



## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

掌握了Wi-

SUN自组网的相关通信技术，主要包括自组网架构设计与通信优势、跳频通信技术、无线信道竞争机制、PHY模式定义与切换流程。掌握了主流的速率自适应算法，主要分为直接测量和基于统计信息两类。掌握了主流的电池热失控预警数据驱动算法，如神经网络与聚类算法。掌握了主流的无线网络路由算法，如开放最短路径优先算法、最小化多路径路由算法。掌握了主流的队列QoS优先级调度算法，如严格优先级算法、加权轮询调度算法、加权公平排队算法、差分加权轮询调度算法等。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

工程实践主要包括两个项目经历：1、构建Wi-

SUN时延模型，同时考虑PHY模式对无线信道的PLR和冲突域竞争情况的影响，以最小化端到端平均时延为优化目标进行模型求解从而实现速率自适应。设计实验验证算法性能。2、根据电池数据异常指标动态调整对应数据流的流量需求，建立无线信道利用率为约束的网络流量约束模型，在网络流量需求满足流量约束条件下通过设计流量分配模型实现数据流路径选择，通过流量调度算法对链路分配的流量进行QoS优先级调度。设计实验验证算法性能。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

工程实践中，针对物联网电池储能系统对于异常检测的实时性需求，综合运用所学知识，提出了基于电池组异常指标的流量管理算法。

首先，基于K-

Shape聚类算法对电池组进行异常分析，比较当前聚类分配结果与初始正常聚类分配结果是否变化，若变化则判断电池组异常，触发热失控预警。同时，基于聚类轮廓系数构建电池组异常指标。聚类轮廓系数作为评价聚类效果的指标，能够衡量时间序列与其所在聚类的紧密度以及与其它聚类的分离度。依据构建的电池组异常指标设计了动态采样频率机制，可以使电池组在正常状态使用较低的采样频率，维持较低的流量，在异常状态使用较高的采样频率，分配到更高的流量，有助于提升电池组异常检测的实时性。

其次，面对不同异常指标数据流的流量需求，建立了以最小化网络平均端到端发送时延为优化目标的流量分配模型，模型是一个全局连续优化问题，适合使用模拟退火算法进行模型求解。模拟退火算法能够在庞大解空间中进行全局搜索，避免陷入局部最优，并且无需梯度信息，灵活性强，适合处理没有显式解析表达式或难以计算梯度的复杂统计问题。模型考虑了链路竞争无线信道的时延与无线信道利用率约束，避免形成网络流量的“热点”区域，保证网络负载均衡。设计了基于数据流异常指标的拥塞控制算法，在网络流量需求超过流量约束时根据数据流流量需求比例进行流量均衡，提高拥塞控制公平性。提出了RT-DWRR队列调度算法，将数据流间队列调度和数据流内队列调度结合。数据流间队列调度采用DWRR算法，DWRR算法在队列不存在数据帧时停止调度并遍历下一个队列，避免其它队列处于等待状态时资源空闲，提高了系统资源利用率。同时，DWRR算法会将队列余额传递到下一个轮询周期，充分保证队列调度的公平性。数据流内队列调度设置每个数据帧的数据采集时间与超时时间，对于同一个数据流队列中的数据帧，优先调度数据采集时间更新的数据帧，并丢弃超时未被调度的数据帧。在信道竞争激烈的场景下可以有效提高传感数据的实时性，减缓网络的拥塞，适用于时间敏感的WSN。

最后，通过仿真验证流量管理算法的性能。仿真在固定空间内随机模拟多个电池传感模块和路由网关，位置服从泊松分布，据此构建一个基于Wi-SUN协议的无线传感自组网。每个电池传感模块模拟多个电池组传感数据的发送，包括温度、电压、电流等多种传感数据。电池组传感数据分为正常电池组传感数据和异常电池组传感数据，正常电池组传感数据通过对电池组进行标准充电得到，异常电池组传感数据通过对电池组进行热失控评估得到。仿真结果表明，设计的基于电池组异常指标的流量管理算法能有效提高物联网电池储能系统异常检测的实时性，同时保证网络流量的公平性和负载均衡。

(二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
无线传感网络速率自适应算法设计与仿真	核心期刊	2024年01月18日	传感技术学报	1/3	录用
基于数据异常指标的无线传感网络流量管理	核心期刊	2024年04月18日	传感技术学报	1/3	录用

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 88 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 88 分
<b>本人承诺</b>	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：翁晓龙</p>	



浙江大学研究生院  
攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260113	姓名: 翁晓龙	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 电子信息	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 28.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	90	公共学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	87	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	89	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	86	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	数字信号处理		2.0	89	专业选修课	2022-2023学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	93	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	87	公共学位课	2022-2023学年春夏学期	移动互联网智能设备应用设计与实践		3.0	90	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	81	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	物联网信息安全技术与应用基础		2.0	91	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	94	专业学位课	2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	81	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生英语		2.0	84	公共学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年春季学期	科技创新案例探讨与实战		2.0	84	专业选修课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。  
2. 备注中“\*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-06-03



# Design and Simulation of Rate Adaptive Algorithm Based on Wireless Sensor Network

Weng Xiaolong<sup>1</sup>, Yu Guanding<sup>2\*</sup>, He Yinghui<sup>2</sup>

(1.College of Engineers, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310015, China;

2.College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** Multiple physical layer (PHY) modes have been provided by the protocol of Wi-SUN to meet different data transmission requirements, and the PHY mode is adapted dynamically by rate adaptive algorithms based on the channel quality to achieve optimization of delay and throughput in Wi-SUN wireless network. To address the issue of existing rate adaptation algorithms failing to accurately evaluate the impact of rate adjustment on the performance of WSN, the impact of transmission rate on wireless channel transmission delay and competition delay is taken into account, and an optimization problem is constructed with the goal of minimizing the average end-to-end sending delay in WSN and the constraint of the range of packet loss rate (PLR) in the channel. Because this problem is a mixed shaping optimization problem, genetic algorithm is used to solve it to obtain adaptive rates, which achieves overall delay optimization of WSN. At the same time, in order to reduce storage and computing costs, a rate adaptation algorithm based on dynamic programming is proposed. Each node only exchanges information on the wireless channel quality with neighboring nodes, and the rate of the link transmitter is adapted based on the wireless channel quality through dynamic programming. The experimental results show that the two proposed rate adaptive algorithms have lower delay and higher throughput in WSN compared to previous algorithms.

**Key words:** Wi-SUN; rate adaptation; transmission delay; competitive delay; genetic algorithm; dynamic programming

**EEACC:** 7230 **doi:**

## 无线传感网络速率自适应算法设计与仿真

翁晓龙<sup>1</sup>, 余官定<sup>2\*</sup>, 何映晖<sup>2</sup>

(1.浙江大学工程师学院, 杭州浙江310015; 2.浙江大学信息与电子工程学院, 杭州浙江310058)

**摘要:** Wi-SUN 协议提供多种物理层 (PHY) 模式以满足不同的数据传输需求, 速率自适应算法可以根据信道质量动态调整 PHY 模式以实现无线传感网络 (WSN) 时延与吞吐量的优化。为了解决现有速率自适应算法未能准确评估速率调整对 WSN 性能影响的问题, 同时考虑传输速率对无线信道传输时延和竞争时延的影响, 构建以最小化 WSN 平均端到端发送时延为目标, 信道丢包率 (PLR) 范围为约束的优化问题。因为该问题是混合整形优化问题, 所以可以使用遗传算法求解得到自适应速率, 实现 WSN 时延的整体优化。同时, 为了减少存储和计算开销, 提出一种基于动态规划的速率自适应算法, 每个节点只与邻居节点交换无线信道质量信息, 链路发射端根据无线信道质量通过动态规划的方法进行速率自适应。实验结果表明, 提出的两种速率自适应算法相比以往算法具有更低的 WSN 时延和更高的 WSN 吞吐量。

**关键词:** Wi-SUN; 速率自适应; 传输时延; 竞争时延; 遗传算法; 动态规划

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:**

无线传感网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 已广泛应用于环境检测、智能交通、健康医疗等应用领域。WSN 中传感节点负责感测数据, 并将采集的数据传输到信宿。Wi-SUN 是基于 IEEE 802.15.4g、IEEE 802 和 IETF IPv6 标准的开放规范, 其中物理层 (Physical Layer, PHY) 基于 IEEE 802.15.4g 标准, 支持 24 跳大规模自组织网络, 具有长距离、低功耗的通信性能, 很好地契合 WSN 的通信需求<sup>[2]</sup>。Wi-SUN 协议提供多种 PHY 模式以满足不同的数据传输速率需求, PHY 模式主要包括调制方法, 传输速率和调制指数。速率自适应算法可以根据信道质量动态调整 PHY 模式以实现 WSN 性能优化。

现有速率自适应算法主要根据信道质量进行 PHY 模式的选择, 对于同一种调制方法, 在信道质量好的时候提高发送速率, 信道质量差的时候降低发送速率。获得信道质量信息的方法主要分为直接测量<sup>[3]</sup>和基于统计信息<sup>[6]</sup>两类。直接测量的方法通常通过接收端测量信号的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)<sup>[4]</sup>或接收信号强度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI)<sup>[4]</sup>来衡量信道质量, 并通过报文将信道质量反馈给发射端。发射端根据信道质量和 PHY 模式可以估计信道丢包率 (Packet Loss Rate, PLR), 在限制信道 PLR 的条件下选择最大的允许速率作为传输速率。据此, 发射端可以构建信道质量和 PHY 模式的映射表, 当信道质量变化, 可以通过查表实现速率自适应<sup>[5]</sup>。基于统计信息的方法通常通过统计发射端一段时间内的 PLR 来衡量信道质量。ARF 算法<sup>[6]</sup>中若连续 10 帧发送成功, 则速率向上调整一级, 若连续 2 帧发送失败, 则速率向下调整一级。AARF 算法<sup>[7]</sup>采用多个速率上调的门限值, 当上调的速率等级与信道质量不匹配, 速率回退至原来的等级, 同时提高速率上调的门限值。这种改进避免了频繁上调速率, 减小了速率的抖动。Minstrel 算法<sup>[8]</sup>和 HA-RRAA 算法<sup>[9]</sup>分别统计速率对应的传输吞吐率和丢包率, 并据此进行速率自适应。

