

用于消除缓变伪距偏差的抗差扩展卡尔曼滤波方法*

沙海, 田丰, 王东会, 张国柱, 欧钢

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对卫星导航系统中伪距观测量存在缓变伪距偏差, 导致定位精度下降的问题, 提出了一种基于滑动积累的抗差扩展卡尔曼滤波方法。该方法在抗差扩展卡尔曼滤波算法的基础上, 通过滑动窗口内多个历元残差矢量的累积, 增大标准化残差矢量的伪距偏差, 来提高对缓变伪距偏差故障的抗差能力。仿真表明, 该方法能有效消除或者减弱微小伪距偏差和缓慢增长伪距偏差造成的位置误差, 与传统抗差扩展卡尔曼滤波算法比较, 定位精度得到明显改善。

关键词:卫星导航系统; 接收机自主完好性监测; 抗差扩展卡尔曼滤波; 缓变故障

中图分类号: TP914.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)05-131-05

A new robust extended Kalman filter method for eliminating the slowly growing pseudo-range error

SHA Hai, TIAN Feng, WANG Donghui, ZHANG Guozhu, OU Gang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Since the slowly growing pseudo-range errors existing in the pseudo-range measurements of satellite navigation system may further lead to the decreasing of position accuracy, a robust extended Kalman filter (EKF) method based on sliding and accumulated residuals was proposed. The method based on the robust EKF algorithm cumulated the residual vectors for multi epochs in the sliding window and increased the pseudo-range error of standardized residual vector, which improved the robustness of slowly growing pseudo-range error. Results show that the method can effectively eliminate or weaken the position error caused by slight pseudo-range error and slowly growing pseudo-range error. Compared with the traditional robust EKF algorithm, the positioning accuracy of this method is improved obviously.

Key words: satellite navigation system; receiver autonomous integrity monitoring; robust extended Kalman filter; slowly growing error

接收机自主完好性监测 (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM) 技术是保证卫星导航系统完好性能指标的重要方法^[1], 由于其无需额外的硬件资源, 仅利用冗余观测数据即可完成卫星故障的检测和识别, 因而得到了广泛的应用。RAIM 方法对于粗大的伪距偏差和快跳变的故障具有较高的检测率, 而对于缓变伪距偏差故障还存在误检和漏检的问题^[2]。实际应用中, 由于受到模型误差、漫反射多径效应等多种因素的影响, 伪距观测量容易出现微小缓慢增长误差^[3-4], 这对系统精度和可靠性造成了不良影响。因此, 对缓变伪距偏差的消除或减弱方法进行研究具有重要实际意义。

目前常用的 RAIM 检测方法可以分为快照法和滤波法。对于快照法, 文献[5-6]分别提出了基于奇偶矢量积累与基于累计和控制图方法的缓

变伪距偏差的 RAIM 检测方法。而对于滤波法, 特别是与惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 组合的扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 方法, 文献[3]通过仿真验证了与卡方检测法相比较, 外推法对于缓变故障检测效果更好。文献[4]在速率检测器算法的基础上, 通过增加动态滤波状态方程, 进一步改善了对慢变误差的检测性能。文献[7]提出了一种新的 ERAIM (Extended RAIM) 方法, 仿真结果表明该方法对于阶梯误差和斜坡误差均能有效检测和识别。此外另一类处理异常值的滤波方法是采用抗差估计方法, 文献[8]在丹麦法的基础上提出了一种适合室内弱信号条件下的抗差估计方法; 文献[9]针对低载噪比条件下, 由于环路门限效应等容易产生异常伪距值的问题, 提出了两种改进的抗差估计方法。文献[10]提出了给定错误报

* 收稿日期: 2013-12-31

作者简介: 沙海 (1984—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, E-mail: sandhai@163.com;

欧钢 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: ougang@nudt.edu.cn

警率和粗差探测率改进的抗差 EKF 算法, 数据处理发现缓慢增长误差的影响要远大于粗差, 而抗差 EKF 算法仅能一定程度上消除此类误差影响, 效果有待提高。文献[11-12]提出了 GNSS/INS 紧组合导航的抗差 EKF 算法, 仿真测试了算法对缓慢增长误差的抑制能力。

