

不同系统组合的精密单点定位性能分析*

黄令勇^{1,2,3}, 刘宇玺³, 辛国栋¹, 朱雷鸣¹, 李 五¹, 张 欢¹

(1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;

3. 中国天绘卫星中心, 北京 102102)

摘要:在分析研究星间单差精密单点定位算法和抗差 Kalman 滤波解算模型基础上, 利用全球定位系统、全球导航卫星系统、北斗卫星导航系统数据, 对单、双、三系统精密单点定位精度和收敛时间进行了分析, 得出了以下结论: 三系统精密单点定位技术无论定位精度还是收敛速度均最优, 多系统组合导航定位有利于提高导航定位精度。

关键词:精密单点定位; 三系统; 组合定位; 北斗卫星导航系统; 全球定位系统; 全球导航卫星系统

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)03-030-06

Performance analysis of different system precise point positioning

HUANG Lingyong^{1,2,3}, LIU Yuxi³, XIN Guodong¹, ZHU Leiming¹, LI Wu¹, ZHANG Huan¹

(1. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;

2. School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

3. China Aerospace Surveying and Mapping Satellite Center, Beijing 102102, China)

Abstract: The PPP (precise point positioning) algorithm based on the single differencing between satellites and the robust Kalman filter model was studied and analyzed. And then, the global position system, global navigation satellite system and BeiDou navigation satellite system data had been used to analyze to the positioning precision and convergence time of single, double and three-system PPP. Finally, the conclusion were drawn as follows: the positioning precision or the convergence speed of the three-system PPP technology is optimized, and multiple-system integrated navigation and positioning can improve the precision of navigation and positioning.

Key words: precise point positioning; triple-system; integrated positioning; BDS; GPS; GLONASS

随着我国北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite System, BDS) 的建成运行, 精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术研究再次成为热点^[1]。由文献[2]可知, 单系统 PPP 依然存在以下问题: ①卫星信号遮挡情况下可视卫星数少, 容易造成卫星空间几何结构差, 进而影响定位精度; ②单系统载波模糊度与位置参数、接收机钟差、对流层延迟等误差分离困难, 导致收敛时间长。而当全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 卫星较少时, 增加全球导航卫星系统 (GLObal NAVigation Satellite System, GLONASS) 卫星可有效提高 GPS PPP 收敛速度和定位精度^[3]。随着我国 BDS 运行以及 GLONASS 卫星补网完善, 有必要进一步对 GPS、GLONASS、BDS 组合双系统甚至三系统 PPP 性能进行分析,

以充分发挥系统组合定位优势。

1 PPP 解算模型

首先给出多系统观测模型:

$$\begin{cases} P_i^G = \rho + cd t_r^G - cd t^s, G + T^G + I_i^G + \varepsilon_{p_i}^G \\ L_i^G = \rho + cd t_r^G - cd t^s, G + T^G - I_i^G + \lambda_i^G N_i^G + \varepsilon_{\phi_i}^G \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为站星距离, c 表示光速, dt_r 和 dt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差, T 为对流层延迟, I 为电离层延迟, N 为整周模糊度, λ 为载波波长, ε_p 表示伪距观测噪声, ε_ϕ 表示载波观测噪声, 上标 G 和 s 分别代表卫星系统和卫星, 下标 i 和 r 分别表示信号频率和接收机。

为消除电离层延迟, 多采用无电离层组合:

* 收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41674019); 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0501701); 地理信息工程国家重点实验室开放基金资助项目 (SLKGIE2015-M-2-1)

作者简介: 黄令勇 (1987—), 男, 山东嘉祥人, 工程师, 博士, E-mail: hlylj87@126.com

$$\begin{cases} P_{\text{IF}}^G = \frac{f_1^2 P_1^G - f_2^2 P_2^G}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r^G - cdt^{s,G} + T^G + \varepsilon_{P_{\text{IF}}}^G \\ L_{\text{IF}}^G = \frac{f_1^2 L_1^G - f_2^2 L_2^G}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r^G - cdt^{s,G} + T^G + \lambda_{\text{IF}}^G N_{\text{IF}}^G + \varepsilon_{\phi_{\text{IF}}}^G \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{IF} 与 L_{IF}^G 分别为伪距、载波消除电离层组合。

