

三种多系统开源 PPP 软件性能比较与分析

王何鹏¹ 郭 杭¹ 黄 聪¹

1 南昌大学信息工程学院,南昌市学府大道 999 号,330031

摘 要: 为对比 PPPH、MG-APP、GAMP 三种多系统开源 PPP 软件的特性,选取 6 个 MGEX 测站的观测数据,使用 3 个 PPP 软件进行 GPS 单系统和 GRCE 多系统精密单点定位解算,分析对比其解算的定位精度、收敛时间和对流层延迟。结果表明,3 个软件解算的 GRCE 多系统的定位精度和收敛时间相比于 GPS 单系统均有所改善,MG-APP 和 GAMP 解算的定位精度相当而 PPPH 略差,MG-APP 相比于 PPPH 和 GAMP 收敛时间更短。3 个软件解算的 GPS 和 GRCE 静态精密单点定位在平面上优于 1 cm,高程上优于 2 cm;GPS 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm,高程上优于 5 cm;GRCE 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm,高程上优于 3 cm。3 个软件解算的 ZTD 与 IGS 发布的 ZTD 具有很高的-致性,均能满足 ZTD 精度要求,GAMP 相比于 PPPH 和 MG-APP 解算的 ZTD 稳定性略高。

关键词: 精密单点定位;开源软件;定位精度;收敛时间;对流层

中图分类号: P228

文献标识码: A

精密单点定位(PPP)是一种使用单台接收机就可实现高精度定位的方法,广泛应用于低轨卫星精密定轨、地壳形变监测、GNSS 气象学、高精度静态或动态定位等领域。多系统融合的 GNSS 精密单点定位方法已成为当前的趋势,可有效提高定位精度和收敛速度^[1-8]。

随着 PPP 技术的快速发展,国内外已有大量科研机构和个人开发出许多支持 PPP 处理的软件工具,大致可分为 4 类:大型科研软件、商业软件、在线服务系统和开源软件^[9-10]。大型科研软件如 P3、PANDA、Bernese 等功能强大,但学习难度大且不对普通用户开放;商业软件如 GrafNav 等价格昂贵,源码不公开;在线服务系统如 APPS、GAPS、CSRS-PPP 和 magicGNSS 等使用简单,无需付费,但源码也不对用户开放,且大部分在线服务系统均不支持多系统处理^[11-12]。开源 PPP 软件具有源码公开、免费、使用简单、所有用户都能使用等优点,非常适合广大科研人员、工程应用人员进行学习以及进一步开发,因此对开源 PPP 软件的运用以及开发具有重要价值和意义。目前已经有大量开源 PPP 软件可供用户使用,如 PPPH、MG-APP、GAMP、GPSTk、PRIDE PPP-AR、RTKLIB 等,但并非所有开源 PPP 软件都支持多系统卫星联合定位,且目前对不同开源软件性能比较研究的文献较

少。本文对 PPPH、MG-APP、GAMP 三种可处理多系统联合定位的开源 PPP 软件进行比较与分析,对比 3 个软件的特点,并分析其处理 GPS+GLONASS+BDS+Galileo 多系统和 GPS 单系统 PPP 的定位精度、收敛时间和对流层延迟。

1 三种开源软件特性比较

由于不同的开源软件具有不同的数据处理特点和功能,用户在使用之前不仅要考虑其定位精度,还应关注软件支持的操作系统、运行环境、操作界面、处理模型、输出结果类型等因素,然后根据需求选择对应的开源软件。

PPPH 是在 MATLAB 下运行的多系统开源 PPP 软件,MG-APP 是基于跨平台 Qt 框架的 C++ 语言下的多系统开源 PPP 软件,GAMP 是在 RTKLIB 基础上开发的多系统开源 PPP 软件^[13-15]。表 1 为 PPPH、MG-APP、GAMP 三种软件的主要特征比较,可以看出,3 种软件均能在 Windows、Mac、Linux 等操作系统下运行,且能支持多种卫星系统,可极大方便用户使用。PPPH 和 MG-APP 均拥有用户友好的图形操作界面,相比于 GAMP 更容易学习和使用。GAMP 比 PPPH 和 MG-APP 多了非差非组合的 PPP 模型,可方便用户对比研究不同 PPP 模型函数。MG-APP 和 GAMP 比

