

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.07

能量感知的传感器网络异构节点优化部署算法

孙茜¹, 孟祥越², 李晶^{3*}

(1. 北京工商大学 计算机与人工智能学院, 北京 100048; 2. 中央广播电视发射二台, 北京 100045;
3. 北京联合大学 智慧城市学院, 北京 100101)

摘要: 目前监测任务领域应用的传感器网络异构节点部署方案存在运行效率较低的不足, 针对此问题, 本文提出单汇聚节点异构无线传感器网络异构节点部署 (Optimal Deployment of Heterogeneous Node Positions in a Single Sink Network, ODHNSS) 算法, 结合网络覆盖率、通信距离与通信半径之比、休眠节点占比等关键指标, 制定异构节点位置的选择依据, 实现基于能量感知的传感器网络异构节点优化部署。利用 MATLAB 软件进行仿真, 对比 ODHNSS、三层扩展能效优化层次结构 (Three-Tier Extended Energy Efficient Clustering Hierarchy, TEECH) 和异构节点优化部署 (Optimal Deployment of Heterogeneous Nodes, ODHN) 算法的应用效果, 结果表明: 相较另外两种算法, ODHNSS 能够使数据传输效率明显提升并降低网络运行能耗, 为推动无线传感器监测网络技术发展提供有力支撑。

关键词: 能量感知; 无线传感器网络; 异构节点; 优化部署; 数据传输; 运行效率; 网络覆盖率; 物联网
中图分类号: TP212; TB9; TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 04-0109-07

Energy-aware optimization algorithm for the deployment of heterogeneous nodes in sensor networks

SUN Qian¹, MENG Xiangyue², LI Jing^{3*}

(1. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Central Radio and Television Station No. 2, Beijing 100045, China; 3. Smart City College, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: Currently, the heterogeneous node deployment schemes employed in sensor network applications for monitoring tasks suffer from suboptimal operational efficiency. To address this issue, this paper proposes the Optimal Deployment of Heterogeneous Node Positions in a Single-Sink Network (ODHNSS) algorithm. By jointly considering key performance indicators such as network coverage, the ratio of communication distance to communication radius, and the proportion of sleeping nodes, the algorithm establishes principled criteria for selecting optimal heterogeneous node locations, thereby enabling energy-aware optimization of heterogeneous node deployment in wireless sensor networks. Simulation experiments were conducted using MATLAB to comparatively evaluate the performance of ODHNSS against two state-of-the-art algorithms, Three-Tier Extended Energy-Efficient Clustering Hierarchy (TEEECH) and Optimal Deployment of Heterogeneous Nodes (ODHN). Results demonstrate that, relative to both benchmarks, ODHNSS significantly improves data transmission efficiency while simultaneously reducing overall network energy consumption, thus providing robust techni-

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2025-06-12; 录用日期: 2026-07-01; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61802010); 北京联合大学青年名师培育项目

引用格式: 孙茜, 孟祥越, 李晶. 能量感知的传感器网络异构节点优化部署算法[J]. 计测技术, 2026, 46(4): 109-115.

Citation: Sun Qian, Meng Xiangyue, Li Jing. Energy-aware optimization algorithm for the deployment of heterogeneous nodes in sensor networks[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4): 109-115.



cal support for advancing wireless sensor monitoring network technologies.

Key words: energy perception; wireless sensor network; heterogeneous nodes; optimized deployment; data transmission; operational efficiency; network coverage; Internet of Things

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)作为物联网的重要组成部分,目前已广泛应用于环境监测、交通、农业、医疗等诸多领域^[1]。WSNs作为监测工作的主要手段之一,常被部署于恶劣环境中。能量是限制传感器节点存活时间的重要因素,一旦能量耗尽则节点死亡。如何降低网络能耗已成为当前WSNs研究的重点。节点的传输功率与通信节点之间的距离成比例衰减,研究人员在网络中引入可充电的异构节点,用于辅助簇头(Cluster Heads, CHs)到汇聚节点(Sink)的信息传递工作。异构节点在WSNs中的部署位置会对网络性能产生重大影响,不同部署策略和位置选择会影响网络的覆盖、通信和能效等。引入异构节点并将其部署于合适的位置可提高WSNs的灵活性,使其更好地适应各种应用场景和需求。

