



三家北斗地基增强系统的高精度定位服务性能对比分析

史俊波, 欧阳晨皓, 岳金广, 陈明, 郭际明

引用本文:

史俊波, 欧阳晨皓, 岳金广, 陈明, 郭际明. 三家北斗地基增强系统的高精度定位服务性能对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(7): 712–715.

Shi Junbo, Ouyang Chenhao, Yue Jinguang, Chen Ming, Guo Jiming. High-Precision Positioning Service Performance Analysis of Three BDS Ground-Based Augmentation Systems[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(7): 712–715.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.07.009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北斗三号新信号中长基线RTK定位研究

Research on Medium-Long Baseline RTK Positioning of BDS-3 New Signal

大地测量与地球动力学. 2022, 42(7): 716–721 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.07.010>

不同光压模型对北斗IGSO与MEO卫星定轨的适用性分析

Applicability of Different Solar Radiation Pressure Models for Beidou IGSO and MEO Satellites Orbit Determination

大地测量与地球动力学. 2022, 42(1): 9–14 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.01.003>

北斗卫星广播星历精度评估与单点定位优化模型

Beidou Satellite Broadcast Ephemeris Accuracy Evaluation and SPP Optimization Model

大地测量与地球动力学. 2022, 42(3): 291–297 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.03.014>

基于BDS-3 PPP-B2b服务的实时PPP性能分析

Performance Analysis of Real-Time PPP Based on BDS-3 PPP-B2b Service

大地测量与地球动力学. 2022, 42(6): 616–621 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.06.012>

华为P40手机北斗三频观测数据质量及噪声分析

Quality and Noise Analysis of BDS Triple-Frequency Observation from Huawei P40 Mobile Phone

大地测量与地球动力学. 2021, 41(7): 661–665, 699 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2021.07.001>

三家北斗地基增强系统的高精度定位服务性能对比分析

史俊波¹ 欧阳晨皓¹ 岳金广¹ 陈 明² 郭际明¹

1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079

2 国家基础地理信息中心,北京市莲花池西路 28 号,100830

摘 要: 北斗地基增强系统是推广高精度“北斗+”应用的重要基础设施。本文首次研究千寻位置、六分科技及中国移动 3 家覆盖全国的北斗地基增强系统的定位服务性能,通过对 2021-07-21~22 采集的 2 次 8~9 h 观测数据进行分析,得到以下结论: 1) 千寻位置和中国移动的官方推荐挂载点支持 BDS-2 三频信号和 BDS-3 双频信号(B1I、B3I),六分科技支持 BDS-2 和 BDS-3 双频信号(B1I、B3I); 2) 3 家北斗地基增强系统都能提供 100% 的北斗数据完整率; 3) 静态基线结果表明,3 家北斗地基增强系统虚拟基站组成的闭合环相对误差均小于 2×10^{-6} ; 4) 单历元 RTK 解算结果表明,3 家北斗地基增强系统均能够提供水平向优于 3 mm、垂直向优于 9 mm 的内符合精度,但不同北斗地基增强系统之间存在 cm~dm 级的定位结果偏差,因此不建议在 RTK 作业时使用不同的北斗地基增强系统。

关键词: 北斗地基增强系统;千寻位置;六分科技;中国移动;网络实时动态差分定位

中图分类号: P228

文献标识码: A

北斗地基增强系统最早由各省市的测绘部门组织建设并提供服务,随着“互联网+”业务范围的逐渐扩大,目前我国已出现了多家覆盖全国的商用北斗地基增强系统,包括 2016 年推出的千寻位置、2020-07 推出的六分科技和 2020-10 推出的中国移动北斗地基增强系统,其中千寻位置提供的网络 RTK 是国内最早的商用北斗地基增强系统,已有学者对其服务进行了较为详细的研究^[1-3]。

3 家北斗地基增强系统的网络 RTK 服务性能对于高精度“北斗+”的推广应用具有重要意义,但目前尚未有对其较系统的比较分析。本文从 3 家网络 RTK 服务提供商对北斗三号新卫星和新信号的支持情况、北斗原始观测值的数据质量及高精度定位性能等方面进行详细分析,给北斗地基增强系统网络 RTK 用户提供使用建议。

1 北斗原始观测数据质量分析指标

本文选取数据完整率、多路径误差、信噪比、周跳比这 4 项指标对北斗地基增强系统的北斗原始观测数据进行质量分析,各指标的具体含义为:

1) 数据完整率为实际观测历元数与理论观测历元数的百分比,计算公式如下:

$$\alpha = \frac{N_i}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, α 为数据完整率, N_i 为实际观测历元数, N_0 为理论观测历元数。

