

中高纬度地区GPS/GLONASS/BDS-3组合精密相对定位性能评估

张西杰

安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

摘要

目前, 短基线定位的研究大都基于低纬度和中纬度地区, 并且基于GPS、Galileo和BDS的研究占极大比例, 由于GLONASS模糊度的特殊性, 涉及中高纬度地区关于GLONASS的短基线定位研究较少。为了研究中高纬度地区GPS/GLONASS/BDS-3的定位效果, 通过对GLONASS的模糊度进行重组的方法并设置不同高度角模拟不同遮挡情况下对单系统以及不同组合系统的模糊度固定率、模糊度成功率、可视卫星数以及定位精度等方面进行对比分析。结果显示, 在15°截止高度角下进行单频单历元基线解算模糊度固定率处于最为理想状态达到95%以上, 模糊度成功率达到90%以上。总体上, 在中高纬度地区, GPS/GLONASS/BDS-3组合定位精度可达到cm级。

关键词

中高纬度地区, 多系统组合, 单频单历元, 基线解算

Performance Evaluation of the Combined GPS/GLONASS/BDS-3 Precision Relative Positioning in Middle and High Latitudes

Xijie Zhang

School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Mar. 28th, 2023; accepted: Apr. 22nd, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

At present, most of the research on short-baseline positioning is based on low-latitude and

mid-latitude regions, and the research based on GPS, Galileo and BDS accounts for a large proportion. Due to the particularity of GLONASS ambiguity, there are few short-baseline positioning researches on GLONASS in mid-latitude and high-latitude regions. In order to study the positioning effect of GPS/GLONASS/BDS-3 in middle and high latitudes, through the method of reorganizing the ambiguity of GLONASS and setting different altitude angles to simulate different occlusion situations, the ambiguity fixation rate, ambiguity success rate, number of visible satellites, and positioning accuracy of a single system and different combined systems are compared and analyzed. The results show that the ambiguity fixation rate of the single-frequency single-epoch baseline solution is in the most ideal state, reaching more than 95%, and the ambiguity success rate reaches more than 90%. In general, in the middle and high latitudes, the combined positioning accuracy of GPS/GLONASS/BDS-3 can reach cm-level.

Keywords

Middle and High Latitudes, Multi-System Combination, Single-Frequency Single-Epoch, Baseline Solutions

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 随着全球导航定位系统的发展和建设, GNSS 正朝多频多系统的方向发展[1] [2]。2020年6月23日我国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)最后一颗卫星发射, 标志着我国北斗全面组网成功。与其它卫星导航定位系统不同, BDS-3 不仅具备定位、导航、授时功能, 其还有其它卫星导航系统不具备的短报文通信服务能力[3] [4] [5] [6]。随着我国北斗导航系统的建成 BDS-3 已经广泛应用到各个领域。

在单个卫星导航系统卫星定位精度不佳的情况下主要采取多系统组合定位改善这一情况, 目前国内外对导航定位的研究主要集中在 BDS 及其与 GPS 组合的载波相对定位并主要集中在低纬度地区, 而对中高纬度地区下的 GPS/GLONASS/BDS-3 三系统组合定位的研究较少, 尤其是在卫星信号高遮挡情况下的研究较少。由于 GLONASS 采用 FDMA 技术与其它卫星导航系统不同, 其不同卫星的载波频点不同, 所以 GLONASS 模糊度解算以及与其它导航系统实现组合定位更为复杂[7] [8], 因此对单独地使用 GLONASS 定位或者基于 GLONASS 与其它卫星导航定位的研究较少。文献[7]采集北京地区不同长度基线主要针对基于 BDS-2 的位于中纬度地区 GPS/GLONASS/BDS 研究, 介绍了不同系统组合下的定位精度, 其实验表明 14 km 基线平面和垂直定位精度可达 3.01 cm 和 4.71 cm。文献[9]主要针对基于 BDS-2 的中纬度地区 GPS/GLONASS/BDS 的单点定位, 但没有涉及基于 BDS-3 的中高纬度地区的 GPS/GLONASS/BDS-3 组合精密定位。针对上述情况, 本文利用两组不同长度的基线(约 4.47 km 与约 8.65 km)采用 GLONASS 模糊度重组法并模拟不同信号遮挡环境研究在中高纬度地区下 GPS/GLONASS/BDS-3 组合精密相对定位性能来对基于 BDS-3 的中高纬度地区的定位效果提供参考。

2. 坐标与时间系统的统一

由于采用的时间基准与空间基准不同, GLONASS 坐标系统与 ITRF2000 差异只在原点平移, 在 X、Y、Z 方向分别为: -0.36 m、+0.08 m、+0.18 m [8]。WGS-84 与 ITRF2000 差异可以忽略, 三者之间换算

