

面向无线传感器网络节点定位的自适应卡尔曼滤波算法收敛条件分析

李 迅 王建文 李洪峻 马宏绪

(国防科技大学机电工程与自动化学院自动控制系 长沙 410073)

摘 要 分析了新息序列是有色噪声时自适应卡尔曼滤波算法(Adaptive Kalman Filter, AKF)的滤波效果,在范数意义下,证明了 k 时刻 AKF 算法中估计误差协方差矩阵和 k 时刻最优 KF 算法中估计误差协方差矩阵间距离与新息序列相关性成正比。利用上述结论,证明了所有 AKF 算法中估计误差协方差矩阵必逐渐远离 1 时刻最优 KF 算法中估计误差协方差矩阵。总结上述结论,发现 AKF 算法收敛条件可描述成以下几个等价命题:1)AKF 算法中估计误差协方差矩阵与 1 时刻最优 KF 算法中估计误差协方差矩阵差有极限;2) k 时刻 AKF 算法中估计误差协方差矩阵和 k 时刻最优 KF 算法中估计误差协方差矩阵间距离极限是 0;3)AKF 算法渐进收敛于 k 时刻最优 KF 算法;4)AKF 算法中新息序列渐进收敛于白噪声序列;5) k 时刻 AKF 算法中滤波增益矩阵与 k 时刻最优 KF 算法中滤波增益矩阵间距离极限是 0。上述理论为最终解决复杂环境下无线传感器网络节点定位问题奠定了基础。

关键词 无线传感器网络,节点定位,自适应卡尔曼滤波算法,滤波性能分析,滤波收敛性

Convergence of Locating Nodes' Positions in Wireless Sensor Networks in a Complex Environment

LI Xun WANG Jian-wen LI Hong-jun MA Hong-xu

(Department of Automatic Control, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The filtering effects are analyzed when the innovations' series in an adaptive Kalman filter(AKF) is colored noise. Taken the matrix norm as a tool, it is proved that at time k , the distance between the covariance matrix in the AKF and the covariance matrix in the k th optimal KF is in proportion to the innovations' correlation. Then, it is derived that covariance matrices in all AKFs are gradually away from the covariance matrix in the 1th optimal KF based on the above-mentioned conclusions. At last, it is summarized that convergent conditions of AKFs are: 1 The difference between the covariance matrix in an AKF and the covariance matrix in the 1th optimal KF has limit value; 2 At time k , the limit value of the distance between the covariance matrix in an AKF and the covariance matrix in the k th optimal KF is zero; 3 The AKF is gradually convergent to the k th optimal KF; 4 The innovations' series is gradually convergent to white noise; 5 At time k , the limit value of the distance between the gain matrix in an AKF and the gain matrix in the k th optimal KF is zero. These theories found groundworks for perfectly locating nodes' positions in wireless sensor networks.

Keywords Wireless sensor network, Localization, Adaptive kalman filter, Filtering effect, Filtering convergence

1 引言

近十年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)节点定位问题已被广泛研究。Capkun 等人提出了 SPA(Self-Positioning Algorithm)相对定位算法^[1]。SPA 算法首先建立局部坐标系,然后通过节点间信息交换与协调建立全局坐标系,从而实现相对定位。Iyengar 等人提出了一种基于聚类的定位算法^[2]。该算法首先选择多个区域分别建立局部坐标系,以某一局部坐标系为参考坐标系建立全局坐标系。文献^[3]中提出了一种通过对多次测距结果求平均值来减小测距误差的算法,但这种方法仅适用于节点静止、测量噪声是平稳白噪声情况。Savvides 等人提出了 NHMP(N-hop Multilateration Primitive)定位算法^[4]。NHMP 算法研究了 WSN 拓扑结构重构条件,并使用广义卡尔曼滤波算法(Extended Kalman Filter, EKF)提高定位精度。文献^[5]中的 MDS-MAP 算法应用 MDS 技术把节点间距离矩阵变换为 2 维或 3 维相对坐标系,根据锚节点信息将相对坐标系变换为

绝对坐标系,从而实现定位。Taylor 等人利用贝叶斯滤波算法框架来同时估计动态节点和静态节点位置^[6]。上述定位算法受到以下一个或多个假设条件限制:1)WSN 节点是静态的;2)距离测量值噪声较小;3)需要大量节点位置已知;4)噪声协方差矩阵已知。

