



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：单北斗接收机网络 RTK 增强定位服务性能分析
作者：唐卫明, 张思宇, 邓辰龙, 戚克培, 聂肖虎, 邹璇, 李洋洋
DOI: 10.13203/j.whugis20240157
收稿日期: 2024-06-19
网络首发日期: 2024-07-17
引用格式: 唐卫明, 张思宇, 邓辰龙, 戚克培, 聂肖虎, 邹璇, 李洋洋. 单北斗接收机网络 RTK 增强定位服务性能分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240157>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240157

引用格式：

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240157 (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, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240157)

单北斗接收机网络 RTK 增强定位服务性能分析¹

唐卫明¹, 张思宇¹, 邓辰龙², 戚克培¹, 聂肖虎³, 邹璇¹, 李洋洋¹

1. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079
2. 武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉, 430063
3. 中国石化销售股份有限公司华中分公司, 湖北 武汉, 430015

摘要：近年来, 国产单北斗定位终端研制与推广的需求日益增强。网络 RTK 技术作为北斗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。本文将利用武汉大学自主研发的网络 RTK 数据处理软件 PowerNetwork 对单北斗接收机的网络 RTK 服务性能进行系统分析和评估。实验以司南 M300 Pro 单北斗接收机为例, 在武汉市四个站点进行了数据采集, 然后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三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三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 0.50cm; 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 1cm, 高程方向优于 5cm。单北斗接收机在上述三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

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

TANG Weiming¹, ZHANG Siyu¹, DENG Chenlong², QI Kepei¹, NIE Xiaohu³, ZOU Xuan¹, LI Yangyang¹

¹ 收稿日期: 2024-06-19

基金项目：国家重点研发计划课题(2022YFB3904601); 2023 年湖北省重大攻关项目(JD)(2023BAA02601); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(WUT: 2024IVA047)。

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

通信作者：唐卫明, 博士, 教授。wmtang@whu.edu.cn

1. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
3. Central China Branch of SINOPEC Sales Co., Ltd, Wuhan 430015, China

Abstract: Objectives: With the completion and operation of China's Beidou-3 navigation satellite system (BDS-3), the BDS provides 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 homemade standalone BDS receivers has been increasingly growing in recent years. **Methods:** The data of standalone BDS receivers will be process by the NRTK software PowerNetwork, which developed independently 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, 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. In the first aspect, the ionospheric-free three-carrier ambiguity resolution (IF TCAR) method is used to process the three-frequency observations of BDS-2, while the B1I+B3I dual-frequency observations of BDS-2/3 are processed by the MW method. In the second aspect, the corrections including dispersive and non-dispersive errors for the rover station are obtained by linear interpolation algorithm. In the positioning calculations, the Kalman method is employed to determine the float ambiguity, and then the optimal position of the rover station is obtained after the ambiguity is processed by the LAMBDA 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 the first aspect. In the second aspect, the accuracy of the ionospheric delay and non-dispersive errors for all visible satellite pairs is better than 1.00 cm and 0.5cm; In the last aspect, the fixed rate and correctly fixed rate of the ambiguity for the rover are 99.72% and 96.55%, respectively. And the RMS values in the horizontal and elevation directions are better than 1cm and 5cm, respectively. **Conclusions:** The service performance of the homemade 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, NRTK, performance evaluation, ambiguity resolution between reference station, positioning

自北斗三号全球卫星导航系统（BDS-3）全面建成以来，我国北斗开启了高质量服务全球、造福人类的新时代^[1-4]。北斗地基增强系统是北斗卫星导航系统的重要组成部分，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^[5-7]。网络 RTK 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^[8-10]。近年来，国产单北斗定位终端的研制与推广需求日益增强^[11]。目前，国内市场已有数款能够独立接收北斗信号的单北斗终端产品，鉴于其信号捕获方式的改变，单北斗接收机的网络 RTK 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网络 RTK 增强定位服务性能分析评估工作。

