

卫星分群的抗差 Kalman 滤波在 GPS/BDS 融合精密单点定位中的应用

王 琰^{1,2}, 张传定², 胡小工³, 宋叶志³, 马绍龙⁴, 唐成盼³, 李 冉³

(1. 解放军信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052; 2. 北京卫星导航中心, 北京 100094;
3. 中科院上海天文台, 上海 200030; 4. 南京陆军指挥学院 军队指挥系, 南京 210045)

摘要: 抗差 Kalman 滤波是控制 GNSS 动态导航定位中观测异常的有效算法, 当应用到 GPS/BDS 实时动态精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 时, 会出现某些历元定位精度甚至不如单一系统定位精度高, 这主要是因为同一接收机接收的不同种类卫星观测量的随机特性不同, 使得观测量验后残差的分布特性不一致, 抗差估计时随机特性不同的观测量验后残差互比, 反而对某一系统优质数据也进行了降权, 导致定位结果出现偏差, 减弱了 GPS/BDS 融合精密单点定位的优势。针对这一问题, 提出了卫星分群的抗差 Kalman 滤波算法, 并应用到 GPS/BDS 融合精密单点定位中, 算法的核心是在每一历元观测数据质量控制时根据卫星类型分类构建方差膨胀因子, 给出了算法的实施步骤, 最后通过 MGEX 实测数据进行了验证, 结果表明算法应用到 GPS/BDS 融合精密单点定位中, 相较传统的抗差 Kalman 滤波算法在东、北、天三个方向分别提高了 34.6%、33.3%、31.0%, 同时表明该算法提高了 GPS/BDS 融合精密单点定位的可靠性。

关键词: 抗差估计; Kalman 滤波; 卫星分类定权; GPS/BDS; 精密单点定位

中图分类号: P227

文献标志码: A

Robust Kalman filtering based on different satellite types and it's application in GPS/BDS precise point positioning

WANG Yan^{1,2}, ZHANG Chuan-ding², HU Xiao-gong³, SONG Ye-zhi³, MA Shao-long⁴, TANG Cheng-pan³, LI Ran³

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094; 3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. Nanjing Army Command College, Nanjing 210045, China)

Abstract: A robust Kalman filtering is used to control the abnormal errors of observations in GNSS dynamic navigation and positioning. However, when it is used in combined GPS/BDS dynamic precise point positioning (PPP), the positioning accuracy may be worse than that of the single system PPP. Since the random characteristics of different types of satellite's observables are different, the post-fit residuals of these observables are different either. When the post-fit residuals are used to calculate the equivalent weight factor in robust estimation, the high quality data may be down weighted, leading to the deviation of the positioning result. So the advantage of combining GPS/BDS with PPP is weakened. To solve this problem, the equivalent weight factor calculation based on different satellite types in robust Kalman filtering is proposed and the execution process of the algorithm is given. Finally, the experiment based on MGEX data is carried out. Compared with the robust Kalman filtering, the proposed algorithm improves the positioning accuracy and reliability of GPS/BDS with PPP. The positioning accuracy in ENU directions are increased by 34.6%, 33.3%, and 31.0%, respectively.

Key words: robust estimation; Kalman filtering; satellite classification weighting; GPS/BDS; precise point positioning

收稿日期: 2016-08-25; **修回日期:** 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金 (41374038, 41204022, 41504018)

作者简介: 王琰 (1990—), 男, 博士研究生, 从事测量数据处理理论与方法研究。E-mail: wang1yan.hi@163.com

精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术利用卫星精密星历和钟差产品获得全球任一接收机在 ITRF 下的绝对坐标, 该技术经过了 15 年的发展, 应用前景广阔^[1]。北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是我国独立自主发展的导航系统, 目前已经为亚太地区提供导航定位服务^[2], GPS/BDS 融合 PPP 吸引了一系列专家学者的广泛关注, 相较单一导航系统的 PPP 解, GPS/BDS 融合 PPP 增加了观测冗余, 改善了定位的 DOP 值, 能够提高 PPP 的精度和可靠性, 缩短初始化时间, 其优势毋庸置疑^[2-7]。文献[2~7]研究了多系统融合 PPP 的函数模型, 并采用实测数据评估了多系统融合 PPP 的定位精度与收敛时间, 阐述了多系统融合 PPP 的优势; 文献[4][5]对 GPS/BDS PPP 的定位精度与收敛时间进行了比较。PPP 技术还有许多关键算法需要改进, 文献[8]对影响 PPP 定位的关键因素进行了分析研究。

众所周知, GNSS 实时数据质量控制是保证动态导航定位精度的关键, 对于 GPS/BDS 融合动态 PPP, 要尽量利用可以利用的观测数据, 但要保证参与 PPP 解算的观测数据的质量, 若质量较差的观测数据参与平差, 非但无法起到增加观测冗余的作用, 反而影响定位精度^[9]。实时 PPP 随着历元向前处理, 过程不可逆, 因此无法像事后 PPP 根据前后历元观测时间序列特性进行质量控制, 故实时 PPP 质量控制更为重要^[10]。