WSNs将物理相关信息与物联网驱动的计算系统相关联^[2]。传感器节点(Sensor Nodes, SNs)间的协同工作以及数据传输是WSNs最重要的任务之一^[3]。为了提高传感器网络的性能,WSNs中常常采用分布式节能聚类算法进行管理。分布式节能聚类算法是指将SNs划分成多个簇,并在每个簇中选出一个簇头节点,由簇头节点负责所有子节点的信息收集、处理和传输。这种机制有效减少了SNs的能耗,并提高了网络的可靠性和稳定性。

Han Bing等人^[4]提出了一种基于自适应层次聚类的能量采集无线传感器网络路由协议(Adaptive Hierarchical-Clustering-based Routing Protocol for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks, HCEH-UC),通过数据传输的分布式调整实现对目标区域的不间断覆盖。实验结果表明所提算法在网络寿命和能量剩余方面优于其他对比算法。异构无线传感器网络是一种由不同类型的SNs组成的网络,它能接收不同类型的数据包。Bhushan S等人^[5]提出了一种基于模糊属性的联合集成调度和树形成(Fuzzy Attribute-based Joint Integrated Scheduling

and Tree Formation, FAJIT)技术的算法,用于异构网络中使用模糊逻辑的树形成和父节点选择。FAJIT主要致力于解决异构网络中聚合不同类型数据包以提高能效的父节点选择问题。该算法在计算节点间连接边的权重后,还要在节点周围查找邻居节点并计算动态邻居节点个数,再进行归一化、分别计算隶属值等操作,计算量大且过程较为复杂。Bhat S J等人^[6]在包含异构节点的网络中提出了一个本地部署模型。定位算法使用了算术优化算法(Arithmetic Optimization Algorithm, AOA),并将该算法的结果进一步用于开发部署模型,以实现完全连接的网络。Bhat S J等人利用该算法对区域的覆盖空洞进行了仿真实验,有效降低了部署误差,但未深入探讨网络运行效果。Fedorenko V等人^[7]研究了在显示不同信号衰落的线性无线传感器网络(Linear Wireless Sensor Network, LWSN)段中的时间和能量损失模型,该模型由比特误差概率表达式中的Rician K因子表示。Fedorenko V等人基于时间损失对节点间距离的依赖性,提出了异构LWSN的部署算法,在选择用于部署异构LWSN的合理算法时,他们确定了节点的最佳数量,但并未考虑节点的休眠或唤醒能耗。Elfouly F H等人^[8]研究了异构节点在网络中的最佳部署计划,所使用的主要目标函数工作原理为:在网络寿命约束下最大化给定字段的覆盖范围。Elfouly等人所提出的算法考虑了环境条件和其他重要参数(如链路负载均衡、节点能量和可靠性),实验结果表明:该算法有效提高了网络覆盖率并降低了能耗。Sun Qian等人^[9]提出了一种异构节点优化部署(Optimal Deployment of Heterogeneous Nodes, ODHN)算法,以增强无线传感器网络的抗攻击性。该算法结合分布式节能聚类(Distributed Energy-Efficient Clustering, DEEC)设计聚类算法和甲虫天线搜索(Beetle Antennae Search, BAS)优化算法,找到异构节点的全局最优部署位置。通过异构节点建立与汇聚节点通信的快捷方式,设置异构节点的移动阈值,简化了部署难度,但在节点移动过