WSN 应用环境大多在复杂、恶劣的环境下。复杂环境中,WSN 节点将受到统计特性未知的随机扰动影响,此时,上述假设很难成立,文献^[1-6]中算法不能直接应用。分析发现,随机扰动统计特性未知时的 WSN 节点定位问题可归结为基于自适应卡尔曼滤波算法(Adaptive Kalman Filter, AKF)^[7-17]的状态估计问题,目前,常见的 AKF 算法有:基于渐消因子的 AKF 算法^[7-10];基于噪声协方差矩阵估计的 AKF 算法^[11-14];基于滤波增益矩阵估计的 AKF 算法^[15-17]等。显然,上述 AKF 算法滤波效果影响着 WSN 节点定位精度,因此,有必要研究 AKF 算法的收敛性。在实际应用中,文献^[18]指出 SHAKF(Sage-Husa Adaptive Kalman Filter, SHAKF)算法^[7,13]经常存在结果偏移现象,甚至发散^[19];文

献[20]指出 SHAKF 算法同时估计未知的系统噪声协方差矩阵和观测噪声协方差矩阵将会造成滤波发散;文献[21]指出滤波初值对 SHAKF 算法收敛性影响较大,不恰当的滤波初值会导致 SHAKF 算法发散。这些论断从实际应用角度说明 AKF 算法在某些情况下会发散。

构造 AKF 算法的目的是提高滤波精度,显然,AKF 算法发散与 AKF 算法的构造初衷相悖。如何从理论上评价 AKF 算法收敛性? AKF 算法收敛条件是什么?能否基于 AKF 算法收敛条件校正 AKF 算法,以保证 AKF 算法收敛,并提高 AKF 算法滤波估计精度?目前,这些问题既困扰着 AKF 算法的实际应用又困扰着 AKF 算法理论的进一步发展。为了丰富和完善 AKF 算法理论,本文将对上述问题进行深入研究。

2 KF 算法介绍及其性质

考虑时变线性离散随机系统

$$\begin{cases} x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + w_{k-1} \\ y_k = H_k x_k + v_k \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $x_k \in R^n$, $y_k \in R^m$, k 是离散时间, Φ_k 和 H_k 是已知时变矩阵, Φ_k 满秩, H_k 行满秩, w_k 和 v_k 是相互独立的零均值白噪声,其协方差矩阵分别是 $D(w_k) = Q$, $D(v_k) = R$ 。

给定滤波初值 \bar{x}_0 , P_0 , 且满足 $E[\bar{x}_0] = E[x_0]$, $E[(x_0 - \bar{x}_0)(x_0 - \bar{x}_0)^T] = P_0$, 则相应的 KF 算法是

$$\begin{cases} \bar{x}_k = \bar{x}_{k|k-1} + K_k \varepsilon_k \\ \varepsilon_k = y_k - H_k \bar{x}_{k|k-1} \\ \bar{x}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \bar{x}_{k-1} \\ P_{k|k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q \\ K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} \\ P_k = (I_n - K_k H_k) P_{k|k-1} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, T 是矩阵转置符号, I_n 是 $n \times n$ 单位矩阵, ε_k 称为消息, $E[(x_k - \bar{x}_{k|k-1})(x_k - \bar{x}_{k|k-1})^T] = P_{k|k-1}$, $E[(x_k - \bar{x}_k)(x_k - \bar{x}_k)^T] = P_k$ 。

性质 1 KF 算法最优的充要条件是其滤波增益矩阵满足 $K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}$ 。

把性质 1 作为 AKF 算法构造条件,文献[7,9,10,12]中构造了几种 AKF 算法,这些 AKF 算法的优点在于:若能准确估计出噪声协方差矩阵,则它们将收敛于最优 KF 算法。遗憾的是,这些 AKF 算法的收敛性证明仍是一个难题。

性质 2 KF 算法最优的充要条件是其新息序列是零均值白噪声。

对于其他一些 AKF 算法,它们不估计噪声协方差矩阵,而是以性质 2 为条件,通过假设检验方法不断调整滤波初值(或其他滤波参数),如文献[5,6]中构造的 AKF 算法就属于此类算法。由于性质 2 仅作为 AKF 算法最优性的检验条件,因此,这些算法的收敛性更难保证。