Kalman 滤波在动态数据处理中应用较广, 实时 PPP 一般也采用 Kalman 滤波, 但是标准 Kalman 滤波无法对数据中的粗差进行有效处理。为了控制 Kalman 滤波递推过程中的观测异常, 有两种思路: 一种是文献[11]提出的与 Kalman 滤波并行操作的误差探测、诊断与修复的 DIA(Detection, Identification, Adaptation) 方法, 该算法的理论基础是将粗差归于均值漂移的粗差探测技术; 另一种是将抗差估计与 Kalman 滤波相结合的抗差 Kalman 滤波, 抗差 Kalman 滤波的理论基础是基于将粗差归于方差膨胀的稳健估计技术, 不同于 DIA 算法对“值得怀疑”的异常数据进行硬性拒绝, 抗差 Kalman 滤波通过对观测数据“降权”、“保权”、“拒绝”三种方式尽量利用可以利用的观测数据, 从而保证定位结果的精度和可靠性, 因此在 GNSS 动态数据处理中应用较广, 其中以杨元喜等提出的抗差自适应滤波理论最具代表, 该算法能够更有效地控制异常影响, 提高动态滤波精度, 相关研究很多不再详述^[12-13]。

抗差 Kalman 滤波在 PPP 中广泛应用, 文献[9][10]对实时 PPP 的质量控制进行了详细研究, 文献[13]提出了一种改进的抗差 Kalman 滤波方法并应用到精密单点定位中。对抗差估计的原理进行研究发现, 抗差

估计实际是根据参与平差的观测量验后残差进行互比, 对验后残差离群的观测量进行降权, 这个前提是参与定位的观测量验后残差向量同类、同分布。GPS/BDS 融合 PPP 与基线解的模式不同, 卫星星历误差无法通过差分消除或减弱, IGS 提供的 GPS 卫星精密星历和钟差精度较高, 而 BDS 采用了混合星座, 不同种类的卫星星历精度存在偏差, 同时轨道高度不同, 外加测量噪声本身随机特性的不同, 都造成 GPS/BDS 融合 PPP 观测量验后残差很难做到同类、同分布, 因此本文提出了一种卫星分群的抗差 Kalman 滤波算法, 并应用到 GPS/BDS 融合 PPP 中, 介绍了算法的实施流程, 最后采用 MGEX 实测数据验证了算法的有效性。

1 多系统融合 PPP

1.1 GPS/BDS 融合 PPP 的观测方程

GPS/BDS 融合 PPP 示意图如图 1。PPP 一般采用消电离层组合伪距和载波相位观测值, 消去电离层一阶项误差。卫星轨道和钟差固定 (一般采用 IGS 分析中心提供的精密星历和钟差产品), 卫星钟差产品中包含了卫星端的伪距硬件延迟, 接收机端的伪距硬件延迟被接收机钟差吸收。GPS/BDS 融合 PPP 中 GPS 的观测方程如式(1)^[1, 3-4]:

$$\begin{aligned} P_{PC,r}^{G,j} &= \rho_r^j - cd\tilde{t}_r^G + M_r^{G,j} d_{\text{trop},r} + \varepsilon(P_{PC,r}^{G,j}), \\ \Phi_{LC,r}^{G,j} &= \rho_r^j - cd\tilde{t}_r^G + M_r^{G,j} d_{\text{trop},r} - (cd_{PC}^{G,j} - cd_{PC,r}^G) + \\ & c(b_{LC,r}^G - b_{LC}^{G,j}) + \lambda_1 N_{LC,r}^{G,j} + \varepsilon(\Phi_{LC,r}^{G,j}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 伪距和相位硬件延迟与模糊度参数无法分离, 这也是 PPP 中模糊度无法固定的原因。PPP 中模糊度参数一般采用浮点解:

$$\lambda_1 \hat{N}_{LC,r}^{G,j} = \lambda_1 N_{LC,r}^{G,j} + c(b_{LC,r}^G - b_{LC}^{G,j}) - cd_{PC,r}^G$$

前述表明接收机钟差参数会吸收接收机端的伪距硬件延迟, 而此延迟与信号频率和导航系统相关, 因此两个系统在接收机端会产生伪距硬件延迟之差, 也

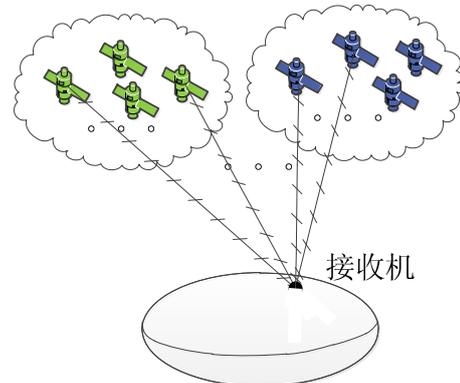


图 1 GPS/BDS 融合 PPP 示意图

Fig.1 Schematic of combining GPS/BDS with PPP

即码偏差 (Differenced Code Bias, DCB), 另外由于不同导航系统时间基准有差异, 因而在 GPS/BDS 融合 PPP 时, 同一个接收机对不同的导航系统观测方程中会采用不同的接收机钟差参数。融合 PPP 的观测方程一般以 GPS 系统的接收机钟差作为基准, 其他系统的观测方程中增加 ISB 参数, 该参数吸收了 DCB 和时间基准的系统偏差^[3-5]。因此 GPS/BDS 融合 PPP 中 BDS 的观测方程为

