

一种改进的无线传感器网络信息融合技术

付 华 胡雅馨 (辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 针对矿井环境监测系统的安全隐患问题, 提出基于改进 Kalman 滤波与 SVM 的分布递阶信息融合方法, 将系统中的传感器分为源节点和汇聚节点, 在源节点采用改进 Kalman 滤波, 汇聚节点采用 SVM 信息融合方法。该算法可以有效地降低无线传感器网络的能耗和网络信息冲突, 仿真结果表明, 该方法具有可靠性, 并有效地提高无线传感器网络的信息融合精度。

关键词: 息融合; 卡尔曼滤波; 支持向量机; 无线传感器网络

An Improved Information Fusion Technique in Wireless Sensors Network

FU Hua, HU Ya-Xin

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In view of the security threats in the coal mine environmental monitoring system, this paper proposes a method for distributed hierarchical information fusion based on improved Kalman filter and SVM. The sensors in the system are divided into source nodes and sink nodes. In the source, the Kalman filtering are used, and in the sink SVM is used. The algorithm can reduce the energy consumption and data collision. Simulation result verifies the reliability of this algorithm, and it improves the fusing precision of the wireless sensor network.

Keywords: information fusion; Kalman filter; SVM; wireless sensor network

无线传感器网络是综合了传感器、无线通信、微计算机和信息处理等技术的一个新的研究领域, 并在学术、军事和工业等领域得到了广泛的发展, 由于其存储量小、运算能力低、电池能量有限等特点, 使得在其传输数据时使用信息融合技术显得尤为重要, 这样可以减少网络拥塞、节省能量、减少数据冗余, 从而延长网络节点寿命。目前常用的信息融合算法^[1]有加权平均法、卡尔曼滤波、贝叶斯估计、D-S 证据理论等, 但这些方法本身也要消耗能量, 因此不仅要求传输数据量小, 还要求融合算法成本尽可能低。本文采用分布递阶式信息融合算法对煤矿井下环境进行监测, 将无线传感器网络中的传感器节点分为源节点和汇聚节点, 分别对其采用改进的卡尔曼滤波和 SVM 算

量的矩阵计算以及迭代过程, 因此本文将卡尔曼滤波算法进行改进, 并与支持向量机算法相结合应用在煤矿井下环境的监测系统中, 此方法可以有效地降低无线传感器网络的能量消耗和网络信息冲突, 并且能有效地提高无线传感器网络的信息融合精度。

1 基于改进Kalman滤波的信息融合

1.1 Kalmana 滤波原理

设 t 时刻的系统被估计状态 的状态方程^[2]描述为:

$$\text{状态方程为: } \hat{X}_k = A_k \hat{X}_{k-1} + K_k (Z_k - H_k A_k \hat{X}_{k-1}) \quad (1)$$

$$\text{观测方程为: } Z_k = H_k X_k + v_k \quad (2)$$

$$\text{预测误差方程: } P_{1k} = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T + \Gamma_k Q_{k-1} \Gamma_k^T \quad (3)$$

基金项目: 国家自然科学基金 (50874059); 教育部博士点项目 (200801470003); 辽宁省优秀人才基金 (2007R24); 辽宁省重大科技项目 (2007231003); 辽宁省科技攻关项目 (2006220019)

收稿时间: 2009-10-24; 收到修改稿时间: 2009-12-05

波增益方程：

$$K_k = P_{1k} H_k^T (H_k P_{1k} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4)$$

估计误差方程：

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{1k} \quad (5)$$

式中， Φ_k 为 $t(k)$ 时刻的一步转移矩阵， Γ_k 为系统噪声矩阵。 Z_k 为能够直接得到的系统观测值， H_k 为系统观测矩阵，为系统的观测噪声序列^[3]。

由于上述 Kalman 算法含有大量矩阵乘法、求逆运算及迭代过程，计算复杂，因此将此算法经改进后得到：

$$P_{1k} = (P_{1k-1} - K_{k-1} H_{k-1} P_{1k-1}) \Phi_k^T + \Gamma_k Q_{k-1} \Gamma_k^T \quad (6)$$