由此可见,无论是以性质 1 还是性质 2 作为 AKF 算法构造条件,所构造的 AKF 算法的收敛性都很难保证,另外,即使某些 AKF 算法收敛,我们也不清楚它们以何种趋势收敛、它们的估计误差协方差矩阵变化情况如何、这些 AKF 算法的滤波性能是否可以进一步提高。这些问题都是现有的 AKF 算法理论所无法回答的,因此,目前 AKF 算法还缺少必要的理论支撑,AKF 算法理论有待于进一步完善。

性质 3 若 $P_{k-1,1} > P_{k-1,2}$, 则 $P_{k,1} > P_{k,2}$ 。

定义 k 时刻最优 KF 算法指: k 时刻前,该 KF 算法是次优的,从 k 时刻开始,该 KF 算法是最优的。

3 AKF 算法性质及其收敛条件

若新息序列是零均值白噪声,则由性质 2 知,此时,AKF 算法将收敛于 k 时刻最优 KF 算法,但是,当新息序列是有色噪声时, k 时刻 AKF 算法与 k 时刻最优 KF 算法间滤波效果差别如何?新息序列间相关性大小对 AKF 算法滤波效果到底影响到什么程度?若 AKF 算法滤波效果与新息序列有色存在确定性对应关系,则显然可以通过调整新息序列相关性来提高 AKF 算法滤波效果。经研究发现,在范数意义下,AKF 算法滤波效果与新息序列有色间的关系可用下述定理描述。

定理 1 设 $P_{k|k-1} H_k^T - \hat{K}_k (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R) = \Delta$, 则

$$\begin{aligned} & \frac{\|\Delta\|}{\|H_k^T\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|} \leq \\ & \|\hat{P}_k - P_k\| \leq \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\| \\ & \|\Delta\| \|H_k P_{k|k-1} H_k^T + R\|^{-1} \leq \\ & \|K_k - \hat{K}_k\| \leq \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}\| \end{aligned}$$

注:定理 1 中, \hat{K}_k 是 AKF 算法中滤波增益矩阵, $\|\cdot\|$ 是矩阵范数符号。

证明:由 k 时刻最优 KF 算法知

$$P_{k|k-1} H_k^T - K_k (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R) = 0 \quad (3)$$

因此,有

$$\begin{aligned} & P_{k|k-1} H_k^T - \hat{K}_k (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R) - P_{k|k-1} H_k^T + \\ & K_k (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R) = (K_k - \hat{K}_k) (H_k P_{k|k-1} H_k^T + \\ & R) = \Delta \end{aligned} \quad (4)$$

变形式(4),得

$$(K_k - \hat{K}_k) = \Delta (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} \quad (5)$$

因此,有

$$(K_k - \hat{K}_k) H_k P_{k|k-1} = \Delta (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1} \quad (6)$$

式(6)两端取范数,得

$$\begin{aligned} & \|(K_k - \hat{K}_k) H_k P_{k|k-1}\| = \|\hat{P}_k - P_k\| = \\ & \|\Delta (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\| \leq \\ & \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\| \end{aligned} \quad (7)$$

变形式(4),得

$$(K_k - \hat{K}_k) H_k P_{k|k-1} H_k^T = \Delta (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1} H_k^T \quad (8)$$

式(8)两端取范数,得

$$\begin{aligned} & \|\hat{P}_k - P_k\| \|H_k^T\| \geq \|(K_k - \hat{K}_k) H_k P_{k|k-1} H_k^T\| = \\ & \|\Delta (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1} H_k^T\| \geq \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\|\Delta\|}{\|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|}$$

即

$$\|\hat{P}_k - P_k\| \geq \frac{\|\Delta\|}{\|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|} \quad (10)$$

综合式(7)、式(10),得

$$\frac{\|\Delta\|}{\|H_k^T\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|} \leq \| \hat{P}_k - P_k \| \leq \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\|$$

同理可证,

$$\|\Delta\| \|H_k P_{k|k-1} H_k^T + R\|^{-1} \leq \|K_k - \hat{K}_k\| \leq \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}\|$$

问题得证。

注:由于 H_k 行满秩及 $P_{k|k-1}$ 正定,因此 $H_k P_{k|k-1} H_k^T$ 可逆。

由定理 1 可知,新息序列相关性越大(即 $\|\Delta\|$ 越大),则 k 时刻 AKF 算法与 k 时刻最优 KF 算法间滤波效果差别越大, k 时刻 AKF 算法中估计误差协方差矩阵 \hat{P}_k 越远离 k 时刻最优 KF 算法中估计误差协方差矩阵 P_k 。由于 k 时刻 AKF 算法中 \hat{P}_k 与 k 时刻最优 KF 算法中 P_k 间距离在有界闭集内,因此,有如下推论成立。

