

第33卷 第2期 Vol.33 No.2 February 2022

ISSN 1000-9825
CODEN RUXUEW

软件学报

Journal of Software

2022年第33卷第2期

科学出版社

软件学报 *Software* *Journal of*



主办



中国科学院软件研究所



中国计算机学会

出版



科学出版社



2013 年全国百强科技期刊



2015 年全国百强科技期刊



中国精品科技期刊



中国计算机学会会刊

软件学报

(Ruanjian Xuebao)

第 33 卷第 2 期

2022 年 2 月

目次

系统软件与软件工程

- 自适应推导下的统一化调试加速技术 姜一翎 张令明 郝 丹 张皓天 张 路 (377)
- CMuJava: 一个面向 Java 程序并发变异体生成系统 孙昌爱 耿 宁 代贺鹏 顾友达 (397)
- 分布式数字资产交易平台的问题与评估 蔡维德 王 荣 何 娟 邓恩艳 (410)
- 结合关键点概率与路径相似度的多路径覆盖策略 钱忠胜 祝 洁 朱懿敏 俞情媛 李端明 宋 佳 (434)
- SOTIMiner: 一种基于集合运算的时序不变式挖掘方法 孙德权 周竞文 周海芳 (455)
- 基于硬件虚拟化的内核同层多域隔离模型 钟炳南 邓 良 曾庆凯 (473)

模式识别与人工智能

- 超图学习综述: 算法分类与应用分析 胡秉德 王新根 王新宇 宋明黎 陈 纯 (498)
- 预测不确定性与对抗鲁棒性的关系研究 陈思宏 沈浩靖 王 冉 王熙照 (524)
- 考虑标记间协作的标记分布学习 李睿钰 祝继华 刘新媛 (539)
- 基于多尺度残差 FCN 的时间序列分类算法 张雅雯 王志海 刘海洋 曾昭博 (555)
- 基于合作网的汉语句子隐喻理解 苏 畅 李俊超 王晓梅 陈怡疆 (571)
- 双加权多视角子空间聚类算法 曹容玮 祝继华 郝问裕 张长青 张茁涵 李钟毓 (585)

计算机网络与信息安全

- 异质信息网络分析与应用综述 石 川 王睿嘉 王 啸 (598)
- 基于虚拟力的 WSNs 能量高效分簇路由协议 赵小强 崔砚鹏 郭 铮 刘 敏 李 雄 文 秦 (622)
- SG-Edge: 电力物联网可信边缘计算框架关键技术 杨维永 刘 苇 崔恒志 魏兴慎 黄 皓 廖 鹏 钱柱中 王元强 (641)
- 基于链接预测的水下 WSN 消息转发算法 刘林峰 向 阳 吴家皋 (664)
- 一种基于图模型的网络攻击溯源方法 黄克振 连一峰 冯登国 张海霞 吴 迪 马向亮 (683)
- 车联网中基于位置服务的个性化位置隐私保护 徐 川 丁颖祎 罗 丽 刘帅军 刘立祥 赵国锋 (699)
- 一种密码函数存在性证明的新方法 尤启迪 张习勇 周 旋 吴兆阳 袁 野 (712)
- 基于系数配对的自适应 JPEG 可逆信息隐藏方法 吴桃宇 黄方军 (725)
- PASER: 加性多维 KPI 异常根因定位模型 靖宇涵 何 波 张凌昕 李天星 王敬宇 刘 聪 (738)

计算机体系结构

- 内存体系划分技术的研究与发展 邱杰凡 华宗汉 范 菁 刘 磊 (751)

期刊基本参数: CN11-2560/TP*1990*m*16*395*zh+en*P*¥70*2022*22*2022-02

Contents

SYSTEM SOFTWARE AND SOFTWARE ENGINEERING

- 377 Accelerating Unified Debugging via Adaptive Inference
LOU Yi-Ling, ZHANG Ling-Ming, HAO Dan, ZHANG Hao-Tian, ZHANG Lu
- 397 CMuJava: Concurrent Mutant Generation System for Java
SUN Chang-Ai, GENG Ning, DAI He-Peng, GU You-Da
- 410 Decentralized Digital Asset Exchanges: Issues and Evaluation
Wei-Tek TSAI, WANG Rong, HE Juan, DENG En-Yan
- 434 Multi-path Coverage Strategy Combining Key Point Probability and Path Similarity
QIAN Zhong-Sheng, ZHU Jie, ZHU Yi-Min, YU Qing-Yuan, LI Duan-Ming, SONG Jia
- 455 SOTMiner: Mining Method of Temporal Invariants Based on Set Operations
SUN De-Quan, ZHOU Jing-Wen, ZHOU Hai-Fang
- 473 Kernel-level Multi-domain Isolation Model Based on Hardware Virtualization
ZHONG Bing-Nan, DENG Liang, ZENG Qing-Kai

PATTERN RECOGNITION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- 498 Survey on Hypergraph Learning: Algorithm Classification and Application Analysis
HU Bing-De, WANG Xin-Gen, WANG Xin-Yu, SONG Ming-Li, CHEN Chun
- 524 Relationship Between Prediction Uncertainty and Adversarial Robustness
CHEN Si-Hong, SHEN Hao-Jing, WANG Ran, WANG Xi-Zhao
- 539 Label Distribution Learning with Collaboration among Labels
LI Rui-Yu, ZHU Ji-Hua, LIU Xin-Yuan
- 555 Time Series Classification Algorithm Based on Multiscale Residual Full Convolutional Neural Network
ZHANG Ya-Wen, WANG Zhi-Hai, LIU Hai-Yang, ZENG Zhao-Bo
- 571 Chinese Sentential Metaphor Comprehension Based on Cooperative Network Model
SU Chang, LI Jun-Chao, WANG Xiao-Mei, CHEN Yi-Jiang
- 585 Dual Weighted Multi-view Subspace Clustering
CAO Rong-Wei, ZHU Ji-Hua, HAO Wen-Yu, ZHANG Chang-Qing, ZHANG Zhuo-Han, LI Zhong-Yu

COMPUTER NETWORKS AND INFORMATION SECURITY

- 598 Survey on Heterogeneous Information Networks Analysis and Applications
SHI Chuan, WANG Rui-Jia, WANG Xiao
- 622 Energy-efficient Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Virtual Force
ZHAO Xiao-Qiang, CUI Yan-Peng, GUO Zheng, LIU Min, LI Xiong, WEN Qin
- 641 SG-Edge: Key Technology of Power Internet of Things Trusted Edge Computing Framework
YANG Wei-Yong, LIU Wei, CUI Heng-Zhi, WEI Xing-Shen, HUANG Hao, LIAO Peng, QIAN Zhu-Zhong, WANG Yuan-Qiang
- 664 Message Dissemination Algorithm Based on Link Prediction in Underwater Wireless Sensor Networks
LIU Lin-Feng, XIANG Yang, WU Jia-Gao
- 683 Method of Cyber Attack Attribution Based on Graph Model
HUANG Ke-Zhen, LIAN Yi-Feng, FENG Deng-Guo, ZHANG Hai-Xia, WU Di, MA Xiang-Liang
- 699 Personalized Location Privacy Protection for Location-based Services in Vehicular Networks
XU Chuan, DING Ying-Yi, LUO Li, LIU Shuai-Jun, LIU Li-Xiang, ZHAO Guo-Feng
- 717 New Method for Existence Proof of Some Cryptographic Functions
YOU Qi-Di, ZHANG Xi-Yong, ZHOU Xuan, WU Zhao-Yang, YUAN Ye
- 725 Adaptive JPEG Reversible Data Hiding Method Based on Pairwise Coefficients
WU Tao-Yu, HUANG Fang-Jun
- 738 PASER: Root Cause Location Model for Additive Multidimensional KPIs
JING Yu-Han, HE Bo, ZHANG Ling-Xin, LI Tian-Xing, WANG Jing-Yu, LIU Cong

COMPUTER ARCHITECTURE

- 751 Evolution of Memory Partitioning Technologies: Case Study through Page Coloring
QIU Jie-Fan, HUA Zong-Han, FAN Jing, LIU Lei

基于虚拟力的 WSNs 能量高效分簇路由协议^{*}

赵小强^{1,3}, 崔砚鹏², 郭 铮^{1,3}, 刘 敏^{1,3}, 李 雄^{1,3}, 文 秦^{1,3}

¹(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

²(泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

³(陕西省信息通信网络及安全重点实验室(西安邮电大学), 陕西 西安 710121)

通信作者: 崔砚鹏, E-mail: cuiyanpeng94@bupt.edu.cn



摘 要: 作为无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)的关键技术之一, 分簇路由协议因其可扩展性较强及能耗较低等优势, 逐渐成为 WSNs 路由协议的研究热点. 如何对簇首进行最佳化选取, 是提高分簇路由协议性能的关键. 通过揭示不同场景中的簇首数量及网络能耗之间的映射关系, 以能耗最小化为目标, 构建了簇首最佳规模及最佳位置的计算理论; 面向不同规模的网络讨论了簇间多跳策略的使用条件, 提出了虚拟簇首及其虚拟力的概念, 构建了虚拟簇首与边界、节点及其他虚拟簇首之间的 3 种虚拟力模型, 讨论了不同虚拟力的最佳距离阈值; 为实现网络能耗的最小化及均衡化, 设置了关于剩余能量及距离因子的适应度函数, 形成了基于虚拟力的能量高效路由协议. 实验结果表明: 在多种规模的网络中, 与基于适应度值的改进灰狼优化器、改进的低能耗自适应聚类层次结构协议以及改进的分布式能量高效分簇算法相比, 该算法使簇首分布更均匀、节点能耗更低且更均衡.

关键词: 无线传感器网络; 分簇路由协议; 簇首最佳数量; 虚拟力

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 赵小强, 崔砚鹏, 郭铮, 刘敏, 李雄, 文秦. 基于虚拟力的 WSNs 能量高效分簇路由协议. 软件学报, 2022, 33(2): 622–640. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6159.htm>

英文引用格式: Zhao XQ, Cui YP, Guo Z, Liu M, Li X, Wen Q. Energy-efficient Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Virtual Force. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2022, 33(2): 622–640 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6159.htm>

Energy-efficient Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Virtual Force

ZHAO Xiao-Qiang^{1,3}, CUI Yan-Peng², GUO Zheng^{1,3}, LIU Min^{1,3}, LI Xiong^{1,3}, WEN Qin^{1,3}

¹(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

²(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

³(Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security (Xi'an University of Posts and Telecommunications), Xi'an 710121, China)

Abstract: As one of the key technologies of wireless sensor networks (WSNs), clustering routing protocol has gradually become a research hotspot of WSNs routing protocol due to its advantages of strong scalability and low energy consumption. How to select the optimal cluster head is the key to improve the performance of cluster routing protocol. In this study, by revealing the mapping relationship among cluster head number and the network energy consumption in different scenarios, with the goal of minimizing energy consumption, the calculation theory of optimal number of cluster heads is constructed. The conditions of using multi-hop strategy among clusters are discussed for different scale networks; the concept of virtual cluster head and its three virtual force models is proposed. Three virtual

* 基金项目: 国家自然科学基金-雅蓉江联合基金(U1965102); 陕西省创新人才推进计划-物联网科技创新团队(2019TD-028)

收稿时间: 2020-06-30; 修改时间: 2020-08-11; 采用时间: 2020-09-29

force models between virtual cluster head and boundaries, node and other virtual cluster heads are constructed, and the optimal distance thresholds for different virtual forces and the differences are discussed. In order to realize the minimization and equalization of network energy consumption, the fitness function of residual energy and distance factor is set up to form an energy efficient routing protocol based on virtual force. The experimental results show that in networks of various scales, compared with the fitness-value based improved gray wolf optimizer, the improved low-energy adaptive clustering hierarchy protocol and the modified distributed energy efficient clustering algorithm, the algorithm proposed in this study makes the cluster head more uniform, the node energy consumption lower and more balanced, and the network life is effectively extended.