程中依然会消耗相应能量,不适用于大规模网络。

目前监测任务中应用的异构节点部署方案需人为设定异构节点数量和部署情况,导致网络运行效率较低。为达到提升网络运行效率、节省能耗的目的,提出单汇聚节点异构无线传感器网络异构节点部署(Optimal Deployment of Heterogeneous Node Positions in a Single Sink Network, ODHNSS)算法,在网络中引入可充电异构传感器节点,使其在数据传输阶段与汇聚节点直接通信,并根据网络覆盖率、通信距离与通信半径之比、休眠节点占比等参数构建综合评价指标,实现无线传感器网络异构节点高效部署。利用 MATLAB 软件开展仿真分析,对比 ODHNSS、三层扩展能效优化层次结构(Three-tier Extended Energy Efficient Clustering Hierarchy, TEECH)和异构节点优化部署(Optimal Deployment of Heterogeneous Nodes, ODHN)算法的使用效果。

1 算法模型

1.1 网络模型

在本文构建的网络中负责数据采集的普通 SNs 数量为 n 。SNs 将采集到的信息传递给所在簇的 CH, CHs 负责收集、打包成员节点采集的数据并以多跳形式转发给汇聚节点^[10]。网络模型具有如下特点:① 汇聚节点位于监测区域的中央并掌握所有 SNs 的位置信息;② 普通 SNs 在网络中的位置一旦部署则不再改变,且所有 SNs 已知汇聚节点位置;③ 所有普通 SNs 初始能量相同;④ SNs、CHs 和汇聚节点之间的通信遵循跳数的标准规则^[11]。

1.2 能量模型

由于 SNs 的能量有限,节点能量耗尽时则死亡,当全部节点的能量均耗尽时则网络死亡。本文采用两种不同的能量模型:自由空间模型和多径衰落信道模型^[12]。功率衰减是由发射机和接收机之间的距离 d 引起的。当该距离小于阈值 d_0 时,算法使用自由空间模型(d^2 功率损耗),否则采用多径衰落信道模型(d^4 功率损耗),阈值 d_0 的计算如式(1)所示。

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (1)$$

式中: E_{fs} 为自由空间参数, E_{mp} 为路径参数。

发送端向接收端传输 L 数据(L 的单位为 bit),发送端能量消耗 E_T 可按式(2)计算。

$$E_T(L, d) = \begin{cases} E_{elec} \cdot L + E_{fs} \cdot L \cdot d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} \cdot L + E_{mp} \cdot L \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{elec} 为发送或接收 L 数据的电子耗散能量。接收 L bit 数据所需的能量 E_R 由式(3)计算。

$$E_R = L \cdot E_{elec} \quad (3)$$

2 单汇聚节点网络异构节点部署方案

本文提出一种单汇聚节点异构无线传感器网络异构节点部署方案(Optimal Deployment of Heterogeneous Node Positions in a Single Sink Network, ODHNSS),以提升网络运行效率、降低网络能耗。当 WSNs 用于环境监测工作时,将 SNs 随机抛洒在监测区域中会出现节点冗余现象。若冗余节点处于工作状态,不仅会出现数据重复的问题,还会造成不必要的能量浪费。因此,本文采用一种基于分簇拓扑的节点休眠调度算法对 SNs 进行休眠节点的选取^[13],之后再行异构节点的部署工作。

2.1 基于分簇拓扑的节点休眠调度算法

基于分簇拓扑的节点休眠调度(Node Duty-cycling Scheduling based on Clustering Topology, NDSCT)算法通过簇的形成和簇内冗余节点调度来实现^[13]。对于冗余节点的判定条件为:若簇内节点的感知覆盖区域内的邻居节点数大于或等于 4 个,且满足如图 1 所示覆盖条件,即该节点的感知区域被邻居节点覆盖,则判定该节点为冗余节点,使其在当前轮中休眠;反之,则节点处于活跃状态继续工作。

