

北斗二号系统非核心区域定位精度影响因素分析

侯 睿¹, 郭金运¹, 周茂盛¹, 刘 新¹, 纪 兵², 刘智敏¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033)

摘 要:北斗二号系统作为一种区域定位系统在其服务核心区域内发挥了越来越重要的作用,对于北斗二号系统非核心区域定位精度影响因素的研究也变得越来越大。本研究使用 GAMIT/GLOBK 软件解算由多 GNSS 实验项目(MGEX)提供的位于北斗二号系统非核心区的 17 个 IGS 站数据,研究了不同精密星历以及基线解算策略中的干湿映射函数、观测量选择、卫星高度截止角、对流层天顶延迟估计时间间隔对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响。实验结果表明:北斗二号系统非核心区域定位标准差精度达到分米级;利用 GAMIT/GLOBK 软件对实验区域北斗数据进行解算时,使用欧洲定轨中心(CODE)提供的精密星历,干湿映射函数采用 NMF 函数,观测量采用电离层约束求解宽巷模糊度,卫星高度截止角设置为 12° ,对流层天顶延迟估计时间间隔设置为 1 h,解算精度较高。制约北斗二号系统非核心区域定位精度的主要原因是非核心区域测站可观测到的北斗二号卫星数太少。研究表明,精密星历、干湿映射函数、观测量选择、卫星高度角设置和对流层天顶延迟估计时间间隔会影响北斗二号系统非核心区的定位精度,通过选择合适的精密星历和基线解算策略能够提高定位精度。

关键词:北斗二号; 非核心区; 定位精度; GAMIT/GLOBK 软件; 多 GNSS 实验项目(MGEX)

中图分类号:P228.1

文献标志码:A

Analysis of influencing factors of positioning precision in non-core area of BeiDou II system

HOU Rui¹, GUO Jinyun¹, ZHOU Maosheng¹, LIU Xin¹, JI Bing², LIU Zhimin¹

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: As a regional positioning system, BeiDou II system playing an increasingly important role in its core area services, research on factors affecting the positioning precision in non-core area of BeiDou II has also become more and more significant. In this study, GAMIT/GLOBK software was used to process the data provided by MGEX of 17 IGS stations located in the non-core area of BeiDou II system. Factors affecting the positioning precision of BeiDou II in the non-core area were analyzed, including different precise ephemeris, mapping functions, choices of observation, satellite cut-off elevation angles, and time intervals on zenith tropospheric delay estimation. The results show that the standard deviation reaches the decimeter level. A higher positioning precision can be achieved by using the precise ephemeris provided by CODE, solving broad lane ambiguity based on ionospheric constraint, selecting NMF mapping function, and setting the satellite cut-off elevation angle as 12° and the time interval of zenith tropospheric delay estimation as 1 h. The main reason for the lower positioning precision in non-core area of BeiDou II system is that only a few number of BeiDou II satellites can be observed. The research shows that the positioning precision in non-core area of BeiDou II system were affected by the precise ephemeris, wet and dry mapping functions, choice of

收稿日期:2020-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41774001,41374009,41774021);国家科技基础性工作专项(2015FY310200)

作者简介:侯 睿(1996—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事 GNSS 数据处理的研究。

郭金运(1969—),男,山东巨野人,教授,博士生导师,主要从事空间大地测量、物理大地测量和海洋大地测量等研究,本文通信作者。E-mail: jinyunguo1@126.com

observation, satellite cut-off elevation angle, and time interval on zenith tropospheric delay, but it can be improved by selecting suitable precise ephemeris and baseline solution strategy.

Key words: BeiDou II; non-core area; positioning precision; GAMIT/GLOBK software; the multi-GNSS experiment and pilot project(MGEX)

中国北斗二号系统的建成和使用极大促进了中国导航定位事业的发展,北斗二号系统的研究和应用前景已经变得越来越广阔。目前,北斗二号系统主要服务于亚太地区,其服务的重点区域为东经 $55^{\circ} \sim 180^{\circ}$, 北纬 55° 之间^[1]。

近年来,国内外学者开展了大量关于北斗二号系统定位精度影响因素的研究。Liu 等^[2]利用北斗区域导航系统,完成了北斗高精度定位任务,并对北斗解算方案中的参考站选择、站间距离等因素进行了研究。李森等^[3]将北斗卫星系统应用于高精度工程控制测量,将北斗系统定位精度与全球定位系统(global positioning system, GPS)系统进行比较,认为可以将北斗系统应用在厘米级定位精度的测绘领域,并探讨了北斗系统精密星历对解算北斗数据的影响。吴仁攀等^[4]利用天津、武汉和广东连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS 站)网内的实测北斗卫星数据进行了北斗相对定位精度影响因素的研究。目前北斗二号系统的研究和应用区域主要局限于北斗二号系统服务的核心区域,对于非核心区域(服务区域 $55^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$, $55^{\circ}\text{S} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 之外的区域)研究较少。因此,研究北斗二号系统非核心区域定位精度的影响因素,并针对这些影响因素制定最佳的数据处理策略对提高北斗二号系统在非核心区域的定位精度具有重要的意义。

