



引文格式:张宇,赵齐乐,蒋科材,等.基于BDS-3的陆地探测一号星间基线高精度解算方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10):1763-1769.DOI:10.13203/j.whugis20240198

Citation: ZHANG Yu, ZHAO Qile, JIANG Kecai, et al. High-Precision Inter-Satellite Baseline Determination Method for Lutan-1 Based on BDS-3[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(10): 1763-1769. DOI: 10.13203/j.whugis20240198

基于BDS-3的陆地探测一号星间基线高精度解算方法

张宇¹ 赵齐乐¹ 蒋科材¹ 郭向^{2,3} 李敏¹

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

² 华中科技大学精密重力测量国家重大科技基础设施,湖北 武汉,430074

³ 华中科技大学物理学院引力中心,湖北 武汉,430074

摘要:陆地探测一号(Lutan-1, LT-1)是中国首个L波段干涉合成孔径雷达(interferometry synthetic aperture radar, InSAR)低轨编队卫星任务,高精度的星间基线是InSAR处理和应用的關鍵。研究了低轨卫星编队动力学精密基线解算方法和星间双差模糊度固定方法,并分析了LT-1 A/B双星搭载北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)(B1C、B2a)和GPS(L1、L2)在精密基线解算中的贡献。实验结果表明,与GPS相比,BDS-3的B1C和B2a观测值相位和伪距观测值残差明显更小,表明其信号精度更高。基于GPS、BDS和GPS/BDS联合解的基线重叠精度分别为0.8 mm、0.6 mm和0.5 mm, BDS基线精度比GPS提高25%,并且联合GPS/BDS可进一步提高基线精度。利用GPS和BDS解算的基线间互差精度为1 mm,表明单BDS-3系统可以实现1 mm级的低轨卫星编队精密基线确定。

关键词: B1C/B2a信号;精密基线确定;模糊度固定;LT-1卫星

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2024-05-23

DOI: 10.13203/j.whugis20240198

文章编号: 1671-8860(2024)10-1763-07

High-Precision Inter-Satellite Baseline Determination Method for Lutan-1 Based on BDS-3

ZHANG Yu¹ ZHAO Qile¹ JIANG Kecai¹ GUO Xiang^{2,3} LI Min¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² National Precise Gravity Measurement Facility, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

³ Center for Gravitational Experiment, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Objectives: Lutan-1(LT-1) is the first formation-flying mission of China, enabling interferometry synthetic aperture radar (InSAR) in the L-band. High-precision inter-satellite baseline is crucial for InSAR processing and application. **Methods:** We investigate the dynamic precise baseline solution method and the inter-satellite double-difference ambiguity fixing method of low-orbit formation satellite, and analyze the contribution of BDS-3 (B1C, B2a) and GPS (L1, L2) observation of LT-1 A/B in precise baseline determination. **Results:** The results show that compared with GPS, the residuals of B1C and B2a observations of BDS-3 are significantly smaller, suggesting a higher signal accuracy. The baseline overlap accuracies of GPS-based, BDS-based, and GPS/BDS combined solutions are 0.8 mm, 0.6 mm, and 0.5 mm, respectively. The BDS-based baseline accuracy is 25% higher than that of GPS, and the GPS/BDS combined solution can further improve the baseline accuracy by 37.5% and 16.7% relative to the GPS- and BDS-baselines. The baseline difference between the GPS-based and BDS-based baseline solutions is 1 mm in 3 dimensional directions. **Conclusions:** The analysis suggests that the single BDS-3 system can achieve

基金项目:国家自然科学基金(42030109, 42204020)。

第一作者:张宇,博士,主要研究方向为低轨编队卫星精密定轨。zhangyu2020@whu.edu.cn

通讯作者:赵齐乐,博士,教授。zhaoql@whu.edu.cn

precise baseline determination for low-orbit formation satellites at the 1 mm level and combined GPS/BDS solution will further improve the accuracy than single-system solution.

