

BDS-2/BDS-3/QZSS 组合短基线 相对定位精度分析

郑磊, 刘成

(西南交通大学希望学院, 四川 成都 610000)

摘 要: 针对日本准天顶卫星系统(QZSS)对北斗二号(BDS-2)和北斗三号(BDS-3)短基线相对定位性能的影响, 本文基于国际 GNSS 服务(IGS)跟踪站组成的 5 km 和 10 km 两条短基线, 分析了 QZSS、BDS-2、BDS-3 不同组合短基线相对定位精度。经研究发现, QZSS 能有效改善 BDS-2 和 BDS-3 卫星可见数与卫星空间几何构型, 而 BDS-2/BDS-3 组合下的卫星可见数与卫星空间几何构型优于任一单系统。在定位精度方面, QZSS 与数据缺失情况下 BDS-3 组合定位精度与 BDS-2 相当, 同时 QZSS 能有效提升 BDS-2 和 BDS-2/BDS-3 相对定位精度, 而 BDS-3 对 BDS-2 定位精度的提升要优于 QZSS。

关键词: BDS-2; BDS-3; QZSS; 短基线; 相对定位

中图分类号: P228.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2020)05-0057-05

0 引言

随着对导航与定位需求的增加, 各国都在致力于建设发展自己的卫星导航系统。21 世纪初, 我国开始建设北斗卫星导航系统(BDS), 经历了北斗一号(BDS-1)和北斗二号(BDS-2)阶段的建设, 当前已完成北斗三号(BDS-3)的建设^[1-3]。BDS-3 于 2015 年开始进行试验建设, 截至 2020 年初, 已具备一定的全球导航定位能力, 并且可以和 BDS-2 一起为 BDS 用户提供高精度定位服务^[4-6]。BDS-2 和 BDS-3 卫星都播发 B1I 和 B3I 频率, 增强了二者组合定位的兼容性, 能更好地为 BDS 用户提供导航、定位与授时服务。准天顶卫星系统(QZSS)作为日本建设的亚太区域增强系统, 2018 年初正式提供服务, 经专家学者验证, 能有效提升亚太多数区域的定位精度^[7-9]。BDS 作为四大全球卫星导航系统之一, 自建设以来, 其定位性能一直备受关注。文献[10]发现 BDS-3 的卫星可见数与卫星空间几何构型优于 BDS-2, BDS-3 的标准单点定位精度与动态精密单点定位精度相比 BDS-2 也有较大提升。文献[11]发现在成都地区的 95% 置信度条件下,

BDS-3 的卫星空间几何构型明显优于 BDS-2, BDS-3 B1I 频率定位性能与 BDS-2 相当, 而 B3I 频率定位性能优于 BDS-2。文献[12]发现在 5 km 的短基线情况下, BDS-2/BDS-3 相对定位精度相比于 GPS 和 BDS-2 单系统有了较大提升, 而 BDS-2/BDS-3/GPS 组合相对定位外符合偏差在 5 mm 以内。文献[13]发现 BDS-3 卫星空间几何构型和伪距单点定位精度明显优于 BDS-2, 而 BDS-2/BDS-3 组合伪距单点定位精度相比 BDS-2 和 BDS-3 任一单系统都有较明显提升, 且消除了 BDS-2 定位精度与地理经度相关的边缘效应。

为进一步分析 QZSS 与 BDS-2 和 BDS-3 组合定位性能, 本文基于国际 GNSS 服务(IGS)跟踪站组成的两条短基线, 分析了 QZSS 与 BDS-2、BDS-3 以及 BDS-2/BDS-3 组合短基线相对定位精度。

1 相对定位模型

1.1 函数模型

为消除接收机与卫星钟差, 削弱电离层、对流层延迟误差, 同时保证模糊度方便固定, 在进行相对定位时一般采用双差模型。双差模型是在单差模

收稿日期: 2020-06-28

资助项目: 九寨沟地区震后滑坡监测预警研究(2018-R2-005)