为了探讨北斗二号系统非核心区域相对定位精度的影响因素。本研究将对精密星历和基线解算策略中 4 个参数(观测量选择、卫星高度截止角、干湿映射函数、对流层天顶延迟估计时间间隔)进行研究。探究这些因素对北斗二号系统非核心区域相对定位精度的影响,并根据这些影响因素给出最佳的北斗二号系统非核心区域数据解算策略。

1 数据及方法

1.1 研究区域和数据

为针对北斗二号系统非核心区域进行研究,选取 $20^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}\text{W}$, $70^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{S}$ 作为研究区,主要包含美洲和东太平洋地区。

MGEX(Multi_global navigation satellite system(GNSS) experiment, 多全球导航定位系统实验项目)2012 年由国际 GNSS 服务组织(International GNSS service, IGS)工作组提出^[5-7]。研究数据取自 MGEX 机构,包括北斗导航星历(https://igs.bkg.bund.de/root_ftp/IGS/BRDC/)^[8],混合观测数据(<ftp://igs.ign.fr/pub/igs/data/>)^[9]和混合精密星历(<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/mgex/>)^[10]。共选取 17 个 IGS 站的观测数据作为实验数据,数据采样间隔为 30 s,站点主要位于美洲地区和东太平洋地区,海陆及中高低纬度皆有分布,测站站点分布如图 1 所示。

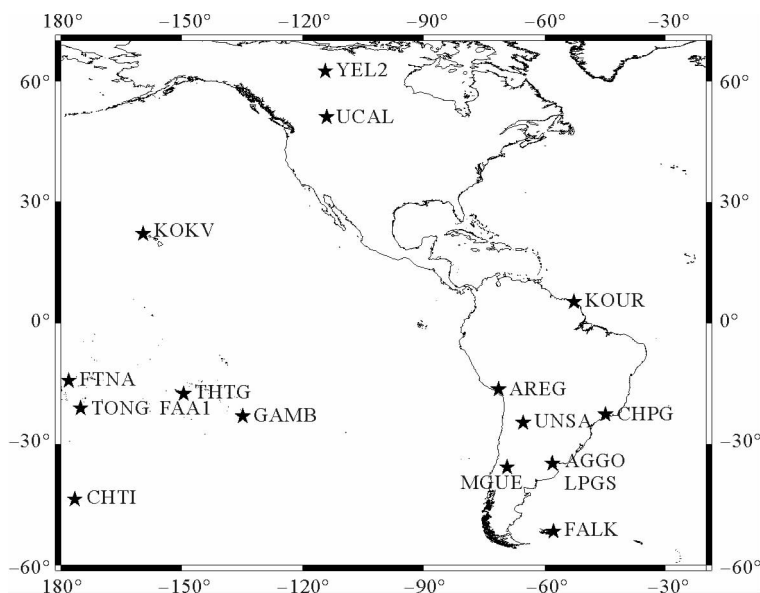


图 1 测站站点分布

Fig. 1 Station distribution

1.2 研究方法

GAMIT 作为一款高精度全球导航定位系统(GNSS)数据处理软件,由于其优良的解算精度,在国内外高精度 GNSS 数据处理中得到了广泛应用^[11-12]。目前 GAMIT 可以进行北斗二号卫星系统数据的解算,因此采用 GAMIT10.7 作为北斗二号系统数据解算软件。

为了研究北斗二号系统在非核心区域的相对定位精度,将对 17 个 IGS 站数据设计 5 种实验策略。由于观测数据同时包含 GPS 数据和北斗二号系统数据,因此将相同测站同时段的 GPS 单天解作为参考值,GPS 解算使用 IGS 精密星历,基线解算策略及参数设置如表 1 所示。

方案 1,研究不同精密星历对北斗二号系统在非核心区域相对定位精度的影响。分别使用欧洲定轨中心(centre for orbit determination in Europe, CODE)、德国地学中心(geo forschungs zentrum, GFZ)和武汉大学(Wuhan university, WUM)三个分析中心提供的精密星历进行北斗二号系统数据解算,每组连续解算 20 天(2018 年年积日 007 至 026),基线解算策略如表 1 所示。

方案 2,研究解算策略参数中干湿映射函数参数对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响。分别使用 3 种干湿映射函数 NMF(niell mapping function)、VMF1(vienna mapping functions 1)、GMF(global mapping function)进行北斗二号系统数据解算,共解算 7 天(2018 年年积日 020 至 026),精密星历使用 CODE 精密星历,除干湿映射函数之外的其他基线解算策略采用表 1 中的参数。

方案 3,研究解算策略中观测量选择参数对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响。分别采用基于伪距解算宽巷模糊度和利用电离层约束求解宽巷模糊度进行北斗二号系统数据解算,共解算 7 天(2018 年年积日 020 至 026),精密星历使用 CODE 精密星历,除观测量选择之外其他基线解算策略采用表 1 参数。

方案 4,研究解算策略中卫星高度截止角对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响。对北斗二号系统数据进行解算,将卫星高度截止角分别设置为 0°、5°、10°、11°、12°、13°、14°、15°、20°、25°、30°、35°、40°,共解算 7 天(2018 年年积日 020 至 026),使用 CODE 精密星历,除卫星高度截止角之外的其他解算策略采用表 1 中的参数。