关系为[9]

$$\begin{cases} \text{GPST} = \text{UTC}(\text{USNO}) + 1 \text{ s} \times n - 19 \text{ s} \\ \text{BDT} = \text{UTC}(\text{NTSC}) + 1 \text{ s} \times n - 19 \text{ s} - 14 \text{ s} \\ \text{GLONASS} = \text{UTC}(\text{SU}) + 3 \text{ h} - \tau_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, n 代表国际原子时(AIT)与 UTC 之间需要持续调整的参数, τ_r 为 GLONASS 与 UTC (SU)之间存在的 1 ms 内系统偏差。本文在数据处理时选择 GPST 作为统一的时间基准, 具体的转换关系为[9]

$$\begin{cases} \text{GPST} = \text{BDT} + 14 \text{ s} + \tau_{\text{UTC}(\text{USNO})-\text{UTC}(\text{NTSC})} \\ \text{GPST} = \text{GLONASS} - 3 \text{ h} + \tau_r + 1 \text{ s} \times n - 19 \text{ s} + \tau_{\text{UTC}(\text{USNO})-\text{UTC}(\text{SU})} \end{cases} \quad (2)$$

完成 BDT, GLONASS 与 GPST 之间的整数秒转换关系后, BDT, GLONASS 与 GPST 之间还分别存在关于时间的系统间偏差; 在实际定位解算中, 上述系统间偏差不影响相对定位[10], 这是因为双差过程中消除了钟差参数。

3. GPS/GLONASS/BDS-3 基线处理模型

3.1. 函数模型

多系统组合基线解算方式采用伪距以及载波相位观测值双差组合实现相对定位。其中 GPS、BDS-3 双差载波相位和伪距观测方程表达式可用式(3)表示; GLONASS 双差载波相位和伪距观测方程表达式可用式(4)表示

$$\begin{cases} \nabla \Delta \phi_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} + \lambda N_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + \varepsilon_{kl}^{ij} \\ \nabla \Delta P_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + e_{kl}^{ij} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \nabla \Delta \phi_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} + (\lambda^j N_{kl}^j - \lambda^i N_{kl}^i) - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + \varepsilon_{kl}^{ij} \\ \nabla \Delta P_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + e_{kl}^{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\nabla \Delta \phi_{kl}^{ij}$ 为载波双差相位观测值, 其中, $\nabla \Delta$ 为双差算子, k, l 分别为参考站与流动站, i, j 分别为参考星与非参考星; λ 为信号的载波波长; N 表示载波相位观测中的未知整周模糊度; $\nabla \Delta \rho_{kl}^{ij}$ 为载波双差相位观测值; $\nabla \Delta \rho_{kl}^{ij}$ 为卫星至接收机的双差几何距离; N_{kl}^{ij} 为双差整周模糊度, 具有整数特性[11]; $\nabla \Delta I_{kl}^{ij}$ 为双差电离层延迟; $\nabla \Delta T_{kl}^{ij}$ 为双差对流层延迟; ε_{kl}^{ij} 、 e_{kl}^{ij} 分别为载波与伪距双差观测值噪声。

由(3)式和(4)式可知, 双差过程中消除了大部分误差影响, 其中包括卫星钟差、接收机钟差、卫星星历误差、对流层和电离层延迟误差。由于 GLONASS 不同卫星采用不同的频率, 接收机钟差无法消除, 其双差模糊度不具有整周特性, 所以 GLONASS 双差观测值的模糊度处理较为复杂[12]。以上是系统内差分过程, 也可以选择系统间差分, 缺点是系统间差分时, 如果系统间系统误差不能处理好, 会影响定位结果的精度[13]; 需要注意的是由于 GLONASS 的两颗卫星载波波长 λ_i 和 λ_j 并不相同, 模糊度在双差观测方程中的表现形式与 GPS 或 BDS-3 差异较大, 故式(4)中的 GLONASS 双差模糊度项 $(\lambda_j N_{kl}^j - \lambda_i N_{kl}^i)$ 不再具有整数特性, 因此进行如下变换[12] [14]:

$$\begin{aligned} \lambda^j N_{kl}^j - \lambda^i N_{kl}^i &= \lambda^j N_{kl}^j - \lambda^j N_{kl}^i + \lambda^j N_{kl}^i - \lambda^i N_{kl}^i \\ &= \lambda^j N_{kl}^{ij} + (\lambda^j - \lambda^i) N_{kl}^i \end{aligned} \quad (5)$$