网络 RTK 技术的数据处理主要包括：基准站间双差模糊度固定、误差改正数生成和客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[12, 13]分别提出了一种网络 RTK 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[14-16]充分利用电离层约束模型和对流层约束信息解决了网络 RTK 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网络 RTK 基准站间模糊度解算。随着北斗系统的不断完善和发展，许多学者使用北斗数据开展相关研究。文献[17]介绍了基于几何相关的三频相位模糊度解算(Geometry-Based Three-Carrier Ambiguity Resolution, GB TCAR)和基于几何无关模型的 TCAR (Geometry-Free TCAR, GF TCAR)方法，并采用北斗三频数据分析了模糊度固定性能；文献[18]为解决 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，提出了一种无电离层 TCAR 方法(Ionospheric-Free TCAR, IF TCAR)，并使用北斗数据验证了所提方法的模糊度解算性能；文献[19, 20]利用北斗三频观测数据评估了模糊度解算性能。文献[21]实现了基准站间双差 B1、B2 载波相位整周模糊度单历元快速解算方法。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，也常称之为综合误差。文献[22]提出综合误差内插法，直接采用线性内插方式获取用户位置的综合误差。文献[23]提出了改进的综合误差法，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。非弥散误差主要是对流层延迟误差，原因在于双差后残余的高阶电离层延迟误差和轨道误差的量级极小。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网络 RTK 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^[24,25]。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，许多文献评估了网络 RTK 定位性能。文献[26]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网络 RTK 的定位性能；文献[27]使用 DREAMNET 软件对 GPS/BDS/GLONASS 的网络 RTK 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 0.006m、高程 0.015m；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 0.01m、高程 0.025m 的定位精度；文献[28-30]研究了使用不同的电离层矫正模型用于提升网络 RTK 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，现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[31]基于实测北斗三频数据评估了用户端动态定位解算精度：平面定位中误差为 3-4cm，高程方向约为 5cm；文献[32, 33]的实验结果表明，北斗三号单系统流动站可实现厘米级定位；北斗三号的引入进一步提升了北斗二号的定位精度；文献[34]从频率角度详细分析了北斗系统用户端模糊度固定率和定位精度，指出在北斗三号系统使用信号(B1C+B2a)和 (B1I+B3I)提供虚拟基准站服务时，用户终端 RTK 固定率在 95%以上，水平精度和高程精度分别在 1cm 和 2cm 以内。BDS-2/3 的 B1I+B3I 组合处理效果最佳，E、N 方向精度优于 0.5 cm，U 方向精度优于 1.5 cm。

如上所述，网络 RTK 的相关文献主要是基于多系统接收机的多频多模数据或北斗数据，有关国产单北斗接收机数据及其网络 RTK 性能分析的文献较少。本文将选用武汉市内布设的四个安装有单北斗接收机的站点，采集相应的北斗卫星观测数据，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三个方面的服务性能展开系统分析，以期对单北斗接收机的网络 RTK 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 实验与数据处理介绍

1.1 实验与数据采集

为评估和分析单北斗接收机的网络 RTK 增强定位服务性能，本文在武汉市选取了四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。四个静态站分别命名为 JXZF、WDKJ、DSCZ 和 YHYH，其位置分布如图 1 所示。其中，站点 JXZF、WDKJ、DSCZ 作为基准站并构建基准站网，在图中以黄色实心三角符号表示；站点 YHYH 作为流动站，在图中以黄色实心圆点符号表示。基准站网中基线 JXZF-WDKJ、WDKJ-DSCZ、DSCZ-JXZF 的距离分别为 14.8km、22.1 km 和 32.6km。接收机采样间隔和卫星截止高度角分别设置为 1s 和 10° ，于 2024 年 2 月 1 日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，本次实验仅呈现上述 4 个站点在 2024 年 2 月 6 日一整天（UTC 时，DOY037）的分析结果。

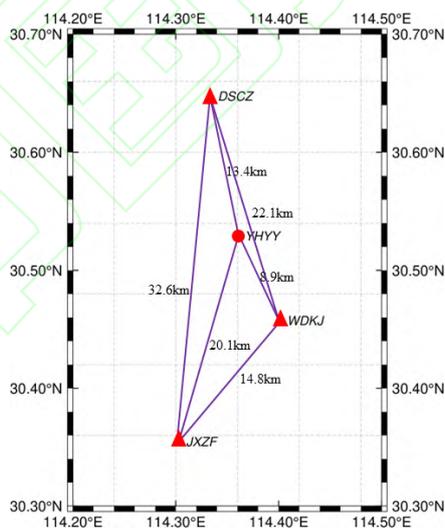


图 1 武汉市 4 个测站的站点位置分布图
Fig. 1 The Reference Station Distribution in Wuhan

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^[35]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次实验的参考坐标。然后利用武汉大学自主研发的 PowerNetwork 软件^[36]对采集的单北斗数据进行网络 RTK 数据处理，具体处理策略介绍如下。

