

基于抗差 EKF 的机载单站无源定位算法

张艺航, 陈树新, 吴昊, 张衡阳

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 机载单站无源测向定位中,若观测值中存在异常误差,采用 EKF 算法会导致定位结果有偏。为增强算法抗差性,将抗差 EKF 算法引入到机载单站无源测向定位中。首先,建立了机载单站无源测向定位模型,依据标准化观测残差构建了抗差等价权矩阵,对异常观测进行降权处理。其次,针对抗差 EKF 算法效率低的特点,构建了卡方统计量,提出了基于卡方检验的抗差 EKF 定位算法,即先利用卡方检验判别出含异常误差的观测值,再调用抗差 EKF 算法进行定位解算。最后,通过在观测值中加入单个异常误差和连续异常误差,测试了算法对不同异常误差的抵抗能力。仿真表明,抗差 EKF 算法能较好地削弱异常误差对位置估值的影响,并且基于卡方检验的抗差 EKF 定位算法能提高定位的效率。

关键词 无源定位;单站定位;抗差 EKF 滤波;定位精度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.018

中图分类号 TN971 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0075-04

Airborne Single-Observer Passive Location Algorithm Based on Robust EKF

ZHANG Yi-hang, CHEN Shu-xin, WU Hao, ZHANG Heng-yang

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In the application of airborne single-observer passive wireless radio frequency injection location, if there has outliers in the observed value, the application of the EKF algorithm will make the location estimation biased. Therefore, a robust EKF algorithm is applied to airborne single-observer passive wireless radio frequency injection location system. Firstly, airborne single-observer passive bearing location model is build, and the robust equivalent weight matrix built by standardized observation residuals is used to resist outliers. Then, in order to improve the efficiency of passive location system, the robust EKF based on chi-square test is proposed by creating a chi-square statistical model. It can distinguish outliers through chi-square test, and then call the robust EKF to complete location solution. Through rejecting single outlier and continuing outliers to test the ability of the algorithm. Simulation result shows that the suggested algorithm has great outlier suppression ability and the robust EKF based on chi-square test is fast.

Key words: passive location; single-observer location; robust extended Kalman filter; location accuracy

机载单站无源定位隐蔽性强,灵活性好,在电子对抗等领域有着广阔的应用前景^[1-2]。在一些复杂

收稿日期:2013-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202490);陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8010)

作者简介:张艺航(1990-),女,山西长治人,硕士生,主要从事机载无源定位研究.E-mail:zhang_yi_hang@126.com

引用格式:张艺航,陈树新,吴昊,等.基于抗差 EKF 的机载单站无源定位算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):75-78 [J].
Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 75-78.

环境中,角度可能是探测设备唯一能得到的观测信息,因此研究基于角度信息的机载单站无源定位有着重要意义^[3,4]。

常用的定位算法有最小二乘法、卡尔曼滤波法等。最小二乘法及其改进算法在测向定位中有广泛的应用,如线性加权最小二乘法、总体最小二乘法等,这些方法对克服服从零均值正态分布的随机误差有一定的作用,但当观测值中存在异常误差时,会对定位精度产生较大影响。为解决这些问题,文献[1]将抗差估计理论引入到最小二乘法的改进算法中,提高了算法的抗异常误差能力,但并没有考虑到动态载体的状态方程。考虑系统的状态方程,可以采用卡尔曼滤波算法,文献[5]提出了抗差卡尔曼滤波、秩亏模型的卡尔曼滤波、抗差自适应卡尔曼滤波等算法,将抗差估计理论引入了标准卡尔曼滤波及其改进算法中。但目前这些算法多应用于卫星钟差拟合与估计^[6]、精密单点定位^[7]、组合导航^[8]等方面。而在无源定位算法方面,利用抗差估计原理提高算法抗异常误差能力的研究较少。而且将抗差EKF算法应用于机载无源测向定位中需要考虑到定位效率的问题。为此,需要进一步的研究定位算法的抗差性和有效性。