收稿日期:2020-08-08

项目来源:国家自然科学基金(41764002)。

第一作者简介:王何鹏,硕士生,主要从事北斗/GNSS 精密定位研究,E-mail:719275880@qq.com。

表 1 3 种开源软件主要特征比较

Tab. 1 Comparison of main features of three kinds of open source software

开源软件	PPPH	MG-APP	GAMP
主要研发机构	土耳其 Hacettepe 大学	中国科学院	华东师范大学
可下载网址	https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox		
支持卫星系统	GPS、GLONASS、BDS、Galileo	GPS、GLONASS、BDS、Galileo	GPS、GLONASS、BDS、Galileo、QZSS
支持操作系统	Windows、Mac、Unix/Linux	Windows、Mac、Unix/Linux	Windows、Mac、Unix/Linux
运行工具	MATLAB	跨平台 Qt 框架	Microsoft Visual Studio
操作界面	图形用户界面	图形用户界面	命令行程序
处理模式	静态/动态	静态/动态	静态/动态
PPP 模型	无电离层组合	无电离层组合	无电离层组合、非差非组合
对流层改正	Saastamoinen 模型	Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、UNB3m 模型	Saastamoinen 模型、SBAS 模型、Estimate ZTD、Estimate ZTD+Grad
滤波方式	扩展卡尔曼滤波	卡尔曼滤波、均方根信息滤波	扩展卡尔曼滤波
输出结果	定位偏差、天顶对流层延迟、可见卫星数量、接收机钟差等	定位偏差、天顶对流层延迟、接收机钟差等	定位偏差、天顶对流层延迟、斜电离层延迟、可见卫星数等

PPPH 具有更多的对流层改正模型,可方便用户比较不同对流层模型对定位结果的影响。

2 数据处理与分析

2.1 实验方案与数据处理策略

实验数据选取全球多系统定位服务实验网(MGEX)中 6 个测站(AREG、JFNG、REUN、WROC、NNOR、YEL2)2018-09-13~2018-09-19 和 2019-01-05~2019-01-11 共 14 d 的观测数据,数据采样率为 30 s。

利用 PPPH、MG-APP、GAMP 三款开源软件分别对 GPS 单系统、GPS+GLONASS+BDS+Galileo(以下简称 GRCE)多系统进行静态/动态 PPP 解算,并分析不同软件解算的定位精度、收敛时间以及对流层 ZTD。表 2 为 3 个软件具体的数据处理策略,精密轨道、精密钟差等精密产品均由 IGS 各分析中心提供,PPPH 和 GAMP 使用 CODE 发布的 5 min 精密轨道和 30 s 精密钟差,由于 MG-APP 可自动选择和下载精密产品,因此不作说明。

表 2 3 种开源软件数据处理策略

Tab. 2 Processing strategies of three kinds of open source software

类型	PPPH	MG-APP	GAMP
星座	GPS、GLONASS、BDS、Galileo		
PPP 模型	无电离层组合		
处理模式	静态/动态		
卫星轨道、卫星钟差	CODE MGEX 精密轨道(采样间隔 5 min)、CODE MGEX 精密钟差(采样间隔 30 s)	GBM/IGS 产品(自动下载)	CODE MGEX 精密轨道(采样间隔 5 min)、CODE MGEX 精密钟差(采样间隔 30 s)
高度截止角	10°		
观测值加权	高度角定权 $[\sin(\text{elevation})]$ (载波相位观测值标准差:0.003 m;伪距观测值标准差:3 m)	$P = \sin^2 e / \sigma^2$ (σ^2 为伪距或载波方差);GPS: GLONASS; BDS; Galileo=3:2:1:1	高度角定权 $[\sin(\text{elevation})]$ (载波相位观测值标准差:0.003 m;伪距观测值标准差:0.3 m)
参数估计方式	扩展卡尔曼滤波	卡尔曼滤波	扩展卡尔曼滤波
对流层干延迟	Saastamoinen 模型		
对流层湿延迟	估计		
对流层映射函数	GMF		
相位中心偏差	Igs14.atx(考虑 PCO、PCV)改正		
接收机钟差、接收机坐标、ISB(GPS 为参考)、模糊度	估计参数		
潮汐改正	IERS conventions 2010(固体潮、海潮、极潮)		
相位缠绕、相对论效应	模型改正		

