



北斗/GNSS机载动态PPP性能分析

赵龙, 郭将, 栗广才, 罗锋

Performance analysis of BDS/GNSS airborne kinematic PPP

ZHAO Long, GUO Jiang, LI Guangcai, and LUO Feng

引用本文:

赵龙, 郭将, 栗广才, 等. 北斗/GNSS机载动态PPP性能分析[J]. 全球定位系统, 2022, 47(5): 57–64. DOI: [10.12265/j.gnss.2022096](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022096)

ZHAO Long, GUO Jiang, LI Guangcai, et al. Performance analysis of BDS/GNSS airborne kinematic PPP[J]. *Gnss World of China*, 2022, 47(5): 57–64. DOI: [10.12265/j.gnss.2022096](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022096)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022096>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GNSS多系统动态精密单点定位性能分析

Performance Analysis of Multi-GNSS Dynamic Precision Point Positioning

全球定位系统. 2018, 43(2): 12–19

多系统双频精密单点定位不同模型下性能比较分析

Performance comparison of multi-GNSS and dual-frequency PPP under different models

全球定位系统. 2019, 44(6): 97–103

多系统融合精密单点定位在机载雷达电力线巡检中的应用

Airborne radar power line inspection based on multi-GNSS fusion precise single point positioning

全球定位系统. 2021, 46(5): 104–110

PPP_AR模糊度固定模式下的PPP性能分析

Performance Analysis of PPP in Mode of PPP_AR

全球定位系统. 2018, 43(3): 100–106

几种附电离层约束GNSS单频PPP性能评估

Performance evaluation of GNSS ionospheric constraint single-frequency PPP

全球定位系统. 2021, 46(4): 59–65

BDS/GNSS融合精密单点定位性能分析

Performance analysis of BDS/GNSS precision point positioning

全球定位系统. 2021, 46(3): 66–71



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2022096

北斗/GNSS 机载动态 PPP 性能分析

赵龙¹, 郭将^{2,3}, 栗广才³, 罗锋²

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079;

2. 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083;

3. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079)

摘 要: 针对基于机载动态场景下的实测数据, 使用开源的 PRIDE PPP-AR 软件, 采用伪距和载波相位观测值构建双频的消电离层组合 (IF) 进行了动态精密单点定位 (PPP) 实验, 并对比了单北斗卫星导航系统 (BDS) 以及 BDS/GNSS 在进行机载大动态 PPP 定位方面的性能. 结果表明: 多系统组合在卫星数、卫星几何构型以及位置精度衰减因子 (PDOP) 等方面均优于单系统, 且对比单 GPS 而言, 平面 (东 (E)、北 (N)、高程 (U)) 方向的定位精度分别提升了 10% 和 12%; 此外将开源软件 PRIDE PPP-AR 的解算结果与商业软件 WayPoint 进行了对比, 结果表明前者的定位精度在 E 和 U 方向分别提升了 46% 和 36%, N 方向提升最多, 提升了近 2 倍, 因而 PRIDE PPP-AR 具备更高的动态解算精度与可靠性.

关键词: 机载动态; 精密单点定位 (PPP); 多系统; 性能评估; PRIDE PPP-AR

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2022)05-0057-08

0 引 言

自上世纪美国的 GPS 建成以来, 在相当长一段时间内卫星导航定位领域主要以 GPS 定位为主, 但随着 21 世纪以来俄罗斯的 GLONASS 现代化计划的实施, 使得 GLONASS 焕发新生; 中国的北斗卫星导航系统 (BDS) 历经“三步走”战略也已经实现全球组网, 面向全球用户提供服务; 欧盟的 Galileo 系统也在持续建设和发展. 当前全球卫星导航系统 (GNSS) 已由原来的单 GPS 主导逐渐发展为多系统鼎足而立的阶段, 多系统融合定位已经成为当前卫星导航定位技术领域的主要发展趋势之一^[1-3]. GNSS 多系统融合定位相比单系统定位而言, 具有可见卫星数更多、卫星几何构型更好以及可以利用多频观测值组合成波长更长的新观测量, 使得模糊度参数能更快被固定^[4].

精密单点定位 (PPP) 是指利用高精度的载波相位观测值以及卫星星历来实现高精度单点定位的技术, 它只需要架设一台接收机, 就能实现厘米级甚至毫米级定位精度, 自其出现以来就有十分显著的应用

优势^[5]. 相比相对定位技术, 它不受距离限制, 作业方便; 此外, 由于避免差分运算对观测信息造成的损失, PPP 技术也能应用于气象监测等方面. 由于上述特点, 近年来 PPP 技术已经成为 GNSS 领域的热门研究方向, 展现出了广阔的应用前景. 如今以国际 GNSS 服务 (IGS) 组织推动的多模 GNSS 实验跟踪网 (MGEX) 为契机, PPP 进一步朝着多系统融合的方向发展^[6].