$$P_{PC,r}^{C,j} = \rho_r^j - cd\tilde{t}_r^G + M_r^{C,j} d_{\text{trop},r} + ISB + \varepsilon(P_{PC,r}^{C,j}),$$

$$\Phi_{LC,r}^{C,j} = \rho_r^j - cd\tilde{t}_r^G + M_r^{C,j} d_{\text{trop},r} + ISB + \lambda_1 \hat{N}_{LC,r}^{C,j} + \varepsilon(\Phi_{LC,r}^{C,j}) \quad (2)$$

式中: C 代表 BDS 系统; $ISB = c(d_{PC,r}^C - d_{PC,r}^G) + M_{\text{sys}}^{GC}$, $d_{PC,r}^C - d_{PC,r}^G$ 为 DCB 参数, M_{sys}^{GC} 为两个系统时间基准的差异; 其他参数的意义与式(1)一致。

1.2 扩展 Kalman 滤波 (EKF)

设 $\hat{x}_k(+)$ 为 t_k 时刻的状态参数, $\hat{x}_k(-)$ 为 t_{k-1} 到 t_k 时刻的状态预报值, 线性化后的观测方程为

$$v_k = H_k \hat{x}_k(+) + l_k \quad (3)$$

式中: $l_k = (z_k - h(\hat{x}_k(-)))$ 为 **O-C 向量**; z_k 为观测值向量; v_k 为残差向量, 满足 $E(v_k) = 0$; $Q_k = E(v_k v_k^T) = \sigma_0^2 P_k^{-1}$, Q_k 为观测量的方差-协方差矩阵, P_k^{-1} 为观测量的权矩阵, σ_0^2 为观测量的单位权中误差, H_k 为设计矩阵。

测量更新:

$$\begin{aligned} K_k &= Q_{\hat{x}_k(-)} H_k^T (H_k Q_{\hat{x}_k(-)} H_k^T + Q_k)^{-1}, \\ \hat{x}_k(+) &= \hat{x}_k(-) + K_k (z_k - h(\hat{x}_k(-))), \\ Q_{\hat{x}_k(+)} &= (I - K_k H_k) Q_{\hat{x}_k(-)} \end{aligned} \quad (4)$$

状态更新:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1}(-) &= \Phi(t_{k+1}, t_k) \hat{x}_k(+) + W_k, \\ Q_{\hat{x}_{k+1}(-)} &= \Phi(t_{k+1}, t_k) Q_{\hat{x}_k(+)} \Phi(t_{k+1}, t_k)^T + Q_{W_k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: K_k 为滤波增益矩阵; $\Phi(t_{k+1}, t_k)$ 为 t_k 到 t_{k+1} 历元的状态转移矩阵; W_k 为模型误差向量, 满足 $E(W_k) = 0$, $Q_{W_k} = E(W_k W_k^T)$, 设状态向量 W_k 、 W_{k-1} 及观测模型误差向量 l_k 、 l_{k-1} 互不相关, 且服从正态分布。

GPS/BDS 融合 PPP 相较单一导航系统 PPP 具有很大的优势, 但是作者在实际处理时发现, 当某一系统的观测数据出现异常, 若处理不当可能导致融合 PPP 的定位精度甚至不如单一导航系统的定位精度高。下面采用实测数据的算例进行说明。

1.3 试验分析

为了避免 EKF 中由于载体运动导致状态参数出现异常的情况, 采用静态仿动态的数据处理模式, 以

MGEX(Multi-GNSS Experiment) 两个静态监测站 GMSD 和 JFNG 站 2014 年年积日 070 天的数据进行说明, GMSD 和 JFNG 站分别位于日本和中国, 两站接收 GPS/BDS 卫星情况如图 2 所示, 采用 GFZ 和 WHU 提供的星历产品进行 PPP 解算^[14-15], 比较以下三种方案的定位结果: **方案 1**: 单 GPS PPP, 采用 IGS 精密星历和 30s 采样率的精密钟差产品; **方案 2**: GPS/BDS 融合 PPP, 采用 GFZ 提供的星历产品; **方案 3**: GPS/BDS 融合 PPP, 采用 WHU 提供的星历产品。