2.2 静态 PPP 定位精度和收敛性分析

为分析 3 种软件处理 GPS 单系统和 GRCE 多系统的定位精度和收敛时间,本文使用 IGS 提供的 SINEX 文件中的坐标作为参考值,并以 N、E、U 三个方向定位偏差均收敛至 1 dm 的时间定义为收敛时间。图 1 和图 2 为 2019-01-05 AREG 站 GPS 单系统和 GRCE 多系统静态 PPP 解算结果,为方便

比较,图中仅显示前 6 h 结果。可以看出,3 个软件解算的 GRCE 多系统的定位精度和收敛时间比 GPS 单系统均有所改善,MG-APP 相比于 PPPH 和 GAMP 在收敛时间上更短。表 3 和表 4 分别为 2018-09-13~2018-09-19 期间和 2019-01-05~2019-01-11 期间 3 个软件解算的 6 个测站 GPS 单系统和 GRCE 多系统静态 PPP 两周定位误差 RMS 和

收敛时间平均值,可以看出, U 方向精度最差,且 3 个软件解算的 GPS 单系统和 GRCE 多系统精密单点定位结果在平面上优于 1 cm,高程上优于 2 cm; MG-APP 和 GAMP 解算的定位精度相当而 PPPH 略差,3 个软件解算的多系统精密单点定位精度均优于 GPS 单系统;PPPH、MG-APP、GAMP 解算的

GPS 单系统 PPP 收敛时间分别约为 30.5 min、28.6 min、29.2 min,GRCE 多系统 PPP 收敛时间分别约为 18.7 min、17.1 min、17.6 min。PPPH、MG-APP、GAMP 解算的 GRCE 多系统收敛时间比 GPS 单系统分别改善约 38.7%、40.2%、39.7%,极大地缩短了定位的收敛时间。

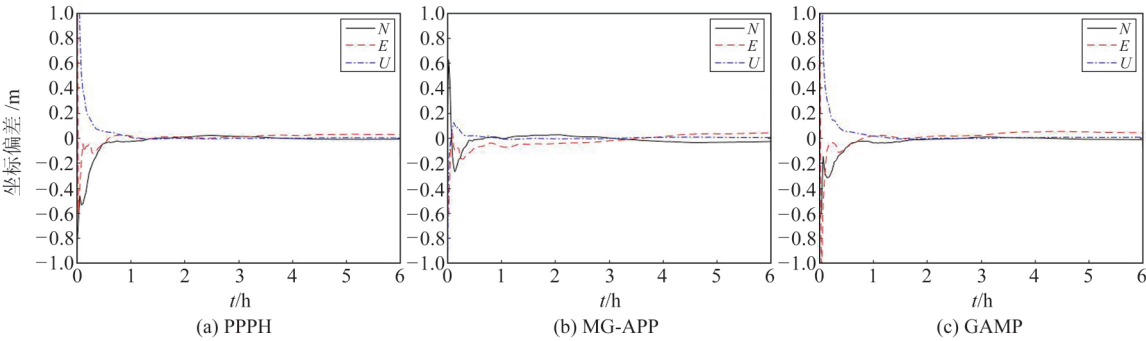


图 1 3 种软件解算的 AREG 站 GPS 单系统静态 PPP 误差
Fig. 1 GPS static PPP error of AREG station solved by three kinds of software