除需消除电离层误差, PPP 解算之前还需进行数据预处理和相应误差改正, 以及多系统的时空基准统一^[4]。非差数据预处理是影响 PPP 精度的一个重要因素, 其主要内容是进行周跳探测与修复。由于钟跳将导致所有观测卫星上所有频率的伪距、相位观测值产生类似周跳的数据阶跃, 但它与周跳有本质区别。为避免周跳探测误判, 周跳探测之前需进行实时钟跳探测与修复。

$$\begin{cases} \Delta P(j) = P(j) - P(j-1) \\ \Delta L(j) = L(j) - L(j-1) \end{cases}, \text{构造检验量 } S: \begin{cases} S^k(j) = \Delta P^k(j) - \Delta L^k(j) \\ |S^k(j)| > k_1 \approx 0.001c \end{cases} \quad (3)$$

式中, j 表示历元, k 为卫星, k_1 为阈值。

对于某一历元, 当且仅当所有可用卫星满足式(3)时, 才认为该历元时刻可能存在钟跳或所有卫星同时发生大周跳。利用式(4)计算钟跳候选值 m , 并确定实际钟跳值 J_s 。

$$\begin{cases} m = \alpha \cdot \left(\sum_{j=1}^n S^k \right) / (nc) \\ J_s = \begin{cases} \text{INT}(m) & |m - \text{INT}(m)| \leq k_2 \\ 0 & |m - \text{INT}(m)| > k_2 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 为系数因子, $\alpha = 10^3$; INT 为取整函数; k_2 为阈值, $k_2 = 10^{-7} \sim 10^{-5}$ 。

完成上述钟差修复以后, 即可通过常用的宽窄巷 (Melbourne-Wubben, MW) 组合和无几何 (Geometry-Free, GF) 组合进行周跳探测与修复, 具体算法可参见文献[5-6]。

接下来对式(2)线性化并矩阵化。

$$\mathbf{L} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{\Delta} \quad (5)$$

式中, \mathbf{X} 为待估参数 (主要包括接收机位置、浮点模糊度、接收机钟差、对流层延迟误差), \mathbf{B} 为矩阵系数, \mathbf{L} 和 $\mathbf{\Delta}$ 分别为观测值和随机噪声。

随机模型为:

$$\begin{cases} E(\mathbf{\Delta}) = \mathbf{0} \\ \text{VAR}(\mathbf{\Delta}) = \sigma_0^2 \mathbf{Q} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_0^2 为单位权方差, \mathbf{Q} 为协因数阵。

对于非差 PPP, 为准确分离接收机钟差与模糊度参数, 必须对伪距观测值合理定权, 而实际定

位中多系统组合定位多依据经验给出各系统间伪距观测值的权, 不够严密。此外, 多系统组合 PPP, 还需估计各导航系统时间差参数。根据文献[2]可知, 星间差分可有效消除接收机钟差, 并由此降低对伪距随机模型准确性的要求。下面给出基于星间差分的 GPS/GLONASS/BDS 三系统进行 PPP 观测方程表达式。

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{m \times 1} = \mathbf{A}_{m \times (m+6)} \mathbf{X}_{(m+6) \times 1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{m \times 1} \\ \text{Cov}_{\varepsilon_L} \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}_{LL}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{L} 为 m 维观测值; \mathbf{A} 为观测组合系数; \mathbf{X} 为待估参数, $\mathbf{X} = [x, y, z, dT, dt_{r,GR}, dt_{r,GC}, N_{\text{IF}}^s]^T$, 其中 x, y, z 为坐标参数, dT 为天顶对流层湿分量, $dt_{r,GR}$ 为 GPS 和 GLONASS 时间差, $dt_{r,GC}$ 为 GPS 和 BDS 时间差, N_{IF}^s 为以 s 卫星为参考星的单差无电离层组合模糊度集合; $\text{Cov}_{\varepsilon_L}$ 为对应随机模型。

精密单点定位中, 由于参数较多, 为提高运算效率、克服高阶矩阵求逆困难, 常采用 Kalman 滤波算法进行解算。Kalman 滤波由状态方程和观测方程组成, 状态方程描述相邻时刻状态转移变化, 观测方程描述对状态进行观测的信息。具体 Kalman 方程可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{L}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{e}_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{X}_k 是系统在 $t(k)$ 时刻的状态向量; $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为从 $t(k-1)$ 时刻到 $t(k)$ 时刻系统状态的转移矩阵; \mathbf{W}_k 为系统噪声向量; \mathbf{L}_k 为系统在 $t(k)$ 时刻的观测向量; \mathbf{A}_k 为观测方程的系数阵; \mathbf{e}_k 为观测噪声。