2) 多路径误差 MP_{ij} 为观测信号第 i 频率相对于第 j 频率上多路径效应的影响, MP_{ij} 的值越小,抗多路径效应的能力越强。 MP_{ij} 的计算公式如下:

$$MP_{ij} = P_i - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\varphi_i + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\varphi_j \quad (2)$$

式中, P_i 为第 i 频率上的伪距观测值, φ_i 、 φ_j 分别为第 i 和第 j 频率上的相位观测值, α 为第 i 和第 j 频率 f_i 、 f_j 之比的平方,即 $\alpha = (f_i/f_j)^2$ 。

3) 信噪比(SNR)为信号功率和噪声功率之间的比率,SNR 越高,信号质量越好。SNR 可以从观测文件中直接获取。

4) 周跳比是反映周跳情况的指标,公式如下:

$$o/slip = \frac{\text{num_of_all}}{\text{num_of_slip}} \quad (3)$$

收稿日期:2021-09-17

项目来源:国家自然科学基金(41804038);国家大坝安全工程技术研究中心开放基金(CX2020B04);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金(20-02-04)。

第一作者简介:史俊波,博士,副教授,主要从事 GNSS 高精度定位研究,E-mail: jbsbi@sgg.whu.edu.cn。

式中, $o/slip$ 表示观测值数 num_of_all 和周跳数 num_of_slip 的比值,比值越小,周跳情况越严重。

2 北斗地基增强系统网络 RTK 服务原始数据采集方案

本文通过自编 Ntrip 客户端软件获取千寻位置、六分科技及中国移动 3 家北斗地基增强系统网络 RTK 服务的原始数据。需要指出的是,每个网络 RTK 服务都提供了多个挂载点,每个挂载点对北斗卫星系统和观测值信号的支持能力不一样。为保证数据分析的一致性,本文选取官方推荐的挂载点,分别为 AUTO(千寻位置)、RTCM32_GRECJ2(六分科技)、RTCM33_GRCE(中国移动),且均选择 CGCS2000 坐标框架对应

的端口号。

依据 Ntrip 协议客户端与服务端的交互逻辑,在 2021-07-21~22 以 $31^{\circ}00'58.345''$ 、 $109^{\circ}27'55.891''$ 模拟用户近似坐标,分别实时接收 8~9 h 的网络 RTK 服务原始数据,并按照 RTCM V3.3 给定的标准格式进行解码。由文献[2-4]可知,目前北斗地基增强系统为虚拟格网模式,而非传统虚拟基站模式,因此本文实际采集的 3 个基准站数据是距用户坐标最近的虚拟格网点的虚拟观测数据,具体采集情况如表 1 所示。由表可见,3 家系统返回的虚拟格网点与用户的距离小于 $58.4''$ N、 $56.0''$ E(约 2.4 km),千寻位置与中国移动虚拟格网点的椭球高差仅为 4.2 cm,而与六分科技的椭球高差为 779.808 m。

表 1 3 家北斗地基增强系统网络 RTK 服务原始数据采集情况

Tab. 1 Raw data collection situation of three BDS ground-based augmentation system network RTK service			
服务提供商	采集时间	用户近似坐标	虚拟格网点坐标
千寻位置	2021-07-21 08:58:03~17:28:08	$31^{\circ}00'58.345''$ N, $109^{\circ}27'55.891''$ E 椭球高:0.000 m	$31^{\circ}01'01.204''$ N, $109^{\circ}27'10.780''$ E 椭球高:234.003 m
六分科技			$31^{\circ}01'32.378''$ N, $109^{\circ}28'31.293''$ E 椭球高:1 013.811 m
中国移动	2021-07-22 08:17:07~16:25:36		$31^{\circ}00'00.004''$ N, $109^{\circ}26'59.980''$ E 椭球高:234.045 m

3 结果与分析

3.1 3 家北斗地基增强系统对北斗卫星系统和信号的支持情况

相较于 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统相对固定的星座和信号结构,北斗卫星导航系统遵循逐步建设、逐步完善的发展规律。由于北斗二号卫星系统的正式宣布时间(2012-12)远早于 3 家网络 RTK 服务提供商的成立时间,这 3 家提供商的网络 RTK 服务支持所有北斗二号卫星(C01-C16)。但是针对 2020-07 正式宣布的北斗三号卫星系统^[5-6],这 3 家提供商的支持能力各有不同。表 2 为 3 家北斗地基增强系统对北斗卫星的支持情况,需要指出的是,原始 RTCM 数据的解析以标准 RTCM V3.3 协议为准^[7],3 家北斗地基增强系统