$$\hat{X}_k = Y_k \hat{X}_{k-1} + K_k Z_k \quad (7)$$

其中 $Y_k = E_k - H_k K_k$ ，当采样频率确定时， Y_k 和 K_k 的各元素均为常数。

大量复杂的卡尔曼滤波增益和系数可以预先离线完成，这既大大降低了运算量，提高了运算效率，又提高了精度，可以满足实际应用的要求。

1.2 无线传感器网络的卡尔曼滤波信息融合算法

本文采用对源节点和汇聚节点分级融合的方法，源节点采用 Kalman 滤波信息融合，则第 i 个传感器源节点的卡尔曼滤波方程：

$$\begin{cases} \hat{x}_{i,k} = y_{i,k} \hat{x}_{i,k-1} + K_{i,k} Z_{i,k} \\ K_{i,k} = P_{i,k} H_{i,k}^T (H_{i,k} P_{i,k} H_{i,k}^T + R_{i,k})^{-1} \\ P_{i,k} = (P_{i,k-1} - K_{i,k-1} H_{i,k-1} P_{i,k-1}) \Phi_k^T + \Gamma_k Q_{k-1} \Gamma_k^T \\ x_i(0) = \mu_0, P_i(0) = p_0 \end{cases}$$

式中， $P_{i,k}$ 和 $P_{i,k-1}$ 分别为子传感器的滤波和预报误差阵， $K_{i,k}$ 为滤波增益阵。

在无线传感器网络中，源节点以高速率采集和发送数据，这时可以通过的变化来降低源节点到汇聚节点的传输信息量^[4]。

假设第 i 个源节点在采样时刻 k 观测到的数据平均值为：

$$\bar{X}_{i,k} = \frac{k-1}{k} \bar{X}_{i,k-1} + \frac{1}{k} \bar{X}_{i,k} \quad (8)$$

式中 $\bar{X}_{i,0} = X_{i,0} = 0, k = 1, 2, \dots$

源节点经过 k 次采样的测量方差^[4]统计为：

$$\bar{R}_{i,k} = \frac{k-1}{k} \bar{R}_{i,k-1} + \frac{1}{k} R_{i,k} \quad (9)$$

式中， $k = 1, 2, \dots$ ， $\bar{R}_{i,0}$ 为经验设定值。

随着采样时刻 k 的增加有：

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{R}_{i,k} = \lim_{k \rightarrow \infty} \left[\frac{k-1}{k} \bar{R}_{i,k-1} + \frac{1}{k} R_{i,k} \right] = \bar{R}_{i,k-1} \quad (10)$$

当 $\Delta \bar{R}_{i,k} \leq \varepsilon$ 时，源节点不向汇聚节点传送 $R_{i,k}$ ，汇聚节点利用 $R_{i,k-1}$ 进行运算，从而减少数据传输量；当 $\Delta \bar{R}_{i,k} > \varepsilon$ 时 ε 为无限小的正实数，可利用式 (7)、(8)、(9) 更新 $R_{i,k-1}$ $R_{i,k}$ 。

如果观测方差不变，且源节点观测方差学习过程结束，则 $R_i(k)$ 为定值，不需要每次更新时进行传输，从而可以节省源节点数据传输量；否则，源节点的误差方差自动与更新数据同时传输到汇聚节点进行融合。

2 基于 SVM 的信息融合

2.1 SVM 的基本原理^[5]：

给定一个两类模式分类问题，样本 (x_i, y_i) ， $x_i \in R^n, y_i \in \{1, -1\} \quad i = 1, \dots, n$ ， n 为样本数。寻找使两类之间的间隔最大最优超平面的过程可归结为一个二次规划问题：

$$\min = \left| \frac{1}{2} w \cdot w + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right| \quad (11)$$

$$\text{s.t. } y_i (w_i \cdot \varphi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (12)$$

$$\xi_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, n$$

其中， C 为惩罚因子， w 为权向量， ξ_i 为松弛变量， b 为分类阈值。引入拉格朗日函数，得到最大化函数：

$$Q(a) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n a_i a_j y_i y_j (\varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq a_i \leq C, i = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n y_i a_i = 0 \quad (14)$$

解优化问题，得到 SVM 决策函数：

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^l a_i^* y_i K(x \cdot x_i) + b^* \right) \quad (15)$$

2.2 基于 SVM 的信息融合在汇聚节点的应用

SVM 基于统计学习理论^[6]，根据结构风险最小化原则，在经验风险和模型的复杂度之间折中，有较强的泛化能力，且具有全局最优、与维数无关等特性，因此在汇聚节点采用基于 SVM 的信息融合技术，其融合结构图如图 1 所示。