Key words: B1C/B2a signals; precise baseline determination; ambiguity fixing; Lutan-1 satellite

陆地探测一号(Lutan-1, LT-1)01组卫星是中国首次发射的全极化L波段干涉合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星。该任务由两颗设计指数完全相同的卫星组成,A星(LT-1 A)和B星(LT-1 B)分别于2022年1月26日和2月27日在酒泉卫星发射中心成功发射并进入预定轨道^[1]。当卫星进入绕飞模式时,两颗卫星会保持间距在几千米以内。这种模式下,两颗卫星将实施在轨双星干涉测高任务,以获取高精度地表高程信息^[2]。高精度的干涉测量依赖于高精度的卫星相对位置信息,为了获取双星在轨期间的高精度绝对和相对位置信息,两颗卫星都搭载了可以同时接收GPS和北斗卫星导航系统(Bei-Dou satellite navigation system, BDS)信号的星载全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机,实现LT-1卫星高精度精密轨道和基线解算。

第三代北斗系统(BDS-3)自2020年8月3日建成后开始提供全球服务。BDS-3目前为无线电导航卫星服务(radio navigation satellite service, RNSS)提供5种信号,包括继承自BDS-2的B1I和B3I信号及新播发的B1C、B2a和B2b信号^[3]。近年来,中国越来越多的低轨卫星搭载了能够同时跟踪GPS和BDS信号的星载GNSS接收机,并用于低轨卫星精密轨道确定(precise orbit determination, POD)和基线确定(precise baseline determination, PBD)。文献[4]采用BDS-3的B1I和B3I信号实现对天平一号B星三维亚分米级的精密轨道确定。文献[5]采用BDS-3的B1C和B2a信号对海洋2D卫星进行POD,获得的轨道结果径向精度可达到2.3 cm。为了进一步提升轨道的精度,文献[6]对海洋2D卫星进行带有整周模糊度固定的B1C、B2a信号精密定轨,结果通过卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)检核精度达到2.2 cm。目前,国内外还没有采用B1C、B2a信号进行整周模糊度固定的PBD相关文献报道。

文献[7]采用双差模糊度固定方法,实现重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)编队卫星轨道切向1 mm精度的基线确定。文献[8]针对GRACE数据采用单差模糊度固定和双差模糊度固定联合解算,实

现动力学基线和运动学基线的KBR检核结果35%和16%的提升。文献[9]在Swarm-A星和Swarm-C星间实现模糊度固定的简化动力学和运动学精密基线确定,简化动力学基线三维精度达到1~2 mm水平,运动学基线达到1 cm精度水平。

本文采用LT-1 A/B双星星载GPS、BDS观测数据,分别开展GPS、BDS和GPS/BDS联合动力学和运动学基线解算,并通过双差整周模糊度固定实现高精度基线解算。首先推导双差模糊度固定的方法,然后介绍PBD中采用的数据处理策略,最后基于LT-1 A/B双星实测数据的PBD结果,对比GPS,统计分析了模糊度固定率、观测值残差和基线精度,对PBD中BDS新信号的贡献进行评估。

1 低轨卫星星间双差模糊度固定

低轨卫星POD或PBD中通常采用双频无电离层观测值组合消除一阶电离层的影响,而无电离层组合载波相位观测值的模糊度会失去整数特性^[8],即:

$$\begin{cases} \overline{N}_{r,IF}^s = N_{r,IF}^s + d_{r,IF} - d_{IF}^s \\ d_{r,IF} = B_{r,IF} - b_{r,IF}/\lambda_1 \\ d_{IF}^s = B_{IF}^s - b_{IF}^s/\lambda_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中,上标 s 代表导航卫星;下标 r 代表接收机;IF代表无电离层组合模式; $\overline{N}_{r,IF}^s$ 和 $N_{r,IF}^s$ 分别表示解算的无电离层组合模糊度和相应的真值; b 和 B 分别表示伪距和载波相位引起的硬件延迟偏差; d 表示模糊度的小数周偏差; λ_1 表示频率1对应的波长。模糊度受伪距和相位硬件延迟影响产生小数部分,导致模糊度的整数特性被破坏。对模糊度进行双差计算可以有效恢复模糊度的整周特性,再进行整数模糊度固定可以有效提升轨道解的相对精度^[8]。

根据国际全球GNSS服务(International GNSS Service, IGS)中心提供的观测值信号偏差(observable specific signal bias, OSB)改正产品对原始载波相位和伪距观测值进行改正后,观测值中的导航卫星端硬件延迟偏差将被消除。无电离层组合模糊度可以分解为宽巷(wide lane, WL)模糊度和窄巷(narrow lane, NL)模糊度的线