目前抗差估计方法对微小缓变伪距偏差抑制能力有限, 并且针对缓变伪距偏差的抗差估计方法研究较少。本文在抗差 EKF 算法的基础上, 提出了一种基于滑动积累的抗差 EKF 算法, 用于削弱或者抵消缓变伪距偏差对位置估计结果的影响。仿真结果验证了算法的有效性。

1 抗差 EKF 算法

1.1 EKF 模型

GNSS 导航系统的观测方程或者状态方程通常为非线性方程, 需要采用 EKF 方法将非线性方程进行线性化后再进行处理。

设系统的状态方程和观测方程分别为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (2)$$

式中, \mathbf{X}_k 为 k 时刻的系统待估状态向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为一步状态转移矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_{k-1}$ 为系统过程噪声输入矩阵; \mathbf{W}_{k-1} 为系统随机过程噪声序列; \mathbf{L}_k 为 k 时刻的系统观测值; \mathbf{H}_k 为系统观测矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 为系统的观测噪声。

系统的随机模型为

$$\begin{cases} E[\mathbf{W}_k] = 0 \\ E[\mathbf{W}_k \mathbf{W}_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \\ E[\boldsymbol{\varepsilon}_k] = 0 \\ E[\boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\varepsilon}_j^T] = \mathbf{C}_k \delta_{kj} \\ E[\mathbf{W}_k \boldsymbol{\varepsilon}_j^T] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, \mathbf{Q}_k 为系统过程噪声序列 \mathbf{W}_k 的方差阵; \mathbf{C}_k 为系统过程噪声序列 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 的方差阵; δ_{kj} 为克罗内克 (Kronecker) 函数。

采用 EKF 模型处理接收机观测数据时, 其步骤如下。

预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{M}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{M}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{M}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{C}_k)^{-1} \quad (6)$$

修正:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{L}_k - h(\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1})] \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{M}_{k,k-1} \quad (8)$$

其中, h 为系统非线性观测方程。预测残差 \mathbf{v}_k 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k &= \hat{\mathbf{L}}_k - \mathbf{L}_k \\ &= \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k - \mathbf{L}_k \\ &= (\mathbf{H}_k \mathbf{K}_k - \mathbf{I}) [\mathbf{L}_k - h(\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1})] \end{aligned} \quad (9)$$

容易推得 \mathbf{v}_k 为服从正态分布的随机变量, 其均值和方差为^[13]

$$E(\mathbf{v}_k) = 0$$

$$D(\mathbf{v}_k) = (\mathbf{H}_k \mathbf{K}_k - \mathbf{I}) (\mathbf{C}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{M}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T) (\mathbf{H}_k \mathbf{K}_k - \mathbf{I})^T \quad (10)$$

1.2 抗差 EKF 算法

抗差 EKF 算法包括等价增益矩阵构造和迭代解算。借鉴 IGG-III 方案^[11-12] 构造等价权函数的思想, 构造等价 EKF 增益矩阵为

$$K_{ij} = \begin{cases} K_{ij} & |s_j| \leq k_0 \\ K_{ij} \times \frac{k_0}{s_j} \times \left[\frac{k_1 - s_j}{k_1 - k_0} \right]^2 & k_0 < |s_j| \leq k_1 \\ 0 & |s_j| > k_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中, i, j 分别为状态向量和观测向量的维数, k_0, k_1 为抗差参数。而

$$s_j = \frac{|v_{kj}|}{\sqrt{r_j \sigma_j}} \quad (12)$$

式中, r_j 和 σ_j 分别为观测向量的多余观测分量和测量标准差。每次更新后进行迭代计算, 具体过程见文献[11]。

由式(11)可知, 对于抗差 EKF 算法, 当 $s_j > k_1$ 时, 视为存在较大粗差, 采用淘汰处理方法, 以消除粗差的影响; 当 $k_0 < s_j \leq k_1$ 时, 怀疑存在粗差, 采用降低权值的方法; 当 $s_j \leq k_0$ 时, 视为无粗差。