Kalman 滤波假定系统观测值、系统噪声为独立零均值高斯白噪声, 且系统噪声与观测噪声互不相关, 此时有:

$$\begin{cases} E(\mathbf{e}_k) = 0 & \text{VAR}(\mathbf{e}_k) = \sigma^2 & \mathbf{Q}_k = \sigma^2 \mathbf{P}_k^{-1} \\ E(\mathbf{W}_k) = 0 & \text{VAR}(\mathbf{W}_k) = \sigma^2 & \mathbf{Q}_{W_k} = \sigma^2 \mathbf{P}_{W_k}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{W}_k 与 \mathbf{W}_{k-1} , \mathbf{e}_k 与 \mathbf{e}_{k-1} , \mathbf{W}_k 与 \mathbf{e}_k 均为不相关的高斯白噪声。

为减弱粗差对 Kalman 滤波解算的影响, 可以引入抗差 Kalman 算法^[7]。

$$\hat{\mathbf{X}}_k = (\mathbf{A}_k^T \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{A}_k + \alpha_k \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}_k})^{-1} (\mathbf{A}_k^T \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{L}_k + \alpha_k \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}_k} \bar{\mathbf{X}}_k) \quad (10)$$

式中, $\bar{\mathbf{P}}$ 为抗差等价权矩阵, α_k 为自适应因子。

若观测值存在异常, 减小式(10)中等价权矩阵元素, 以控制观测异常对状态估值的影响; 若状态矩阵模型存在异常, 可以减小自适应因子来控制预测信息异常。

2 数据分析

2.1 实验设计

为分析多系统组合 PPP 性能,实验选用 2013 年第 342 ~ 348 年积日 7 天 4 个国际导航卫星系统服务组织(International GNSS Service, IGS)测站利用天宝 TRM 59800.00 系列接收机接收的 GPS/GLONASS/BDS 三系统数据分别对 GPS、BDS、GLONASS 单系统, GPS/GLONASS、GPS/BDS 双系统, GPS/GLONASS/BDS 三系统 PPP 精度、收敛时间进行比较分析。具体站点信息具体见表 1。

表 1 各站点信息
Tab. 1 Station information

编号	站名	位置
1	CUTO	南纬 32°, 东经 115.9°
2	GMSD	北纬 30.6°, 东经 131.0°
3	JFNG	北纬 30.5°, 东经 114.5°
4	REUN	南纬 21.2°, 东经 55.6°

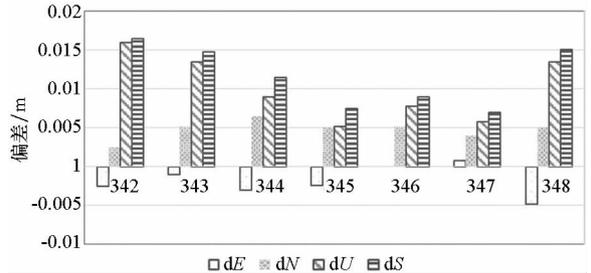
数据处理策略如下:采用伪距/载波无电离层组合观测方程,对相位缠绕、固体潮、相对论进行模型改正;利用欧空局(European Space Agency, ESA)发布的 GPS、GLONASS 精密产品和武汉大学发布的 BDS 精密产品进行卫星钟差和轨道改正;卫星天线采用 IGS_08.atx 绝对天线相位中心模型,接收机进行天线相位中心改正;采用 Saastamoinen 模型改正对流层干分量;采用星间差分消除接收机钟差;将对流层湿分量、坐标、模糊度浮点解作为参数进行估计,采用 Kalman 滤波进行数据处理。

以精密钟差文件中 4 个 IGS 站的日坐标为参考真值,利用 PPP 解算坐标与参考真值在测站坐标系东北天(East North Up, ENU)方向的偏差 dE 、 dN 、 dU 和 PPP 解算坐标与参考真值在测站坐标系中的距离偏差 dS 来分析 PPP 解算精度。定义距离偏差 dS 首次小于 0.1 m 的历元并且该历元以后的 20 历元距离偏差 dS 均未超过 0.1 m 时认为滤波在该历元收敛,从开始定位到完成收敛的时间段称之为收敛时间。由于不同观测时刻、观测条件下 PPP 解算精度和收敛速度不同,为此声明本实验每天 PPP 解算均从接收机独立交换格式(Receiver Independent Exchange Format, RIEF)观测文件记录的 0 时 0 分 0 秒开始。下面以定位精度、收敛时间为评价指标对多系统 PPP 进行相同观测、相同处理策略下的定位性能比较。

