

# 一种改进的分布递阶无线传感器网络信息融合算法<sup>①</sup>

邵靖宇<sup>1</sup>, 谢森<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

<sup>2</sup>(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 信息融合技术是一个多学科高度集成的热点研究领域, 目前针对煤矿井下环境监测系统的安全隐患问题, 提出了一种基于无线传感器网络的分布递阶卡尔曼滤波信息融合算法, 其中下层源节点采用改进卡尔曼滤波算法, 上层汇聚节点采用方差自适应的加权信息融合算法, 该算法能有效降低无线传感器网络能耗和网络信息冲突, 实现信号重构。仿真结果表明, 该算法具有很高的可靠性和信息融合精度, 有较好的工程实用价值。

**关键词:** 信息融合; 卡尔曼滤波; 无线传感器网络

## An Improved Distributed Hierarchical Information Fusion Algorithm in Wireless Sensor Network

SHAO Jing-Yu<sup>1</sup>, XIE Sen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

<sup>2</sup>(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Information fusion technology is a multidisciplinary highly integrated popular research fields. In view of the security threats in the coal mine environmental monitoring system, A distributed hierarchical information fusion algorithm is proposed in wireless sensor network. In the source, the improved Kalman filtering are used to reduce the power consumption and data collision. In the sink, the dynamic weighted fusion algorithm based on linear minimum variance sense is adopted. This method is minimize the overall power consumption and the probability of collision in the network as well, it can realize signal reconstruction. A simple example is performed to verify the reliability and fusioning precision of this method, at the same time it has high fault-tolerant.

**Key words:** information fusion; Kalman filter; wireless sensor network

微电子技术、嵌入式计算技术和无线通信等技术的进步, 使得在低功耗多功能传感器的微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能<sup>[1]</sup>。由这些无线传感器构成的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由检测网络内大量微型传感器节点组成, 能够协作地实时检测、采集和处理网络分布区域内的各种监测对象的信息, 将处理后的信息以无线通信的方式发送到用户终端<sup>[2]</sup>。在无线传感器网络中, 由于其通信能力有限、电源能量有限、存储量小、传感器数量大分布范围广、运算能力低等特点, 信息融合技术在其数据传输中起到了重要作用, 这样可有效地节省能量、减轻网络堵塞、减少数据冗余、延

长网络生存周期<sup>[3]</sup>。目前的信息融合技术是一种多层次、多方面的处理技术, 在航空航天、机器人技术等领域得到广泛应用。由于大部分信息融合算法<sup>[4,5]</sup>本身也要消耗能量, 因此所选融合算法要求传输量小, 成本尽可能低。

本文采用基于无线传感器网络的无反馈分布递阶信息融合算法对矿井环境进行监测, 下层源节点采用改进的卡尔曼滤波算法, 上层汇聚节点采用方差自适应的加权信息融合算法, 该算法能有效降低传感器网络能耗和网络信息冲突, 实现信号重构, 有效完成监测。仿真结果表明了该算法可有效提高信息融合精度和可靠性。

① 基金项目:国家自然科学基金(51274118,70971059);辽宁省科技攻关项目(2011229011)

收稿时间:2012-08-20;收到修改稿时间:2012-09-29

# 1 基于分布卡尔曼滤波信息融合

## 1.1 系统模型

信息融合系统模型直接决定了融合算法的结构、性能、系统规模。基于无线传感器网络的无反馈分布卡尔曼滤波信息融合算法，信息融合系统结构模型和算法结构模型如图 1 和图 2 所示：

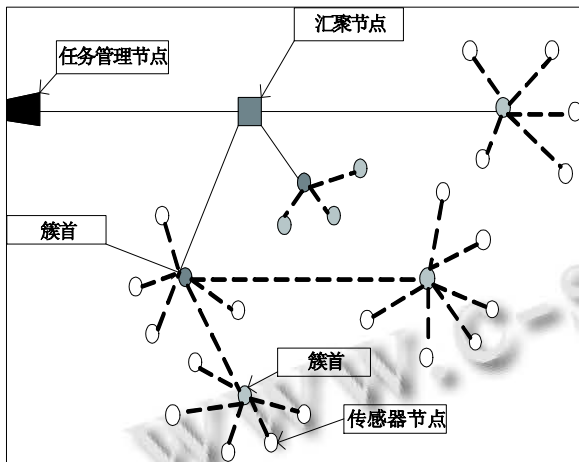


图 1 基于 TEEN 协议的分布递阶信息融合系统结构

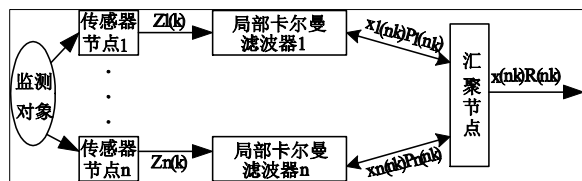


图 2 分布递阶信息融合算法结构图

分布递阶卡尔曼信息融合结构中，簇首节点负责监测信息的收集、融合处理以及簇间数据的转发。在层次路由协议中，传感器节点的保留能量、与簇首的接近程度决定每个簇的形成，簇首节点的选择需要周期更新，以便于延长整个网络的生命周期。

