



精客单点定位不等精度观测值的 RKF 研究

姚一飞^{1,2} 高井祥^{1,2} 李增科^{1,2} 谭兴龙^{1,2}

1 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州, 221116

2 中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州, 221116

摘要: 推导了精客单点定位含有粗差观测数据的 M-LS 滤波原理, 对等价权阵采用三段降权函数实现抗差。从新息和残差的协方差关系出发, 利用对粗差敏感的残差标准差作为抗差因子。通过迭代减弱卫星间载波残差及其抗差因子的相关性。针对载波和伪距观测值不等精度和不相关性, 采用双抗差因子实现静态抗差卡尔曼滤波(robust Kalman filtering, RKF)。采用标准卡尔曼滤波、基于新息 RKF、基于残差的增益矩阵双抗差因子 RKF、基于残差的等价权阵双抗差因子 RKF 等 4 种模型, 分别对一组实测数据解算分析。结果表明, 基于新息 RKF 对精度较高的载波粗差不敏感; 基于残差的增益矩阵 RKF 对载波较小的粗差抗差效果较差, 且发生粗差历元时刻的状态参数与真值偏差较大; 而基于残差构造的等价权阵双抗差因子 RKF 可以非常精确和高效地实现抗差, 单个卫星粗差对测站位置参数影响小于 1 mm。

关键词: 抗差卡尔曼滤波; 精客单点定位; 新息; 残差; 三段降权函数

中图法分类号:P228

文献标志码:A

精客单点定位仅需单个测站接收机即能获得高精度的测站坐标和其他产品, 但其解算需要各项误差改正且经过较长时间才能收敛, 严重制约了其发展和应用。文献[1-3]提出了通过数据分析服务中心实时发布模糊度小数偏差或硬件延迟和钟差改正等精密产品给用户, 可以大大提高模糊度固定速率和解算精度。但该系统需要强大的数据分析中心, 且实时发布各项精密改正产品, 大大增加了运营成本, 尤其是该系统的定位精度和可靠性低于网络 RTK(real-time kinematic)。

在导航定位中, 接收机易受信号中断、多路径效应、对流层不稳定和强磁场等外界环境因素的影响, 或者接收机长时间连续运行, 维护不及时, 电子元器件老化, 从而导致原始观测数据中可能产生大量的粗差和噪声。当原始观测数据中含有异常粗差时, 会对模糊度收敛的速度和定位的精度产生较大的影响。目前对精客单点定位抗差 Kalman 滤波研究较少, 主要是基于新息向量构造抗差因子实现抗差。但基于新息的抗差 Kalman 滤波只能对精度较低的伪距观测值进行有效抗差, 而无法对精度较高的载波观测值进行有效抗差。由于载波粗差较伪距粗差对最终结果影响

较大, 文献[4]利用载波抗差因子构造等价权阵, 可以有效地减弱载波粗差对解算结果的影响。虽然伪距粗差对解算结果的影响较小, 但较大的伪距粗差仍可产生较大偏差。同时, 该方法不能对较小的载波相位粗差进行有效抗差。对精客单点定位不等精度的载波和伪距观测值而言, 残差协方差阵较新息协方差阵对粗差更敏感^[5,6], 更能反映原始观测数据异常粗差的发生。文献[7]根据残差较新息对粗差更敏感的特性, 提出了利用残差向量进行抗差滤波的方法。但简单地通过增益矩阵构造降权模型, 不能反映粗差通过观测权阵和新息传递的特性, 且未考虑卫星间载波残差的相互影响, 造成对卫星观测值不合理降权, 从而导致定位精度和可靠性较差。尤其是当粗差较多或多个卫星同时有粗差时, 该方法失去了抗差的效果。

本文针对精客单点定位载波和伪距观测值不等精度的特性, 采用对粗差更敏感的基于残差标准差双抗差因子, 对原始观测值的等价权阵来构造降权函数。针对卫星间残差及其抗差因子的相关性, 通过增益矩阵和抗差因子的迭代来减弱其影响。对标准卡尔曼滤波, 基于新息的 RKF、基于残差的