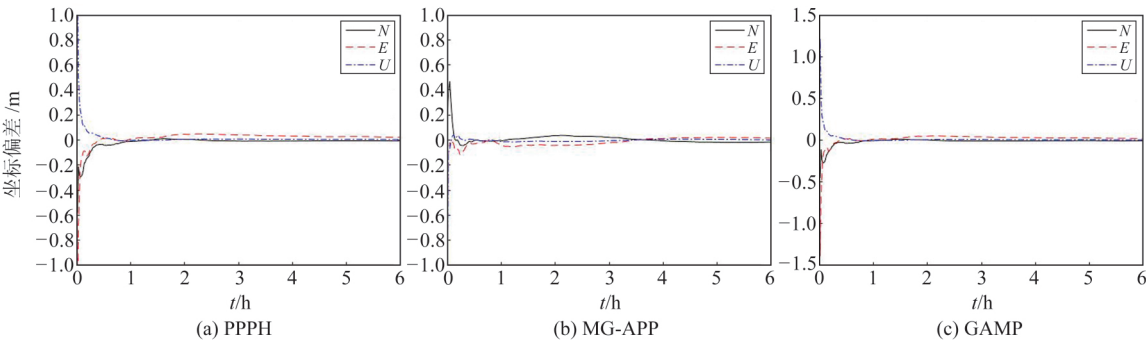


图 2 3 种软件解算的 AREG 站 GRCE 多系统静态 PPP 误差
Fig. 2 GRCE static PPP error of AREG station solved by three kinds of software

表 3 6 个测站 GPS 静态 PPP 两周定位误差 RMS 值与收敛时间

Tab. 3 Positioning error RMS and convergence time of GPS static PPP in two weeks of six stations

	GPS	AREG	JFNG	REUN	WROC	NNOR	YEL2	平均值
PPPH	N/mm	6.5	6.3	4.5	4.9	5.2	3.6	5.2
	E/mm	7.2	8.8	4.7	8.8	9.9	5.9	7.6
	U/mm	14.1	15.3	11.7	12.8	17.8	13.1	14.1
	收敛时间/min	27.9	36.1	26.1	28.1	41.3	23.4	30.5
MG-APP	N/mm	6.1	5.5	3.4	4.1	2.9	2.8	4.1
	E/mm	6.0	7.1	2.7	6.8	8.6	4.5	6.0
	U/mm	13.3	17.3	9.6	10.1	16.7	12.2	13.2
	收敛时间/min	25.4	38.4	25.8	24.9	34.7	22.1	28.6
GAMP	N/mm	6.7	5.4	2.4	3.3	3.3	3.4	4.1
	E/mm	7.5	6.2	2.5	7.5	8.5	4.1	6.1
	U/mm	12.1	14.7	9.7	11.9	18.1	11.4	13.0
	收敛时间/min	29.1	35.1	23.7	27.5	35.2	24.5	29.2

2.3 动态 PPP 定位精度分析

采用 § 2.1 中数据处理策略和实验数据进行分析,使用 3 种软件对各个测站进行 GPS 和 GRCE 两种模式的动态精密单点定位。图 3 为 3 种软件解算的 2 种模式 2 周定位误差 RMS 平均值,可以看出,3 个软件解算的 GPS 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm、高程上优于 5 cm;

GRCE 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm、高程上优于 3 cm,GRCE 动态精密单点定位精度优于 GPS 单系统。

2.4 对流层精度分析

对流层延迟是精密单点定位的重要误差源,同时对研究水汽变化从而预报降水也具有重要意义。PPP 技术是获取 ZTD 产品的一种方式,因

表 4 6 个测站 GRCE 静态 PPP 两周定位误差 RMS 值与收敛时间
Tab. 4 Positioning error RMS and convergence time of GRCE static PPP in two weeks of six stations

	GRCE	AREG	JFNG	REUN	WROC	NNOR	YEL2	平均值
PPPH	N/mm	4.1	5.5	3.3	4.4	5.0	2.9	4.2
	E/mm	6.7	7.3	3.6	7.1	8.5	3.5	6.1
	U/mm	13.9	12.6	10.1	11.5	15.2	12.3	12.6
	收敛时间/min	17.1	24.8	11.5	19.4	25.9	13.5	18.7
MG-APP	N/mm	5.3	4.4	2.9	3.5	2.8	2.1	3.5
	E/mm	5.8	5.7	2.7	6.1	7.6	3.8	5.3
	U/mm	11.3	12.9	8.1	10.2	15.8	10.7	11.5
	收敛时间/min	13.5	24.3	12.1	16.8	23.7	12.1	17.1
GAMP	N/mm	4.5	3.6	1.8	2.7	2.6	3.4	3.1
	E/mm	6.9	6.2	2.8	6.4	8.7	3.8	5.8
	U/mm	11.1	11.7	8.7	11.3	15.6	9.4	11.3
	收敛时间/min	15.8	20.7	12.9	18.4	24.3	13.2	17.6