性组合^[10],即:

$$\begin{cases} \bar{N}_{r,IF}^s = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{r,WL}^s + \frac{f_1}{f_1 + f_2} N_{r,NL}^s + d_{r,IF} \\ N_{r,WL}^s = N_{r,1}^s - N_{r,2}^s \\ N_{r,NL}^s = N_{r,1}^s \end{cases} \quad (2)$$

式中, $N_{r,WL}^s$ 和 $N_{r,NL}^s$ 分别表示 WL 和 NL 模糊度; $N_{r,1}^s$ 和 $N_{r,2}^s$ 分别表示频率 1 和频率 2 对应的整周模糊度; f_1 和 f_2 分别表示频率 1 和频率 2 对应的频率大小。其中, WL 模糊度可以先采用 Hatch - Melbourne - Wübbena 组合计算^[11-13], 然后采用参数估计中解算的非差模糊度浮点解 $\bar{N}_{r,IF}^s$, 根据式(2)计算 NL 模糊度, 最终通过 WL、NL 模糊度组合就能获得无电离层组合模糊度的值。但由于式(2)中存在未知的接收机端硬件延迟偏差 $d_{r,IF}$ 阻碍模糊度的解算, 为了消除 $d_{r,IF}$ 的影响, 对无电离层组合模糊度在卫星 S_0 、 S 和接收机 r_0 、 r 间进行两次差分计算, 即:

$$\begin{cases} \Delta \nabla \bar{N}_{r_0,r,IF}^{s_0,s} = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \nabla N_{r_0,r,WL}^{s_0,s} + \\ \frac{f_1}{f_1 + f_2} \Delta \nabla N_{r_0,r,NL}^{s_0,s} \\ \Delta \nabla N_{r_0,r,WL}^{s_0,s} = (N_{r,WL}^s - N_{r_0,WL}^{s_0}) - \\ (N_{r_0,WL}^s - N_{r_0,WL}^{s_0}) \\ \Delta \nabla N_{r_0,r,NL}^{s_0,s} = (N_{r,NL}^s - N_{r_0,NL}^{s_0}) - \\ (N_{r_0,NL}^s - N_{r_0,NL}^{s_0}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta \nabla$ 符号代表在导航卫星间和接收机间分别进行差分。差分操作可以消除掉导航卫星端和接收机端硬件延迟偏差, 恢复模糊度的整周特性, 再根据上述流程就可以解算出双差模糊度。

将获得的双差模糊度视作伪观测值, 作为参数估计中非差模糊度解算的约束, 即:

$$\Delta \nabla \bar{N}_{r,IF}^{s_0,s} = (\bar{N}_{r,IF}^s - \bar{N}_{r_0,IF}^{s_0}) - (\bar{N}_{r_0,IF}^{s_0} - \bar{N}_{r_0,IF}^{s_0}), W_{r_0,r}^{s_0,s} \quad (4)$$

式中, $W_{r_0,r}^{s_0,s}$ 是伪观测值的权。本文在单 GPS、单 BDS 以及 GPS/BDS 联合基线解算中都采用双差模糊度固定以提高基线解的精度。

2 动力学精密基线确定策略

本文采用武汉大学卫星导航定位技术研究中心研发的 PANDA 软件进行卫星精密基线解算, 该软件已广泛应用于 POD、PBD 和重力场反演^[14-16]。分别采用 GPS 的 L1、L2 信号数据、BDS-3 的 B1C、B2a 信号数据以及两种数据联合生产 LT-1 卫星动力学与运动学基线。PBD 中使用的