近年来, 许多学者对多系统 PPP 技术进行了大量研究, 文献 [7] 进行了多系统 PPP 实验, 结果表明多系统在定位稳定性和精度上均优于单系统; 文献 [8] 研究分析了四系统融合 PPP 的定位性能, 实验表明, 在单系统几何观测、几何构型不理想的区域, 多系统融合能显著提高 PPP 的定位精度和收敛速度; 文献 [9] 对比分析了 GPS、BDS、GPS+BDS 不同情况下静态与动态 PPP 精度, 结果表明多系统状态下定位精度更高. 文献 [10] 对多系统的 PPP 性能进行了分析, 结果发现 BDS+GPS 的定位精度优于其他组合.

目前 PPP 技术的研究主要采用 MGEX 的测网数

收稿日期: 2022-05-30

资助项目: 中国自然资源航空物探遥感中心青年创新基金 (2020YFL02); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2042022kf1035); 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助.

通信作者: 郭将 E-mail: guojiang@whu.edu.cn

据进行多系统组合静态或者静态模拟动态实验,对于实际的动态场景尤其是航空动态数据解算中的多系统 PPP 的定位性能研究较少^[11]。因此,本文选用机载动态场景下的实测的数据,利用 IGS 提供的精密产品,实现了对单 GPS、单 BDS 和 BDS+GPS 组合定位系统, BDS+GPS+GLONASS 组合系统动态模型下的电离层组合 (IF) 的 PPP 解算,通过对可视卫星数、位置精度衰减因子 (PDOP)、验后残差以及平面和高程方向定位精度等方面对定位性能进行了评估和分析。

1 数学模型

1.1 原始观测方程

PPP 广泛使用伪距和载波相位观测值进行解算。相对论效应、电离层延迟、对流层延迟、天线相位中心偏差 (PCO)、相位中心变化 (PCV)、潮汐效应均对最终的定位精度产生影响^[12],考虑到上述误差改正后的观测方程为:

$$L_{r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \cdot (dt_r - dt^s) + \lambda \cdot (N_{r,i}^{s,j} - b_i^{s,j} + b_{r,i}) + \alpha \cdot T_z - \beta_f \cdot I_z + \varepsilon_\phi, \quad (1)$$

$$P_{r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \cdot (dt_r - dt^s) + c \cdot (d_{r,i}^{s,j} - d_r^{s,j}) + \alpha \cdot T_z + \beta_f \cdot I_z + \varepsilon_p. \quad (2)$$

式中: P 、 L 分别为伪距和载波相位观测值,单位为 m; 上标 j 、 s 分别为卫星系统和卫星,下标 r 、 i 分别为接收机和测站; ρ 为卫星与接收机之间的几何距离,单位为 m; c 为真空中的光速; dt_r 、 dt^s 分别为接收机端钟差和卫星钟差,单位为 m; λ 为载波的波长; $N_{r,i}^{s,j}$ 为整周模糊度; $b_i^{s,j}$ 、 $b_{r,i}$ 分别表示卫星端和接收机端相位硬件延迟; $d_{r,i}^{s,j}$ 、 $d_r^{s,j}$ 分别表示卫星端和接收机端的伪距硬件延迟偏差,单位为 m; α 为对流层投影系数; T_z 为天顶对流层延迟; β_f 为电离层对应投影系数; I_z 为天顶电离层延迟; ε_ϕ 、 ε_p 分别为载波相位与伪距观测噪声,单位为 m。

1.2 无电离层组合观测方程

对于多频的伪距和载波相位观测值而言,为了消除电离层延迟的影响,可以通过构造无电离层组合,此时观测方程为^[13]:

$$P_{IF,i,r}^{s,j} = \frac{f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (3)$$

$$L_{IF,i,r}^{s,j} = \frac{f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (4)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为两个载波的频率; P_1 、 P_2 分别为两个频率上的伪距观测值; L_1 、 L_2 分别为两个频率上的相位观测值。式 (1)~(2) 的观测方变为:

$$P_{IF,r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \cdot (dt_r - dt^s) + \alpha \cdot T_z + \beta \cdot I_z + c \cdot (d_{i,r}^{s,j} - d_j^{s,j}) + \varepsilon_p \cdot (P_{IF}), \quad (5)$$

$$L_{IF,r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \cdot (dt_r - dt^s) + \lambda \cdot (N_{IF,i}^{s,j} - b_i^{s,j} + b_{i,r}^{s,j}) + \alpha \cdot T_z + \beta_f \cdot I_z + \varepsilon_\phi \cdot (L_{IF}), i. \quad (6)$$