针对以上问题,将抗差EKF算法应用于机载单站无源测向定位中。并构建卡方统计量,提出了基于卡方检验的抗差EKF定位算法。最后通过仿真实验验证了算法的性能。

1 机载单站无源测向定位模型

为方便计算,以二维机载单站无源测向定位模型为例进行分析,建立了定位模型的状态方程和观测方程,并对观测方程进行了线性化处理。见图1,目标辐射源T位于 (x_t, y_t) 。令飞机从原点出发,做速度为 v 的匀速直线运动并测向,飞机第 k 个观测点的坐标为 (x_k, y_k) , φ_k 为第 k 个观测点测得的方位角。

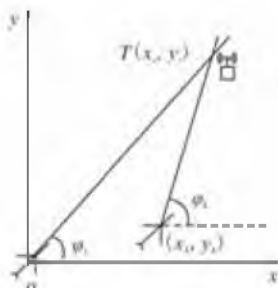


图1 定位模型

Fig. 1 Location model

以飞机为参考系,目标辐射源的状态方程为:

$$\mathbf{X}(k) = \Phi \mathbf{X}(k-1) + \Gamma \mathbf{W}(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{W}(k) \sim N(0, \mathbf{Q})$; $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}(k), \dot{\mathbf{x}}(k),$

$\mathbf{y}(k), \dot{\mathbf{y}}(k)]^T = [\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_k, -v_x, \mathbf{y}_t - \mathbf{y}_k, -v_y]^T$;

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \Gamma = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix}.$$

机载单站无源测向定位的观测方程可表示为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{h}[k, \mathbf{X}(k)] + \mathbf{V}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{V}(k) \sim N(0, \mathbf{R})$, $\mathbf{Z}(k) = \varphi_k$, $\mathbf{X}(k) =$

$[\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_k, -v_x, \mathbf{y}_t - \mathbf{y}_k, -v_y]^T$, $\mathbf{h}[k, \mathbf{X}(k)] = \arctan \left[\frac{\mathbf{y}_t - \mathbf{y}_k}{\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_k} \right]$ 。

以飞机为参考系时,定位模型转换为固定单站对匀速运动的目标辐射源进行跟踪的问题,可以利用卡尔曼滤波进行解算。

从式(1)和式(2)可看出,定位系统的状态方程是线性方程,观测方程则是非线性的。扩展卡尔曼滤波通过对非线性系统进行线性近似,有效解决非线性问题,得到较优的状态估值。利用EKF算法^[9],可得到定位系统的线性化观测矩阵:

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{Z}(k)}{\partial \mathbf{X}(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{Z}(k)}{\partial \mathbf{x}(k)} & \frac{\partial \mathbf{Z}(k)}{\partial v_x} & \frac{\partial \mathbf{Z}(k)}{\partial \mathbf{y}(k)} & \frac{\partial \mathbf{Z}(k)}{\partial v_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(y_t - y_k)}{(x_t - x_k)^2 + (y_t - y_k)^2}, 0, \frac{-(x_t - x_k)}{(x_t - x_k)^2 + (y_t - y_k)^2}, 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 抗差扩展卡尔曼滤波算法

2.1 抗差EKF滤波算法

抗差EKF的过程包括构建等价增益矩阵和迭代解算。抗差估计的关键是构造恰当的等价权函数,使得当出现异常观测数据时,权值减小甚至为0,以降低异常数据对估值的影响。抗差估计中常用的等价权函数有Huber权函数、丹麦权函数、IGG I权函数、IGG III权函数等。选取IGG III权函数为等价权函数,即:

$$\tilde{p}_i = \begin{cases} 1, & |\tilde{s}_i| \leq k_1 \\ \frac{k_1}{|\tilde{s}_i|} \left[\frac{k_2 - |\tilde{s}_i|}{k_2 - k_1} \right]^2, & k_1 < |\tilde{s}_i| \leq k_2 \\ 0, & |\tilde{s}_i| > k_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \tilde{s}_i 为第 i 个观测值的标准化残差; $\tilde{s}_i = \mathbf{s}_i / \sigma_v$; σ_v 为残差的标准差,可以通过先验方式计算得出。

k_1, k_2 为常数,通常取 $k_1 \in [1.0, 1.5], k_2 \in [2.5, 8.0]$ 。 k_1, k_2 反映了算法对异常数据的敏感度,取值过大,可能包含过多异常观测;过小则不能充分利用优质的观测数据,反而导致定位精度降低。因此,取 $k_1 = 1.2, k_2 = 4.0$ 。