具体数据处理策略见表 1。本文采用接收机间差分的伪距和载波相位观测值组成无电离层组合作为观测值, 同时 PBD 需要已知一颗卫星的轨道作为参考轨迹。进行 PBD 之前对 LT-1 A 卫星进行 POD, 结果作为固定轨道。POD 数据处理采用非差无电离层组合观测值, 其余数据处理策略与 PBD 基本相同。GNSS 产品采用武汉大学发布的快速星历、钟差和 OSB 产品, 其中 OSB 产品可以提供包括 GPS 的 L1、L2 和 BDS 的 B1C、B2a 信号的伪距和载波相位信号偏差改正值。在双系统联合 PBD 中采用方差分量估计方法, 根据不同系统观测值的残差为观测值定权。LT-1 卫星的天线相位偏差 (phase center offset, PCO) 采用卫星发射前的地面标定值进行改正, 天线相位中心变化 (phase center variation, PCV) 在卫星入轨后采用残差法进行估计。LT-1 卫星绕飞期间, LT-1 B 卫星为了保持与 LT-1 A 卫星之间的相对位置, 每天都要进行数次轨道机动。本文通过在轨道机动时间段内估计额外的轨道径向、切向和法向的常数加速度来弥补轨道机动力的影响。

3 PBD 结果分析

基于上文所述的数据处理策略, 本文采用 2022 年年积日 195~224 LT-1 卫星绕飞模式下接收的星载 GNSS 数据进行基线解算, 分别基于 GPS (L1、L2) 数据、BDS (B1C、B2a) 数据以及 GPS/BDS 联合数据生产动力学和运动学基线解。解算弧长是以每天正午为中心的 30 h 弧段, 相邻两个弧段间存在 6 h 的重叠部分 (21 时至次日 3 时)。为保证 BDS 解的精度, 本文只采用接收自 BDS-3 中地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星的数据。图 1(a) 是实验数据时间段内平均每个历元跟踪卫星数, GPS 均值是 8.6 颗, BDS 均值是 8.3 颗, 两个系统跟踪卫星数达到同一水平。图 1(b) 是 GPS 和 BDS 伪距观测值多路径误差随高度角变化。BDS B1C、B2a 信号多路径误差标准差分别为 0.19 m 和 0.13 m, 明显小于 GPS L1、L2 信号的 0.22 m 和 0.19 m, 说明 BDS 伪距观测值精度要优于 GPS。下文将通过模糊度固定率、观测值残差、基线重叠弧段差值和基线间比较来评估 B1C 和 B2a 信号对基线解算的贡献。

3.1 模糊度固定率

模糊度固定需要解出一组最大线性无关的独立模糊度。模糊度固定率可以作为衡量模糊

表1 精密基线确定数据处理策略
Tab. 1 PBD Data Processing Strategy

统计项	具体数据	策略
力学模型	地球重力场	EIGEN-6C4, 150×150阶次重力场模型
	地球固体潮和极潮	IERS Conventions 2010
	海潮	EOT11a海潮模型
	海洋极潮	Desai模型
	N体引力	DE421行星星历
	相对论效应	IERS Conventions 2010
	大气阻力	Macro卫星模型, DTM-2013大气密度模型
	太阳光压	Macro卫星模型, Box-wing模型
	地球反照辐射压	Macro卫星模型, CERES地球辐射数据
输入数据和误差改正	星载GNSS数据	接收机间单差的伪距和载波相位观测值无电离层组合, 采样间隔30 s
	导航卫星星历、钟差和OSB产品	武汉大学发布的快速星历产品 ^[17]
	导航卫星天线相位中心改正	IGS14.ATX模型
	观测值定权	方差分量估计 ^[18]
待估参数	陆地探测卫星天线相位中心改正	PCO采用地面标定值, PCV采用残差法进行估计 ^[19]
	LT-1 A卫星轨道	采用POD结果
	LT-1 B卫星参考时刻状态矢量	卫星位置矢量和速度矢量
	常数经验力, 切向和法向周期性经验力	每90 min分段
	接收机钟差	每历元1个
	载波相位模糊度	每颗卫星、每个模糊度弧段1个
	切向、法向和径向常数经验数加速度	每次轨道机动估计1组 ^[20]