此对 PPP 解算的 ZTD 产品的精度与可靠性进行分析非常重要。为验证 3 个软件解算 ZTD 的精度,使用 IGS 发布的 ZTD 产品作为参考值来评

估不同软件解算的 GPS 单系统和 GRCE 多系统 ZTD 精度。图 4 和图 5 为 2019-01-05~ 2019-01-11(年积日 5~11)AREG 站和 YEL2 站软件解算

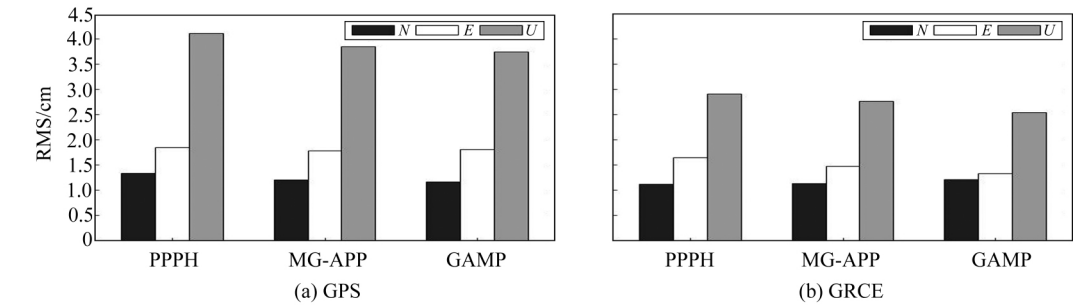


图 3 2 种模式 2 周定位误差 RMS 平均值
Fig. 3 RMS mean value of positioning error in two weeks under two modes

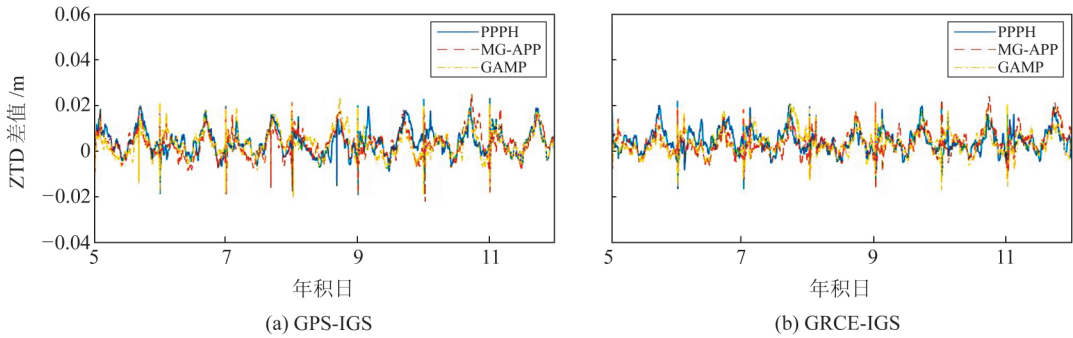


图 4 3 个软件解算的 AREG 站 ZTD 差值时间序列
Fig. 4 Time series of ZTD difference values of AREG station calculated by three software

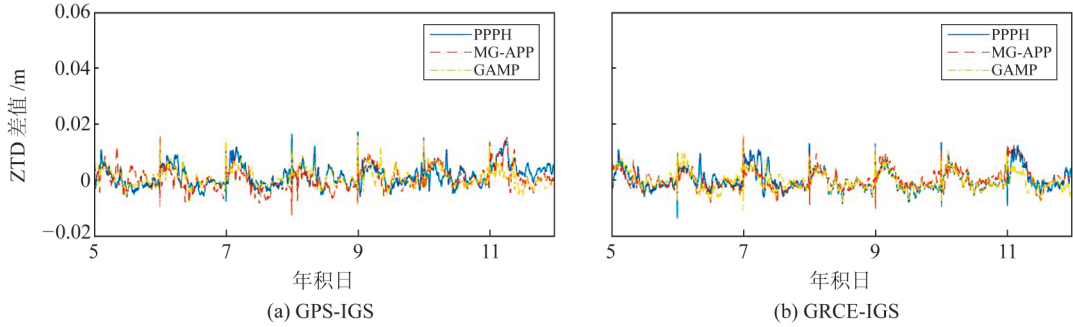


图 5 3 个软件解算的 YEL2 站 ZTD 差值时间序列
Fig. 5 Time series of ZTD difference values of YEL2 station calculated by three software