## 1.2 分布卡尔曼滤波信息融合算法

假设多传感器对单个目标的卡尔曼滤波估计测量都基于同一坐标内，考虑离散动态系统：

$$\text{状态方程: } X_k = \varphi_{k/k-1} X_{k-1} + G_{k/k-1} W_{k-1} \quad (1)$$

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

式中， $X_{k-1}$  为目标状态向量， $\varphi_{k/k-1}$  为系统状态转移矩阵， $G_{k/k-1}$  为系统噪声输入矩阵， $W_{k-1}$  为系统过程噪声。 $Z_k$  是系统观测向量， $H_k$  是观测矩阵， $\gamma_k$  是观测噪声向量<sup>[6]</sup>。

本文对源节点采用卡尔曼滤波融合算法<sup>[7]</sup>，第  $i$  个

滤波器的卡尔曼滤波方程如下：

$$\begin{cases} \hat{X}_{i,k} = \varphi_{k/k-1} \hat{X}_{i,k-1} + K_{i,k} (Z_{i,k} - H_{i,k} \varphi_{k/k-1} \hat{X}_{i,k-1}) \\ P_{i,k} = (I - K_{i,k} H_{i,k}) \varphi_{k/k-1} P_{i,k-1} \varphi_{k/k-1}^T + G_{k/k-1} Q_{i,k-1} G_{k/k-1}^T \\ K_{i,k} = P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T (H_{i,k} P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T + R_{i,k})^{-1} \\ X_i(0) = \mu_0, P_i(0) = p_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $P_{i,k}$  与  $P_{i,k/k-1}$  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，源节点通常以高速率采集、发送数据，这时可利用卡尔曼滤波算法通过更新信息来降低源节点到汇聚节点的传输信息量<sup>[8]</sup>。

假设第  $i$  个源节点在采样  $k$  时刻观测数据的平均值：

$$\bar{Y}_{i,k} = \frac{k-1}{k} \bar{Y}_{i,k-1} + \frac{1}{k} Y_{i,k} \quad (4)$$

式中， $\bar{Y}_{i,0} = Y_{i,0} = 0, k = 1, 2, \dots$

第  $k$  次采样时刻测量方差的估计为：

$$R_{i,k} = [Y_{i,k} - \bar{Y}_{i,k}] [Y_{i,k} - \bar{Y}_{i,k}]^T \quad (5)$$

源节点经过  $k$  次采样的方差统计  $\bar{R}_{i,k}$ ：

$$\bar{R}_{i,k} = \frac{k-1}{k} \bar{R}_{i,k-1} + \frac{1}{k} R_{i,k} \quad (6)$$

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：

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{R}_{i,k} = \lim_{k \rightarrow \infty} \left[ \frac{k-1}{k} \bar{R}_{i,k-1} + \frac{1}{k} R_{i,k} \right] = \bar{R}_{i,k-1} \quad (7)$$

当  $\Delta \bar{R}_{i,k} > \varepsilon$  时， $\varepsilon$  为无限小的正实数， $\varepsilon$  的大小可根据不同需求进行设定，可利用式(5)、(6)、(7)更新  $R_{i,k}$ 。当  $\Delta \bar{R}_{i,k} \leq \varepsilon$  时，汇聚节点利用  $R_{i,k-1}$  进行运算，因源节点不向汇聚节点传送  $R_{i,k}$ ，从而减少数据传输量。

若观测方差不变，同时源节点观测方差学习过程结束，则  $R_i(k)$  为定值，没必要每次更新时进行传输，节省了源节点数据传输量；观测方程变化时，源节点的误差方差自动适应环境变化与更新数据同时传输到汇聚节点进行融合。

## 2 基于方差自适应加权信息融合

根据源节点卡尔曼滤波及基于减少能耗和网络冲突的数据处理，汇聚节点采用方差自适应的加权信息融合算法<sup>[9]</sup>对数据进行融合，有效得出有用信息，完成矿井环境监测任务。

