引文格式：魏永虎, 景仙林. BDS-2 对 BDS-3 三频超长基线单历元解算影响分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 98-101. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.03.021

BDS-2 对 BDS-3 三频超长基线单历元解算影响分析

魏永虎[1]，景仙林[1]
（1. 西宁市国土勘测规划研究院有限公司，青海 西宁 810001）

摘　要：针对当前 BDS-3 三频相对定位性能评估问题，首先推导了 BDS-3 三频双差定位模型，再进行了 BDS-2 加入前后 BDS-3 B1C/B2a/B3I 和 B1I/B2a/B3I 超长基线相对定位解算实验。结果表明，BDS 三频超长基线相对定位性能较优，4 种三频解算定位精度都在厘米级，其中 BDS-2/BDS-3 B1I/B2a/B3I 的定位精度最优，水平定位精度优于 5 cm，高程定位精度优于 8 cm，模糊度固定率约为 86%。BDS-2 对 BDS-3 B1C/B2a/B3I 超长基线定位性能没有改善，但对 BDS-3 B1I/B2a/B3I 超长基线定位性能改善效果明显，可为今后 BDS-3 超长基线定位性能研究提供一定的参考。

关键词：BDS-3；三频；超长基线；定位精度
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0098-04

Influence Analysis of BDS-2 on BDS-3 Tri-frequency Ultra-long Baseline Single Epoch Solution

WEI Yonghu[1], JING Xianlin[1]
(1. Xining Land Survey and Planning Research Institute Co., Ltd., Xining 810001, China)

Abstract: Aiming at the current evaluation of BDS-3 tri-frequency relative positioning performance, we deduced the BDS-3 tri-frequency double difference positioning model at first. And then, we carried out the ultra-long baseline relative positioning solution experiments of BDS-3 B1C/B2a/B3I and B1I/B2a/B3I before and after the addition of BDS-2. The experimental results show that the relative positioning performance of BDS tri-frequency ultra-long baseline is better, and the positioning accuracy of the four tri-frequency solutions are at the centimeter level. Among them, the positioning accuracy of BDS-2/BDS-3 B1I/B2a/B3I is the best, the horizontal positioning accuracy is better than 5 cm, the elevation positioning accuracy is better than 8 cm, and the ambiguity fixed rate is about 86%. BDS-2 satellite has not improved the ultra-long baseline positioning performance of BDS-3 B1C/B2a/B3I tri-frequency combination, but it has significantly improved the positioning performance of BDS-3 B1I/B2a/B3I tri-frequency combination, which can provide a certain reference for the research of BDS-3 ultra-long baseline positioning performance in the future.

Key words: BDS-3, tri-frequency, ultra-long baseline, positioning accuracy

北斗三号（BDS-3）已于 2020-07-31 全部组网完成，标志着我国导航定位技术已经十分成熟，不再依赖国外的导航定位系统[1]。建设完成的 BDS 在轨卫星共计 46 颗，能播发多频信号，不仅可实现多频组合定位，而且能保证较差观测环境下的卫星可见数[2-3]。实时动态差分技术（RTK）不仅能实现厘米级高精度定位，而且相比精密单点定位技术能快速收敛，目前应用领域广泛[4-5]。RTK 技术根据两个跟踪站组成的基线可实现单历元定位，而根据基线的距离可分为超短基线、短基线、中长基线、长基线和超长基线，其中超长基线是指基线长度大于 500 km 的基线[6-7]。

曹士龙[8]等分析 GPS 超长基线误差特性与精度发现，基线长度小于 500 km 可采用广播星历解算，水平定位精度优于 5 cm，高程定位精度优于 8 cm；而大于 500 km 的需采用精密星历，水平定位精度优于 2.5 cm，高程定位精度优于 5.5 cm，解算初始收敛时间随基线长度的增加而缩短。林全东[9]研究不同电离层模型对 GPS 共视时间传递的影响发现，广播电离层模型模式下站间 GPS 共视时间传递的精度最差，格网电离层模型比广播电离层和消电离层模型改正效果好。刘刚[10]等利用超长基线双差瞬时精密定位技术研究汶川地震动态形变序列发现，该技术能获取震区连续的动态形变序列，且能根据动态时序计算得到地震波地壳平均速度。何玉童[11]等开发了一种超长基线解算软件，可精确解算滑坡基准点坐标，使滑坡基准点监测精度优于 3 mm，能较好地应用于地质灾害、滑坡应急救援等