的 ZTD 与 IGS 发布的 ZTD 差值的时间序列,可以看出,3 个软件解算的 GPS 单系统和 GRCE 多系统 ZTD 差值绝大部分小于 2 cm,与 IGS 发布的 ZTD 具有很高的一致性,均能满足 ZTD 精度要求,GAMP 相比于 PPPH 和 MG-APP 解算的 ZTD 稳定性略高。

3 结 语

通过比较分析 PPPH、MG-APP、GAMP 三种多系统开源 PPP 软件的性能,从软件特性、定位精度、收敛时间、对流层延迟等多个方面进行对比,得到以下结论:

1)3 种软件均能在多种操作系统下运行,且能支持多种卫星系统,可极大地方便用户使用, MG-APP 和 GAMP 相比于 PPPH 在数据处理策略和改正模型上更丰富。

2)3 个软件解算的 GRCE 多系统的定位精度和收敛时间相比于 GPS 单系统均有所改善, MG-APP 和 GAMP 解算的定位精度相当而 PPPH 略差。3 个软件解算的 GPS 和 GRCE 静态精密单点定位在平面上优于 1 cm,高程上优于 2 cm; GPS 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm,高程上优于 5 cm;3 个软件解算的 GRCE 动态精密单点定位在平面上优于 2 cm,高程上优于 3 cm。MG-APP 相比于 PPPH 和 GAMP 收敛时间更短, PPPH、MG-APP、GAMP 解算的 GRCE 多系统收敛时间比 GPS 单系统分别改善约 38.7%、40.2%、39.7%,极大地缩短了定位的收敛时间。

3)3 个软件解算的 ZTD 与 IGS 发布的 ZTD 具有很高一致性,均能满足 ZTD 精度要求, GAMP 相比于 PPPH 和 MG-APP 解算的 ZTD 稳定性略高。

参考文献

- [1] 李昕. Multi-GNSS 精密单点定位固定解方法与性能评估[D]. 武汉:武汉大学, 2018(Li Xin. Research on Methodology of Multi-GNSS Precise Point Positioning Ambiguity Resolution and Performance Assessment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018)
- [2] 魏二虎, 刘学习, 刘经南. 北斗+GPS 组合单点定位精度评价与分析[J]. 测绘通报, 2017(5):1-5(Wei Erhu, Liu Xuexi, Liu Jingnan. Accuracy Evaluation and Analysis of Single Point Positioning with Beidou and GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(5):1-5)
- [3] 刘学习. BDS/GPS 组合精密单点定位及其模糊度固定技术与方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018(Liu Xuexi. Modeling and Assessment of BDS/GPS Precise Point Positioning and Research on Ambiguity Resolution[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018)