Key words: wireless sensor networks (WSNs); clustering routing protocol; optimal number of cluster heads; virtual force

1 引言

作为一种由低功耗微型传感器节点组成的, 具有无线通信感知、数据处理和存储能力的自组织网络, 无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)^[1]凭借其部署便捷、抗毁能力强及成本低等特点, 为信息感知带来了一场新的变革, 在智慧农业及风能资源监测等领域得到了广泛应用^[2]. 传感器节点在多数应用场景中常被不规则地部署, 且节点的地理位置常因环境的变化而变化(如基于系留汽艇的风能资源监测节点), 因此, WSNs 需具备自组织能力, 且能以较低的成本提供安全可靠的通信与控制业务. 尽管 WSNs 的自组织形式常因场景业务的不同而存在差异, 但多数传感器节点的任务是从目标监测区域对数据进行感测、收集与预处理, 并基于预设的路由协议将监测数据通过无线传输的方式发送至基站, 完成对目标监测区域的实时全面监控, 实现诸多服务质量(如网络寿命、吞吐量和可靠性等)的性能提升^[3].

根据网络结构的差异, WSNs 路由协议可被分为以数据为中心的协议、基于位置的协议、分簇路由协议与基于服务质量的协议等多类^[4]. 其中, 分簇路由协议因其可扩展性较强、负载及能耗较低且支持数据融合等优势, 逐渐成为 WSNs 路由协议的研究热点之一. 如图 1 所示, 在分簇路由协议中, 所有节点被群集划分, 簇内的某个节点被选举为簇首, 一方面负责协调簇内成员的监测及数据传输任务, 另一方面向其他簇首或基站进行数据转发, 因此具备减少能耗与延长网络寿命的能力. 然而, 由于承担了大量数据的融合与转发任务, 簇首节点常比其他节点更早地耗尽能量. 鉴于 WSNs 的应用场景限制, 节点的更换或其能源的二次供应往往难以实现, 一旦部分节点因能量耗尽而失效, 将给整个网络带来无法挽救的灾难^[5]. 因此, 如何对簇首进行最佳化选取, 实现能耗的最小化、均衡化并延长网络的生命周期, 成为 WSNs 分簇路由协议面临的挑战.

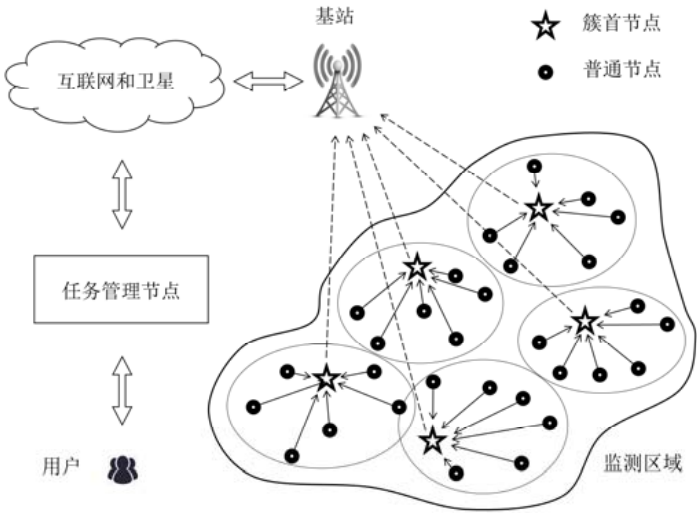


图 1 WSNs 的分簇路由结构

根据簇首选举机制的差异, 现有的分簇路由协议可被分为经典分簇路由协议及基于群体智能优化的分簇

路由协议等类别。

Heinzelman 等人提出一种低能耗自适应聚类层次结构(low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)^[6], LEACH 被公认为最原始的经典分簇路由协议,它根据节点当选簇首的次数、概率阈值及当前网络轮次等因素对簇首进行选举,优势在于每个节点拥有同等的机会充当簇首,避免了因某节点多次承担转发数据的任务而过早死亡的现象发生。作为多数分簇路由协议的基础,LEACH 被众多学者广泛地研究与改进^[7-9]。Chen 等人提出了 LEACH-G 协议^[10],基于区域面积及节点数量构建了簇首最佳规模的计算理论,相较于原始 LEACH,改进后的协议在网络寿命及能耗方面的性能更优。Behera 等人提出一种名为 R-LEACH 的分簇协议^[11],基于节点的剩余能量及最佳簇首数量重新定义了概率阈值,实现了网络吞吐量的提升,降低了网络平均能耗。Amgoth 等人提出了能量感知路由算法^[12],基于节点的剩余能量设计了计时器(用于控制节点当选簇首的次数),实现了网络负载均衡。Sabet 等人提出了一种分布式节能分簇路由算法^[13],各节点基于与基站的距离及剩余能量计算自身属性值,并基于此与邻居节点进行竞争,实现了簇首的最优选取。Cengiz 等人提出了改进的低能耗固定分簇算法^[14],各簇区一经确定后不再改变,基于剩余能量因子在各簇区中进行簇首选举,当簇首能量小于阈值时,从簇成员中随机选择一个节点进行下一轮选举,该算法有效延长了网络寿命。Tiware 等人将剩余能量高于阈值的节点视为候选簇首并令其参与竞争,构建了簇内低功率通信机制,提出了改进的分布式能量高效分簇(modified distributed energy-efficient clustering, MDEEC)算法^[15],在延长网络生命周期的同时,增加了基站接收的数据量。针对 LEACH 算法未考虑剩余能量、簇首分布及簇首与基站直接通信的缺陷,刘闯等人^[16]提出一种改进协议 LEACH-LOMUC,基于剩余能量、簇首规模及簇首与基站的距离选取候选簇首,对于簇首间通信距离较大的情况,引入中继节点协助数据传输,有效节省了网络能量。针对因节点负载不均而形成的“热区”问题,孙彦清等人提出一种基于动态分区负载均衡的分布式分簇路由协议^[17],根据簇首与基站距离的差异设定不同的簇半径,延长了网络生命周期。为解决距离基站较远的簇首节点直接与宿节点通信带来的高能耗问题,Huarui 等人^[18]面向农田环境设计了一种高效簇首选举和中继节点选择方案,在簇头选举中,综合考虑了节点剩余能量、网络拓扑密度和节点到汇聚节点的距离;在中继节点的选择过程中,从候选中继节点与汇聚节点的距离出发,分别讨论了多种通信模型下的中继方案。在实现能耗均衡的同时,提高了网络能量效率。

作为解决大规模高维度工程问题的有效工具,群体智能优化算法因其扩展性、高效性及鲁棒性较强等特点,近些年被大量学者用于构建全新的 WSNs 分簇协议^[19-21]。Zhao 等人通过设置关于剩余能量及与基站距离的适应度函数,基于适应度值对原始灰狼优化器中的前三头狼的权重进行了改进,设计了基于适应度值的改进灰狼算法(fitness-value based improved grey wolf optimizer, FIGWO)^[22,23],实现了簇首的最佳化选举。武小年等人基于自适应学习因子对粒子群优化算法进行了改进^[24],定义了基于节点能量因子和位置均衡因子的适应度函数,根据簇首与基站距离的差异提出了单跳与多跳两种通信方式,均衡了节点的能量消耗。为解决节点能耗不均的问题,刘宏等人提出一种基于蚁群优化的非均匀分簇算法^[25],在信息素更新过程中引入了优越度的概念,以实现路径质量的优化,有效提升了网络能量利用率。Shokouhifar 等人提出一种低功耗路由协议^[26],围绕节点与基站的距离及剩余能量因子设定节点属性,通过判断随机数与属性的关系进行最优簇首选取,并基于遗传算法与模拟退火算法对权重参数进行最优化解,实现了对特定应用场景的能耗优化。Arjunan 等人基于模糊逻辑理论与蚁群优化算法提出一种混合非均匀分簇路由协议^[27],根据剩余能量、与邻居节点及基站的距离等因素,将网络划分为非均匀的簇区,基于蚁群优化算法实现了监测数据从簇首到基站的高效传输,有效节省了网络能耗。崔亚楠^[28]分析并讨论了 LEACH 在异构网络中的缺陷,提出了基于粒子群算法的改进型 LEACH,以均衡网络能耗为目标,揭示了簇首比例与网络规模的关系,为粒子群算法设计了关于剩余能量与节点密集度的适应度函数,显著延长了网络生命周期。Daneshvar 等人^[29]提出了一种使用灰狼优化器和单项适应度函数的新聚类协议,对多种分簇方案的实际能耗进行预测,允许某个分簇方案被重复使用;为了防止距离基站较远的节点过早死亡,建立了边缘簇首与汇聚节点间的双跳通信网络,平衡了簇首和中继节点之间的能量消耗,有效减少了网络总能耗。

综上所述, 基于经典分簇路由协议的改进算法常基于剩余能量与距离等因素对簇首进行选举, 然而其局限性在于: 基于概率对簇首进行轮换选取易导致每轮的簇首数量存在较大差异, 尽管部分学者试图通过设计阈值来最大程度地延迟簇首轮换进程, 但是由于忽视了簇首位置对节点能耗的影响, 难以有效延长网络寿命. 对于以粒子群算法、蚁群算法及灰狼优化器等为代表的群体智能优化算法而言, 尽管其可扩展性更强, 但通常比经典分簇协议的复杂度更高; 且由于算法涉及的参数较多, 如何对各类参数的最优值进行协同设定是难点所在. 更重要的是: 多数研究倾向于将剩余能量高且距离基站近的节点选举为簇首, 忽视了数量对网络能耗的影响; 尤其是在簇首与基站的通信过程中, 未面向不同规模的网络中设计鲁棒性更强的簇间中继协议. 因此, 如何从能耗角度对簇规模进行最佳设定, 对簇首在簇区内的分布进行优化, 建立传感器节点与基站之间的最佳中继路径, 实现网络寿命的最大化, 是分簇路由协议面临的重要挑战.

针对上述问题, 本文通过揭示网络规模(包括区域面积及节点数量等因素)、簇首比例与网络能耗之间的映射关系, 构建了簇首最佳规模的计算理论; 面向不同规模的网络, 讨论了簇间多跳策略的适用条件; 此外, 提出了虚拟簇首的概念, 基于距离与能量因子定义了虚拟簇首之间、虚拟簇首与网络边界、虚拟簇首与节点间的 3 种虚拟力, 分析了虚拟簇首的间距、虚拟簇首与边界的间距对协议性能的影响, 形成了基于虚拟力的能量高效路由协议(energy-efficient routing protocol based on virtual force, EERPVF), 有效提升了簇分布的均匀性, 实现了数据的高效传输及网络寿命的提升.

本文第 1 节对 WSNs 分簇路由协议的研究意义及挑战进行简述, 对经典分簇路由协议进行分类, 对现有工作进行总结并分析其贡献与待改善之处, 对本文主要贡献进行介绍. 第 2 节提出簇间多跳策略并讨论其适用条件, 以网络能耗最小化为目标, 提出多跳网络中的簇首最佳规模的计算理论. 第 3 节提出虚拟簇首的概念, 构建虚拟簇首的 3 种虚拟力, 并基于距离与能量因子设计真实簇首的选取机制. 第 4 节对本文算法的参数设定进行实验与讨论, 分别从簇首及网络的角度分析本文算法与 3 种对比算法的性能差异, 讨论导致性能差异的原因, 对所提算法在多种场景下的性能进行实验. 第 5 节对本文研究进行总结, 并对未来工作进行展望.