在实际数据解算中,文献 [14-15] 指出接收机钟差、卫星钟差会分别吸收接收机伪距硬件延迟、卫星伪距硬件延迟;文献 [16-17] 说明了相位硬件延迟与整周模糊度参数的相关性较强,PPP 解算过程中卫星端和接收机端的相位延迟会被模糊度参数吸收,使得模糊度参数失去整数特性,式 (5)~(6) 就变为:

$$P_{IF,r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \bar{d}_t + \alpha \cdot T_z + \varepsilon_r^s (P_{IF}), \quad (7)$$

$$L_{IF,r,i}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c \bar{d}_t + \alpha \cdot T_z + \varepsilon_r^s (P_{IF}) + \bar{N}_{r,i}^{s,j}. \quad (8)$$

其中:

$$c \bar{d}_t = \delta t_r + d_{i,r}^{s,j}, \quad (9)$$

$$\bar{N}_{r,i}^{s,j} = N_{IF,r,i}^{s,j} + c(b_{IF,r,i}^{s,j} + b_{IF,i}^{s,j}). \quad (10)$$

1.3 参数估计方法

本文进行 PPP 参数解算时采用的是最小二乘估计,误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B} \mathbf{X} - \mathbf{L}. \quad (11)$$

式中: \mathbf{L} 为常数矩阵; \mathbf{B} 为系数矩阵。根据平差论中加权残差平方和最小的原理

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min. \quad (12)$$

即

$$(\mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{X} - \mathbf{L})^T (\mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{X} - \mathbf{L}) = \min. \quad (13)$$

法方程可表示为

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{X} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}. \quad (14)$$

则参数解为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}. \quad (15)$$

估计的精度为:

$$\mathbf{D}_{ii} = \sigma_0 \sqrt{\mathbf{Q}_{ii}}, \quad (16)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{r}}. \quad (17)$$

式中: \mathbf{D}_{ii} 为方差矩阵,反映了精度信息; σ_0 为验前单位权中误差; \mathbf{Q}_{ii} 为协因数矩阵; 1 为观测数; r 为多余观测量。

2 数据来源与处理策略

2.1 数据来源

本实验为在海南省进行的动态机载实验,飞行时间自 2021 年 3 月 27 日 6 点 29 分起,结束于当日 11 点 50 分 (UTC 时间),飞行轨迹如图 1 所示.最终获得的实测数据主要包括基准站数据和机载数据.



图 1 飞机飞行轨迹图

基准站数据由基准站 1 与基准站 2 数据组成.基准站 1 的坐标已知,基准站 2 坐标未知,通过与基准

站 1 联测的方式可以获得基准站 2 的坐标.基准站 1 的数据为 2 Hz 的单 GPS 数据,其搭载的接收机类型为 Spectra Precision PROFLEX800,数据起止时间为 2021 年 3 月 27 日 6 点 14 分至 12 点 24 分 (UTC 时间),基准站 2 数据情况与基准站 1 相同.

机载数据由移动站搭载 NovAtel Guiscard 接收观测得到,数据为 2 Hz 的 GPS/BDS/GLONASS 的高频实测数据.

其中各系统包含频率分别为 GPS 的 L1/L2; GLONASS 的 L1/L2 以及北斗二号 (BDS-2) 的 B1I/B2I.采集时段从 2021 年 3 月 27 日 6 点 29 分起至 11 点 50 分 (UTC 时间).

2.2 PPP 数据处理策略

采用表 1 中的数据处理策略,解算时位置当作随机游走参数来估计,每历元以标准单点定位解作为初值;接收机参数视作噪声,大小给定为 $9\ 000\ \text{m}/\sqrt{s}$ 的白噪声参数进行估计,其中 s 表示时间单位 s ;由于飞机速度很大,其所处对流层环境变化剧烈,因此本研究采用了每历元单独估计对流层参数的策略,随机游走噪声给定为 $2\ \text{cm}/\sqrt{s}$.

表 1 数据处理策略

类别	参数	策略
观测值	卫星系统与频率	GPS: L1/L2/L5 GLONASS: L1/L2 BDS: B1I/B2I
	截止高度角	5°
	采样率	2 Hz
	DCB产品	武汉大学WUM快速OSB产品
	ERP产品	武汉大学WUM快速ERP产品
	轨道与钟差	武汉大学WUM快速精密钟差轨道产品
改正模型	卫星端/接收机端PCO/PCV	Igs14.atx
	对流层	模型改正+随机游走估计 ^[18]
	电离层	无电离层组合
参数估计	位置	当作随机游走
	接收机钟差	当作白噪声
	模糊度	当作常数估计

在数据处理时,为了获得参考真值,首先使用 RTKLIB 软件对参考站和流动站做了双差解算,固定率为 99.3%,这证明以此基线结果作为真值是可行的.由于此次机载测量实验中北斗三号 (BDS-3) 缺

少双频数据,无法构建双频的无电离层组合,因而本文中所使用的 BDS 数据均是 BDS-2 的数据.