收稿日期：2021-12-27；修回日期：2022-03-18。
项目来源：西宁市科技计划资助项目（2019-Y-12）。
第一作者简介：魏永虎（1985—），工程师，从事测绘工作，E-mail：xujjbj@163.com。

领域。上述研究缺乏对BDS超长基线单历元解算性能的分析，因此本文基于一组超长基线实测数据，分析了BDS-3、BDS-2/BDS-3三频超长基线解算的定位性能。

1　BDS-3三频双差观测模型

BDS-3三频双差伪距观测值与载波相位观测值在 k 时刻可表示为[12-13]：

$$\begin{cases} P_{i,k}=\rho_k+T_k+I_k+\varepsilon_{P,i,k} \\ \Phi_{i,k}=\lambda_i\varphi_{i,k}=\rho_k+T_k-I_k+\lambda_i N_i+\varepsilon_{\Phi,i,k} \end{cases} \tag{1}$$

式中，$i=1,2,3$ 为BDS-3参与组合的3个频率；λ_i 为3个频率对应的波长；$\varphi_{i,k}$ 为 k 时刻 i 频率以周为单位的双差载波相位观测值；ρ_k 为双差卫星至测站间的几何距离；T_k 为双差对流层延迟；I_k 为双差电离层延迟；N_i 为双差整周模糊度；$\varepsilon_{P,i,k}$ 为 k 时刻 i 频率的双差伪距观测值噪声；$\varepsilon_{\Phi,i,k}$ 为 k 时刻 i 频率的双差载波相位观测值噪声。

对BDS-3三频载波相位观测值进行线性组合，得到组合公式为[12]：

$$\varphi_c=l\varphi_1+m\varphi_2+n\varphi_3 \tag{2}$$

式中，l、m、n 为三频线性组合系数，且必须为正数。

进一步得到以m为单位的三频组合载波相位观测值和三频组合伪距观测值，即[12]

$$\begin{cases} P_c=\dfrac{lf_1P_1+mf_2P_2+nf_3P_3}{lf_1+mf_2+nf_3} \\ \Phi_c=\dfrac{lf_1\Phi_1+mf_2\Phi_2+nf_3\Phi_3}{lf_1+mf_2+nf_3} \end{cases} \tag{3}$$

式中，f_1、f_2、f_3 为3个频率。

2　实验分析

实验数据选取MGEX跟踪网中一组长度约为561 km的超长基线，数据采集时间为2021-10-27—2021-10-31连续5 d，采样间隔为30 s。解算软件为上海天文台GNSS分析中心研发的Net_Diff软件，支持解算BDS-3卫星B1C/B2a/B3I和B1I/B2a/B3I两种三频组合定位数据。本文设计了两种实验：①解算只有BDS-3卫星参与的B1C/B2a/B3I和B1I/B2a/B3I超长基线单历元数据；②解算在BDS-3卫星的基础上加入BDS-2卫星的B1C/B2a/B3I和B1I/B2a/B3I超长基线单历元数据。两种实验参数设置完全一致，对流层改正模型采用GPT2_5w模型，周跳探测采用GF+MW组合，其余改正采用对应的文件改正，参考坐标为IGS中心的周解算坐标值。

2.1　卫星可用性分析

两种实验卫星可见数与PDOP值随历元变化序列如图1所示，可以看出，BDS-2卫星的加入明显增加了BDS-3卫星可见数，降低了PDOP值；BDS-3卫星数据单独定位解算时，最低卫星数为4颗，最高卫星数为7颗，平均卫星数为5颗，加入BDS-2卫星后，最低卫星数为6颗，最高卫星数为12颗，平均卫星数为9颗；BDS-3卫星数据单独定位解算时，PDOP值波动较大，部分历元PDOP值超过4，平均PDOP值为2.6，加入BDS-2卫星后，除个别历元PDOP值大于4小于5外，其余历元PDOP值均在3以内，平均PDOP值为1.53，比BDS-3单独定位的平均PDOP值降低了41.2%。

