

# 无线传感器网络中的信息融合算法<sup>①</sup>

李 强, 张旭帆, 王 加, 梁浩聪

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

**摘 要:** 无线传感器网络是一种新兴前沿技术. 节省能耗和延长网络寿命是无线传感器网络研究的核心课题之一, 通过信息融合算法减少数据传输量是延长网络节点寿命的有效途径, 研究了无线传感器网络中三种主要的信息融合算法, 并总结了算法的不足与改进方法.

**关键词:** 无线传感器网络; 信息融合; D-S 证据理论; BP 神经网络; 卡尔曼滤波

## Information Fusion Algorithm in Wireless Sensors Network

LI Qiang, ZHANG Xu-Fan, WANG Jia, LIANG Hao-Cong

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Wireless sensor network(WSN) is the front line of technique. To reduce the energy consumption and extend the network's survival time is the key research problem in WSN. It is proposed that multi-sensor information fusion is an effective way to reduce the communication data and save the energy consumption. This paper introduces three information fusion algorithms in WSN, and summarizes the improving methods.

**Key words:** wireless sensor network; information fusion; D-S evidence theory; BP neural network; Kalman filter

## 1 引言

无线传感器网络被认为是 21 世纪最重要的技术之一<sup>[1]</sup>, 它将虚拟的信息世界与客观的物理世界联系在一起, 改变了人类与自然界的交互方式. 这种网络结构可以在长期无人值守的状态下及恶劣的环境中工作, 在军事国防、工农业、城市管理、环境监测等许多领域都有重要的科研价值和广阔的市场前景. 然而, 无线传感器网络存在能量、使用寿命、存储能力方面的缺陷, 需要采用新的技术进行网络优化, 运用信息融合技术就能达到相应的效果. 面对不同的应用环境, 所采用的信息融合算法也不同, 越来越多的学者对主要的算法做出了改进, 也将不同算法的优点结合起来使用, 本文研究了 D-S 证据理论、BP 神经网络、卡尔曼滤波和它们改进后的算法.

## 2 无线传感器网络与信息融合技术

### 2.1 无线传感器网络

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)

是由部署在监测区域内大量廉价的微型传感器节点组成, 大量的智能传感器节点随机分布于监测区域内. WSN 的布设和组网不依赖任何预设的网络设施, 区域内的传感器节点一旦开机, 便能自动、快速地组成一个独立的网络系统, 各节点通过分层协议和分布式算法, 协调各自的行为. 同时, WSN 具有较强的容错能力, 从而使监测系统的鲁棒性提高. 可以使人们在任何时间、地点和任何环境条件下获取大量详实而可靠的信息<sup>[2,3]</sup>.

### 2.2 信息融合技术

信息融合(Information Fusion 或 Data Fusion)技术, 也称多传感器数据融合技术, 是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟, 它通过把多个传感器获得的信息按照一定的规则组合、归纳、演绎, 得到对观测对象的一致解释和描述. 现如今, 该技术已经在军事、遥感、设备自动监视、医疗诊断和机器人技术等领域得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>.

与单一传感器相比, 信息融合克服了被测数据的

① 收稿时间:2012-07-24;收到修改稿时间:2012-08-28

不确定性,提高了整个传感器系统的有效性能,能够更加准确地描述被测对象<sup>[5]</sup>.表 1 列出了如今国内和国外常用的多传感器信息融合算法.

表 1 多传感器信息融合算法

分类	融合方法	信息类型	融合技术	适用范围
估计理论方法	加权平均	冗余	加权平均	低层信息融合
	卡尔曼滤波	冗余	系统模型滤波	低层信息融合
聚类法	聚类分析	冗余	划分类的算法	低层信息融合
	贝叶斯估计	冗余	贝叶斯估计	低层信息融合
	经典推理	冗余	逻辑推理	低层信息融合
统计推断方法	统计决策理论	冗余	极值决策	高层信息融合
	D-S 证据理论	冗余互补	逻辑推理	高层信息融合
	模糊推理	冗余互补	逻辑推理	高层信息融合
	神经网络	冗余互补	神经网络	低/高层信息融合
人工智能方法	遗传算法	冗余互补	迭代和进化	低/高层信息融合
	品质因素法	冗余	逻辑推理	低层信息融合
	逻辑模板法	冗余	逻辑推理	低层信息融合
	模糊推理	冗余互补	逻辑推理	低/高层信息融合
信息论方法	熵理论	冗余互补	逻辑推理	低/高层信息融合

### 2.3 信息融合技术在无线传感器网络中的作用

无线传感器网络中的信息融合技术是指按照一定的规则,在传感器网络中建立某种形式的融合路径,数据在路径的传送过程中,中间节点对数据进行“多

入单出”融合处理,仅将融合处理后的少量有用数据向上汇报.因此无线传感器网络中的信息融合主要起着以下三方面的作用<sup>[6]</sup>.