经上述变换, 双差模糊度被分解为具有整周特性的双差模糊度项 $\lambda^j N_{kl}^{ij}$ 和单差模糊度项 $(\lambda^j - \lambda^i) N_{kl}^i$, 对于单差模糊度 N_{kl}^i , 可按下式进行估算[14] [15]:

$$N_{kl}^i = (P_{kl}^i - \lambda^i \phi_{kl}^i) / \lambda^i \quad (6)$$

所以, 解算 GLONASS 的模糊度时, 双差模糊度是根据单差模糊度固定的, 之后重新计算单差模糊度。

3.2. 随机模型

采用高度角随机模型进行数据处理, 其函数模型以运行中的卫星高度角为变量对观测值的方差进行估计, 即[16] [17] [18]:

$$\sigma^2 = f(Elev) \quad (7)$$

式中, σ 为观测值中误差; $Elev$ 为卫星的高度角, 这些函数模型中其中最常用的为正弦函数模型, 为了更好的定义低高度角情况下的观测值的中误差, 常常采用改进的正弦函数模型, 即[19]:

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 / (\sin(Elev))^2 \quad (8)$$

式中, a 和 b 一般都是经验值, 常取 $a = 4 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ 。

GNSS 定位精度效果受随机模型直接影响, 忽略单系统不同系统间观测值的相关性组合系统双差观测值的方差 - 协方差阵为:

$$D_{C/G/R} = \begin{pmatrix} D_{\text{BDS-3}} & & \\ & D_{\text{GPS}} & \\ & & D_{\text{GLONASS}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, $D_{\text{BDS-3}}$, D_{GPS} , D_{GLONASS} 以及 $D_{\text{C/G/R}}$ 分别是 BDS-3, GPS, GLONASS 以及三系统组合双差观测值的方差 - 协方差矩阵。

根据误差传播定律, 各系统双差观测值的方差 - 协方差矩阵为[20]:

$$D_{(\cdot)} = a^2 A + b^2 B_{el} \quad (10)$$

$$\text{式中, } B_{el} = \begin{bmatrix} f^2(el)_{kl}^i & f^2(el)_{kl}^i & \cdots & f^2(el)_{kl}^i \\ f^2(el)_{kl}^i & f^2(el)_{kl}^i & \cdots & f^2(el)_{kl}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f^2(el)_{kl}^i & f^2(el)_{kl}^i & \cdots & f^2(el)_{kl}^i \end{bmatrix}_{m \times m}, \quad A = \begin{bmatrix} 4 & 2 & \cdots & 2 \\ 2 & 4 & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & \cdots & 4 \end{bmatrix}_{m \times m}; \quad \text{其中, } a, b \text{ 为常数项因子,}$$

$f(el)$ 为与高度角 el 相关的函数; $f^2(el)_{kl}^i = f^2(el)_{kl}^i + f^2(el)_{kl}^i$,

$f^2(el)_{kl}^{ij} = f^2(el)_{kl}^i + f^2(el)_{kl}^j + f^2(el)_{kl}^i + f^2(el)_{kl}^j$, ($j = 1, 2, \dots, m$), i 为参考星, m 为非参考星数。

4. 实验分析及处理策略

4.1. 实验数据及基线处理策略

为评估 GPS/GLONASS/BDS-3 短基线在中高纬度地区的定位性能与可靠性, 本文选取了 IGS 中心 4 个位于北半球的测站分别为 HUEG、BRMG、KIR0、KIRU, 数据信息见表 1, 采集日期从 2021-07-29 至 2021-08-04 共 7 天, 数据采样间隔为 30 s。其中 HUEG 和 BRMG 组成基线 A, KIR0 和 KIRU 组成基线 B。

本实验采用事后处理方式获得的坐标作为参考值, 数据处理策略采用最小二乘进行参数估计, 逐历元计算模糊度浮点解, 然后采用 LAMBDA 法尝试模糊度固定[21], 固定效果可以根据两个方面进行综合

评价,分别是模糊度固定率以及模糊度成功率[22] [23] [24] [25],并用 Ratio 阈值进行检验,Ratio 阈值设为 2 或 3 的情况下较多,通常情况下设为 3。分别对设置的不同高度角处理模式进行实验统计与分析。