增益矩阵双抗差因子 RKF、基于残差的观测权阵双抗差因子 RKF 4 种模型采用 IGS (the international GNSS service) 实测数据分析对比。

1 M-LS 抗差卡尔曼滤波

传统的精密单点定位一般选用消电离层的载波和伪距观测值建立随机模型^[8,9]。卫星轨道误差和卫星钟差可通过 IGS 服务中心的精密星历和精密钟差产品内插大大减弱, 其他如卫星天线相位中心、接收机天线相位中心、相对论效应、固体潮和海潮等误差可通过模型来减弱。剩余的待估参数向量包括测站坐标、对流层延迟、接收机钟差和各个卫星消电离层组合观测值的实数模糊度参数可表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = (\boldsymbol{\delta}_x, \boldsymbol{\delta}_y, \boldsymbol{\delta}_z, T, dt_r, N^i, \dots, N^i)^T$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为第 k 历元时刻的待求参数向量; $\boldsymbol{\delta}_x$ 、 $\boldsymbol{\delta}_y$ 、 $\boldsymbol{\delta}_z$ 为接收机的三维坐标向量; T 为对流层延迟; dt_r 为接收机钟差; N^i 为 i 卫星的消电离层模糊度浮点解。

将精密单点定位的载波和伪距观测方程按泰勒级数展开^[8,9], 可得观测模型方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (1)$$

式中, \mathbf{Z}_k 为观测向量; \mathbf{H}_k 为观测系数矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 为观测噪声向量。

将精密单点定位的状态方程离散化, 可得其动力模型系统方程^[8-9]:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_k \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵; $\boldsymbol{\omega}_k$ 为状态噪声向量。

观测方程(1)和动力系统方程(2)可分别改写为如下误差方程形式^[5]:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k - \mathbf{Z}_k \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{V}}_k = \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{X}}_k - \mathbf{Z}_k \quad (4)$$

式中, \mathbf{V}_k 为观测向量的残差向量; $\bar{\mathbf{V}}_k$ 为状态预测残差向量, 即新息; $\bar{\mathbf{X}}_k$ 为预测的状态向量。

残差和新息的关系及其协方差关系可表示为^[10]:

$$\mathbf{V}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{H}_k \mathbf{K}_k) \bar{\mathbf{V}}_k \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{V}_k} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}_k \mathbf{K}_k) \mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{V}}_k}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^T \mathbf{H}_k^T) \quad (6)$$

式中, \mathbf{K}_k 为增益矩阵; $\mathbf{Q}_{\mathbf{V}_k}$ 为 \mathbf{V}_k 的协方差; $\mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{V}}_k}$ 为 $\bar{\mathbf{V}}_k$ 的协方差。由式(3)、式(4)可以看出, 新息是由预测的状态向量推算而来, 是未经观测向量修正的状态向量, 所以新息更能反映动态扰动^[10], 而残差向量是由实际参数向量求解而来, 是经过观测向量修正的状态向量。从式(5)、式(6)可以看出, $\mathbf{Q}_{\mathbf{V}_k}$ 一定

小于 $\mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{V}}_k}$ 。综上所述, 针对不等精度观测量的粗差, 残差的协方差较新息的协方差更敏感, 采用基于残差较新息构造抗差因子效果更显著^[7]。由于静态精密单点定位没有较大的扰动异常, 本文只分析粗差异常对解算结果的影响, 而不考虑自适应滤波对扰动异常的抗差效果^[6,10]。

假设第 $k-1$ 历元不存在粗差, 可认为第 k 历元预测的状态参数向量 $\bar{\mathbf{X}}_k$ 服从高斯分布。若第 k 历元的原始载波或伪距观测值含有粗差, 则观测向量服从污染的高斯分布。则应对观测向量采用抗差估计, 而对状态参数向量采用最小二乘估计, 即 M-LS 估计^[5-6], 极值条件可表示为:

$$\mathbf{V}_k^T \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{V}_k + \bar{\mathbf{V}}_k^T \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}_k} \bar{\mathbf{V}}_k = \min \quad (7)$$