基准站间模糊度解算采用文献[18]介绍的基于无电离层模型的三频载波模糊度解算(IF TCAR)方法

处理 BDS-2 三频观测数据，具体处理策略介绍如下。1)固定双差超宽巷模糊度：首先采用 MW 组合方法^[37; 38]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(1561.098 MHz)、B2I(1207.14 MHz)和 B3I(1268.52 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)由于如上确定的三组模糊度线性无关，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。上述数据处理过程的详细细节可参考文献[18]。此外，BDS-2/3 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 $\nabla\Delta N_{(1, 0, -1)}$ 。

误差改正数在生成过程中首先需要利用固定的原始双差模糊度得到三条基准站间基线的弥散误差和非弥散误差改正数，再以基准站 WDKJ 为主参考站、JXZF 和 DSCZ 为辅参考站，通过文献[39]的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，以评估误差改正数的性能。

网络 RTK 的流动站定位解算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，并经 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，以获取该流动站在北方向、东方向和高程方向的定位误差。

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 4.8m 的长波长，三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。

三条基准站间基线的共视卫星如图 2 所示。共视卫星中，选择北斗 C07 为参考卫星，并从北斗地球静止轨道(GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星及中圆轨道(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 方法解算三条基线的 BDS-2 三频观测数据，并以上述 3 对卫星为例，得到图 3 所示的 B1I-B3I 宽巷模糊度残差，该残差已经过历元间平滑处理。由图可以观察到所有卫星对的宽巷模糊度残差均能快速收敛。

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^[40]，进而对三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 1.0s、309.3s 和 601.0s。同时，统计模糊度收敛后残差的标准差，进而对

三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，三个卫星对的平均标准差分别为 0.033 周、0.027 周和 0.033 周。

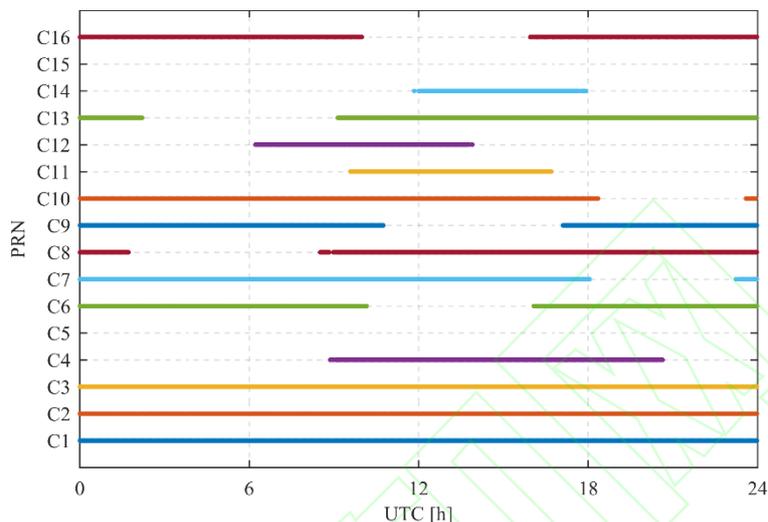


图2 三条基准站间基线共视的 BDS-2 卫星
Fig. 2 The visible BDS-2 satellite between base station DSCZ, WDKJ and JXZF

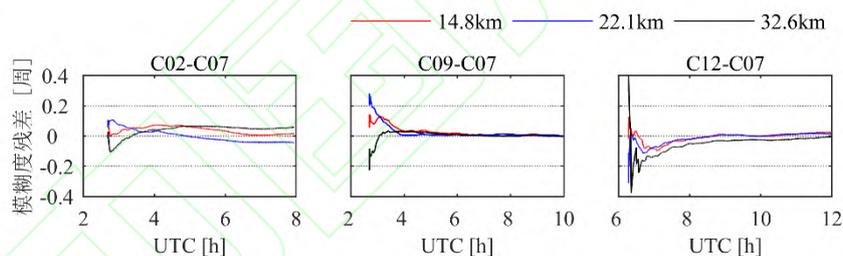


图3 基于 IF TCAR 方法解算所得 BDS-2 宽巷模糊度残差图
Fig. 3 The Optimal Wide Lane Ambiguity Residual by the IF TCAR Method with Triple Frequency Data of BDS-2

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该基线 GEO 卫星对的收敛时间及标准差，类似可得该基线其他类型卫星对的收敛时间及标准差。最后统计所有三条基线收敛时间及标准差的平均值，其结果如表 1 所示。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 500s，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 方法能够可靠确定宽巷模糊度。