2 簇间多跳策略及簇首最佳规模计算理论

WSNs 的数据转发策略与簇首规模对网络寿命存在较大影响. 在大规模 WSNs 中, 鉴于簇首的位置在各轮次中是各异的, 因此常出现簇首与基站的距离较远的现象. 若簇首直接与基站通信, 将导致较大的网络能耗. 此外, 当簇首数量较多时, 分簇效率及簇首利用率较低, 难以实现能耗的最小化; 当簇首数量较少时, 各簇首承担了大量数据的融合及长距离转发业务, 通信开销将激增. 因此, 如何面向不同的场景确定簇首的最佳规模并设计对应的簇间多跳策略, 是提高分簇路由协议性能的关键.

2.1 能耗模型

假设节点间的数据传输基于无线通信能耗模型(如图 2 所示), 根据通信距离的远近, 可将其分为自由空间通信与多径衰落通信两种类型^[6].

单次完整的通信过程包括数据的发送与接收.

- 数据发送模块包括信号发送单元和信号放大单元, 将 l 比特的数据传输 d 距离时的能耗 E_T 可通过公式(1)计算:

$$E_T(l, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times E_{fs} \times d^2, & \text{if } d \leq d_{th} \\ l \times E_{elec} + l \times E_{mp} \times d^4, & \text{if } d > d_{th} \end{cases} \quad (1)$$

E_{elec} 是收发电路能耗系数, E_{fs} 与 E_{mp} 是放大电路能耗系数(分别对应自由空间与多径衰落信道模型), 二者共同影响如公式(2)所示的距离阈值 d_{th} :

$$d_{th} = \sqrt{E_{fs} / E_{mp}} \quad (2)$$

- 数据接收模块接收 l 比特数据的能耗 E_R 可通过公式(3)计算:

$$E_R(l) = l \times E_{elec} \quad (3)$$

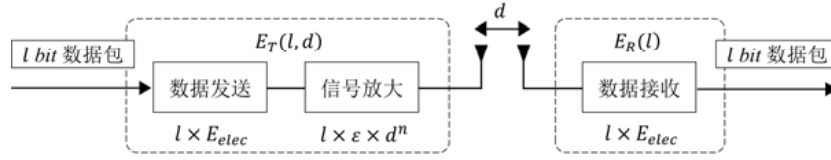


图2 无线通信能耗模型

2.2 簇间多跳策略的适用条件

原始的经典分簇路由协议(如 LEACH 协议)通过“普通节点发送至簇首、簇首节点转发至基站”的方式避免了各节点直接与基站进行通信,降低了普通节点的网络能耗。然而,由于簇首节点在该过程中承担了大量的数据转发任务,因此其往往比普通节点更早地耗尽能量。鉴于不同场景中的 WSNs 网络规模差异较大,尤其是对于大规模网络而言,若不使用中继策略,则在距基站较远处将存在大量以多径衰落模型与基站通信的簇首,导致极大的网络开销。为了构建不同场景中的簇首间中继转发策略,以更低的能耗将簇内数据传输至基站,提出如下定理。

定理 1. 对于基于分簇路由协议的 WSNs 而言,当发送节点与中继节点的间距 $d_{toRelay}$ 满足以下条件时,中继多跳策略可降低网络能耗。其中, $d_{toTarget}$ 为发送节点至目的节点的距离:

$$\begin{cases} d_{toRelay} < \left(d_{toTarget}^2 - \frac{E_{elec} + E_{DA}}{\varepsilon_{fs}} \right)^{\frac{1}{2}}, & \text{when } d_{toTarget} \leq d_{th}, d_{toRelay} \leq d_{th} \\ d_{toRelay} < \frac{1}{d_{th}} \left(d_{toTarget}^4 - \frac{E_{elec} + E_{DA}}{\varepsilon_{mp}} \right)^{\frac{1}{2}}, & \text{when } d_{toTarget} > d_{th}, d_{toRelay} \leq d_{th} \\ d_{toRelay} < \left(d_{toTarget}^4 - \frac{E_{elec} + E_{DA}}{\varepsilon_{mp}} \right)^{\frac{1}{4}}, & \text{when } d_{toTarget} > d_{th}, d_{toRelay} > d_{th} \end{cases} \quad (4)$$

证明:根据分簇路由协议的结构易知:簇间的中继多跳策略仅影响簇首与基站的通信过程,对簇内普通节点与簇首的通信能耗无任何影响。因此,在分析中继策略性能时,可暂时忽略簇内普通节点的能耗,仅围绕簇首能耗展开讨论。中继簇首的能耗包括两部分:将簇内感知数据直接发送至目的节点(可能是簇首或基站)的能耗(接收簇内普通节点感知数据的能耗、对数据进行融合的能耗与向目的节点发送数据的能耗)、将其他簇首的发送数据转发至目的节点的能耗,如公式(5)所示:

$$E_{CHandRelay} = lE_{elec}(N_{CM}-1+N_R) + lE_{DA}(N_{CM}+N_R) + (lE_{elec} + l\varepsilon d^j) \quad (5)$$

其中, N_{CM} 为簇成员的数量; E_{DA} 为融合单位比特数据的能耗; N_R 为承担中继转发的次数; ε 为不同通信模型下的信号放大系数。 j 根据通信距离与距离阈值 d_{th} 的关系取不同的值,如公式(6)所示:

$$\begin{cases} j = 2, & \text{if } d \leq d_{th} \\ j = 4, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

以一次中继为例(多次中继同理,不再赘述),对中继前后的能耗差异进行对比。如图 3 所示:簇首 A、B 承担了各自簇区内的数据融合及传输任务,将发送节点(簇首 A)直接向目的节点(基站)传输数据的总能耗记为 $E_{Non-Relay}$,将其通过中继节点(簇首 B)向目的节点传输数据的总能耗记为 E_{Relay} ,则易计算中继转发策略节省的能量,如公式(7)所示:

$$E_{Non-Relay} - E_{Relay} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_{fs} d_{toTarget}^2 \\ \varepsilon_{mp} d_{toTarget}^4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_{fs} d_{toRelay}^2 \\ \varepsilon_{mp} d_{toRelay}^4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times [E_{elec} + E_{DA}] \quad (7)$$

$d_{toTarget}$ 和 $d_{toRelay}$ 分别为发送节点与目的节点、中继节点之间的距离。

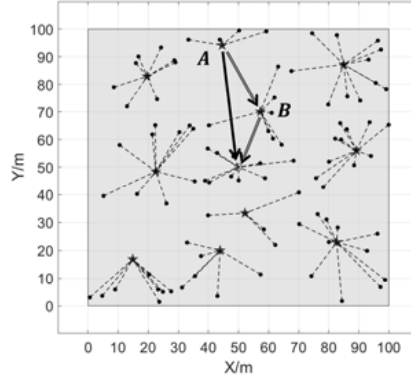


图3 簇间多跳通信

对于大规模 WSNs 而言, 节点间的通信可分为自由空间模型、多径衰落模型两种情况, 因此, 公式(7)包括 4 种情况, 限制条件如公式(8)所示:

$$\begin{cases} d_{toTarget} \leq d_{th}, d_{toRelay} \leq d_{th} \\ d_{toTarget} \leq d_{th}, d_{toRelay} > d_{th} \\ d_{toTarget} > d_{th}, d_{toRelay} \leq d_{th} \\ d_{toTarget} > d_{th}, d_{toRelay} > d_{th} \end{cases} \quad (8)$$

当公式(7)取值大于 0 时, 相比于一跳传输至基站的通信方式, 中继多跳的能耗被减小, 中继节点的作用得以体现, 此时的解即为中继转发策略的适用范围。

第 1 种情况的中继策略节省能量值如公式(9)所示, 该式大于 0 的解如公式(10)所示:

$$E_{Non-Relay} - E_{Relay} = \varepsilon_{fs}(d_{toTarget}^2 - d_{toRelay}^2) - (E_{elec} + E_{DA}), \text{ when } d_{toTarget} \leq d_{th}, d_{toRelay} \leq d_{th} \quad (9)$$

$$d_{toRelay} < \left(d_{toTarget}^2 - \frac{E_{elec} + E_{DA}}{\varepsilon_{fs}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

第 2 种情况的中继策略节省能量值如公式(11)所示:

$$E_{Non-Relay} - E_{Relay} = \varepsilon_{mp}(d_{th}^2 d_{toTarget}^2 - d_{toRelay}^4) - (E_{elec} + E_{DA}), \text{ when } d_{toTarget} \leq d_{th}, d_{toRelay} > d_{th} \quad (11)$$

易知, 该式大于 0 时无解。因此, 中继策略在该场景中无法降低能耗。同理可得出后两种情况的解。

综上, 中继多跳策略降低网络能耗的条件如公式(4)所示。证毕。□

2.3 多跳网络中的簇首最佳规模

如何从能耗角度确定簇首规模在不同场景中的最优解, 是提升分簇路由协议性能的关键。现有研究常将不同场景下的簇首最佳比例设置为 10%^[22,30,31], 忽视了网络规模的差异性对其最优解的影响。本节以网络总能耗最小化为目标, 为确定不同场景下的簇首最佳规模, 提出如下定理。

定理 2. 对于含有 N 个节点、 K 个簇区且边长为 M 的正方形感知区域而言, 若基站位于区域中心处, 当簇首数量满足公式(12)所示的条件时, 网络总能耗被最小化:

$$K_{opt} = M \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs} N}{2\pi[N_R(E_{elec} + E_{DA}) + \varepsilon_{fs} d_{CHtoRelay}^2]}} \quad (12)$$

其中, $d_{CHtoRelay}$ 为簇首与中继节点(或基站)间的通信距离, N_R 是其承担中继转发任务的次数。

证明: 假设 WSNs 节点分布均匀, 各簇区的成员数量相同(包含 1 个簇首节点与 $N/K-1$ 个普通节点), 则各簇区的能耗包括簇首与基站间、普通节点与簇首间的通信能耗。簇首的能耗如公式(13)所示, 主要包括以下 3 部分: 第 1 部分为簇首接收簇内 $N/K-1$ 个普通节点感知数据的能耗及簇首作为中继节点接收其他 N_R 个簇首转发数据的能耗; 第 2 部分为簇首对 $N/K+N_R$ 组数据进行融合的能耗, E_{DA} 为融合单位比特数据的能耗; 第 3 部分

为簇首节点向中继或基站发送数据的能耗. 鉴于簇首数量较优且分布较均匀时, 簇首与目的节点可通过自由空间模型进行通信, 因此在此假设簇首与中继节点(或基站)间的通信距离不超过距离阈值 d_{th} :

$$E_{CHtoRelay} = lE_{elec} \left(\frac{N}{K} - 1 + N_R \right) + lE_{DA} \left(\frac{N}{K} + N_R \right) + (lE_{elec} + l\varepsilon_{fs} d_{CHtoRelay}^2) \quad (13)$$

簇内普通节点的能耗主要包括将感知数据发送至簇首节点的能耗, 如公式(14)所示:

$$E_{SNtoCH} = lE_{elec} + l\varepsilon_{fs} d_{SNtoCH}^2 \quad (14)$$

假设各簇区为半径是 $R = M / \sqrt{\pi K}$ 的圆形(簇首位于区域中心), 簇内节点分布均匀(分布密度函数为 $\rho(x,y)=K/M^2$), 且与簇首的通信距离不超过距离阈值 d_{th} , 则簇内普通节点与簇首距离二次方的期望值如公式(15)所示:

$$E(d_{SNtoCH}^2) = \iint (x^2 + y^2) \rho(x,y) dx dy = \frac{K}{M^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{M}{\sqrt{\pi K}}} r^3 dr d\theta = \frac{M^2}{2\pi K} \quad (15)$$

在单次完整的通信过程中, 每个簇的能耗及网络整体能耗分别如公式(16)与公式(17)所示:

$$E_{Cluster} = E_{CHtoBS} + \left(\frac{N}{K} - 1 \right) \times E_{SNtoCH} \approx E_{CHtoBS} + \frac{N}{K} \times E_{SNtoCH} \quad (16)$$

$$E_{Total} = KE_{Cluster} = NI(2E_{elec} + E_{DA}) - \frac{\varepsilon_{fs} l M^2}{2\pi} + l(N_R(E_{elec} + E_{DA}) + \varepsilon_{fs} d_{CHtoRelay}^2 - E_{elec}) \times K + \frac{\varepsilon_{fs} l N M^2}{2\pi} \times \frac{1}{K} \quad (17)$$

通过最小化网络整体能耗 E_{Total} , 易得出如公式(12)所示的簇首最佳数量. 证毕. \square

3 基于虚拟簇首及其虚拟力的分簇路由协议

基于上述簇间多跳策略的适用条件及簇首最佳规模计算理论, 当簇首数量满足公式(12)所示的条件时, 单轮次的网络总能耗可实现最小化. 然而, 由于簇首的能耗普遍高于普通节点, 需要综合考虑节点的剩余能量等因素, 基于轮换机制进行簇首选举, 以中继多跳的形式实现监测数据向基站的高效传输, 才能实现能耗的均衡化与网络寿命的最大化.