状态参数抗差解 $\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1)$ 、其协方差矩阵 $\mathbf{P}(k+1|k+1)$ 及抗差 EKF 增益 $\mathbf{K}_{\text{MLS}}(k+1)$ 为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}_{\text{MLS}}(k+1)$$

$$(\mathbf{Z}(k+1) - \hat{\mathbf{Z}}(k+1)) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\text{MLS}}(k+1)\mathbf{H}(k+1)] \mathbf{P}(k+1|k) \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{\text{MLS}}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)$$

$$[\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}]^{-1} \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{Z}}(k+1) = h[k, \hat{\mathbf{X}}(k+1|k)]$; $\mathbf{R} = [\mathbf{R}\mathbf{P}_k]^{-1}$;

\mathbf{P}_k 为等价权矩阵,此处为一维; \mathbf{I} 为单位阵。

当观测值中存在异常误差时,算法能通过抗差等价增益矩阵对异常数据进行降权处理,从而减小异常数据对定位估值的影响。

2.2 基于卡方检验的抗差 EKF 算法

测向定位中,观测残差向量为:

$$\mathbf{V}(k+1) = \hat{\mathbf{Z}}(k+1) - \mathbf{Z}(k+1) \quad (8)$$

式中: $\hat{\mathbf{Z}}(k+1) = h[k, \hat{\mathbf{X}}(k+1|k)]$ 。

由于各观测值统计独立,则统计量^[10]:

$$\epsilon(k+1) = \sum_i \left[\frac{\mathbf{V}_i(k+1)}{\sqrt{\Sigma_{ii}(\mathbf{V}(k+1))}} \right]^2 = \mathbf{V}^T(k+1)\Sigma(\mathbf{V}(k+1))^{-1}\mathbf{V}(k+1) \quad (9)$$

服从自由度为 1 的 χ^2 分布。式中: $\mathbf{V}_i(k+1)$ 为第 i 个观测残差; $\Sigma_{ii}(\mathbf{V}(k+1))$ 为 $\mathbf{V}(k+1)$ 的协方差矩阵的第 i 行 i 列的元素。

$$\begin{aligned} \Sigma(\mathbf{V}(k+1)) &= \mathbf{E}(\mathbf{V}(k+1)\mathbf{V}^T(k+1)) = \\ &\mathbf{H}(k+1)\mathbf{E}(\hat{\mathbf{X}}(k+1)\hat{\mathbf{X}}^T(k+1))\mathbf{H}(k+1) + \\ &\mathbf{E}(\mathbf{Z}(k+1)\mathbf{Z}^T(k+1)) = \\ &\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k+1)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R} \end{aligned} \quad (10)$$

观测值中不存在异常误差时,观测残差 $\mathbf{V}(k+1)$ 服从零均值正态分布, $\epsilon(k+1)$ 服从中心 χ^2 分布,自由度为 1;反之,观测值中存在异常误差时,观测残差 $\mathbf{V}(k+1)$ 均值不为零, $\epsilon(k+1)$ 服从自由度为 1 的非中心 χ^2 分布。

检验方法为:原假设 H_0 : 观测值中无异常误差;备选假设 H_1 : 观测值中存在异常误差。显著性水平为 α ,若 $\epsilon(k+1) \leq \chi_{\alpha}^2(1)$,则接受 H_0 假设,检验通过;反之,接受 H_1 假设,拒绝 H_0 假设。其中, $\chi_{\alpha}^2(1)$ 为 $\chi^2(1)$ 分布的上 α 分位数。