现有速率自适应算法主要以 PLR 作为速率调整的指标, 未能准确评估速率调整对 WSN 的性能影响, 算法性能受调整阈值参数设置影响大, 无法得到平衡低丢包率和高传输速率的最佳 PHY 模式选择。同时, 现有速率

自适应算法未考虑传输速率对无线信道竞争的影响, 低速率链路需要占用信道更长的时间完成数据传输, 这会限制冲突域内其它链路的数据传输, 存在“效能异常”问题<sup>[10]</sup>。因此, 本文同时考虑传输速率对无线信道传输时延和竞争时延的影响, 构建以最小化 WSN 平均端到端发送时延为目标, 信道 PLR 范围为约束的混合整形优化问题。分别基于遗传算法和动态规划求解得到自适应速率, 实现 WSN 时延的整体优化。在完成算法设计后, 对本文提出的速率自适应算法和现有速率自适应算法进行仿真。结果表明, 本文提出的速率自适应算法具有更低的 WSN 平均端到端时延和更高的 WSN 平均吞吐量, 进一步优化了 WSN 性能。

## 1 Wi-SUN 系统模型

### 1.1 Wi-SUN 通信拓扑结构

Wi-SUN 通信拓扑如图 1 所示, Wi-SUN 可以通过 Mesh 拓扑实现自组网多跳通信。Wi-SUN 网络含有两种不同类型的传感设备: 全功能设备 (Full Functional Device, FFD) 和简单功能设备 (Reduced Functional Device, RFD)。RFD 只能作为端节点, FFD 可以作为端节点和转发节点。FFD 可以和 RFD 或者 FFD 通信, RFD 只能和 FFD 通信。有且仅有一个 FFD 作为协调器负责创建和管理 WSN。

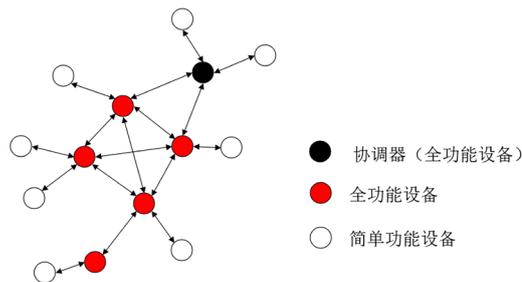


图 1 Wi-SUN 通信拓扑图

### 1.2 Wi-SUN PHY 模式

Wi-SUN 命令帧中 PHY 模式 ID 是一个唯一的 8 位值, 用于区分 Wi-SUN 所有 PHY 模式。PHY 模式 ID 前四位为 PHYType 字段, 定义了不同的调制方式。Wi-SUN 协议主要支持 FSK 和 OFDM 两种调制方式, 并支持多级传输速率。表 1 为 PHYType 字段不同值对应的调制方式, 值使用十进制表示。

表1 WiSUN 命令帧 PHYType 字段定义

值	调制方式
0	FSK 不带 FEC
1	FSK 带 FEC
2	OFDM 模式 1
3	OFDM 模式 2
4	OFDM 模式 3
5	OFDM 模式 4
6-15	保留

PHY 模式 ID 后四位为 PHYMode 字段，定义了在给定的调制方式下支持哪些 PHY 模式。表 2 为 FSK 调制方式下 PHYMode 字段不同值对应的 PHY 模式。

表2 FSK 调制方式下 WiSUN 命令帧 PHYMode 字段定义

值	调制方法	传输速率(kbps)	调制指数
0	2-FSK	50	0.5
1	2-FSK	50	1.0
2	2-FSK	100	0.5
3	2-FSK	100	1.0
4	2-FSK	150	0.5
5	2-FSK	200	0.5
6	2-FSK	200	1.0
7	2-FSK	300	0.5
8-15		保留	

FSK 调制方式提供 50kbps 至 300kbps 的传输速率，调制方法主要为 2-FSK，其误码率如下式<sup>[1]</sup>：

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{P}{N_0 R}}\right). \quad (1)$$

式中： $E_b$  为单位比特能量， $N_0$  为噪声密度， $\frac{E_b}{N_0}$  是归一化的 SNR， $P$  为接收信号功率， $R$  为传输速率，函数

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

表 3 为 OFDM 调制方式下 PHYMode 字段不同值对应的 PHY 模式。

表3 OFDM 调制方式 WiSUN 命令帧 PHYMode 字段定义

值	调制方法	传输速率(kbps)			
		模式1	模式2	模式3	模式4
0	BPSK	100	50	25	125
1	BPSK	200	100	50	25
2	QPSK	400	200	100	50
3	QPSK	800	400	200	100
4	QPSK	1200	600	300	150
5	16-QAM	1600	800	400	200
6	16-QAM	2400	1200	600	300
7-15			保留		

OFDM 调制模式有四种，提供 12.5kbps 至 2400 kbps 的传输速率，每种调制模式都有 7 种 MCS 传输级别。MCS0 和 MCS1 基于 BPSK 调制，MCS2、MCS3 和 MCS4 基于 QPSK 调制，MCS5 和 MCS6 基于 16-QAM 调制。

对于 MCS0 到 MCS4，其误码率如下式<sup>[1]</sup>：

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2P}{N_0 R}}\right). \quad (2)$$

对于 MCS5 和 MCS6，其误码率如下式<sup>[1]</sup>：

$$P_e = 3Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = 3Q\left(\sqrt{\frac{2P}{N_0 R}}\right). \quad (3)$$

在不考虑纠错码的条件下，数据帧发送成功需要保证每个码元被正确传输，所以 PLR 如下式：

$$PLR = 1 - (1 - P_e)^n. \quad (4)$$

式中： $n$  为码元数。

### 1.3 WiSUN 传输时延模型

$ETT_j$  表示链路  $j$  的期望传输时延 (Expected Transmission Time, ETT)，是成功传输一个帧所需的时间的数学期望，通过将成功发送一个帧所需的平均帧数与传输一个帧所需时间相乘得到：

$$ETT_j = \frac{1}{1 - PLR_j} \times \frac{L}{R_j}. \quad (5)$$

式中： $R_j$  为链路  $j$  的传输速率， $L$  为帧长度，WiSUN 协议中规定  $L$  最大为 127 字节， $PLR_j$  为链路  $j$  的 PLR， $\frac{1}{1 - PLR_j}$  表示链路  $j$  成功发送一个帧所需的平均帧数， $\frac{L}{R_j}$  表示链路  $j$  传输一个帧所需的时间。

设链路有  $K$  种 PHY 模式， $R_j$  如下式：

$$R_j = \sum_{k=1}^K \theta_{j,k} R_k \quad (6)$$

式中， $\theta_{j,k}$  为链路  $j$  是否选择第  $k$  种 PHY 模式的布尔变量， $R_k$  为第  $k$  种 PHY 模式的传输速率。

链路 PHY 模式仅对本链路 ETT 有影响。对于同一种调制方法，增大传输速率会降低传输一个帧的时间，但是会增大 PLR，从而增加重传次数。根据 SNR，可以找到最优的 PHY 模式使得 ETT 最小。

### 1.4 WiSUN 竞争时延模型

WiSUN 中 CSMA/CA 策略<sup>[2]</sup>如图 2 所示。NB 为退避次数， $M$  为最大退避次数。BE 为退避指数，初始值为  $b$ ，最大值为  $B$ 。WiSUN 设备每次发送数据帧前先随机延迟  $0 \sim 2^{BE} - 1$  个退避时隙后再执行空闲信道评估 (Clear Channel Assessment, CCA)，若信道空闲，则成功发送数据帧；若信道不空闲，则增大退避指数，再随机延迟一段时间，若退避次数大于  $M$ ，则发送失败。

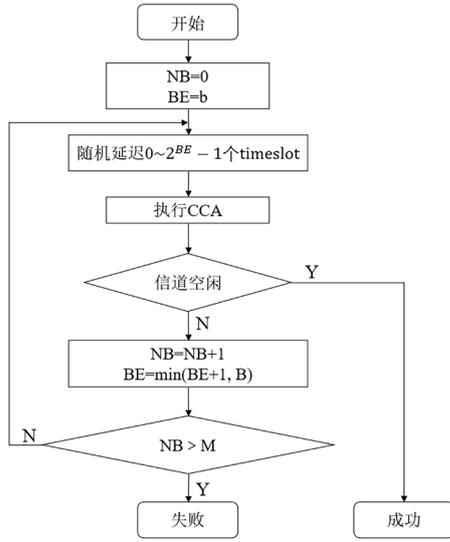


图2 WiSUN中CSMA/CA策略

链路发送数据帧的碰撞概率，与冲突域链路数和链路PHY模式有关，可以通过统计方法估计得到。如图3所示，对于两种ETT相同的PHY模式，低速率PHY模式每个帧需要占用信道较长的时间完成数据传输，在此期间其冲突域链路发送数据帧都会发生碰撞。高速率PHY模式每个数据帧只需要占用信道较短的时间完成数据传输，每个数据帧都需要进行CSMA/CA，从而避免低速率链路长期占用信道的问题。在多速率网络中，低速率链路数据帧需要占用信道更长的时间，限制了高速率链路的传输优势，这就是“效能异常”问题。对此，DR-CA算法<sup>[3]</sup>将具有相同或相当传输速率的链路分配在同一信道，并调整传输速率使每个信道上的所有链路的ETT总和大致相等，从而获得更好的性能。但是，DR-CA算法需要进行信道分配设计，且很难控制每个信道的所有链路的ETT总和大致相等，实现复杂。

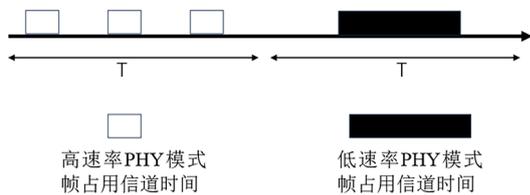


图3 PHY模式对冲突域链路的影响

为解决传输速率对无线信道竞争的影响，本文建立基于WiSUN的竞争时延模型。 $\alpha_j^m$ 为链路 $j$ 退避 $m$ 次的概率， $E(NB)_j$ 为链路 $j$ 发送一个帧的平均退避时隙数，是关于 $\alpha_j^m$ 的函数，可以通过将CSMA/CA每个退避次数对