- (1)降低网络能耗,延长网络生命周期.
- (2)增强采集数据,提高采集效率.
- (3)优化网络资源,提高系统整体性能.

## 3 信息融合算法在无线传感器网络中的应用

如今,信息融合算法已经在众多领域得到了广泛的应用.在无线传感器网络中,应用最为广泛的是 D-S 证据理论、BP 神经网络、卡尔曼滤波三种信息融合算法.

### 3.1 D-S 证据理论方法

#### 3.1.1 经典 D-S 证据理论融合模型

在多传感器信息融合系统中,每个信息源提供一组证据和命题,并且建立一个相应的质量分布函数.因此,每一个传感器就相当于一个证据体.在同一个鉴别框架下,将不同的证据体通过 D-S 合并规则并成一个新的证据体,并计算证据体的似真度,最后用某一决策选择规则,获得最后的识别结果.由此建立证据理论融合模型如图 1 所示.

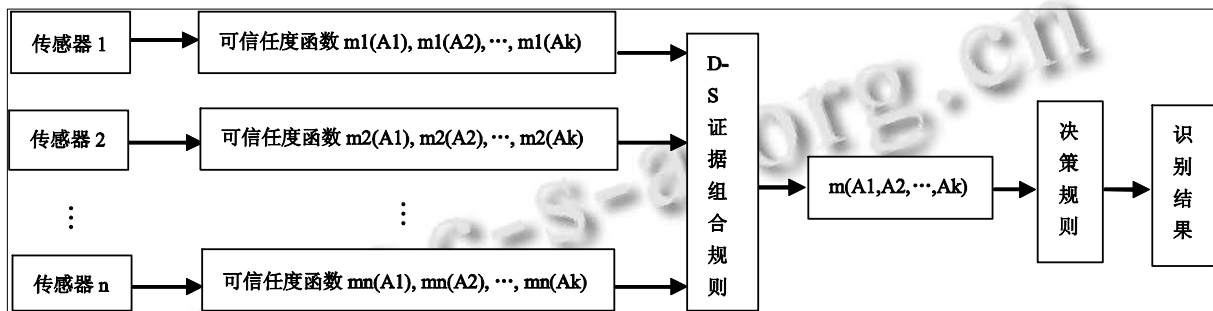


图 1 D-S 证据理论融合模型

在证据理论中,一般将传感器产生的证据,目标运行的状态,如正常工作、不正常工作、不确定等这些作为融合公式中的焦点元素.对于多个证据,先将其中两个进行融合,然后将融合后的证据再和其他的进行融合,直到证据融合结束为止,并且融合的顺序不影响最终结果.

按照以上分析,总结出用证据决策理论进行多传感器信息融合的一般过程:

- (1) 分别计算每个传感器的基本可信数,信任度

函数和似真度函数;

- (2) 利用 Dempster 合并规则,求得所有传感器联合作用下的基本可信数、信任度函数和似真度函数;

- (3) 在一定决策规则下,选择具有最大可信度的目标,得到识别结果.

用证据理论进行融合,所有的要合并的证据之间要互相独立,这是因为在做假设定义时定义的观测空间是互斥且完备.证据理论的重点及难点是各证据信号的信度函数分配.关键是各个传感器隶属度函数的

求取, 需要通过长期的运行经验和专家知识来求取.

### 3.1.2 存在问题与算法改进

虽然 D-S 证据理论在信息融合应用中取得了优异的成绩, 但同时也存在一些缺陷.

问题一:

Dempster 组合规则过程中会掩盖证据本身存在的冲突, 使得融合结果不尽如人意. 根据实际需求的需求, 很多学者对传统的 D-S 证据理论做出了改进, 一些学者对融合的规则进行修正, 典型的如 Yager<sup>[7]</sup>、Lefevre<sup>[8]</sup>、孙权和李弼程等人提出的方法. Yager、Lefevre 等人认为由于 D-S 证据组合本身规则不完善, 所以对冲突信息融合会出现悖论. 只有对冲突信息按一定的规则重新分配才能解决这个问题, 然而这种分配又面临两种需要解决的问题<sup>[9]</sup>: (1)对哪些子集进行冲突分配; (2)以多大比例对这些可接收冲突的子集进行分配. 文献[10]提出了一种基于加权相似度的改进 D-S 证据理论, 用以解决证据间发生的冲突, 该算法依据证据体间的相似度大小, 调整每一个证据体的权值, 对产生冲突的部分进行修改, 这样就减少了计算的复杂度.