通信作者: 郑磊 E-mail: yanhongchangdx@163.com

型的基础上进行卫星间求差得到,而单差模型则是测站间求差得到,表达式如下^[14-15]:

$$\begin{cases} \Delta P_{kl}^i = \Delta \rho_{kl}^i + \Delta dt_{kl}^i + \Delta d_{kl}^i - \Delta I_{kl}^i + \\ \quad \Delta T_{kl}^i + \Delta e_{kl}^i, \\ \Delta \Phi_{kl}^i = \Delta \rho_{kl}^i + \Delta dt_{kl}^i + \Delta \lambda_{kl}^i (\Delta \delta_{kl}^i + \Delta N_{kl}^i) - \\ \quad \Delta I_{kl}^i + \Delta T_{kl}^i + \Delta \epsilon_{kl}^i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δ 表示站间单差算子; i 表示卫星号; k, l 表示测站号; P 表示伪距观测值; Φ 表示载波相位观测值; ρ 表示站星间几何距离; dt 表示接收机钟差; I 表示电离层延迟误差(单位:m); T 表示对流层延迟误差(单位:m); λ 表示波长; d 表示伪距硬件延迟; δ 表示载波硬件延迟; N 表示整周模糊度; e 和 ϵ 分别表示伪距与载波未模型化误差和观测噪声。

在式(1)的基础上进行卫星间求差,即可得到双差模型,表示如下:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{kl}^j = \nabla \Delta \rho_{kl}^j - \nabla \Delta I_{kl}^j + \nabla \Delta T_{kl}^j + \nabla \Delta e_{kl}^j, \\ \nabla \Delta \Phi_{kl}^j = \nabla \Delta \rho_{kl}^j + \nabla \Delta \lambda_{kl}^j \cdot \nabla \Delta N_{kl}^j - \nabla \Delta I_{kl}^j + \\ \quad \nabla \Delta T_{kl}^j + \nabla \Delta \epsilon_{kl}^j. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\nabla \Delta$ 表示星间双差因子; j 表示卫星号;其他符号表示含义与式(1)相同。

在双差方程公式(2)的基础上构建 BDS/QZSS 组合方程,表示如下:

$$\begin{bmatrix} A^J & B^J & 0 \\ A^C & 0 & B^C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ \Delta \nabla N^J \\ \Delta \nabla N^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla \Phi^J \\ \Delta \nabla \Phi^C \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x^1 - x_0}{\rho_0} & \frac{y^1 - y_0}{\rho_0} & \frac{z^1 - z_0}{\rho_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x^n - x_0}{\rho_0} & \frac{y^n - y_0}{\rho_0} & \frac{z^n - z_0}{\rho_0} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中: J 表示 QZSS; C 表示 BDS; dX 为测站坐标改正数; (x_0, y_0, z_0) 为测站近似坐标; (x^n, y^n, z^n) 为卫星坐标。

参数估计方法则利用卡尔曼滤波模型,模糊度固定采用 LAMBDA 算法,限于篇幅原因,本文不再进行详细介绍。

1.2 随机模型

在进行 BDS/QZSS 组合定位时,BDS 与 QZSS 各自随机模型采用高度角定权模型,表达式如下^[12]:

$$\sigma_i^2(E) = \begin{cases} \frac{\sigma}{\sin^2}(E), & E < 30^\circ, \\ \frac{\sigma}{\sin}(E), & E \geq 30^\circ. \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_i 表示观测值中误差; E 为卫星的高度角。

2 实验分析

2.1 数据来源

实验数据选取由 IGS 跟踪站组成位于亚太地区的两条短基线,第一条由 BUR2 站和 RHPT 站组成,长约 5 km,第二条由 TID1 站和 STR1 站组成,长约 10 km,观测时间为 2019 年 11 月 1 日—11 月 7 日,采样频率为 30 s。在数据采集过程中,能同时接收到 BDS-2 卫星数据和 QZSS 数据,能接收到部分 BDS-3 卫星数据,主要为中圆轨道(MEO)卫星。

2.2 数据处理策略

采样自编软件解算两条短基线实测数据,以 IGS 周解算坐标值为坐标真值,将解算单历元坐标值与坐标真值进行比较,分析 BDS-2/BDS-3/QZSS 短基线相对定位精度。在进行短基线相对定位数据处理时,主要分为五种情况,第一种:解算只含有 BDS-2 卫星短基线相对定位数据;第二种:解算含有 BDS-2+QZSS 卫星短基线相对定位数据;第三种:解算含有 BDS-3+QZSS 卫星短基线相对定位数据;第四种:解算含有 BDS-2+BDS-3 卫星短基线相对定位数据;第五种:解算含有 BDS-2+BDS-3+QZSS 卫星短基线点的定位数据,由于所选测站接收到 BDS-3 卫星较少,不能单独进行短基线相对定位,因此本文不单独对 BDS-3 单系统短基线相对定位精度进行分析。

首先分析不同情况下的卫星可见数与位置精度因子(PDOP)值,B-2 表示 BDS-2、B-3 表示 BDS-3、J 表示 QZSS。

如图 1 所示,在所选测站情况下,QZSS 能有效提升 BDS-2、BDS-3 和 BDS-2/BDS-3 平均卫星可见数,分别使 BDS-2、BDS-3 和 BDS-2/BDS-3 平均卫星可见数提升了 14.3%、16.7%、8.3%,BDS-2/BDS-3 组合的平均卫星可见数相比于 BDS-2 和 BDS-3 单系统都有明显增加,BDS-2/BDS-3 使 BDS-2