然而, 对于观测向量出现大小与观测噪声标准差处于同一量级的微小误差或者缓慢增长误差时, 其标准化残差较小, 导致对应的权值落入信任区域, 无法采取抗差处理。因此, 传统的抗差 EKF 方法对于持续微小误差和缓慢增长误差的抗差处理能力有限。

2 基于滑动积累的抗差 EKF 方法

由于缓变伪距偏差产生的标准化残差数值很小, 抗差 EKF 算法无法对该异常值作抗差处理。然而缓变伪距偏差持续一段时间后, 会对定位结果产生较大影响, 甚至导致滤波结果发散^[5]。鉴于此, 为了增大微小缓变伪距偏差的幅度, 使得抗差 EKF 算法可以有效处理该偏差, 提出了一种基于滑动积累的抗差 EKF 方法。实际上, 这种噪声

积累的想法,已广泛应用于雷达信号处理中,以提高捕获信号的载噪比。

2.1 算法流程

利用滑动窗口积累的方法将多个历元的残差累加后,再采用抗差 EKF 方法处理,以提高对微小缓变误差的抗差能力。其算法流程如图 1 所示。

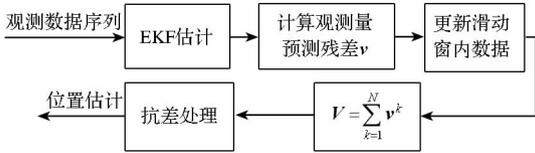


图 1 基于滑动积累的抗差 EKF 方法处理流程

Fig. 1 Architecture of robust EKF algorithm based on sliding and accumulated residuals

通过 EKF 算法估计得到残差序列 \mathbf{v} ,用以更新滑动窗内的数据,使得滑动窗内含有最新的测量信息。构造新的残差矢量为窗口内 N 个观测历元的残差矢量和,称其为积累残差矢量:

$$\mathbf{V} \triangleq \sum_{k=1}^N \mathbf{v}^k \quad (13)$$

\mathbf{v}^k 表示观测历元 k 时的残差矢量,其定义同式(9), N 为滑动窗口宽度。

由积累残差矢量得到的新的标准化积累残差为

$$S_j = \frac{|\mathbf{V}_j|}{\sqrt{r_j \sigma_j}} \quad (14)$$

将其代入 IGG-III 等价权函数得到相关等价增益矩阵,实现抗差估计。

2.2 抗差性能

当观测量存在伪距偏差时,观测方程式(2)可写为

$$\mathbf{L}_k^b = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{b}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (15)$$

$$\mathbf{b}_i = (0, \dots, \Delta\rho, 0, \dots, 0)^T$$

得到的预测残差,与式(9)对比可得

$$\mathbf{v}_k^b = \hat{\mathbf{L}}_k - \mathbf{L}_k^b = \mathbf{v}_k - \mathbf{b}_i \quad (16)$$

因此,当不存在伪距偏差时,预测残差服从零均值正态分布: $\mathbf{v}_k \sim N[0, D(\mathbf{v}_k)]$;而存在伪距偏差 $\Delta\rho$ 时, \mathbf{v}_k^b 服从均值为 $-\mathbf{b}_i$, 方差为 $D(\mathbf{v}_k)$ 的正态分布: $\mathbf{v}_k^b \sim N[-\mathbf{b}_i, D(\mathbf{v}_k)]$ 。

而 N 个历元积累后的残差矢量统计特性为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{不存在偏差: } \mathbf{V} \sim N\left(0, \sum_{k=1}^N D(\mathbf{v}_k)\right) \\ \text{存在偏差: } \mathbf{V} \sim N\left[-N\mathbf{b}_i, \sum_{k=1}^N D(\mathbf{v}_k)\right] \end{array} \right. \quad (17)$$

由于在 N 个观测历元中,与当前可视卫星星座相关的残差协方差矩阵 $D(\mathbf{v}_k)$ 变化相当缓慢,可以近似认为,在短时间内 $D(\mathbf{v}_k)$ 不随时间变化,则

$$\sum_{k=1}^N D(\mathbf{v}_k) \approx ND(\mathbf{v}_{N/2}) \quad (18)$$

因此,存在缓变伪距偏差时,标准化积累残差矢量 \mathbf{S} 服从 $N(-\sqrt{N}\mathbf{b}_i, 1)$ 的正态分布。则与传统抗差 EKF 方法中的标准化残差均值比为

$$\frac{E(\mathbf{S})}{E(\mathbf{s})} = \frac{\sqrt{N}\mathbf{b}_i}{\mathbf{b}_i} = \sqrt{N} \quad (19)$$