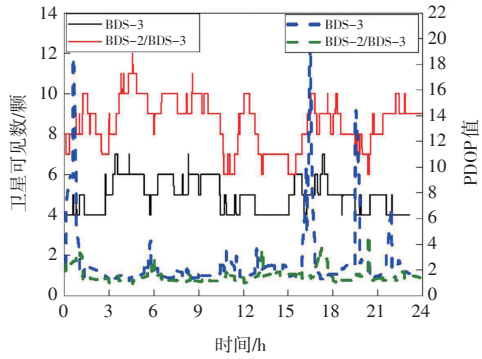


图1　卫星可见数与PDOP值随历元变化序列

2.2　定位结果分析

B1C/B2a/B3I超长基线定位偏差如图2所示，可以看出，BDS-3与BDS-2/BDS-3定位偏差序列一致，即加入BDS-2卫星对BDS-3 B1C/B2a/B3I超长基线定位

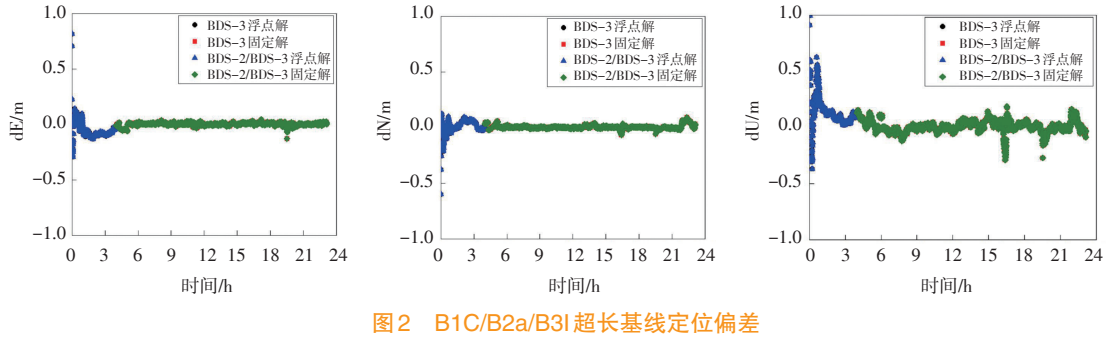


图2　B1C/B2a/B3I超长基线定位偏差

解算没有影响；E、N、U方向定位偏差均存在一个收敛过程，即浮点解，收敛之后为固定解，收敛后E、N方向定位偏差在±10 cm以内变化，U方向定位偏差在±20 cm以内变化。

B1I/B2a/B3I超长基线定位偏差如图3所示，可以看出，BDS-2/BDS-3相较于BDS-3定位偏差序列明显减小，即加入BDS-2卫星对BDS-3 B1I/B2a/B3I超长基线定位改善效果明显，E、N、U方向定位偏差均存在一个收敛过程，即浮点解，收敛之后为固定解，即使在收敛过程中，BDS-2/BDS-3浮点解也比BDS-3浮点解更加稳定；收敛后BDS-3的E、N方向定位偏差在±10 cm以内变化，U方向定位偏差在±20 cm以内变化；BDS-2/BDS-3的E、N方向定位偏差在±5 cm以内变化，U方向定位偏差在±15 cm以内变化。个别历元BDS-2/BDS-3定位偏差大于BDS-3定位偏差，结合图1可知，由于BDS-2/BDS-3组合的PDOP值大于BDS-3，因此增加了定位偏差，后续分析中若存在该情况，原因一致。