应概率与对应平均退避时隙数相乘，再对所有相乘后的结果求和得到：

$$E(NB)_j = \frac{2^b - 1}{2} + \sum_{m=1}^M \alpha_j^m \times \frac{2^{\min\{B, b+m\}} - 1}{2}. \quad (7)$$

$ACD_j$ 表示链路 $j$ 的平均竞争时延（Average Contention Delay, ACD），是链路 $j$ 成功竞争无线信道所需要的时间的数学期望，通过将成功传输一个帧所需的平均帧数与发送一个帧的平均退避时长相乘得到：

$$ACD_j = \frac{1}{1 - PLR_j} \times E(NB)_j \times \tau. \quad (8)$$

式中： $\tau$ 为单个退避时隙的时长， $E(NB)_j \times \tau$ 表示链路 $j$ 发送一个帧的平均退避时长。

链路PHY模式对本链路及冲突域链路ACD都有影响。增大传输速率会增加本链路PLR，从而增加本链路ACD，但其可能会降低冲突域链路 $E(NB)$ ，从而降低冲突域链路ACD。信道竞争激烈的多速率网络“效能异常”问题更严重，对此低速率链路增大传输速率带来的性能优化更显著。

## 2 基于遗传算法的速率自适应算法

### 2.1 优化目标设计

针对时间敏感的WSN通信场景，以最小化WSN时延为目的进行速率自适应算法设计。对于WSN，每条链路时延包括传输时延、竞争时延、传播时延、处理时延和排队时延五个部分。链路PHY模式会直接影响传输时延和竞争时延，即链路发送时延。因此，可以将优化目标设计为WSN平均端到端发送时延最小。

设WSN有 $I$ 条数据流， $D_A$ 为WSN平均端到端发送时延，可通过下式计算得到：

$$D_A = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I D_i \times W_i. \quad (9)$$

式中， $W_i$ 为第 $i$ 条数据流的流量，可将其作为数据流权重， $D_i$ 为第 $i$ 条数据流的平均端到端发送时延，设 $N_i$ 表示第 $i$ 条数据流经过的链路集合，则 $D_i$ 可通过对第 $i$ 条数据流经过的每条链路的ETT和ACD求和得到：

$$D_i = \sum_{j \in N_i} (ETT_j + ACD_j). \quad (10)$$

优化问题可以表示成：

$$\begin{aligned}
\min_{\theta_{j,k}}. & \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (ETT_j + ACD_j) \times W_i, \\
s.t. & PLR_j \leq \sigma \quad \forall j \in \mathcal{N}_i, \\
& \theta_{j,k} \in \{0,1\} \quad \forall j \in \mathcal{N}_i, \\
& \sum_{k=1}^K \theta_{j,k} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{N}_i.
\end{aligned} \tag{11}$$

式中：优化变量  $\theta_{j,k}$  是一个布尔变量， $\sum_{k=1}^K \theta_{j,k} = 1$  保证链路只能选择一种 PHY 模式， $\sigma$  表示链路最大允许 PLR。

## 2.2 基于遗传算法的模型求解

公式 (11) 的优化变量是 WSN 所有链路的 PHY 模式选择，这是一个混合整形优化问题，适合使用遗传算法求解<sup>[4]</sup>，算法流程如图 4。

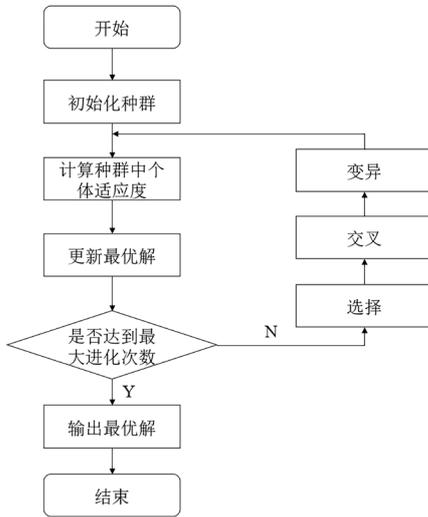


图 4 遗传算法流程图

遗传算法二进制编码的基因序列表示 WSN 所有链路的 PHY 模式选择，序列长度  $L$  是链路数  $N$  与链路 PHY 模式二进制编码所需码元数的乘积：

$$L = N \times \log K. \tag{12}$$

初始化种群步骤设置种群大小，最大进化次数，对于种群中每个个体，随机生成二进制编码的基因序列，每种基因序列对应一种 WSN 所有链路 PHY 模式选择。在适应度计算步骤，对于种群中每个个体，计算其基因序列对应 PHY 模式下的 WSN 平均端到端发送时延，时延越小则说明该个体适应度越高，性能更优。选择，交叉，变异为一次进化过程的三个步骤。选择步骤使用轮盘赌法，适应度更高的个体有更高的概率被选择作为下一代种群。在交叉步骤中种群中任意两个个体以一定概

率决定是否交叉，若交叉，两者随机选择一段基因序列进行交叉。在变异步骤中种群中每个个体按照一定概率决定是否变异，若变异，随机选择一个位点进行变异，按位取反。

基于遗传算法进行速率自适应可以实现 WSN 时延的整体优化，在保证最大进化次数和种群大小足够的条件下，其性能接近 WSN 时延性能上界。但是，该算法存在两个问题：一是算法需要知道 WSN 全局信息，对于大规模网络将消耗大量的存储资源；二是遗传算法需要保证最大进化次数和种群大小足够，对于大规模网络将消耗大量的计算资源。对此，可以通过网络分层设计减少资源消耗。

## 3 基于动态规划的速率自适应算法

针对基于遗传算法进行速率自适应存储和计算资源消耗过大的问题，提出一种基于动态规划的速率自适应算法：每个节点只需与邻居节点交换无线信道质量信息，每条链路发射端根据无线信道质量信息通过动态规划的方法进行速率自适应，实现 WSN 时延的整体优化。

### 3.1 无线信道质量评估方法

无线信道质量通过 SNR 和冲突域链路 ACD 进行综合评估，同时考虑了无线信道的 PLR 和冲突域竞争情况。

WSN 所有链路接收端周期性地接收信号 SNR 反馈给发射端，从而实现网络 SNR 信息的交换。运用统计的思想，链路发射端周期性地统计碰撞频率，作为其碰撞概率估计，并根据公式 (8) 计算得到该链路的 ACD，告知接收端，从而实现网络 ACD 信息的交换。SNR 和 ACD 信息交换示意图如图 5，信息可以通过路由报文携带。



图 5 SNR 和 ACD 信息交换示意图

链路发射端将本节点通信域链路的 ACD 的均值，作为冲突域链路的平均 ACD。为了保证通信域链路的

ACD 的均值能代表冲突域链路的平均 ACD，需要控制冲突域不能远大于通信域。

### 3.2 速率自适应策略

当链路 SNR 变化值超过阈值或冲突域链路平均 ACD 的变化值超过阈值时，说明无线信道质量出现明显的变化，启动速率自适应机制。阈值设置为链路 SNR 或冲突域链路平均 ACD 正常波动的最大值。链路 SNR 变化超过阈值时速率自适应策略如图 6 所示。若 SNR 增大，说明信道干扰程度减弱，则链路尝试 PLR 更高的 PHY 模式；若 SNR 减小，则链路尝试 PLR 更低的 PHY 模式。

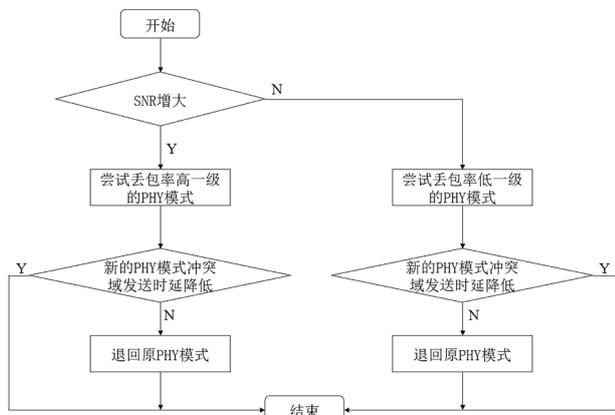


图 6 链路 SNR 变化超过阈值时的速率自适应策略

冲突域链路平均 ACD 变化超过阈值时速率自适应策略如图 7 所示。若平均 ACD 明显增大，说明信道竞争程度变得更激烈，尝试传输速率更高的 PHY 模式；若平均 ACD 明显减小，尝试传输速率更低的 PHY 模式。

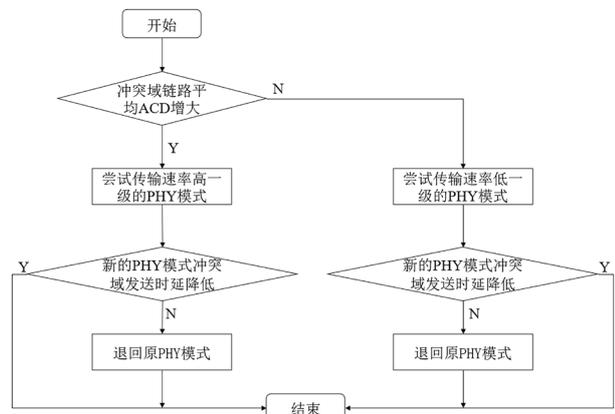


图 7 冲突域链路平均 ACD 变化超过阈值时的速率自适应策略

因为链路 PHY 模式对本链路 ETT、ACD 和冲突域链路 ACD 有影响，因此链路通过比较原 PHY 模式和新 PHY 模式下本链路 ETT、ACD 和冲突域链路 ACD 的加

权和判断能否使用新的 PHY 模式。若新 PHY 模式更小，则继续使用新 PHY 模式；若原 PHY 模式更小，则退回原 PHY 模式。

### 3.3 基于动态规划的算法设计

计算链路 ACD 需要统计  $\alpha$ ，若在链路尝试新的 PHY 模式的统计周期内冲突域内有其它链路同时尝试新的 PHY 模式，则无法得到本链路尝试新的 PHY 模式对冲突域链路 ACD 的影响。因此，每条链路在尝试使用新的 PHY 模式前，需要检测冲突域内是否有其它链路正在尝试使用新的 PHY 模式，若无，则可以尝试使用新的 PHY 模式，并告知冲突域内链路；若有，则通过定时器随机延迟一段时间后再检测。