由式(19)可知,在探测粗差率和报警率一定的条件下^[10],基于滑动积累的抗差 EKF 方法和传统抗差 EKF 方法的抗差参数完全相同,但标准化残差的均值增大了近 \sqrt{N} 倍,故其抗差性能增强。

该方法的本质是利用历元间测量残差的不相关性和伪距偏差的相关性,通过 N 个历元的时间积累,将积累残差矢量的方差和均值增大了 N 倍,因此积累残差矢量的标准化残差的伪距偏差相比传统抗差方法的标准化残差增大了近 \sqrt{N} 倍。

2.3 窗口长度的选择

由式(19)可知,窗口长度 N 越大,则抗差性能提升得越明显。但随着 N 的增大,卫星位置与接收机之间相对几何关系的改变,将使得残差协方差矩阵 $D(\mathbf{v}_k)$ 发生明显变化,从而抵消积累的抗差性能,因此,窗口长度的选择应是抗差性能与积累时间的折中。

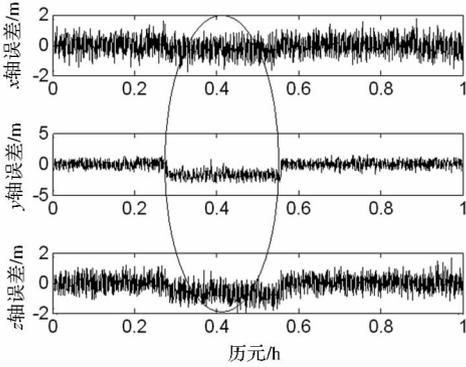
根据文献[5]对 GPS 星座的可视卫星保持不变的持续时间计算结果,可以得到不超过 1min 的处理周期内可视卫星不变的前提是合理的。因此,在计算时间间隔为 1s 的情况下,窗口长度 N 应取 60 以内。

3 仿真验证与分析

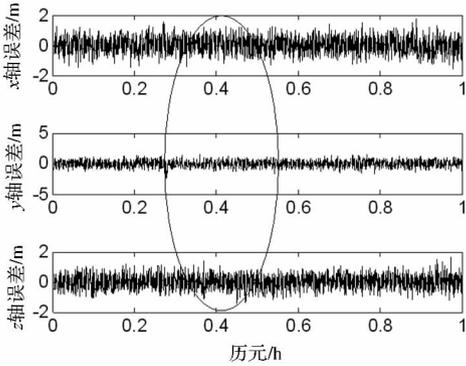
由于在城市、灌木等复杂环境下多径效应会引起接收机很长一段时间的伪距微小偏差^[5],而在组合导航中设备故障又会出现缓变故障的情况^[7-9],因此选择微小伪距偏差和缓变伪距偏差两种条件,采用仿真手段验证基于滑动积累抗差 EKF 方法的有效性。仿真中,选择国际 GPS 地球动力学服务机构的武汉观测站在 2012 年 3 月 11 日 8:00 ~ 9:00 所观测的 GPS 卫星作为星座模型,可视卫星共 8 颗,观测频度为 1Hz,选取伪距观测噪声标准差为 1m,滑动窗口长度为 10。同时取 $k_0 = 2.80$ 、 $k_1 = 3.42$ ^[10]。

3.1 微小伪距偏差

在 1000 ~ 2000s 时间段内,在卫星 2 的伪距上增加 5m 的伪距偏差,分别采用传统的抗差 EKF 方法和基于滑动积累的抗差 EKF 方法作对比,位置估计结果如图 2 所示。图 2 中椭圆所示区域为存在微小伪距偏差的时段。