表 1 三条基线所有可视 BDS-2 卫星与参考卫星 C07 的宽巷模糊度残差的收敛时间、标准差及其平均值

Tab.1 The Convergence Time, Standard Deviation and Their Mean Values of the Wide-lane Ambiguity Residuals Between all Visible Satellites of BDS-2 and the Reference Satellite C07 for Three Baselines

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-2/3 双频宽巷模糊度解算

三条基准站基线共视的 BDS-3 卫星如图 4 所示。选择 BDS-2 的 C06 为参考卫星，并从 BDS-3 的 IGSO 和 MEO 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，得到图 5 所示的宽巷模糊度残差。由图可以看出，相较于卫星对 C45-C06，卫星对 C39-C06 中三条基线的模糊度残差变化幅度较小、能更好的收敛到 0 周。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 组合方法能可靠确定 BDS-2/3 的宽巷模糊度。

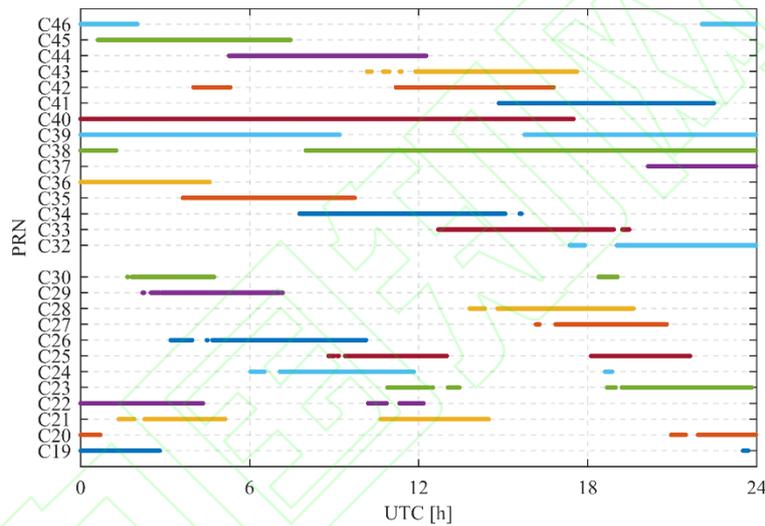


图 4 三条基准站间基线共视的 BDS-3 卫星

Fig. 4 The visible BDS-3 satellite base station DSCZ, WDKJ and JXZF

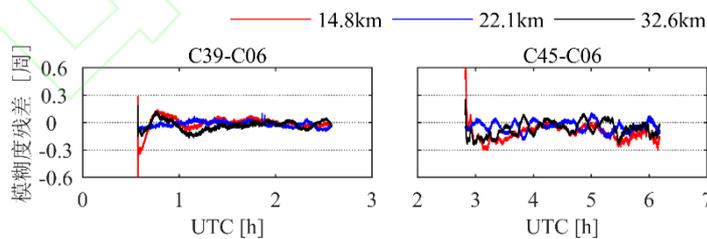


图 5 基于 MW 组合方法解算 BDS-2 和 BDS-3 的 B1I+B3I 双频数据得到的宽巷模糊度残差图

Fig. 5 The Wide Lane Ambiguity Residual by the MW Method with B1I+B3I Dual Frequency Data of BDS-2 and BDS-3

为进一步分析 BDS-2/3 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，计算了三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。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 200s，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，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。

表 2 三条基线所有可视的 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

Tab.2 The Convergence Time, Standard Deviation and Their Mean Values of the Wide-lane Ambiguity Residuals Between all Visible Satellites of BDS-3 and the Reference Satellite C06 for Three Baselines

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

此外, 对比图 3 和图 5, 容易发现在宽巷模糊度解算中, 相较于 IF TCAR 方法而言, 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, 可以观察到 IF TCAR 方法的卫星对标准差的平均值均小于 MW 组合方法。上述图和表结果均表明 IF TCAR 方法优于 MW 组合方法。

2.3 BDS 原始模糊度解算

图 6 呈现了 2.1 小节中三组卫星对的原始模糊度解算残差。由图可以观察到所有卫星对整体上都较好的收敛, 但卫星对 C02-C07 中, 基线 JXZF-DSCZ 在 5.5h 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^[40], 卫星对 C02-C07、C09-C07 和 C12-C07 的收敛时间分别为 154.3s、1238.7s 和 26.7s, 相应卫星对的平均标准差分别为 0.055 周, 0.050 周和 0.078 周。