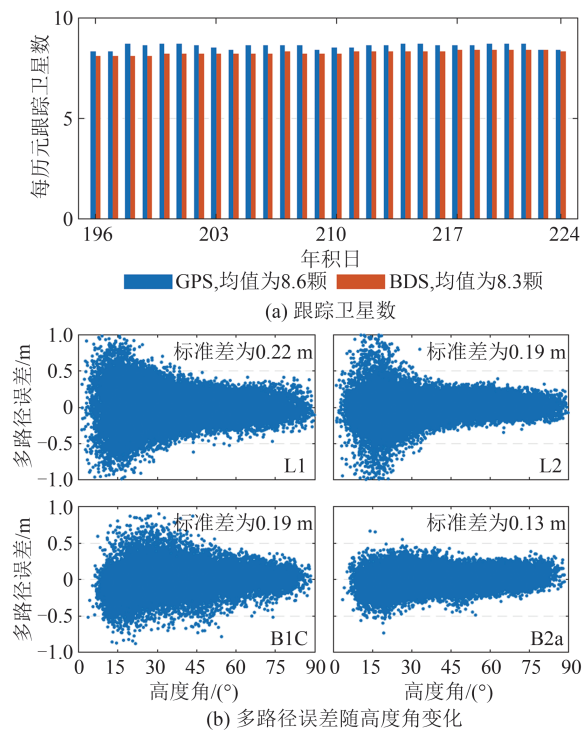


图1 GPS、BDS每历元跟踪卫星数和伪距观测值多路径误差
Fig. 1 GPS, BDS Per Epoch Tracked Satellites and Multipath Errors of Code Observation

度固定表现的一个指标。图2为3组动力学基线的WL、NL双差模糊度固定率, 图例中给出了每组基线模糊度固定率的均值。WL、NL模糊度固

定率分别为固定的WL或NL模糊度数与独立模糊度数的比值。从图2中可以看出, GPS单系统、BDS单系统以及GPS/BDS联合处理3组基线解的WL模糊度固定率都达到100%, NL模糊度固定率也都超过98%。如上文所述, 双差模糊度消除了接收机端和导航卫星端的硬件延迟误差, 很好地恢复了模糊度的整周特性, 因此3组基线解都表现出极好的模糊度固定效果。

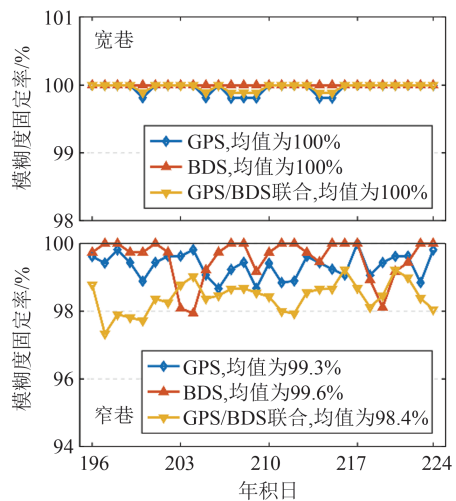


图2 宽巷和窄巷模糊度固定率
Fig. 2 WL and NL Ambiguity Fixing Rates

3.2 观测值残差

观测值残差可以一定程度上反映观测值的

质量以及观测值与采用的动力学模型间的一致性。在进行星间 PBD 之前,对 LT-1 A 进行了 POD 来获得 A 星轨道作为参考轨道。图 3 为基于 GPS 单系统、BDS 单系统以及 GPS/BDS 联合处理的 A 星轨道解和星间基线解的载波相位和伪距观测值残差的均方根 (root mean square, RMS) 的均值,可以看出,POD 和 PBD 结果的观测值残差之间存在较大差异。对于载波相位观测值,轨道解的 BDS 相位观测值残差为 4.9 mm,略大于 GPS 的 4.7 mm;而基线解的 BDS 相位观测值残差为 2.5 mm,远小于 GPS 的 4.4 mm。这种变化说明 BDS 观测值相比 GPS 存在更大的系统性误差和更小的随机噪声。POD 中,BDS 观测值受量级更大的系统差影响,显示出更大的残差。PBD 中,采用的站间单差观测值会消除大部分导航卫星端系统差,随机噪声更小的 BDS 观测值显示出更小的残差。

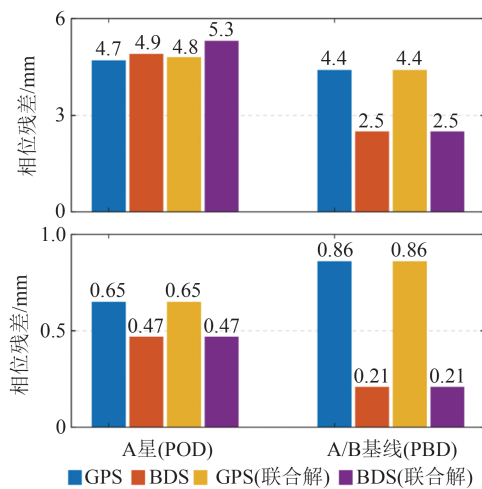


图 3 相位和伪距观测值残差平均 RMS 值
Fig. 3 Mean RMS Values of Phase and Code Observation Residual