使用 PRIDE PPP-AR 软件处理动态数据,PRIDE PPP-AR 是由武汉大学 PRIDE 课题组开发的一款可

对多系统 GNSS 数据进行后处理,能应用于大地测量学、重力测量、摄影测量、地震监测等方面研究的开源软件.软件主要经过数据准备和预处理、最小二乘估计以及位置信息输出等步骤,输入精密星历文件和观测值文件最终解算出高精度单点定位坐标,软件处理具体流程如图 2 所示

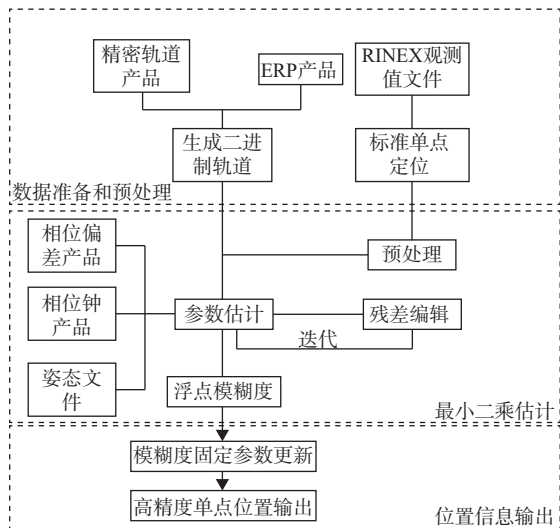


图 2 PRIDE PPP-AR 数据处理流程图

3 实验结果与分析

3.1 可视卫星分析和 PDOP 分析

由图 3 可以看出, GPS 的卫星分布较均匀,在各个方向均有分布,几何构型也是其中最好的, BDS 的卫星

多数分布在西南侧,东北侧的卫星分布较少,空间几何构型较差, GLONASS 的卫星分布较为均匀,但卫星数较少,因此分布较为稀疏, BDS+GPS+GLONASS 的卫星分布更加均匀,高程(U)方向分布的卫星数也更多.

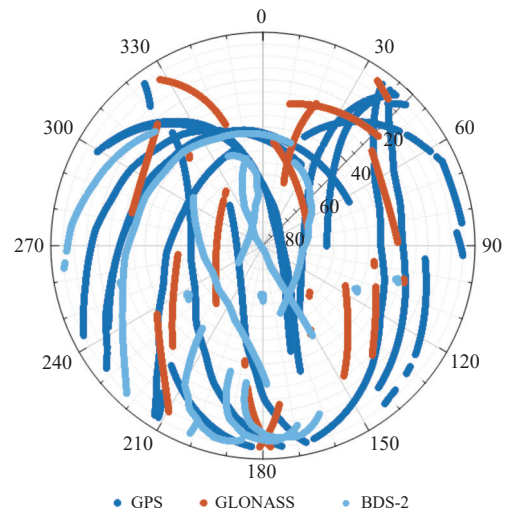


图 3 GPS、BDS 和 GLONASS 的卫星分布图

由图 4 可知, GPS+BDS-2+GLONASS 的可视卫星数约为 20~30 颗,飞行过程中约稳定在 25 颗,相比单 GPS、单 BDS-2 在亚太地区拥有更多得可用卫星,平均 10~15 颗, GLONASS 在观测的开始和结束阶段可视卫星 7~9 颗,但观测过程大部分时间段内可视卫星数基本为零.多系统的卫星数显著多于单系统的卫星数,更加适合在动态情况部分卫星被环境遮挡时保持 PPP 解算的准确估计和稳定持续解算.

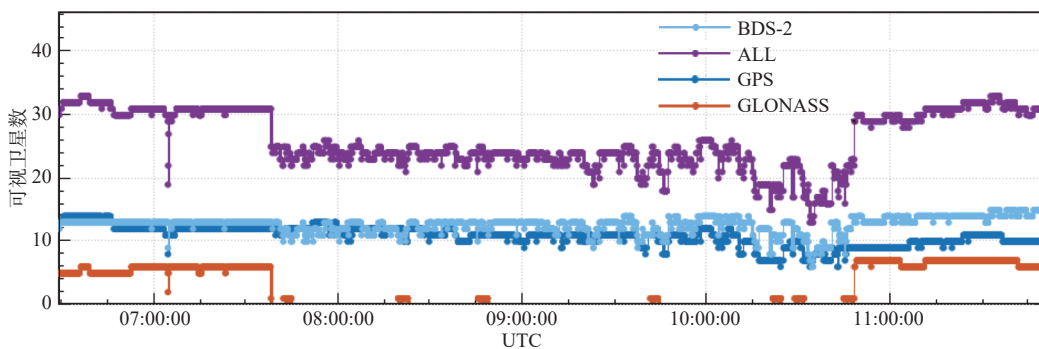


图 4 可视卫星数的时间序列

PDOP 值反映了定位的质量情况,其值越小,表明其卫星处于较好的几何分布状态,定位精度更好.由图 5 可知,单 BDS-2 的 PDOP 最大,其值在 2 附近波动,单 GPS 其 PDOP 值在 1.5 波动. GPS+BDS+GLONASS 的 PDOP 值与 GPS+BDS 相差不大,在 1 附近波动,主要是因为 GLONASS 在飞机起飞后其

卫星数量急剧减少,推测是由于接收机未能有效跟踪 GLONASS 卫星,因而实际的定位主要由 BDS-2 和 GPS 决定.相比单系统而言,飞机飞行过程中的大部分时刻多系统的 PDOP 降低了 0.5~1 倍,有望获得更高的定位精度.