问题二:

针对测量数据量大时, D-S 算法的计算量相对较大, 精确度不高的问题, 也有很多学者提出了相应的改进措施.

文献[11]提出了在用 D-S 证据理论之前进行预处理的方法, 与直接使用 D-S 证据理论相比, 可以有效减少参与计算的焦元个数, 提高决策结果的准确度.

文献[12]提出一种基于 D-S 证据理论的组合数据融合算法. 先对传感器网络的当前值进行聚类, 然后用 D-S 证据推理算法进行融合, 最后通过计算得出虚拟节点数据向量的异常值, 把它作为加权重进行加权融合. 仿真实验表明: 该算法识别目标的可信度高于 D-S 推理法, 且在计算复杂度上也有明显优势.

文献[13]提出另一种层次式数据融合算法. 该算法针对不同层次的数据采用不同的处理方法. 在汇聚节点采用最小二乘法融合簇内数据, 降低汇聚节点与监控中心通信量; 在监控终端采用 D-S 证据理论, 建立识别框架, 通过证据的不断积累, 提高无线传感器网络对检测事件的识别精度.

文献[14]提出一种基于证据理论和模糊集合的信息融合方法, 客观反映了各传感器之间的相互支持程度, 能有效避免计算过程中的绝对化, 使得融合结果

更加精确.

问题三:

经典 D-S 证据理论在处理模糊信息时显得无能为力, 目前也有学者在这方面内容进行研究, 但相对较少, 有待进一步研究.

### 3.2 BP 神经网络

#### 3.2.1 BP 神经网络融合模型

在多层感知器的基础上增加误差反向传播信号, 就可以处理非线性的信息, 我们将这种网络称之为误差反向传播的前向网络, 即 BP 网络<sup>[15]</sup>. BP 网络是一种非线性映射的神经网络, 其网络拓扑结构由一个输入层、一个或多个隐含层和一个输出层构成. 在多传感器信息融合中通常采用三层感知器模型和 BP 网络. 由于传感器采集的信息大多受随机信号干扰比较严重, 因此, 首先需要对多传感器采集到的信息进行预处理, 如特征提取、数据归一化处理等. 预处理后用 BP 神经网络融合处理过程有几种模式, 常用的有两种: 一种是分别对每一个传感器预处理后的数据用 BP 神经网络进行训练, 然后再把这些训练后的信息进行融合得到决策输出, 该融合过程如图 2 所示.

另一种是首先对预处理后的信息进行融合, 再将这些信息用 BP 神经网络处理, 得到决策输出, 该过程如图 3 所示.

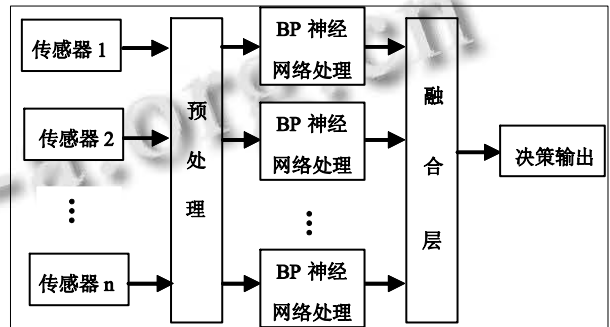


图 2 BP 神经网络融合模型 1

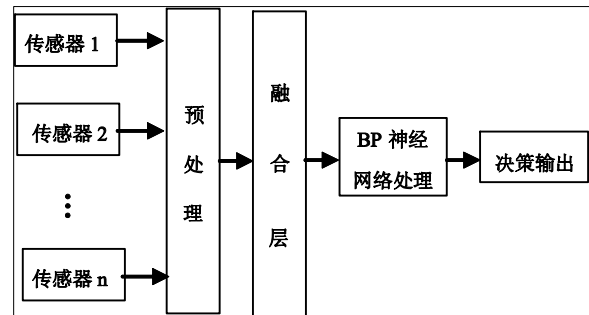


图 3 BP 神经网络融合模型 2

在 BP 神经网络融合模型的融合层中, 可以采用不同的融合算法进行融合, 以便达到更好的融合效果。

按照上述分析, 总结出 BP 神经网络进行多传感器信息融合的一般过程:

