

无线传感器网络数据融合技术在物联网中的实现与性能分析

王显轩¹ 刘炜² 卢善勇¹

1 广西职业技术学院, 广西南宁, 530226;

2 广西大学, 广西南宁, 530004;

摘要: 本文研究物联网中无线传感器网络 (WSN) 数据融合技术的实现及性能。首先梳理该技术研究进展, 分析不同技术特点与场景应用, 以卡尔曼滤波算法为例详解实现方式; 进而聚焦物联网场景, 提出适用于物联网的 WSN 数据融合架构, 结合智能家居系统说明从传感器部署到云平台决策的全流程; 通过对智能家居和智能农业系统的能量效率、数据准确性、系统延迟三项指标测试, 证实该技术在提升能效、准确性及降低延迟上的显著优势, 为物联网系统优化提供依据。

关键词: 无线传感器网络 (WSN); 物联网 (IoT); 数据融合技术; 性能分析

DOI: 10. 64216/3080-1494. 25. 05. 047

引言

随着物联网技术飞速发展, 作为其核心的无线传感器网络 (WSN), 由大量分布式传感器节点组成, 可感知温度、湿度等环境信息并无线传输至中心节点或云平台。但传感器节点受能量、计算及存储能力等资源限制, 直接传输大量原始数据会导致能量快速耗尽, 还会增加通信延迟和网络拥塞, 因此数据融合技术应运而生。该技术通过在传感器节点或网络中处理、融合数据, 减少传输量, 提高数据质量和系统整体性能。在物联网应用中, 它不仅优化传感器网络性能, 还提升系统可靠性和准确性, 例如智能家居中融合多传感器数据可准确判断室内环境状态以实现设备智能控制, 智能农业中融合土壤湿度、温度和光照传感器数据能更好地预测和控制作物生长, 优化灌溉和施肥策略。

1 无线传感器网络与物联网

无线传感器网络 (WSN) 作为物联网 (IoT) 感知层的核心组件, 通过分布式传感器节点协同工作实现环境数据采集与传输, 其架构包含传感器节点 (集成感知、处理、通信及电源模块)、汇聚节点 (中继枢纽, 支持数据汇总与深度处理) 和管理节点 (网络控制中心, 负责配置监控及应用分析); 而物联网系统则构建了三层模型: 感知层依托 WSN 等实现物理世界信息采集与执行控制, 网络层通过无线传感网、移动通信等技术保障数据可靠传输与融合, 应用层基于云平台与人工智能完成数据挖掘并支撑智能化服务。在此背景下, 无线传感器网络数据融合技术成为提升系统性能的关键, 通过整合

多源传感器数据有效减少冗余、提高准确性与可靠性, 然而其发展仍面临资源约束 (能量、算力限制)、通信干扰 (数据丢失或错误)、多源异构数据融合瓶颈及物联网场景多样化需求 (实时性、可靠性差异) 等挑战; 近年来, 随着技术进步, 数据融合算法逐步优化以适应动态网络环境, 在智能家居、智能农业、智慧城市及环境监测等领域展现出巨大应用潜力, 为构建高效智能的物联网系统提供了重要技术支撑。

2 无线传感器网络数据融合技术的研究

2.1 数据融合技术的研究现状

数据融合技术的研究现状可从融合维度和融合方法两大技术维度划分, 其中基于融合维度可分为数据级融合、特征级融合和决策级融合: 数据级融合直接处理传感器原始数据以减少冗余并保留原始信息, 虽能最大限度保留数据细节, 但对传感器节点的计算和存储能力要求较高, 卡尔曼滤波便是常用算法, 可通过递归估计系统状态提升数据准确性; 特征级融合在数据预处理阶段提取关键特征后再进行融合, 适用于传感器数据特征明显的情况, 能降低数据维度、减少计算量并保留主要信息, 主成分分析、线性判别分析等是常见的特征提取方法; 决策级融合则是在各传感器节点独立决策后对结果进行融合, 多用于多传感器协同决策场景, 可提高系统的可靠性和鲁棒性, 如投票法、贝叶斯决策融合均为常用方法。而基于数据融合方法又可分为基于统计理论方法、基于人工智能方法和基于信息论方法: 基于统计理论方法通过建立统计模型分析融合数据, 适用于数据