4.2. 不同高度角卫星可见数及各测站信噪比分析

卫星可见性是在特定仰角下地面某点在某时刻能观测到的所有卫星的数量或某时段所有观测卫星的跟踪弧段长度[26],分析其可见性能够从测站位置的角度了解、评价系统卫星的运行情况[27]。通过对单系统及其组合系统观测数据的处理,利用不同截止高度角对不同遮挡情况进行模拟[28],对截止高度角 10°、15°、30°、45°时 GPS、GLONASS 与 BDS-3 的可观测卫星数量进行统计,结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出,当截止高度角为小于等于 15°时,在观测时段内平均可观测卫星数在 4 颗以上满足信号遮挡情况下的定位要求;当截止高度角为 30°时,在观测时段内平均可观测卫星数为 4.4 颗,BDS-3 系统出现了大量历元卫星数不足 4 颗的情况;当截止高度角为 45°时,GLONASS 和 BDS-3 单系统出现了可观测卫星数不足 4 颗的历元,此时不满足定位要求。

通常用信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)反映 GNSS 载波信号质量的优劣,其数值大小代表着观测信号的质量[29] [30]。信噪比通常以 dB/Hz 为单位[31],其表达式如下:

$$SNR = P_R / (kTB_n) \quad (11)$$

式中: B_n 为噪声带宽(Hz); k 为波尔曼常数,为 1.38×10^{-23} J/K。

为了分析北斗三新频点 B1C 的信噪比情况,图 2 给出了四个测站北斗三 B1C 频点七天的信噪比统计结果,从图中可以看出四个测站的 B1C 平均信噪比均大于 40 dBHz。

Table 1. Summary of experimental data

表 1. 实验数据概况

测站	纬度	经度	GNSS 接收机类型	固件版本	GNSS 天线类型
HUEG	47.834°	7.596°	JAVAD TRE_3 DELTA	3.7.10	LEIAR25.R4 LEIT
BRMG	47.908°	7.633°	JAVAD TRE_3 DELTA	3.7.10	LEIAR25.R4 LEIT
KIRO	67.878°	21.060°	SEPT POLARX5	5.3.0	JNSCR_C146-22-1 OSOD
KIRU	67.857°	20.968°	SEPT POLARX5	5.4.0	SEPCHOKE_B3E6 SPKE

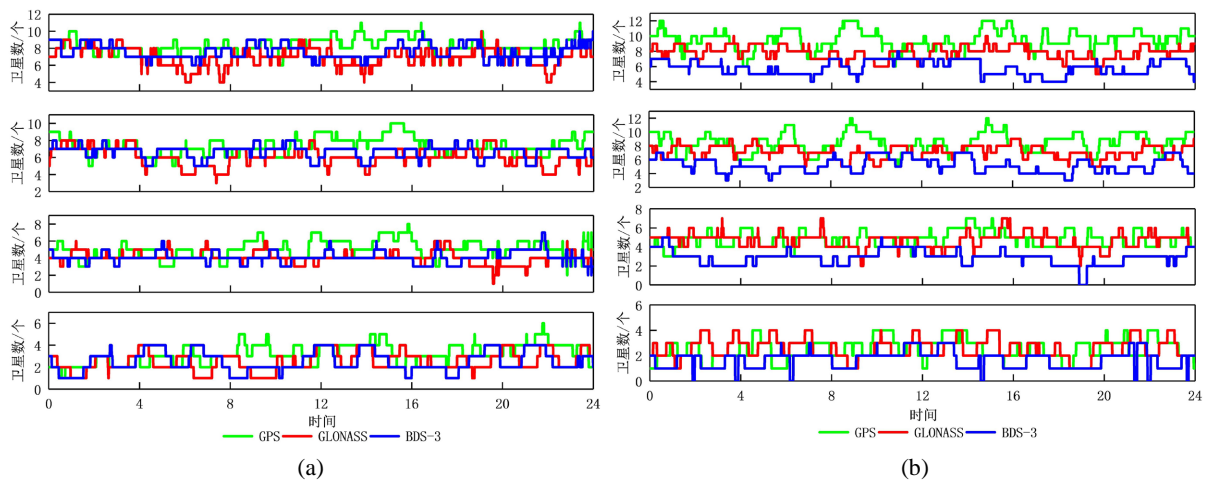


Figure 1. Number of visible satellites for baselines (a) (left) and (b) (right) at elevation cutoff angles of 10°, 15°, 30° and 45°
图 1. 基线(a) (左)和(b) (右) 10°、15°、30°和 45°截止高度角的可视卫星数