方案 5,研究解算策略中对流层天顶延迟估计时间间隔对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响。对北斗二号系统数据进行解算,将对流层天顶延迟估计时间间隔分别设置为每 1 h 解算一次、每 2 h 解算一次、每 4 h 解算一次,共解算 7 天(2018 年年积日 020 至 026),运用 CODE 精密星历,除对流层天顶延迟估计时间间隔之外的其他解算策略采用表 1 中的参数。

2 结果和分析

2.1 不同精密星历对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响

为了分析不同精密星历对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响,分别使用 CODE、GFZ、WUM 三家机构发布的精密星历进行北斗数据解算,并将单天解中的北斗解算结果与 GPS 解算结果进行对比,统计测站北斗解算与 GPS 解算在 N、E、U 三方向上差值的最大值(MAX)、最小值(MIN)、平均值(MEAN)和标准差(STD),统计结果如表 2 所示,并根据(1)式分析测站的标准差,统计结果如图 2 所示。

$$STD_{\text{总}} = \sqrt{STD_N^2 + STD_E^2 + STD_U^2} \quad (1)$$

其中:STD_总 为点位误差,STD_N 为 N 方向标准差,STD_E 为 E 方向标准差,STD_U 为 U 方向标准差。

表 1 基线解算策略

Tab. 1 Strategy of baseline solution

| 控制选项 | 参数设置 |
|-------------|------------|
| 截至高度角 | 10° |
| 观测量 | LC_AUCTCLN |
| 干湿映射函数 | GMF 函数 |
| 光压模型 | BERNE |
| 潮汐改正模型 | FES2004 |
| 对流层天顶延迟估计间隔 | 2 h |
| 对流层误差模型 | SAAS |

表 2 不同精密星历解算精度统计

Tab. 2 Statistics of solution accuracy using different precise ephemeris m

| 精密星历 参数 | CODM | | | GFZ | | | WUM | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | dN | dE | dU | dN | dE | dU | dN | dE | dU |
| MAX | 0.836 0 | 1.670 0 | 2.934 8 | 1.172 0 | 1.704 9 | 2.533 8 | 0.655 4 | 1.704 9 | 2.533 8 |
| MIN | −0.714 6 | −1.891 1 | −0.527 2 | −0.530 0 | −2.465 1 | −1.501 4 | −0.530 0 | −2.465 1 | −1.501 4 |
| MEAN | −0.001 2 | −0.003 2 | 0.007 2 | −0.002 5 | 0.017 9 | −0.024 4 | −0.005 8 | 0.009 5 | −0.016 2 |
| STD | 0.131 9 | 0.247 9 | 0.236 0 | 0.164 8 | 0.297 7 | 0.282 7 | 0.146 5 | 0.290 1 | 0.268 4 |

由表 2 知,在北斗非核心区域测站单天 GPS 解算值与北斗解算值的差值中,最大值达到米级,平均值达到厘米级,标准差精度达到分米级。由图 2 知,最优结果(点位误差最小)中 76.4%使用 CODE 精密星历解算;最优解算结果中 11.8%使用 WUM 精密星历解算;最优解算结果中 11.8%使用 GFZ 精密星历解算。通过比较发现,使用 CODE 精密星历进行北斗二号系统数据解算的精度和稳定性较高,WUM 次之,GFZ 精度稍差,因此在非核心区进行北斗二号系统数据解算时建议使用 CODE 精密星历。

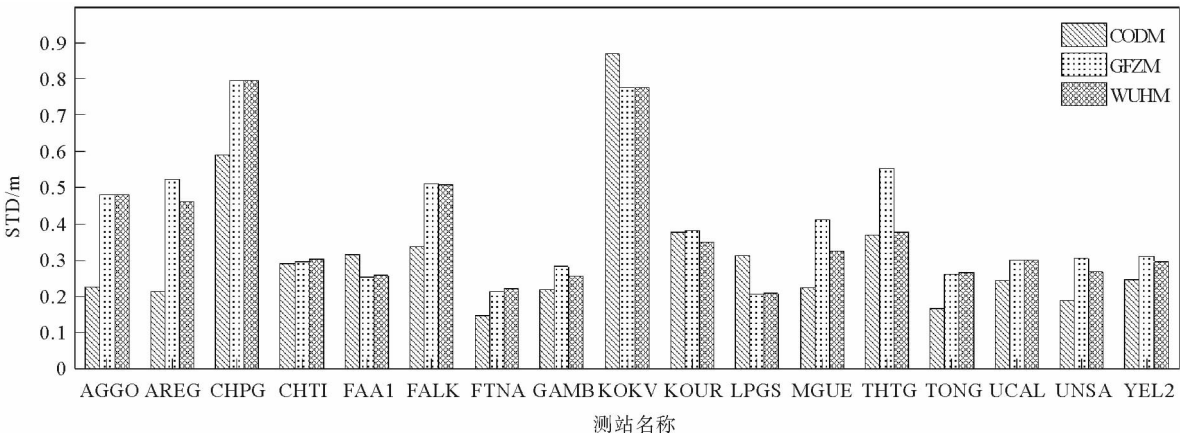


图 2 不同精密星历测站点位标准差统计

Fig. 2 Statistics of standard deviations using different precise ephemeris

2.2 干湿映射函数对北斗二号系统在非核心区域定位精度的影响

映射函数是对流层延迟改正中的重要组成部分,是将天顶方向延迟量准确转化为信号传播路径方向的关键。选择一个合适的映射函数对于提高数据处理精度具有十分重要的意义^[13-14]。