(a) 抗差 EKF 方法



(b) 基于滑动积累抗差 EKF 方法

图 2 微小伪距偏差条件下的位置误差

Fig.2 Position error under condition of slight pseudo-range error

表 1 给出了添加伪距偏差时间内,两种方法得到的位置误差的均值和标准差。由比较结果可见,由于微小伪距偏差产生的标准化残差较小,传统的抗差 EKF 方法无法消除微小伪距偏差的影响。在存在微小伪距偏差故障时间内,x 轴误差

表 1 微小伪距偏差条件下的误差统计

Tab.1 Error statistics under condition of slight pseudo-range error (m)

| pseudo-range error (m) | | | |
|------------------------|----|--------|-------|
| | 方向 | 平均值 | 标准差 |
| 抗差 EKF 法 | x | -0.288 | 0.472 |
| | y | -1.778 | 0.562 |
| | z | -0.621 | 0.432 |
| 基于滑动积累的抗差 EKF 法 | x | 0.004 | 0.466 |
| | y | -0.003 | 0.493 |
| | z | -0.003 | 0.408 |

均值为 -0.288m,y 轴误差均值为 -1.778m,z 轴误差均值为 -0.621m,明显大于无伪距偏差时段内的位置误差。而基于滑动积累的抗差 EKF 方法则有效地消除了伪距偏差对定位结果的影响,在故障时间内,定位精度变化不大。

3.2 缓慢增长伪距偏差

在 1000 ~ 2000s 时间段内对卫星 2 的伪距添加缓变伪距偏差,伪距偏差的变化速率为 0.01m/s,伪距偏差变化曲线如图 3 所示。采用两种方法得到的位置误差如图 4 所示。图 4 中椭圆所示区域为存在缓变增长伪距偏差的时段。

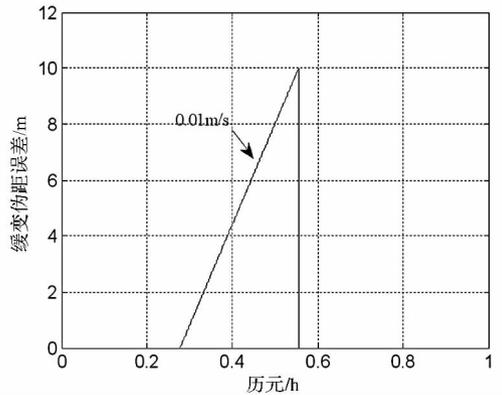
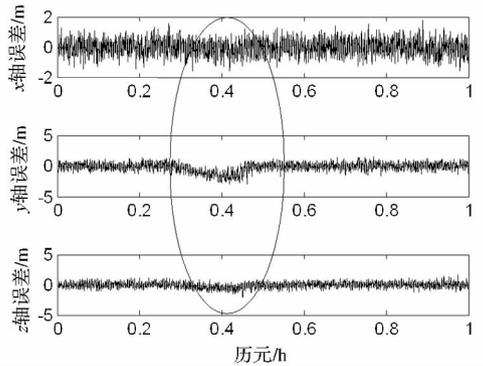
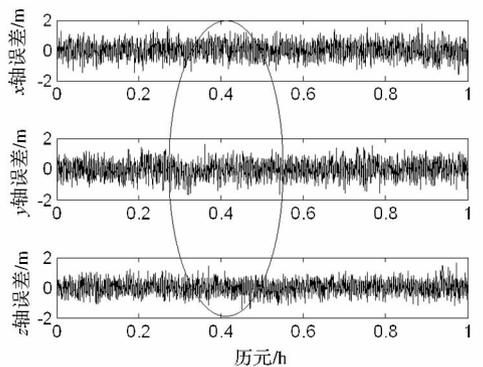


图 3 缓变伪距偏差变化曲线

Fig.3 Curve of slowly growing pseudo-range error



(a) 抗差 EKF 方法



(b) 基于滑动积累抗差 EKF 方法

图 4 缓变伪距偏差条件下的位置误差

Fig.4 Position error under condition of slowly growing pseudo-range error

根据表2给出的缓变伪距偏差时间内两种方法位置误差的均值和标准差可以得出:对于抗差EKF方法,当缓变伪距偏差较小时,无法对该伪距观测值作抗差处理,但是当伪距偏差增大到一定程度时,位置误差开始逐步减小,即抗差性能存在明显的延迟性,并且位置误差也明显增大。而基于滑动积累的抗差EKF方法,能较快抵抗缓变伪距偏差对定位精度的影响,抗差效果十分明显。