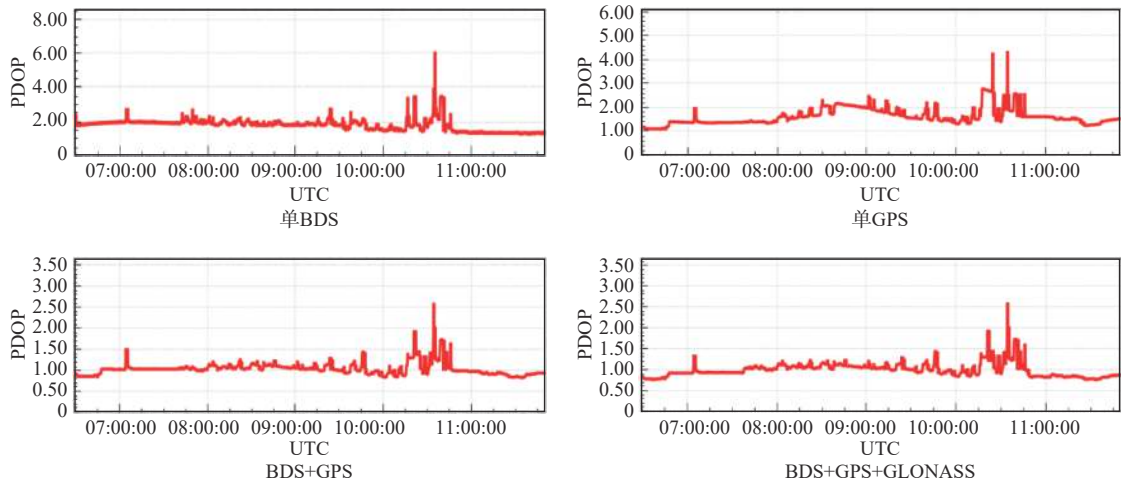


图 5 三系统的 PDOP 值和可用卫星数时间序列

结合表 2 的定位精度情况,对于卫星数和几何构型更好的多系统 PPP,其 PDOP 更小,卫星分布更均匀,可见卫星数更多、定位精度更高,表明更多的卫星数以及更好的空间几何构型有助于提高机载动态情况下 PPP 解算的精度。

3.2 观测值残差分析

观测值残差是由观测值减去改正值后以及参数估计值后的残余部分,包括机载测量过程中来自卫星端、信号传播路径中、接收机端等带来的噪声以及其他未被精确模型化的误差,观测值残差大小可以作为评价一个模型好坏以及观测质量的重要标准。

定位的精度与观测条件、数据质量直接相关,越精确的观测数据,其定位解算的结果就会相应越好。残差的噪声量级以及包含的周期信号可以用来分析

观测值的数据质量。虽然 PPP 中载波相位的权重远大于伪距,但如果伪距的质量太差依然会影响对位置、模糊度参数的准确估计。图 6 绘制了 GPS、BDS、GLONASS 三个系统的载波相位、伪距的残差以及对应的高度角图。从图 6 中可以看出,载波相位测量值的残差在 ± 0.1 cm 内波动,伪距测量值在 ± 5 m 内波动;并且可以看到伪距和载波相位的残差值在飞机起飞和降落阶段波动较大,在飞行过程中保持稳定,主要原因是飞机起飞和降落时环境变化较大,测量误差较大。从图中也可以看出,BDS-2 的卫星高度角大部分在 30° 以上,且 50° 以上占比较大,GPS 的卫星高度角集中在 $10^\circ \sim 40^\circ$, 50° 以上占比较小,这与 BDS-2 在亚太地区的可视卫星数较多有关,BDS-2 相对更大的卫星高度角测量会使得多路径造成的误差更小。