- [4] Tu R, Ge M R, Zhang H P, et al. The Realization and Convergence Analysis of Combined PPP Based on Raw Observation[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(1): 211-221
- [5] Yuan X X, Fu J H, Sun H X, et al. The Application of GPS Precise Point Positioning Technology in Aerial Triangulation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 541-550
- [6] 张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3):250-256 (Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan, et al. Convergence Time and Positioning Accuracy Comparison between BDS and GPS Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3):250-256)
- [7] 臧楠, 李博峰, 沈云中. 3 种 GPS+BDS 组合 PPP 模型比较与分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(12):1 929-1 938(Zang Nan, Li Bofeng, Shen Yunzhong. Comparison and Analysis of Three GPS+BDS PPP Models[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(12):1 929-1 938)
- [8] 符华年, 张旭东, 胡玉坤. GPS 静态精密单点定位算法精度分析[J]. 测绘通报, 2019(2):95-98(Fu Huanian, Zhang Xudong, Hu Yukun. Accuracy Analysis of GPS Static Precise Point Positioning Algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2):95-98)
- [9] 周昌杰. 基于 RTKLIB 的 GNSS 精密单点定位研究[D]. 长春:吉林大学, 2019(Zhou Changjie. Research on GNSS Precise Point Positioning Based on RTKLIB[D]. Changchun: Jilin University, 2019)
- [10] 宋佳, 李敏, 赵齐乐, 等. 3 种开源精密单点定位软件性能评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(6):627-632 (Song Jia, Li Min, Zhao Qile, et al. Performance Evaluation of Three Open Source Precise Point Positioning Software[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(6):627-632)
- [11] 王挥云. 4 种在线 PPP 服务系统定位精度分析[J]. 测绘通报, 2016(7):66-69(Wang Huiyun. Positioning Accuracy Analysis Obtained from Four Online PPP Services[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(7):66-69)
- [12] 郭斐, 张小红. 在线 PPP 服务系统对钟跳的处理能力分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(11):1 333-1 336(Guo Fei, Zhang Xiaohong. Processing Capacity for GPS Data with Clock Slip Using Online PPP Services[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11):1 333-1 336)
- [13] Bahadur B, Nohutcu M. PPPH: A MATLAB-Based Software for Multi-GNSS Precise Point Positioning Analysis[J]. GPS Solutions, 2018, 22(4):1-10
- [14] Xiao G W, Liu G Y, Ou J K, et al. MG-APP: An Open-Source Software for Multi-GNSS Precise Point Positioning and Application Analysis[J]. GPS Solutions, 2020, 24(3):1-13
- [15] Zhou F, Dong D N, Li W W, et al. GAMP: An Open-Source Software of Multi-GNSS Precise Point Positioning Using Undifferenced and Uncombined Observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2):1-10

(下转第 529 页)

We use the observation data of 183 reference stations in the west coast CORS network of the United States to model the regional ionosphere, obtain high-precision ionospheric delay information, and compare and analyze through experiments, the PPP positioning performance of the three algorithms: ionosphere-free, uncombined and unconstrained and ionosphere-constraint model. The experimental results show that the additional ionospheric constraint algorithm has better model geometric strength. Compared with the first two models, the PPP 10 minutes before the positioning process, this algorithm can significantly improve the convergence speed and positioning accuracy of PPP positioning.

Key words: PPP; regional ionospheric model; external ionosphere constraint; convergence time; geometry strength

Foundation support: National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0502101, 2016YFB0502105; Basic Research Fund of Chinese Academy of Surveying and Mapping, No. AR2006.

About the first author: WEI Shengtao, postgraduate, majors in satellite positioning and navigation, E-mail: 1095542586@qq.com.

Corresponding author: LI Dehai, PhD, associate researcher, majors in satellite positioning and navigation, E-mail: lidh@casm.ac.cn.

+++++
(上接第 524 页)

Performance Comparison and Analysis of Three Kinds of Multi-System Open Source PPP Software

WANG Hepeng¹ GUO Hang¹ HUANG Cong¹

¹ School of Information Engineering, Nanchang University, 999 Xuefu Road, Nanchang 330031, China

Abstract: We compare the characteristics of PPPH, MG-APP and GAMP software, select the observation data of six MGEX stations, use the three PPP software to solve the GPS single system and GRCE multi-system precise point positioning, and compare the positioning accuracy, convergence time and tropospheric delay of the three software solutions. The results show that the positioning accuracy and convergence time of GRCE multi-system solved by three software are improved as compared with GPS single system, the positioning accuracy of MG-APP and GAMP is almost the same, while PPPH is slightly worse, and the convergence time of MG-APP is shorter than that of PPPH and GAMP. The GPS and GRCE static precise point positioning calculated by the three software is better than 1 cm horizontally and better than 2 cm vertically. The GPS dynamic precise point positioning calculated by the three software is better than 2 cm horizontally and better than 5 cm vertically. The GRCE dynamic precise point positioning calculated by the three software is better than 2 cm horizontally and is better than 3 cm vertically. The ZTD calculated by the three software are consistent with the ZTD released by IGS, which can meet the accuracy requirements of the ZTD. The stability of ZTD calculated by GAMP is slightly higher than that of PPPH and MG-APP.

Key words: precise point positioning; open source software; positioning accuracy; convergence time; troposphere

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 41764002.

About the first author: WANG Hepeng, postgraduate, majors in Beidou/GNSS precise positioning, E-mail: 719275880@qq.com.