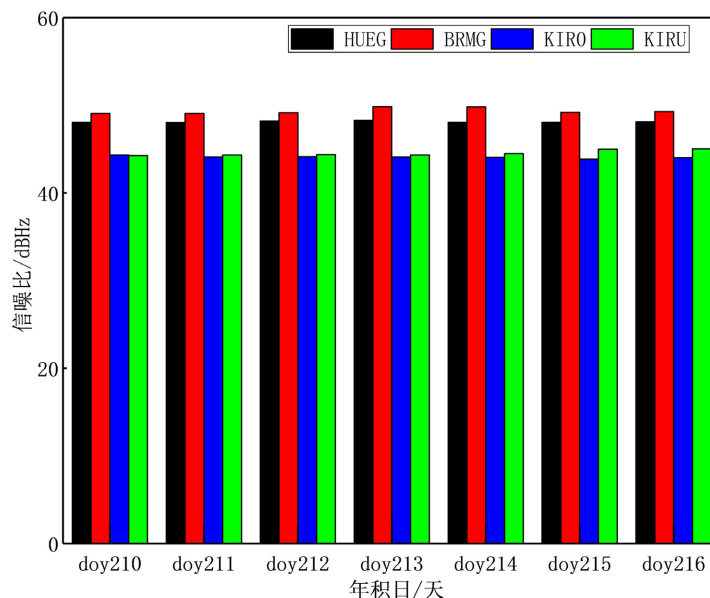


Figure 2. The mean value of the signal-to-noise ratio of the B1C signal at each station

图 2. 各测站 B1C 信号信噪比均值

4.3. 模糊度解算结果分析

模糊度解算性能是影响载波相位相对定位精度的主要因素[7]，表 2 给出了七天数据实验统计结果的平均值，限于文章篇幅表中只给出部分实验模糊度解算性能对比，固定率检验以设定 Ratio 阈值的方法来确定。其中，模糊度固定率与成功率分别定义如下：

$$\begin{cases} \text{固定率} = \frac{\text{满足阈值的历元数}}{\text{总有效历元数}} \\ \text{成功率} = \frac{\text{正确固定历元数}}{\text{总有效历元数}} \end{cases} \quad (12)$$

在进行解算过程中，可能出现错误符合 Ratio 阈值模糊度组[23]。由表 2 和图 3 可以看出，对于 8.652 km 长的基线 A，在 10°和 15°的卫星截止高度角情况下，GPS、GLONASS 和 BDS-3 在模糊度固定率与成功率相当；截止高度角为 30°和 45°时，单系统下 GPS 模糊度固定率和成功率最高，GLONASS 的成功率也低于 50%，BDS-3 固定效果较差，结合图 1 可知，这是由于 GPS 在可见性上要优于 GLONASS 和 BDS-3。单系统固定率与成功率随着高度角的增加都呈现出下降趋势，但 GPS/BDS-3 与 GPS/GLONASS/BDS-3 的固定率与成功率都高于 75%。对于基线 B，截止高度角为 10°和 15°时，BDS-3 成功率超过了 80%，GPS 和 GLONASS 超过了 90%，而 GPS 与其它系统组成的组合系统成功率高达 95%以上；截止高度角为 30°时，BDS-3 可视卫星数减少使得其固定率与成功率大幅下降，而 GPS/BDS-3、GPS/GLONASS 与 GPS/GLONASS/BDS-3 固定率与成功率依然高达 95%以上，对于 45°截止高度角的不利观测条件下 GPS 与 GLONASS 的模糊度固定率与多系统组合的模糊度固定率基本相当，BDS-3 固定效果较差，单系统固定成功率远低于多系统。

4.4. 基线向量定位结果分析

本文利用基线偏差进行精度分析，将正确固定的历元的解算结果与参考值做差。限于篇幅，以 10°

截止高度角为例图 4 给出了两条基线的解算结果，表 3 给出了在单历元模式下单系统及不同系统组合情况下的相对定位的内符合精度。

Table 2. Statistics on ambiguity fixation of single system and different combined systems
表 2. 单系统及不同组合系统模糊度固定情况统计

高度角	项目	基线 A						基线 B					
		G	R	C	G/C	G/R	G/R/C	G	R	C	G/C	G/R	G/R/C
10°	平均有效历元数	2879	2830	2642	2865	2879	2879	2880	2872	2835	2880	2880	2879
	固定率/%	87.0	92.7	86.0	81.0	85.6	99.9	99.3	97.8	95.7	98.3	98.3	99.9
15°	平均有效历元数	2880	2715	2606	2854	2863	2872	2880	2880	2676	2880	2872	2872
	固定率/%	99.6	91.3	98.2	99.5	99.2	99.9	99.6	95.3	82.9	99.6	99.5	99.9
30°	平均有效历元数	2632	1270	1823	2865	2873	2872	2597	2536	308	2875	2871	2872
	固定率/%	89.9	76.8	50.4	99.5	99.5	99.5	94.5	99.6	51.1	95.8	99.6	99.6
45°	平均有效历元数	642	410	—	2117	2141	2680	220	272	—	894	1726	2063
	固定率/%	79.3	45.8	—	75.3	48.5	82.2	51.2	56.7	—	55.8	56.8	51.6

