

一种无线传感网络拓扑及路由协议方法研究

陈琳[†]

(恩施职业技术学院信息工程学院,湖北 恩施 445000)

摘 要:针对无线传感器网络(WSN)的数据传输效率和降低能耗存在的现实问题,提出了一种基于层次分析法(AHP)的多跳传输路由协议模型(MHTRP-AHP)。首先建立了 WSN 拓扑优化模型,综合考虑了节点状态可感知特性、同构与异构特性等因素。在此基础上,利用 AHP 方法从网络节点中选出簇头(CH)节点,负责数据的收集和转发。通过与 SERP、GB-EAMRP 以及 RACO-SL 等主流路由协议的对比实验,结果表明 MHTRP-AHP 在活跃节点数、死亡节点数和网络能效方面均表现更优。该研究不仅为 WSN 路由设计提供了新思路,也为提升网络稳定性和持久性提供了有力支持。

关键词:无线传感器网络;网络拓扑;路由协议;层次分析法;能耗优化

中图分类号:TP393

文献标识码:A

Research on a Wireless Sensor Network Topology and Routing Protocol Method

CHEN Lin[†]

(School of Information Engineering, Enshi Vocational and Technical College, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: This paper proposes a multi hop transmission routing protocol model (MHTRP-AHP) based on analytic hierarchy process (AHP) to address the practical issues of data transmission efficiency and energy consumption reduction in wireless sensor networks (WSN). Firstly, a WSN topology optimization model was established, taking into account factors such as node state perceptibility, isomorphism, and heterogeneity. On this basis, the AHP method is used to select cluster head (CH) nodes from network nodes, responsible for data collection and forwarding. Through comparative experiments with mainstream routing protocols such as SERP, GB-EAMRP, and RACO-SL, the results show that MHTRP-AHP performs better in terms of active node count, dead node count, and network energy efficiency. This study not only provides new ideas for designing WSN routing protocols, but also provides strong support for improving network stability and persistence.

Key words: wireless sensor network; network topology; routing protocol; analytic hierarchy process; energy consumption optimization

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由众多微型传感器构成,这些传感器负责监测物理系统的多项参数,诸如温度、湿度、振动、噪声及物体存在状态^[1-3]。WSN 基本组成部分涵盖

传感单元、处理单元、传输单元及供电单元,核心功能在于数据采集、处理及少量传感器节点间的双向通信^[4,5]。由于 WSN 密集部署,能源供应受限且难以再生,这要求网络必须优化能源使用,以延长

使用寿命。鉴于 WSN 的特殊性,传统系统中的诸多定义和概念不再适用,故需开发新方法策略,以优化能源利用,确保网络按需高效地向用户提供数据。

针对 WSN 中传感器节点在数据传输过程中面临的能量受限、负载均衡性差等问题,众多学者展开了深入研究。文献[6]提出了一种基于改进蚁群算法信息素因子的 WSN 路由选择方法。该方法有效提高了 WSN 的吞吐量和稳定性,但尚未充分考虑数据传输的轮数,导致效率与生命周期在某些场景下仍有提升空间。文献[7]则针对水下通信环境,设计了基于能量和深度的稳定选举路由协议(Stable Election Routing Protocol, SERP)。文献[8]提出了一种基于网关的能量感知多跳路由协议(Gateway-Based Energy-Aware Multi-hop Routing Protocol, GB-EAMRP),采用秘密共享方案提高了能量利用率和多跳数据安全性。该协议在保障数据传输安全的同时,也面临如何在资源受限环境下高效实施的问题。文献[9]通过引入奖惩因子和精英个体交叉变异操作,改进了蚁群优化算法,提出了基于扇形链路策略的改进蚁群分簇路由协议(Improved Ant Colony Clustering Routing Protocol Based on Fan Shaped Link Strategy, RACOSL)。尽管现有研究在稳定性、可扩展性、可靠性等方面取得了进展,但仍存在诸多挑战,如能量受限、负载均衡性差等问题。特别是在异构网络环境下,如何平衡各节点的能耗、提高网络的稳定性和寿命,仍是一个亟待解决的问题。