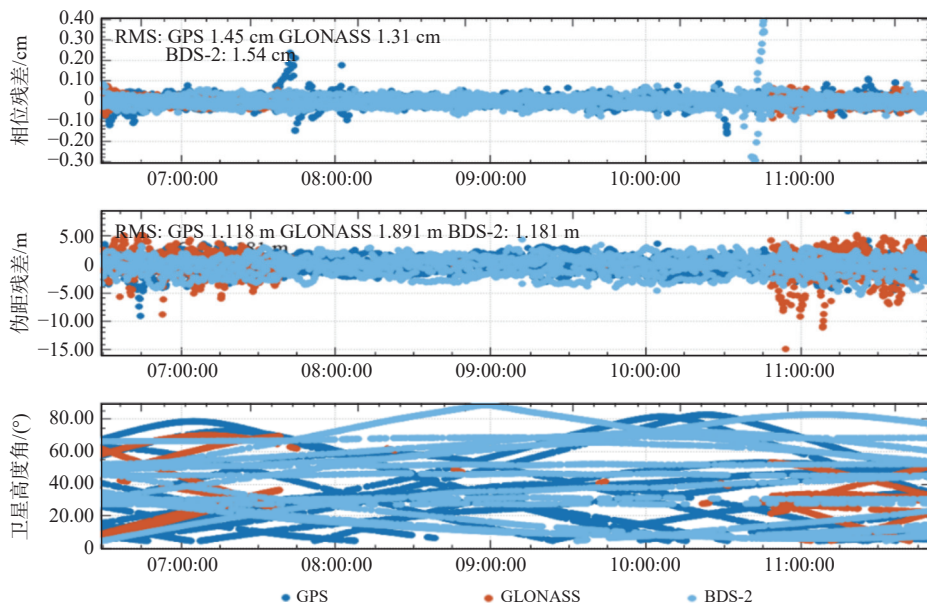


图 6 观测值残差以及卫星高度角

根据实测数据计算出 GPS、BDS、GLONASS 的载波相位测量值残差分别是 1.45 cm、1.54 cm 和 1.31 cm, 伪距测量值残差分别为 1.118 m、1.181 m 和 1.891 m, 三个卫星导航系统的载波相位观测值残差相近, 相差 10~20 mm, 但对于伪距观测值残差, GPS 最小, GLONASS 最大, GPS 与 BDS 伪距测量残差相近, 在 1.15 m 附近, GLONASS 较之降低了约 60%。从测量残差来看, BDS 的观测值残差与 GPS 接近, 均低于 GLONASS 的观测值残差, 因此从残差来看, BDS 和 GPS 的观测质量相近, GLONASS 的观测质量较差。

3.3 定位精度分析

图 7 为单 GPS、单 BDS-2、BDS-2+GPS 以及 BDS-2+

GPS+GLONASS 的定位精度序列, 表 2 为不同组合系统下的平均定位精度。定位序列在飞机起飞和降落时有明显的抖动, 在 U 方向尤其明显, 推测是对流层模型剧烈变化导致结果估计不稳定。从表 2 中可以看出, 无论是单 GPS、单 BDS 还是组合系统 GPS+BDS 以及 GPS+BDS+GLONASS, 其动态 PPP 在东 (E) 方向和北 (N) 方向的定位精度都要远优于 U 方向的定位精度, 一方面是因为处于平面方向的卫星分布较均匀, 卫星空间几何构型较好, 而只有 U 方向有卫星分布, 几何构型较差; 另一方面, 由于电离层延迟、对流层延迟等误差改正项主要是投影到 U 方向, 对于定位的精度影响较大, 从表 2 中也可以看出, E 方向和 N 方向的平均精度高于 U 方向 60%~90%。