3.1 虚拟簇首

为构建真实簇首的最佳选取机制, 首先提出虚拟簇首的概念. 真实簇首与虚拟簇首的联系与区别在于: 后者在实际的 WSNs 中并不存在, 亦不被用于数据传输, 仅用于揭示前者的最佳位置. 如图 4(a)所示, 黑色散点为 WSNs 真实存在的节点, 黑色实心圆为虚拟簇首, 以虚拟簇首为圆心的虚线圆为其覆盖范围, 黑色五角星为基于虚拟簇首选出的真实簇首. 虚拟簇首的覆盖半径表征其可覆盖真实节点的最远距离, 根据簇区与监测区域的面积关系易知其覆盖半径 $R_{VCH} = M / \sqrt{K\pi}$, M 为监测区域的边长, K 为虚拟簇首的数量. 网络基于真实簇首进行分簇后, 通过簇间多跳向基站传输数据的过程如图 4(b)所示.

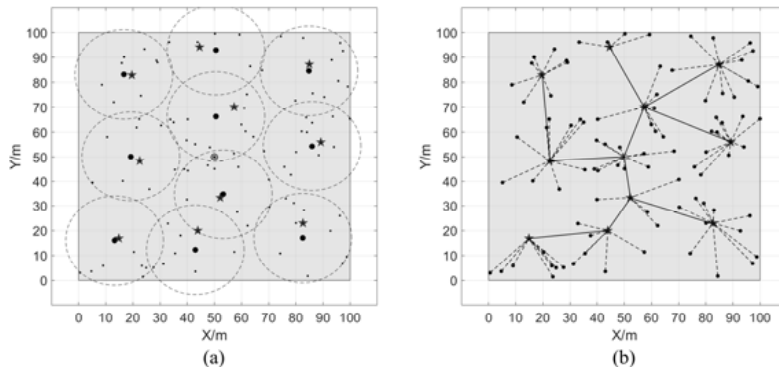


图 4 虚拟簇首与真实簇首的区别与联系

3.2 虚拟簇首的虚拟力

为保证簇首在监测区域中的分布均匀性, 避免出现簇首间距较小、簇首极端靠近区域边界或簇首分布在节点密度较低区域等现象, 本节分别构建虚拟簇首之间、虚拟簇首与边界、虚拟簇首与节点间的 3 种虚拟力. 各虚拟簇首在虚拟合力的驱使下进行移动, 当受力达到平衡或移动次数超出上限后移动结束. 基于节点的剩余能量及与虚拟簇首的距离, 选举最佳的真实簇首. WSNs 最终基于真实簇首对所有节点分簇, 并进行数据传输.

(1) 虚拟簇首与边界的虚拟力

为避免出现簇首极端靠近区域边界的现象, 在虚拟簇首与边界之间定义如公式(18)所示的虚拟力 F_{VCH-BD} , 如图 5(a) 的 4 号、5 号虚拟簇首所示:

$$F_{VCH-BD}(i) = \begin{cases} (d_{V-BDth} - d_{toBD}(i), \theta_1(i)), & 0 \leq d_{toBD}(i) \leq d_{V-BDth} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

对于第 i 个虚拟簇首而言, $d_{toBD}(i)$ 为其与最近边界之间的欧氏距离, $\theta_1(i)$ 为其指向区域内部的方向角(垂直于边界), d_{V-BDth} 为衡量虚拟簇首受边界虚拟力属性的距离阈值. 当虚拟簇首与最近边界的间距小于 d_{V-BDth} 时, 其受边界的斥力随二者间距的减小而增大.

根据 F_{VCH-BD} 的定义易知: 虚拟簇首与边界间的虚拟力阈值 d_{V-BDth} 对虚拟簇首与边界间虚拟力的影响较大, 是控制真实簇首与边界间距的主要因素. 当仅考虑 F_{VCH-BD} 时, 若受力达到平衡状态, 则各虚拟簇首与边界的距离至少为 d_{V-BDth} . 根据图 5(b) 所示的几何关系可知, 当 $d_{V-BDth} = \sqrt{2}R_{VCH}/2$ 时, 在区域内边界处的空洞可被完全覆盖, 且虚拟簇首浪费(处于区域之外)的覆盖范围可被最小化. 因此, 该值即为虚拟簇首与边界间的最佳虚拟力阈值.

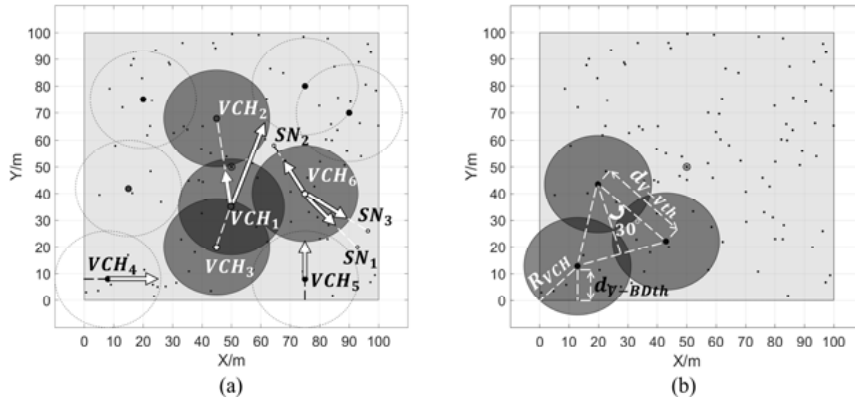


图 5 虚拟簇首与边界、其他虚拟簇首及节点间的虚拟力

(2) 虚拟簇首间的虚拟力

为确保簇首在网络分布的均匀性, 在虚拟簇首之间定义如公式(19)所示的虚拟力 $F_{VCH-VCH}$, 如图 5(a) 的 1 号虚拟簇首所示:

$$F_{VCH-VCH}(i, j) = \begin{cases} (d_{V-Vth} - d_{toVCH}(i, j), \theta_2(i, j)), & 0 \leq d_{toVCH}(i, j) \leq d_{V-Vth} \\ (d_{toVCH}(i, j) - d_{V-Vth}, \theta_2(i, j) + \pi), & d_{toVCH}(i, j) > d_{V-Vth} \end{cases} \quad (19)$$

对于第 i, j 个虚拟簇首而言, $\theta_2(i, j)$ 是由后者指向前者的方向角, $d_{toVCH}(i, j)$ 为二者之间的欧氏距离, d_{V-Vth} 为衡量二者虚拟力属性的距离阈值. 当二者间距不超过 d_{V-Vth} 时, 虚拟斥力随着二者间距的减小而增加; 反之, 虚拟引力随二者间距的增加而增加.

根据 $F_{VCH-VCH}$ 的定义易知, 虚拟簇首间的距离阈值 d_{V-Vth} 对虚拟簇首间距存在较大影响. 当其取值较大(小)时, 虚拟簇首之间的虚拟力将导致各虚拟簇首间的距离较远(近). 当仅考虑 $F_{VCH-VCH}$ 时, 若受力达到平衡

状态, 则各虚拟簇首间的距离为 d_{V-Vth} . 根据图 5(b)所示的几何关系可知: 当 $d_{V-Vth} = \sqrt{3}R_{VCH}$ 时, 各虚拟簇首的覆盖范围重叠范围最小, 并且在三者相交处无覆盖空洞, 该值即为虚拟簇首间的最佳虚拟力阈值.

(3) 虚拟簇首与节点间的虚拟力

簇首与节点的间距对数据传输的能耗具有较大影响. 簇首被优先选取在节点密度较高的区域, 能有效降低簇内通信能耗. 因此, 在虚拟簇首与节点间定义如公式(20)所示的虚拟力 F_{VCH-SN} , 如图 5(a)中 6 号虚拟簇首所示:

$$F_{VCH-SN}(i, j) = \begin{cases} (d_{ioSN}(i, j) - R_{VCH}, \theta_3(i, j)), & d_{ioSN}(i, j) \geq R_{VCH} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

对于第 i 个虚拟簇首与第 j 个未覆盖的节点而言, $d_{ioSN}(i, j)$ 为二者的欧氏距离, $\theta_3(i, j)$ 为前者指向后者的方向角. 当虚拟簇首与未覆盖节点的间距超出覆盖半径时, 虚拟簇首将被节点吸引, 引力大小随二者间距的增大而增大.

3.3 算法流程

本文所提出的 EERPVF 的流程如图 6 所示, 主要步骤如下.

(1) 参数初始化.

初始化网络中的节点数量 N 、节点坐标、节点通信范围、节点初始能量、区域尺寸、基站坐标及簇首比例 p 等参数.

(2) 计算各虚拟簇首的虚拟合力.

在区域内随机生成 $K = \lceil N_{alive} \times p \rceil$ 个虚拟簇首, N_{alive} 为当前轮次存活的节点数量, $p = K_{opt}/N$ 为最佳的簇首比例. 遍历所有虚拟簇首, 计算其受其他虚拟簇首、边界及节点施加的虚拟力. 以第 i 个虚拟簇首为例, 其虚拟合力 $F_C(i)$ 可通过公式(21)计算:

$$F_C(i) = \sum_{j=1, j \neq i}^K F_{VCH-VCH}(i, j) + F_{VCH-BD}(i) + \sum_{j=1}^N F_{VCH-SN}(i, j) \quad (21)$$

其中, $F_{VCH-VCH}(i, j)$ 为其受第 j 个虚拟簇首的虚拟力, $F_{VCH-BD}(i)$ 为其受边界的虚拟力, $F_{VCH-SN}(i, j)$ 为其受第 j 个节点的虚拟力. 若所有虚拟簇首的虚拟合力均为 0, 则进行第(4)步; 否则进行第(3)步.

(3) 虚拟簇首在虚拟合力的驱使下进行移动.