对于伪距观测值,在 POD 和 PBD 结果中 BDS 伪距残差都要明显小于 GPS,这与上述伪距多路径误差分析结果一致。基线解的 GPS 伪距观测值残差大于轨道解的伪距残差,说明 GPS 伪距观测值中米级的观测值噪声占主要,观测值差分操作对系统误差的削弱不能抵消差分观测值对噪声的放大作用。对于 BDS 伪距观测值,差分操作削弱系统误差对观测值残差的影响更加明显。许多针对 B1C、B2a 信号的分析研究也已证明 BDS-3 的 B2a 信号相比 GPS 信号表现出更小的伪距和相位噪声,而 B1C 信号与 GPS 信号噪声处在同一水平^[21-23]。GPS/BDS 双系统解表现出与单系统解相同水平的观测值残差。

3.3 基线精度分析

同一组基线解的相邻弧段之间存在重叠,通过计算重叠弧段差值可以对解的内符合精度进行评价。图 4 显示了 3 组动力学基线解在轨道切向、法向和径向上 6 h 重叠基线差值的每日 RMS 值。基于 GPS、BDS 和 GPS/BDS 联合解基线的三维平均 RMS 值分别为 0.8 mm、0.6 mm 和 0.5 mm,结果表明 3 组基线在所有方向上都表现出相似且优异的内部一致性。BDS 基线精度略高于 GPS 基线,这与观测值残差中分析结果一致。GPS/BDS 联合基线相对于 GPS、BDS 基线精度分别提升 37.5% 和 16.7%。

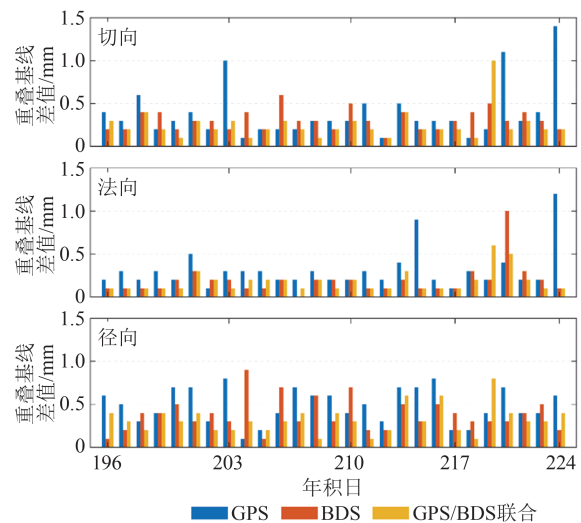


图 4 3 种基线解的重叠基线差值

Fig. 4 Overlapping Baseline Differences of Three Sets of Baseline Solutions

图 5 是 3 种动力学基线彼此间差值的时间序列,其中,G/C 代表 GPS 基线和 BDS 基线间差值,G/GC 代表 GPS 基线和 GPS/BDS 联合基线间差值,C/GC 代表 BDS 基线和 GPS/BDS 联合基线间差值。图 5 中径向基线差值中出现的规则尖峰是由 LT-1 B 日常机动所引起的。即使 PBD 策略中增加额外的经验加速度参数吸收轨道机动的影 响,轨道机动弧段附近的基线精度也略有下降,但对基线整体精度没有显著影响。G/C、G/GC 和 C/GC 3 种基线差值的三维 RMS 均值分别为 1.0 mm、0.7 mm 和 0.4 mm。基线一致性分析结果说明 BDS 基线与 GPS/BDS 联合基线间表现出最佳的一致性,这进一步说明差分 BDS 观测值在 PBD 中表现出优越的性能。