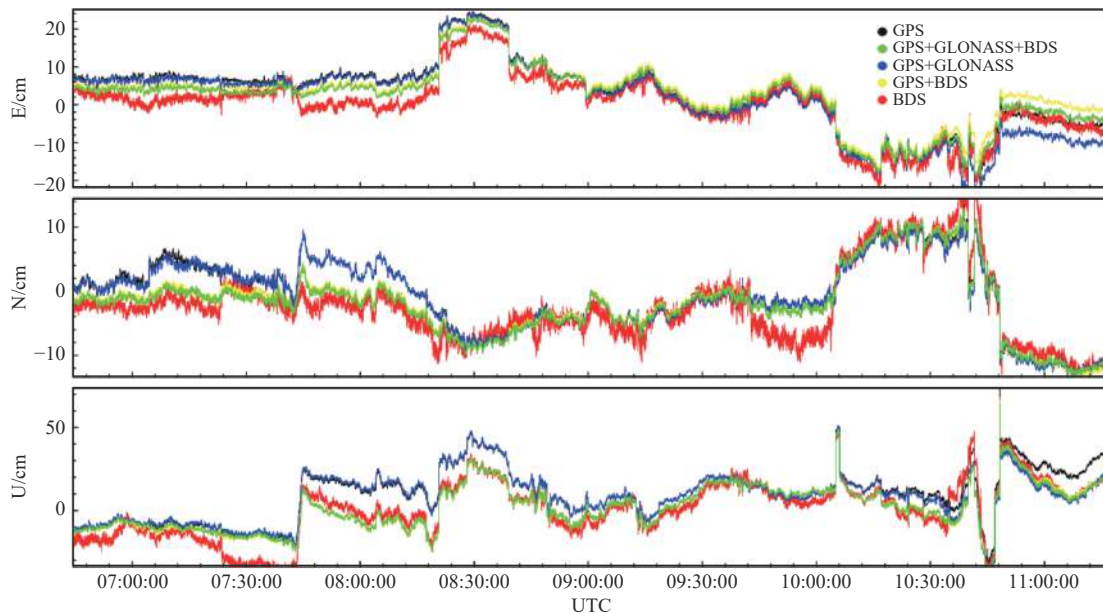


图 7 不同组合下的定位精度

表 2 不同组合下的定位精度 cm

卫星系统	GPS	BDS	GPS/BDS	GPS/BDS/GLONASS
E	9.1	8.0	7.8	8.1
N	5.7	5.7	5.4	5.4
U	15.4	16.7	13.6	13.4

同时单 BDS 的 PPP 在 E 方向和 N 方向较单 GPS 精度更高, GPS+BDS 的 PPP 在 E、N 和 U 方向上均优于单 GPS 和单 BDS, 其中在 U 方向提升更为明显。我们也可以发现 GPS+BDS+GLONASS 与 GPS+BDS 的定位表现相近, 主要是由于 GLONASS 卫星在飞机起飞后可视卫星数目急剧减少, 对结果的贡献很小。这与图 4 中可用卫星数也可以看出来总卫星数

在飞行阶段与 GPS+BDS 的基本一致。因此多系统 PPP 相比单系统 PPP 而言, 能提高定位的精度。

3.4 PRIDE PPP-AR 软件与 WayPoint 软件结果对比

图 8 中我们将 PRIDE PPP-AR 的解算结果同 WayPoint 差分解做了比较。

可以看到在飞机起飞后图中水平方向和 U 方向表现出明显的“阶跃”, 推测是由于模糊度固定错误导致的位置跳变。最终, 定位结果在三个方向定位精度分别达到了 13.3 cm、15.4 cm、18.6 cm, WayPoint 的解算精度相比 PRIDE PPP-AR 而言, GPS+BDS 的 PPP 在 E 方向和 U 方向分别降低了 46% 和 36%, N 方向下降最多, 降低了近 2 倍。因此 PRIDE PPP-AR 软件的 PPP 解算结果显著优于 WayPoint 软件的解算结果。

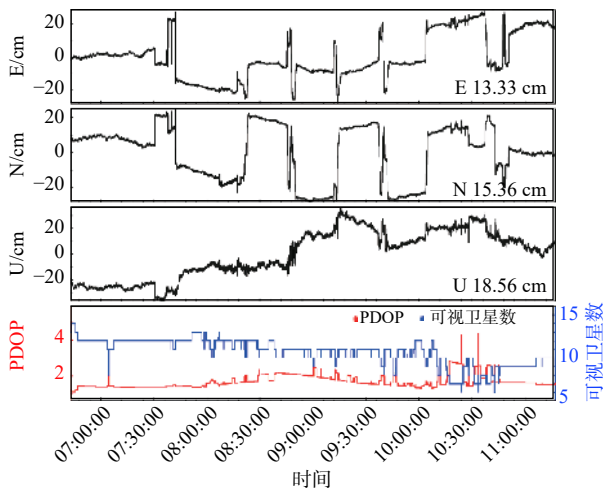


图 8 WayPoint 软件基线解

4 结束语

本文通过机载 NovAtel GPScard 接收机在海南省所进行的动态 PPP 实验,由于 GLONASS 在飞机起飞后卫星数急剧减少,对解算结果贡献比较小,因而本文主要是利用 PRIDE PPP-AR 软件进行了单 GPS、单 BDS、GPS+BDS 以及 BDS+GPS+GLONASS 的动态 PPP 解算.结果表明:

1) 相比 GPS,单 BDS-2 在亚太地区拥有更多的可视卫星,平均 10~15 颗,因此具有更好的几何构型.从定位结果来看,单 BDS-2 动态 PPP 定位精度在 E、N、U 三个方向分别为 8.0 cm、5.7 cm、16.7 cm,相比单 GPS 结果在 E 方向提高了 12%.如果引入 BDS-3 卫星,定位性能会得到进一步提升.

2) 机载动态情况下多系统 GNSS 的 PPP 在实际解算中优势更为明显,其可视卫星数更多,卫星几何构型更好;E、N、U 方向的定位精度都高于单系统,U 方向提升更加明显,在 U 方向上,GPS+BDS 比单 GPS、单 BDS 精度提升了 12% 和 19%,这对于高程方向更加敏感的应用场景如航空重力测量会更有帮助.