给出源节点状态估计  $\hat{X}_1$ 、 $\hat{X}_2$ ，相互独立且是  $\hat{X}_g$  的无偏估计， $W_1$ 、 $W_2$  为待定的加权阵，估计误差方差为  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ ，得到融合后的真值和加权因子满足一下两式：

$$\hat{X}_g = W_1\hat{X}_1 + W_2\hat{X}_2 \tag{8}$$

$$\text{且有: } W_1 + W_2 = I \tag{9}$$

系统的估计误差阵如下：

$$\sigma_g = E\left\{ \left[ X - \hat{X}_g \right] \left[ X - \hat{X}_g \right]^T \right\} \tag{10}$$

$$= \sigma_{11} - W_2[\sigma_{11} - \sigma_{22}]^T - [\sigma_{11} - \sigma_{22}]W_2^T + W_2[\sigma_{11} - \sigma_{12} - \sigma_{21} + \sigma_{22}]W_2^T$$

式中， $\sigma_{11} = E\left\{ \left[ X - \hat{X}_1 \right] \left[ X - \hat{X}_1 \right]^T \right\}$

$$\sigma_{22} = E\left\{ \left[ X - \hat{X}_2 \right] \left[ X - \hat{X}_2 \right]^T \right\}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21}^T = E\left\{ \left[ X - \hat{X}_1 \right] \left[ X - \hat{X}_2 \right]^T \right\}$$

若  $\hat{X}_1$ 、 $\hat{X}_2$  不相关，则

$$\sigma_g = \sigma_{11} - W_2[\sigma_{11} - \sigma_{22}]^T - [\sigma_{11} - \sigma_{22}]W_2^T + W_2[\sigma_{11} + \sigma_{22}]W_2^T \tag{11}$$

为了得到  $\min TrR_g$ ，

$$W_2 = [\sigma_{11} - \sigma_{22}][\sigma_{11} + \sigma_{22}]^{-1} \tag{12}$$

此时  $\hat{X}_g$  的无偏估计：

$$\hat{X}_g = \left[ R_{11}^{-1} + R_{22}^{-1} \right]^{-1} \left( R_{11}^{-1}\hat{X}_1 + R_{22}^{-1}\hat{X}_2 \right) \tag{13}$$

综上可推广出  $N$  个源节点时：

$$X(k) = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{X}_i(k)}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i(k)}} \tag{14}$$

式中， $k = n * m * T$ ， $n = 1, 2, \dots$ ， $m > 1$  可为整数， $n$  可为时变量，此情况下融合速率降低，有利于同步数据、降低汇聚节点计算量。其中  $T$  为源节点采样和更新周期， $mT$  为汇聚节点融合周期。

### 3 算法仿真及分析

结合上述算法对煤矿井下环境监测系统进行实例仿真，设有两个传感器同时对目标进行监测，将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，有：

$$\text{状态方程: } X(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X(k-1) + \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.2 \end{pmatrix} W(k-1)$$

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

式中  $X(0) = [0, 1]$ ，采样周期  $T = 0.2s$ 。设源节点的观测方阵  $H$  相同，误差不同，对无线传感器网络中传感器源节点 1 和源节点 2 的数据进行滤波和处理，然后每隔 2 秒将数据发送到汇聚节点融合，用 Matlab 进行仿真，其仿真结果如图 3，图 4，图 5 所示：