式中, $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 为观测向量的等价权阵; $\mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}_k}$ 为状态向量的权阵。对式(7)求极值后, 分别将式(1)~式(4)代入整理后, 得状态估计向量及其增益矩阵可表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{H}_k \bar{\mathbf{X}}_k - \mathbf{Z}_k) \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_k = \bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \tilde{\mathbf{P}}_k^{-1})^{-1} \quad (9)$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为状态估计向量; $\bar{\mathbf{X}}_k$ 为预测的状态向量; $\bar{\mathbf{P}}_{k,k-1}$ 为预计状态的协方差阵; $\tilde{\mathbf{P}}_k^{-1}$ 为观测噪声方差阵。从式(4)、式(8)、式(9)可以看出, \mathbf{Z}_k 将含有的粗差传递给 $\bar{\mathbf{V}}_k$ 。若要减弱或消除粗差的影响, 需合理地构造 \mathbf{K}_k , 而 \mathbf{K}_k 主要受 $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 的影响。若要合理地抗差, 只需构造出与 $\bar{\mathbf{V}}_k$ 粗差等价对应的 $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 即可, 即粗差是通过 $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 和 $\bar{\mathbf{V}}_k$ 传递的。简单地对 \mathbf{K}_k 采用三段降权函数法(IGGⅢ), 并不能准确地反映原始粗差的影响^[7], 故本文对 $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 构造三段降权函数。

构造的基于残差向量抗差的 Kalman 滤波解算过程可表示为如下。

预测过程:

$$\bar{\mathbf{X}}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{P}}_{k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k \quad (10)$$

更新过程:

$$\mathbf{K}_k = \bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \tilde{\mathbf{P}}_k^{-1})^{-1},$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k \bar{\mathbf{V}}_k \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \bar{\mathbf{P}}_{k,k-1} \quad (12)$$

式中, \mathbf{Q}_k 为过程噪声的方差阵; $\hat{\mathbf{P}}_k$ 为状态向量的协方差阵; $\tilde{\mathbf{P}}_k$ 为构造的抗差等价权阵。

2 不等观测精度的双抗差因子

抗差 Kalman 滤波可以通过构造抗差的等价权函数来实现抗差, 如丹麦法权函数、Huber 权函数等, 本文采用较优的三段降权函数法^[6]。构造

抗差的等价权矩阵如下：

$$\tilde{\mathbf{P}}_{k_{ii}} = \gamma_{ii} \mathbf{P}_{k_{ii}} \quad (13)$$

式中, $\tilde{\mathbf{P}}_{k_{ii}}$ 表示抗差等价权矩阵的第 (i, i) 元素; $\mathbf{P}_{k_{ii}}$ 为原始观测噪声的权矩阵, 采用高度角正弦值平方倒数定权; γ_{ii} 为抗差的三段降权函数^[6,11]:

$$\gamma_{ii} = \begin{cases} 1, s_{ii} \leq k_0 \\ \frac{k_0}{s_{ii}} \left(\frac{k_1 - s_{ii}}{k_1 - k_0} \right)^2, k_0 < s_{ii} \leq k_1 \\ 0, s_{ii} > k_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, k_0, k_1 分别为分位参数和淘汰点; s_{ii} 为抗差因子:

$$s_{ii} = \frac{|\mathbf{V}_{k_i}|}{\sqrt{(\mathbf{Q}_{v_k} \mathbf{P}_k)_{ii} \mathbf{P}_{k_{ii}}}} \quad (15)$$

式中, \mathbf{V}_{k_i} 为残差向量第 i 个元素; \mathbf{Q}_{v_k} 为残差向量的协方差阵。

针对不等精度的观测量进行抗差 Kalman 滤波估计, 由于原始观测噪声的不等精度, 会造成两种观测值 k_0 和 k_1 选取的不匹配。由于载波观测值的残差及其抗差因子远小于伪距(见 § 3 图 1 和图 2)。若将载波相位和伪距观测值采用统一的 k_0 和 k_1 , 会造成载波粗差的漏判从而失去三段降权函数的对载波粗差降权效果, 所以需要将载波和伪距抗差因子的 k_0 和 k_1 分开定义。考虑到载波和伪距观测值的不相关性, 本文对载波和伪距的 k_0 和 k_1 分开处理, 且均采用三段降权函数法, 两种观测值的 k_0 和 k_1 分别根据载波和伪距观测值的标准化残差大小来确定。