3) 本文利用 PRIDE PPP-AR 软件的动态 PPP 解算结果与 WayPoint 软件差分解对比,结果表明 PRIDE PPP-AR 解算结果精度相比前者在 E 和 U 方向分别提高了 46% 和 36%,N 方向提高了近两倍,因此其解算结果显著优于 WayPoint 软件的解算结果,且前者完全开源,而后者为商业软件,因此 PRIDE PPP-AR 软件相比 WayPoint 软件具有更加显著的解算性能与应用能力.

致谢: 感谢武汉大学 PRIDE Lab 提供的开源软件 PRIDE PPP-AR 的支持.感谢中国自然资源航空物探遥感中心提供的机载观测数据.

参考文献

- [1] 宁津生,姚宜斌,张小红.全球导航卫星系统发展综述[J].*导航定位学报*,2013,1(1):3-8.
- [2] 季宇虹,王让会.全球导航定位系统GNSS的技术与应用[J].*全球定位系统*,2010,35(5):69-75.
- [3] 刘基余.GNSS全球导航卫星系统的新发展[J].*遥测遥控*,2007,28(4):1-6.
- [4] 耿江辉,常华,郭将,等.面向城市复杂环境的3种多频多系统GNSS单点高精度定位方法及性能分析[J].*测绘学报*,2020,49(1):1-13.
- [5] 张小红,李星星,李盼.GNSS精密单点定位技术及应用进展[J].*测绘学报*,2017,46(10):1399-1407.
- [6] 屈利忠,赵齐乐,郭靖,等.GNSS融合动态精密单点定位性能分析[J].*大地测量与地球动力学*,2016,36(4):298-302.
- [7] 苗维凯,陈旭升,刘洋洋.GNSS多系统组合PPP解算方法与成果分析[J].*大地测量与地球动力学*,2019,39(5):521-527.
- [8] 任晓东,张柯柯,李星星,等.BeiDou、Galileo、GLONASS、GPS多系统融合精密单点[J].*测绘学报*,2015,44(12):1307-1313,1339.
- [9] 祝会忠,杨添宇,赵洪涛,等.GNSS多系统精密单点定位方法与性能分析[J].*测绘科学*,2020,45(12):1-7,21.
- [10] 尹海博,郭杭,罗孝文.BDS/GNSS融合精密单点定位性能分析[J].*全球定位系统*,2021,46(3):66-71.
- [11] 高永刚,吴观焯,郭金运,等.GNSS多系统组合动态精密单点定位性能研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2022,30(2):501-518.
- [12] 夏宇飞.INS辅助的多系统GNSS单频精密单点定位算法研究[D].上海:华东师范大学,2018.
- [13] 杨添宇.GNSS精密单点定位算法研究及性能分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
- [14] 胡丽乐,潘林.GPS/GLONASS/BDS/Galileo组合精密单点定位[J].*导航定位学报*,2017,5(1):86-90.
- [15] 丁赫,孙付平,李亚萍,等.BDS/GPS/GLONASS组合精密单点定位模型及性能分析[J].*大地测量与地球动力学*,2016,36(4):303-307.
- [16] 李盼.GNSS精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D].武汉:武汉大学,2016.
- [17] 屈利忠.北斗/GNSS实时精密定位服务系统关键算法研究与实现[D].武汉:武汉大学,2017.
- [18] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J].*Bulletin géodésique*,1972:279-298.

作者简介

赵龙 (2000—),男,研究方向为GNSS高精度数据处理.

郭将 (1994—),男,博士,研究方向为高精度定位与数据处理.

栗广才 (1989—), 男, 博士, 研究方向为低成本高精度定位.

罗锋 (1979—), 男, 工程师, 研究方向为航空地球物理勘探.

Performance analysis of BDS/GNSS airborne kinematic PPP

ZHAO Long¹, GUO Jiang^{2,3}, LI Guangcai³, LUO Feng²

(1. *School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

2. *Key laboratory of airborne geophysics and remote sensing geology, Ministry of nature and resources, Beijing 100083, China;*

3. *GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)*

Abstract: Based on the measured data in the airborne kinematic scene, this paper uses the open-source PRIDE PPP-AR software to construct a dual-frequency ionosphere-free combination (IF) using the pseudorange and carrier phase observations for kinematic precise point positioning (PPP) experiment, and it also compares the performance of a single BDS system and BDS/GNSS in airborne large kinematic positioning. The results show that the number of satellites, satellite geometry and position dilution of precision (PDOP) of the multi-system combination are superior. In a single system, the positioning accuracy in the plane (east (E), north (N) and up (U))directions are improved by 10% and 12% respectively. In addition, this paper compares the solution results of the open-source software PRIDE PPP-AR with the commercial software WayPoint, the results show that the positioning accuracy of the former is improved by 46% and 36% in the E and U directions respectively, and the N direction is the most improved, nearly doubled. Therefore, PRIDE PPP-AR has higher solution accuracy and better solution performance.

Keywords: airborne kinematic; precise point positioning (PPP); Multi-GNSS; positioning accuracy; PRIDE PPP-AR