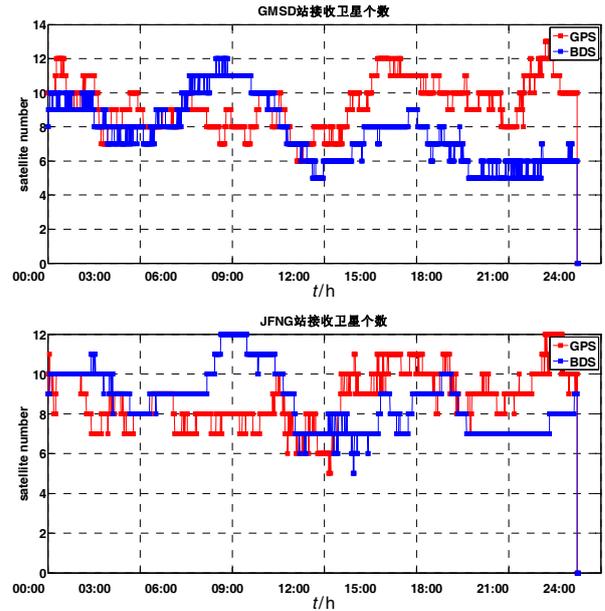


图 2 可观测卫星数

Fig.2 Number of visible satellites

三种方案解算策略一致, 仅仅是采用的星历产品不同, 对模糊度收敛后的定位结果进行统计, 图 3、图 4 分别为 GMSD 与 JFNG 站为三种方案每天 50 min 之后的 PPP 定位结果时间序列。

从图 3 和图 4 的结果可以看出:

1) GMSD 站的定位结果说明 GPS/BDS 融合 PPP 能够提高定位精度, 方案 2、方案 3 定位结果的时间序列比方案 1 更加稳定, 不会出现方案 1 中红色点迹的“毛刺”现象。同时图 4 中 JFNG 站方案 1 的定位序列在 19:00-21:00 天方向的定位结果较差, 而同时期方

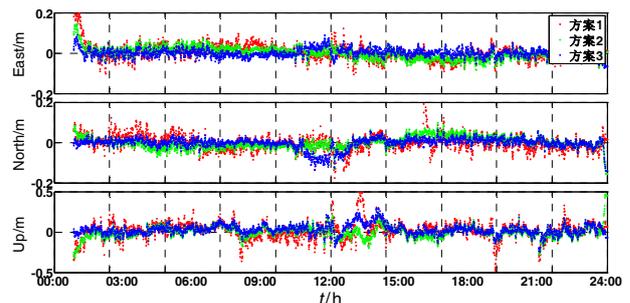


图 3 GMSD 站三种方案定位结果

Fig.3 Positioning results of three schemes (site GMSD)

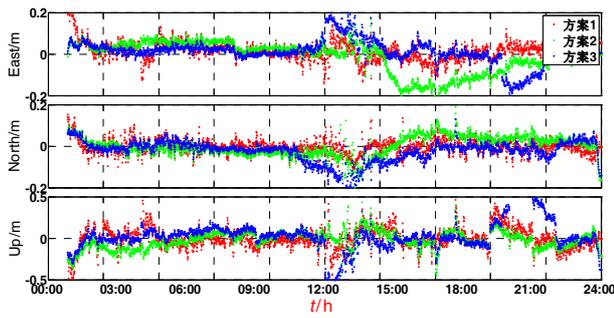


图 4 JFNG 站三种方案定位结果

Fig.4 Positioning results of three schemes (site JFNG)

表 1 GMSD 与 JFNG 站三种方案的定位结果 (RMS)

Tab.1 Positioning results (RMS) of three schemes (site GMSD and JFNG)

	GMSD			JFNG		
	1	2	3	1	2	3
East/m	0.040	0.029	0.021	0.048	0.077	0.060
North/m	0.039	0.029	0.028	0.039	0.056	0.064
Up/m	0.107	0.075	0.069	0.130	0.105	0.208

案 3 的定位结果无异常,这是因为该段时间 GPS 观测数据存在异常值, BDS 观测数据的加入弥补了这一不足,充分说明了 GPS/BDS 融合 PPP 的优势。

2) 图 4 中 JFNG 站方案 1 的定位序列在 12:00 前后无明显异常,说明 GPS 观测测量无明显异常,但是方案 3 的定位结果序列在这个时间段明显异常,分析是 BDS 的观测数据存在异常造成了 GPS/BDS 融合 PPP 定位结果在该时间段变差。

3) 图 4 中 JFNG 站方案 2 在 15:00-21:00 时段内东方向的定位精度比方案 3 的要差,分析是由于该段时间 GFZ 提供的 BDS 轨道和钟差的精度不高, PPP 数据处理模式与基线解不同,卫星端的星历误差无法通过差分消除,导致 GPS/BDS 融合 PPP 的定位精度甚至不如单 GPS 系统的好。对于这一问题可以采用 Helmert 方差分量估计解决,拟在其他文章中另行介绍,本文不做讨论。