针对 WSN 中的路由选择问题,提出了一种基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)的多跳传输路由协议模型(Multi Hop Transmission Routing Protocol Model Based on Analytic Hierarchy Process, MHTRP-AHP)。该模型通过综合考虑节点的能量状态和与汇聚节点的相对距离,动态选择簇头节点,以实现能量消耗和数据传输效率之间的平衡。

1 WSN 拓扑模型建立

在 WSN 的拓扑结构中涵盖三种核心节点类型:普通节点、簇头(Cluster Head, CH)节点以及汇聚节点。

1.1 模型假设

本研究所涉及的 WSN 模型在设计与运行中需综合考虑节点的状态可感知特性、同构与异构特

性、基站的外部数据获取需求、节点的无人值守与能量限制、外部资源的依赖性以及无线连接的对称性,以确保网络的高效、稳定与持久运行。

1.2 拓扑优化模型

在评估 WSN 能耗的过程中,全面考量拓扑关系下能量的传输与获取环节是至关重要的。具体而言,令 WSN 中网络拓扑记为 $G(N, E)$, 其中 N 为节点总数, E 为将数据包从节点 i 传输到 j 所消耗的总能量,且 $i, j \in N$ 。令能量传输消耗函数为 E_{send} , 则有:

$$E_{\text{send}}(n, s) = \begin{cases} E_{\text{embb}}(n) + E_{\text{amp}}(n, s^2) & s \leq s_{\xi} \\ E_{\text{embb}}(n) + E_{\text{amp}}(n, s^4) & s > s_{\xi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{send}}(n, s)$ 为在距离 s 内发送 n 位数据所消耗的能量; $E_{\text{embb}}(n)$ 为传感器处理 n 位数据的固有能耗; $E_{\text{amp}}(n, s^2)$ 为当距离 s 位于感知阈值 s_{ξ} 内时的传输能耗衰减函数,其与发送数据位数 n 及距离的平方相关,表明能耗快速损失; $E_{\text{amp}}(n, s^4)$ 为当距离 s 超过感知阈值 s_{ξ} 时,能耗剧烈损失。

相应地,定义能量接收消耗函数 E_{acq} , 则有:

$$E_{\text{acq}}(s) = E_{\text{embb}}(n) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{acq}}(s)$ 函数为在特定范围 s 内获取数据所需的能量成本。

值得注意的是,能量传输消耗 $E_{\text{send}}(n, s)$ 不仅依赖于传输的数据量 n 以及数据处理的消耗,还随传输距离 s 的变化而变化,这体现了无线通信中能量消耗与距离之间的复杂关系。而能量接收消耗 $E_{\text{acq}}(n, s)$ 则主要聚焦于数据处理过程中的能耗,可能涉及传感器激活、数据采样及初步处理等步骤,其成本往往与获取的数据量 n 直接相关。

在睡眠状态下,令 WSN 消耗的能量为 E_{slp} , 则 WSN 的总能耗如下所示:

$$E = E_{\text{send}}(n, s) + E_{\text{acq}}(s) + E_{\text{slp}}(t) \quad (3)$$

式中: E 为 WSN 的总能耗; $E_{\text{slp}}(t)$ 为 WSN 睡眠模式 t 时的能量消耗。

2 基于 AHP 的多跳传输路由协议模型

2.1 基于 APH 的 CH 确定

AHP 是一种专为多准则决策情境设计的系统性方法。该方法首先明确关键的决策标准,并依据这些标准对备选方案进行评估与比较分析。AHP 的核心目的是通过运用预先界定的标准及其相应的重要性权重,以分析的方式选出最优方案。在具体操作中, AHP 采用了分层结构,随后构建出对偶

比较矩阵。接着,运用向量法计算各标准的相对重要性,并借助一致性比率来检验对偶比较矩阵的一致性。当一致性比率达到可接受水平时,将对备选方案进行优先级排序,最终选出得分最高的方案作为最优选择。