观测值中可能存在异常误差时,先采用上述方法进行检验,如果存在异常误差,进行抗差迭代,得到准确的定位估值;如果不存在异常误差,则不再进行抗差迭代,以 EKF 算法得到的位置估值作为定位结果。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

仿真参数设置如下:某辐射源目标 T 位于 (5 km, 10 km),飞机以 600 m/s 的速度从 (0, 0) 出发,向 x 正半轴运动并测向,测量周期为 1 s,测量噪声服从均值为 0,标准差为 0.1° 的正态分布。为加快定位速度和保证抗差 EKF 算法收敛,设目标位置的递推估计初值由前几次的测量值计算得出。 \mathbf{P} 矩阵初始值 $\mathbf{P}(0|0) = \text{diag}(10^6, 0, 10^6, 0)$,以飞机为参考系时,目标速度已知,则速度初始方差设为 0。改进 EKF 算法中,取显著性水平 $\alpha = 0.005$,则查表可得,判决门限 $\chi_{\alpha}^2(1) = 7.879$ 。为准确分析算法性能,进行多次 Monte-Carlo 仿真,采用 RMSE 性能指标,即:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [(x_i - \hat{x}_k - x_i)^2 + (y_i - \hat{y}_k - y_i)^2]} \quad (11)$$

式中 M 为 Monte-Carlo 仿真次数。本文取 M 为 200,仿真时间为 200 s。

3.2 仿真实验及结果分析

仿真实验 1: EKF 算法和最小二乘法性能的比较,见图 2。

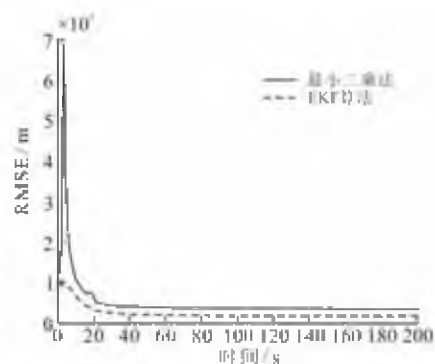


图 2 EKF 算法和最小二乘法性能比较

Fig. 2 Comparison of EKF algorithm and LS algorithm

结果分析:从图 2 中可以看出,EKF 算法的定位精度和收敛速度均优于最小二乘法,收敛后,二者定位精度相差 150 m 左右。这是由于 EKF 算法考虑了系统的状态方程,可获得更多的信息,从而得到更精确的位置估值。

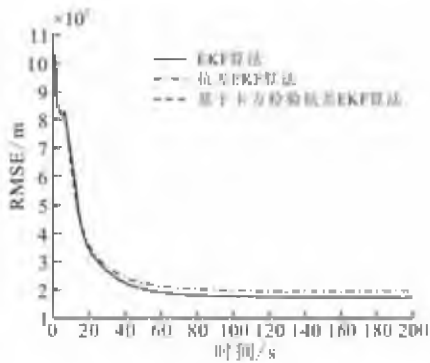


图3 算法性能比较(无异常误差)

Fig. 3 Comparison of algorithm performance (no outliers)

仿真实验2: 观测值无异常误差时, EKF算法、抗差 EKF算法和基于卡方检验的抗差 EKF算法性能的比较, 见图3。从图3可看出, 无异常误差时, 随着观测时间的增加, EKF算法和抗差 EKF算法都逐渐收敛。具体来看, 抗差 EKF滤波算法收敛速度比 EKF算法慢, 且收敛后定位精度低于 EKF算法, 两种算法的定位精度约有 20 m 的差异。这是由于抗差 EKF算法对每一时刻的观测值都进行抗差迭代, 使得解算时间较长且降低了定位精度, 二者定位精度约有 20 m 的差异。而基于卡方检验的 EKF算法与 EKF算法性能相近, 二者收敛速度和定位精度均优于抗差 EKF算法, 二者定位精度约有 3 m 的差异。由此可以看出, 在无异常误差时, 相比抗差 EKF算法, 基于卡方检验的抗差 EKF算法能提高定位精度和收敛速度。