算法运用了动态规划的思想<sup>[4]</sup>，其流程如图 8 所示。链路首先根据初始 SNR 通过最小化 EET 选择初始速率，当信道质量变化超过阈值时，启动速率自适应机制。链路在保证当前冲突域其它链路 PHY 模式不变的条件下，执行相应速率自适应策略以尝试更优的 PHY 模式。WSN 所有链路一起运行速率自适应算法，可以实现 WSN 时延的整体优化。

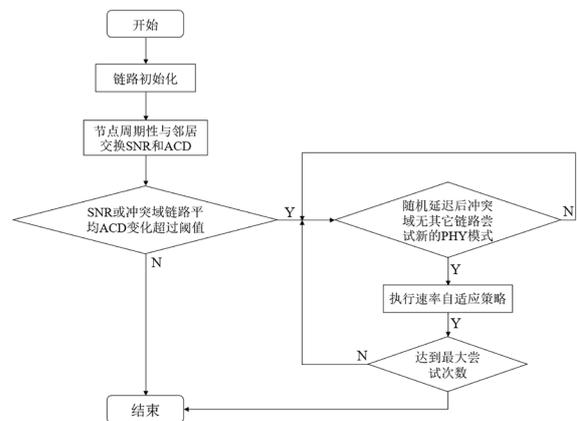


图 8 基于动态规划的算法设计流程图

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真场景

在固定空间内随机生成一定数量的 RFD 和 FFD，节点位置服从泊松分布。距离在通信域内的 RFD 和 FFD，FFD 和 FFD 互为邻居。随机生成一定数量的数据流，并

设置数据源发包频率，路由根据 RIP 协议动态生成<sup>[9]</sup>，链路 SNR 随机生成，其范围为 10-40dB。

仿真参数设置如下表：

表 4 仿真参数设置

参数名	参数值
RFD 数目	10
FFD 数目	10
空间范围	4m×4m
冲突域半径	1m
通信域半径	0.5m
SNR 范围	10-40dB
$L$	127 字节
$b$	2
$B$	6
$M$	4
$\tau$	0.05ms
$\sigma$	0.3
$\alpha$ 统计周期	3s
SNR 交换周期	0.1s
ACD 交换周期	3s
遗传算法种群大小	50
遗传算法变异概率	0.2
遗传算法交叉概率	0.95
遗传算法迭代次数	40

## 4.2 仿真设计与结果分析

在相同的仿真场景下，通过比较不同的速率自适应算法的 WSN 平均端到端时延和 WSN 平均吞吐量来评估算法性能。对于知道 WSN 全局信息的基于遗传算法的速率自适应算法，因为其优化目标是 minimized WSN 平均端到端发送时延，在保证最大进化次数和种群大小足够的条件下，其性能接近 WSN 时延性能上界。对于只知道邻居信息的速率自适应算法，对比以往基于 PLR 阈值和本文基于动态规划的算法性能，并与基于遗传算法的速率自适应算法性能进行对比，从而知道算法相对 WSN 时延性能上界的差距。

固定数据流数目为 24，改变数据源发包频率，比较三种速率自适应算法性能，结果如图 9，10 所示。固定数据源发包频率为 10 帧/s，改变 WSN 数据流数目，比较三种速率自适应算法性能，结果如图 11，12 所示。

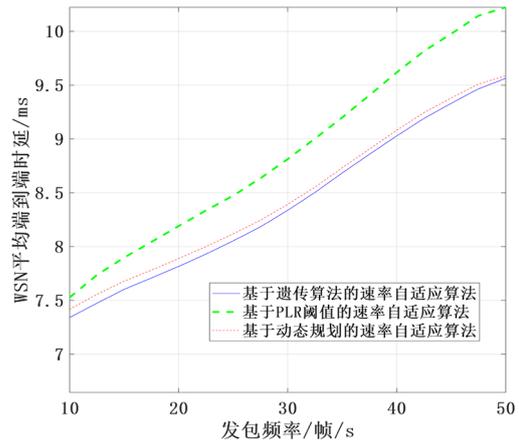


图 9 WSN 不同发包频率下不同速率自适应算法时延性能

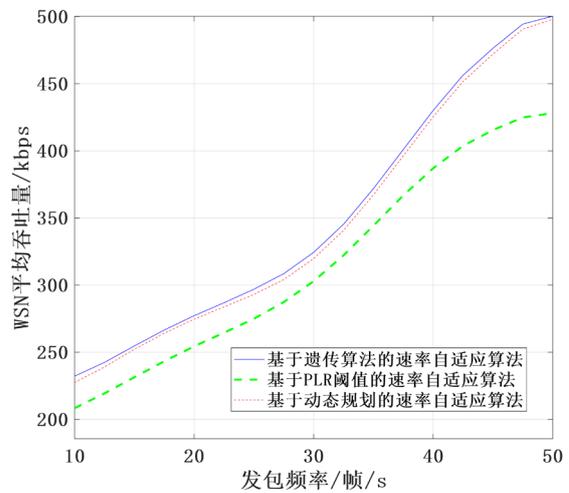


图 10 WSN 不同发包频率下不同速率自适应算法吞吐量性能

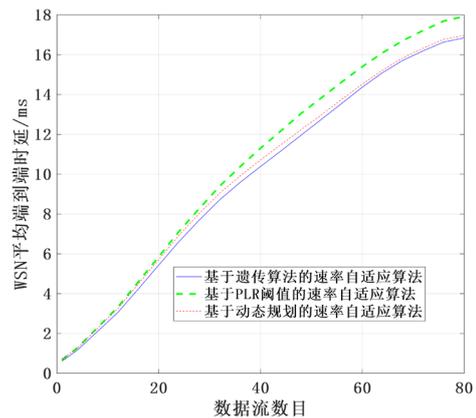


图 11 WSN 不同数据流数目下不同速率自适应算法时延性能

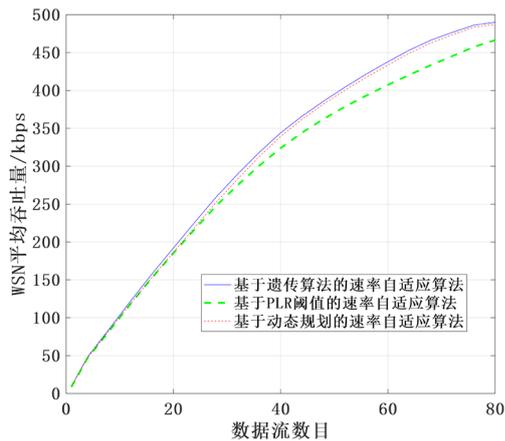


图 12 WSN 不同数据流数目下不同速率自适应算法吞吐量性能

由仿真结果可知,在知道邻居信息的基础上,基于动态规划的速率自适应算法相比于传统的基于 PLR 阈值的速率自适应算法,具有更低的 WSN 平均端到端时延和更高的 WSN 平均吞吐量,进一步优化了 WSN 性能。这是因为基于动态规划的速率自适应算法通过 WSN 平均端到端发送时延评估速率调整对 WSN 的性能影响,平衡了低丢包率和高传输速率,同时考虑了传输速率对无线信道传输时延和竞争时延的影响。在 WSN 发包频率较低或数据流数目较少时,无线信道很少出现冲突情况,传输时延是 WSN 时延性能的主要因素。随着 WSN 发包频率或数据流数目增加,无线信道竞争更激烈,ACD 逐渐成为 WSN 性能提升的瓶颈,基于动态规划的速率自适应算法性能提升更加明显。基于动态规划的速率自适应算法与基于遗传算法的速率自适应算法性能接近,但前者只需在邻居信息的基础上进行速率自适应,大大减少了计算与存储资源。

## 5 结论

本文同时考虑了传输速率对无线信道传输时延和竞争时延的影响,构建了以最小化 WSN 平均端到端发送时延为目标,PLR 范围为约束的优化问题。分别基于遗传算法和动态规划进行速率自适应算法设计,实现 WSN 时延的整体优化。基于遗传算法的速率自适应算法性能接近 WSN 时延性能上界,但对于大规模网络将消耗大量的计算和存储资源,可以通过网络分层设计减少资源消耗。基于动态规划的速率自适应算法可以在实现大规模动态组网性能优化的同时维持较小存储和计算开

销。实验结果表明,相比于现有的速率自适应算法,本文提出的两种速率自适应算法具有更低的 WSN 平均端到端时延和更高的 WSN 平均吞吐量,进一步优化了 WSN 性能。

## 参考文献(References):

- [1] 刘建,何佳,孙香涛,等.Wi-SUN 在无线传感网络中应用的研究[J].中国新通信,2020,22(19):88-89.
- [2] 金明松,杨贵亮,陆会贤,等.Wi-SUN 协议及应用发展趋势分析[J].信息通信,2020(12):18-21.
- [3] 赵柏山,李嘉欣,陈瑜.一种基于 RBAR 的高效速率自适应算法[J].无线电工程,2020,50(01):15-20.
- [4] 孙中杰.基于 RSSI 门限的 BLE 速率自适应算法[J].物联网技术,2022,12(09):57-59.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2022.09.015.
- [5] 吴宇,喻明.无线 Mesh 网络速率自适应算法研究[J].无线电通信技术,2020,46(03):293-299.
- [6] KAMERMAN A, MONTEBAN L. WaveLAN@-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band [J]. Bell Labs technical journal, 1997, 2(3): 118-133.
- [7] XI Y, KIM B S, WEI J, et al. Adaptive multirate auto rate fallback protocol for IEEE 802.11 WLANs[C]/MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference. IEEE, 2006: 1-7.
- [8] Xia D, Hart J, Fu Q. Evaluation of the Minstrel rate adaptation algorithm in IEEE 802.11 g WLANs[C]/2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2013: 2223-2228.
- [9] Pefkianakis I, Wong S H Y, Yang H, et al. Toward history-aware robust 802.11 rate adaptation[J]. IEEE Transactions on mobile computing, 2012, 12(3): 502-515.
- [10] HEUSSE M, ROUSSEAU F, BERGER-SABBATEL G, et al. performance anomaly of 802.11 b[C]/IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428). IEEE, 2003, 2: 836-843.
- [11] FOWLER S, EBERHARD M, BLOW K, et al. Adaptive sending rate over wireless mesh networks using SNR[J]. International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies (IJWNBT), 2011, 1(3): 30-48.
- [12] 黄仁,郗辉,任军华.非时隙 CSMA/CA 性能分析与研究[J].计算机工程与应用,2009,45(07):108-110+118.