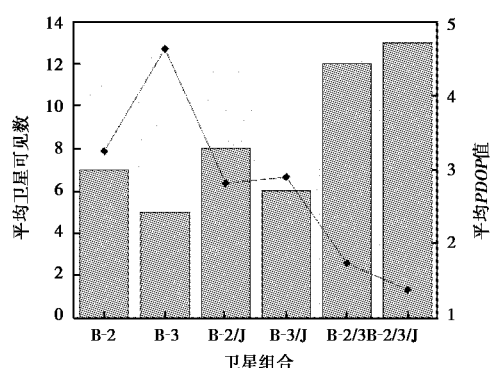


图1 不同卫星组合下卫星可见数与PDOP值平均值

和BDS-3平均卫星可见数增加了71.4%、140%。同时发现QZSS能有效改善BDS-2、BDS-3和BDS-2/BDS-3卫星空间几何构型,QZSS使BDS-2、BDS-3和BDS-2/BDS-3平均PDOP值减少了13.2%、37.7%、20.7%,同样BDS-2/BDS-3的卫星空间几何构型优于BDS-2和BDS-3任一单系统,使BDS-2和BDS-3平均PDOP值减少了46.5%、62.4%。

2.3 相对定位精度分析

按照数据处理策略,对不同组合情况下的短基线进行相对定位数据解算,得到每个历元的坐标值,将单历元坐标值与IGS周解算坐标做差,并且转换为E、N、U三个方向的误差。

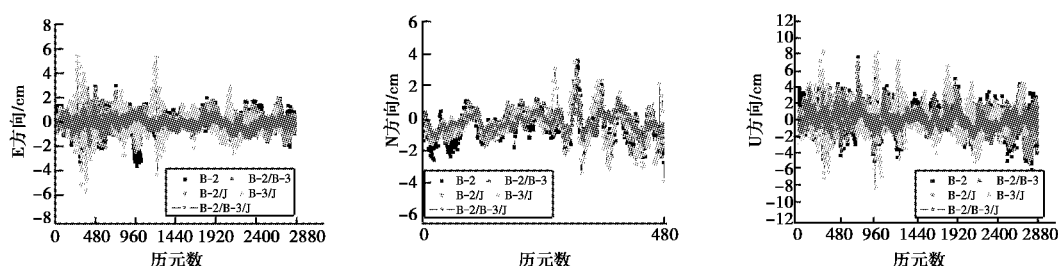


图2 5 km短基线E、N、U方向误差分布

如图2所示,对于5 km短基线,QZSS系统的加入明显降低了BDS-2、BDS-2/BDS-3定位误差,且弥补了BDS-3卫星个数不足、数据不完整无法进行定位的缺点,由于接收机本身的问题导致BDS-3卫星缺少.在观测时段内,BDS-2相对定位E和N方向定位误差在 ± 4 cm范围内波动,U方向定位误差在 ± 8 cm范围内波动;BDS-2/QZSS

相对定位E和N方向定位误差在 ± 3 cm范围内波动,U方向定位误差在 ± 8 cm范围内波动;BDS-3/QZSS相对定位E和N方向定位误差在 ± 6 cm范围内波动,U方向定位误差在 ± 10 cm范围内波动;BDS-2/BDS-3和BDS-2/BDS-3/QZSS相对定位E和N方向定位误差在 ± 2 cm范围内波动,U方向定位误差在 ± 4 cm范围内波动。