- (1) 网络初始化, 设置各层权值和阈值的初值, 并对每一个传感器采集的数据进行预处理;
- (2) 提供训练用的学习资料, 即提供样本数据;
- (3) 分别计算其输出和隐层单元的状态, 并得出输出层训练误差和隐层训练误差;
- (4) 分别计算输出层和隐层的修正权值;
- (5) 判断均方误差是否满足实际允许的误差, 当满足则继续, 否则转到第 2 步, 重新读取一组样本, 继续训练;
- (6) BP 神经网络停止;
- (7) 在每一个传感器数据用 BP 神经网络处理后, 再使用融合规则进行融合;
- (8) 输出融合结果。

在实际应用中, W-T Sung<sup>[16]</sup>利用 BP 神经网络对环境监测系统中的多传感器数据进行融合, 大大降低数据特征维数, 提高环境监测系统的数据融合效率。

### 3.2.2 存在问题与算法改进

问题一:

BP 神经网络存在训练速度慢、易陷入局部极小点及“过学习”的问题, 文献[17]中利用基站运行 BP 神经网络算法, 有效解决了节点计算耗能大于传送未拟合数据的耗能问题。

文献[18]基于基本 BP 算法, 引入具有全局游动性的混沌机制设计了混沌神经网络, 提高了信息融合的质量和传感器的输出准确度, 消除非目标参量对传感器输出结果的影响。

文献[19]利用 BP 神经网络能够对曲线进行无限逼近的特性来对无线传感器的监测数据进行数据拟合, 然后传输拟合好的权值与阈值, 同时通过将上一次拟合的权值与阈值赋予下一次拟合来减少神经网络的训练步数, 从而达到高效利用传感器能量的目的。

问题二:

为了使 BP 神经网络得到更广泛的应用, 很多学者利用与新技术的结合弥补其不足。如与粒子群优化算法、遗传算法、模糊逻辑、粗糙集、小波变换等技术的结合。

文献[20]提出利用遗传算法构造能量高效的数据融合树。Wilbert 等<sup>[21]</sup>将遗传算法和神经网络算法相结合, 在监测系统的多任务进程管理中取得了较好的表现。

文献[22]利用粗糙集神经网络对交通工具进行分类, 系统先是对数据进行滤波和数字化处理, 再利用粗糙集提取有用的特征, 将特征信息输入到神经网络进行分类。用遗传算法进行训练, 性能优于 BP 模型, 网络收敛速度快。

文献[23]将 BP 神经网络和传感器网络分簇路由协议有机结合, 将每个簇设计成一个神经网络模型, 通过神经网络提取原始数据中的少量特征数据, 然后将特征数据发送给汇聚节点, 从而提高数据收集效率, 延长网络生存时间。

文献[24]中提出一种基于分布式并行粒子滤波的目标跟踪方法, 算法实现了运动目标协作跟踪, 与集中式结构目标跟踪相比, 跟踪精度提高了 30%。

### 3.3 卡尔曼滤波

#### 3.3.1 经典卡尔曼滤波融合模型

Kalman 滤波是把状态空间的概念引入到随机估计理论中, 把信号过程视为白噪声作用下的一个线性系统的输出, 用状态方程来描述这种输入输出关系, 估计过程中利用系统状态方程、观测方程和白噪声激励(系统噪声和观测噪声)的统计特性形成滤波算法。由于所用信息都是时域的量, 所以卡尔曼滤波不仅适用于单参量的平稳随机过程的状态估计, 也适用于矢量的非平稳随机过程的状态估计。

在无线传感器网络中, Kalman 滤波融合法则针对动态环境中冗余传感器信息进行实时融合, 在很大程度上减少了由于较多冗余信息造成的融合过程中的能量浪费<sup>[25]</sup>, 其融合模型如图 4 所示。

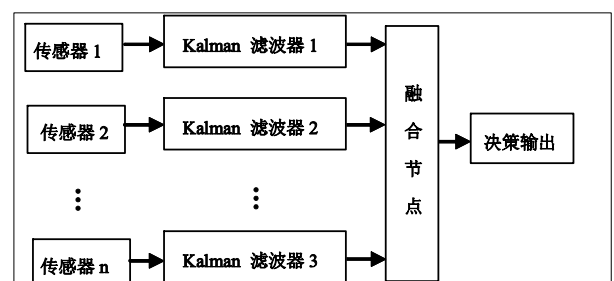


图 4 Kalman 滤波融合模型

kalman 滤波算法一般分为两步, 包括时间更新和

测量更新两个过程:

(1) 时间更新预测, 根据本时刻的状态估计下一时刻的状态;

(2) 测量值更新, 对预估值进行修正, 得到本次的估计值.