3 实验分析

本文采用的是 IGS 中心提供的观测数据和精密产品。选取 BJFS 站 2010 年 8 月 29 日 00:00~01:15 共 150 个历元的观测数据, 采样间隔为 30 s。卫星轨道和钟差均采用 IGS 同一机构的精密星历和精密钟差产品内插, 其他误差可通过模型进行改正^[8,9], 周跳探测与修复采用 MW/TECR 或者构造第三频率仿真数据^[12,13]。

图 1 为针对载波和伪距不等精度的观测值, 在某一卫星载波和伪距原始数据第 100 历元时刻分别加入 0.1 m、10 m 粗差后^[14], 新息和残差的时间序列图。从图 1 可以看出, 新息和残差均服从高斯分布; 载波相位的新息为 dm 到 m 级, 残差为 cm 级; 而伪距的新息和残差均为 m 级; 同一历元时刻所有卫星的载波新息大小相近, 但当载波加入 0.1 m 的粗差时, 发生粗差卫星的新息出现较小不易分离的异常(图 1(a)), 而残差可以较明

显地探测出异常。说明残差相对于新息而言, 其对粗差更敏感, 验证了式(6)。同时, 在单个卫星的载波相位观测值加入 0.1 m 的较小粗差, 所有卫星的残差向量均有较大的跳跃(图 1(a)), 说明卫星残差向量间有一定的相关性。

由于原始观测数据中不存在粗差, 图 2 为在载波和伪距原始数据第 100 历元时刻分别加入 0.1 m、10 m 粗差后, 基于新息和残差的抗差因子时间序列图。从图 2 可以看出, 基于残差的抗差因子可以敏感地探测到载波异常粗差, 而基于新息的抗差因子对载波异常粗差不敏感; 而对于精度不高的伪距粗差, 能较好地探测出新息和残差, 且可识别出含有粗差的卫星号。载波相位和伪距的抗差因子量级不同, 所以本文对两种不等精度的观测值采用不相关的双抗差因子。与图 1(a)结果类似, 当在精度较高的载波观测值存在粗差时, 基于残差的抗差因子同样出现了卫星间抗差因子的相关性。

文献[7]通过对增益矩阵采用三线段函数法实现抗差效果, 虽然经过多个历元的收敛, 最终的结果与无粗差的结果较相符, 但 § 2 分析了对增益矩阵采用三线段降权函数法并不能合理地进行抗差, 且未考虑卫星间残差及其抗差因子的相关性。由于传统抗差模型对伪距观测粗差较明显, 而对载波无法有效抗差。本文在第 100 历元时刻加入粗差大小的方式如下: ① 无粗差; ② 载波加入 0.1 m 粗差; ③ 伪距加入 10 m 粗差; ④ 载波加入 0.5 m 粗差和伪距加入 50 m 粗差。分别采用以下 5 种方案解算:

- 方案 1 标准 Kalman 滤波;
- 方案 2 基于新息的 RKF;
- 方案 3 基于残差的增益矩阵双抗差因子的 RKF;
- 方案 4 基于残差的观测权阵双抗差因子的 RKF;
- 方案 5 基于残差的观测权阵双抗差因子的 RKF, 通过式(5)、式(9)、式(13)~式(15)对残差向量及其抗差因子迭代计算。

图 3 和图 4 分别为采用方案 2 和方案 3, 在载波第 100 历元加入 0.1 m 粗差的接收机坐标估值时间序列图。从图 3 可以明显看出, 从第 100 历元开始, 坐标估值出现明显的整体偏移。从图 4 可以看出, 第 100 历元时刻的坐标估值有明显的偏差, 但之后历元的坐标估计偏差较小。经过分析认为, 这主要是由于通过增益矩阵的三线段函数法实现抗差, 可以较好地对发生粗差历元的