本文主要对前 2 个问题进行讨论。当两大系统每个历元的观测数据都存在冗余且均无异常观测量时, BDS/GPS 融合 PPP 的定位精度明显要优于单 GPS 的定位精度。但是当其中一个系统的观测数据出现异常(星历精度的问题或者观测量本身的问题),导致另一系统的观测数据残差整体变大,使定位结果出现偏差,甚至不如单一导航系统的定位精度。

根据 Helmert 方差分量估计的思想,利用观测量的验后残差计算不同种类观测值的方差因子,从而对哪一类观测量出现了异常进行定位。式(6)为近似 Helmert 方差分量估计的 Forstner 公式,其中 $\hat{\sigma}_i$ 为第 i 类观测量的方差分量估计值, n_i 为当前历元该类观测

量个数。按照文献[12][13]的研究,历史的观测异常误差会对 Kalman 滤波结果造成影响,从而对当前历元方差分量估计值 $\hat{\sigma}_i$ 的计算,故本文选取当前历元的观测量验后残差构建方差因子。若某一类观测在某一历元的方差分量估计值 $\hat{\sigma}_i$ 变大,说明当前历元此类观测值中存在异常。将 GPS/BDS 融合 PPP 的卫星按照类型分为四类:GPS、BDS GEO、BDS IGSO、BDS MEO。图 5 为 JFNG 站方案 3 中四类卫星的 $\hat{\sigma}_i$ 时间序列。

$$\hat{\sigma}_i = \text{sqrt} \left(\frac{V_i^T P V_i}{n_i - \text{tr}(N_i N_i^{-1})} \right) \quad (6)$$

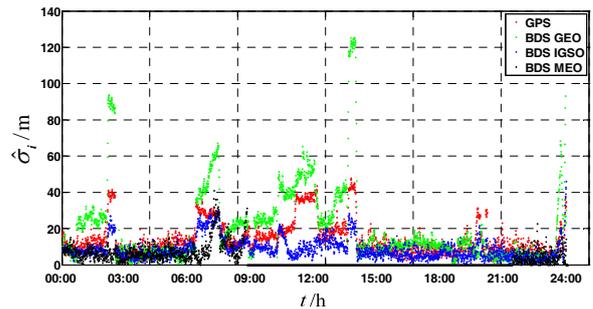


图 5 JFNG 站第 i 类观测量方差分量估计值 $\hat{\sigma}_i$ 的时间序列

Fig.5 Variance-component estimation value $\hat{\sigma}_i$ of type- i observables in site JFNG

图 5 中 10:00 至 14:00 之间 GPS、GEO、IGSO 三类卫星观测量的 $\hat{\sigma}_i$ 值均变大,前边分析了是由于 BDS 的观测量存在异常, GPS 观测量的验后残差也相应变大,分别对 JFNG 站 GPS/BDS 的观测量验后残差做分析。图 6 为 JFNG 站 10:00-15:00 之间 GPS/BDS 观测量验后残差序列:上图为 GPS 的结果,在 12:00 与 14:00 前后存在观测量残差出现离群的现象,但是不明显;

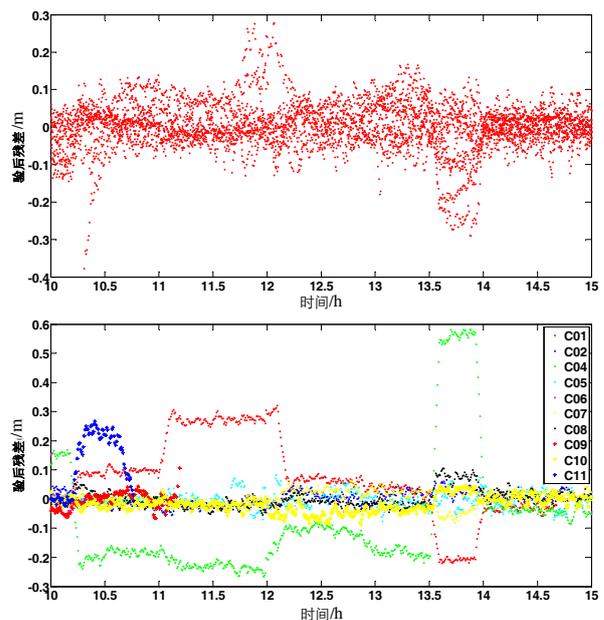


图 6 JFNG 站 10:00-15:00 之间 GPS/BDS 观测量残差

Fig.6 Post-fit phase residuals of GPS/BDS (time 10:00-15:00, site JFNG)

下图为 BDS 的结果, 明显地在 11~12 h 期间 C01/C04 星观测量出现异常, 基于前后历元时间序列进行粗差探测, 判定是 C01 星观测量出现了异常, 导致图 5 中 12:00 左右 BDS GEO 卫星的方差分量估计值 $\hat{\sigma}_i$ 出现异常, 相同历元的观测量验后残差均出现离群状态 (GPS 以及 C04 星的结果可以说明)。