以第 i 个虚拟簇首为例, 按照公式(22)进行位置更新:

$$\begin{cases} VCH_x(i) = VCH_x(i) + \frac{F_{CX}(i)}{F_C(i)} \times \text{MaxStep} \times \exp\left(-\frac{1}{F_C(i)}\right) \\ VCH_y(i) = VCH_y(i) + \frac{F_{CY}(i)}{F_C(i)} \times \text{MaxStep} \times \exp\left(-\frac{1}{F_C(i)}\right) \end{cases} \quad (22)$$

其中, $F_{CX}(i)$ 与 $F_{CY}(i)$ 分别为虚拟合力 $F_C(i)$ 在横、纵坐标轴方向上的分力, MaxStep 为虚拟簇首的单次移动步长. 若虚拟簇首的移动次数超过上限, 则进行第(4)步; 否则返回第(2)步.

(4) 基于虚拟簇首确定真实簇首.

各节点加入距离最近的虚拟簇, 根据公式(23)计算虚拟簇内各节点的属性值, 将属性值最大的节点(即距离虚拟簇首较近, 且剩余能量较高者)视为真实簇首, 若节点在上一轮充当了簇首的角色, 则将其排除:

$$Q_{SN}(i, j) = w_1 \times \frac{d_{ioVCHmax}(i) - d_{ioVCH}(i, j)}{d_{ioVCHmax}(i) - d_{ioVCHmin}(i)} + w_2 \times \frac{E'(j)}{E_o(j)} \quad (23)$$

其中, $Q_{SN}(i, j)$ 为第 i 个虚拟簇的第 j 个节点的属性值. 对于第 i 个虚拟簇而言, $d_{ioVCHmax}(i)$ 与 $d_{ioVCHmin}(i)$ 分别代表虚拟簇内所有节点与虚拟簇首的最远及最近距离, $E_o(j)$ 与 $E'(j)$ 分别为第 j 个节点的初始能量及在当前轮的剩余能量, w_1 与 w_2 分别为距离因子与能量因子的权重($w_1 + w_2 = 1$).

(5) 基于真实簇首对网络进行分簇.

各簇首对通信范围内的所有节点发送 Hello 数据包, 广播“我是簇首”的信息, 节点加入最近的簇.

(6) 数据传输.

若节点与基站的距离小于与簇首的距离, 则直接向基站发送 Data 数据包; 否则, 将 Data 数据包单跳发送至簇首; 各簇首将簇内数据进行融合后发送至基站. 在簇首与基站的通信过程中, 为各簇首选择中继节点. 具体而言, 按照其与基站间距离由远至近的顺序, 基于定理 1 指出的簇间多跳策略的适用条件, 在所有真实簇首中选择候选中继节点, 将剩余能量最高的簇首视为中继节点, 各簇首通过多跳的方式将簇区内的数据转发至基站.

(7) 所有节点的能量耗尽, 则算法结束; 否则返回第(2)步.

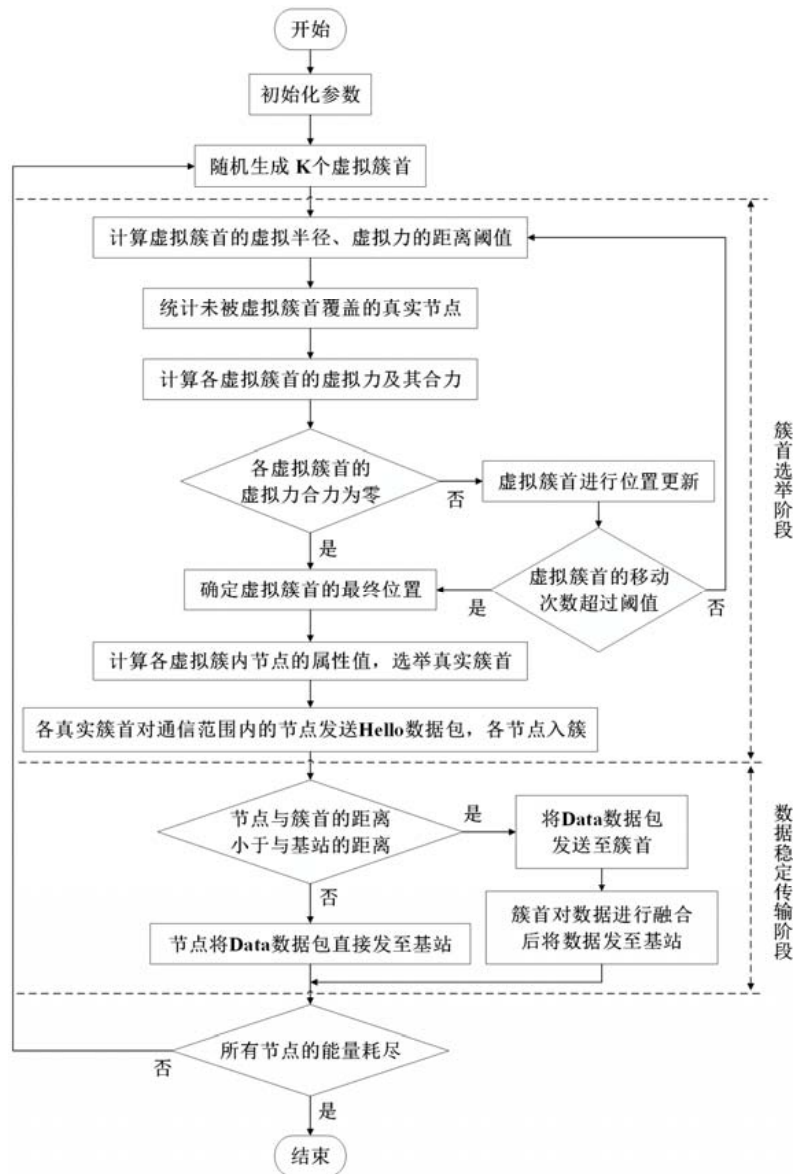


图 6 EERPVF 流程图

4 仿真实验

为了对本文算法性能进行评估,在 MATLAB 环境下,围绕簇的分布情况、簇首能耗、簇成员数量、网络剩余能量、数据传输情况及网络寿命等性能指标,将本文提出的 EERP VF 与 R-LEACH^[11]、MDEEC^[15]和 FIGWO^[22]进行性能对比.

4.1 EERP VF 的参数设定

(1) 簇首规模对网络能耗的影响

本节实验中,无线收发电路能耗系数 E_{elec} 、数据融合能耗系数 E_{DA} 与自由空间放大器能耗系数 E_{fs} 分别被设定为 50 nJ/bit、5 nJ/bit 与 10 pJ/bit/m². 对于面积分别为 200 m²、300 m² 与 400 m² 的含有 100 个节点的正方形监测区域而言,各簇首与中继节点间的距离分别为 0–141 m、0–212 m 与 0–282 m. 假设各簇首的数据转发次数为 2–5 次,基于公式(12)可计算出最佳的簇首数量分别为 $4 < K_{opt} < 11$ 、 $5 < K_{opt} < 17$ 与 $6 < K_{opt} < 20$. 通过在 $5 < K < 20$ 的范围内改变簇首的数量,对网络出现死亡节点前的每轮总能耗的平均值进行统计,如图 7(a)所示. 实验结果表明:3 种场景下的最佳簇首数量分别为 10、12 与 15,与理论分析结果较为吻合,将基于该组簇首规模进行后续实验.

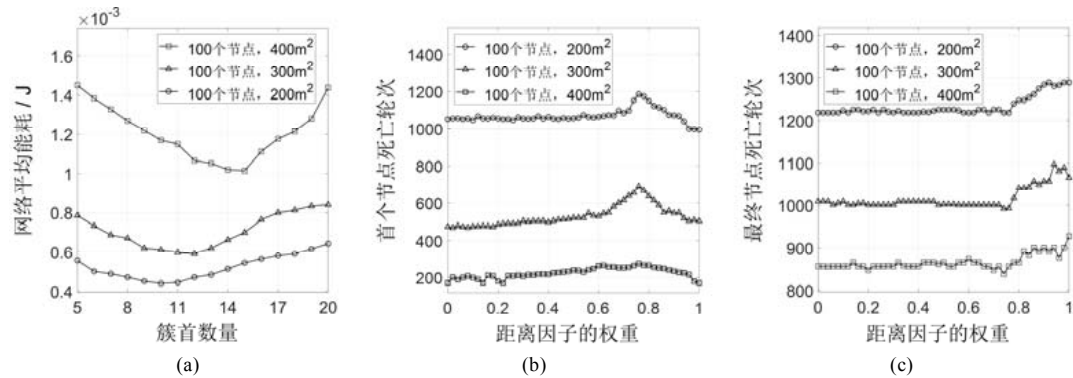


图7 实验参数对网络能耗的影响

(2) 距离与能量权重对网络能耗的影响

由于承担了簇内节点的数据融合及转发任务,簇首节点的能耗普遍比普通节点高.当虚拟簇首确定后,EERP VF 基于公式(23)同时兼顾节点的剩余能量及其与虚拟簇首的距离选举真实簇首. w_1 与 w_2 分别控制着距离与能量因子的权重,如何对二者进行最优化选取,是减少能耗及延长网络寿命的关键.基于不同的 w_1 ,本节对3种场景下的首个、最终死亡节点出现轮次进行统计,分别如图 7(b)、图 7(c)所示.当 w_1 从 0 增至 0.75 的过程中,首个节点死亡轮次逐渐被延后,最终节点死亡轮次均没有显著变化; w_1 在 0.75 附近时,3 种场景下的首个节点死亡轮次均最大;当 w_1 超过 0.75 后,尽管最终节点死亡所在轮次被延后,但首个节点死亡轮次骤降.由于首个节点死亡轮次往往被用于表征网络寿命,因此后续将基于 $w_1=0.75(w_2=0.25)$ 进行实验.

(3) 虚拟移动的步长与次数对网络的影响

由于虚拟簇首的初始位置是随机生成的,若移动后的虚拟簇首分布不均,则将影响真实簇首的最终位置,从而影响分簇效率乃至网络寿命.在虚拟簇首的移动过程中,单步移动距离与移动次数上限对算法时间复杂度的影响较大,较小的单步移动距离需要更多次迭代才能使簇首分布更为均匀;此外,二者对虚拟簇首的最终位置有影响,当单步移动距离较大时,无论经历多少次迭代,都无法得到最均匀的簇首分布方案.因此,如何在保证虚拟簇首分布均匀的前提下,尽可能地减少其移动次数是关键.

根据虚拟簇首及其虚拟力的定义,多数节点在理想状态下应处于虚拟簇首的覆盖范围内,即整个监测区域未被虚拟簇首覆盖的空洞区域应充分少.因此,本节用监测区域被覆盖的效果衡量虚拟簇首的位置是否均衡,以进一步确定一组最佳的单步移动距离及移动次数.如图 8 所示:对于 3 种场景而言,单次步进距离较小

时, 尽管 100 次移动后网络覆盖率可达 97%左右, 但覆盖率的收敛速度较慢; 单次步进距离较大时, 尽管收敛速度较快, 但最终覆盖率较低. 单步移动距离为 5 m 时, 3 种场景下的虚拟簇首分别移动 10、20、30 次后, 无论是收敛速度或是覆盖率收敛值均较优.