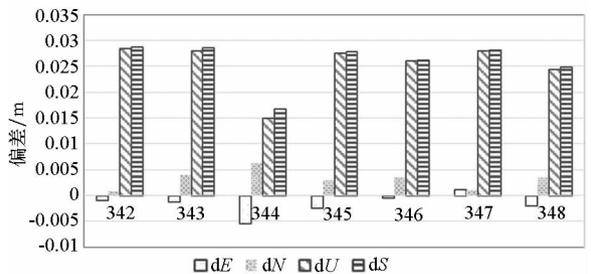
2.2 定位精度分析

2.2.1 单系统静态精度分析

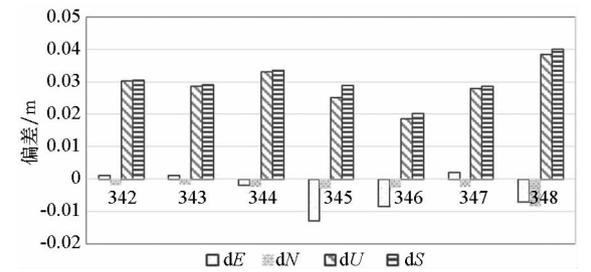
图 1 所示的为 JFNG 站点 7 天单 GPS 静态 PPP 解算结果在 E 、 N 、 U 方向以 PPP 解算位置与参考真值的偏差。由图 1(a)可知,水平方向 dE 和 dN 基本小于 0.5 cm, dU 方向精度较差,但大部分偏差在 1.5 cm 以内,7 天解算结果中最大位置偏差约为 1.6 cm,最小位置偏差约为 0.7 cm,由此可见 GPS 单系统 PPP 静态定位精度较高,能够实现 cm 级。由图 1(b)可知,虽然 GLONASS 单系统 PPP 水平方向偏差在 0.5 cm 以内,但 dU 方向偏差较大,7 天解算结果有 5 天 dU 偏差大于 2.5 cm,由此可见 GLONASS 单定位精度较 GPS 稍差。由图 1(c)可知, BDS PPP 水平方向精度基本小于 1 cm,但 dU 方向偏差明显大于 GPS PPP 和 GLONASS PPP,7 天 dU 平均偏差约为 3 cm,最



(a) GPS 精密单点定位精度分析
(a) Precision analysis of GPS PPP



(b) GLONASS 精密单点定位精度分析
(b) Precision analysis of GLONASS PPP

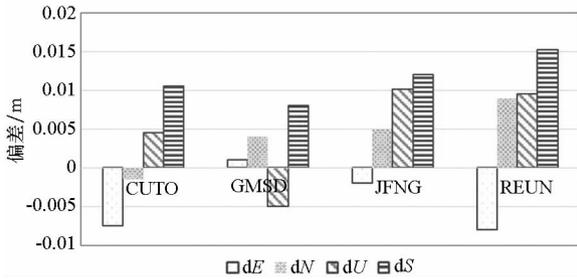


(c) BDS 精密单点定位精度分析
(c) Precision analysis of BDS PPP

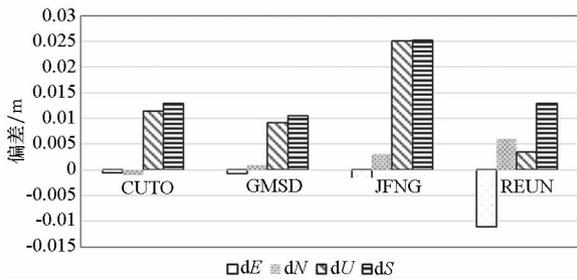
图 1 JFNG 单系统 7 天精密单点定位精度分析
Fig. 1 Analysis of JFNG single system 7 days PPP precision

大偏差接近 4 cm,而 BDS dU 方向偏差过大主要是由于 BDS 尚未发布精确的 BDS 卫星端天线相位中心偏差(Phase Center Offsets, PCO)和天线相位中心漂移(Phase Center Variation, PCV)改正信息等原因。以上三个单系统静态 PPP,水平方向 dE、dU 偏差均优于 dU 方向,主要是与卫星星座在高程方向变化不大有关。由图 1 分析可知, JFNG 站点 7 天静态 GPS PPP 平均定位精度最高,位置偏差约为 1.2 cm;GLONASS 精度次之,约为 2.5 cm;BDS 系统最差约为 3 cm。