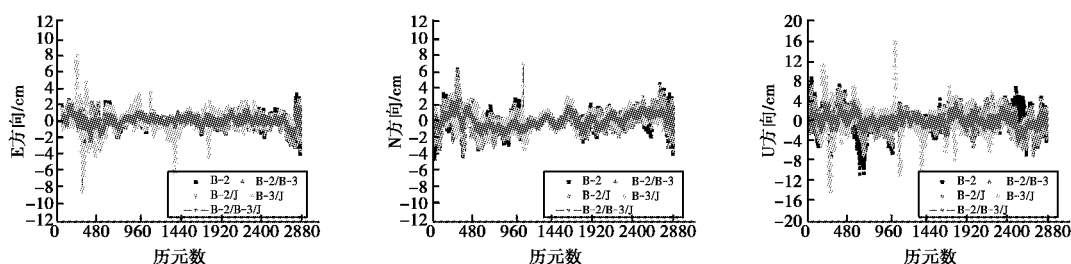


图3 10 km短基线E、N、U方向误差分布

如图3所示,对于10 km短基线,QZSS系统的加入明显降低了BDS-2、BDS-2/BDS-3定位误差,且弥补了BDS-3卫星个数不足、数据不完整无

法进行定位的缺点.在观测时段内,BDS-2相对定位E和N方向定位误差在 ± 6 cm范围内波动,U方向定位误差在 ± 10 cm范围内波动;BDS-2/

QZSS 相对定位 E 和 N 方向定位误差在 ± 6 cm 范围内波动, U 方向定位误差在 ± 8 cm 范围内波动; BDS-3/QZSS 相对定位 E 和 N 方向定位误差在 ± 10 cm 范围内波动, U 方向定位误差在 ± 20 cm 范围内波动; BDS-2/BDS-3 和 BDS-2/BDS-3/QZSS

相对定位 E 和 N 方向定位误差在 ± 4 cm 范围内波动, U 方向定位误差在 ± 5 cm 范围内波动。

对不同组合 E、N、U 三个方向定位误差均方根(RMS)值统计如表 1 所示。

表 1 短基线不同组合下 E、N、U 方向定位误差 RMS 值

卫星组合	5 km			10 km		
	E	N	U	E	N	U
B-2	1.39	0.84	2.18	1.42	0.89	2.47
B-2/J	1.05	0.70	1.72	1.24	0.79	2.15
B-3/J	1.34	0.92	2.47	1.25	0.97	2.99
B-2/B-3	0.49	0.43	0.98	0.83	0.56	1.16
B-2/B-3/J	0.43	0.40	0.90	0.80	0.51	1.02

由表 1 可知,对于 5 km 短基线, BDS-2、BDS-2/QZSS 和 BDS-3/QZSS 三种组合 E 方向定位精度优于 1.5 cm, N 方向定位精度优于 1 cm, U 方向定位精度优于 2.5 cm, BDS-2/BDS-3 和 BDS-2/BDS-3/QZSS 两种组合 E 和 N 方向定位精度优于 0.5 cm, U 方向定位精度优于 1 cm, 对于 10 km 短基线, BDS-2、BDS-2/QZSS 和 BDS-3/QZSS 三种组合 E 方向定位精度优于 1.5 cm, N 方向定位精度优于 1 cm, U 方向定位精度优于 3 cm, BDS-

2/BDS-3 和 BDS-2/BDS-3/QZSS 两种组合 E 和 N 方向定位精度优于 1 cm, U 方向定位精度优于 1.2 cm, QZSS 卫星能明显提升 BDS-2、BDS-2/BDS-3 定位精度,使 BDS-2/QZSS 组合定位精度与 BDS-2 相当,而 BDS-2/BDS-3 组合使 BDS-2 定位精度明显提升。

进一步统计 QZSS 对 BDS-2 和 BDS-2/BDS-3、BDS-3 对 BDS-2 定位精度的提升,统计结果如表 2 所示。

表 2 QZSS 和 BDS-3 对不同组合下 E、N、U 方向定位精度提升/%

距离 /km	系统	BDS-2				BDS-2/BDS-3			
		E	N	U	3D 方向	E	N	U	3D 方向
5	J	24.46	16.67	21.10	36.35	12.00	6.98	8.16	16.10
	B-3	64.03	48.81	55.05	97.53				
10	J	12.68	11.24	12.96	21.33	3.61	8.93	12.00	15.39
	B-3	41.55	37.08	53.04	76.91				

由表 2 可知,对于 5 km 短基线, QZSS 使 BDS-2 相对定位 3D 方向精度提升 36.35%, BDS-3 使 BDS-2 相对定位 3D 方向精度提升 97.53% 以上, QZSS 使 BDS-2/BDS-3 相对定位 3D 方向精度提升 16.10%。对于 5 km 短基线, QZSS 使 BDS-2 相对定位 3D 方向精度提升 21.33%, BDS-3 使 BDS-2 相对定位 3D 方向精度提升 76.91% 以上, QZSS 使 BDS-2/BDS-3 相对定位 3D 方向精度提升 15.39%。

3 结 论

本文基于 IGS 跟踪站组成的 5 km 和 10 km

两条短基线,分析了 QZSS 与 BDS-2 和 BDS-3 不同组合下的相对定位精度,经研究发现:

1) QZSS 使 BDS-2、BDS-3 以及 BDS-2/BDS-3 卫星可见数与卫星空间几何构型得到了明显改善,而 BDS-2/BDS-3 相比于 BDS-2 和 BDS-3 任一单系统在卫星可见数与卫星空间几何构型两方面也有较明显改善。