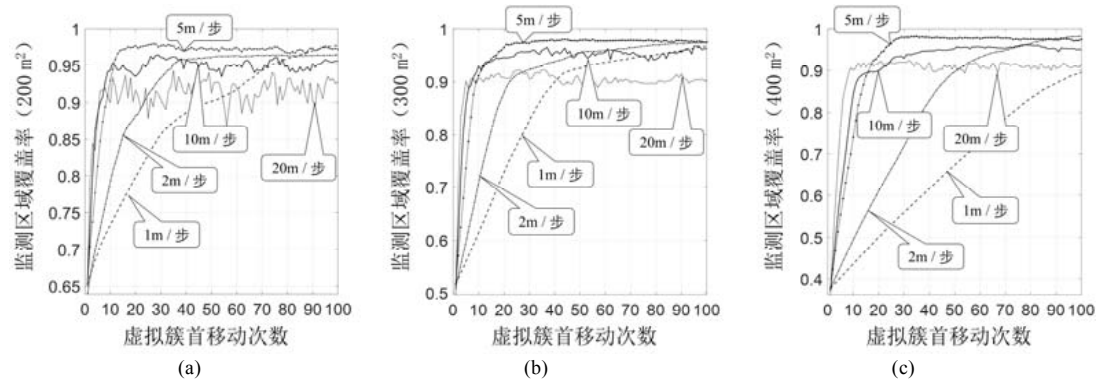


图 8 移动速度、移动次数上限与覆盖效果的关系

图 9 反映了单步移动距离在 3 种场景下对首个死亡节点出现前的簇首平均能耗的影响, 可以看出: 当簇首单步移动 5 m 时, 簇首总能耗最低. 因此, 后续将基于单步移动 5 m, 3 种场景各移动 10、20 与 30 次进行实验.

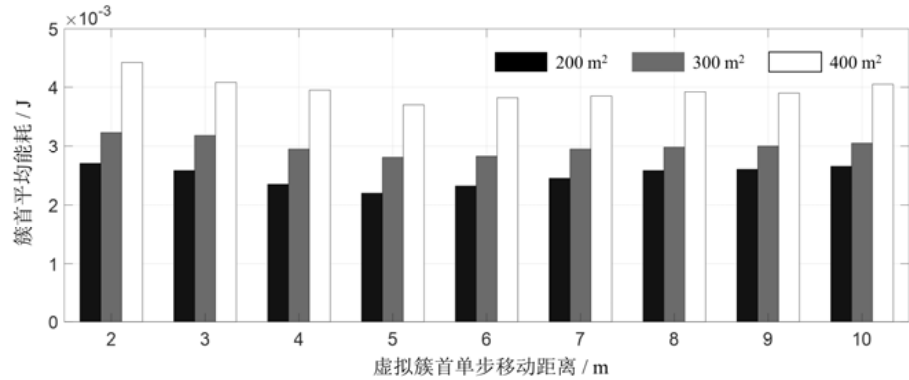


图 9 虚拟簇首的移动速度与真实簇首能耗的关系

实验涉及的所有参数见表 1.

表 1 实验参数

实验参数	参数取值	实验参数	参数取值
区域面积	200 m ² , 300 m ² , 400 m ²	距离、能量因子的权重(w_1, w_2)	0.75, 0.25
节点数量 N	100 个	Data 数据包长度	4000 bit
簇首比例 p	0.10, 0.12, 0.15	初始能量 E_o	0.50 J
虚拟簇首半径 R_{VCH}	36 m, 33 m, 30 m	无线收发电路能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
虚拟簇首之间的虚拟力距离阈值 d_{V-Vth}	62 m, 57 m, 52 m	自由空间放大器能耗 E_{fs}	10 pJ/bit/m ²
虚拟簇首的移动步长 $MaxStep$	10 m	多径传输放大器能耗 E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
移动次数上限	10 次, 20 次, 30 次	数据融合能耗 E_{DA}	5 nJ/bit

4.2 基于簇首的实验与分析

本节在 200 m² 场景中, 将本文提出的 EERPVF 与其他 3 种算法的簇首分布情况进行对比. 簇首在第 500 轮的分布情况、前 500 轮的簇首平均数量及簇内成员节点数量的标准差对比分别如图 10–图 12 所示.

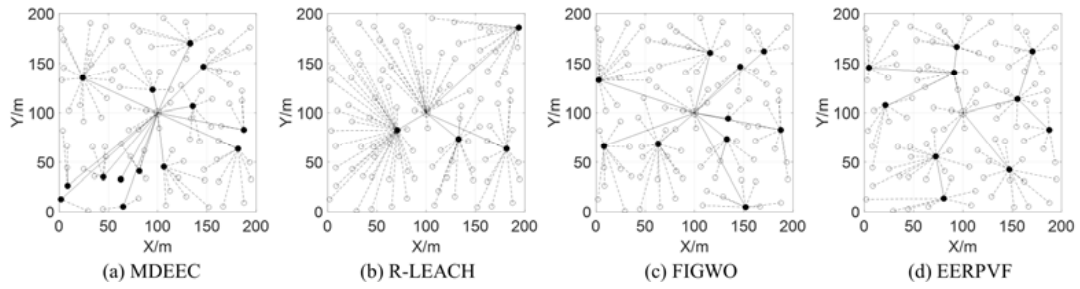


图 10 簇首分布情况对比

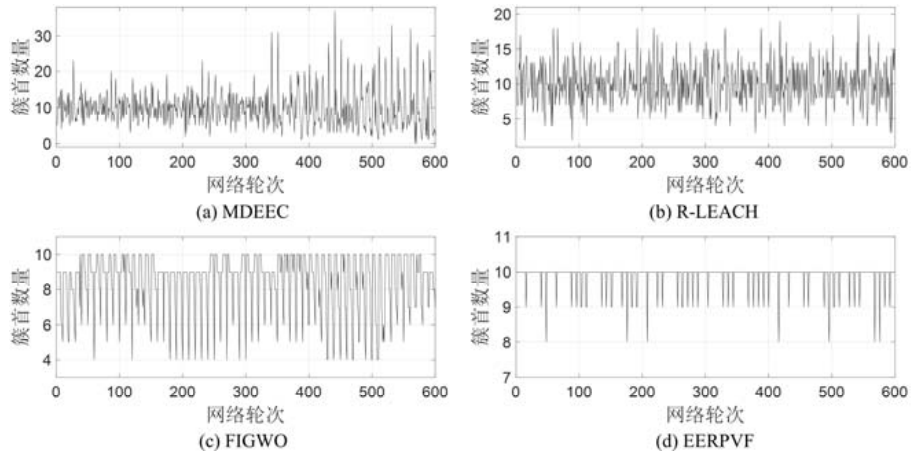


图 11 簇首数量对比

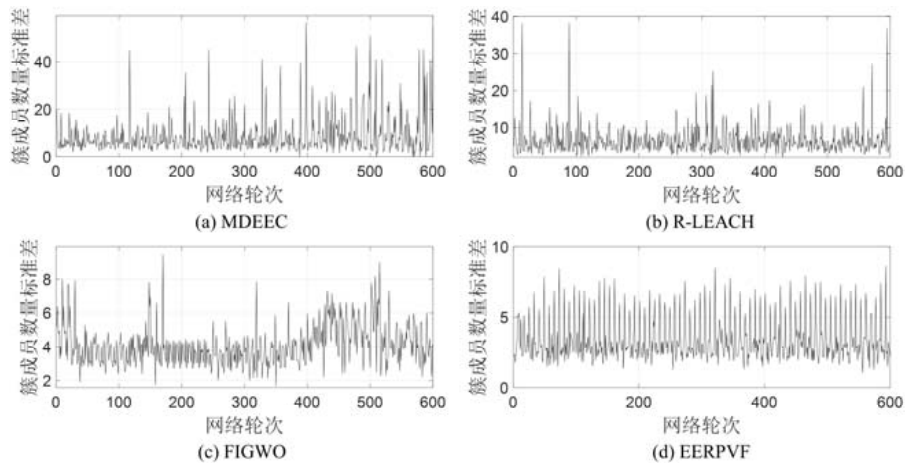


图 12 簇成员数量标准差对比

对于 MDEEC 与 R-LEACH 而言, 从图 10(a)与图 10(b)中可以看出, 二者的簇首比例明显偏离设定的簇首比例 10%。这是由于 R-LEACH 基于节点轮换当选簇首的机制, 近期当选过簇首的节点不再参与簇首选举, 若当前轮次等于簇首最优数量, 则将所有节点当选簇首的概率重置为 1; MDEEC 同样基于节点轮换当选簇首的机制, 与 R-LEACH 的不同之处在于节点当选簇首的概率公式中考虑了节点剩余能量因子, 因此在簇首比例设定相同时, 二者在每轮的簇规模是各异的, 具体表现为图 11(a)与图 11(b)中的簇规模显著波动现象; 此外, 二者并未对簇首在区域内的位置进行优化, 因此簇首分布均匀性较差, 导致如图 12(a)与图 12(b)所示的簇成

员节点数量存在显著差异。

对于 FIGWO 而言, 尽管图 10(c) 所示的簇首规模达到了理论最优值, 但是由于其规定若簇成员节点少于 3 个, 则将簇首视为普通节点, 因此多数情况下的簇首数量小于最优值, 如图 11(c) 所示。FIGWO 仅将剩余能量及与基站的距离作为适应度因子, 无法避免将靠近基站或区域边界的节点选举为簇首的情况发生。此外, 由前三头狼确定的猎物位置往往是不存在节点的区域, 寻找距离猎物最近的节点当选簇首, 易导致适应度值较低的节点被选举为簇首。因此, 簇首选取最优原则无法被保证, 簇首分布不均导致各簇成员的数量差异较大, 如图 12(c) 所示。

对于本文提出的 EERP VF 而言, 从图 10(d) 中可以看出, 簇首数量最优且分布效果最均匀。这是由于本文算法的簇首数量与表 1 所述的簇首比例及存活节点数量有关, 不会随轮次的变化产生明显波动, 可长时间保持在最佳簇首规模(为保证能耗均衡性, 本文算法禁止节点连续两轮当选簇首, 因此簇首数量偶尔会少于 10 个), 如图 11(d) 所示。此外, 本文算法为虚拟簇首定义的 3 种虚拟力对簇首分布的均匀性存在以下贡献。

- 虚拟簇首之间的虚拟力保证了各簇间的距离较为均衡;
- 虚拟簇首与边界之间的虚拟力确保了簇首不会极端靠近边界;
- 簇首与节点之间的虚拟力可最大程度地将簇首限制在节点密度较高的区域。

相较于其他 3 种对比算法, 本文算法能以更均匀的方式对网络进行分簇, 因此簇成员数量差异性较小, 如图 12(d) 所示。

除上述性能指标外, 簇首数量及分布均匀性对簇首的平均能耗影响较大。

- 一方面, 当簇首规模不变时, 所有簇首服务的普通节点数量亦不变, 仅与簇内节点数量有关而与距离无关的簇首接收数据及融合数据的能耗不变。因此, 每轮簇首平均能耗差异的影响因素主要为发送数据的能耗。当簇首与基站的距离超过距离阈值后, 能耗将急剧上升;
- 另一方面, 当各轮簇首与基站之间距离的差异不大时, 簇首能耗主要受簇首规模影响, 较少的簇首将导致普通节点与簇首通信能耗的骤升。