在标准协议的基础上自定义数据类型,例如北斗三号新信号 B1C、B2a 均不包括在本文分析中;本文对原始北斗观测值的字符标识以标准 RINEX 3.04 协议为准^[8]。由表 2 可知:1)北斗三号卫星共 30 颗,包括 24 颗 MEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 3 颗 GEO 卫星,其中千寻位置除 C59、C60、C61 三颗 GEO 卫星外共支持 27 颗卫星,六分科技除 C61 外共支持 29 颗卫星,中国移动仅支持 C19~C30、C32~C37 共 18 颗 MEO 卫星;2)从信号类型来看,千寻位置和中国移动支持 3 个频率的伪距、相位和信噪比观测值,而六分科技仅支持 B1 和 B3 两个频率的伪距、相位和信噪比观测值;3)从具体的信号频率来看,对于北斗二号卫星,千寻位置和中国移动支持 B1I+B2I+B3I,六分科技支持 B1I+B3I;对于北斗三号卫星,3 家服务提供商均支持 B1I+B3I。

表 2 3 家北斗地基增强系统对北斗系统的支持情况(2021-07-21~22)

Tab. 2 Support for BDS by three BDS ground-based augmentation system(2021-07-21~22)			
服务提供商	千寻位置	六分科技	中国移动
支持的 BDS-3 卫星	24MEO+3IGSO	24MEO+3IGSO+2GEO	18MEO
信号类型	C2I L2I S2I C6I L6I S6I C7I L7I S7I	C2I L2I S2I C6I L6I S6I	C2I L2I S2I C6I L6I S6I C7I L7I S7I
信号频率	BDS-2 B1I、B2I、B3I BDS-3 B1I、B3I	B1I、B3I B1I、B3I	B1I、B2I、B3I B1I、B3I

3.2 3 家北斗地基增强系统网络 RTK 服务北斗原始数据质量

利用本文提供的数据完整率、多路径误差、信

噪比、周跳比 4 项指标计算公式得到 3 家网络 RTK 服务提供商的基准站北斗数据质量(表 3 和图 1)。结果表明:1)3 家服务提供商的北斗数

据完整率均为 100%；2)六分科技不支持第二频率,故没有 MP2 和 SNR2 指标,3 家服务提供商提供的北斗数据多路径误差都不超过 0.13 m；3)3 家服务提供商的信噪比为 43.84~48.13 dB；4)中国移动的周跳比最低,小于千寻位置和六分科技。

表 3 3 家北斗地基增强系统网络 RTK 服务北斗原始数据质量

Tab. 3 Raw data quality of three BDS ground-based augmentation system network RTK service									
日期	服务提供商	数据完整率/%	多路径效应/m			信噪比/dB			周跳比
			MP1	MP2	MP3	SNR1	SNR2	SNR3	
2021-07-21	千寻位置	100	0.13	0.08	0.04	44.49	46.21	46.33	417 854
	六分科技	100	0.03	—	0.04	48.13	—	45.53	399 569
	中国移动	100	0.11	0.08	0.13	43.99	45.47	44.87	6 715
2021-07-22	千寻位置	100	0.13	0.08	0.04	44.10	46.19	46.08	399 793
	六分科技	100	0.03	—	0.04	47.85	—	45.39	376 702
	中国移动	100	0.10	0.08	0.13	43.84	45.29	44.90	12 212

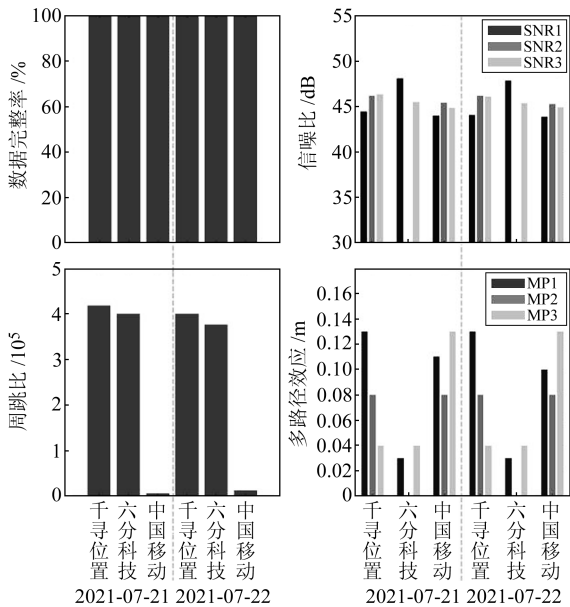


图 1 3 家北斗地基增强系统网络 RTK 服务的北斗原始数据完整率、多路径效应、信噪比、周跳比
Fig.1 Data integrity, multipath effect, signal-to-noise ratio and cycle slip ratio of three BDS ground-based augmentation system network RTK service