分布明确的情况，卡尔曼滤波、贝叶斯估计等能有效处理数据的不确定性和噪声；基于人工智能方法借助机器学习算法处理融合数据，可适应复杂环境变化，在处理非线性关系和复杂模式方面优势明显，如神经网络、支持向量机、粒子群优化等；基于信息论方法通过信息熵等信息度量融合数据，能有效处理数据的冗余性和相关性，以提高数据准确性，常见的有信息熵融合、互信息融合等。

2.2 数据融合算法的实现

为了更好地说明数据融合技术在无线传感器网络中的应用，分析数据融合算法的实现过程，以卡尔曼滤波算法为例，它是一种递归估计算法，其原理是利用系统的动态模型和观测模型，结合先验知识和观测数据，通过最小化估计误差的方差来对系统的状态进行估计。其在无线传感器网络中的应用非常广泛，如在环境监测中，通过融合多个传感器的温度、湿度数据，可以准确地估计环境状态。

2.2.1 状态预测

$$\hat{x}_k | k-1 = F_k \hat{x}_{k-1} | k-1 + B_k u_k$$

其中， $\hat{x}_k | k-1$ 是在时刻 k 的状态预测值， F_k 是状态转移矩阵， $\hat{x}_{k-1} | k-1$ 是上一时刻的状态估计值， B_k 是控制输入矩阵， u_k 是控制输入。

2.2.2 误差协方差预测

$$P_k | k-1 = F_k P_{k-1} | k-1 + Q_k$$

其中， $P_k | k-1$ 是状态预测误差的协方差矩阵， Q_k 是过程噪声的协方差矩阵。

2.2.3 卡尔曼增益计算

$$K_k = P_k | k-1 H_k^T (H_k P_k | k-1 H_k^T + R_k)^{-1}$$

其中， K_k 是卡尔曼增益， H_k 是观测矩阵， R_k 是观测噪声的协方差矩阵。

2.2.4 状态更新

$$\hat{x}_k | k = \hat{x}_k | k-1 + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k | k-1)$$

其中， $\hat{x}_k | k$ 是在时刻 k 的状态估计值， z_k 是观测值。

2.2.5 误差协方差更新

$$P_k | k = (I - K_k H_k) P_k | k-1$$

其中， $P_k | k$ 是状态估计误差的协方差矩阵， I 是单位矩阵。

3 数据融合技术在物联网中的实现

3.1 场景应用

在物联网（IoT）的多元化应用场景中，无线传感器网络（WSN）作为数据采集的核心组件，其数据融合技术对系统性能提升具有关键作用，尤其在智能家居与智能农业领域展现出显著价值。在智能家居系统中，数据融合技术通过整合温度、湿度、光照等多模态传感器数据，实现环境状态的精准综合评估，为室内舒适度管理提供依据；同时基于融合数据驱动设备联动控制，例如根据光照强度自动调节照明，或结合温湿度数据智能控制空调运行，进一步通过能源消耗优化策略，结合室内外环境参数动态调节设备功率，实现节能减排目标。而在智能农业领域，数据融合技术通过整合土壤湿度、温度、光照及二氧化碳浓度等传感器数据，实时监测作物生长状态并精准判断需水量与灌溉时机；依托融合后的多维环境数据与历史生长记录，可构建精准灌溉、施肥决策模型，减少水资源浪费；此外，结合叶片湿度、气象数据及病虫害历史信息，数据融合技术还能支持预警模型的建立，提前预测病虫害发生概率并启动防治措施，从而推动农业管理的智能化与精细化发展。

3.2 数据融合技术的集成

在物联网系统中，数据融合技术的集成需兼顾传感器网络架构、数据传输协议与应用需求，其构架包含传感器节点、汇聚节点和云平台这三个核心部分，各自在数据处理流程中发挥关键作用。传感器节点负责采集环境温度、湿度、光照强度等参数，经滤波、特征提取等初步融合处理去除冗余信息后，通过无线通信将数据传至汇聚节点；汇聚节点接收数据后，借助卡尔曼滤波、贝叶斯估计等方法进行更深层次融合以提升数据质量，再上传至云平台；云平台则运用数据挖掘与机器学习技术深度分析数据，生成决策并下达设备控制指令，同时通过用户界面展示结果并接收反馈以优化决策。以智能家居系统为例，数据融合技术的实现需历经多个关键步骤：传感器节点在客厅、卧室、厨房等区域部署，通过 ZigBee 或蓝牙传输实时采集的数据，同时进行滤波和特征提取以保证数据质量与传输效率；汇聚节点对接收到的数据进行时间同步，再用卡尔曼滤波进一步融合，随后通过 Wi-Fi 上传至云平台；云平台深度分析数据后生成调节空调温度、打开窗帘等控制指令，并将结果展示给用户以接收反馈，从而确保系统高效精准运行。