表 3 为方案 2 中分别利用三种映射函数进行解算的精度统计表,通过统计发现,三种模型的测站单天 GPS 解算值与北斗解算值的差值中,最大值达到米级,平均值在厘米级,标准差在分米级。对三组实验分别以测站为单位绘制点位误差图,由图 3 知最优结果(点位误差最小)中的 53%使用 NMF 函数;最优解算结果中的 17.6%使用 VMF1 函数;最优解算结果中 29.4%使用 GMF 函数。经过比较发现,VMF1 函数精度和稳定性稍差,GMF 函数次之,NMF 函数精度和稳定性较好,因此在非核心区进行北斗二号系统数据处理时建议使用 NMF 映射函数。

表 3 不同干湿映射函数解算精度统计

Tab. 3 Statistics of solution accuracy using different mapping functions m

| 映射函数 指标 | VMF1 | | | GMF | | | NMF | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | dN | dE | dU | dN | dE | dU | dN | dE | dU |
| MAX | 0.705 2 | 1.591 5 | 2.648 5 | 0.836 0 | 1.670 0 | 2.934 8 | 0.718 7 | 1.400 4 | 2.733 8 |
| MIN | −0.632 8 | −1.750 9 | −1.529 1 | −0.390 8 | −1.891 1 | −0.375 0 | −0.363 1 | −1.951 5 | −1.019 5 |
| MEAN | −0.015 4 | −0.003 9 | 0.016 4 | −0.006 5 | 0.000 6 | 0.028 6 | −0.002 9 | 0.006 4 | 0.006 9 |
| STD | 0.140 7 | 0.323 2 | 0.366 6 | 0.133 7 | 0.304 9 | 0.331 2 | 0.118 6 | 0.282 8 | 0.306 8 |

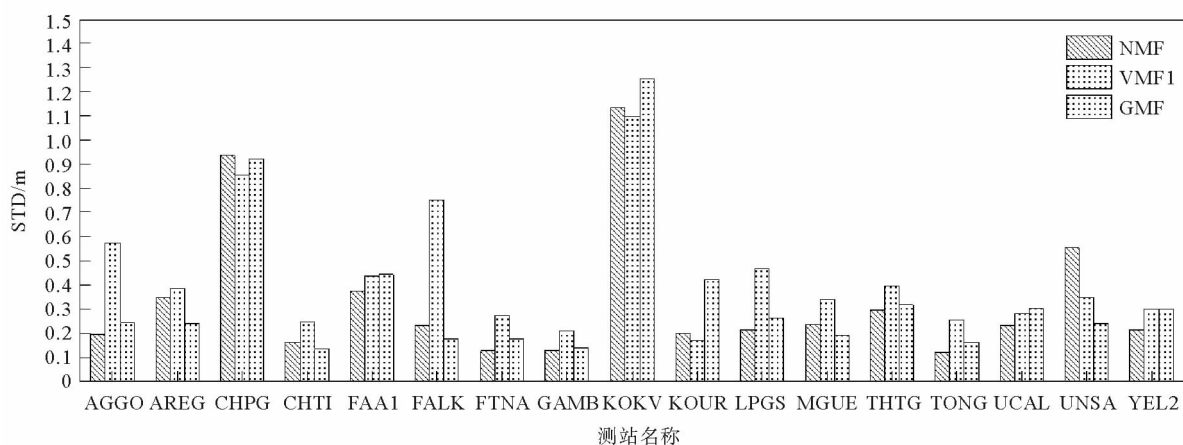


图3 不同映射函数测站点位标准差统计

Fig. 3 Statistics of standard deviations using different mapping functions

2.3 不同观测量选择对北斗二号系统在非核心区域数据处理定位精度的影响

GAMIT 软件在采用双差载波相位观测值解算长基线时提供了两种解算模式:一种是基于伪距解算宽巷模糊度;另一种是利用电离层约束求解宽巷模糊度。由于基于伪距解算宽巷模糊度和利用电离层约束求解宽巷模糊度均为基于无电离层组合载波相位观测值,区别仅在于如何分解 LC 整周模糊度,地球不同区域电离层分布将会影响长基线解收敛速度和 LC 模糊度分解精度^[15],因此观测量选择对于提高数据处理精度具有十分重要的意义。

表 4 为方案 3 分别使用基于伪距解算宽巷模糊度和利用电离层约束求解宽巷模糊度作为观测量进行解算的精度统计。结果表明分别使用两种不同观测量时,测站单天 GPS 解算值与北斗解算值的差值中,最大值达到米级,平均值为厘米级,标准差为分米级。对三组实验分别以测站为单位绘制点位标准差统计图,由图 4 知观测量使用电离层约束求解宽巷模糊度进行解算,测站点位标准差范围为 0.102 0~1.071 0 m;观测量使用基于伪距解算宽巷模糊度进行解算,测站点位标准差范围为 0.137 1~1.251 1 m。通过对比发现,观测量使用电离层约束求解宽巷模糊度解算精度较好。因此在非核心区进行北斗二号系统数据处理时,建议使用电离层约束求解宽巷模糊度进行解算。