- [13] NIRANJAN N, PANDEY S, GANZA A. Design and evaluation of multichannel multirate wireless networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11: 697-709.
- [14] 张捷. 计算机遗传算法在网络优化设计中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(24): 14-15.
- [15] 文超婷, 沈秋铭, 姚仁杰, 等. 动态规划及其算法应用[J]. 科技风, 2022(25): 69-71. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202225023.
- [16] 金海峰, 曹雪花, 倪峰. RIP 路由协议分析及仿真[J]. 福建电脑, 2021, 37(02): 20-23. DOI: 10.16707/j.cnki.fjpc.2021.02.005.



翁晓龙（2000—），男，2022 年获得电子科技大学学士学位，现为浙江大学硕士研究生，主要研究方向为无线传感网络，通信感知一体化等，22260113@zju.edu.cn;



余官定（1980—），男，通讯作者，2006 年获得浙江大学博士学位，现为浙江大学教授，博士生导师，主要研究方向为第六代移动通信系统，包括无线 AI，通信感知一体化，语义通信等，累计发表论文 200 余篇，累计引用次数达 8000 多

次，yuguan ding@zju.edu.cn。

录用和收费通知

翁晓龙, 余官定, 何映辉 先生/女士: 您好!

您的文章 无线传感网络速率自适应算法设计与仿真 经专家审稿, 符合要求, 决定录用 (文章编号: cg230606)。请尽快交纳版面费 2100 元到我编辑部, 收到款后我们即安排刊期, 并将正规发票寄上, 待文章发表后我们赠送第一作者两本杂志。请在 2024 年 1 月 28 日之前将完成。谢谢合作!

收款银行帐号、户名如下:

南京市建设银行四牌楼支行, 行号: 105301000361

户名: 东南大学 帐号: 32001594138059123456

按相关新规定, 我校开具的发票必须要作者提供本单位纳税人识别号, 否则无法开具发票。请务必在转账时附上贵单位纳税人识别号。

为了确保及时收到您的版面费, 请一定注明您的稿号, 不接受邮局柜台现金汇款! 为了确保发票能安全寄达您的手中, 我们会通过顺丰快递到付的方式将发票邮寄给您, 谢谢合作!

文章的具体刊期可登陆我们的网址: <http://chinatransducers.seu.edu.cn>

东南大学《传感技术学报》编辑部

2024年1月18日



# Flow Management of Wireless Sensor Network Based on Data Anomaly Indicators

Xiaolong Weng<sup>1</sup>, Yinghui He<sup>2\*</sup>, Guanding Yu<sup>2</sup>

(1.College of Engineers, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310015, China;

2.College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** Wireless Sensor Network (WSN) is widely used in data monitoring in various fields. Anomaly detection delay can be shortened by dynamically adjusting the data sampling frequency based on data anomaly indicators. For the flow requirements of data streams with different anomaly indicators, both transmission delay and competition delay of the links are considered. A flow allocation model is established with the optimization goal of minimizing the average end-to-end sending delay of the network and the constraint of utilization rate of the wireless channels to achieve network load balance. When the network flow exceeds the flow constraint, congestion control is carried out based on data anomaly indicators to improve the flow balance effect. Flow scheduling is carried out between data streams based on data anomaly indicators, while it is carried out within data streams based on data collection time, which further improves data real-time performance while ensuring fairness in flow scheduling. The simulation results show that the flow management algorithm proposed can reduce the average end-to-end delay of the network and improve the average throughput of the network while ensuring flow fairness.

**Key words:** wireless sensor network; data anomaly indicators; network route; congestion control; flow scheduling

EEACC: 7230

doi:

## 基于数据异常指标的无线传感网络流量管理

翁晓龙<sup>1</sup>, 何映晖<sup>2\*</sup>, 余官定<sup>2</sup>

(1.浙江大学工程师学院, 杭州 浙江 310015; 2.浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 浙江 310058)

**摘要:** 无线传感网络 (WSN) 广泛应用于各个领域的数据监测, 基于数据异常指标动态调整数据采样频率可以缩短异常检测时延。针对不同异常指标数据流的流量需求, 综合考虑链路的传输时延和竞争时延, 建立以最小化网络平均端到端发送时延为优化目标, 无线信道利用率为约束的流量分配模型, 可以实现网络负载均衡。在网络流量超过流量约束时, 基于数据流异常指标进行拥塞控制, 可以提高流量均衡效果。数据流间根据数据异常指标进行流量调度, 数据流内根据数据采集时间进行流量调度, 可以在保证流量调度公平性的基础上进一步提升数据实时性。仿真结果表明, 所提流量管理算法能够在保证流量公平性的同时降低网络平均端到端时延, 提高网络平均吞吐量。

**关键词:** 无线传感网络; 数据异常指标; 网络路由; 拥塞控制; 流量调度

中图分类号: TN 929

文献标识码: A

文章编号:

无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)已广泛应用于环境监测、智能交通、健康医疗等领域<sup>[1]</sup>。WSN中传感节点负责感测数据,并将采集的数据通过WSN传输到信宿<sup>[2]</sup>。WSN通信拓扑如图1所示,通过Mesh拓扑实现自组网多跳通信。WSN有两种不同类型的传感设备:全功能设备(Full Functional Device, FFD)和简单功能设备(Reduced Functional Device, RFD)。RFD只能作为端节点,FFD可以作为端节点和转发节点。FFD可以和RFD或者FFD通信,RFD只能和FFD通信。有且仅有一个FFD作为协调器负责创建和管理WSN。通过Mesh组网的方式,设备发送的数据帧经过多跳路由后可以到达其它设备。WSN在状态监测应用场景中通过对传感数据进行异常检测可以捕捉不同流量的数据异常程度。传统的流量管理算法根据数据流异常指标划分不同的服务质量(Quality of Service, QoS)优先级,并且动态调整不同QoS优先级流量的网络资源分配<sup>[3-4]</sup>。传统的流量管理算法未考虑数据采样频率对异常检测的影响,本文在满足无线信道约束条件下通过提高异常流量的数据采样频率可以提高异常流量数据采样的实时性,从而提高异常检测的实时性。本文以电池状态监测为例,通过对电池WSN数据流进行异常检测得到相应的异常指标,并据此动态调整数据采样频率,从而确定流量需求并进行流量管理。仿真结果表明,所提方法能够降低异常检测的时延。

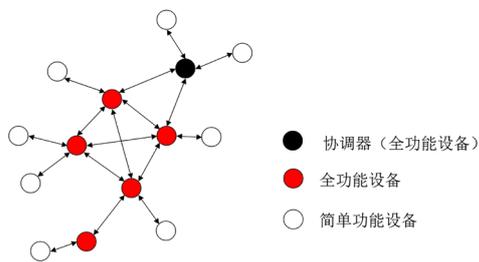


图1 WSN通信拓扑图

针对WSN不同异常指标数据流的流量需求,良好的流量管理可以很大程度优化网络时延、吞吐量等性能,满足时间敏感、高流量WSN的数据传输需求。本文基于数据异常指标进行WSN流量管理,流程如图2所示,流量管理主要包括网络路由、拥塞控制和流量调度。网络路由由算法在网络流量满足流量

约束条件下通过设计流量分配模型实现数据流路径选择,拥塞控制算法在网络流量超过流量约束时动态调整网络流量以缓解网络拥塞程度,流量调度算法对链路分配的流量进行QoS优先级调度。

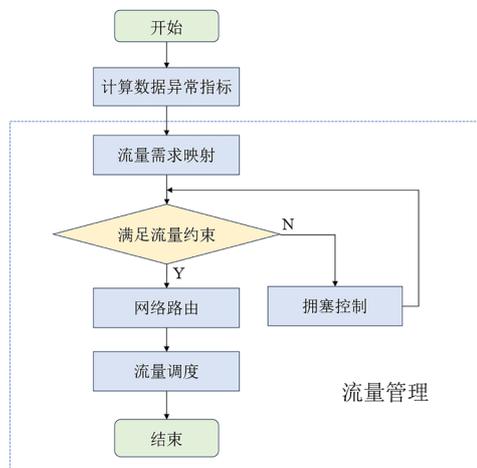


图2 基于数据异常指标的WSN流量管理算法流程图

网络路由算法可以分为单路径路由算法和多路径路由算法。开放最短路径优先算法(Open Shortest Path First, OSPF)<sup>[5]</sup>是常用的单路径路由算法,通过洪泛算法广播链路状态以构建网络拓扑,基于网络拓扑计算最短路径并更新路由表,实现最优路径选择和数据转发。单路径路由算法实现简单,易于管理和配置,但是因为流量集中于单条路径,容易造成负载不均衡的问题。多路径路由算法通过多条路径传输数据流,可以实现网络的负载均衡,从而提高网络的吞吐量,降低网络的时延。时延最小化多路径路由算法(Delay Minimization Multiple Path Routing, DMMP)<sup>[6]</sup>构建以最小化网络平均端到端传输时延为优化目标,链路容量为约束的流量分配模型,并根据模型求解后得到的流量分配结果设计网络多路径路由。DMMP在计算网络时延时,仅考虑了链路传输时延,而未考虑网络中链路竞争无线信道的竞争时延,导致传输速率较快的路径在流量分配未达到其容量前会不断往该路径分配流量,形成网络流量的“热点”区域,仍存在负载不均衡的问题。同时,DMMP在计算流量约束时,仅考虑链路容量,未考虑无线信道利用率,容易出现信道拥塞的问题。本文设计了负载均衡-时延最小化多路径路由算法(Load Balance-Delay Minimization Multiple Path Routing, LB-DMMP),