4 性能分析与评估

4.1 性能评估指标

为全面评估无线传感器网络数据融合技术在物联网中的性能表现,本研究从以下三个关键指标进行分析。

4.1.1 能量效率

能量效率是无线传感器网络中的关键性能指标之一,直接影响传感器节点的使用寿命和系统的可持续性。其按以下公式计算:

$$\text{能量效率} = \frac{\text{数据传输量}}{\text{能耗}}$$

其中,数据传输量是指传感器节点在一定时间内传输的数据总量,能耗是指传感器节点在该时间段内的能量消耗。较高的能量效率意味着在相同的能耗下能够传输更多数据,从而提高系统的整体性能。

4.1.2 数据准确性

数据准确性反映了融合后的数据与真实环境状态的接近程度,按以下公式计算:

$$\text{数据准确性} = 1 - \frac{\text{误差}}{\text{真实值}}$$

其中,误差是指融合后的数据与真实值之间的差异,真实值可通过高精度的参考传感器或实验测量获得。较高的数据准确性意味着融合后的数据能够更准确地反映环境状态,从而提高系统的可靠性。

4.1.3 系统延迟

系统延迟是指从传感器节点采集数据到云平台生成决策结果的时间间隔,包括数据采集延迟、数据传输延迟和数据处理延迟,其按以下公式计算:

$$\text{系统延迟} = \text{数据采集延迟} + \text{数据传输延迟} + \text{数据处理延迟}$$

较低的系统延迟意味着系统能够更快地响应环境变化,提高系统的实时性。

4.2 实验设计与结果分析

本研究为证实数据融合技术在物联网中的性能表现,设计了一组系列实验,实验研究环境包括一个智能家居系统和一个智能农业系统,分别部署了多个传感器节点和汇聚节点,拟研究和评估数据融合技术在能量效率、数据准确性和系统延迟方面的性能。

4.2.1 实验环境

智能家居系统实验研究环境:部署了 10 个传感器节点,分别用于采集温度、湿度和光照强度数据;1 个汇聚节点,负责收集传感器节点的数据并上传到云平台;以及基于云服务器的云平台,用于数据分析和决策生成。

智能农业系统实验环境:部署了 20 个传感器节点,分别用于采集土壤湿度、温度、光照强度和二氧化碳浓度数据;2 个汇聚节点,负责收集传感器节点的数据并上传到云平台;以及基于云服务器的云平台,用于数据分析和决策生成。

4.2.2 实验方法

分别在智能家居系统和智能农业系统中进行实验测试,其中实验又分成两组进行,第 1 组未采用数据融合技术,第 2 组采用数据融合技术,实验时间均为 7 天,实验过程中,监测和记录传感器节点的能耗、数据传输量、数据准确性以及系统延迟等指标数据。

4.2.3 实验结果及分析

1) 能量效率

两组实验系统的能量效率数据见表 1,数据显示,采用数据融合技术的智能家居系统和智能农业系统的能量效率均高于未采用数据融合技术的系统,且分别提高了 40%和 50%。其结果表明,采用数据融合技术能降低传感器节点的能耗,其原因是数据融合后使整体的数据传输量减少,则能耗下降。

表 1 能量效率

系统类型	数据传输量 (KB)		能耗 (J)		能量效率 (KB/J)		提高率
	第 1 组	第 2 组	第 1 组	第 2 组	第 1 组	第 2 组	
智能家居	500	700	1000	1000	0.5	0.7	40%
智能农业	400	600	1000	1000	0.4	0.6	50%

2) 数据准确性

两组实验系统的数据准确性数据见表 2,数据显示,采用数据融合技术的智能家居系统和智能农业系统的数据准确性均高于未采用数据融合技术的系统,且分别

提高了 20.0%和 25.3%,其结果表明,采用数据融合技术能提高数据准确性,这是因为数据融合技术通过综合多个传感器的数据,减少了数据噪声和误差,提高了数据准确性。