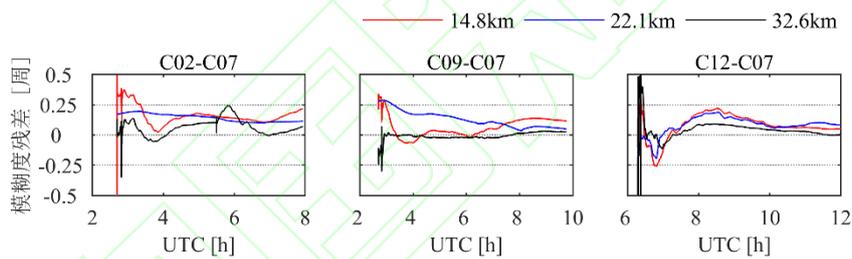


图 6 BDS-2 原始双差模糊度解算残差图
Fig. 6 The B11 Double-Differenced Ambiguity Residual of BDS-2 Data

采用与表 1 相同的统计方式, 三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、标准差及其平均值列于表 3 中。由表可知, 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 300s, 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。

表 3 三条基线所有可视的 BDS-2 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

Tab.3 The Convergence Time, Standard Deviation and Their Mean Values of the Ambiguity Residuals Between all Visible Satellites of BDS-2 and the Reference Satellite C07 for Three Baselines

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 7 呈现了 2.2 小节所介绍的卫星对的原始模糊度解算残差。从图可以看出, 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 29.7s 和 82.3s, 相应卫星对的

平均标准差分别为 0.056 周和 0.024 周。三条基线所有可视的 BDS-3 卫星与参考卫星 C06 的宽巷模糊度残差的收敛时间、标准差及其平均值列于表 4 中。由表可知，BDS-2/3 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 400s，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。

综上所述，BDS-2 和 BDS-2/3 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解算性能一致。

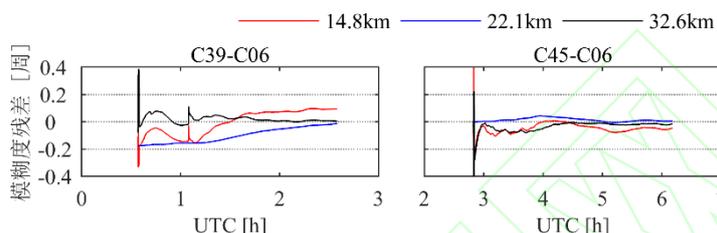


图 7 BDS-2 和 BDS-3 原始双差模糊度解算残差图

Fig.7 The B1I Double-Differenced Ambiguity Residual of BDS-2 and BDS-3 Data

表 4 三条基线所有可视的 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

Tab.4 The Convergence Time, Standard Deviation and Their Mean Values of the Wide-lane Ambiguity Residuals Between all Visible Satellites of BDS-3 and the Reference Satellite C06 for Three Baselines

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

3 误差改正数生成性能分析

为评估误差改正数性能，我们将通过线性内插得到的移动站 YHYY 处的电离层延迟及非弥散误差的改正数与对应的改正数参考值作差，绘制了图 8 和图 9 所示的 BDS-2 和 BDS-2/3 可视卫星对的改正数误差图。由图可知 BDS-2 及 BDS-2/3 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零附近波动。从图 8 可以观察到不同卫星对的电离层延迟改正数误差基本在 2cm 范围内波动，且变化频率较大，尤其是卫星对 C02-C07。相比较而言，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 3.20cm 和 2.40cm。此外，卫星对 C02-C07、C09-C07 和 C12-C07 的电离层延迟及非弥散误差的 RMS 值分别为 6.48mm 和 5.23mm、6.09mm 和 2.90mm 及 6.40mm 和 4.95mm。卫星对 C02-C07 的电离层延迟 RMS 值是所有卫星对中最大的，这与上述分析结果相一致。