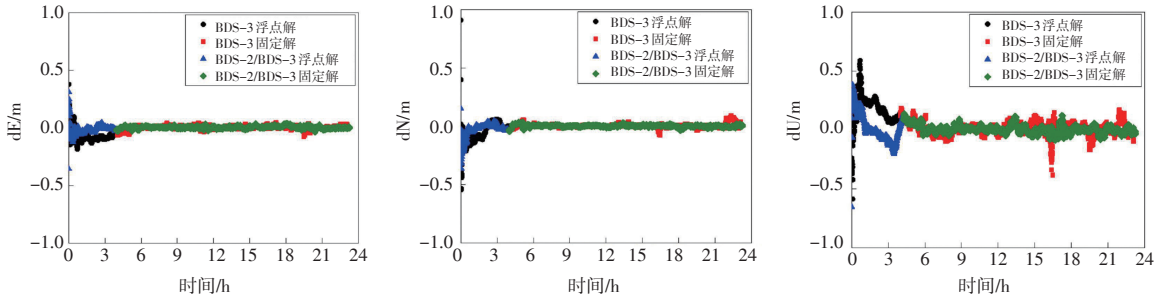


图3 B1I/B2a/B3I超长基线定位偏差

B1C/B2a/B3I与B1I/B2a/B3I超长基线解算Ratio值如图4所示，可以看出，当解算结果为浮点解时，Ratio值小于3；当解算结果为固定解时，Ratio值大于3；B1C/B2a/B3I解算时，BDS-3/BDS-2组合与BDS-3解算的Ratio值一致；B1I/B2a/B3I解算时，加入BDS-2卫星使BDS-3解算的Ratio值更加稳定。B1C/B2a/B3I与B1I/B2a/B3I超长基线解算模糊度固定率如图5所示，可以看出，两种三频组合超长基线解算模糊度固定率主要在80%~90%之间，B1C/B2a/B3I解算加入BDS-2卫星前后模糊度固定率未发生变化，B1I/B2a/B3I解算加入BDS-2卫星后模糊度固定率有所提升。

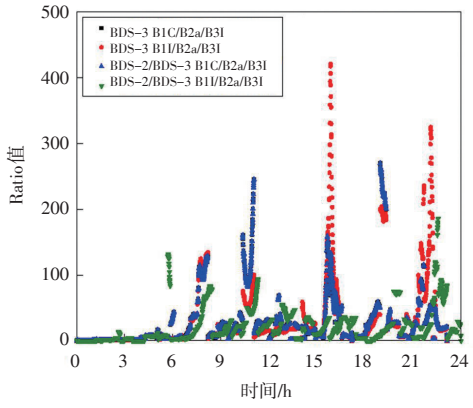


图4 Ratio值随历元变化序列

B1C/B2a/B3I与B1I/B2a/B3I超长基线E、N、U方向的单天定位精度如图6所示，可以看出，BDS-3与BDS-2/BDS-3三频组合B1C/B2a/B3I在E、N、U方向

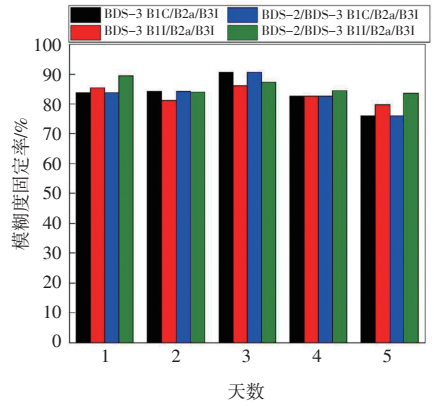


图5 整周模糊度固定率

的定位精度一致；而BDS-2/BDS-3三频组合B1I/B2a/B3I定位精度优于BDS-3。B1C/B2a/B3I与B1I/B2a/B3I超长基线连续5 d定位精度平均值与模糊度固定率平均值如表1所示，可以看出，BDS-3 B1C/B2a/B3I、BDS-3 B1I/B2a/B3I、BDS-2/BDS-3 B1C/B2a/B3I超长基线E和N方向定位精度优于7 cm，U方向定位精度优于10 cm，模糊度固定率约为83%，BDS-2/BDS-3 B1I/B2a/B3I超长基线E方向定位精度优于5 cm，N方向定位精度优于4 cm，U方向定位精度优于8 cm，模糊度固定率约为86%。结果表明，BDS-2卫星的加入对BDS-3 B1C/B2a/B3I超长基线定位结果没有影响，而对BDS-3 B1I/B2a/B3I超长基线定位结果有较明显改善，E方向定位精度提升了25.90%，N方向定位精度提升了34.77%，U方向定位精度提升了26.78%，模糊度固定率提升了3.28%。