推论 1 k 时刻 AKF 算法中 \hat{P}_k 和 k 时刻最优 KF 算法中 P_k 间距离与 $\|\Delta\|$ 成正比; k 时刻 AKF 算法中 \hat{K}_k 和 k 时刻最优 KF 算法中 K_k 间距离与 $\|\Delta\|$ 成正比。

证明:

由于

$$\frac{\|\Delta\|}{\|H_k^T\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|} \leq \| \hat{P}_k - P_k \| \leq \|\Delta\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\|$$

因此,必存在

$$0 < \frac{1}{\|H_k^T\| \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1} (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)\|} \leq \gamma_k \leq \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} H_k P_{k|k-1}\|$$

满足 $\|\hat{P}_k - P_k\| = \gamma_k \|\Delta\|$ 。

同理可证,存在 $0 < \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}\| \leq \lambda_k \leq \|(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}\|$,满足 $\|K_k - \hat{K}_k\| = \lambda_k \|\Delta\|$,问题得证。

显然,当新息序列是有色噪声时, k 时刻 AKF 算法滤波效果劣于 k 时刻最优 KF 算法,此时,AKF 算法将导致 $\hat{P}_k > P_k$ 。由最优 KF 算法性质 3 知,分别以 \hat{P}_k, P_k 为初值的最优 KF 算法在 $k+1$ 时刻满足 $\hat{P}_{k+1} > P_{k+1}$,而由定理 1 可知,在 $k+1$ 时刻, $\hat{P}_{k+1} > \hat{P}_{k+1}$,因此,有如下推论成立。

推论 2 AKF 算法中 \hat{P}_k 必逐渐远离 1 时刻最优 KF 算法中 P_k 。

由推论 2 知,在使用 AKF 算法中,我们无法控制 \hat{P}_k 远离 P_k ,这意味着 AKF 算法中滤波估计值落在以真实值为中心的某个区间内的概率在逐渐减小,即估计值不可信度在逐渐增大,此时会发生两种情况:1) \hat{P}_k 无限远离 P_k ,这最终将导致滤波估计值以概率 1 不落在以真实值为中心的某个区间内,显然,此时滤波估计值已没有意义,滤波已发散;2) \hat{P}_k 与 P_k 差有极限,此时,虽然 AKF 算法滤波效果劣于 1 时刻最优 KF 算法,但是,AKF 算法与 1 时刻最优 KF 算法间滤波效果恒定,可认为 AKF 算法已收敛,因此,有如下推论成立。

推论 3 AKF 算法收敛的充要条件是 AKF 算法中 \hat{P}_k 与 1 时刻最优 KF 算法中 P_k 差有极限。

虽然推论 3 给出了 AKF 算法收敛充要条件,但是,它既不能用于 AKF 算法收敛性检验也不能用于构造收敛的 AKF 算法,仅是一种理论结果。下面,从另一个角度分析 AKF 算法收敛充要条件。

设 1 时刻最优 KF 算法中 P_k 在有界区间内(若 P_k 无界,则 1 时刻最优 KF 算法已发散,此时,AKF 算法必发散),则推论 3 可描述成 AKF 算法收敛的充要条件是 AKF 算法中 \hat{P}_k 有极限,即 $\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{P}_k = A$ 。由数列极限性质知,AKF 算法中 \hat{P}_k 和 k 时刻最优 KF 算法中 P_k 满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{P}_k - P_k) = 0$,因此,有 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{P}_k - P_k\| = 0$,即 AKF 算法将收敛于 k 时刻最优 KF 算法;由推论 1 知,若 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\Delta\| = 0$,则必有 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{P}_k - P_k\| = 0$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \|K_k - \hat{K}_k\| = 0$;由最优 KF 算法性质 2 知,若 AKF 算法中新息序列渐进收敛于白噪声序列,则 AKF 算法收敛于最优 KF 算法,此时必有 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\Delta\| = 0$,因此,实用的 AKF 算法收敛充要条件可描述为如下推论。

推论 4 AKF 算法中新息序列渐进收敛于白噪声序列 \Leftrightarrow AKF 算法渐进收敛于 k 时刻最优 KF 算法 $\Leftrightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} \|\Delta\| = 0$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{P}_k - P_k\| = 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} \|K_k - \hat{K}_k\| = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \text{AKF 算法收敛。}$$