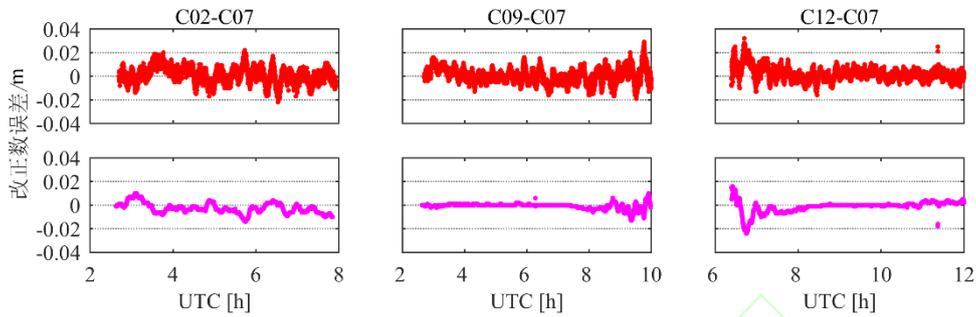


图 8 BDS-2 可视卫星对的电离层延迟(上)及非弥散误差(下)的改正数误差图

Fig. 8 The Residuals of Double Differenced Ionospheric Delays (Upper Row) and Non-Dispersion Delays (Lower Row) of BDS-2 Data

图 9 显示 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零。经统计, 卫星对 C39-C06 和 C45-C06 的电离层延迟误差改正数的 RMS 值分别为 3.45mm 和 5.56mm, 非弥散误差改正数的 RMS 值分别为 0.11mm 和 2.09mm。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网络 RTK 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。

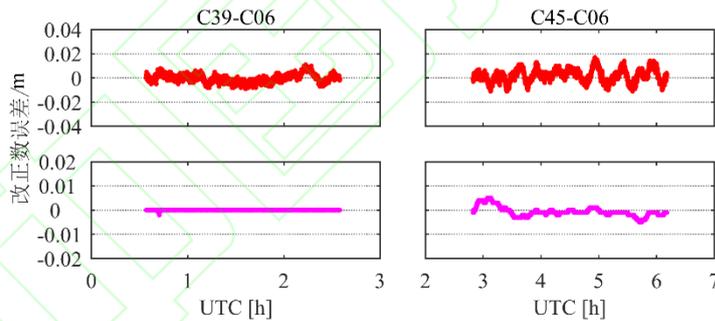


图 9 BDS-2 和 BDS-3 可视卫星对的电离层延迟(上)及非弥散误差(下)的改正数误差图

Fig. 9 The Residuals of Double Differenced Ionospheric Delays (Upper Row) and Non-Dispersion Delays (Lower Row) 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, 统计结果如表 5 所示。由表 5 可知, BDS-2 和 BDS-2/3 的电离层延迟误差的改正数精度均优于 1.00cm, 非弥散误差的改正数精度更是优于 0.50cm, 再次说明单北斗接收机数据能够提供与传统多系统 GNSS 接收机同样可靠的网络 RTK 差分增强改正数产品。

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

Tab.5 RMS Values of Ionospheric and Non-dispersion Errors for BDS-2 and BDS-2/3

误差类型	系统	
	BDS-2	BDS-2/3
电离层延迟误差	9.98mm	7.15mm
非弥散误差	2.95mm	3.73mm

4 流动站用户定位性能分析

本文将利用网络 RTK 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；平面精度优于 5cm，同时高程精度优于 10cm 时视为模糊度正确固定。基于该判断标准，图 10 呈现了流动站 YHYY 模糊度正确固定情况下北向、东向和天向的坐标误差序列。由图可知流动站 YHYY 的坐标误差序列在整体上均集中在零附近波动，平面北向和东向误差基本在 2cm 范围内波动，天向误差基本在 5cm 范围内波动。较天向误差而言，平面北向和东向的误差波动范围更小，表明该方向的定位精度将更高。此外，可以观察到的是，4-5h(UTC 时) 时间段内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。

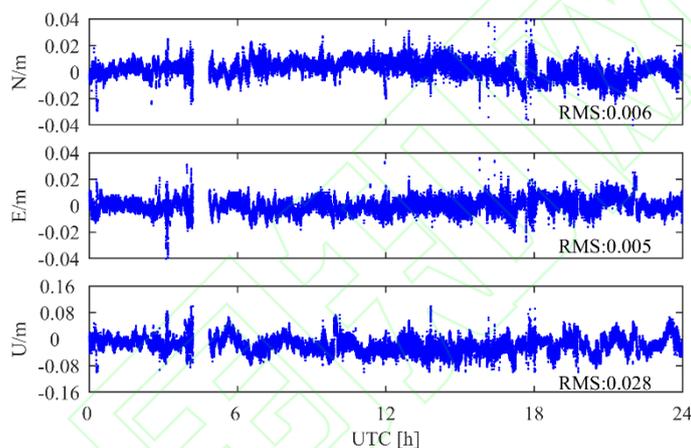


图 10 流动站 YHYY 在北向、东向和天向的坐标误差序列

Fig. 10 The Coordinate Error Sequence of the Rover YHYY in the North, East and Up Directions