由于本文提出的 EERP VF 在簇首数量及分布效果方面显著优于其他 3 种对比算法, 因此其簇首平均能耗最小且最稳定, 如图 13 所示。

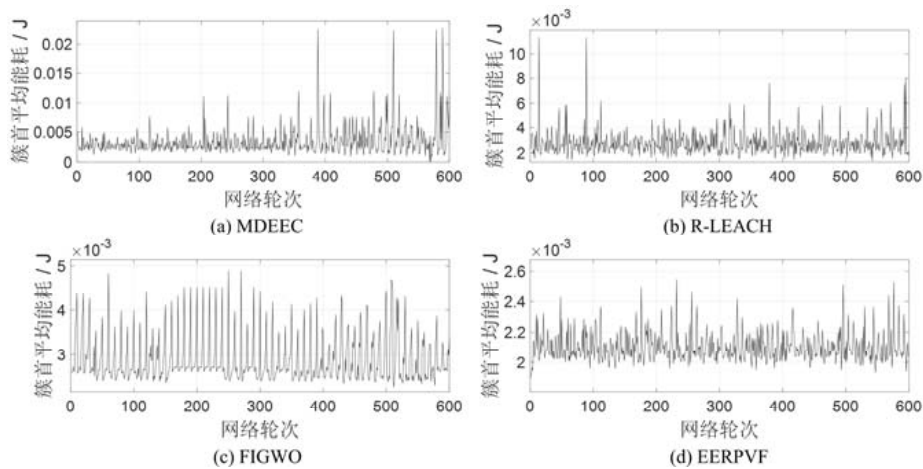


图 13 簇首平均能耗对比

4.3 基于网络的实验与分析

节点剩余能量是衡量网络数据传输效率的重要性能指标。4 种算法的节点剩余能量平均值及标准差的对比如图 14 所示: 当网络执行到第 900 轮时, FIGWO、R-LEACH、MDEEC 与 EERP VF 的节点平均剩余能量分别为 0.064 4、0.054 5、0.049 2 与 0.136 6(J), 节点剩余能量标准差分别为 0.053 5、0.049 1、0.061 5 与 0.038 4(J),

前三者的节点剩余能量比本文 EERP VF 的性能分别差 52.86%、60.10%与 63.98%，剩余能量标准差分别差 39.32%、27.86%与 60.16%。因此，本文算法在每轮的能量效率最高。主要原因在于：EERP VF 在选取簇首时不仅考虑了节点剩余能量，更重要的是，基于定义的 3 种虚拟力保证了簇首分布的均匀性，在最大化簇首利用效率的同时，有效地降低了簇内成员节点的能耗，因此图 14(a)所示的节点剩余能量均值较高；此外，EERP VF 随机生成的虚拟簇首在虚拟力的驱使下进行移动，各轮的虚拟簇首的位置是各异的，基于虚拟簇首选取出的真实簇首是不同的，且公式(23)保证了剩余能量较高的节点被选举为簇首的可能性更大，因此图 14(b)所示的节点剩余能量差异较小。本文算法能够显著降低并均衡各节点的能量消耗，有利于保证网络数据传输的稳定性。

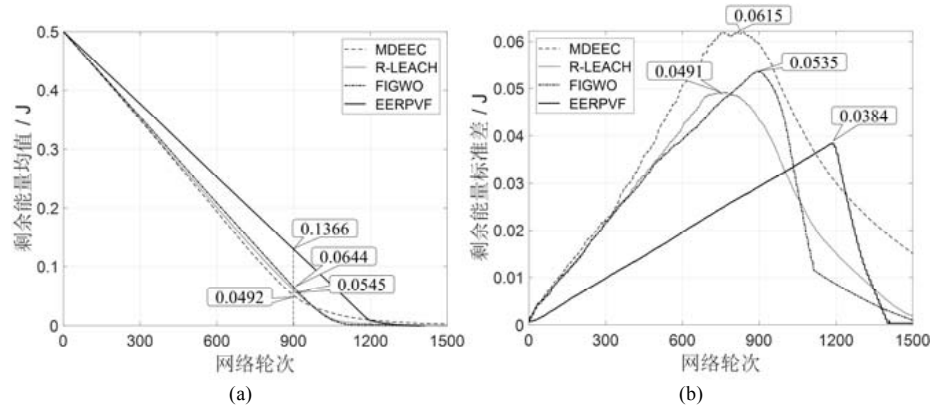


图 14 网络能耗对比

基站接收分组数代表基站接收各簇首的数据包量，是评价路由协议性能的重要指标之一，性能优异的分簇路由协议往往能以最小的能耗实现最大的数据传输量。本节对 EERP VF 与其他 3 种对比算法的数据传输效率进行了对比，如图 15–图 17 所示。

当网络能量耗尽时，FIGWO、R-LEACH、MDEEC 与 EERP VF 的基站接收分组数分别为 8 540 组、10 284 组、9 685 组与 11 948 组。相比于前三者，本文算法的性能分别提高了 39.91%、16.18%与 23.37%，如图 15(a)所示。本文算法与 R-LEACH、MDEEC 的基站分组数接收量在前期无明显差异，这是由于在首个死亡节点出现之前，三者的簇首平均数量差异不大。由于 FIGWO 的簇首数量常低于最优设定值，因此其基站接收分组数较低。

当网络能量消耗过半时，FIGWO、R-LEACH、MDEEC 与 EERP VF 的基站接收分组数分别为 4 425 组、4 950 组、4 844 组与 6 002 组，相比于前三者，本文算法的性能分别提高了 35.64%、21.25%与 23.91%，如图 15(b)所示，本文算法能量高效的特点得以体现。由于 EERP VF 以减少节点能耗与延长网络寿命为目标，针对虚拟簇首分别定义了基于距离与能量的虚拟力，多种虚拟力共同限制了虚拟簇首的位置，综合考虑了节点剩余能量、距离虚拟簇首的距离等因素对真实簇首进行选举，在实现能耗最小化的同时，可保证节点剩余能量较均衡。因此，在每轮网络通信过程中，本文算法能够以最小的能耗为代价实现监测数据向基站的传输。因此，与其他 3 种算法相比，本文算法的能量效率最高。

网络的生命周期(从网络建立开始到节点没有足够能量完成感知数据传输的时间)是衡量路由协议性能的关键，通常采用首个节点死亡时间作为评价网络生命周期的参考指标。4 种算法的死亡节点数量与网络能耗及轮次的关系如图 16 所示。FIGWO、R-LEACH、MDEEC 与 EERP VF 的首个死亡节点出现轮次分别为 864 轮、689 轮、635 轮与 1 188 轮，相比于前三者，本文算法的网络寿命分别延长了 37.50%、72.42%与 87.09%，能够保证对监测区域进行长时间的有效监测。此外，EERP VF 的首个与最终死亡节点出现轮次之差是最小的，与上述关于本文算法节点能耗最均衡的结论相符。值得强调的是：当网络消耗了 48 J(总能量为 50 J)的能量后，FIGWO、R-LEACH、MDEEC 与 EERP VF 的存活节点数量分别为 39 个、56 个、28 个与 100 个，如图 16(b)所示。当网络能耗趋近耗尽时，本文算法的死亡节点数量最少，死亡速率最低，因此能够提高网络数据稳定传

输的时长, 对目标区域进行长时间的有效监测. 为了验证本文提出的 EERP VF 在更大规模场景中的性能, 分别在 300 m^2 与 400 m^2 场景下对网络寿命进行了对比. 从图 17 中可以看出: 在大规模网络中, EERP VF 的中继多跳策略有效减小了距离基站较远的簇首的能耗; 此外, 随着网络规模的扩大, 由公式(12)定义的簇首最佳数量随之增加, 簇间中继将倾向于以自由空间能耗模型进行通信, 有效减小了簇间通信能耗. 因此在大规模网络中, EERP VF 相比于 FIGWO、R-LEACH 及 MDEEC 仍具有较明显的性能优势.

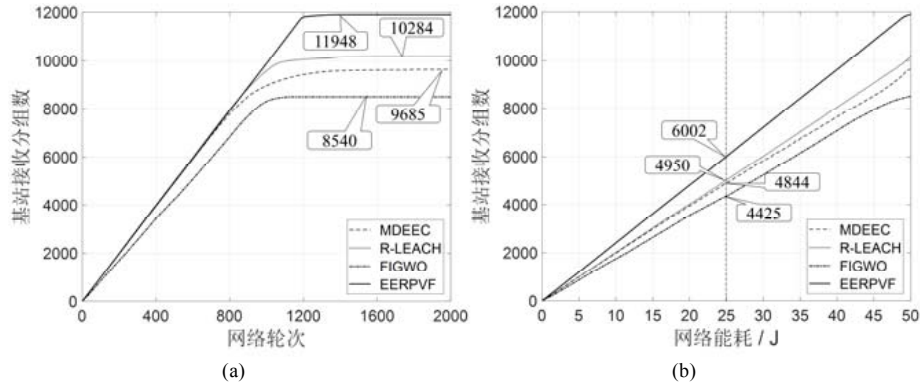


图 15 基站接收分组数对比

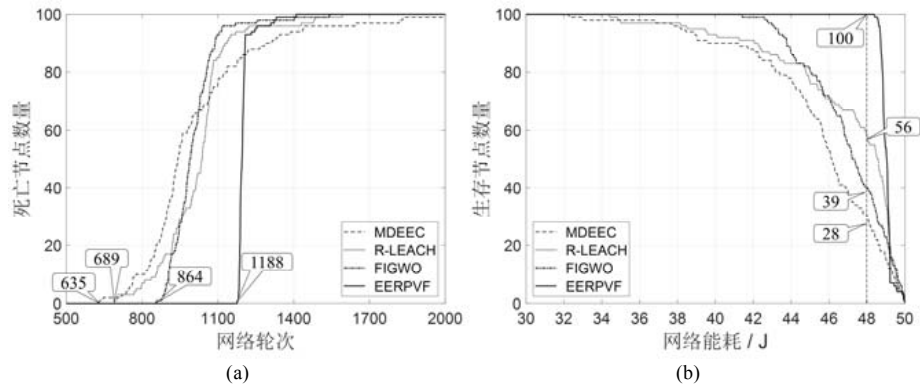


图 16 网络寿命对比

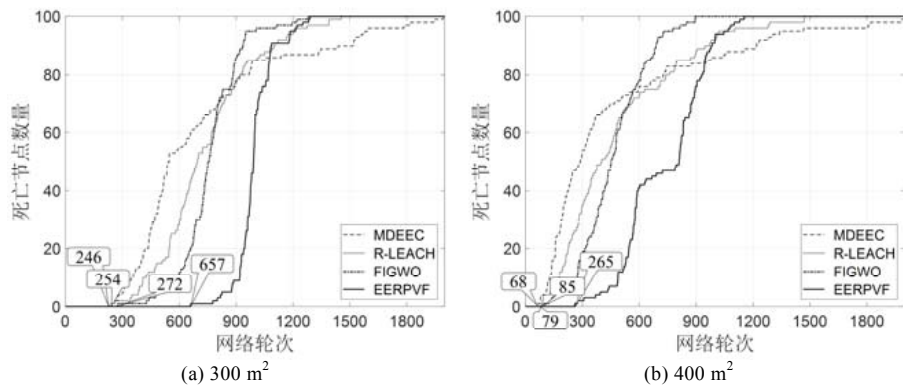


图 17 不同场景下的网络寿命对比

4.4 算法复杂度分析

在时间复杂度方面, 对于含有 N 个节点、 N_{CH} 个簇首的网络($N \geq N_{CH}$), 簇首与边界、簇首间的虚拟力、簇

首与节点间的虚拟力的时间复杂度分别为 $O(N_{CH})$ 、 $O(N_{CH}^2)$ 与 $O(N \times N_{CH})$, 基于虚拟簇首选择真实簇首的时间复杂度为 $O(N)$; 在簇首与基站的通信过程中, 中继节点选取的时间复杂度为 $O(N_{CH}^2)$, 因此在每轮簇首选举及通信过程中, 本文提出的 EERP VF 的时间复杂度为 $O(N \times N_{CH})$. LEACH 改进协议(R-LEACH 与 MDEEC)的时间复杂度普遍在 $O(N^2)$ 之内, EERP VF 存在优势且网络能耗性能得到了显著提升; 群体智能优化算法(以 FIGWO 为例)在解决分簇路由问题时, 种群数量 N_{pop} 及迭代次数 N_{iter} 是时间开销的主要部分, 其时间复杂度为 $O(N \times N_{pop})$, 在小规模网络中, 由于其种群数量多于簇首数量, 因此本文 EERP VF 在算法复杂度方面有显著优势; 在大规模网络中, 簇首数量多于种群数量, 本文 EERP VF 在时间复杂度方面稍显劣势, 但在网络寿命等方面有更优秀的性能.