运动学精密基线确定方法不依赖任何卫星动力学模型,完全依赖星载 GNSS 数据进行卫星坐标解算。本文采用与表 1 中相同的观测值误差

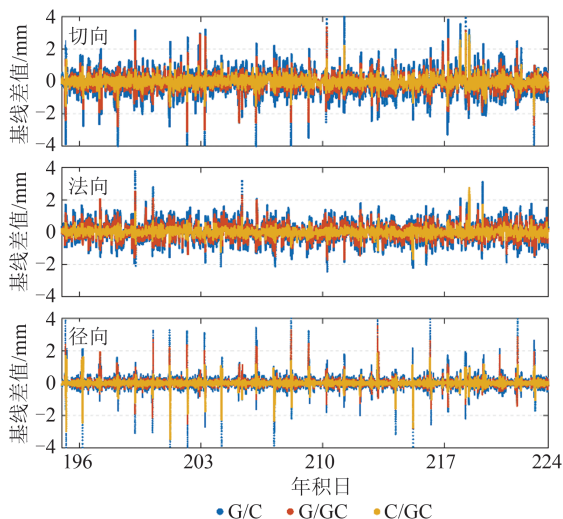


图5 3种基线解之间差值的时间序列

Fig. 5 Time Series of Baseline Differences Between Three Sets of Baseline Solutions

改正策略生成3组运动学基线解。图6显示了采用相同观测值的动力学与运动学基线间差值的每日RMS值的箱形图。GPS基线、BDS基线和GPS/BDS联合基线的三维RMS均值是11.6 mm、10.4 mm和7.3 mm。运动学基线精度主要受观测值质量影响,对于高动态环境,解算精度要低于动力学基线解算精度^[24]。此外,3组解在径向都表现出较差的精度,这是因为运动学解中径向的几何约束通常弱于其他方向,这与地面精密单点定位中观测到高程方向精度较差的现象相同。采用B1C、B2a信号可以实现分米级的运动学精密基线确定。

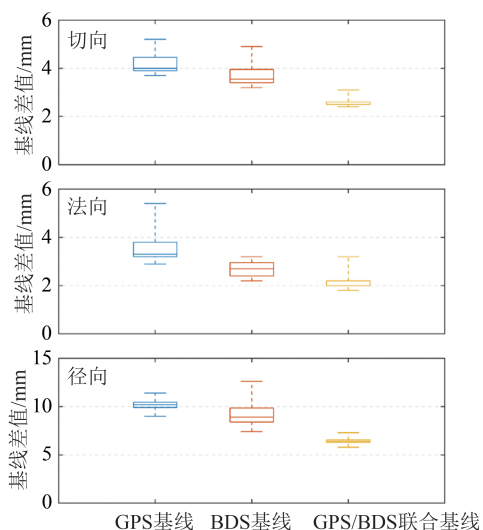


图6 动力学与运动学基线解间一致性的箱形图

Fig. 6 Box Plot of Consistency Between Dynamic and Kinematic Baseline Solutions

相较于GPS、BDS动力学与运动学基线间表现出更好的一致性,而联合解基线表现则更优于

单系统基线解,并且各方向的基线差值更加稳定。运动学基线精度主要受观测值质量影响,因此联合解基线主要受益于双系统对观测数据量的增加。

在PBD中,采用站间单差观测值会削弱大部分来自导航卫星端的系统误差,随机误差更小的B1C、B2a信号会显示出更加优异的性能。因此,采用BDS数据可以实现比GPS精度更高的精密基线确定,而GPS/BDS联合数据解算可以实现优于单系统解的基线精度。

4 结语

本文采用LT-1 A/B双星载GPS(L1、L2)和BDS(B1C、B2a)GNSS数据进行星间精密基线确定研究,获得了动力学和运动学的GPS、BDS和GPS/BDS联合基线并对结果进行了模糊度固定率、观测值残差以及基线精度分析。

1) 受益于双差模糊度消除了导航卫星端和接收机端的硬件延迟误差,3组动力学基线的宽巷模糊度固定率都达到100%,窄巷模糊度固定率也超过98%。

2) PBD中采用的站间单差观测值消除了导航卫星端大部分的系统误差,因此随机误差更小的B1C和B2a信号表现出更小的观测值残差。

3) BDS信号在动力学基线的重叠弧段差值、基线间差值分析和动力学与运动学基线一致性比较都表现出比GPS基线更高的精度。相对于单系统解,采用GPS/BDS联合可以实现进一步的精度提升。