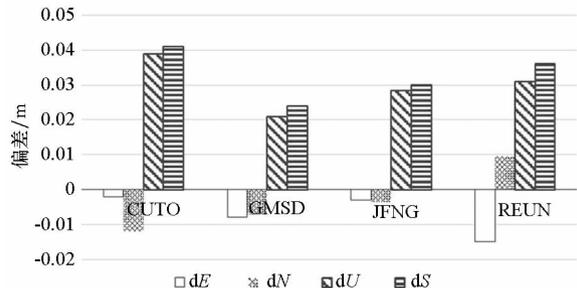
图 2 所示为 4 个站点 7 天 GPS、GLONASS、BDS 单系统静态 PPP 偏差平均值。由图 2 可发现:GPS 精度最高,其距离偏差最大在 1.5 cm 左右,4 站平均位置偏差约为 1.1 cm(如表 2 所示)。GLONASS 精度次之,若除去 JFNG 站点其他 3 站的 7 天平均位置偏差与 GPS 定位结果精度相当,约为 1 cm,但由于 JFNG 站点位置偏差高达 2.5 cm,



(a) GPS 精密单点定位精度分析
(a) Precision analysis of GPS PPP



(b) GLONASS 精密单点定位精度分析
(b) Precision analysis of GLONASS PPP



(c) BDS 精密单点定位精度分析
(c) Precision analysis of BDS PPP

导致 GLONASS PPP 4 站平均位置偏差约为 1.5 cm。以上 4 站 GLONASS 定位结果存在较大差异说明:GPS PPP 解算可靠性高于 GLONASS。BDS PPP 最小位置偏差 dS 均大于 2 cm,4 站 BDS PPP 平均精度约为 3.3 cm。基于分析,有必要加强 BDS 与其他系统的组合定位以提高其精度。

表 2 PPP 精度和收敛时间分析

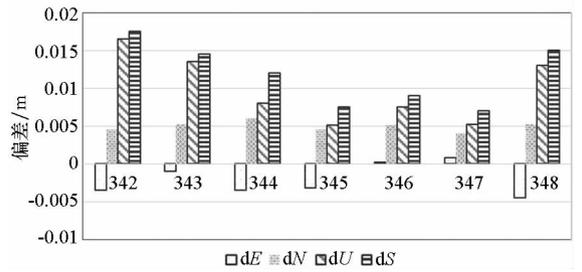
Tab.2 PPP precision and convergence time analysis

	系统		
	GPS	GLONASS	BDS
偏差/cm	1.17	1.55	3.29
收敛时间/min	21	26	110

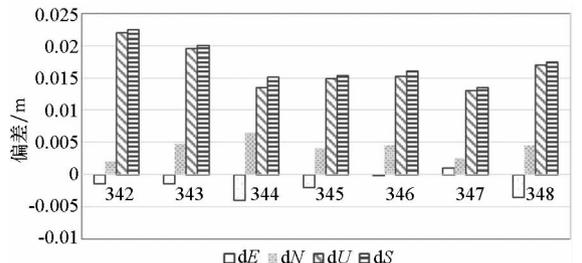
	系统		
	GPS/ GLONASS	GPS/BDS	GPS/GLONASS/ BDA
偏差/cm	1.13	1.32	1.12
收敛时间/min	16	24	15.6

2.2.2 双系统静态精度分析

由图 3 所示的 JFNG 站点 7 天 GPS/GLONASS 和 GPS/BDS 双系统 PPP 精度可知, JFNG 站点 GPS/BDS 组合定位位置偏差基本大于 1.5 cm,而 GPS/GLONASS 组合定位位置偏差除 342 年积日大于 1.5 cm 以外,其他全小于 1.5 cm,甚至有 3 天的定位偏差均小于 1 cm。进一步比较双系统



(a) GPS/GLONASS 双系统定位精度分析
(a) GPS/GLONASS dual-system precision analysis



(b) GPS/BDS 双系统定位精度分析
(b) GPS/BDS dual-system precision analysis

图 2 单系统 7 天平均精密单点定位精度

Fig.2 Single system 7 days PPP average precision

图 3 JFNG 站双系统定位精度分析

Fig.3 Dual-system precision analysis of station JFNG

与三个单系统定位精度, GPS/BDS 显著提高了 BDS PPP 精度, 但 GPS/BDS 组合对 GPS PPP 精度没有改善作用; 而 GPS/GLONASS 双系统组合精度均优于 GPS 和 GLONASS 单系统定位精度。由此发现, GLONASS 与 GPS 组合效果要优于 BDS 与 GPS 组合效果, 这主要是由于目前 BDS 精密产品精度相对 GLONASS 精密产品精度差, 且 BDS 卫星天线相位偏差还未标定改正。