3.3 3 家北斗地基增强系统的高精度定位性能

3.3.1 高精度定位解算方案

取 2021-07-22 采集的数据,按照 2 种解算模式对 3 家系统的定位性能进行分析:1)从控制测量应用的角度出发,按照单基线解算模式计算 3 个虚拟基站之间的基线向量,并统计闭合差等指标;2)从变形监测应用的角度出发,将 3 个虚拟站数据分别

模拟为基准站和监测站,按照单历元 RTK 模式解算,选取该虚拟站对应的 RTCM 1005 报文中的虚拟格网坐标作为定位结果的参考。以上 2 种解算模式均采用 B1I 单频信号,且设置了 BDS-2 和 BDS-2+3 进行对比分析实验。

3.3.2 单基线解算结果

表 4 为 3 个虚拟基准站之间基线向量组成的闭合差统计结果,其中闭合环长度为 8.19 km,基于 BDS-2 观测数据的闭合差为 10.2 mm,相对误差为 1.24×10^{-6} ;基于 BDS-2+3 观测数据的闭合差为 13.3 mm,相对误差为 1.62×10^{-6} 。

表 4 单基线解算结果的闭合差统计结果

Tab. 4 Misclosure of single-baseline solution				
使用的卫星系统	闭合差分量/mm			边长闭合差/mm
	dX	dY	dZ	
BDS-2	-5.6	6.0	-6.0	10.2
BDS-2+3	-6.9	11.1	2.2	13.3

3.3.3 单历元 RTK 解算结果

如表 5 所示,本文共进行 6 组单历元 RTK 解算实验,取全时段最后 30 个历元的结果,分别统计定位误差的标准差 STD 和平均值 mean。图 2 为这 6 组定位结果误差的标准差和平均值,结果表明:1)3 个虚拟站之间的 RTK 误差 STD 水平向均小于 3 mm,垂直向均小于 9 mm,且 BDS-2+3 的稳定性优于 BDS-2;2)3 个虚拟站之间 RTK 定位误差均值存在 cm~dm 级的系统性偏差,其中六分科技和中国移动虚拟站的解算组合 RTK 误

表 5 单历元 RTK 精度统计

Tab. 5 Accuracy statistics of single-epoch RTK									
方案	基准站	监测站	卫星系统	STD/cm			mean/cm		
				E	N	U	E	N	U
1	千寻位置	六分科技	BDS-2	0.15	0.10	0.50	4.48	-1.67	-44.80
2			BDS-2+3	0.09	0.05	0.25	7.00	1.20	-35.02
3	六分科技	中国移动	BDS-2	0.20	0.19	0.77	-13.67	10.37	39.69
4			BDS-2+3	0.15	0.15	0.44	-6.57	0.87	47.28
5	中国移动	千寻位置	BDS-2	0.24	0.21	0.89	0.33	-1.68	-8.79
6			BDS-2+3	0.15	0.15	0.28	2.56	-1.21	-3.41

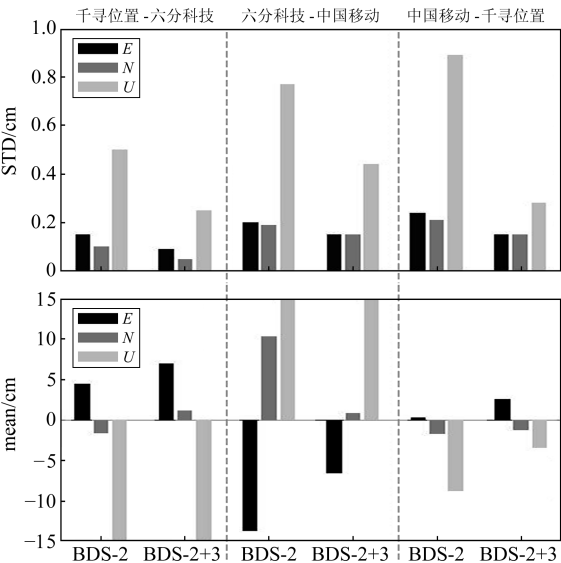


图 2 3 个虚拟格网点之间的单历元 RTK 结果
Fig. 2 Single-epoch RTK results between three virtual grid points