5 结 论

如何对簇首的规模及其在网络中的分布进行优化, 是构建 WSNs 高性能分簇协议的关键. 本文提出一种基于虚拟力的能量高效路由协议 EERP VF, 分析了簇间多跳策略的适用条件, 揭示了网络规模、簇首数量与网络能耗的映射关系, 推导出不同场景下的簇首最佳数量及最佳位置; 以最小化网络能耗为目标, 提出了虚拟簇首的概念并为其构建了 3 种虚拟力, 讨论了影响网络能耗的虚拟力距离阈值的最佳设定方案; 定义了基于距离及能量因子的节点属性, 以能耗最小化及均衡化为目标在虚拟簇中选举最佳的真实簇首; 讨论了导致参数理论最优值与实验最优值存在差异的原因. 实验结果表明: 与 FIGWO、R-LEACH、MDEEC 相比, 本文提出的 EERP VF 有效减小了网络能耗, 提高了数据传输效率并且延长了网络寿命. 然而, EERP VF 的最终死亡节点的寿命有待进一步优化. 由于尚未考虑因分簇及簇间多跳导致的通信拥塞问题, 因此未来将围绕通信服务质量展开进一步研究.

References:

- [1] Tomić I, McCann JA. A survey of potential security issues in existing wireless sensor network protocols. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(6): 1910–1923.
- [2] Zhao XQ, Cui YP, Gao CY, *et al.* Energy-efficient coverage enhancement strategy for 3-D wireless sensor networks based on a vampire bat optimizer. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 325–338.
- [3] Hasan MZ, Al-Rizzo H, Al-Turjman F. A survey on multipath routing protocols for QoS assurances in real-time wireless multimedia sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1424–1456.
- [4] Yang L. Study on cluster-based energy saving routing protocols for wireless sensor networks [Ph.D. Thesis]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [5] Zhao X, Cui Y, Guo Z, *et al.* An energy-efficient coverage enhancement strategy for wireless sensor networks based on a dynamic partition algorithm for cellular grids and an improved vampire bat optimizer. *Sensors*, 2020(20): 619.
- [6] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660–670.
- [7] Zhang RR. Research on optimization technology of WSN based on UAV [MS. Thesis]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [8] Yang Y. Research on clustering algorithm based on LEACH protocol in free space optical sensor network [MS. Thesis]. Xi'an: Xi'an Electrical Sciences & Technology University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [9] Lee JS, Kao TY. An improved three-layer low-energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(6): 951–958.
- [10] Chen H, Zhang C, Zong X, *et al.* LEACH-G: An optimal cluster-heads selection algorithm based on LEACH. *Journal of Software*, 2013, 8(10): 2660–2667.
- [11] Behera TM, Mohapatra SK, Samal UC, *et al.* Residual energy-based cluster-head selection in WSNs for IoT application. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5132–5139.

- [12] Amgoth T, Jana PK. Energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 41: 357–367.
- [13] Sabet M, Naji HR. A decentralized energy efficient hierarchical cluster-based routing algorithm for wireless sensor networks. *AEU—Int'l Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(5): 790–799.
- [14] Cengiz K, Dag T. Improving energy-efficiency of WSNs through LEFCA. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12(8): 8139401.
- [15] Tiwari T, Roy NR. Modified DEEC: A varying power level based clustering technique for WSNs. In: *Proc. of the 2015 Int'l Conf. on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*. IEEE, 2015. 170–176.
- [16] Liu C, Chen GF, Ma WF. Research and improvement on the LEACH protocol of wireless sensor network. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(2): 129–133 (in Chinese with English abstract).
- [17] Sun YQ, Peng J, Liu T, Chen XH. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 198–206 (in Chinese with English abstract).
- [18] Wu H, Zhu H, Miao Y. An energy efficient cluster-head rotation and relay node selection scheme for farmland heterogeneous wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 2018, 101(3): 1639–1655.
- [19] Mann PS, Singh S. Energy-efficient hierarchical routing for wireless sensor networks: A swarm intelligence approach. *Wireless Personal Communications*, 2017, 92(2): 785–805.
- [20] Qi P, Bao KY, Ma XY. WSN hierarchical routing algorithm based on fuzzy C-means clustering and swarm intelligence. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(7): 1974–1980+1988 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhang YY. A clustering routing algorithm for WSN based on swarm intelligence optimization technique [MS. Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [22] Zhao X, Zhu H, Aleksic S, *et al.* Energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks based on improved grey wolf optimizer. *KSII Trans. on Internet and Information Systems*, 2018, 12(6): 2644–2657.
- [23] Zhao X, Ren S, Quan H, *et al.* Routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks based on a modified grey wolf optimizer. *Sensors*, 2020, 20(3): 820.
- [24] Wu XN, Zhang CY, Zhang RL, Sun YP. Clustering routing protocol based on improved PSO algorithm in WSN. *Journal on Communications*, 2019, 40(12): 114–123 (in Chinese with English abstract).
- [25] Liu H, Li HW. Uneven clustering routing algorithm based on ant colony optimization. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2018, 46(8): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- [26] Shokouhifar M, Jalali A. A new evolutionary based application specific routing protocol for clustered wireless sensor networks. *AEU—Int'l Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(1): 432–441.
- [27] Arjunan S, Sujatha P. Lifetime maximization of wireless sensor network using fuzzy based unequal clustering and ACO based routing hybrid protocol. *Applied Intelligence*, 2018, 48(8): 2229–2246.
- [28] Cui YN, Wei W, Hu YH. Particle swarm optimal-based improved LEACH protocol for WSN. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2019, 14(11): 1169–1173, 1193 (in Chinese with English abstract).
- [29] Daneshvar SMMH, Mohajer PAA, Mazinani SM. Energy-efficient routing in WSN: A centralized cluster-based approach via grey wolf optimizer. *IEEE Access*, 2019, 7: 170019–170031.
- [30] Zhao XQ, Zhang L. Clustering routing algorithm for wireless sensor networks based on angle clustering. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2019, 24(2): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- [31] Dong FZ, Ding HW, Yang ZJ, Xiong CB, Zhang YJ. WSN clustering routing algorithm based on genetic algorithm and fuzzy C-means clustering. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(8): 2359–2365 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [4] 杨柳. 基于分簇结构的无线传感器网络节能路由协议研究 [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [7] 张瑞瑞. 基于无人机的无线传感器网络优化技术研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [8] 杨宇. 基于 LEACH 协议的无线光传感器网络分簇算法研究 [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [16] 刘闯, 陈桂芬, 马威风. 无线传感器网络 LEACH 协议的研究改进. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(2): 129–133.

- [17] 孙彦清, 彭舰, 刘唐, 陈晓海. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议. 通信学报, 2014, 35(1): 198–206.
- [20] 戚攀, 包开阳, 马晶源. 基于模糊 C 均值聚类及群体智能的 WSN 分层路由算法. 计算机应用, 2018, 38(7): 1974–1980+1988.
- [21] 张影影. 基于群智能优化技术的无线传感网分簇路由算法研究 [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [24] 武小年, 张楚芸, 张润莲, 孙亚平. WSN 中基于改进粒子群优化算法的分簇路由协议. 通信学报, 2019, 40(12): 114–123.
- [25] 刘宏, 李好威. 基于蚁群优化的非均匀分簇路由算法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 50–54.
- [28] 崔亚楠, 韦伟, 胡艳华. WSN 中基于粒子群最优算法的 LEACH 的改进路由. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(11): 1169–1173, 1193.
- [30] 赵小强, 张琳. 基于角度聚类的无线传感器网络分簇路由算法. 西安邮电大学学报, 2019, 24(2): 16–20.
- [31] 董发志, 丁洪伟, 杨志军, 熊成彪, 张颖婕. 基于遗传算法和模糊 C 均值聚类的 WSN 分簇路由算法. 计算机应用, 2019, 39(8): 2359–2365.



赵小强(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 专业会员, 主要研究领域为面向环境监测的物联网技术, 无线传感器网络.



崔砚鹏(1994—), 男, 博士, 主要研究领域为雷达通信一体化, 面向无人驾驶的边缘计算, 无线传感器网络.



郭铮(1995—), 男, 硕士, 主要研究领域为面向环境监测的物联网技术, 无线传感器网络.



刘敏(1995—), 女, 硕士, 主要研究领域为面向环境监测的物联网技术, 无线传感器网络.



李雄(1996—), 男, 硕士, 主要研究领域为面向环境监测的物联网技术, 无线传感器网络.



文秦(1998—), 男, 硕士, 主要研究领域为面向环境监测的物联网技术, 无线传感器网络.

《软件学报》2022 年出版专刊/专题

发表期数	专刊/专题名称	特约编辑
2022 年第 3 期	数据库系统新型技术	李国良,于戈,杨俊,范举
2022 年第 4 期	面向开放场景的鲁棒机器学习研究	陈恩红,李宇峰,邹权
2022 年第 5 期	领域软件工程	汤恩义,江贺,陈俊洁,李必信,唐滨
2022 年第 6 期	系统软件安全	杨珉,张超,宋富,张源
2022 年第 6 期	定理证明理论与应用	曹钦翔,詹博华,赵永望
2022 年第 7 期	智能系统的分析和验证	明仲,张立军,秦胜潮
2022 年第 8 期	形式化方法与应用	陈立前,孙猛
2022 年第 9 期	融合媒体环境下的媒体内容分析与信息服务技术	汪萌,张勇东,俞俊,张伟
2022 年第 10 期	智慧信息系统新技术	邢春晓,王鑫,张勇,于戈

登录软件学报网站: <http://www.jos.org.cn> 免费下载专刊/专题全文.

软 件 学 报

Ruanjian Xuebao

(月刊, 1990 年创刊)

第 33 卷 第 2 期 2022 年 2 月

Journal of Software

(monthly)

(Started in 1990)

Vol.33 No.2 Feb. 2022

主管单位	中国科学院	Sponsored by the Chinese Academy of Sciences
主办单位	中国科学院软件研究所 中国计算机学会	Published by Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences (ISCAS) and China Computer Federation
主 编	赵 琛	Editor-in-Chief: ZHAO Chen
编 辑	《软件学报》编辑部 (北京 8718 信箱 邮编 100190) 电话: 010-62562563, E-mail: jos@iscas.ac.cn http://www.jos.org.cn	Edited by Editorial Board of Journal of Software (P.O.Box 8718, Beijing 100190, P.R.China) Tel: 8610-62562563, E-mail: jos@iscas.ac.cn http://www.jos.org.cn
编辑部主任	方 梅	Distributed by Science Press (16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China)
出 版	科学出版社 (北京东黄城根北街 16 号 邮编 100717)	Printed by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd
印 刷	北京宝昌彩色印刷有限公司	Generally Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
总发行处	中国邮政集团公司北京市报刊发行局	Domestically Distributed by All Local Post Offices in China
订 购 处	全国各地邮局	Overseas Distributed by China International Book Trading Corporation (P.O.Box 399, Beijing 100044, China)
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱 邮编 100044)	

ISSN 1000-9825

CN 11-2560/TP

国内邮发代号: 82-367

国外发行代号: M4628

©2022 ISCAS (版权所有)

定价: 70.00 元

公 开 发 行