此外，我们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，模糊度固定解及正确固定解的占比及 RMS 值均列于表 6。由表可知，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%，固定解及正确固定解的定位精度在水平方向均优于 2cm，高程方向均优于 5cm。上述结果表明在网络 RTK 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

Tab.6 The Accuracy Statistics of the Fixed Solution and the Correctly Fixed Solution of Rover YHYY

类型	比例 (%)	RMS (cm)		
		北	东	天
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 结论

为开展国产单北斗接收机的网络 RTK 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，在武汉市内的四个站点进行了数据采集。我们使用自主研发的网络 RTK 数据处

理软件 PowerNetwork 处理 2024 年 2 月 6 日一整天的观测数据，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 IF TCAR 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三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，三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 和 BDS-2/3 的电离层延迟误差和非弥散误差改正数整体上均集中在零附近波动，且两者的电离层延迟误差精度均优于 1.00cm，非弥散误差精度优于 0.50cm，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 接收机同样可靠的网络 RTK 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 2cm，高程方向均优于 5cm。表明在网络 RTK 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 PowerNetwork 对单北斗接收机网络 RTK 性能进行了评估与分析。在后续实验条件具备时，我们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网络 RTK 性能及不同网络 RTK 软件处理单北斗数据的结果。

参考文献

- [1] Yang Yuanxi, Yang Cheng, Ren Xia. PNT Intelligent Services[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1006-1012. (杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT 智能服务[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1006-1012.)
- [2] Shi Chuang, Zheng Fu, Lou Yidong, et al. BDS High-Precision Time and Frequency Service Theoretical Method and Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7):1010-1018. (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.)
- [3] Song Weiwei, Zhao Xinke, Lou Yidong, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 408-415. (宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(03): 408-415.)
- [4] Wang Xilong, Xu Xiaolong, Zhao Qile. Signal Quality Analysis and Orbit Accuracy Verification of BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 611-619. (王西龙, 许小龙, 赵齐乐. 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(04): 611-619.)
- [5] 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. (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(05): 756-764.)
- [6] Liu Mingliang, An Jiachun, Wang Zemin, et al. Performance Analysis of BDS-3 Multi-frequency Pseudorange Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 902-910. (刘明亮, 安家春, 王泽民, 等. BDS-3 多频伪距定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(06): 902-910.)
- [7] Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 92-100. (曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(01): 92-100.)
- [8] Liu Jingnan, Liu Hui. Continuous Operational Reference System-Infrastructure of Urban Spatial Data[J]. *Geomatics and Information Science of*