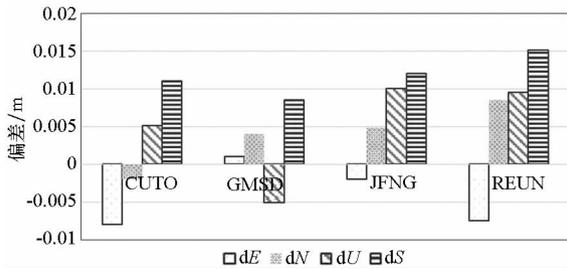
由图 4 所示的 GPS/GLONASS 和 GPS/BDS 双系统 4 站点 7 天平均定位精度分析图可知, REUN 站点基于 GPS/GLONASS 双系统组合解算的 7 天静态 PPP 位置平均偏差值最大, 约为 1.5 cm, 而其他 3 站点平均偏差约为 1 cm。详细比较图 4 中 GPS/GLONASS 各站点定位偏差与图 2 中 GPS、GLONASS 单系统 PPP 4 站点定位偏差可以看出, 双系统组合定位偏差较 GLONASS 单系统定位偏差小, 但定位偏差明显与 GPS 单系统定位偏差趋势相同。以双系统组合 PPP GMSD 站 dU 方向偏差为例, GPS 单系统 dU 偏差为 -0.491 cm, GLONASS 单系统 dU 偏差为 0.8 cm, 而 GPS/GLONASS 组合后 dU 方向偏差为 -0.513 cm, 组合结果与 GPS 单系统结果相差不大, 而与 GLONASS 单系统结果相差甚远, 由此说明双系统组合中 GPS 观测的贡献较 GLONASS 大。这主要是由于双系统组合 PPP 中, 赋予 GPS 观测值的权比较大, 为此结果与 GPS 单系统定位

结果比较接近。GPS/BDS 组合显著改善了 BDS 单系统定位精度, 并且 GPS/BDS 双系统组合后 4 站点不同方向偏差与 GPS 单系统定位偏差具有相同的偏差趋势。同样造成这种现象的主要原因是 BDS 卫星观测质量较 GPS 卫星差, 在组合定位中设置的 GPS 观测值的权大于 BDS 观测值的权, 从而使得双系统组合定位结果与 GPS 单系统解算结果相差不大。

进一步分析表 2 可知, GPS/GLONASS 双系统组合后 4 站静态 PPP 平均位置偏差为 1.13 cm, 较 GPS 单系统平均偏差 1.17 cm 有所改进; 而 GPS/BDS 组合定位平均偏差为 1.32 cm, 其对 GPS 单系统定位精度没有改善作用, 主要是因为静态 PPP 模型强度较大, 低精度 BDS 观测数据对模型强度的影响可以忽略。但双系统组合后, 对 GLONASS 和 BDS 精度改善作用较明显, GPS/GLONASS 将 GLONASS 精度提升了 27%, GPS/BDS 组合将 BDS 精度提升了 60%。

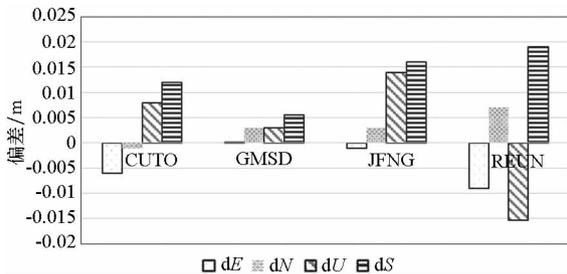
2.2.3 三系统组合精密单点定位精度分析

进一步对三系统精密单点定位精度进行分析, 图 5 所示为 JFNG 站点三系统定位精度分析情况。比较图 5 和图 3 可以发现: JFNG 站点三系统定位精度与 GPS/BDS 组合定位结果相当, 而三系统定位精度反而比 GPS/GLONASS 组合精度差。出现此情况原因是 JFNG 站点位于我国境内, BDS 卫星可观测数目较多, 在三系统组合时 BDS 观测所占权重较大, 进而使得定位精度与 GPS/BDS 系统精度相当, 而低于 GPS/GLONASS 组合定位精度。图 6 所示为三系统定位精度分析情况。比较图 6 与图 4 可以看出: 3 系统组合对其他三站定位精度改进作用较明显, 尤其是 GMSD 站点三系统组合定位后位置偏差由原来 GPS/GLONASS 双系统定位解算的 0.8 cm 减小到 0.5 cm。由此可见, 三系统组合 PPP 可提高 GPS/GLONASS 双系统定位精度, 但三系统定位性能是否有所改进与测站所处的位置以及观测条件有