综上, 对于 GPS/BDS 融合 PPP, 要避免观测数据中上述的异常才能发挥融合 PPP 的优势, 抗差 Kalman 滤波是一种有效手段, 但是若按照常规抗差 Kalman 滤波计算等价权时, 图 5 中 12:00 前后 GPS 观测量验后残差也变大, C01 观测量在降权的同时 GPS 卫星的观测量也整体降权, 这就更造成了定位的偏差。因此本文提出了卫星分群的抗差 Kalman 滤波算法来解决该问题, 下面对算法进行介绍。

2 卫星分群抗差 Kalman 滤波

2.1 抗差 Kalman 滤波

抗差 M-LS 滤波极值条件^[12]:

$$\Omega = \sum_{i=1}^{n_k} \mathbf{Q}_k \rho(v_i) + (\hat{\mathbf{x}}_k(+)-\hat{\mathbf{x}}_k(-))^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k(-)} (\hat{\mathbf{x}}_k(+)-\hat{\mathbf{x}}_k(-)) \quad (7)$$

易得抗差 M-LS 滤波解为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{K}}_k &= \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k(-)} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k(-)} \mathbf{H}_k^T + \bar{\mathbf{Q}}_k)^{-1}, \\ \hat{\mathbf{x}}_k(+) &= \hat{\mathbf{x}}_k(-) + \bar{\mathbf{K}}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k(-))), \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k(+)} &= (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{K}}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k(-)} \end{aligned} \quad (8)$$

比较式(4)(8)两者的差异仅仅是在测量噪声的方差协方差矩阵由 \mathbf{Q}_k 变为了等价方差协方差矩阵 $\bar{\mathbf{Q}}_k$, 从而引起滤波增益矩阵 \mathbf{K}_k 发生变化。鉴于 GPS/BDS 融合 PPP 所有观测量是不相关的, 将 \mathbf{Q}_k 对角线上第 i 个元素 \mathbf{Q}_{k_i} 乘以方差膨胀因子, 就置换为 $\bar{\mathbf{Q}}_{k_i}$ 。方差膨胀因子函数如式(9), 该式利用 IGG III 权因子函数的倒数构建^[12-13]。

$$\bar{\mathbf{Q}}_{k_i} = \begin{cases} \mathbf{Q}_{k_i} & |\tilde{v}_i| \leq K_0 \\ \mathbf{Q}_{k_i} \frac{|\tilde{v}_i|}{K_0} \left(\frac{K_1 - K_0}{K_1 - |\tilde{v}_i|} \right)^2 & K_0 < |\tilde{v}_i| \leq K_1 \\ 10^8 \cdot \mathbf{Q}_{k_i} & |\tilde{v}_i| > K_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_0 、 K_1 根据经验选取, 在本文计算中, $K_0=1.5$, $K_1=3.0$; v_i 是当前历元某一相位观测量的验后残差, 通过当前历元观测残差向量序列 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ 将当前 v_i 化成标准化观测残差 \tilde{v}_i , \tilde{v}_i 的构建有多种方式, 本文选取式(10)^[13], 其中 σ_v 是 \mathbf{v} 的中误差。

$$\tilde{v}_i = \frac{v_i - \text{mean}(\mathbf{v})}{\sigma_v} = \frac{v_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i}{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (v_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i)^2}} \quad (10)$$

当标准化观测残差 $|\tilde{v}_i|$ 小于 K_0 时, 认为当前观测量 i 可靠, 其观测信息对估值的贡献不变; 当 $|\tilde{v}_i|$ 大于 K_1 时观测信息异常, 将测量噪声方差协方差矩阵 \mathbf{Q}_k 对角线上该观测量对应的元素乘以极大值, 将该观测量的贡献降为 0; 当 $|\tilde{v}_i|$ 介于 K_0 和 K_1 之间时, 其观测信息具有一定的可靠性, 此时测量噪声方差协方差矩阵 \mathbf{Q}_k 对角线上该观测量对应的元素乘以方差膨胀因子来降低观测量 i 的贡献。抗差 Kalman 滤波一般采用迭代的方式进行, 当前后两次迭代参数的改正值小于一个限值后 (本文取位置参数改正值小于 0.03 m) 则停止迭代)。

2.2 卫星分群方差膨胀因子

前述分析知, GPS/BDS 融合 PPP 中不同种类卫星的观测量验后残差序列 \mathbf{v} 的随机特性不同, 将当前历元观测残差向量序列 \mathbf{v} 按照卫星类型分为四类 $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_G, \mathbf{v}_{CG}, \mathbf{v}_{CI}, \mathbf{v}_{CM})$, G 代表 GPS 卫星, CG 代表 BDS 中 GEO 卫星, CI 代表 BDS 中 IGSO 卫星, CM 代表 BDS 中 MEO 卫星, 不同类型卫星的观测量验后残差计算等价权因子如式(11):