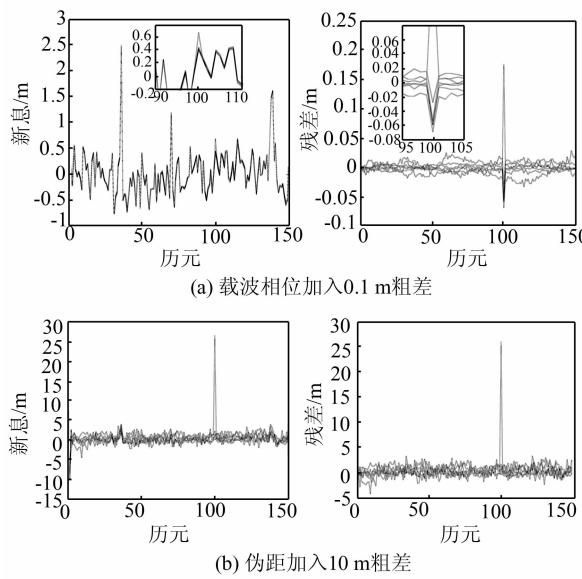


图 1 加入粗差的新息和残差对比

Fig. 1 Comparison of the Innovation and Residuals with Outliers

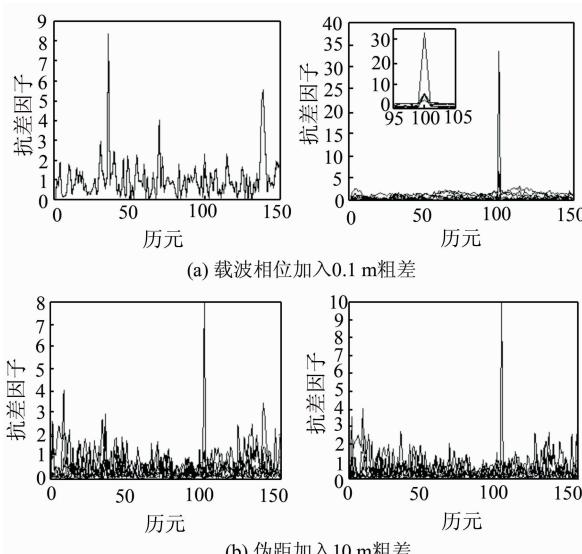


图 2 加入粗差的新息和残差的抗差因子对比

Fig. 2 Comparison of the Robust Factor Based on Innovation and Residuals with Outliers

状态向量协方差阵和下一历元的预计状态协方差阵进行抗差预计,但由于构造的抗差增益矩阵不是十分准确,该历元的状态向量偏差较大,且收敛后的参数向量仍存在若干毫米的偏差(表 1)。

图 5 为采用方案 5 对残差向量和抗差因子迭代计算的结果。通过图 1(a)、图 2(a)、图 5 中载波相位加入 0.1 m 粗差时的残差对比发现,通过迭代计算后,大大减弱了卫星间残差向量及其抗差因子的相关性。克服了由于某颗卫星较大的载波粗差导致该历元其他卫星载波观测数据不可用的缺点,使不含粗差的可用观测数据最大化。