### 3.3.2 存在问题与算法改进

因为 kalman 滤波所要估计的随机信号没有既定的变化规律, 对其估计也就不可能完全准确. 目前, 对 kalman 滤波的研究热点是如何进一步提高算法的准确性和节省网络能耗.

文献[26-27]分别利用经典的 Kalman 滤波进行目标状态估计, 将分批估计算法应用于无线传感器网络的数据融合中, 对所采集的数据进行综合处理, 提高了数据的精度和可信度. 文献[28]首先利用无序估计概念解决单传感器混合无序系统的最优估计问题, 然后基于多步最优 Kalman 预测并结合最小化融合估计误差方差阵的分布式加权融合技术, 建立一类能适用于一般性任意无序信息网络跟踪系统的最优“无序估计”融合算法.

文献[29]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, 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.

文献[30]利用最优的融合簇状态估计的 Krein 空间卡尔曼滤波方法, 得到信息形式的鲁棒卡尔曼滤波. 簇头节点通过所处簇的观测模型, 利用信息形式的鲁棒卡尔曼滤波实现离散形式的卡尔曼滤波. 从而减少通信量, 降低网络能耗.

## 4 总结

将信息融合算法引入无线传感器网络中, 有效的减少了网络通信数据量、节点能耗, 从而延长了网络节点寿命, 增强所采集数据的准确性和提高采集数据的效率, 对无线传感器网络的设计与应用具有重要意义. 本文研究了信息融合技术在传感器网络中的应用, 总结了三种主要的融合算法和在其基础上进行改进的算法. 随着科学技术的进步, 无线传感器网络技术将会不断的发展提高, 同时, 应用于传感器网络中的信息融合算法也会根据这样的变化不断的改进, 也势必会起到越来越重要的作用.

## 参考文献

- 1 Byrne JA. 21 Ideas for the 21st Century. Business Week, 1999,(8):78-167.
- 2 孙利民, 李建中, 朱红松, 陈渝. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 3 Bao W, Zhou R. Anti-aliasing lifting scheme for mechanical vibration fault feature extraction. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009,23(5):1458-1473.
- 4 何友, 王国宏, 陆大瑜, 彭应宁. 多传感器信息融合及应用. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 5 Keller J. Joining sensors through data fusion. Military and Aerospace Electronics, 2008,19(11):18-23.
- 6 姜晓君. 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.
- 7 Yager RR. On the aggregation of prioritized belief structure. IEEE Tran on System, Man and Cybern, 1996,26(6):708-719.
- 8 Lefevre E, Colot O, Vannoorenberghe P. Belief function combination and conflict management. Information Fusion, 2002,3(3):149-162.
- 9 陈炜军, 景占荣, 袁芳菲等. D-S 证据理论的不足及修正关系. 中北大学学报(自然科学版), 2010,31(2):161-168.
- 10 杜加萍. 多传感器信息融合算法的研究与应用[硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2011.
- 11 任秀丽, 田阳. 传感器网络中给予预处理证据理论的数据融合. 计算机应用, 2011,31(7):1992-1994.
- 12 陆三兰, 程铭东. 基于 D-S 证据理论的组合数据融合算法. 微电子学与计算机, 2011,28(1):95-98.
- 13 张磊, 余阳, 王霄, 吴银锋. 基于最小二乘与 D-S 证据理论的 WSN 层次式数据融合算法. 测控技术, 2010,29(5):23-26,35.
- 14 钱菲菲, 秦宁宁, 邵金涛, 徐保国. 一种基于证据理论和模糊集合的信息融合方法. 计算机系统应用, 2012,21(4):202-206.
- 15 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- 16 Sung WT. Employed BPN to Multi-Sensors Data Fusion for Environment Monitoring Services. Autonomic and Trusted Computing, 2009,(6):149-163.
- 17 王晋秀. 无损数据压缩算法在传感器网络中的应用研究. 长沙: 中南大学, 2008.