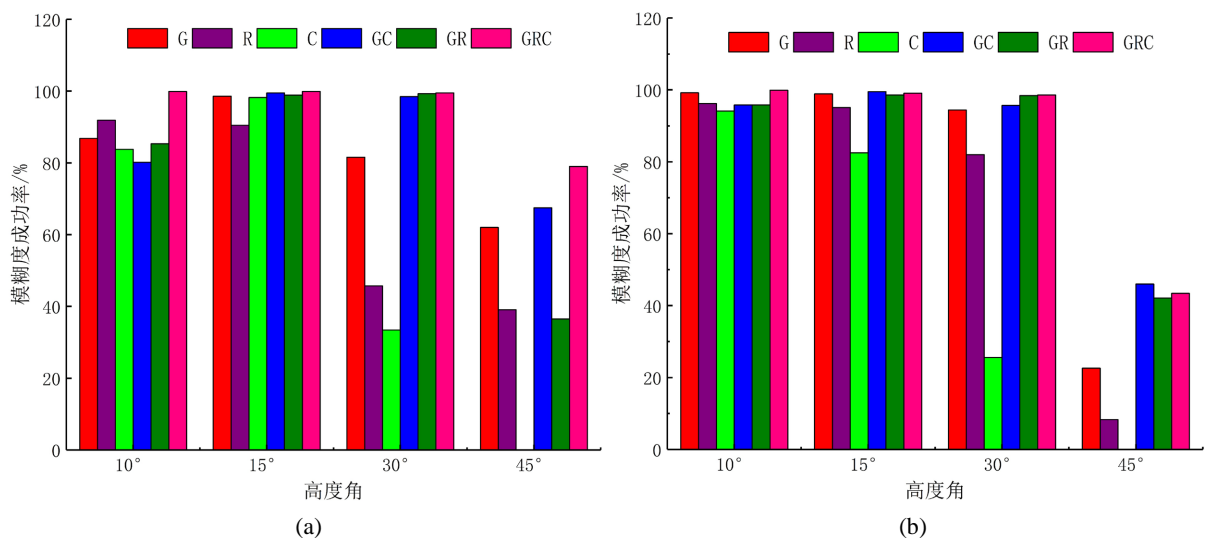


Figure 3. Ambiguity success rates for Baseline (a) (left) and Baseline (b) (right) at elevation angles of 10°, 15°, 30°, and 45°
图 3. 基线(a) (左)和基线(b) (右)在 10°、15°、30°和 45°高度角下的模糊度成功率

从图 4 和表 3 可以得出，对于 8.652 km 长的基线 A，截止高度角为 10°~30°时，GPS、GLONASS 和 BDS-3 单系统的定位精度都在 cm 级，而在 GPS/GLONASS/BDS-3 组合系统下平面定位精度可达 mm 级；当卫星截止高度角为 45°时单个系统定位效果不理想，其中 BDS-3 定位效果不及 GPS 和 GLONASS。对于 4.472 km 长的基线 B，截止高度角为 10°、15°和 30°时 GPS 定位精度可达 cm 级，优于 GLONASS 和 BDS-3 定位精度，三系统组合平面定位精度可达 mm 级；当卫星截止高度角为 45°时，GPS、GLONASS 和 BDS-3 定位效果不理想，GPS 和 GLONASS 定位精度达到分米级，组合系统在 E、N、U 方向定位精度优于单系统。4.472 km 短基线 B 与 8.652 km 基线 A 相比，定位精度效果较为理想。