表 1 为采用以上 5 种方案,在原始数据第

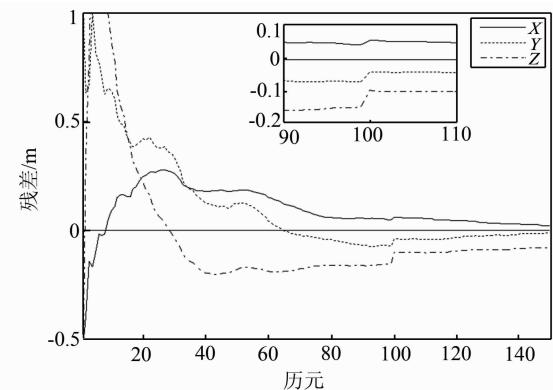


图 3 方案 2 载波加入 0.1 m 粗差的坐标残差

Fig. 3 Estimated Coordinates of Phase Data with 0.1 m Outliers Based on Scheme 2

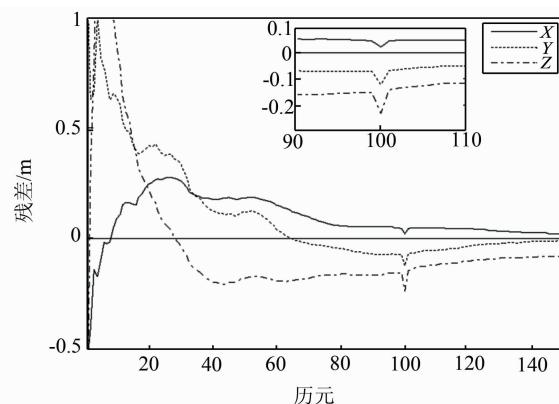


图 4 方案 3 载波加入 0.1 m 粗差的坐标残差

Fig. 4 Estimated Coordinates of Phase Data with 0.1 m Outliers Based on Scheme 3

100 历元时刻加入粗差后该历元和最后一个历元接收机的坐标估值。从表 1 可以明显看出,采用方案 1 不能对粗差进行有效抗差,且载波 0.1 m 较小粗差对位置参数的影响远远大于伪距 10 m 粗差的影响,分析认为主要是由于载波的观测噪声权重大远大于伪距;同时,原始载波相位粗差为 0.5 m 时,其对位置参数的影响更大,但经过 50 个干净历元观测数据的收敛,最终位置参数与无粗差结果的偏差明显减小。采用方案 2 可以对发生在伪距的粗差进行较好地抗差,但对于精度较高的载波观测值,完全失去了抗差的效果。采用方案 3,最终历元时刻位置参数与无粗差的位置参数结果相差在 mm 级,说明可以对各种粗差进行有效抗差;但是在粗差发生的历元时刻,对于载波 0.1 m 的较小粗差,该模型方法的位置参数偏差较大,而对于载波 0.5 m 较大的粗差可以进行有效抗差。采用方案 4 在历元发生时刻和最终历元时刻,无论载波或伪距的大粗差还是小粗差,都能进行有效地抗差。同时,研究发现,由于卫星间残差及其抗差因子的相关性,方案 4 对未发生粗

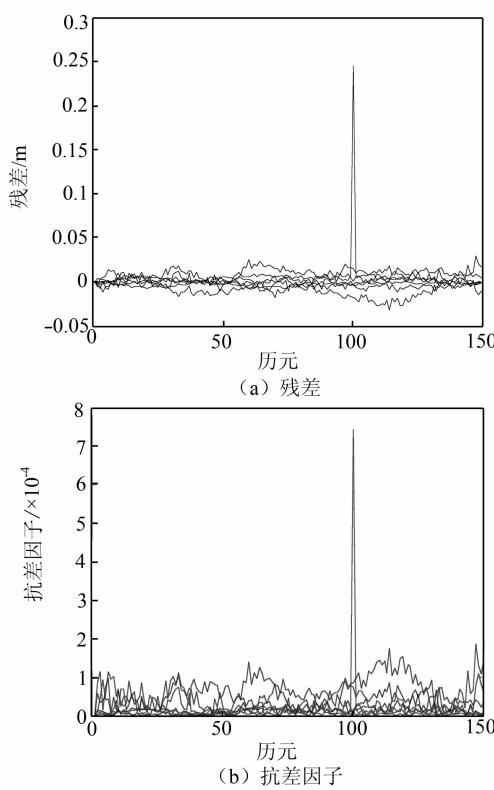


图5 迭代后载波相位的残差和抗差因子

Fig. 5 Residuals and the Robust Factor of Phase Carrier After Iterating

差卫星的观测数据也进行了不合理的降权。采用

表1 5种方案位置参数对比/m

Tab. 1 Comparison of the Estimated Coordinates for 5 Schemes/m

方案	加入粗差方式	第100历元坐标偏差			第150历元坐标偏差		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1	①	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	②	-0.016	0.033	0.052	0.000	-0.014	-0.007
	③	-0.002	0.001	0.002	-0.001	0.000	0.000
	④	-0.087	0.170	0.265	-0.006	-0.069	-0.035
2	①	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	②	-0.016	0.033	0.052	0.000	-0.014	-0.007
	③	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	④	-0.079	0.164	0.260	-0.001	-0.068	-0.035
3	①	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	②	0.022	-0.048	-0.082	0.000	-0.008	-0.004
	③	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	④	-0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000
4	①	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	②	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.001	-0.001
	③	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	④	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
5	①	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	②	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000
	③	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	④	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000