研究表明LT-1卫星采用BDS-3的B1C和B2a信号可以实现1 mm级精密基线确定,精度优于基于GPS数据获得的精密基线结果,相较于单系统解,采用GPS/BDS数据联合解算会进一步提高基线结果精度。

参 考 文 献

- [1] Xiao Qu. Landsat-1 01 Group Satellite[J]. *Satellite Application*, 2022(3): 70. (晓曲. 陆地探测一号01组卫星[J]. 卫星应用, 2022(3): 70.)
- [2] Liu Bin, Zhang Li, Ge Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230478. (刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测-1号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023,

- DOI: 10.13203/j.whugis20230478.)
- [3] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0) [EB/OL]. (2021-05-01) [2024-05-01]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202105/P020210526216231136238.pdf>.
- [4] Zhao X L, Zhou S S, Ci Y, et al. High-Precision Orbit Determination for a LEO Nanosatellite Using BDS-3[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(4): 102.
- [5] Li M, Mu R H, Jiang K C, et al. Precise Orbit Determination for the Haiyang-2D Satellite Using New Onboard BDS-3 B1C/B2a Signal Measurements [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 137.
- [6] Jiang K C, Li W W, Li M, et al. Precise Orbit Determination of Haiyang-2D Using Onboard BDS-3 B1C/B2a Observations with Ambiguity Resolution [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 28.
- [7] Kroes R, Montenbruck O, Bertiger W, et al. Precise GRACE Baseline Determination Using GPS [J]. *GPS Solutions*, 2005, 9(1): 21-31.
- [8] Guo X, Geng J H, Chen X Y, et al. Enhanced Orbit Determination for Formation-Flying Satellites Through Integrated Single- and Double-Difference GPS Ambiguity Resolution [J]. *GPS Solutions*, 2019, 24(1): 14.
- [9] Allende-Alba G, Montenbruck O, Jäggi A, et al. Reduced-Dynamic and Kinematic Baseline Determination for the Swarm Mission [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1275-1284.
- [10] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2 000 km [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10187-10203.
- [11] Hatch R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements [C]//The 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, New York, USA, 1982.
- [12] Melbourne W G. The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems [C]//The 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, 1985.
- [13] Wübbena G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements [C]//The 1st International Symposium on Precise Position with GPS, Rockville, Maryland, 1985.
- [14] Liu J N, Ge M R. PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 603-609.
- [15] Guo X, Zhao Q L. M-Estimation-Based Robust and Precise Baseline Determination for Formation-Flying Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 48.
- [16] Guo X, Zhao Q L, Ditmar P, et al. Improvements in the Monthly Gravity Field Solutions Through Modeling the Colored Noise in the GRACE Data [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(8): 7040-7054.
- [17] Geng J H, Chen X Y, Pan Y X, et al. A Modified Phase Clock/Bias Model to Improve PPP Ambiguity Resolution at Wuhan University [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2053-2067.
- [18] Bähr H, Altamimi Z, Heck B. Variance Component Estimation for Combination of Terrestrial Reference Frames [M]. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2007.
- [19] Jäggi A, Dach R, Montenbruck O, et al. Phase Center Modeling for LEO GPS Receiver Antennas and Its Impact on Precise Orbit Determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(12): 1145-1162.
- [20] Mao X Y, Arnold D, Kalarus M, et al. GNSS-Based Precise Orbit Determination for Maneuvering LEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 147.
- [21] Huang C, Song S L, Cheng N, et al. Data Quality Analysis of Multi-GNSS Signals and Its Application in Improving Stochastic Model for Precise Orbit Determination [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8): 1253.
- [22] 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(4): 611-619.)
- [23] Zhang Qiang. Research on Key Technologies of Precise Orbit Determination of LEO Satellites and Their Formations Using GPS and BeiDou [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (张强. 采用GPS与北斗的低轨卫星及其编队精密定轨关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.)
- [24] He L N, He X X, Huang Y. Enhanced Precise Orbit Determination of BDS-3 MEO Satellites Based on Ambiguity Resolution with B1C/B2a Dual-Frequency Combination [J]. *Measurement*, 2022, 205: 112197.