表 4 采用不同观测量的解算精度统计

Tab. 4 Statistics of solution accuracy using different choices of observation

m

| 观测量选择 指标 | 利用电离层约束求解宽巷模糊度 | | | 基于伪距解算宽巷模糊度 | | |
|-------------|----------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| | dN | dE | dU | dN | dE | dU |
| MAX | 0.655 7 | 1.328 0 | 2.547 4 | 0.836 0 | 1.670 0 | 2.934 8 |
| MIN | -0.354 3 | -1.808 6 | -0.724 5 | -0.390 8 | -1.891 1 | -0.375 0 |
| MEAN | 0.005 4 | -0.015 0 | 0.000 9 | -0.006 5 | 0.000 6 | 0.028 6 |
| STD | 0.121 1 | 0.296 2 | 0.289 9 | 0.133 7 | 0.304 9 | 0.331 2 |

2.4 不同卫星高度截止角对北斗二号系统在非核心区域数据处理精度的影响

GNSS 测量过程会受到多路径效应的影响,合理处理多路径效应误差的影响是提高定位精度的关键。采取合适的卫星高度截止角能有效消减多路径效应的影响^[16]。

表 5 为方案 4 对不同卫星高度截止角作为解算策略进行解算的精度统计,图 5 为以卫星高度截止角为单位绘制的点位误差统计图。由于对不同截止角连续解算 7 天,因此将数据解算结果以卫星高度截止角为单位进行标准差统计,通过统计发现卫星高度截止角在 0°、5°、10°时精度几乎相同,在 12°达到最优,在 25°以后有些测站由于卫星高度截止角太高,可用卫星数太少导致解算失败,在 40°以后基本没有解算结果。通过

统计连续 7 天解算结果,有 1 天在 11°达到最优,4 天在 12°达到最优,2 天在 13°达到最优,因此在非核心区进行北斗二号系统数据处理时建议将卫星高度角设置为 12°。

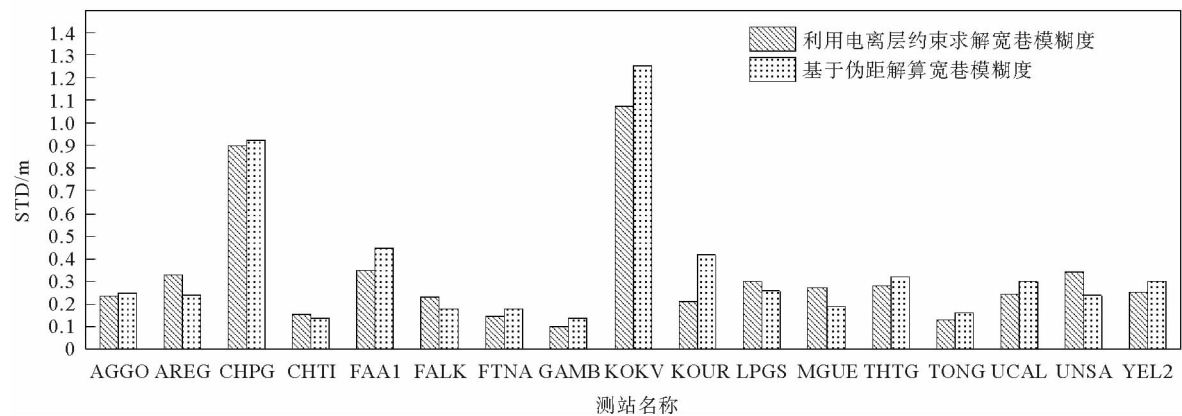


图 4 不同观测量选择测站点位标准差统计

Fig. 4 Statistics of standard deviations using different choices of observation

2.5 对流层天顶延迟估计间隔对北斗二号系统在非核心区域数据处理精度的影响

GPS 信号经过对流层时,传播路径和传播方向均发生变化,从而改变信号到达接收机的传播时间。对流层属于非弥散介质,对信号产生的延迟无法通过相位组合的方式消除。通过对对流层天顶延迟估计间隔时间的设置会影响不同长度的基线解算^[17]。

表 6 为对流层天顶延迟估计时间间隔分别设置为每 1、2、4 h 各解算一次进行精度统计。结果表明,测站单天 GPS 解算值与北斗解算值的差值中,最大值达到米级,平均值为厘米级,标准差为分米级。对三组实验分别以测站为单位绘制点位误差统计图,由图 6 知,最优结果(点位误差最小)中的 47.1%对流层天顶延迟估计时间间隔为 1 h;最优解算结果中的 29.4%对流层天顶延迟估计时间间隔为 2 h;最优解算结果中的 23.5%对流层天顶延迟估计时间间隔为 4 h。通过比较发现,对流层天顶延迟估计间隔设置对于北斗二号卫星系统解算精度影响不明显,对流层天顶延迟估计时间间隔设置为 1 h 时统计结果较好,但会增加解算时间,因此对精度要求不高或解算测站过多时,可以使用 2 h 作为解算策略。