方案5同样获得了非常高的精度,当前历元和最终历元时刻其位置参数与无粗差的位置参数偏差均小于1 mm。由于方案5使用了更多不含粗差的观测值,理论上其解算精度要高于方案4,且对多粗差的抗差能力要优于方案4。

综上所述,针对精密单点定位载波和伪距观测值不等精度的特点,基于新息的抗差Kalman滤波模型失去了对精度较高的载波观测值抗差的效果。简单地对增益矩阵采用三段降权函数法,可以对下一历元的状态向量及其方差进行较好地估计,但并不能较好地反映粗差通过原始观测等价权阵和新息传递的特性。尤其是该增益矩阵构造的不合理直接导致发生粗差历元时刻的位置参数向量估计错误。假设粗差发生在最后一个历元或者最后历元时刻粗差较多,那么方案3解算的坐标估值可能会产生误差。而方案5可以以非常高的精度进行抗差,通过对抗差因子和增益矩阵迭代计算,有效地减弱了卫星间残差和抗差因子的相关性。同时,方案5可以克服不等精度观测值残差不相符的缺点,对两种观测量分开抗差,不会造成粗差漏探或者降权不合理的情况。此外,其他参数如对流层延迟,接收机钟差和卫星模糊度浮点解与位置参数规律类似。

同时,对 BJFS 站原始观测数据分析发现,在第 300~800 历元间粗差较多,采用传统的 Kalman 滤波模型解算精度较差。为检验本文算法的有效性,分别采用方案 2、方案 3 和方案 5 等 3 种模型算法对该天实测数据进行解算。对 3 种方案解算的坐标与 SOPAC(<http://sopac.ucsd.edu/sector.shtml>)提供的该测站天解坐标进行了对比。图 6 为采用方案 2、方案 3 和方案 5 等 3 种方案解算坐标与 SOPAC 提供坐标的差值时间序列图。从图 6 可以明显看出,在第 300~800 历元间粗差较多,方案 2 和方案 3 均不能对该实测数据进行有效抗差,主要是由于粗差较多且多个卫星同时有粗差出现,而本文提出的方案 5 可以有效地减弱粗差的影响(必须进行迭代计算,否则,由于粗差较多,方案 4 抗差能力不明显)。研究发现,方案 5 可以对粗差进行有效减弱,但迭代大大增加了算法计算量,且粗差越多需要迭代次数越大(一般 5 次迭代即可)。

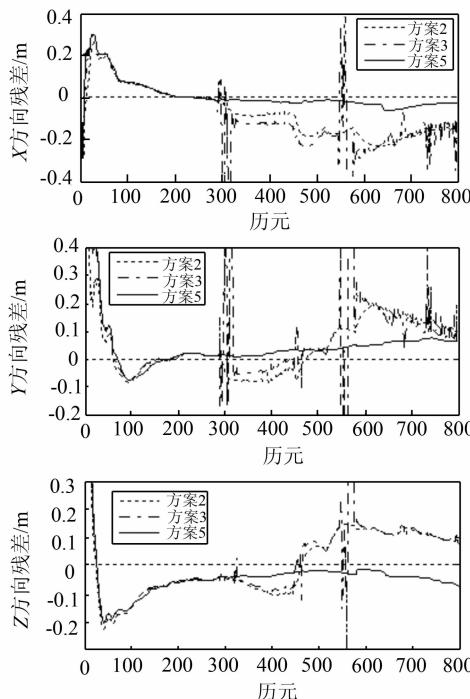


图 6 方案 2、3 和 5 的坐标残差

Fig. 6 Estimated Coordinates of Scheme 2, 3 and 5

4 结语

1) 针对精密单点定位载波和伪距观测量残差不等精度和不相关的特性,采用基于残差向量的双抗差因子 Kalman 滤波,可以有效地克服传统抗差算法对高精度观测量粗差不敏感的缺点;

2) 精密单点定位的粗差通过观测向量的等

价权阵和新息来传递,简单地对增益矩阵进行三段降权函数并不能进行有效地抗差,而对原始观测向量的等价权阵进行三段降权函数更能有效地减弱异常粗差的影响;