表 2 数据准确性

系统类型	数据准确性		提高率
	第 1 组	第 2 组	
智能家居	80%	96%	20.00%
智能农业	75%	94%	25.30%

3) 系统延迟

两组实验系统的系统延迟数据见表 3，数据显示，采用数据融合技术的智能家居系统和智能农业系统的系统延迟均低于未采用数据融合技术的系统，且分别降低了 20.0%和 24.8%。其结果表明，采用数据融合技术能降低系统延迟，这是因为数据融合技术通过减少数据传输量和优化数据处理过程，降低了系统的整体延迟。

表 3 系统延迟

系统类型	系统延迟 (ms)		降低率
	第 1 组	第 2 组	
智能家居	200	160	20.00%
智能农业	250	188	24.80%

5 结论

本文研究了无线传感器网络数据融合技术在物联网中的实现与性能分析，提出了一个适用于物联网的无线传感器网络数据融合架构，并对其性能进行了全面评估。实验结果表明，数据融合技术在能量效率、数据准确性和系统延迟方面均表现出显著优势，在智能家居和智能农业系统的能量效率分别提高了 40%和 50%，数据准确性提高了 20.0%和 25.3%，系统延迟减少了 20.0%和 24.8%。研究取得一定的积极成果，但仍有多个研究方向值得深入探讨，包括多模态数据融合、分布式数据融合、自适应数据融合、数据安全性与隐私保护以及人工智能与数据融合的结合。未来的研究可结合新兴技术进一步提升数据融合技术的效能，增强物联网系统的智能化、鲁棒性与安全性，以应对日益复杂的应用需求。

参考文献

[1] 吴苏丹. 无线传感器网络中的信号处理与数据融合[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(16): 153-155+158.

[2] 杨芬婷. 基于无线传感器网络的环境监测系统数据融合方案研究[D]. 武汉轻工大学, 2024.

[3] 任金金, 任敬敏, 王淑芳, 等. 基于 CNN 与 BiGRU 融合的无线传感器网络数据聚合方法[J]. 长江信息通信, 2

024, 37(02): 114-116.

[4] 刘志豪, 荣丽红, 李娟, 等. 一种基于无线传感器网络的猪舍环境数据融合算法[J/OL]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 1-10[2024-11-27].

[5] 刘陈男, 罗恒. 基于改进卡尔曼算法的室内温度数据融合[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(01): 179-184.

[6] 闵玄. 无线传感器网络跨层协同优化的容错策略[J]. 福建电脑, 2023, 39(07): 39-46.

[7] 陈怡娜. 基于深度学习算法的无线传感器异常数据检测[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(02): 178-183.

[8] 赵宏宇. 分布式扩散无迹卡尔曼滤波研究[D]. 西南大学, 2023. [17] 张新. 基于改进灰狼优化算法的 WSN 能效优化研究[D]. 内蒙古师范大学, 2023.

[9] 马原东. 浅述无线传感器网络中数据融合技术[J]. 中国宽带, 2023, 19(05): 48-52.

[10] 徐思韵. 基于数据压缩和分簇路由的 zigbee 网络的节能技术研究[D]. 扬州大学, 2023.

[11] 王成杰. 智慧城市无线传感器网络传输机制优化的研究[D]. 中国石油大学(华东), 2022.

作者简介: 1. 王显轩 (1986.12)，男，汉族，广西南宁，讲师/工程师，英国萨里大学移动卫星通信专业硕士，主要研究方向：通信工程、教育数字技术。

2. 刘炜 (1985.12)，男，汉族，广西南宁，广西大学，助理教授/博士，主要研究方向：无线传感器网络，零知识证明，安全多方计算。

3. 卢善勇 (1977.7)，男，壮族，广西龙州，本科，副教授，主要研究方向：移动通信技术、通信电源技术。

基金项目: 广西高校中青年教师科研能力提升项目“基于网格聚类的 5G 部署区挖掘和组网策略的研究” (2021KY0984)，广西职业技术学院科研重点资助项目(桂职院[2021]121 号 211107)

广西高校中青年教师科研能力提升项目“基于 5G 通信技术的老年人居家监控系统研究与设计” (编号: 2021KY0982)