仿真实验3: 在观测值中加入单个异常误差和连续异常误差, 异常误差设定^[11]见表1, EKF算法、抗差 EKF算法和基于卡方检验的抗差 EKF算法性能的比较, 见图4。

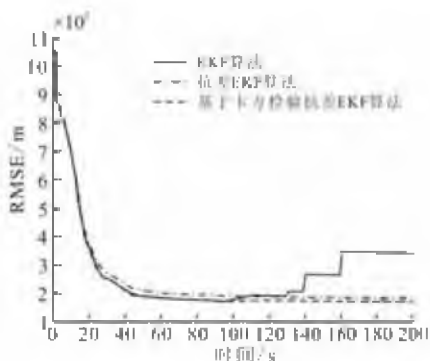


图4 算法性能比较(有异常误差)

Fig. 4 Comparison of algorithm performance (have outliers)

表1 异常误差的设定

Tab.1 Outliers setting

观测点/s	100~110	130	140	160
异常误差	5σ	10σ	20σ	25σ
标准差设定				

结果分析: 由图4可看出, 未加入异常误差时, 基于卡方检验的抗差 EKF算法性能与 EKF算法性能相近, 二者性能均优于抗差 EKF算法; 在 $T=100 \sim 110$ s 加入连续异常误差时, EKF算法受到异常误差影响, 算法收敛速度变慢, 而抗差 EKF算法与基于卡方检验的抗差 EKF算法受影响较小, 且普通算法与抗差算法定位精度约有 100 m 的差异。在 $T=130$ s, 140 s, 160 s 处分别加入单个异常误差时, EKF算法受到异常误差影响, 定位精度降低, 收敛速度变慢, 与抗差 EKF算法和和改进了的抗差 EKF算法相比, 定位精度约有上百米的差异; 尤其是 $T=160$ s 处加入大异常误差时, EKF算法受影响很大, 发生严重扭曲, 而抗差 EKF算法与基于卡方检验的抗差 EKF算法对异常数据进行了抗差迭代, 即对异常观测值进行降权或者剔除, 减小其对定位估值的影响, 使得算法能较好地收敛, 且有较高的定位精度。总的来看, 抗差的算法能较好地削弱异常误差对位置估值的影响, 保证算法的性能; 而基于卡方检验的抗差 EKF算法性能又优于抗差 EKF算法, 这是由于改进的抗差 EKF算法结合统计模型, 构造了统计检验量并进行了判决, 提高了算法的效率, 使得算法有更快的收敛速度和更高的定位精度。

4 结语

本文将抗差 EKF算法应用于机载单站无源定位, 并提出了基于卡方检验的抗差 EKF算法。仿真表明, 该算法能抵抗异常误差的影响, 有较好的定位性能。在状态方程与载体运动轨迹间存在显著异常和观测方程、状态方程都受到异常误差影响的情况下, 无源定位估值也会受到较大影响, 进而产生偏差, 下一步将考虑这些复杂环境, 进一步提高算法的鲁棒性。

参考文献 (References):

- [1] 吴昊, 陈树新, 张衡阳. 基于递推总体最小二乘的机载单站无源定位算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(1): 62-65.

WU Hao, CHEN Shuxin, ZHANG Hengyang. Recursive total least squares-based airborne single-observer passive location algorithm[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(1): 62-65. (in Chinese)

(下转第 87 页)