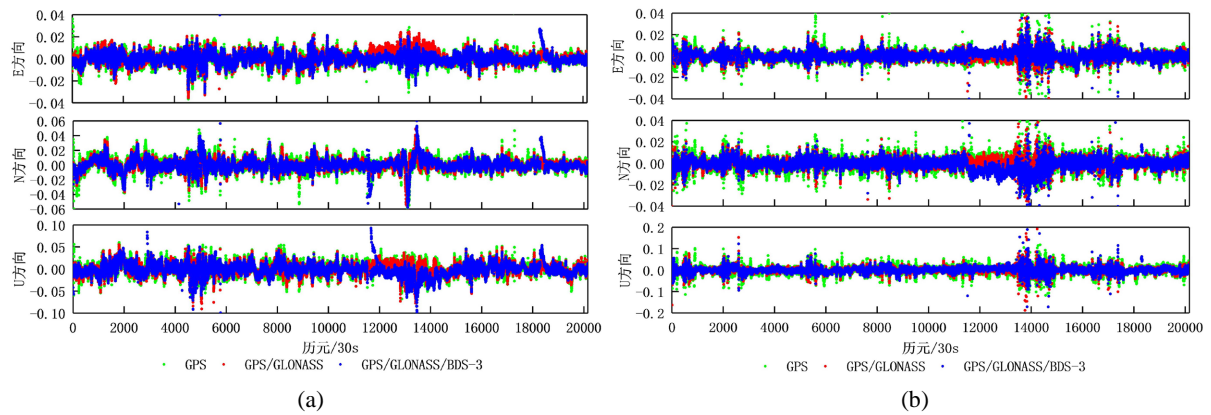


Figure 4. Deviations of GPS, GPS/GLONASS and GPS/GLONASS/BDS-3 systems in E, N, U directions when the altitude angle is 10°

图 4. 高度角为 10° 时 GPS、GPS/GLONASS 及 GPS/GLONASS/BDS-3 系统在 E、N、U 方向的偏差

Table 3. Statistics of fixed solution accuracy of single system and different combined systems (cm)

表 3. 单系统及不同组合系统固定解精度统计(cm)

高度角	方向	基线 A						基线 B					
		G	R	C	G/C	G/R	G/R/C	G	R	C	G/C	G/R	G/R/C
10°	E	1.3	2.4	2.2	2.7	0.5	0.5	0.8	1.8	2.1	1.3	0.6	0.6
	N	1.9	3.2	3.3	4.4	0.7	0.8	0.6	1.6	2.7	0.8	0.6	0.5
	U	2.8	3.6	5.1	5.2	1.3	1.3	2.2	3.8	3.9	2.5	1.8	1.2
15°	E	0.7	5.0	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4	0.9	2.4	0.6	0.6	0.5
	N	0.8	2.8	1.5	0.8	1.0	0.8	0.7	1.0	2.8	0.7	0.6	0.5
	U	1.9	6.2	2.2	1.4	1.4	1.3	1.8	2.7	3.5	1.8	1.9	1.6
30°	E	1.0	2.1	1.7	0.7	1.1	0.6	1.7	2.2	3.8	1.2	0.9	0.7
	N	1.5	2.8	2.2	0.9	0.9	0.6	1.6	1.4	3.2	1.1	1.4	0.9
	U	2.1	5.9	5.5	2.0	3.3	1.5	2.9	3.0	3.9	2.5	2.8	2.3
45°	E	6.2	11.1	—	0.9	1.6	3.3	8.2	33.1	—	5.1	9.3	5.8
	N	4.0	10.9	—	0.6	0.9	1.8	17.8	34.0	—	2.2	11.6	5.4
	U	8.2	13.1	—	5.6	4.7	3.8	26.2	37.8	—	18.7	11.3	6.8

5. 结论

本文分别从可见卫星数, 信噪比, 定位精度等方面评估和分析了 GPS/GLONASS/BDS-3 在中高纬度地区的定位性能, 本文利用两组数据, 在不同基线长度环境下, 对 GPS、GLONASS、BDS-3 单系统以及 GPS/BDS-3、GPS/GLONASS、GPS/GLONASS/BDS-3 组合系统的相对定位性能进行了分析对比, 实验结果表明, 多系统组合情况下的可视卫星数和系统稳定性较单系统而言有所提高。在 15° 截止高度角下模糊度固定率和成功率较高, 在卫星截止高度角为 45° 的不利观测条件下, BDS-3 模糊度固定效果不理想, 多系统组合明显提高了单系统的模糊度固定成功率。从整体上来看在 15° 截止高度角下进行单频单历元基线解算模糊度固定率处于最为理想状态达到 95% 以上, 模糊度成功率达到 90% 以上, GPS/GLONASS/BDS-3 组合的定位精度要好于单系统定位精度。因此, 在中高纬度地区, GPS/GLONASS/BDS-3 单频单历元定位精度可达到 cm 级。