基于 SVM 的信息融合算法^[6]描述如下：

a. 确定传感器汇聚节点的个数，使其输入等于输出；

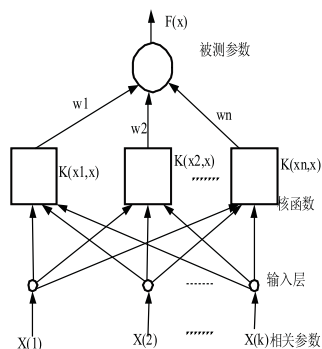


图 1 基于 SVM 的信息融合结构图

- b. 采集传感器节点数据并生成训练样本；
- c. 选择合适的核函数，并通过训练学习后确定其相关参数；
- d. 通过式(13)~(15)计算 a^* 和 b^* 值；
- e. 通过训练学习后，对确定的 a^* 和 b^* 值进行样本测试，若满足精度要求，则式(17)为传感器信息融合系统模型，否则选择新的核函数重复 c，直到满足系统精度为止。

3 仿真结果与分析

基于上述的模型算法，对煤矿环境监测系统进行实例仿真，将传感器收集的数据按源节点的卡尔曼滤波信息融合算法进行融合，其中 2 个作为源节点，则有：

$$\text{状态方程} : X(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0.4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X(k-1) + \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.4 \end{pmatrix} w(k-1)$$

$$\text{观测方程为} : Z_i(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} X(k) + v_i(k), i=1,2$$

且 $X(0) = [0 \ 1]$ ，采样周期 $T = 0.4s$ 。假设源节点的观测方阵 H 相同，但误差不同，对源节点进行滤波和处理^[4]，用 Matlab 进行仿真，其仿真结果如图 2 所示。

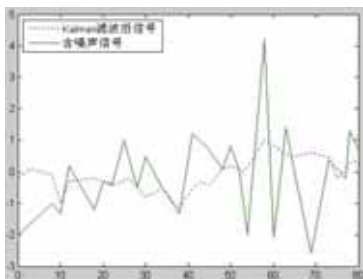


图 2 源节点 1 经卡尔曼滤波更新前后的信号及理想信号

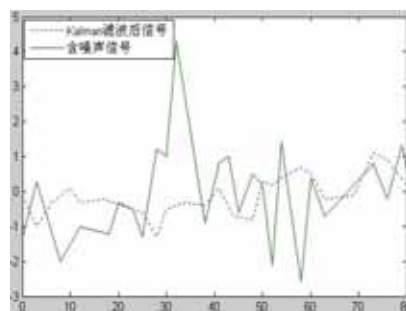


图 3 源节点 2 经卡尔曼滤波更新前后的信号及理想信号

同理，可以得到其他环境参数的以及融合结果，图 2 和图 3 分别是源节点 1 和 2 经过卡尔曼滤波之后的信号，通过仿真可以看出无线传感器网络的卡尔曼信息融合方法使每个源节点能够在传感器内部自己完成数据处理，卡尔曼滤波后的信号比原始的含噪信号更加平稳，降低了数据传输量，节省了源节点能量，延长了网络生命周期^[7]。

源节点经融合后得到的环境数据值作为 SVM 信息融合的信息源进行融合，而融合后得到的信息为井下环境的安全状况信息，经 SVM 信息融合后，融合结果见表 1 所示。

表 1 性能检验结果

组\节点	5	4	3	2	1
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

由融合的结果可以看出，经训练后的 SVM 能够在精度要求范围内根据现场的各参数估计出井下某点的环境状况，有效地降低无线传感器网络的能耗和网络信息冲突，有效地提高无线传感器网络的信息融合精度。

4 结论

本文针对无线传感器网络提出了分布式递阶的信息融合方法，源节点采用改进的卡尔曼滤波，而汇聚节点采用基于 SVM 的信息融合方法，并对矿井环境监测系统进行了实例仿真，仿真结果表明该方法有很高的可靠性和信息融合精度。

(下接第 118 页)

参考文献

- 1 冯秀芳,赵禅禅,贾嘉.无线传感器网络中的信息融合技术研究.太原理工大学学报,2007,38(2):153-155.
- 2 陈炯,阮建国.数字保护中卡尔曼滤波算法的改进.计算机与数字工程,2008,36(4):7-10.
- 3 付梦印,邓志红,张继伟.Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用.北京:科学技术出版社,2003.
- 4 崔平远,黄晓瑞.基于联合卡尔曼滤波的多传感器信息融合算法及应用.电机与控制学报,2001,5(3):204-207.
- 5 阎辉,张学工,等.支持向量机与最小二乘法关系的研究.清华大学学报(自然科学版),2001,43(9):77-80.
- 6 程学云,吉根林,彭志娟.基于 SVM 的信息融合新方法.计算机应用研究,2007,24(12):51-54.
- 7 Rabaey JM, Ammer M J, da Silva Jr JL, Patel D, Roundy S. PicoRadio Supports ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. Computer, July 2002. 42-48.