- [4] YE Saizhi, YAO Guoxiang, GUAN Quanlong. A multiple secret sharing scheme with general access structure[C]//2009 international symposium on intelligent ubiquitous computing and education. Chengdu: IEEE computer science, 2009: 461-464.
- [5] 李慧贤, 庞辽军. 基于双线性变换的可证明安全的秘密共享方案[J]. 通信学报, 2008, 29(10): 45-50.
LI Huixian, PANG Liaojun. Provably secure secret sharing scheme based on bilinear maps[J]. Journal on communications, 2008, 29(10): 45-50. (in Chinese)
- [6] Wu TsuYang, Tseng Yuh-Min. A pairing-based publicly verifiable secret sharing scheme[J]. Journal of systems science and complexity, 2011, 24(1): 186-194.
- [7] Somayeh Heidarvand, Jorge L Villar. Public verifiability from pairings in secret sharing schemes[J]. Lecture notes in computer science, 2009, 5381(1): 294-308.
- [8] 黄伟达, 姚国祥, 沈瑞雪. 基于双线性对的动态门限多秘密共享方案[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 901-905.
HUANG Weida, YAO Guoxiang, SHEN Ruixue. Dynamic threshold multi-secret sharing scheme based on bilinear pairing[J]. Computer engineering and design, 2012, 33(3): 901-905. (in Chinese)
- [9] Koblitz N. Elliptic curve cryptosystems[J]. Mathematics of computation, 1987, 48: 203-209.
- [10] 庞辽军, 王育民. 基于 RSA 密码体制 (t, n) 门限秘密共享方案[J]. 通信学报, 2005, 26(6): 70-73.
PANG Liaojun, WANG Yumin. (t, n) threshold secret sharing scheme based on RSA crypto system[J]. Journal of China institute of communications, 2005, 26(6): 70-73. (in Chinese)
- [11] 黄东平, 刘铎, 王道顺, 等. 一种安全的门限多秘密共享方案[J]. 电子学报, 2006, 34(11): 1937-1940.
HUANG Dongping, LIU Duo, WANG Daoshun, et al. A secure threshold multi-secret sharing scheme[J]. Acta electronica sinica, 2006, 34(11): 1937-1940. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

(上接第 78 页)

- [2] LIU Zhong, HE Jingbo. Passive location algorithm using kushner equation[J]. Journal of theoretical and applied information technology, 2013, 47(7): 229-232.
- [3] 吴昊, 陈树新, 侯志强, 等. 一种鲁棒的约束总体最小二乘定位算法[J]. 上海交通大学学报: 自然科学版, 2013, 47(7): 1114-1118.
WU Hao, CHEN Shuxin, HOU Zhiqiang, et al. A robust constrained total least squares algorithm for passive location[J]. Journal of Shanghai jiaotong university: natural science edition, 2013, 47(7): 1114-1118. (in Chinese)
- [4] ZHOU Y, LI J X. Collaborative maneuvering target tracking in wireless sensor network with quantized range-only measurements[J]. IEEE signal processing letters, 2009, 17(2): 157-160.
- [5] 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 publishing house, 2006. (in Chinese)
- [6] HUANG G, ZHANG Q. Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust Kalman filter with classified adaptive factors[J]. GPS solution, 2012, 16(4): 531-539.
- [7] 聂建亮, 张双成. 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(6): 218-220.
NIE Jianliang, ZHANG Shuangcheng. Precise point positioning based on robust Kalman filtering [J]. Journal of earth sciences and environment, 2010, 32(6): 218-220. (in Chinese)
- [8] 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, 2011, 36(5): 596-600.
WANG Jian, LIU Chao, GAO Jingxiang, et al. GNSS/INS tightly coupled navigation model based on robust EKF[J]. Geomatics and information science of Wuhan university, 2011, 36(5): 596-600. (in Chinese)
- [9] YANG Ji. The EKF sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor adaptive back stepping control system[C]//Applied mechanics and mechanical engineering III. Wuhan: [s.n.] 2013: 1166-1172.
- [10] Bhatti U I, Ochieng W Y, FENG Shaojun. Integrity of an integrated GPS/INS system in the presence of slowly growing errors. part I: a critical review [J]. GPS solution, 2007, 11(3): 173-181.
- [11] 周彦, 李建勋, 王冬丽. 传感器网络中鲁棒状态信息融合抗差卡尔曼滤波器[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 291-297.
ZHOU Yan, LI Jianxun, WANG Dongli. Anti-outlier Kalman filter-based robust estimation fusion in wireless sensor networks[J]. Control theory & applications, 2012, 29(3): 291-297. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)