结束语 本文清晰描述了有色噪声对 AKF 算法滤波效果的影响,在范数意义下,明确了 k 时刻 AKF 算法中 \hat{P}_k 和 k 时刻最优 KF 算法中 P_k 距离与 $\|\Delta\|$ 间的关系;系统说明。

AKF 算法中 \hat{P}_k 与 1 时刻最优 KF 算法中 P_k 间的关系;上述结论建立了 AKF 算法中 \hat{P}_k 变化理论。利用 AKF 算法中 \hat{P}_k 与 1 时刻最优 KF 算法中 P_k 间关系推出了 AKF 算法收敛条件;另外,从应用角度出发,给出了一套实用的 AKF 算法收敛条件,该套收敛条件既可用于证明现有 AKF 算法收敛性又可用于构造收敛的 AKF 算法。文中理论进一步丰富了 AKF 算法现有的理论,解决了 AKF 算法中现存的一些理论问题,推动了 AKF 算法理论进一步发展。上述理论为最终解决复杂环境下无线传感器网络节点定位问题奠定了理论基础。

参考文献

- [1] Capkun S, Hamdi M, Hubaux J P. GPS-free Positioning in Mobile Ad-hoc Networks. Cluster Computing, 2002; 157-167
- [2] Iyengar R, Sikdar B. Scalable and Distributed GPS Free Positioning for Sensor Networks // Proc. of IEEE Int'l Conf. on Communications 2003, vol. 1, Anchorage; IEEE Communications Society, 2003; 338-342
- [3] Bergamo P, Mazzini G. Localization in Sensor Networks with Fading and Mobility // Proc. of the 13th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Lisbon; IEEE Communications Society, 2002; 750-754
- [4] Savvides A, Park H, Srivastava M B. The Bits and Flops of the N-hop Multilateration Primitive for Node Localization Problems // Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Atlanta; ACM Press, 2002
- [5] Shang Y, Ruml W, Zhang Y, et al. Localization from Mere Connectivity // Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Annapolis; ACM Press, 2003; 201-212
- [6] Taylor C, Rahimi A, Bachrach J, et al. Simultaneous Localization

and Tracking in an Ad-hoc Sensor Network // Proc. of the Fourth International Symp. on Information Processing in Sensor Networks. UCLA, Los Angeles, California, USA, 2005

- [7] 邓自立. 自适应滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
- [8] Hu C W, Chen W, Chen Y Q, et al. Adaptive Kalman Filtering for Vehicle Navigation. Journal of Global Positioning Systems, 2003, 2(1): 42-47
- [9] 耿延睿, 崔中兴, 张洪斌, 等. 衰减因子自适应滤波及在组合导航中的应用. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5): 434-437
- [10] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器. 自动化学报, 1991, 17(6)
- [11] Mehra R K. On the Identification of Variances and Adaptive Kalman Filtering. IEEE Transactions on Automatic Control, 1970, 15(2): 175-184
- [12] Mehra R K. Approaches to Adaptive Filtering. IEEE Transactions on Automatic Control, 1972, 17: 693-698
- [13] Sage A P, Husa G W. Adaptive Filtering with Unknown Prior Statistics // Joint American Control Conference, 1969: 769-774

- [14] Mohamed A H, Schwarz K P. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS. Journal of Geodesy, 1999, 73: 193-293
- [15] Chen G R, Chui C K. A Modified Adaptive Kalman Filter for Real-Time Applications. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1991, 27(1): 149-154
- [16] 刘冀春, 李明. 改进卡尔曼滤波器作动态谐波估计. 四川电力技术, 2005(1. 增刊): 29-32
- [17] Dash P K, Liew A C, Ramakrishna G. Power-demand Forecasting Using a Neural Network with an Adaptive Learning Algorithm. IEEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., 1995, 142(6): 506-568
- [18] 刘广军, 吴晓平, 郭晶. 一种次优并行 Sage 自适应滤波器. 测绘学院学报, 2002, 19(1): 8-10
- [19] 郭晶, 吴晓平, 刘广军. 一种数值稳定的次优并行 Sage 自适应滤波器. 测绘学报, 2002, 31(4): 283-288
- [20] 吕伟, 王艳东. Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波算法在 SINS 初始对准中的应用研究. 战术导弹控制技术, 2005(3): 52-55
- [21] 颜东. 导航、制导系统状态估计方法及容错理论研究. 北京: 北京航空航天大学, 1995