2.2 ODHNSS 算法

分簇路由算法被认为是管理网络能源的有效方法之一。网络被划分为不同的节点组,称为簇,并为每个簇分配一个 CH 来控制节点的活动。本文采用模糊 C 均值聚类算法(Fuzzy C-Means Clustering Algorithm, FCM)对 SNs 进行聚类,并在聚类完成后选取各簇成员节点中能量最高的点作为簇头。基于聚类及节点休眠结果进行异构节点的部署工作,在单汇聚节点网络中部署异构节点时,需要考虑以下因素:

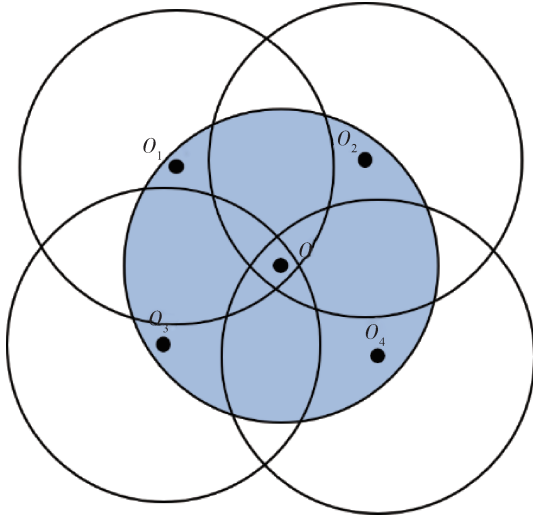


图1 冗余节点O的判定

Fig.1 Determination of redundant node O

1) 覆盖率 $P_{\text{cover}}(k)$

$P_{\text{cover}}(k)$ 为第 k 簇中的节点单独覆盖的面积与该簇整体覆盖面积之比。需要注意的是, 当节点处于休眠状态时无法进行数据采集和感知。因此, 对 $P_{\text{cover}}(k)$ 的计算应在休眠节点筛选之后进行, 具体计算公式为

$$P_{\text{cover}}(k) = \frac{M_{\text{cover}}(k)}{W_{\text{cover}}(k)} \quad (4)$$

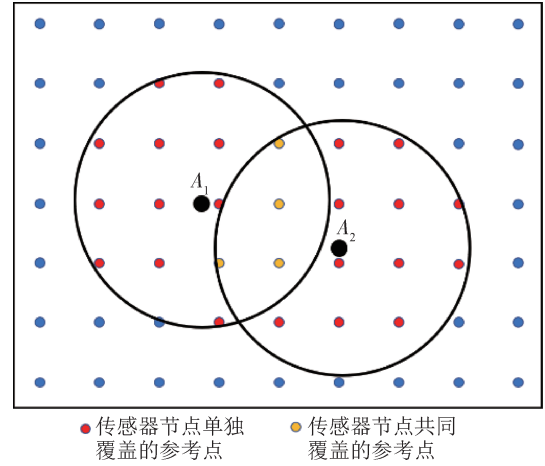
式中: $M_{\text{cover}}(k)$ 为第 k 簇中所有未休眠的成员节点独自覆盖的参考点数量之和, $W_{\text{cover}}(k)$ 为第 k 簇中所有未休眠的成员节点覆盖的参考点总数。这里的参考点指点计数法(Point Counting Method, PCM)中的参考点^[14]。对于PCM参考点的覆盖判定如式(5)和式(6)所示。

$$D(P, S) = \sqrt{(P_x - S_x)^2 + (P_y - S_y)^2} \quad (5)$$

$$C(P, S) = \begin{cases} 1, & D(P, S) \leq R_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 和 S 分别为区域内两点, P_x 、 P_y 和 S_x 、 S_y 分别为各点的坐标, R_s 为传感器节点的感知半径, $D(P, S)$ 为点 P 和点 S 间的欧几里得距离方程, $C(P, S)$ 为覆盖标志。若点 P 与点 S 的欧几里得距离小于或者等于 R_s , 则参考点 P 被 S 覆盖, 即 $C(P, S) = 1$; 其他情况则 $C(P, S) = 0$ 。