差均值最大,水平向高达 13.67 cm,垂直向高达 47.28 cm。这是六分科技虚拟格网点与中国移动虚拟格网点的高差高达 779.766 m 所致(表 1),在这种大高差情形下存在较大的双差对流层残差,进而会引起定位结果的系统性偏差,特别是在高程方向^[9],这同样也能解释千寻位置和六分科技之间在高程方向存在的 44.80 cm 偏差。因此,在利用北斗地基增强系统进行高精度定位作业时,建议不要使用不同的北斗地基增强系统,以避免不同北斗地基增强系统带来的定位结果偏差。

4 结 语

本文深入研究千寻位置、六分科技和中国移动 3 家北斗地基增强系统,分别采集了 2021-07-21~22 内 8~9 h 的数据,得到以下结论:

1)千寻位置和中国移动支持 BDS-2 三频信号(B1I、B2I、B3I)和 BDS-3 双频信号(B1I、B3I),六分科技支持 BDS-2 和 BDS-3 双频信号(B1I、B3I)。3 家北斗地基增强系统都能提供 100% 的北斗数据完整率,六分科技的多路径误差和信噪比指标最优,千寻位置的周跳比指标最优。

2)单基线解算结果表明,3 家北斗地基增强系统虚拟基站组成的闭合环相对误差均小于 2×10^{-6} 。单历元 RTK 解算结果表明,3 家北斗地基增强系统均能提供水平向优于 3 mm、垂直向优于 9 mm 的内符合精度,但不同北斗地基增强系统之间存在 cm~dm 级的定位结果系统性偏差,因此不建议在单历元 RTK 作业时使用不同的北斗地基增强系统。

需要指出的是,本文结论是基于 2021-07-21~22 采集数据得到的。随着各服务提供商对 BDS-3 新卫星/新信号兼容性的升级及虚拟格网生成算法的优化,3 家北斗地基增强系统服务提供商之间的系统性偏差有望减小,并最终实现北斗高精度定位服务共享。

参考文献

[1] 张艳红,张鹏,吴辉,等. 基于 RTK 的低成本 GPS+BDS 接收机设计与性能分析[J]. 测绘通报,2018(11):1-6 (Zhang Yanhong, Zhang Peng, Wu Hui, et al. Design and Performance Analysis of Low Cost GPS+BDS Receiver Based on RTK [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (11):1-6)

[2] Chen X Y, Ouyang C H, Shi J B. Virtual Reference Station(VRS) Coordinate's Pattern of Qianxun Ground-Based Augmentation System[C]. China Satellite Navigation Conference(CSNC) 2018 Proceedings, Harbin, 2018

[3] 李立弘,史俊波,欧阳晨皓. 虚拟格网技术对网络 RTK 动态定位的影响分析[J]. 测绘通报,2020(5):115-118(Li Li-hong, Shi Junbo, Ouyang Chenhao. Analysis of Virtual Grid Technology Impact on Dynamic Positioning of Network RTK [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 115-118)

[4] 刘一,谷守周,秘金钟,等. 虚拟格网化的 BDS/GPS 位置差分方法研究[J]. 测绘通报,2019(1):13-17 (Liu Yi, Gu Shouzhou, Bei Jinzhong, et al. Research on Virtual Gridized BDS /GPS Position Difference Method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1):13-17)

[5] Shi J B, Ouyang C H, Huang Y S, et al. Assessment of BDS-3 Global Positioning Service: Ephemeris, SPP, PPP, RTK, and New Signal[J]. GPS Solutions, 2020, 24(3): 1-14

[6] 肖健,史俊波,欧阳晨皓,等. 2019~2020 年北斗三号广播星历长期性能分析[C]. 第十二届中国卫星导航年会,南昌,2021 (Xiao Jian, Shi Junbo, Ouyang Chenhao, et al. Long-Term Performance Assessment of BDS-3 Broadcast Ephemeris in 2019 to 2020 [C]. The 12th Annual China Satellite Navigation Conference, Nanchang, 2021)

[7] RTCM Special Committee No. 104. RTCM Standard 10403. 3-Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services Version 3[Z]. Arlington: Radio Technical Commission for Maritime Services, 2016

[8] International GNSS Service(IGS). The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04[Z]. RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104(RTCM-SC104), 2018

[9] 蒋俊儒,陶庭叶,高飞. 一种提高大高差短基线精度的方法[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(4):319-322 (Jiang Junru, Tao Tingye, Gao Fei. A Method for Increasing Precision of Short Baseline with Large Height Difference by Using Semi-Parametric Model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016,36(4):319-322)