表 5 不同卫星高度截止角解算精度统计

Tab. 5 Statistics of solution accuracy using different satellite cut-off elevation angles

| 卫星高度 截止角/(°) | STD _N /m | STD _E /m | STD _U /m | 成功解算测站 数(共 17 个站) |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0.121 2 | 0.313 0 | 0.306 9 | 17 |
| 5 | 0.121 2 | 0.313 0 | 0.306 9 | 17 |
| 10 | 0.121 2 | 0.313 0 | 0.306 9 | 17 |
| 11 | 0.127 6 | 0.322 0 | 0.228 7 | 17 |
| 12 | 0.126 0 | 0.259 1 | 0.221 1 | 17 |
| 13 | 0.126 1 | 0.280 1 | 0.254 0 | 17 |
| 14 | 0.188 8 | 0.426 1 | 0.316 8 | 17 |
| 15 | 0.136 9 | 0.234 3 | 0.207 5 | 17 |
| 20 | 0.280 9 | 0.339 3 | 0.306 3 | 17 |
| 25 | 0.288 8 | 0.515 7 | 0.417 0 | 15 |
| 30 | 0.452 3 | 0.466 2 | 0.525 5 | 13 |
| 35 | 0.440 6 | 0.670 2 | 0.652 4 | 11 |
| 40 | 0.751 4 | 0.681 3 | 0.470 7 | 9 |

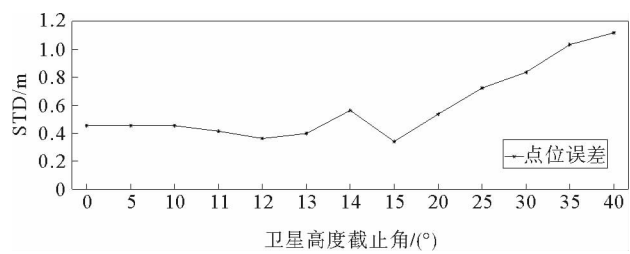


图 5 不同卫星高度截止角点位标准差统计

Fig. 5 Statistics of standard deviations using different satellite cut-off elevation angles

表6 不同对流层天顶延迟间隔解算精度统计

Tab. 6 Statistics of solution accuracy using different time intervals about zenith tropospheric delay estimation

| 对流层天顶 延迟间隔 参数 | 1 h | | | 2 h | | | 4 h | | |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | dN | dE | dU | dN | dE | dU | dN | dE | dU |
| MAX | 0.595 7 | 1.476 4 | 2.617 7 | 0.836 0 | 1.670 0 | 2.934 8 | 0.629 1 | 1.433 3 | 2.634 5 |
| MIN | -0.430 3 | -1.575 0 | -1.244 0 | -0.390 8 | -1.891 1 | -0.375 0 | -0.595 0 | -1.483 4 | -0.455 7 |
| MEAN | 0.000 0 | 0.012 6 | 0.035 4 | -0.006 5 | 0.000 6 | 0.028 6 | -0.001 1 | 0.003 1 | 0.059 5 |
| STD | 0.128 9 | 0.275 5 | 0.313 5 | 0.133 7 | 0.304 9 | 0.331 2 | 0.140 0 | 0.283 2 | 0.318 6 |

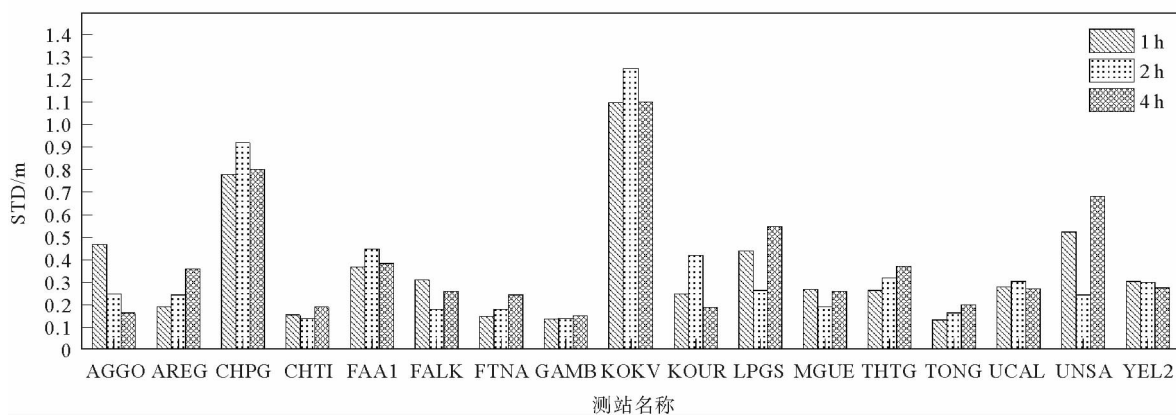


图6 不同对流层天顶延迟估计时间间隔点位标准差统计

Fig. 6 Statistics of standard deviations using different time intervals about zenith tropospheric delay estimation

3 讨论

卫星轨道精度是影响基线解算结果的重要因素之一,因此在进行高精度 GNSS 数据处理时,需要使用事后精密星历进行解算。方案 1 分别使用 CODE、WUM、GFZ 三个分析中心提供的北斗二号精密星历进行基线解算,发现三个分析中心处理得到的精密星历不同,采用 CODE 分析中心提供的精密星历进行北斗二号系统数据解算的精度和可靠性较好。

