doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.009

BDS-3 单频短基线相对定位性能初步评估

贾亚军[1]，都林婷[1]，郤长明[1]，阚中强[1]
（1. 山东正元数字城市建设有限公司，山东 烟台 264670）

摘　要：采集了一组10 km短基线，初步评估了BDS-3 B1C、B1I、B2A、B3I单频短基线相对定位性能，并与GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率做对比。实验结果表明，建设完成后的BDS卫星可见数与空间几何构成较优，4个频率短基线相对定位精度都可以达到厘米级，模糊度固定率都接近100%左右，无论定位精度还是模糊度固定率都优于L1频率和E1频率，可为今后BDS-3相对定位研究提供一定的参考。

关键词：BDS-3；短基线；单频；精度
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0046-04

Preliminary Evaluation of Relative Positioning Performance of BDS-3 Single Frequency Short Baseline

JIA Yajun[1], DU Linting[1], XI Changming[1], KAN Zhongqiang[1]
(1. Shandong Zhengyuan Digital City Construction Co., Ltd., Yantai 264670, China)

Abstract: In order to further evaluate the positioning performance of BDS-3, we collected a set of 10 km short baselines, initially evaluated the relative positioning performance of BDS-3 B1C, B1I, B2a, B3I single-frequency short baselines, and compared with GPS system L1 frequency, Galileo system E1 frequency. The experimental results show that after the completion of construction, the visible number and spatial geometry of BDS satellite are better. The relative positioning accuracy of four short baselines can reach the centimeter level, and the ambiguity fixed rate is close to about 100%. Both the positioning accuracy and the ambiguity fixed rate are better than L1 frequency and E1 frequency, which can provide a certain reference for future BDS-3 relative positioning research.

Key words: BDS-3, short baseline, single frequency, accuracy

北斗系统先后经历了国内双星系统实验、亚太地区区域系统实验阶段[1-3]，于2020-07-31北斗全球系统即北斗三号（BDS-3）正式开通服务，向全球用户提供高精度、多功能的导航、定位与授时服务[4-6]。为进一步提升BDS-3多频组合定位的多样性，BDS-3在频率设计上保留了B1I和B3I 2个老频率，增加了B1C和B2A 2个新频率，同时也保证了BDS-3与其他系统组合兼容定位[7-8]。相对定位作为当前精密定位方式之一，随着BDS-3投入使用，BDS-3相对定位也将是今后的热点问题[9-14]。

1　数学模型

1.1　双差观测模型

基线解算常用的定位模型为双差模型，该模型不仅可以消除部分定位误差，还有利于模糊度的固定[10]，短基线双差定位模型表示如下[5,10]：

$$\begin{cases}\Delta\nabla P_{AB}^{pq}=\Delta\nabla\rho_{AB}^{pq}-\Delta\nabla T_{AB}^{pq}-\Delta\nabla I_{AB}^{pq}+\Delta\nabla\varepsilon_{AB}^{pq}\\ \Delta\nabla\varphi_{AB}^{pq}=\Delta\nabla\rho_{AB}^{pq}-\Delta\nabla T_{AB}^{pq}-\Delta\nabla I_{AB}^{pq}-\lambda\Delta\nabla N_{AB}^{pq}+\Delta\nabla e_{AB}^{pq}\end{cases}\tag{1}$$

式中，$\Delta\nabla$ 为卫星和测站之间的双差算子；p 和 q 都为卫星编号；A 和 B 都为测站编号；P 为伪距观测值；φ 为载波相位观测值；ρ 为卫星至卫星之间的空间几何距离；T 为对流层延迟值；I 为电离层延迟值；ε 为伪距观测噪声；λ 为BDS-3频率；N 为整周模糊度；e 为载波相位观测噪声。

由于在短基线相对定位中，对流层延迟和电离层延迟可以忽略不计，式（1）简化如下：

$$\begin{cases}\Delta\nabla P_{AB}^{pq}=\Delta\nabla\rho_{AB}^{pq}+\Delta\nabla\varepsilon_{AB}^{pq}\\ \Delta\nabla\varphi_{AB}^{pq}=\Delta\nabla\rho_{AB}^{pq}-\lambda\Delta\nabla N_{AB}^{pq}+\Delta\nabla e_{AB}^{pq}\end{cases}\tag{2}$$