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{i_G} &= (v_{i_G} - \text{mean}(\mathbf{v}_G)) / \sigma_{v_G}, \\ \tilde{v}_{i_{CG}} &= (v_{i_{CG}} - \text{mean}(\mathbf{v}_{CG})) / \sigma_{v_{CG}}, \\ \tilde{v}_{i_{CI}} &= (v_{i_{CI}} - \text{mean}(\mathbf{v}_{CI})) / \sigma_{v_{CI}}, \\ \tilde{v}_{i_{CM}} &= (v_{i_{CM}} - \text{mean}(\mathbf{v}_{CM})) / \sigma_{v_{CM}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: σ_{v_G} 、 $\sigma_{v_{CG}}$ 、 $\sigma_{v_{CI}}$ 、 $\sigma_{v_{CM}}$ 为各类卫星观测量验后残差的中误差。每次抗差迭代时仅对该群观测量中验后残差最大的观测量进行方差膨胀, 降低其对参数估计的贡献^[13]。

3 试验分析

为了检验本文算法应用到 GPS/BDS 融合 PPP 中是否有效, 收集了 GMSD 与 JFNG 站 2014 年年积日 070-076 共 7 天的数据进行试验分析, 设计了三种方案:

方案 1: 标准 Kalman 滤波, 采用最简单的 3σ 准则剔除每一历元的粗差数据。

方案 2: 常规的抗差 Kalman 滤波。

方案 3: 采用本文提出的卫星分群抗差 Kalman 滤波。

其中, GPS/BDS 卫星精密星历和精密钟差选用 WHU 提供的产品。三种方案除每个历元数据质量控制模块不同外, 其余数据处理策略均相同, 从定位精度与可靠性两个方面评估本文算法的有效性。

3.1 定位精度

统计每天模糊度收敛后 (每天 50 min 后) 定位序列的 RMS (结果如图 7), 三种方案 7 天定位序列 RMS 的平均值如表 2 所示。

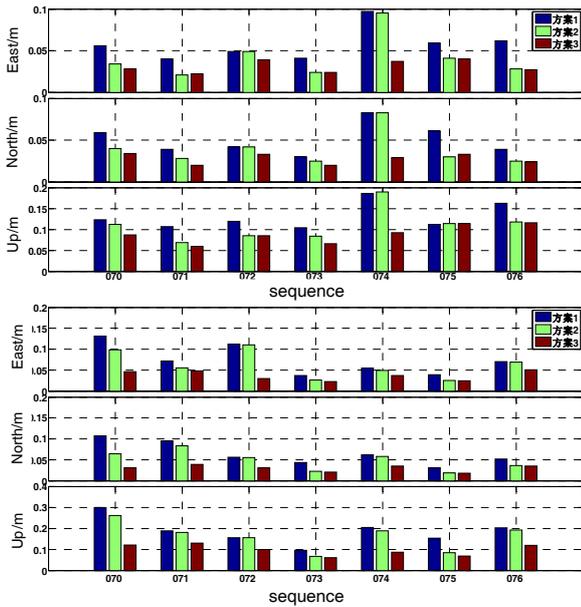


图 7 三种方案定位序列的 RMS(上图为 GMSD 站, 下图为 JFNG 站)

Fig.7 Positioning results RMS of three schemes (The top one is the result of site GMSD, and the bottom one is the result of site JFNG)

表 2 三种方案定位序列 RMS 的平均值
Tab.2 Mean values of positioning results by the three schemes

	GMSD			JFNG		
	1	2	3	1	2	3
East/m	0.058	0.042	0.031	0.074	0.062	0.037
North/m	0.050	0.039	0.028	0.064	0.048	0.030
Up/m	0.131	0.110	0.089	0.186	0.161	0.098

从图 7 两个站多天的定位结果可以看出, 方案 3 的定位结果最优, 方案 2 次之, 方案 1 的结果最差。表 2 的统计结果显示本文算法相较传统的抗差 Kalman 滤波算法平均在东方向提高了 34.6%, 北方向提高了 33.3%, 天方向提高了 31.0%。

3.2 可靠性

统计三种方案出现 GPS/BDS 融合解比 GPS 或 BDS 单独定位精度差情况的概率, 作为衡量三种算法可靠性的一个重要指标。可靠性比较的方法: 对每天模糊度收敛后的定位序列进行统计(每天 50 min, 7 天共 19460 个历元), 统计所有历元中三种方案定位结果比 GPS 或者 BDS 单独定位精度差的百分比, 若方案有效, 则出现定位下降的百分比较小, 结果如图 8 所示。图 9 为方案 3 这 7 天定位序列与 GPS、BDS 单独定位的时间序列。

采用本文提出的卫星分群的抗差 Kalman 滤波算法, 与传统的 Kalman 滤波法相比, GPS/BDS 融合 PPP 定位结果的可靠性增强, 出现融合解的结果比单独解的结果差的概率变小, 但是仍存在某些历元出现