基线解算策略是影响基线解算精度的又一重要因素。方案 2 对基线解算策略中的映射函数进行实验, NMF、VMF1、GMF 映射函数都以对流层延迟变化为基础,利用全球探空资料、折射资料和相关的气象物理模型等构建,映射函数是影响由对流层模型得到的天顶延迟向传播路径延迟方向转化精度的重要因素,实验发现采用 NMF 函数解算的相对定位精度较高;方案 3 对观测量选择进行实验,由于两种观测量均为基于无电离层组合载波相位观测量,不同点在于如何分解 LC 整周模糊度,通过实验发现电离层约束求解宽巷模糊度的相对定位精度高于基于伪距解算宽巷模糊度;方案 4 对于不同卫星高度截止角进行实验,适当增大卫星高度截止角能有效消减多路径效应的影响,但太大的卫星高度截止角会减少可观测到的卫星数量,也会影响定位精度,因此通过方案 4 的研究发现卫星高度角设置为 12° 能达到较好的解算精度;方案 5 对于对流层天顶延迟估计时间间隔进行研究,卫星信号经过对流层时,传播路径和传播方向会发生变化。将对流层天顶延迟估计时间间隔分别设置为 1、2、4 h 进行研究,对流层天顶延迟估计时间间隔设置为 1 h 时精度较好,与设置为 2 h 时精度相差不大,但会增加数据处理时间,因此在精度要求不高或解算测站过多时,可以使用 2 h 作为解算策略。

通过对方案 1 至方案 5 的研究,北斗二号系统相对定位精度最大值达到米级,平均值为厘米级,标准差为分米级,目前在北斗二号系统非核心区域内 GPS 系统定位精度较北斗二号系统高。北斗二号系统作为区域性定位系统,卫星星历星座主要分布于亚太地区,处于非核心区域星历星座分布较少;GPS 系统为全球性

定位系统,卫星星历星座分布比较均匀。因此测站精度与测站可观测到的卫星数密切相关。

为探究北斗二号卫星系统非核心区域定位精度与测站可观测卫星数的关系。通过对方案 1 至方案 5 研究发现,FTNA TONG 定位精度较高;CHPG、KOKV 定位精度较差。因此将方案 2 中使用 GMF 映射函数解算结果中的 FTNA、TONG、CHPG 和 KOKV 4 个测站进行精度统计,结果如表 7 所示。同时对 4 个测站在观测时段内(2018 年年积日 020 至 026)观测到的北斗和 GPS 卫星数目进行统计,统计结果如图 7 所示。图 7 中,横向条带为 4 个测站在观测时段的卫星数目统计,C 为观测到的北斗卫星数,G 为观测到的 GPS 卫星数,右侧条带为观测到的卫星数目标尺,颜色越深表示观测到的卫星数目越多。统计发现测站可观测到的 GPS 卫星数远远大于北斗卫星数,FTNA 和 TONG 可观测到的北斗二号卫星数目多于 CHPG 和 KOKV,且 FTNA、TONG 定位精度优于 CHPG、KOKV,因此测站观测到的卫星数会影响定位精度。北斗二号系统星历星座主要分布于亚太地区,处于非核心区域星历星座较少,因此在非核心区域制约北斗二号系统定位精度的一个重要因素是测站可观测到的卫星数目过少,从而降低了北斗二号系统在非核心区域的定位精度。

表 7 TONG、KOKV、FTNA、CHPG 测站信息

Tab. 7 Station information of TONG, KOKV, FTNA and CHPG

| 测站名称 | 经度/(°) | 纬度/(°) | STD _N /m | STD _E /m | STD _U /m |
|------|------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| TONG | -175.179 2 | -21.144 7 | 0.052 6 | 0.120 1 | 0.093 0 |
| KOKV | -159.664 9 | 22.126 2 | 0.148 5 | 0.687 6 | 1.034 5 |
| FTNA | -178.120 9 | -14.307 8 | 0.090 8 | 0.116 7 | 0.096 5 |
| CHPG | -45.002 3 | -22.682 2 | 0.066 8 | 0.803 9 | 0.445 5 |

4 总结

通过对北斗二号系统非核心区域的 17 个 IGS 站数据进行解算,分别研究了精密星历和基线解算策略中的观测选择、卫星高度截止角、干湿映射函数、对流层天顶延迟估计时间间隔对北斗二号非核心区域定位精度的影响,实验结果表明:

1) 由于北斗二号系统布网形式及其服务范围主要在亚太地区,因此制约非核心区域定位精度的主要因素是测站可观测到的卫星数目过少。

2) 北斗二号系统非核心区域定位精度最大值达到米级,平均值为厘米级,标准差精度达到分米级。

3) 在非核心区域对北斗二号系统进行高精度数据解算时,建议使用 CODE 提供的精密星历,干湿映射函数使用 NMF 函数,观测量使用电离层约束求解宽巷模糊度,卫星高度截止角使用 12°,对流层天顶延迟时间间隔设置为 1 h。

参考文献:

[1]杨元喜.北斗卫星导航系统的进展,贡献与挑战[J].测绘学报,2010,39(1):1-6.
YANG Yuanxi.Progress,contribution and challenges of compass/BeiDou Satellite Navigation System[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2010,39(1):1-6.
[2]LIU Y,LOU Y,SHI C,et al.BeiDou regional navigation system network solution and precision analysis[C]//Proceedings of