如图2所示, A_1 和 A_2 为同一簇内的2个传感器节点, PCM参考点为图中均匀分布的蓝色小圆点, 红色点为它们各自独自覆盖的参考点, 黄色点为

图2 P_{cover} 示意图Fig.2 Schematic diagram of P_{cover}

二者共同覆盖的参考点。由式(4)可计算出由 A_1 和 A_2 构成的这一簇的 P_{cover} 值为0.85。此外, 从图2中也可以看出: 一个传感器节点独自覆盖的参考点数量越多, 那么当这个节点死亡后网络丧失的可监控区域越大。

2) 通信距离与通信半径之比 $P_{\text{trans}}(k)$

$P_{\text{trans}}(k)$ 为CHs到汇聚节点的通信距离与其自身通信半径 R_c 的比值, $P_{\text{trans}}(k)$ 的计算方法如式(7)、式(8)所示, 其中, $d_{\text{CHtrans}}(k)$ 为第 k 个簇头在数据传递过程中的通信距离, h 为当前异构节点数量, $d_{\text{toHTG}}(k)$ 为第 k 个簇头到距其最近的异构节点的距离, $d_{\text{toSink}}(k)$ 为第 k 个簇头到汇聚节点的距离。

$$P_{\text{trans}}(k) = \frac{d_{\text{CHtrans}}(k)}{R_c} \quad (7)$$

$$d_{\text{CHtrans}}(k) = \begin{cases} d_{\text{toSink}}(k), & h = 0 \text{ or } d_{\text{toSink}}(k) < d_{\text{toHTG}}(k) \\ d_{\text{toHTG}}(k), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

本文中的异构节点为可充电传感器节点, 因此在计算通信距离时不考虑异构节点与汇聚节点之间的距离以及在这段距离消耗的能量。 $P_{\text{trans}}(k)$ 的值越大则表示第 k 个簇头距离汇聚节点越远, 在数据传输过程中消耗的能量也就越多。因此, 在部署异构节点时需要充分考虑距离因素。

3) 休眠节点占比 $P_{\text{sleep}}(k)$

$P_{\text{sleep}}(k)$ 为第 k 簇中休眠节点个数占该簇所有节点个数之比, 利用式(9)计算得到。

$$P_{\text{sleep}}(k) = \frac{N_{\text{num-sleep}}(k)}{N_{\text{num}}(k)} \quad (9)$$

式中: num为个数运算符号, $N_{\text{num-sleep}}(k)$ 为当前轮次内第 k 簇中休眠节点的个数, $N_{\text{num}}(k)$ 为第 k 簇中全部成员节点的个数。需要注意的是, 这里的 $N_{\text{num}}(k)$ 统计是在节点休眠前进行的, 并且当选为CH的点不能被选为休眠节点。休眠节点个数越多, 说明在这一簇中的冗余节点越多。当出现死亡节点时, 唤醒休眠节点以替代死亡的节点继续工作, 可以将每簇中的休眠节点理解为“这一簇的后备力量”。 $P_{\text{sleep}}(k)$ 的值越小, 该簇的后备节点越少, 节点死亡带来的影响也就越大。

将上述影响因素组合成综合评价指标 $G(k)$, 用于评价每一簇的重要性, 如式(10)所示。为避免出现分母为0的情况, 当 $P_{\text{sleep}}(k) = 0$ 时, $\alpha = 1$; 当 $P_{\text{sleep}}(k) \neq 0$ 时, $\alpha = 0$ 。 $G(k)$ 越大, 则第 k 簇的重要程度越高。

$$G(k) = \frac{P_{\text{cover}}(k) \cdot P_{\text{trans}}(k)}{P_{\text{sleep}}(k) + \alpha} \quad (10)$$