GPS/BDS 融合 PPP 的结果比单 GPS、BDS 的结果差的情况。

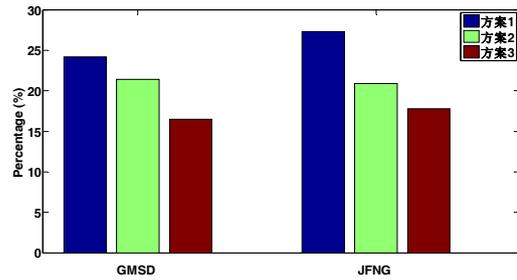


图 8 三种方案可靠性比较

Fig.8 Reliability comparison among three schemes

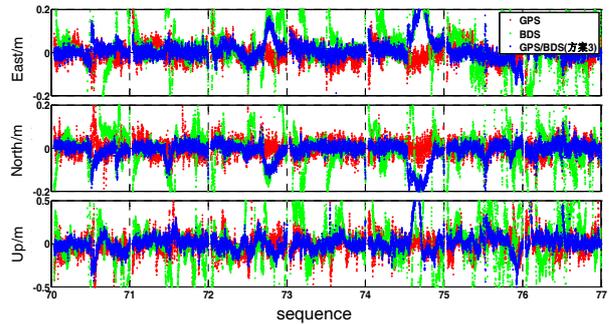


图 9 GMSD 站三种模式的定位序列

Fig.9 Positioning sequence of the three schemes (site GMSD)

4 结论

传统的抗差 Kalman 滤波算法在 GPS/BDS 融合 PPP 数据处理中应用会存在些许不足: 实时质量控制时因为不同随机特性的观测互比, 可能导致优质观测量过分降权的问题, 导致定位结果甚至不如单一导航系统的定位精度高。本文采用 MGEX 实测数据对该问题进行了分析说明, 并提出了改进的卫星分群抗差 Kalman 滤波算法。

算法的基本原理是根据卫星种类分群构建方差膨胀因子, 避免同一接收机不同种类卫星的观测互比, 造成其中某一系统的正常观测量过分降权。本文给出了算法的实施步骤, 最后采用 MGEX 实测数据检验了算法的有效性。与传统的抗差 Kalman 滤波算法相比, 本文算法对 GPS/BDS 融合 PPP 的定位精度有一定提高, 并且提高了 GPS/BDS 融合 PPP 的可靠性。

参考文献 (References):

- [1] Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, Watkins M, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B3): 5005-5017.
- [2] 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 Yuan-xi. Progress, contribution and challenge of compass/BeiDou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.
- [3] Cai C, Gao Y. Modeling and assessment of combined

- GPS/GLONASS precise point positioning[J]. *GPS Solut.*, 2013, 17(2): 223-236.
- [4] Zhang X, Li X. Instantaneous re-initialization in real-time kinematic PPP with cycle slip fixing[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 315-327.
- [5] Li X, Ge M, Dai X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *J Geod.*, 2015, 89(6): 607-635.
- [6] 米洋, 陈家斌, 刘红光, 等. 一种采用小波神经网络的 GPS 精密单点定位方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(3): 337-341.
Mi Yang, Chen Jia-bin, Liu Hong-guang, et al. GPS precise point positioning method using wavelet neural network[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(3): 337-341.
- [7] 刘帅, 孙付平, 李海峰, 等. 前后向平滑算法在精密单点定位/INS 紧组合数据后处理中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2015, 23(1): 85-91.
Liu Shuai, Sun Fu-ping, Li Hai-feng, et al. Forward-backward-smoothing algorithm with application to tightly coupled PPP/INS data post-processing[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(1): 85-91.
- [8] Seepersad G, Bisnath S. Challenges in assessing PPP performance[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2014; 8(3): 205-222.
- [9] 蔡华, 赵齐乐, 孙汉荣, 等. GNSS 实时数据质量控制[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2011, 36(7): 820-824.
Cai Hua, Zhao Qi-le, Sun Han-rong, et al. GNSS real-time quality control[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 36(7): 820-824.
- [10] 张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(8): 940-944.
Zhang Xiao-hong, Guo Fei, Li Pan, et al. Real-time quality control procedure for GNSS precise point positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 940-944.
- [11] Teunissen P J G. Quality control in navigation systems[J]. *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*, 1990, 5(7): 35-41.
- [12] Yang Yuan-xi. Robust Bayesian estimation [J]. *Bulletine Geodesique*, 1991, 65: 145-150.
- [13] 张小红, 潘宇明, 左翔, 等. 一种改进的抗差 Kalman 滤波方法在精密单点定位中的应用[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2015, 40(7): 858-864.
Zhang Xiao-hong, Pan Yu-ming, Zuo Xiang, et al. An improved robust Kalman filtering and its application in PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 858-864.
- [14] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, et al. GFZ global multi-GNSS network and data processing results[C]//International Association of Geodesy Symposia. 2016: 673-679.
- [15] Guo Jing, Xu Xiao-long, Zhao Qi-le, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison[J]. *J Geod.*, 2016, 90(2): 143-159.