例,在武汉市内的 4 个站点进行了数据采集。使用自主研发的 NRTK 数据处理软件 PowerNetwork,处理 2024-02-06 一天的观测数据,并对基准站间模糊度解算、误差改正数生成和流动站用户定位结果进行分析,得到如下结论:

1)在基准站间模糊度解算方面,采用 IFTCAR 方法解算 BDS-2 三频数据、采用 MW 组合方法解算 BDS-2 和 BDS-3 的 B1I+B3I 双频数据,两种数据处理模式所得 3 条基线共视卫星对的 B1I-B3I 宽巷模糊度均能快速收敛,且同属于 IGSO 的卫星对能更好的收敛。此外,3 条基线的宽巷模糊度和原始模糊度残差的平均标准差均优于 0.1 周,同多 GNSS 系统接收机模糊度解算性能一致,均能可靠确定模糊度。

2)在误差改正数生成方面,BDS-2 以及 BDS-2+BDS-3 的电离层延迟和非弥散误差改正数整体上均集中在 0 附近波动,且两者的电离层延迟误差精度均优于 1.00 cm,非弥散误差精度优于 0.50 cm,与多 GNSS 系统接收机的内插精度相一致,可提供与传统多系统 GNSS 接收机同样可靠的 NRTK 差分增强改正数产品

3)在流动站用户定位方面,用户端模糊度固定率和正确固定率分别为 99.72% 和 96.55%;固定解及正确固定解的定位精度在水平方向均优于 2 cm,高程方向均优于 5 cm。表明在 NRTK 流动站用户定位性能上,单北斗接收机与多系统 GNSS 接收机无显著差异,定位精度能够满足高精度测绘作业的需要。

由于目前实验条件有限,本文仅以司南M300 Pro单北斗接收机为例,使用软件Power-Network对单北斗接收机NRTK性能进行了评估与分析。在后续实验条件具备时,将选取间距更长的静态站开展单北斗数据采集,进一步对比分析其他型号单北斗接收机的NRTK性能及不同NRTK软件处理单北斗数据的结果。

参 考 文 献

[1] 刘经南,赵建虎,马金叶. 通导遥一体化深远海PNT基准及服务网络构想[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1523-1534.
LIU Jingnan, ZHAO Jianhu, MA Jinye. Concept of Constructing the Underwater PNT Network with the Abilities of Communication, Navigation and Remote Sensing in the Deep Sea[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10):1523-1534.

[2] 施闯,郑福,楼益栋,等. 北斗高精度时频服务理论方法与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1010-1018.
SHI Chuang, ZHENG Fu, LOU Yidong, et al. BDS High-Precision Time and Frequency Service Theorical Method and Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7):1010-1018.

[3] 张新,李子申,潘洁,等. 时空具身智能:北斗导航与高分遥感融合发展新方向[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(9):1733-1754.
ZHANG Xin, LI Zishen, PAN Jie, et al. Spatio-temporal Embodied Intelligence: A New Fusion Direction of BeiDou Satellite Navigation System and High-Resolution Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(9):1733-1754.

[4] 陈秀德,刘惠,蔚保国,等. 北斗/GNSS广域精密定位技术与服务:现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):413-429.
CHEN Xiude, LIU Hui, YU Baoguo, et al. BeiDou/GNSS Wide-Area Precise Positioning Technology and Service: Current Situation and Prospects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3):413-429.

[5] 陆克,杨晓磊,张光华. BDS-CDRadio精准定位技术分析与海洋应用展望[J]. 测绘标准化,2024,40(4):96-104.
LU Ke, YANG Xiaolei, ZHANG Guanghua. Analysis of BDS-CDRadio Precise Positioning Technology and Prospects for Its Applications in Marine Areas[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2024, 40(4):96-104.

[6] 胡倬铭,袁海军,何秀凤,等. MGEX差分码偏差产品对BDS-3伪距单点定位的影响研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):756-764.
HU Zhuoming, YUAN Haijun, HE Xiufeng, et al. Influence of MGEX Differential Code Bias Products on BDS-3 Pseudorange Single Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5):756-764.

[7] 王乐,陆文龙,解世超,等. 北斗三号MEO卫星B1C/B2a信号单系统精密产品性能评估[J]. 测绘地理信息,2026,51(1):157-166.
WANG Le, LU Wenlong, XIE Shichao, et al. Performance Evaluation of BDS-3 MEO Satellite B1C/B2a Signal-Based Single-System High Precision Products[J]. *Journal of Geomatics*, 2026, 51(1):157-166.

[8] 张郅一,谢新,赵齐乐,等. 顾及空间信号测距误差补偿的BDS-3 PPP-B2b定位性能提升方法[J]. 导航定位学报,2025,13(5):102-108.
ZHANG Zhiyi, XIE Xin, ZHAO Qile, et al. BDS-3 PPP-B2b Positioning Considering Signal-in-Space Ranging Error Compensation[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2025, 13(5):102-108.

[9] PAZIEWSKI J, WIELGOSZ P. Assessment of GPS+Galileo and Multi-Frequency Galileo Single-Epoch Precise Positioning with Network Corrections[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4):571-579.