将计算得出的 $G(k)$ 按降序排列, 异构节点按顺序部署在得分最高的簇的聚类中心。为使异构节点的效用最大化, 在部署完一个异构点后要对各簇重新计算 $G(k)$, 再进行下一个异构点部署。算法1描述了ODHNSS部署异构节点的过程:

- 1) 输入: 聚类结果、簇头信息、休眠节点信息、异构节点个数 h
- 2) 输出: 异构节点位置
 - ① for $i=1: h$
 - ② for $j=1: k$
 - ③ 分别计算每一簇的 $P_{\text{cover}}(k)$ 、 $P_{\text{trans}}(k)$ 、 $P_{\text{sleep}}(k)$
 - ④ 计算 $G(k)$
 - ⑤ 将 $G(k)$ 按降序排列, 把异构节点部署在 $G(k)$ 值最大的簇的聚类中心
 - ⑥ end
 - ⑦ end

3 仿真分析

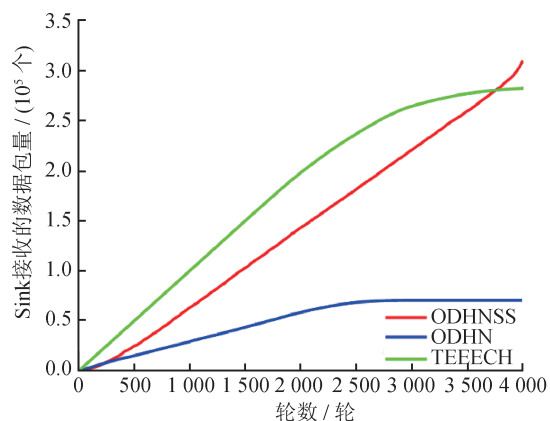
利用MATLAB软件开展仿真, 对比ODHNSS、TEEECH^[15]、ODHN算法^[9]的应用效果, 以观察本文所提算法对网络各项性能的影响。TEEECH算法采用模糊聚类原理, 并利用基于阈值的高级低能量自适应聚类分层协议方法设计CHs选择^[15]。TEEECH网络中的SNs按规则分布在监测区域内, 研究人员预先设定了异构节点的配比, 其中, 普通节点占SNs总数的50%, 高级节点占SNs总数的30%, 超级节点占SNs总数的20%。传感器普通节点、高级节点、超级节点分别有0.5、1.25、2 J的启动能量。由于节点电池不可充电, 当节点能量为0 J时, 传感器节点成为死节点。该算法借助二维椭圆高斯分布方法对SNs进行部署。ODHN算法采用DEEC聚类算法和BAS优化算法寻找异构节点的全局最优部署位置。仿真参数如表1所示。

在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 和 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 两种网络规模下对三种算法进行仿真实验, 得到与轮次相关的汇聚节点接收数据包数量, 如图3所示。根据图3(a)可以看出: 在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的网络规模下, 达到最大迭代次数时, ODHNS传输的数据包数量大于TEEECH算法和ODHN算法。其中, ODHNS相较TEEECH的数据包传输量高了9.8%以上。图3(b)显示: 当网络规模增大到 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 时, ODHNS传输的数据包总量为 2.58×10^5 , TEECH算法传输数据包总量为 1.62×10^5 , ODHN算法传输数据包总量为 1.48×10^5 。通过计算可知ODHNSS传输的数据包总量比TEEECH算法高60%, 比ODHN算法高74%。这表明在相同条件下, 本文所提算法能够更高效地进行数据传输, 并且当网络规模增大时, 本文所提算法依然表现较优。

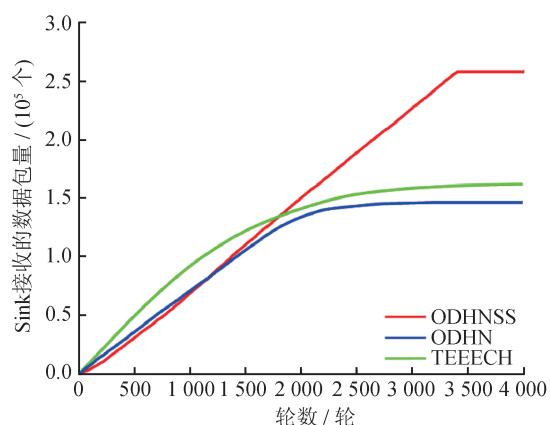
表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