综合考虑链路的传输时延和竞争时延，建立以最小化网络平均端到端发送时延为优化目标，无线信道利用率为约束的流量分配模型。仿真结果表明，LB-DMMPR算法相比于OSPF和DMMPR具有更低的网络平均端到端时延和更高的网络平均吞吐量，优化了网络性能。

拥塞控制算法根据网络拥塞情况动态调整数据流的流量。当网络出现拥塞时，传统的拥塞控制算法<sup>[7]</sup>通过调整拥塞窗口大小控制数据流的流量。传统的拥塞控制算法未考虑不同数据流的差异，无法保证各数据流拥塞控制的公平性。基于往返时延的拥塞控制算法<sup>[8]</sup>基于往返时延大小构建拥塞因子与公平因子，在提高网络吞吐量的同时保证了流量分配的公平性。但是，该算法未考虑不同数据流的QoS优先级差异。对此，本文提出基于数据异常指标的拥塞控制算法，当网络流量超过流量约束时，根据数据流异常指标比例进行拥塞控制。仿真结果表明，本文所提的拥塞控制算法具有更好的流量均衡效果，优化了拥塞控制的公平性。

流量调度算法动态调整不同QoS优先级流量的网络资源分配，从而根据QoS优先级更加合理地利用网络资源，进一步优化网络性能<sup>[9]</sup>。严格优先级流量调度（Strict Priority, SP）算法严格按照数据流QoS优先级从高到低的次序，优先发送队列中较高QoS优先级的数据帧。SP算法会造成低QoS优先级的数据帧因为高QoS优先级的数据帧未全部传输完成而等待很长时间，即低QoS优先级流量“饿死”。加权轮询调度（Weighted Round Robin, WRR）算法根据QoS优先级设置每个数据流的配额，当队列每调度一个数据帧，对应数据流余额就减去1，当余额等于0的时候就停止这个数据流的调度。WRR算法的缺点在于没考虑可变数据帧长度带来的不公平性，不适用于数据帧长度多变的场景。加权公平排队（Weighted Fair Queue, WFQ）算法为每个数据帧设置序列号，并且调度所有数据流中序列号最小的数据帧，可以实现根据各数据流的QoS优先级比例进行流量调度。WFQ算法因为设置序列号限制了同一数据流的数据帧时序，无法进行数据流内部的流量调度。本文提出了数据流间流量调度和数据流

内流量调度结合的流量实时差分加权轮询调度算法（Real Time-Deficit Weighted Round Robin, RT-DWRR）。数据流间采用DWRR算法，根据数据流异常指标划分不同的QoS优先级，以字节作为流量调度的单位，适用于数据帧长度多变的场景。数据流内优先调度数据采集时间更新的数据帧，保证数据的实时性。仿真结果表明，RT-DWRR算法相比于SP算法和WFQ算法具有更低的网络平均端到端时延，进一步优化了网络性能。

## 1 基于数据异常指标的流量需求映射

以电池WSN为例，电池相关状态数据以时间序列形式传输，可使用K-shape聚类算法对多个电池单体组成的电池组数据进行异常水平评估<sup>[10]</sup>。K-shape聚类算法基于时间序列的形状，采用互相关方法计算两个时间序列的基于形状的距离，是精确可扩展，保证缩放和平移不变性的高效时间序列聚类算法。

轮廓系数可以作为评价聚类效果的指标<sup>[11]</sup>，其值介于[0,1]，越趋近于1表示聚同类间距离越大，类内距离越小，聚类效果越好，越趋近0表示聚类效果越差。K-shape聚类算法对电池组多个电池单体实时状态数据流进行聚类，并实时更新聚类结果。在保证电池组初始状态为正常工作的情况下，将初始聚类轮廓系数与实时聚类轮廓系数的比值作为电池组数据异常指标  $p$ ：

$$p = \frac{S_{init}}{S_{now}}. \quad (1)$$

$p$  越趋近于1，说明实时轮廓系数与初始正常轮廓系数越接近，电池组异常水平越低。当  $p$  大于1且越大时，说明实时轮廓系数逐渐偏离初始正常轮廓系数，且聚类效果越差，电池组异常水平越高。

根据电池组数据异常指标调整对应数据流的流量需求，使得电池组在正常状态使用较低的采样频率，维持较低的流量，在异常状态使用较高的采样频率，分配到更高的流量，有助于提升电池预警实时性与准确性。

数据流  $i$  的流量需求  $F_i'$  可以表示如下：

$$F_i' = F_{\min} + \max\left\{1 - \frac{1}{p}, 0\right\} \times (F_{\max} - F_{\min}). \quad (2)$$

式中,  $F_i'$  与  $p$  成正相关关系, 但是  $F_i'$  不能无穷增长, 并且需要在  $p$  上升前期  $F_i'$  有较明显增长, 而在后期数据明显异常时  $F_i'$  增长趋势渐缓, 即边际效用递减。因此, 需要使用单调递增的凹函数描述  $F_i'$  与  $p$  的函数关系。本式选择典型的单调递增的凹函数且将  $F_i'$  限制在  $F_{\min}$  到  $F_{\max}$  范围内,  $F_{\min}$  为电池组正常状态下的基础流量需求, 可根据基础采样频率  $f_{\min}$  与单次采样数据大小  $D$  相乘得到。  $F_{\max}$  为电池组失控状态下的最大流量需求, 可根据最大采样频率  $f_{\max}$  与  $D$  相乘得到。

## 2 负载均衡-时延最小化多路径路由算法

### 2.1 流量约束模型

WSN中位于冲突域内的链路存在信道竞争, 竞争关系可以通过将WSN拓扑图转化为WSN信道竞争资源图得到。图3为WSN局部拓扑图, 虚线表示冲突域, 若链路使用相同频带, 则链路集合  $\{e_1, e_2, e_3\}$  彼此存在信道竞争关系, 链路集合  $\{e_2, e_3, e_4\}$  彼此也存在信道竞争关系, 可以分别作为一个信道竞争区域。将每个信道竞争区域对应的信道资源作为一个信道, 可以绘制WSN信道局部竞争资源图, 如图4所示。

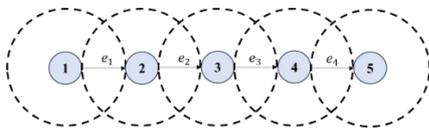


图3 WSN局部拓扑图

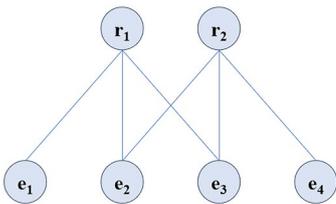


图4 WSN局部信道竞争资源图

链路  $(a, b)$  表示节点  $a$  为发射端,  $b$  为接收端的链

路, 其容量为  $B(a, b)$ , 可根据香农公式计算得到:

$$B(a, b) = W \log\left(1 + \frac{S_{(a, b)}}{N_{(a, b)}}\right). \quad (3)$$

式中,  $W$  表示链路  $(a, b)$  使用的频带带宽,  $S_{(a, b)}$  表示链路  $(a, b)$  的接收信号功率,  $N_{(a, b)}$  表示链路  $(a, b)$  的噪声功率,  $\frac{S_{(a, b)}}{N_{(a, b)}}$  表示链路  $(a, b)$  的信噪比, 可以通过功率测量与计算得到。

### 2.2 流量分配模型

设WSN有  $I$  个数据流, 每个数据流有各自的源和宿。在考虑网络流量约束模型的基础上, 以最小化网络平均端到端发送时延为优化目标建立流量分配模型:

$$\begin{aligned} \min_{f_i(a, b)} & \frac{1}{I} \sum_{(a, b) \in E} \sum_{i=1}^I \left( \frac{f_i(a, b)}{B(a, b)} + \frac{f_i(a, b)}{L} \times E(NB(a, b)) \times \tau \right), \\ \text{s.t.} & \quad 0 \leq f_i(a, b) \leq F_i, \quad (1) \\ & \quad \sum_{b \in \mathcal{O}(a)} f_i(a, b) - \sum_{b \in \mathcal{I}(a)} f_i(b, a) = \psi_i(a), \quad (2) \\ & \quad 0 \leq \sum_{(a, b) \in \mathcal{R}_i} \frac{\sum_{i=1}^I f_i(a, b)}{B(a, b)} \leq 1. \quad (3) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $f_i(a, b)$  表示第  $i$  个数据流在链路  $(a, b)$  上分配的流量,  $\frac{f_i(a, b)}{B(a, b)}$  表示数据流  $i$  在链路  $(a, b)$  上分配流量的传输时延。WSN采用带有冲突避免的载波侦听多路访问 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid, CSMA/CA) 机制<sup>[12]</sup>, 在发送数据前先监听信道是否空闲, 若空闲则发送数据, 否则等待一段时间后再次监听以避免信道冲突。  $L$  表示数据帧长度,  $E(NB(a, b))$  表示链路  $(a, b)$  在CSMA/CA机制下发送一个数据帧的平均退避时隙数, 可以通过统计方法得到,  $\tau$  表示单个退避时隙时长,  $\frac{f_i(a, b)}{L} \times E(NB(a, b)) \times \tau$  表示数据流  $i$  在链路  $(a, b)$  上分配流量的竞争时延。  $F_i$  表示第  $i$  个数据流总流量,  $\mathcal{O}(a)$  表示以节点  $a$  为发射端的链路接收端节点集合,  $\mathcal{I}(a)$  表示以节点  $a$  为接收端的链路发射端节点集合,  $\psi_i(a)$  表示节点  $a$  上第  $i$  个数据流出口流量

与进口流量的期望差值，如式（5）。若节点是数据源，则数据流流出该节点的流量等于数据流总流量；若节点是数据宿，则数据流流进该节点的流量等于数据流总流量；若节点是数据转发节点，则数据流流进该节点的流量等于数据流出该节点的流量，保证流量进出平衡。 $\kappa_n$ 为竞争无线信道 $n$ 的冲突域链路集合。优化目标为最小化网络平均端到端发送时延，其中每个数据流发送时延为其经过的每条链路上分配流量的传输时延和竞争时延的总和。约束①说明数据流在链路上分配的流量不会超过数据流总流量，约束②说明数据流在节点出口分配流量与进口分配流量的差值等于期望差值，约束③说明竞争无线信道的所有链路的利用率之和不会超过1。

$$\psi_i(a) = \begin{cases} F_i & a \text{ 是流量 } i \text{ 源节点} \\ 0 & a \text{ 是流量 } i \text{ 转发节点} \\ -F_i & a \text{ 是流量 } i \text{ 宿节点} \end{cases} \quad (5)$$