(a) GPS/GLONASS 双系统定位精度分析

(a) GPS/GLONASS dual-system precision analysis



(b) GPS/BDS 双系统定位精度分析

(b) GPS/BDS dual-system precision analysis

图 4 双系统定位精度分析

Fig. 4 Dual-system precision analysis

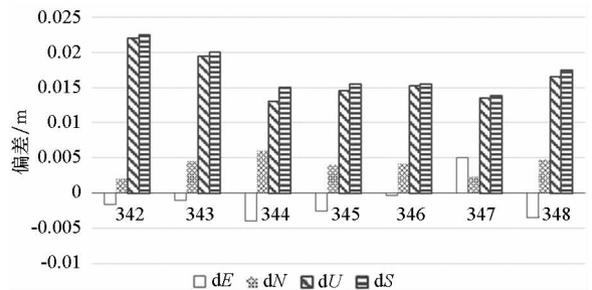


图 5 JFNG 站点三系统定位精度分析

Fig. 5 Triple-system precision analysis of JFNG station

关。根据表2可知,4个站点三系统静态PPP平均偏差最小,由此说明在正常观测情况下,三系统静态PPP精度最优。

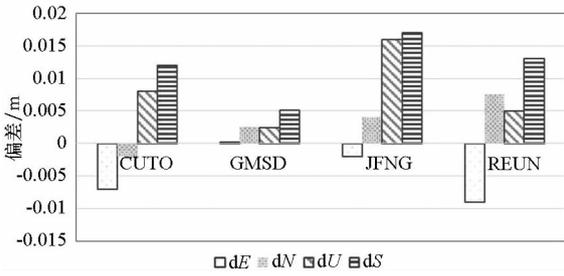


图6 三系统定位精度分析

Fig. 6 Triple-system precision analysis

2.3 收敛性分析

采用前向Kalman滤波进行PPP解算,限于篇幅仅给出4站7天PPP平均收敛时间,具体如图7所示。

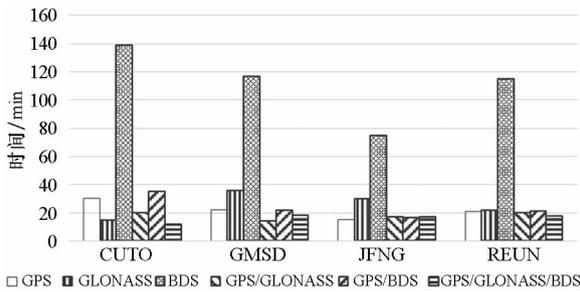


图7 PPP收敛时间分析

Fig. 7 PPP convergence time analysis

图7所示为4个站点7天静态PPP解算收敛时间的平均值(7天计算的PPP收敛时间进行取平均计算)。从图7可以看出,每个站点BDS单系统静态PPP解算收敛时间均最长,即使收敛时间最短的JFNG站点也需要70 min才能完成收敛,而其他3站均超过了100 min。4个站中,GPS、GLONASS单系统静态PPP收敛时间最大不超过40 min,尤其JFNG站点单GPS收敛时间仅为16 min。由此可见,在我国BDS精密星历钟差以及卫星天线改正信息精度不高或者部分有效信息缺失的情况下,有必要加强BDS与GPS系统,甚至与GPS/GLONASS系统的组合,以加快BDS静态PPP收敛速度。而由图7可知,GPS/BDS组合后CUTO站收敛时间最长,但不超过40 min,明显比BDS单系统收敛时间短;而由其他3站可以看出,GPS/BDS大约在20 min即可实现静态PPP收敛;同样GPS/GLONASS/BDS组合后也显著提升了BDS单系统PPP收敛速度。GPS/GLONASS组合除JFNG站点对GPS收敛时间改

善不明显以外,其他3站三系统组合收敛速度均比单GPS和单GLONASS解算收敛速度快。进一步由图7可以看出,GPS/BDS双系统对GPS单系统解算收敛速度的提高效果不明显,甚至组合后收敛速度不如GPS单系统收敛速度快。三系统组合收敛速度除GMSD站相比GPS/GLONASS收敛速度没有提升以外,其他3站收敛速度均有所提升,但幅度不大。

进一步统计4个站点7天静态PPP解算的平均收敛时间,具体结果如表2所示。由表2可知,GPS/GLONASS/BDS三系统平均收敛时间最短,为15.6 min;GPS/GLONASS双系统收敛时间次之,为16 min。单系统中,GPS静态收敛速度最快,为21 min;GLONASS收敛时间为26 min;而BDS最慢,为110 min。GPS/BDS双系统大约对BDS收敛速度提高了近5倍,由此可见BDS与其他系统加强组合定位的必要性。