算法名称	节点数量	初始能量	汇聚节点坐标
ODHNSS	普通节点100个, 异构节点2个	普通节点0.5 J, 异构节点可充电	(100, 100)
TEEECH	普通节点50个, 高级节点30个, 超级节点20个	普通节点0.5 J, 高级节点1 J, 超级节点2 J	(100, 100)
ODHN	普通节点100个, 异构节点2个	普通节点0.5 J, 异构节点可充电	(100, 100)



(a) $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网络规模下的仿真结果
(a) Simulation results for a $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ network scale



(b) $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 网络规模下的仿真结果
(b) Simulation results for a $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ network scale

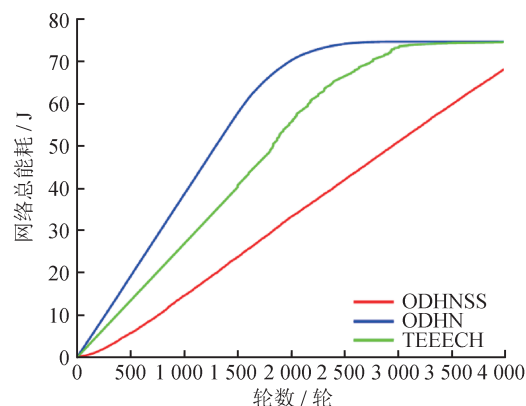
图3 与轮次相关的汇聚节点接收数据包量

Fig.3 Number of packets received by Sink related to the cycle

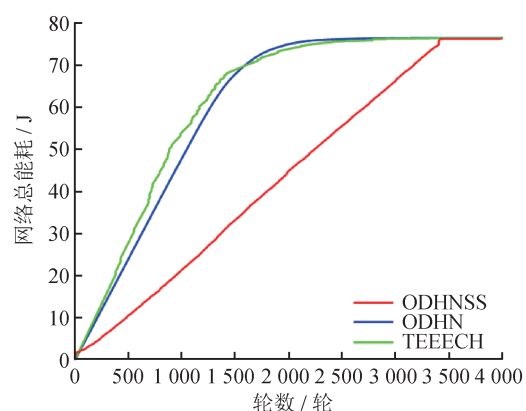
图4展示了3种算法在不同网络规模下总能耗随时间的变化。由图4(a)可计算出当达到最大迭代次数时, ODHNS算法相较另外2种算法节省了约8.4%的能量。图4(b)中, TEECH和ODHN算法在同轮次下的能耗均高于ODHNS算法。综上所述, 本文所提算法在节省网络总能耗的同时, 使网络工作效率更高。

4 总结

为提升无线传感器网络的运行效率, 本文提出基于能量感知的传感器网络异构节点优化部署算法, 在引入异构节点并选择合适休眠节点的基础上, 制定异构节点的位置部署判定依据, 实现部署方案优化。MATLAB仿真分析结果表明: 相较传统TEECH和ODHN算法, ODHNS算法能够显著提升数据传输效率并降低网络运行能耗, 为



(a) $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网络规模下的总能耗
(a) Total energy consumption under a $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ network scale



(b) $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 网络规模下的总能耗
(b) Total energy consumption under a $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ network scale

图4 与轮次相关的网络总能耗

Fig.4 Total power consumption of the network related to the cycle

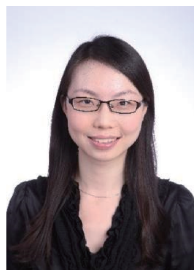
提升无线传感器监测网络性能提供了重要技术借鉴。可充电异构节点的成本高于普通传感器节点, 未来将进一步深入探索异构网络, 研究选择合适数量的异构节点, 在提升网络运行效果的同时节约经济成本。