2) QZSS 卫星的加入有效弥补了 BDS-3 由于卫星数目不足、数据缺少导致无法定位的情况, BDS/QZSS 组合相对定位精度与 BDS-2 相当。

3) QZSS 卫星能有效提升 BDS-2 和 BDS-2/BDS-3 短基线相对定位精度,使 BDS-2 相对定位

3D方向精度提升在20%以上,使BDS-2/BDS-3定位3D方向精度提升在16%左右。BDS-3对BDS-2定位精度的提升优于QZSS,使BDS-2相对定位3D方向精度提升在76%以上。

随着BDS-3其他卫星的加入,相关计算模型的完善,BDS-3定位性能将会进一步提升,接下来需要分析完整BDS-3以及BDS-3与其他系统组合短基线相对定位性能。

参考文献

- [1] 程军龙,王旺,马立烨,等.北斗三号观测数据质量及定位精度初步评估[J].测绘通报,2019(8):1-7.
- [2] 武曙光,聂桂根,彭凤友,等.高精度GPS超短基线场数据处理与分析[J].全球定位系统,2020,45(2):7-12.
- [3] 布金伟,左小清,金立新,等.BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(4):574-585,611.
- [4] 戴金倩,吴迪,戴小蕾,等.BDS-3实时精密单点定位精度分析[J].测绘通报,2020(1):30-34.
- [5] 蒲亚坤,袁运斌,丁文武,等.GPS/BDS-2/Galileo混合双差相对定位模型应用于短基线精密定位研究[J].大地测量与地球动力学,2020,40(1):56-61.
- [6] 周建营,陈国恒,张惠军.对流层延迟在GAMIT解算短基线的应用分析[J].全球定位系统,2019,44(6):92-96.
- [7] 何巧,陈伟康.GPS/QZSS双系统组合定位性能分析[J].北京测绘,2019,33(5):541-545.
- [8] 张玉英,谭荣建,布金伟,等.BDS+QZSS双系统组合PPP性能评估[J].城市勘测,2019(2):107-113.
- [9] 郝茂森,贾小林,曾添,等.QZSS亚米级增强服务和MSAS增强定位性能评估[J].导航定位与授时,1-10[2020-06-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1226.v.20200608.1612.002.html>.
- [10] 徐宗秋,庄典,杨瑞雪,等.BDS-3基本系统的动态单点定位性能评估[J].测绘科学,2020,45(6):46-50.
- [11] 魏钢,高皓,项宇.北斗二号与北斗三号定位精度对比分析[J].导航定位学报,2020,8(2):8-11.
- [12] 金俭俭,高成发,张瑞成,等.GPS与BDS2、BDS3融合数据短基线解算精度分析[J].测绘通报,2020(3):83-86,95.
- [13] 方欣硕,范磊.BDS-2/BDS-3伪距单点定位精度分析[J].全球定位系统,2020,45(1):19-25.
- [14] 李建涛,朱兰艳,史珂,等.GAMIT(10.7)用于GLO-NASS/BDS精密相对定位性能测试与分析[J].测绘工程,2020,29(2):60-66.
- [15] 郑爽,王世杰.北斗三号短基线相对定位精度分析[J].全球定位系统,2020,45(1):61-65.

作者简介

郑磊 (1988—),男,硕士,讲师,主要从事工程测量变形监测。

刘成 (1988—),男,硕士,讲师,主要从事桥梁工程的研究工作。

Relative positioning accuracy analysis of BDS-2/BDS-3/QZSS combination short baseline

ZHENG Lei, LIU Cheng

(Hope College of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract: In view of the impact of QZSS on the relative positioning performance of BDS-2 and BDS-3 short baselines, this paper analyzes the short baselines of different combinations of QZSS, BDS-2 and BDS-3 based on the 5 km and 10 km short baselines composed of IGS tracking stations relative positioning accuracy. It is found that QZSS can effectively improve the BDS-2 and BDS-3 satellite visibility and satellite space geometry, while the satellite visibility and satellite space geometry of BDS-2/BDS-3 combination is superior to any single system. In terms of positioning accuracy, the combined positioning accuracy of BDS-3 and QZSS is equivalent to BDS-2 in the case of missing data. At the same time, QZSS can effectively improve the relative positioning accuracy of BDS-2 and BDS-2/BDS-3, while BDS-3 shows better performance than QZSS in improvement of positioning accuracy of BDS-2.

Keywords: BDS-2; BDS-3; QZSS; short baseline; relative positioning