参考文献

- [1] 任晓东, 张柯柯, 李星星, 张小红. BeiDou、Galileo、GLONASS、GPS 多系统融合精密单点[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1307-1313+1339.
- [2] 姚宜斌, 胡明贤, 许超钤. 基于 DREAMNET 的 GPS/BDS/GLONASS 多系统网络 RTK 定位性能分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1009-1018.
- [3] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 贾小林, 毛悦, 耿涛, 饶永南, 张慧君, 谢新. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821.
- [4] 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.
- [5] 云影. 全球服务核心星座部署完成, 北斗应用再创佳绩——《北斗卫星导航系统发展报告(4.0 版)》发布[J]. 卫星应用, 2020(1): 29-32.
- [6] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 汤静, 郭海荣, 何海波. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.
- [7] 汪亮, 李子申, 袁洪, 周凯. BDS/GPS/GLONASS 组合的双频单历元相对定位性能对比分析[J]. 科学通报, 2015, 60(9): 857-868.
- [8] Engelsberg, V., Petrovski, I. and Babakov, V. (2008) Expert Advice-GLONASS Business Prospects. *GPS World*, **19**, 12-15.
- [9] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 阳凡林. BDS 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 73-78. <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2013.04.016>
- [10] 李金龙. 北斗/GPS 多频实时精密定位理论与算法[D]: [博士学位论文]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [11] 李博峰, 沈云中. 顾及基线先验信息的 GPS 模糊度快速解算[J]. 测绘学报, 2008(4): 423-427+432.
- [12] 段举举, 沈云中. GPS/GLONASS 组合静态相位相对定位算法[J]. 测绘学报, 2012, 41(6): 825-830+917.
- [13] Pratt, M., Burke, B. and Misra, P. (1998) Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1-L2 Data. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1998)*, Nashville, 15-18 September 1998, 389-398.
- [14] Wang, J. (2000) An Approach to GLONASS Ambiguity Resolution. *Journal of Geodesy*, **74**, 421-430. <https://doi.org/10.1007/s001900000096>
- [15] 邓辰龙, 唐卫明. GPS/GLONASS 组合定位对 GPS 模糊度解算及定位结果的影响[C]//中国卫星导航系统管理办公室, 科学技术部高新技术发展及产业化司, 国防科工局系统工程一司, 交通运输部综合规划司, 教育部科学技术司. 第二届中国卫星导航学术年会电子文集. 2011: 1.
- [16] Eueler, H.J. and Goad, C.C. (1991) On Optimal Filtering of GPS Dual Frequency Observations without Using Orbit Information. *Bulletin Géodésique*, **65**, 130-143. <https://doi.org/10.1007/BF00806368>
- [17] Gerdan, G.P. (1995) A Comparison of Four Methods of Weighting Double Difference Pseudorange Measurements. *Australian Surveyor*, **40**, 60-66. <https://doi.org/10.1080/00050334.1995.10558564>
- [18] Han, S. (1997) Quality-Control Issues Relating to Instantaneous Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Kinematic Positioning. *Journal of Geodesy*, **71**, 351-361. <https://doi.org/10.1007/s001900050103>
- [19] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. 基于观测值质量指标的 GPS 观测量随机模型分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008(7): 718-722.
- [20] 吕志成, 刘增军, 张国柱, 王飞雪. GPS 精密定位观测值随机模型的研究[C]//中国卫星导航系统管理办公室, 科学技术部高新技术发展及产业化司, 国防科工局系统工程一司, 交通运输部综合规划司, 教育部科学技术司. 第二届中国卫星导航学术年会电子文集. 2011: 1.
- [21] Teunissen, P.J.G. (1995) The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation. *Journal of Geodesy*, **70**, 65-82. <https://doi.org/10.1007/BF00863419>
- [22] Teunissen, P.J.G. and Verhagen, S. (2009) The GNSS Ambiguity Ratio-Test Revisited: A Better Way of Using It. *Survey Review*, **41**, 138-151. <https://doi.org/10.1179/003962609X390058>
- [23] 王静, 赵兴旺, 刘超, 张翠英. 基于正则化的 GPS/BDS 单频单历元模糊度固定[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(12): 1083-1087.
- [24] 刘经南, 邓辰龙, 唐卫明. GNSS 整周模糊度确认理论方法研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1009-1016.
- [25] Deng, C., Tang, W., Liu, J., et al. (2014) Reliable Single-Epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using

-
- Combined GPS/BeiDou System. *GPS Solutions*, **18**, 375-386. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0337-5>
- [26] 刘会杰, 张乃通. 全球导航卫星系统的星座可见性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2000(5): 23-25.
- [27] 唐卫明, 邓辰龙, 高丽峰. 北斗单历元基线解算算法研究及初步结果[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(8): 897-901.
- [28] 吴明魁, 刘万科, 张小红, 田文文. 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.
- [29] 布金伟, 左小清, 金立新, 常军. 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.
- [30] Bilicha, L.K.M. (2007) Mapping the GPS Multipath Environment Using the Signal-to-Noise. *Radio Science*, **42**, RS6003. <https://doi.org/10.1029/2007RS003652>
- [31] 张小红, 丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 832-836.