因为流量分配模型是线性规划问题，所以可以通过单纯形法<sup>[13]</sup>求解得到流量分配结果，流程如图



5所示。单纯形法通过不断选择入基和出基变量，更新单纯形表格的数据，最终找到线性规划问题的最优解。

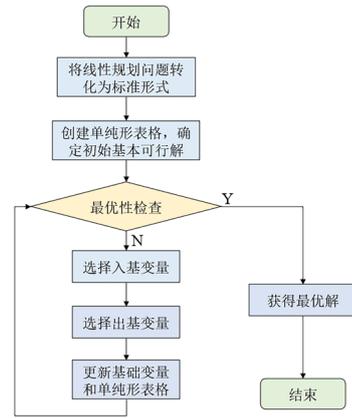


图5 单纯形法流程图

### 2.3 网络路由设计

根据网络流量分配结果，可以进行网络路由设计。节点对于数据流的路由有多种下一跳链路选择，选择概率可根据流量分配结果进行计算，如下式：

$$P_i(a,b) = \frac{f_i(a,b)}{\sum_{o \in \mathcal{O}(a)} f_i(a,o)} \quad (6)$$

式中， $P_i(a,b)$ 表示数据流 $i$ 经过节点 $a$ 往链路 $(a,b)$ 路由的概率，是数据流 $i$ 在链路 $(a,b)$ 上分配的流量占数据流 $i$ 在以节点 $a$ 为发射端的所有链路上分配的总流量的比例。

### 3 基于数据异常指标的拥塞控制算法

流量触发更新流程如图6所示，当数据流异常指标变化超过阈值，触发流量需求更新。若网络流量满足流量约束，可通过单纯形法求解流量分配模型并更新网络流量分配。当网络流量超过流量约束，流量分配模型无法找到可行解，这时需要先对网络所有数据流进行拥塞控制后再求解流量分配模型并更新网络流量分配。

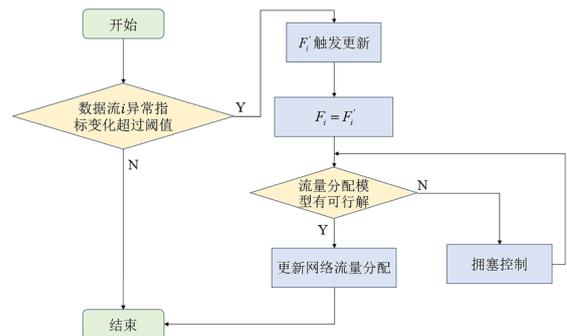


图6 流量触发更新流程图

当数据流*i*的流量需求触发更新,且新增的未分配的流量需求 $U_i$ 超过流量约束,需要对网络所有数据流进行拥塞控制。本文考虑不同数据流的流量差异,基于数据异常指标进行拥塞控制。

拥塞控制算法流程如图7,重复找寻网络是否存在数据流*i*的增广路径,若存在,则沿着增广路径分配最大可分配流量,并更新 $U_i$ ;若不存在,则找寻网络中其它数据流*j*与数据流*i*竞争的饱和链路(*a,b*),饱和链路包括链路竞争无线信道利用率达到1的链路,可以根据数据流*i*与数据流*j*的数据流异常指标比例均衡数据流*i*和*j*在链路(*a,b*)上分配的流量:

$$f_j(a,b) = \max\{0, \frac{F_j'(C_i + C_j)}{(F_i' + F_j')} - (F_j - f_j(a,b))\}. \quad (7)$$

式中, $C_j$ 为网络支持数据流*j*的容量,包括数据流*j*已分配流量和可分配流量, $C_i$ 为网络支持数据流*i*的容量,包括数据流*i*的已分配流量。 $\frac{F_j'(C_i + C_j)}{(F_i' + F_j')}$ 表示根据数据流异常指标比例均衡后数据流*j*分配的总流量, $F_j - f_j(a,b)$ 表示数据流*j*在链路(*a,b*)之外分配的总流量。均衡后 $f_j(a,b)$ 保持不变或降低,若 $f_j(a,b)$ 降低,数据流*i*可以在链路(*a,b*)上分配更多的流量。

重复上述步骤,直到 $U_i = 0$ 说明数据流*i*触发新增的所有流量需求都得到满足,或已遍历网络其它数据流与数据流*i*竞争的所有饱和链路,说明网络所有数据流流量均衡后仍无法满足数据流*i*触发新增的所有流量需求,无法将剩下的 $U_i$ 分配给链路,因此需要降低数据流*i*的流量 $F_i = F_i' - U_i$ 。

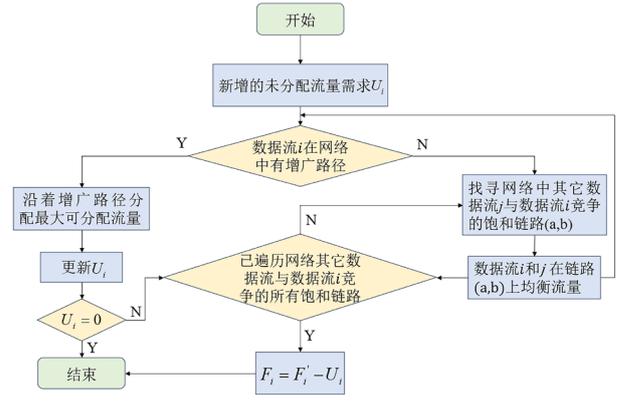


图7 拥塞控制算法流程图

## 4 流量实时差分加权轮询调度算法

同一时刻链路的等待队列可能存在多个数据流的多个数据帧,本文所提RT-DWRR算法结合数据流间流量调度和数据流内流量调度,在DWRR算法的基础上进一步提升数据的实时性。

数据流间流量调度采用DWRR算法<sup>[4]</sup>,以字节为单位,按照数据流报文长度进行流量调度。算法根据数据流异常指标划分不同的QoS优先级,并设置每个数据流的配额。数据流异常指标越高,QoS优先级越高,设置配额的字节数越多。余额用来表示配额的消耗情况。初始时余额等于配额,当队列每调度一个数据流报文,对应数据流余额就减去该报文长度,当余额等于或小于0的时候就停止这个数据流的调度。DWRR算法考虑到可变数据帧长度带来的不公平性,适用于数据帧长度多变的场景。

数据流内流量调度设置每个数据帧的数据采集时间与过期时间,对于同一条数据流的数据帧,优先调度数据采集时间更新的数据帧,并丢弃过期的数据帧。在网络拥塞的场景下可以保证数据的实时性,减缓网络的拥塞,适用于时间敏感的WSN。

## 5 仿真结果

### 5.1 仿真场景

在固定空间内随机生成多个RFD和FFD,节点位置服从泊松分布,距离在通信域内的RFD和FFD、FFD和FFD互为邻居。每个RFD代表一个电池组,电池组数据来源于型号为BM-11-35.2/280的电池单体组成的电池组。电池组分为正常电池组和异常电池组,异常电池组通过对电池组整体长时间过充以诱

发电池组热失控。相关仿真参数如下表：

表 1 仿真参数设置

参数名	参数值
空间范围	4m×4m
冲突域半径	2.5m
通信域半径	1.5m
异常电池组数量	2~8
正常电池组数量	2
FFD 数量	20
信噪比范围	10dB~30dB
链路可用带宽	0.2MHz
$L$	100~1000 字节
$f_{min}$	0.2Hz
$f_{max}$	5Hz
$D$	50kb

## 5.2 仿真设计与结果分析

运用K-shape聚类算法对电池组数据进行异常检测，通过轮廓系数构建电池组数据异常指标，比较流量管理算法对电池组异常检测时延的影响。仿真网络包括2个异常电池组，图8为异常电池组1和2的数据异常指标变化的时序图。初始时间段电池组数据异常指标保持在1.0左右，说明电池组保持正常状态。10s后电池组数据异常指标逐渐上升，在达到7.5后聚类情况发生变化，触发电池组预警。本文所提流量管理算法随着电池组数据异常指标的上升动态增大采样频率，降低异常检测的时延，保证了数据实时性。

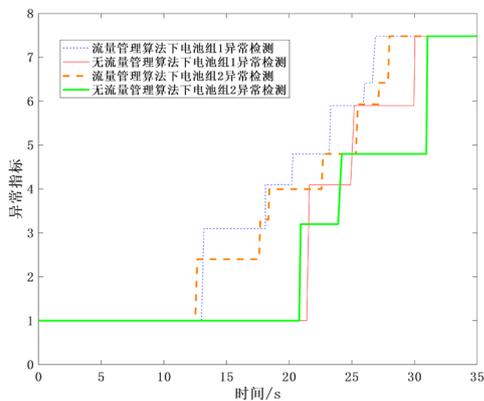


图 8 异常电池组数据异常指标变化时序图

接下来，改变WSN异常电池组数量，分析流量

管理算法在不同异常电池组数量下对异常检测实时性能提升的效果。表2为不同异常电池组数量下流量管理算法的平均异常检测提前时间。可以发现，随着异常电池组数量增加，网络流量需求逐渐增加，当网络流量需求满足流量约束，提前时间维持在3s左右，当网络流量需求超过流量约束时，无法满足所有异常电池组的采样频率需求，提前时间有一定程度的下降，但会维持在2s以上。

表 2 不同异常电池组数量下流量管理算法的平均异常检测提前时间

异常电池组数量	平均异常检测提前时间 (s)
2	3.07
3	3.06
4	3.01
5	2.87
6	2.64
7	2.47
8	2.39

根据式(2)实时将电池组数据异常指标映射为流量需求，在相同的WSN流量约束下，比较不同异常电池组数量下网络路由算法的网络时延和吞吐量性能，如图9、10所示。可以发现，本文所提LB-DMMPR算法相比于OSPF算法和DMMPR算法有更低的网络平均端到端时延和更高的网络平均吞吐量。这是因为随着异常电池组数量增加，网络流量需求逐渐增加，OSPF算法使用单路径路由，当数据流流量需求超过路径容量则出现吞吐量的瓶颈，并且容易造成路径拥塞。而本文所提LB-DMMPR算法允许数据流通过多条路径传输，随着流量变化调整网络路由，同时相比于DMMPR算法保证网络负载均衡，提升了网络的平均吞吐量，降低了网络平均端到端时延。