(上接第 24 页)

中都须考虑的核心问题。一个真正的能够在基于移动用户位置的信息服务中应用的访问控制模型必须同时考虑受保护的数据对象本身所具有的空间特性, 以及提出数据访问请求的主体在提出访问请求时所处的空间位置信息。这里涉及到几个关键问题: (1) 如何将基于角色访问控制的思想应用到空间数据的保护? 在不同的空间数据应用架构中是否需要采用不同的空间访问控制模型? 如何推进空间访问控制模型标准化? (2) 如何构造授权基? 如何维护授权规则集, 使其不出现冲突? 如何验证授权规则集中不存在冲突? 授权规则的高效检索算法? (3) 如何将授权规则和数据对象进行统一检索以提高访问控制决策的效率? 如何组织和存储授权规则集与空间数据对象? (4) 如何将时间维信息加入到空间访问控制模型中?

结束语 目前, 对空间数据的访问控制模型研究还处在起步阶段, 虽然已经有了一些研究成果, 但是还有许多问题尚待进一步研究。随着基于移动用户位置的信息服务种类的不断丰富, 适用于空间数据的访问控制模型必将会得到日益广泛的应用。

参考文献

- [1] Küpper A. Location-based services: Fundamentals and Operations. John Wiley & Sons, Ltd., 2005
- [2] earth. google. com
- [3] Barlow K. Google Earth prompts security fears. <http://www.abc.net.au/news/indepth/featureitems/s1432602.htm>
- [4] Chun S, Atluri V. Protecting Privacy from Continuous High-resolution Satellite Surveillance. Technical report, CIMIC, Rutgers University, 1999
- [5] Elisa B, Luisa D M, Davide M. An Access Control System for a Web Map Management Service // Proceedings of the 14th International Workshop on Research Issues on Data Engineering: Web Services for E-Commerce and E-Government Applications (RIDE'04). IEEE Computer Society, 2004
- [6] Purevji B, et al. An access control model for geographic data in an XML-based framework // Proceedings of the 2nd International Workshop on Security In Information Systems (WOSIS'04). INSTICC Press, Porto, Portugal, 2004
- [7] Belussi A, et al. An authorization model for geographical maps // Proceedings of the 12th annual ACM international workshop on geographic information systems. ACM: Washington DC, USA,

- 2004
- [8] Atluri V, Chun S A. An authorization model for geospatial data. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2004, 1(4): 238-254
- [9] Belussi A, Catania B, Bertino E. A reference framework for integrating multiple representations of geographical maps // Proceedings of the 11th ACM international symposium on Advances in geographic information systems. ACM: New Orleans, Louisiana, USA, 2003
- [10] Andreas M. Declaration and enforcement of fine-grained access restrictions for a service-based geospatial data infrastructure // Proceedings of the tenth ACM symposium on Access control models and technologies. ACM: Stockholm, Sweden, 2005
- [11] Michael J C, Moyer M J, Ahamad M. Generalized Role-Based Access Control for Securing Future Applications // Proceedings of the 23rd National Information Systems Security Conference, 2000
- [12] Michael J C, et al. Securing context-aware applications using environment roles // Proceedings of the sixth ACM symposium on Access control models and technologies. ACM: Chantilly, Virginia, United States, 2001
- [13] Hansen F, Oleshchuk V. Spatial role-based access control model for wireless networks // IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall, 2003
- [14] Hansen F, Oleshchuk V. SRBAC: a spatial role-based access-control model for mobile systems // Proceedings of the 7th Nordic Workshop on Secure IT Systems (NORDSEC'03). Gjøvik, Norway, 2003
- [15] Elisa B, et al. GEO-RBAC: a spatially aware RBAC // Proceedings of the tenth ACM symposium on Access control models and technologies. ACM: Stockholm, Sweden, 2005
- [16] Maria Luisa D, et al. GEO-RBAC: A spatially aware RBAC. ACM Transactions on Information and System Security, 2007, 10(1): 2
- [17] Chandran S, Joshi J B D. LoT - RBAC: A Location and Time - Based RBAC Model // Web Information Systems Engineering - WISE 2005, 2005: 361-375
- [18] Joshi J B D, et al. A generalized temporal role-based access control model. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(1): 4-23
- [19] Rafae B, et al. X-GTRBAC: an XML-based policy specification framework and architecture for enterprise-wide access control. ACM Transactions on Information and System Security, 2005, 8(2): 187-227