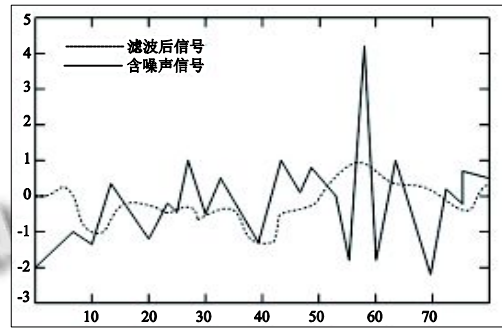


图 3 源节点 1 经卡尔曼滤波后效果

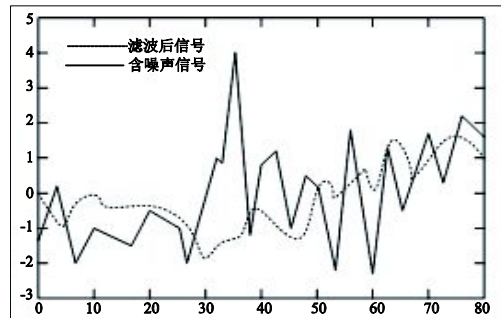


图 4 源节点 2 经过卡尔曼滤波后效果

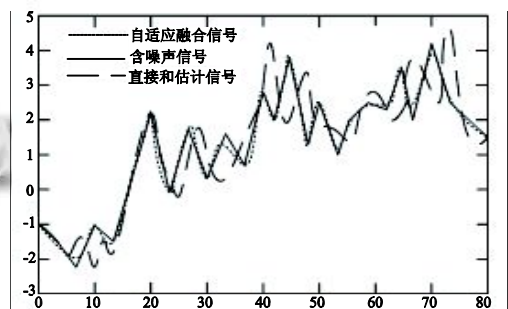


图 5 汇聚节点经过直接加权融合和自适应加权融合比较

图 3 和图 4 分别是源节点 1 和源节点 2 经过卡尔曼滤波的信号，从仿真结果看出每个源节点在传感器节点内自己完成数据处理，经过卡尔曼滤波后的信号比含噪信号更加平稳，降低了数据传输量，较大的传输能耗被较小的计算能耗取代，延长网络生命周期。源节点卡尔曼滤波观测维数低，方差修正采用递推方式，占用存储空间小，节省了源节点有限的存储资源。

源节点经融合以后的数据作为动态加权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.在 MATLAB 仿真中,平均加和融合,固定加权融合和动态加权融合的数据比较如表 1 所示:

表 1 信息融合算法的方差结果比较

试验次数/ 误差方差	1	2	3	4	5	6	7
平均加和 估计	5.13	3.76	5.69	5.31	4.56	4.27	3.92
固定加和 估计	4.16	3.15	4.61	4.60	3.72	3.31	3.26
方差自 适应加 权融合	3.39	2.56	3.67	4.07	3.25	2.32	2.68

由融合的比较结果可以看出,方差自适应加权融合能有效减少通信量,易于实际应用中的实现,能有效提高无线传感器网络的信息融合精度.

#### 4 结语

本文采用基于无线传感器网络的无反馈分布递阶信息融合算法对矿井环境进行监测,针对无线传感器网络提出了分布递阶卡尔曼滤波信息融合算法,下层源节点采用改进的卡尔曼滤波,上层汇聚节点采用方差自适应的加权信息融合算法,结合 MATLAB 进行了实例仿真.仿真结果表明该方法有很高的信息融合精度和可靠性.

(上接第 172 页)

#### 3 结语

本文介绍了流量发生器的原理,分析了 VBR 流量模型,并给出了 VBR 流量发生器的代码和移植过程.这将有助于我们分析流量发生器模型原理,掌握其实现过程,对于进行网络数据流业务分析的研究人员具有一定实用价值.

#### 参考文献

- 李越,钱德沛,何莹.网络仿真器 NS 问题分析及改进方案.系统仿真学报,2005,11:2832-2836.
- 杨玉华,刘培宁,刘际炜.NS-2 的仿真模拟技术分析.计算机工程,2005,31(15):110-112.

#### 参考文献

- 崔莉,鞠海玲,苗勇,等.无线传感器网络研究进展.计算机研究与发展,2005,42(1):163-167.
- 韩鸿泉,朱红松,孟军.无线传感器网络技术.计算机系统应用,2005,14(2):38-41.
- 付华,胡雅馨.一种改进的无线传感器网络信息融合技术.计算机系统应用,2010,19(7):183-185.
- 何友,王国宏,陆大鑫.多传感器信息融合及应用.北京:电子工业出版社,2000.
- 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.
- 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:科技出版社,2003.
- 田继善,吴志勤,吴永杰,文成林.多传感器分布式 Kalman 滤波融合算法.河南大学学报,1999,29(2).
- 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.
- 李战明,陈若珠,张保梅.同类多传感器自适应加权估计的数据级融合算法研究.兰州理工大学学报,2006,32(4):78-82.
- Kalman RE. A new approach to linear filtering and prediction problems. Trans. of the ASME: Journal of Basic Engineering, 1960,82(1):35-45.
- 廖惜春,邱敏,麦汉荣.基于参数估计的多传感器数据融合算法研究.传感技术学报,2007,20(1):193-197.
- 姜晓军.基于无线传感器网络的信息融合算法研究[硕士学位论文].郑州:郑州大学,2007.

- Fall K, Varadhan K. The ns Manual, 2008. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html>.
- 颜昕,李腊元.NS 的仿真机制及协议扩展.武汉理工大学学报,2004,28(2):182-185.
- 黄化吉,冯穗力,秦丽姣,陆宏治.NS 网络模拟和协议仿真.北京:人民邮电出版社,2010.186-187.
- 杨锦亚,郭虹,于宏毅.NS-2 新功能模块的开发.计算机仿真,2006,23(11):120-123.
- 于斌,孙斌,温暖,王绘丽.NS2 与网络模拟.北京:人民邮电出版社,2007.106-109.