- Wuhan University, 2003, (03): 259-264. (刘经南, 刘晖. 连续运行卫星定位服务系统——城市空间数据的基础设施[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, (03): 259-264.)
- [9] Hu G R, Khoo H S, Goh P C, et al. Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(5-6): 292-302.
- [10] Rizos C. Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective[J]. *Journal of Global Positioning System*, 2002, 1(2): 144-150.
- [11] General Office of the Ministry of Transport. Opinions on Giving Full Play to the Role of the National Road Freight Vehicle Public Supervision and Service Platform to Support High-Quality Development For The Industry [Z], 2020-04-26. (交通运输部办公厅. 关于充分发挥全国道路货运车辆公共监管与服务平台作用支撑行业高质量发展的意见[Z], 2020-04-06.)
- [12] 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(03): 359-365. (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(03): 359-365.)
- [13] Tang Weiming, Liu Jingnan, Shi Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Difference Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32 (4): 305-308. (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 (04): 305-308.)
- [14] Li B, Shen Y, Feng Y, et al. GNSS Ambiguity Resolution with Controllable Failure Rate for Long Baseline Network RTK[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2): 99-112.
- [15] Pu Y, Song M, Yuan Y, 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).
- [16] Shengli W, Jian D, Jikun O, et al. Three-step Algorithm for Rapid Ambiguity Resolution between Reference Stations within Network RTK[J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(6): 1310-1324.
- [17] Tang W, Deng C, Shi C, et al. Triple-Frequency Carrier Ambiguity Resolution for Beidou Navigation Satellite System[J]. *GPS solutions*, 2014, 18(3): 335-344.
- [18] Tang W, Shen M, Deng C, et al. Network-based triple-frequency carrier phase ambiguity resolution between reference stations using BDS data for long baselines[J]. *GPS solutions*, 2018, 73(22): 1-10.
- [19] Gao W, Gao C F, Pan S G, et al. Method and Assessment of BDS Triple-Frequency Ambiguity Resolution for Long-Baseline Network RTK[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2520-2532.
- [20] Gao Meng, Xu Aigong, Zhu Huizhong, et al. The Algorithm of triple-frequency Ambiguity Resolution between BDS Network RTK Reference Stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(4): 442-452. (高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. BDS 网络 RTK 参考站三频整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(04): 442-452.)
- [21] Zhu Huizhong, Xu Aigong, Gao Meng, et al. The Algorithm of Single-epoch Integer Ambiguity Resolution between Middle-Range BDS Network RTK Reference Stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(01): 50-57. (祝会忠, 徐爱功, 高猛, 等. BDS 网络 RTK 中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(01): 50-57.)
- [22] Gao Xingwei, Liu Jingnan, Ge Maorong. An Ambiguity Searching Method for Network RTK Baselines Between Base Stations at Single Epoch[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(4): 305-309. (高星伟 刘经南, 葛茂荣. 网络 RTK 基准站间基线单历元模糊度搜索方法[J]. 测绘学报, 2002, 31(04): 305-309.)
- [23] Tang Weiming, Liu Jingnan, Liu Hui, et al. A Modified Combined Bias Interpolation Method for GNSS Network RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12): 1156-1159. (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, (12): 1156-1159.)
- [24] 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(03): 236-240. (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(03): 236-240.)
- [25] Shao Xianfeng, Sun Minggang, Yang Zhonglyu, et al. Analysis of Ionospheric Interpolation Accuracy in Network RTK[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2019, 47(10): 57-62. (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.)
- [26] Paziewski J, Wielgosz P. Assessment of GPS plus Galileo and Multi-Frequency Galileo Single-Epoch Precise Positioning with Network Corrections[J]. *GPS solutions*, 2014, 18(4): 571-579.
- [27] 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. (姚宜斌, 胡明贤, 许超钦. 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(09): 1009-1018.)
- [28] 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. (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(07): 1146-1159.)
- [29] Wang P, Nie 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.

- [30] 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): 1-11.
- [31] Gao Wang, Gao Chengfa, Pan Shuguo, et al, Single-epoch Positioning Method in Network RTK with BDS Triple-frequency Wide lane Combinations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 641-648. (高旺, 高成发, 潘树国, 等. 北斗三频宽巷组合网络 RTK 单历元定位方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 641-648.)
- [32] Zhu H, 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.
- [33] 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): 1-11.
- [34] 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*, 2022, 14(1): 1-18.
- [35] 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 (04):64-70. (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 (04):64-70.)
- [36] Tang Weiming, Liu Jingnan, Chen Rigao, Introduction of PowerNetwork's Key Technologies and Analysis of its Performance[J], *Geomatics and information Science of Wuhan University*, 2008, (08): 868-871. (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, (08): 868-871.)
- [37] Melbourne W. The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems[C]. Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System, 1985: 373-386.
- [38] Wübbena G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI4100 Code and Carrier Measurements[C]. Proceedings of the first International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, 1985.
- [39] St-Pierre C, Santerre R, Parrot D. Improvement of OTF-Kinematic GPS Positioning over Long Distances Using Ionospheric Regional Modelling[J]. *Geomatica*, 1999, 53(4): 395-403.
- [40] Li Y, Shen M, Yang L, et al. Initial Assessment of Galileo Triple-Frequency Ambiguity Resolution between Reference Stations in the Hong Kong Area[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(4): 778.

网络首发:

标题: 单北斗接收机网络 RTK 增强定位服务性能分析

作者: 唐卫明, 张思宇, 邓辰龙, 戚克培, 聂肖虎, 邹璇, 李洋洋

收稿日期: 2024-06-19

DOI:10.13203/j.whugis20240157

引用格式:

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240157 (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*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240157)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

BDS-3 和 Galileo 组合的 RTK 定位性能分析

糜晓龙, 袁运斌, 张宝成

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 113-118.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200483>

广域瞬时厘米级精密单点定位和服务系统

赵齐乐, 陶钧, 郭靖, 陈国, 许小龙, 张强, 张高舰, 徐胜意, 李俊强

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1058-1069.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230202>

BDS-3/BDS-2 多频数据的长距离非差网络 RTK 算法

祝会忠, 张杰, 赵齐乐, 徐爱功

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1146-1159.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220797>