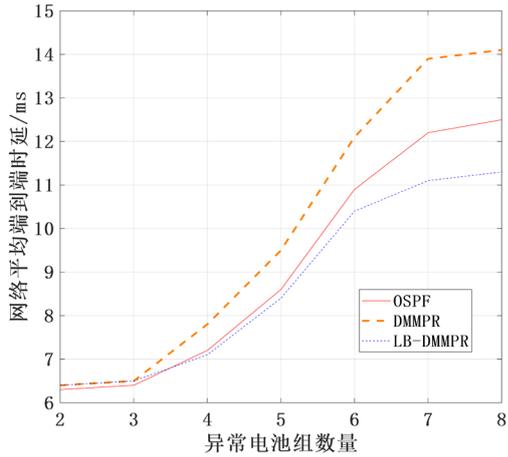


图9 不同异常电池组数量下不同网络路由算法的网络时延性能

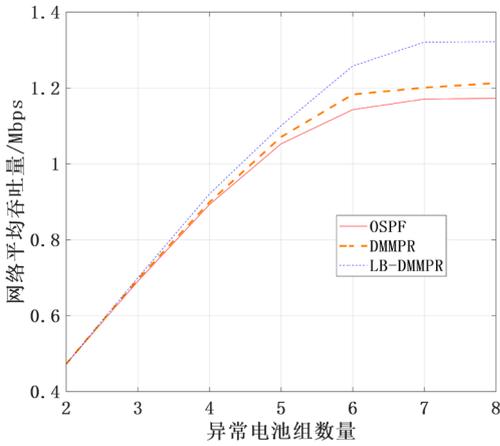


图10 不同异常电池组数量下不同网络路由算法的网络吞吐量性能

根据数据流异常指标比例与实际流量分配比例的均方根差构建流量均衡的评价指标，如式(8)所示，指标越小说明均衡效果越好。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left( \frac{F_i'}{\sum_{j=1}^I F_j'} - \frac{F_i}{\sum_{j=1}^I F_j} \right)^2}. \quad (8)$$

图11仿真了不同异常电池组数量下不同拥塞控制算法的流量均衡效果。本文基于数据异常指标进行拥塞控制，保证各数据流拥塞控制的公平性，在拥塞场景下相比于传统拥塞控制算法有着更好的流量均衡效果。

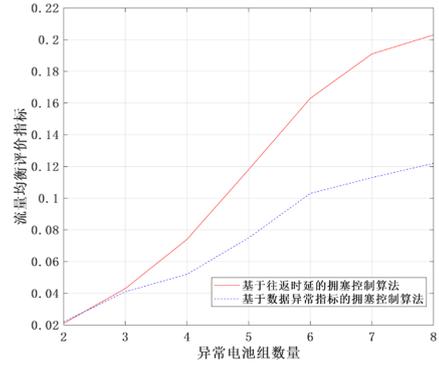


图11 不同异常电池组数量下不同拥塞控制算法的流量均衡效果

图12仿真了不同流量调度算法的时延性能，其中电池组1-6为异常电池组，7-8为正常电池组。相比于SP算法，本文所提RT-DWRR算法在保证数据流QoS优先级的同时避免低优先级的数据帧因为高优先级的数据帧未全部传输完成而等待很长时间，降低了低优先级的正常电池组数据流端到端时延。异常电池组对应数据流流量较高，网络拥塞情况较严重，相比于WFQ算法，本文所提RT-DWRR算法优先调度数据采集时间更新的数据帧，同时丢弃过期的数据帧，降低了异常电池组数据流端到端时延，保证了数据实时性。

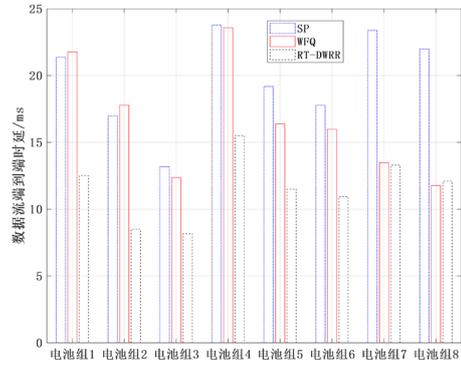


图12 不同流量调度算法时延性能比较

## 6 结论

本文通过对WSN数据流进行异常检测得到相应的数据异常指标，据此动态调整数据采集频率，确定流量需求并进行流量管理，仿真结果表明所提方法能够降低异常检测的时延。本文所提LB-DMMPR算法建立以最小化网络平均端到端发送时延为优化目标，无线信道利用率为约束的流量分配

模型, 综合考虑链路的传输时延和竞争时延, 实现网络负载均衡。仿真结果表明, LB-DMMPR算法能够降低网络平均端到端时延, 提高网络平均吞吐量。本文所提基于数据异常指标的拥塞控制算法在网络流量超过流量约束时, 根据数据流异常指标比例进行拥塞控制。仿真结果表明, 本文所提拥塞控制算法能够提高流量均衡效果, 优化拥塞控制的公平性。本文所提RT-DWRR算法根据数据流异常指标划分不同的QoS优先级, 并且结合数据流间流量调度和数据流内流量调度, 在DWRR算法的基础上进一步提升数据的实时性。仿真结果表明, 本文所提RT-DWRR算法能够降低数据流端到端时延, 提高数据实时性。

## 参考文献 (References) :

- [1] 唐明双. 无线传感器网络应用技术综述 [J]. 科技资讯, 2018, 16 (36): 42-43. DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.36.042.
- [2] 刘辉. 无线传感网络技术与应用课程的教学实践 [J]. 电子技术, 2023, 52 (08): 108-109.
- [3] 王新蕾;周敏;张涛. 时间敏感网络流量调度算法研究综述 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (11): 1830-1838.DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.230310004.
- [4] 张彤;冯佳琦;马延滢;渠思源;任丰原. 时间敏感网络流量调度综述 [J]. 计算机研究与发展, 2022, 59 (04): 747-764
- [5] 傅伟. OSPF 路由协议原理仿真实验设计与实现 [J]. 智能计算机与应用, 2023, 13 (06): 137-141.
- [6] Liu C, Fu B, Huang H J. Delay minimization and priority scheduling in wireless mesh networks[J]. Wireless networks, 2014, 20: 1955-1965.
- [7] 李英华, 崔佳荣. 基于丢包和网络测量的 TCP 拥塞控制算法研究综述 [J]. 数字通信世界, 2022, (04): 9-11+17.
- [8] 程前,王福平. 基于往返时延梯度的多路径拥塞控制算法 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (04): 1027-1034. DOI:10.16208/j.issn1000-7024.2023.04.010.
- [9] 褚开锋,邓大鹏,程吉. 基于 Diffserv 的 QoS 策略在 IP 承载网的应用探析 [J]. 长江信息通信, 2023, 36 (01): 93-96.
- [10] Li X, Li J, Abdollahi A, et al. Data-driven Thermal Anomaly Detection for Batteries using Unsupervised Shape Clustering[C]//2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2021: 1-6.
- [11] 孙林,刘梦含,徐久成. 基于优化初始聚类中心和轮廓系数的 K-means 聚类算法 [J]. 模糊系统与数学, 2022, 36 (01): 47-65.
- [12] 吴秋尘,胡春静,吴皓,等. 基于 CSMA/CA 的无人机自组网容量分析 [J]. 通信技术, 2022, 55 (08): 1014-1019.
- [13] 杨静蕾,张建勇,杨君添. 线性规划单纯形法的三种实现形式探析 [J]. 大学数学, 2020, 36 (04): 68-73.
- [14] 李俊娥,陆秋余,刘剑,等. 智能变电站通信业务优先级及其队列调度方法 [J]. 通信学报, 2021, 42 (07): 25-40.



翁晓龙 (2000—), 男, 2022 年获得电子科技大学学士学位, 现为浙江大学硕士研究生, 主要研究方向为无线传感网络, 通信感知一体化等, 22260113@zju.edu.cn;



余官定 (1980—), 男, 导师, 2006 年获得浙江大学博士学位, 现为浙江大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为第六代移动通信系统, 包括无线 AI, 通信感知一体化, 语义通信等, 累计发表论文 200 余篇, 累计引用

次数达 8000 多次, yuguanding@zju.edu.cn;



何映晖 (1996—), 男, 通信作者, 2023 年获得浙江大学博士学位, 现为新加坡南洋理工大学博士后, 主要研究方向为下一代移动通信技术, 包括通信感知一体化, 无线边缘智能等, [yinghui.he@ntu.edu.sg](mailto:yinghui.he@ntu.edu.sg)。

翁晓龙

录用和收费通知

翁晓龙, 何映辉, 涂厚家  
先生/女士: 您好!

您的文章 基于数据异常指标的无线传感网络流量管理  
专家审稿, 符合要求, 决定录用 (文章编号: cg240034)。请尽快交纳版面费2200元  
到我编辑部, 收到款后我们即安排刊期, 并将正规发票寄上, 待文章发表后我们赠送第  
一作者两本杂志。请在2024年4月30日之前将完成。谢谢合作!

收款银行帐号、户名如下:  
南京市建设银行四牌楼支行, 行号: 105301000361  
户名: 东南大学 帐号: 32001594138059123456

按相关新规定, 我校开具的发票必须要作者提供本单位纳税人识别号, 否则无法开具  
发票。请务必在转账时附上贵单位纳税人识别号。

为了确保及时收到您的版面费, 请一定注明您的稿号, 不接受邮局柜台现金汇款!  
为了确保发票能安全寄达您的手中, 我们会通过顺丰快递到付的方式将发票邮寄给您,  
谢谢合作!

文章的具体刊期可登陆我们的网址: <http://chinatransducers.seu.edu.cn>

东南大学《传感技术学报》编辑部

2024年4月18日