1.2　随机模型

在本文BDS-3短基线相对定位中，采用高度角进行定权，随机模型表示如下[10,14]：

收稿日期：2021-09-16。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR2017MD029）。

$$\sigma_i^2(E)=\begin{cases}a^2, E\geqslant 30^\circ\\ 2\sin^2 E, 10<E<30\end{cases} \tag{3}$$

式中，$\sigma_i^2(E)$ 为中误差；E 为高度角。

2　实验分析

为全面评估BDS-3单频短基线相对定位性能，实验布设一组约10 km短基线，点名依次为JZD1和YDD1，采集时间为2021-05-21，采样间隔为10 s，采样时长为8 h，总共2 880个历元。数据解算软件采用上海天文台GNSS分析中心研发的Net_Diff软件，解算频率为B1C、B1I、B2A和B3I 4个频率，4个频率解算参数设置一致。图1给出了观测时间段内BDS-3卫星可见数与PDOP值随历元变化情况，图1左侧为卫星可见数随历元变化，图1右侧为PDOP值随历元变化。通过图1可以发现，卫星可见数在单历元变化范围为6～9颗之间，平均卫星可见数为7颗；PDOP值

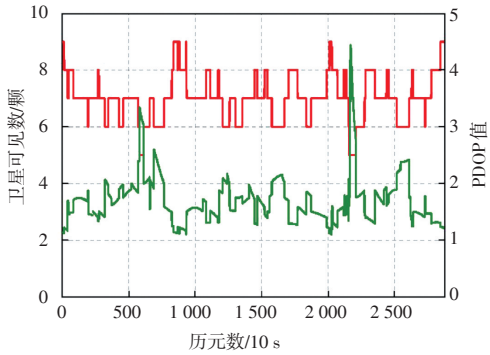


图1　BDS-3卫星可见数与PDOP值

除极少数历元外，单历元变化范围在3以内，平均PDOP值为1.7。

图2给出各频率模糊固定历元水平与垂直向定位误差，通过图2可以发现，B1C单频率短基线相对定位水平向误差在-0.04~0.04 m范围变化，垂直向误差在-0.15~0.15 m范围变化；B1I单频率短基线相对定位水平向误差在-0.04~0.04 m范围变化，垂直向误差