表2 缓变伪距偏差位置误差统计

Tab.2 Error statistics under condition of slowly growing pseudo-range error (m)

| | 方向 | 平均值 | 标准差 |
|-----------------|----|--------|-------|
| 抗差 EKF 法 | x | -0.087 | 0.470 |
| | y | -0.705 | 0.827 |
| | z | -0.251 | 0.460 |
| 基于滑动积累的抗差 EKF 法 | x | 0.003 | 0.465 |
| | y | -0.007 | 0.507 |
| | z | -0.004 | 0.411 |

4 结束语

由于实际应用中存在由若干因素导致的微小缓变伪距偏差,使得导航定位精度明显下降,而传统的抗差EKF算法无法有效减弱这类缓变伪距偏差的影响,因而提出了一种基于滑动积累的抗差EKF方法,通过滑动窗口内多个历元残差的积累,增大了积累残差矢量的标准化残差的伪距偏差,从而提高了抗差能力。仿真算例表明,本文提出的算法可以有效抵消微小伪距偏差和缓变伪距偏差的影响,显著提高定位精度。

同时,还需要指出采用本文方法将会降低处理较大伪距异常时的算法实时性,因此工程中建议与传统方法结合,提高较大伪距异常故障时的处理速度。

参考文献 (References)

[1] Kaplan E D. Understanding GPS: principals and applications[M]. 2nd ed. MA: Artech House, 2006.

[2] 徐肖豪, 杨传森, 刘瑞华. GNSS 用户端自主完好性监测研究综述[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 451-463.

XU Xiaohao, YANG Chuansen, LIU Ruihua. Review and prospect of GNSS receiver autonomous integrity monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 451-463. (in Chinese)

[3] Bhatti U I, Ochieng W Y. Failure modes and models for integrated GPS/INS system[J]. Journal of Navigation, 2007 (60): 327-348.

[4] Bhatti U I, Ochieng W Y, Feng S J. Performance of rate detector algorithms for an integrated GPS/INS system in the presence of slowly growing error[J]. GPS Solutions, 2012, 16(3): 293-301.

[5] 刘文祥, 李峥嵘, 王飞雪. 一种可检测和改正微小慢变伪距偏差的新 RAIM 方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1024-1029.

LIU Wenxiang, LI Zhengrong, WANG Feixue. A new RAIM method for detecting and correcting weak pseudo-range bias under gradual change[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 1024-1029. (in Chinese)

[6] 甘兴利. GPS 局域增强系统的完善性监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

GAN Xingli. Research on the integrity monitoring of GPS local area augmentation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)

[7] Liu H, Ye W, Wang H. Integrity monitoring using ERAIM for GNSS/inertial system[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2012, 84(5): 287-292.

[8] Kuusniemi H, Wieser A, Lachapelle G, et al. User-level reliability monitoring in urban personal satellite-navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4): 1305-1318.

[9] Fallahi K, Chi-Tsun C, Fattouche M. Robust positioning systems in the presence of outliers under weak GPS signal conditions[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(3): 401-413.

[10] 许长辉, 高井祥, 王坚. GNSS/INS 组合系统的抗差卡尔曼滤波[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 773-778.

XU Changhui, GAO Jingxiang, WANG Jian. Robust Kalman filtering of GNSS/INS integrated system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(5): 773-778. (in Chinese)

[11] 王坚, 刘超, 高井祥, 等. 基于抗差 EKF 的 GNSS/INS 紧组合算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 596-600.

WANG Jian, LIU Chao, GAO Jingxiang, et al. GNSS/INS tight coupled navigation model based on robust EKF[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5): 596-600. (in Chinese)

[12] 苗岳旺, 孙付平, 李飞, 等. 基于抗差 EKF 的 INS/GNSS 紧组合算法应用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(3): 97-101.

MIAO Yuewang, SUN Fuping, LI Fei, et al. Research on application of tightly coupled INS/GNSS based on robust extended Kalman filter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(3): 97-101. (in Chinese)

[13] Kay S M. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)