[10] 姚宜斌,胡明贤,许超钤. 基于DREAMNET的GPS/BDS/GLONASS多系统网络RTK定位性能分析[J]. 测绘学报,2016,45(9):1009-1018.
YAO Yibin, HU Mingxian, XU Chaoqian. Positioning Accuracy Analysis of GPS/BDS/GLONASS Network RTK Based on DREAMNET[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9):1009-1018.

[11] 祝会忠,刘经南,唐卫明,等. 长距离网络RTK基准站间整周模糊度单历元确定方法[J]. 测绘学报,2012,41(3):359-365.
ZHU Huizhong, LIU Jingnan, TANG Weiming, et al. The Algorithm of Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution Between Long-Range Network RTK Base Stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3):359-365.

[12] 唐卫明,刘经南,施闯,等. 三步法确定网络RTK基准站双差模糊度[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(4):305-308.
TANG Weiming, LIU Jingnan, SHI Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Dif-

ference Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2007, 32(4): 305-308.

[13] LI B F, SHEN Y Z, FENG Y M, et al. GNSS Ambiguity Resolution with Controllable Failure Rate for Long Baseline Network RTK[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2): 99-112.

[14] PU Y K, SONG M, YUAN Y B, et al. Triple-Frequency Ambiguity Resolution for GPS/Galileo/BDS Between Long-Baseline Network Reference Stations in Different Ionospheric Regions[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 146.

[15] WANG S L, DENG J, OU J K, et al. Three-Step Algorithm for Rapid Ambiguity Resolution Between Reference Stations Within Network RTK[J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(6): 1310-1324.

[16] TANG W M, DENG C L, SHI C, et al. Triple-Frequency Carrier Ambiguity Resolution for Beidou Navigation Satellite System[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 335-344.

[17] TANG W M, SHEN M X, DENG C L, et al. Network-Based Triple-Frequency Carrier Phase Ambiguity Resolution Between Reference Stations Using BDS Data for Long Baselines[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 73.

[18] 章繁, 柴洪洲, 王敏, 等. BDS-3三频非差非组合PPP模糊度快速固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 656-665.
ZHANG Fan, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. BDS-3 Triple-Frequency Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 656-665.

[19] 唐卫明, 刘经南, 刘晖, 等. 一种GNSS网络RTK改进的综合误差内插方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(12): 1156-1159.
TANG Weiming, LIU Jingnan, LIU Hui, et al. A Modified Combined Bias Interpolation Method for GNSS Network RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2007, 32(12): 1156-1159.

[20] 邓健, 赵兴旺, 张爱国. 长距离稀疏参考站下网络RTK电离层误差内插模型精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(3): 236-240.
DENG Jian, ZHAO Xingwang, ZHANG Aiguo. Interpolation Accuracy Analysis of Ionospheric Error for Long-Range and Sparse Reference Stations of Network RTK[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(3): 236-240.

[21] 邵先锋, 孙明刚, 杨仲吕, 等. 不同距离参考站下网络RTK电离层内插模型精度分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(10): 57-62.
SHAO Xianfeng, SUN Minggang, YANG Zhonglü, et al. Analysis of Ionospheric Interpolation Accuracy in Network RTK[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2019, 47(10): 57-62.

[22] 祝会忠, 张杰, 赵齐乐, 等. BDS-3/BDS-2多频数据的长距离非差网络RTK算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1146-1159.
ZHU Huizhong, ZHANG Jie, ZHAO Qile, et al. An Algorithm of Long Distance Undifference Network RTK with BDS-3/BDS-2 Multi-Frequency Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1146-1159.

[23] WANG P X, NIE G G, LIU H, et al. An Ionosphere-Weighted Calibration Method with Multi-Station Network Corrections[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(9): 3982-3997.

[24] CUI J H, TANG W M, JIN L, et al. An Improved Ionosphere Interpolation Algorithm for Network RTK in Low-Latitude Regions[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4): 109.

[25] ZHU H Z, ZHANG J, LI J, et al. An Efficient BDS-3 Long-Range Undifferenced Network RTK Positioning Algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 1-24.

[26] LIU J H, TU R, HAN J Q, et al. Initial Evaluation and Analysis of NRTK Positioning Performance with New BDS-3 Signals[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(1): 014002.

[27] WANG P X, LIU H, YANG Z X, et al. Evaluation of Network RTK Positioning Performance Based on BDS-3 New Signal System[J]. *Remote Sensing*, 2021, 14(1): 1-18.

[28] 施闯, 赵齐乐, 楼益栋, 等. 卫星导航系统综合分析处理软件PANDA及研究进展[J]. 航天器工程, 2009, 18(4): 64-70.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LOU Yidong, et al. PANDA: Comprehensive Processing Software for Satellite Navigation Systems and Its Research Progress[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(4): 64-70.

[29] 唐卫明, 刘经南, 陈日高. PowerNetwork软件关键技术介绍和性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(8): 868-871.
TANG Weiming, LIU Jingnan, CHEN Rigao. Introduction of PowerNetwork's Key Technolgies and Analysis of Its Performance[J]. *Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2008, 33(8): 868-871.