参考文献

- [1] 刘雪蓉, 曹贺, 张宝珍. 飞机结构健康监测技术发展研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 13-24.
Liu Xuerong, Cao He, Zhang Baozhen. Research on the development of aircraft structural health monitoring technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 13-24.
- [2] Behera T M, Mohapatra S K, Samal U C, et al. I-SEP: an improved routing protocol for heterogeneous WSN for IoT-based environmental monitoring[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(1): 710-717.
- [3] Agbulu G P, Kumar G J R, Gunasekar S. IESDCC-KM:

- an improved energy-saving distributed cluster-chain K-communication scheme for smart sensor networks[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2024, 15(9): 4443-4455.
- [4] Han Bing, Ran Feng, Li Jiao, et al. A novel adaptive cluster based routing protocol for energy-harvesting wireless sensor networks[J]. Sensors, 2022, 22(4): 1564.
- [5] Bhushan S, Kumar M, Kumar P, et al. FAJIT: a fuzzy-based data aggregation technique for energy efficiency in wireless sensor network[J]. Complex & Intelligent Systems, 2021, 7: 997-1007.
- [6] Bhat S J, Santhosh K V. A localization and deployment model for wireless sensor networks using arithmetic optimization algorithm[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2022, 15(3): 1473-1485.
- [7] Fedorenko V, Oleinikov D, Samoylenko I, et al. Criteria for the deployment of a heterogeneous linear WSN: operability vs energy efficiency[J]. Ad Hoc Networks, 2023, 147: 103202.
- [8] Elfouly F H, Ramadan R A, Khedr A Y, et al. Efficient node deployment of large-scale heterogeneous wireless sensor networks[J]. Applied Sciences - Basel, 2021, 11(22): 10924.
- [9] Sun Qian, Yang Fengbo, Wang Xiaoyi, et al. Optimal deployment of heterogeneous nodes to enhance network invulnerability[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 73(2): 3081-3097.
- [10] 许匡. 基于 ZigBee 无线传感器网络的功率测量系统[J]. 计测技术, 2010, 30(4): 39-42.
Xu Kuang. Power measurement system based on ZigBee wireless sensor network[J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(4): 39-42.
- [11] Lata S, Mehruz S, Urooj S, et al. Fuzzy clustering algorithm for enhancing reliability and network lifetime of wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 66013-66024.
- [12] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [13] 张雷. 基于分簇拓扑的无线传感器网络节点休眠调度算法研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2019.
- Zhang Lei. Research on sleep scheduling algorithm for wireless sensor network nodes based on clustering topology[D]. Nanchong: China West Normal University, 2019.
- [14] Birtane S, Sahingoz O K, Korkmaz H. Vibrational genetic algorithm-based deployment of wireless sensor networks with heterogeneous nodes in irregularly shaped areas[J]. IEEE Access, 2024, 12: 62926-62941.
- [15] Kumar N, Rani P, Kumar V, et al. TEECH: three-tier extended energy efficient clustering hierarchy protocol for heterogeneous wireless sensor network[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 216: 119448.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 孙茜(1985—), 女, 副教授, 主要研究方向为复杂网络抗毁性。2007年获哈尔滨工业大学工学学士学位, 2014年获北京航空航天大学工学博士学位。近年来主持、参与国家自然科学基金、北京市自然科学基金、国家重点研发计划等多个项目, 发表论文五十余篇, 申请国家发明专利三十余项。



第二作者: 孟祥越(1999—), 女, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络。硕士研究生期间主要从事异构无线传感器网络、多汇聚节点配置方法研究。



通信作者: 李晶(1980—), 男, 副教授, 主要研究方向为先进传感技术。2013年获北京航空航天大学工学博士学位。近年来发表论文三十余篇, 申请国家发明专利十余项。