(下转第 205 页)

统资源的不必要占据。经过此番处理,系统提高了实时性的同时也有了相应的准确性。

### 3.3 显示软件界面设计

温湿度数据经过解包处理分成两路,一路送与后台作数据备份,另一路则送到前面显示软件进行显示,该软件提供了良好的窗口操作(可以设置对  $N$  个远台进行显示( $N=0, 1, \dots, 20$ ),这样就可以使得监控 PC 机可以同时兼顾其他监控系统)、对温湿度阈值的设置、超越阈值提出报警和通信中断报警等功能,界面简洁友好,如图 4。

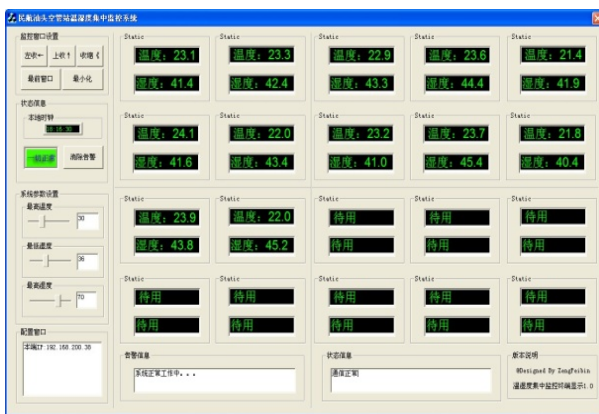


图 4 软件界面

## 4 结论

本文提出了一种基于多线程的温湿度集中监控系统的设计,通过 SHT11 传感器对现场温湿度进行采集,经过单片机读取后送往串口再利用 ZNE-200T 实现网络通信,把多个远台送来的数据送入监控软件,实现了多线程的温湿度集中监控,目前已经投入民航汕头空管站实际应用。在未来发展应用中,还可以用于军队、通信运营和政府部门等对设备安全保障要求较高,设备数量较多、受环境影响较大的机房温湿度监控。

### 参考文献

- 冯显英,葛荣雨.基于数字温湿度传感器 SHT11 的温湿度测控系统.自动化仪表,2006,1:59-61.
- 林惠贞.分布式机房温湿度集中监控系统的设计.汕头大学图书馆,2011.
- 孙鑫,余安萍.VC++深入详解.北京:电子工业出版社,2009. 557-577.
- 徐彤.基于多线程技术的监控系统的设计.火控雷达技术,2004,3(33):55-57.
- Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor. www.sensirion.com Version 4.1-Semp-tember 2008,8-9.
- 高美静,王魁荣,谈爱玲.混沌神经网络多传感器信息融合系统设计.系统仿真学报,2005,9(17):2218-2221.
- 肖骁,王国军,马征.BP 神经网络在 WSN 数据融合中的应用.企业技术开发,2009,28:15-17.
- Islam O, Hussain S, Zhang HY. Genetic algorithm for data aggregation trees in wireless sensor networks. Proc of the 3rd IEEE International Conference on Intelligent Environments, 2007:312-316.
- van Norden W, de Jong J, Bolderheij F, et al. Intelligent task Scheduling in Sensor Networks. Proceedings of 8th International Conference on Information Fusion, 2005.
- Huang Q, Xing T, Liu HT. Vehicle classification in wireless sensor networks based on rough neural network, Advances in Neural Networks-ISNN 2006: Third International Symposium on Neural Networks, ISNN 2006, Proceedings-Part 111, V01.3973 LNCS,58-65.
- 孙凌逸,黄先祥,蔡伟,夏梅尼.基于神经网络的无线传感器网络数据融合算法.传感技术学报,2011,24(1):122-127.
- 屈剑锋,柴毅,郭茂耘.无线传感器网络下的并行粒子滤波目标跟踪算法.电子科技大学学报,2011,42(2):231-236.
- 程琤.多传感器目标跟踪中的信息融合理论与算法.西北工业大学,2007.
- Karim S, Mohsen M, Mohammadreza B. Centralized and decentralized process and sensor fault monitoring using data fusion based on adaptive extended Kalman filter algorithm. Measurement, 2008,41 (10):1059-1076.
- 王楠,李文成,李岩.基于数据融合估计理论的 Kalman 滤波.光机电信息,2010,27(5):32-35.
- 葛泉波,文成林.多传感器网络系统基于无序估计的分布式信息融合.电子与信息学报,2010,32(7):1615-1620.
- 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.
- 张向宾,张海涛,李艳艳.无线传感器网络的数据融合研究.网络与通信,2009,16:38-41.

(上接第 120 页)