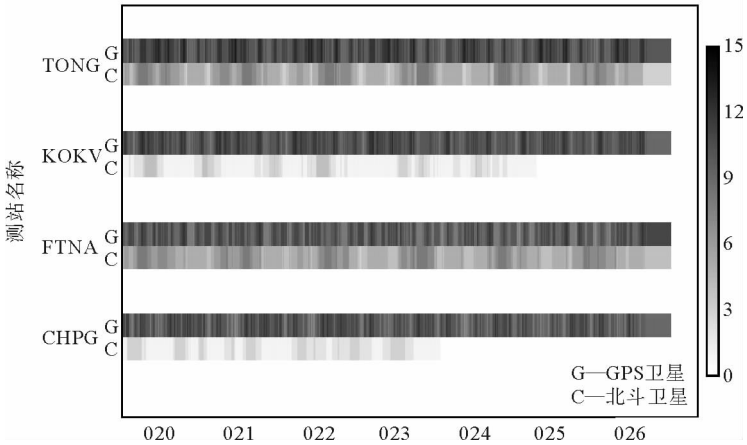


图 7 TONG、KOKV、FTNA、CHPG 测站观测时段内北斗卫星和 GPS 卫星数目统计

Fig. 7 Statistics of BeiDou satellites and GPS satellites during the observation period at TONG, KOKV, FTNA and CHPG

- China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013, Springer Berlin; Heidelberg, 2013: 173-186.
- [3] 李森, 周命瑞, 陈积旭. 北斗数据工程控制网应用实验及精度分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(9): 1-6.
LI Sen, ZHOU Mingrui, CHEN Jixu. Application experiments and accuracy analysis of BeiDou data engineering control network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(9): 1-6.
- [4] 吴仁攀, 刘万科, 吴风波, 等. 北斗中长基线动态定位首次固定时间和定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7): 668-672.
WU Renpan, LIU Wanke, WU Fengbo, et al. Analysis of TTFF and accuracy of BDS medium-long baseline kinematic relative positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(7): 668-672.
- [5] MONTENBRUCK O, RIZOS C, WEBER R, et al. Getting a grip on multi-GNSS: The international GNSS service MGEX campaign[J]. GPS World, 2013, 24(7): 44-49.
- [6] 杨晓明, 王胜利, 王海霞, 等. 基于EKF的GNSS/SINS组合导航系统应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 114-122.
YANG Xiaoming, WANG Shengli, WANG Haixia, et al. Application of GNSS/SINS integrated navigation system based on EKF[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Sciences), 2019, 38(6): 114-122.
- [7] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, KHACHIKYAN R, et al. IGS-MGEX: Preparing the ground for multi-constellation GNSS science[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1): 42-49.
- [8] 耿涛, 苏醒, 许小龙, 等. 北斗卫星导航系统精密定轨和广播星历轨道精度分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(9): 1023-1032.
GENG Tao, SU Xing, XU Xiaolong, et al. Research on precise and broadcast ephemeris orbit of BeiDou navigation satellite system[J]. China Science Paper, 2015, 10(9): 1023-1032.
- [9] 周乐韬, 黄丁发, 冯威, 等. 北斗卫星导航系统/美国全球定位系统载波相位相对定位全球精度分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(4): 671-686.
ZHOU Letao, HUANG Dingfa, FENG Wei, et al. Global precision analysis of carrier phase relative positioning in BeiDou navigation satellite system and United States global positioning system[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(4): 671-686.
- [10] BERKAY B, METIN N. Comparative analysis of MGEX products for post-processing multi-GNSS PPP[J]. Measurement, 2019, 145: 361-369.
- [11] HERRING T, KING R, MCLUSKY S. GAMIT reference manual (Release 10.7) [R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2018: 1-168.
- [12] HERRING T, KING R, MCLUSKY S. GLOBK reference manual (Release 10.6) [R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2015: 1-91.
- [13] XU A, XU Z, GE M, et al. Estimating zenith tropospheric delays from BeiDou navigation satellite system observations[J]. Sensors, 2013, 13(4): 4514-4526.
- [14] 周茂盛, 郭金运, 刘智敏, 等. 对流层映射函数对山东地区GPS解算的影响分析[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(1): 152-160.
ZHOU Maosheng, GUO Jinyun, LIU Zhimin, et al. Influence of tropospheric mapping function on Shandong GPS solution[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(1): 152-160.
- [15] 张双成, 曹海洋, 李海英. 基于GAMIT的GPS长基线解类型分析及应用[J]. 工程勘察, 2011(10): 42-45.
ZHANG Shuangcheng, CAO Haiyang, LI Haiying. Application and analysis of GPS long baseline processing based GAMIT[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(10): 42-45.
- [16] 李国伟, 郭金运, 原永东, 等. GPS测站多路径效应建模研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(3): 7-9.
LI Guowei, GUO Jinyun, YUAN Yongdong, et al. Studies of modeling multipath effect at GPS station[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(3): 7-9.
- [17] 黄祖登, 梅连辉. 高精度GPS数据处理中对流层参数估计研究[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(5): 12-15.
HUANG Zudeng, MEI Lianhui. Research on the time selection of PWL in high-precision GPS data processing[J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(5): 12-15.