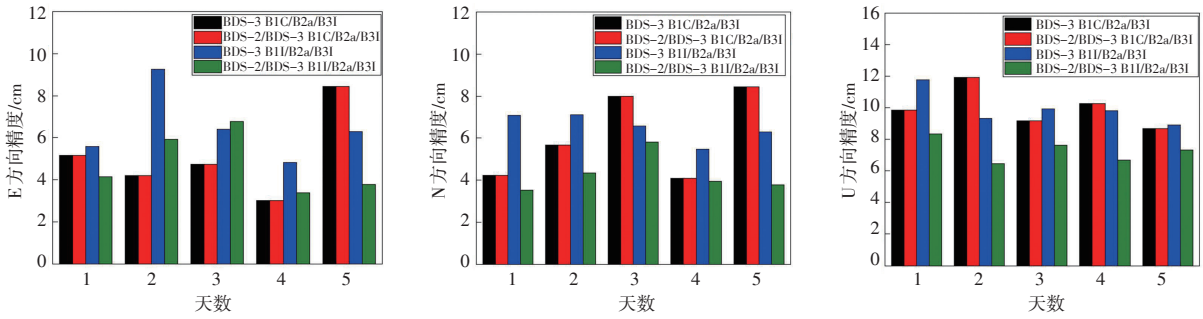


图6　各基线连续5 d定位精度

表1　各基线连续5d定位精度与模糊度固定率平均值

频率	平均定位精度/cm			平均模糊度固定率/%
	E方向	N方向	U方向	
BDS-3 B1C/B2a/B3I	5.11	5.28	9.99	83.40
BDS-3 B1I/B2a/B3I	6.47	6.04	9.97	83.04
BDS-2/BDS-3 B1C/B2a/B3I	5.11	5.28	9.99	83.40
BDS-2/BDS-3 B1I/B2a/B3I	4.80	3.94	7.30	85.76

3　结　语

本文基于一组MGEX跟踪网超长基线多天数据，分别进行了BDS-2卫星加入前后B1C/B2a/B3I与B1I/B2a/B3I超长基线单历元解算实验。结果表明：①BDS-2卫星能有效提升BDS-3单独定位卫星可见数，提升率为125%，且能有效降低BDS-3的PDOP值，降低率为41.2%；②BDS三频组合超长基线定位性能较优，水平与高程定位精度均为厘米级，模糊度固定率在80%~90%之间，其中BDS-2/BDS-3 B1I/B2a/B3I定位精度最优，E、N方向定位精度优于5 cm，U方向定位精度优于8 cm，模糊度固定率约为86%；③BDS-2卫星对BDS-3 B1C/B2a/B3I超长基线定位解算性能没有影响，但能有效改善B1I/B2a/B3I超长基线定位性能，使E方向定位精度提升25.90%，N方向定位精度提升34.77%，U方向定位精度提升26.78%，模糊度固定率提升3.28%。

参考文献

[1] 戴凯阳,邵搏,熊帅,等. 基于北斗三号新频点的多路径误差特性验证方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(9):934-938

[2] LI B, ZHANG Z, MIAO W. Improved Precise Positioning with BDS-3 Quad-frequency Signals[J]. Satellite Navigation,2020(1):1-10

[3] CHEN H, LIU X, JIANG W, et al. Preliminary Analysis and Evaluation of BDS-2/BDS-3 Precise Point Positioning[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(10): 4 113-4 128

[4] 丁磊,钟斌,禹强华,等. 北斗三频载波相位组合与相对定位研究[J]. 航空科学技术,2018,29(1):12-20

[5] WANG M, WANG J, DONG D, et al. Performance of BDS-3: Satellite Visibility and Dilution of Precision[J]. GPS Solutions,2019,23(2):1-14

[6] WANG Q, JIN S, YUAN L, et al. Estimation and Analysis of BDS-3 Differential Code Biases from MGEX Observations[J]. Remote Sensing,2020,12(1):68

[7] 高旺,潘树国,刘力玮,等. 基于BDS-3五频超宽巷/宽巷组合的中长基线单历元定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2021,29(3):293-299

[8] 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)[2021-12-20]. https://kns. cnki. net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD67Dqpioc424yY5HeQt-mqhZ2Fxxv--iYRmSSd953gek0UgxP-BUXE_9t&uniplatform=NZKPT

[9] 林全东. 电离层对超长GNSS基线共视影响分析[J]. 北京测绘,2020,34(12):1 819-1 824

[10] 刘刚,谭凯,彭懋磊,等. 用超长基线解算分析汶川地震动态形变特征[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(5):14-19

[11] 何玉童,汪剑,李宏祥. 基于北斗的超长基线解算在滑坡基准点监测中的应用探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(1):75-78

[12] 孟凡军,李树军,杜祯强. BDS三频双差载波相位组合平滑伪距算法[J]. 测绘科学技术学报,2019,36(5):452-457

[13] 李建全. BDS系统三频基线定位算法[J]. 北京测绘,2019,33(3):296-300

[14] 刘洋. 北斗双频和三频相对定位精度分析[J]. 江西测绘,2020(3):12-16