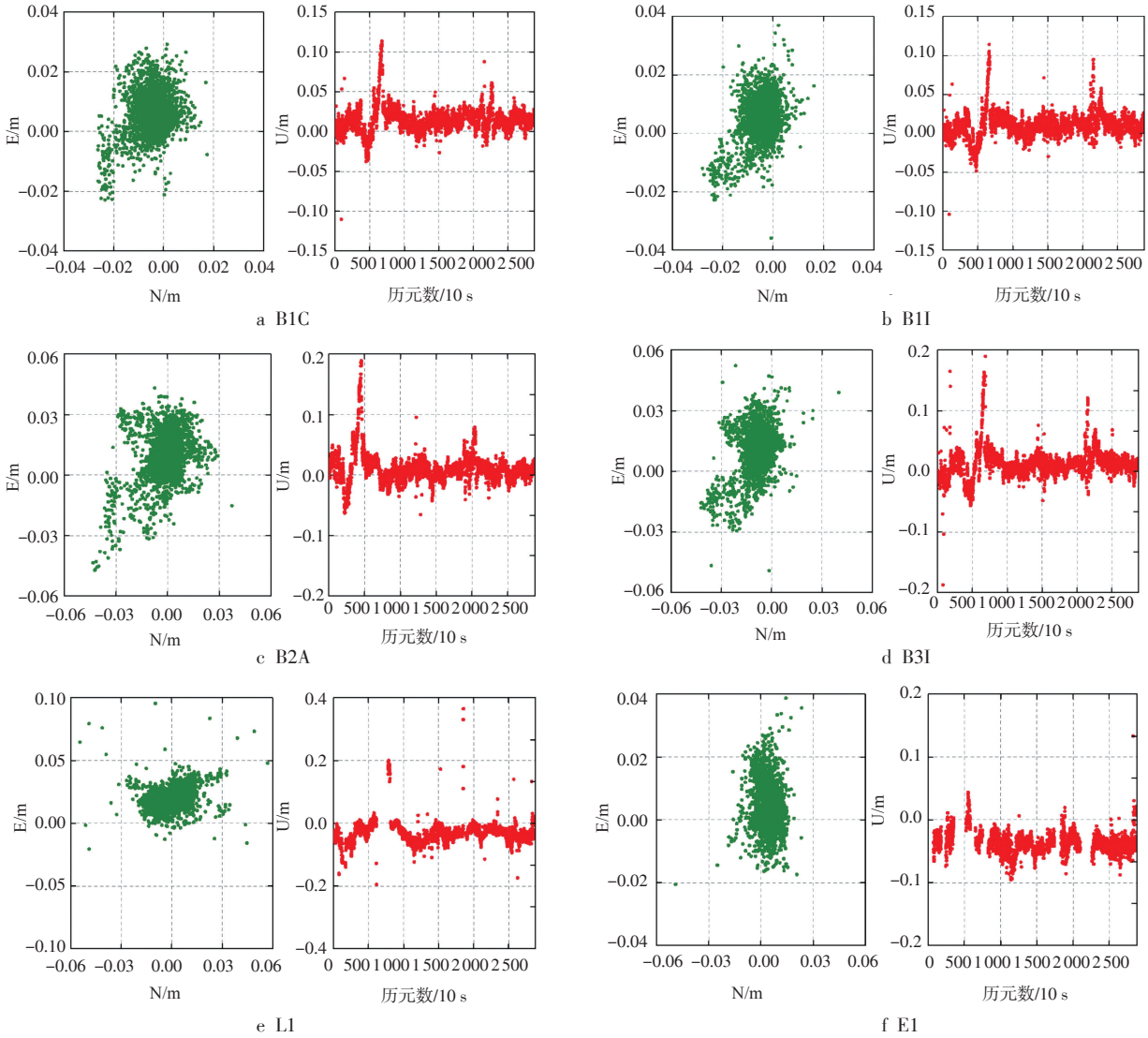


图2　各频率单频模糊度固定历元定位误差序列

在–0.15~0.1 5m范围变化；B2A单频率短基线相对定位水平向误差在–0.06~0.06 m范围变化，垂直向误差在–0.2~0.2 m范围变化；B3I单频率短基线相对定位水平向误差在–0.06~0.06 m范围变化，垂直向误差在–0.2~0.2 m范围变化；L1单频率短基线相对定位水平向误差在–0.1~0.1 m范围变化，垂直向误差在–0.4~0.4 m范围变化；E1单频率短基线相对定位水平向误差在–0.04~0.04 m范围变化，垂直向误差在–0.1~0.1 m范围变化。

图3给出了各频率模糊固定历元3D方向定位误差频数，通过图3可以发现，B1C单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.01~0.02 m范围内；B1I单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.01~0.02 m范围内；B2A单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.01~0.03 m范围内；B3I单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.01~0.03 m范围内；L1单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.02~0.05 m范围内；E1单频短基线相对定位3D方向定位误差频数曲线波峰在0.03~0.05 m范围内。