3) 通过抗差因子和增益矩阵迭代计算,可以有效地减弱卫星间残差及其抗差因子的相关性,仅对含有粗差的卫星进行降权,从而将不含粗差的可用观测数据最大化。实验结果表明,本文基于残差的等价权阵双抗差因子 Kalman 滤波解算模型,单个卫星粗差对接收机位置参数影响小于 1 mm。

参 考 文 献

- [1] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399
- [2] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149
- [3] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. *Navigation*, 2010, 57(2): 123-135
- [4] Nie Jianliang, Zhang Shuangcheng, Xu Yongsheng, et al. Precise Point Positioning Based on Robust Kalman Filtering[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(2): 218-220(聂建亮, 张双成, 徐永胜, 等. 基于抗差 Kalman 滤波的精密单点定位[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 218-220)
- [5] Yang Yuanxi. Adaptive Navigation and Kinematic Positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006(杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006)
- [6] Yang Yuanxi, He H, Xu G. Adaptively Robust Filtering for Kinematic Geodetic Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(2/3): 109-116
- [7] Xu Changhui, Gao Jingxiang, Hu Hong, et al. Robust Kalman Filtering for Precise Point Positioning[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(5): 857-862(许长辉, 高井祥, 胡洪, 等. 精密单点定位的抗差卡尔曼滤波研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 857-862)
- [8] Hu Hong. Research on Theory and Realization of GNSS Precise Point Positioning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013(胡洪. GNSS 精密单点定位算法研究与实现[D]. 徐州:

- 中国矿业大学, 2013)
- [9] Hu Hong, Gao Jingxiang, Yao Yifei. Land Deformation Monitoring in Mining Area with PPP-AR [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(2): 207-212
- [10] Yang Yuanxi, He Haibo. Adaptive Robust Filtering for Kinematic GPS Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 293-298(杨元喜, 何海波. 论动态自适应滤波[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 293-298)
- [11] Zhang X, Guo F, Zhou P. Improved Precise Point Positioning in the Presence of Ionospheric Scintillation [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 51-60
- [12] Liu Z. A New Automated Cycle Slip Detection and Repair Method for a Single Dual-frequency GPS Re-
- ceiver[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 171-183
- [13] Zhang Xiaohong, 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(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)
- [14] Xu Changhui, Gao Jingxiang, Zhou Feng, et al. Reliability Analysis of Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 709-713(许长辉, 高井祥, 周锋, 等. 精密单点定位的可靠性研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2012, 37(6): 709-713)

Research on Robust Kalman Filter of Observations with Unequal Precision in Precise Point Positioning

YAO Yifei^{1,2} GAO Jingxiang^{1,2} LI Zengke^{1,2} TAN Xinglong^{1,2}

1 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: The robust Kalman filter principle of precise point positioning is deduced. The standard deviation of residuals is used to construct robust factor based on IGG III function by equivalent weight matrix, which is very sensitive to the outliers, because the residual covariance is smaller than the innovation covariance. The correlation of residuals and robust factor of carrier phase among satellites is greatly weakened by iterating. The robust factor of carrier phase and code are independently calculated, because of the unequal accuracy and irrelevant between carrier phase and code observations. Four models are used to test and analyze by the GPS dual-frequency observations, which included the standard Kalman filter, the robust Kalman filter (RKF) based on innovation, the RKF based on robust residuals and gain matrix, and the RKF based on robust residuals and equivalent weight matrix. Results show that it is insensitive to the outliers of accurate carrier phase observations, which the RKF based on innovation. The smaller carrier phase outliers are difficult to be detected via the RKF based on robust residuals and equivalent weight matrix, and the estimated coordinates has a large deviation from the true value in the epoch of outliers occurred. The RKF based on robust residuals and equivalent weight matrix can efficiently and accurately resist outliers, and the deviations between the estimated coordinates and true value is 1 mm smaller for the outliers of single satellite.

Key words: robust Kalman filter; precise point positioning; innovation; residuals; IGG III

First author: YAO Yifei, PhD candidate, specializes in the GNSS data processing. E-mail: yifeiyao@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41074010; the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, No. 20130095110022; the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. SZBF2011-6-B35.