3 结论

通过对单系统以及GPS/GLONASS、GPS/BDS双系统和GPS/GLONASS/BDS三系统PPP精度和时间收敛的比较发现:三系统组合精密单点定位性能最优;单系统精密单点定位中,GPS、GLONASS PPP无论精度还是收敛时间均优于BDS系统;在组合PPP中,BDS提升组合定位性能作用小于GLONASS。虽然BDS与GPS双系统组合难以提升GPS单系统定位性能,但BDS通过与GPS或与GPS/GLONASS组合,可明显提高自身定位精度、缩短收敛时间。多系统组合定位可有效提高PPP性能。

参考文献(References)

[1] 施闯,赵齐乐,李敏,等.北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J].中国科学:地球科学,2012,42(6):854-861.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LI Min, et al. Precise orbit determination of Beidou satellites with precise positioning[J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(6): 854-861. (in Chinese)

[2] 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. (in Chinese)

参考文献 (References)

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. US: Artech House, 2006.
- [2] O'Brien A J. Adaptive antenna arrays for precision GNSS receivers [D]. US: The Ohio State University, 2009.
- [3] Arribas J, Fernandez-Prades C, Closas P. Antenna array based GNSS signal acquisition for interference mitigation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 223 - 243.
- [4] Li M, Dempster A G, Balaei A T, et al. Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 2011, 47(3): 1564 - 1579.
- [5] Daneshmand S, Broumandan A, Lachapelle G. GNSS interference and multipath suppression using an antenna array[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2011: 1183 - 1192.
- [6] Seco-Granados G, Fernandez-Rubio J A, Fernandez-Prades C. ML estimator and hybrid beamformer for multipath and interference mitigation in GNSS receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(3): 1194 - 1208.
- [7] Applebaum S P. Adaptive arrays [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 585 - 598.
- [8] Zhang Y D, Amin M G. Anti-jamming GPS receiver with reduced phase distortions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10): 635 - 638.
- [9] Widrow B. Adaptive antenna systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(12): 2143 - 2159.
- [10] 桑怀胜, 李峥嵘, 王飞雪, 等. 采用 RLS 算法的功率倒置阵列的性能 [J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 36 - 40.
SANG Huai sheng, LI Zhengrong, WANG Feixue, et al. The performance of power inversion array using RLS algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 36 - 40. (in Chinese)
- [11] Compton R T, Jr. The power-inversion adaptive array: concept and performance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, 15(6): 803 - 813.
- [12] Fu Z, Hornbostel A, Hammesfahr J, et al. Suppression of multipath and jamming signals by digital beamforming for GPS/Galileo applications[J]. GPS Solution, 2003, 6(4): 257 - 264.
- [13] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing [M]. US: Prentice Hall PTR, 1998.
- [14] 王瑛. 卫星导航天线阵抗干扰关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
WANG Ying. Research on the key technologies of anti-jamming antenna arrays in satellite navigation systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [15] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive filtering, prediction, and control [M]. US: Prentice-Hall, 1984.
- (上接第 35 页)
- [3] Cai C S, Gao Y. Performance analysis of precise point positioning based on combination GPS and GLONASS[C]//Proceedings of the ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, Texas, 2007.
- [4] 黄令勇, 吕志平, 任雅奇, 等. 多元总体最小二乘在三维坐标转换中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(7): 793 - 798.
HUANG Lingyong, LYU Zhiping, REN Yaqi, et al. Application of multivariate total least square in three-dimensional coordinate transformation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(7): 793 - 798. (in Chinese)
- [5] 黄令勇, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 三频 GNSS 电离层周跳处理[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 717 - 725.
HUANG Lingyong, ZHAI Guojun, OUYANG Yongzhong, et al. Ionospheric cycle slip processing in triple-frequency GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sina, 2015, 44(7): 717 - 725. (in Chinese)
- [6] 黄令勇, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 削弱电离层延迟影响的三频 TurboEdit 周跳处理方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(8): 840 - 847.
HUANG Lingyong, ZHAI Guojun, OUYANG Yongzhong, et al. Triple-frequency TurboEdit cycles lip processing method of weakening ionospheric activity [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sina, 2015, 44(8): 840 - 847. (in Chinese)
- [7] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
YANG Yuanxi. Adaptive navigation and kinematic positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006. (in Chinese)