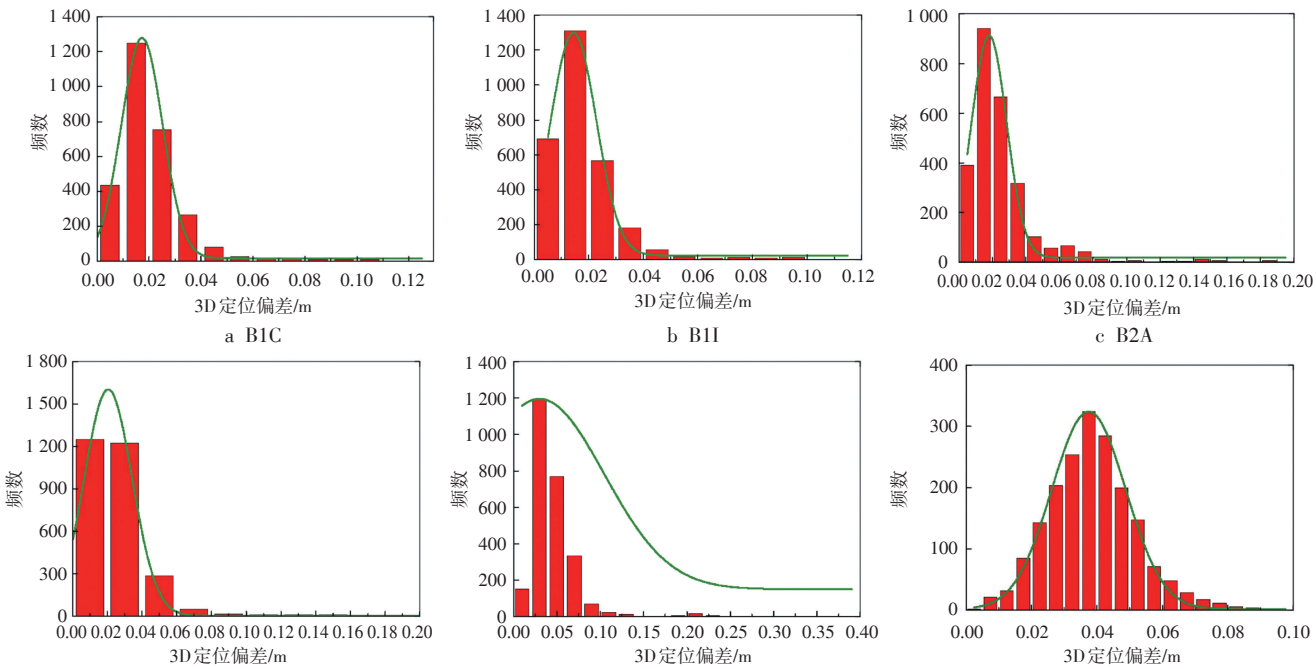


图3 各频率单频模糊度固定历元定位误差频数

图4给出了各频率模糊度固定率，从图4可以发现，B1C、B1I和B2A单频短基线相对定位模糊度固定率在99%以上，接近100%；B3I单频短基线相对定位模糊度固定率为100%；L1单频短基线相对定位模糊度固定率在92%左右；E1单频短基线相对定位模糊度固定率在72%左右。

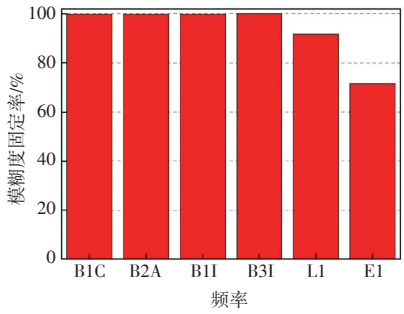


图4 各频率单频短基线模糊度固定率

图5进一步给出了各频率短基线相对定位E方向、N方向与U方向定位精度，从图5可以发现，B1C单频短基线相对定位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 cm；B2A单频短基线相对定位E方向定位精度优于2 cm，N方向定位精度优于2.5 cm，U方向定位精度优于3 cm；B1I单频短基线相对定位E方向定位精度优于1 cm，N方向定位精度优于1.5 cm，U方向定位精度优于2 cm；B3I单频短基线相对定位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；L1单频短基线相对定位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16 cm；E1单频短基线相对定位E方向定位精度优于4 cm，N方向定位精度优于6 cm，U方向定位精度优于20 cm。

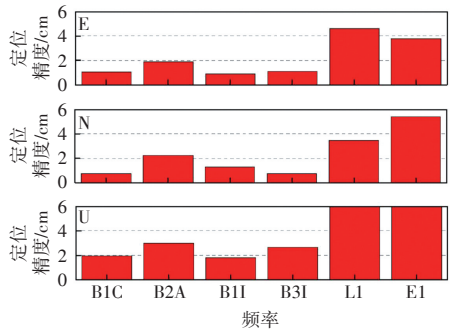


图5　各频率单频短基线相对定位精度

为更直观地表现不同单频短基线定位精度的差异，图6给出了各频率3D方向定位精度，通过图6可以发现，B1C、B1I、B3I单频短基线相对定位3D方向精度优于3 cm，B2A单频短基线相对定位3D方向精度优于5 cm，L1单频短基线相对定位3D方向精度优于17 cm，E1单频短基线相对定位3D方向精度优于21 cm，6个频率3D方向定位精度从高到底依次为B1C、B1I、B3I、B2A、L1、E1。

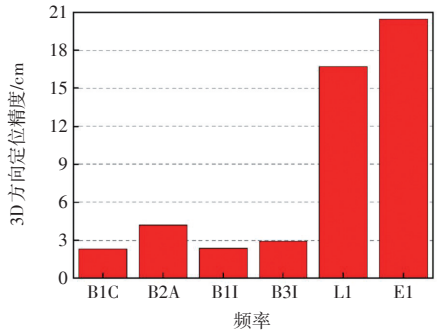


图6　各频率单频短基线相对定位3D方向精度

3　结　论

本文基于一组自采集短基线实测数据，分别进行了B1C、B2A、B1I、B3I单频短基线相对定位实验，并设计了GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率对比实验，得到如下结论：

1）建设完成之后的BDS-3卫星可见数与卫星空间几何构型良好，平均卫星可见数可以达到7颗，平均PDOP值可以达到1.7。

2）BDS-3 4个频率单频短基线相对定位精度都可以达到厘米级，其中B1C和B1I精度最优，水平向定位精度优于1.5 cm，垂直向定位精度优于2 cm；B3I定位精度略差，水平向定位精度优于1.5 cm，垂直向定位精度优于3 cm；B2A定位精度最差，E方向定位精度优于2 cm，N方向定位精度优于2.5 cm，U方向定位精度优于3 cm。

3）BDS-3 4个频率单频短基线相对定位精度都优于L1和E1频率，且模糊度固定率也优于L1和E1频率，3D方向定位精度从高到底依次为B1C、B1I、B3I、B2A、L1、E1。

参考文献

[1] 李树文，王潜心，龚佑兴. 北斗三号卫星新信号数据质量分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2021，44(8)：1 111-1 117

[2] 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)，2021，46(9)：11-19

[3] 赵文浩，刘根友，王生亮，等. GPS-L1/BDS-B1非重叠频率紧组合相对定位[J]. 大地测量与地球动力学，2021，41(6)：618-622+645

[4] 蒋光伟，程传录，陈雄川，等. 基于BDS-3的定位性能与区域参考框架维持分析[J]. 地球物理学进展，2021，36(3)：887-893

[5] 陆雨，邵克凡. BDS/GPS单历元短基线动对动定位性能分析[J]. 测绘科学，2021，46(1)：1-6

[6] 郑磊，刘成. BDS-2/BDS-3/QZSS组合短基线相对定位精度分析[J]. 全球定位系统，2020，45(5)：57-61

[7] 邵银星，赵春梅. 低轨卫星增强BDS单频伪距单点定位[J]. 测绘通报，2020(3)：69-72

[8] 张乾坤，刘小生，何琦敏. BDS-3多频点伪距单点定位性能研究[J]. 测绘通报，2020(1)：71-75

[9] 吴明魁，刘万科，张小红，等. GPS/Galileo/BDS-3试验星短基线紧组合相对定位性能初步评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2020，45(1)：13-20

[10] 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

[11] 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

[12] 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

[13] 刘金海，张睿，涂锐，等. 北斗三号试验卫星对短基线RTK定位性能影响分析[J]. 导航定位学报，2018，6(4)：42-45

[14] 祝会忠，张馨洋，杨虎，等. GEO卫星对BDS相对定位性能的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学，2021，41(8)：795-799+832

[15] 彭广民. BDS-2/BDS-3短基线相对定位精度分析[J]. 地矿测绘，2021，37(1)：8-12

[16] 陈永健. BDS-3新卫星对BDS-2短基线相对定位精度的影响分析[J]. 测绘地理信息，2021，47(9)：1-6

第一作者简介：贾亚军（1987—），工程师，主要从事测绘工作。