在确定阈值过程中,CH 在预设的迭代周期内持续承担其角色。本研究对两种潜在选择进行了对比分析:即担任 CH (T_{CH}) 与不担任 CH (F_{CH})。评估的基准依据为节点与汇聚节点的邻接距离矩阵 U 、邻接能量矩阵 E 以及优势矩阵 C 。为了有效选取簇头节点,系统需掌握邻近节点的能量级别以及它们相对于汇聚节点(Sink)的距离信息。在此过程中,节点应在预设的时间周期内交换其能量状态数据。具体而言,距离信息仅需由 Sink 节点一次性广播至全网,以确保所有节点均能获得这一关键参数。然而,值得注意的是,节点间频繁共享能量信息虽有助于实现精确的簇头选择,但同时也不可避免地增加了整个网络的能源消耗。

假设有 N^2 种状态代表可能的能量和距离状态(N 为节点的总数)。对于所考虑的所有情况,用 AHP 得到的阈值存储在阈值矩阵 D 中:

$$D = \begin{bmatrix} D(E_1, u_1) & D(E_1, u_2) & \cdots & D(E_1, u_n) \\ D(E_2, u_1) & D(E_2, u_2) & \cdots & D(E_2, u_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D(E_n, u_1) & D(E_n, u_2) & \cdots & D(E_n, u_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $D(E, u)$ 为与能量、距离相关的阈值; $E \in E$ 为能量; $u \in U$ 为距离。

在以下两种情况下, $D(E, u)$ 作为 CH 的阈值:

条件 1:与相邻节点相比,该节点的能量范围为 $[(E-1)/N, E/N]$;

条件 2:节点与基站的距离范围为 $[(u-1)/N, u/N]$ 。

在所提方法中,成为 CH 的节点将在特定的周期中保留该角色。同时,在完成指定数量的迭代后,该进程开始选择一个新的 CH。令 CH 选择周期的值记为 p_g 。对于每个 p_g , 阈值矩阵 D 中的 $D(E, u)$ 可根据 $C(q)$ 计算,其中 $C(q) \in C$ 为第 q 个与能量和距离相关的关系对值。令 p_g 和 $C(q)$ 计算的评估矩阵记为 $D_{g,p}$,该过程涉及随机生成 N^2 个不同的网络拓扑,从而确保每个拓扑具有 $D_{g,p}(E, u) \in D_{g,p}$ 所需的属性。

在迭代生成网络拓扑过程中,令评估矩阵 $D_{g,p}$ 的总阶数为 H 。换言之,存在 $N^2 \times H$ 个不同的网

络拓扑需进行 $D_{g,p}(E, u)$ 评估。在所提模型中,选择 CH 是基于网络的剩余能量和属于同一区域的所有节点的平均值来确定。令 x_i 为每节点被选为 CH 的平均概率。在每次 $R_i = 1/x_i$ 迭代中,节点 n_i 只能有一次成为 CH。假设在第一次迭代 R_1 中选择 n_i 作为 CH,那么在后续迭代中,其将不再被选为簇头。需注意,阈值将根据剩余能量和区域的平均能量波动。当网络均匀且每个传感器节点共享相同的起始能量水平时,必须选择最优比例的节点作为 CH。然而,在异构环境中,每个传感器拥有不同的起始能量。此外,采用负载均衡策略使得能量较大的网关节点有更多的迭代来聚合,以防止正常节点的过早死亡。

根据上述分析,每次迭代中所有节点作为 CH 的概率计算如下所示:

$$T(k, m, q) = \mu_e W + \mu_u (1 - W) \quad (5)$$

式中: T 为所有节点作为 CH 的概率; k 为能量矩阵 E 中元素的索引; m 为距离矩阵 U 中元素的索引; q 为优势矩阵 C 中元素的索引; μ_e, μ_u 和 W 为决策系数,分别计算如下:

$$\begin{cases} \mu_e = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + E^{-1}(k)} + \frac{E(k)}{1 + E(k)} \right] \\ \mu_u = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + U^{-1}(m)} + \frac{U(m)}{1 + U(m)} \right] \\ W = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + C^{-1}(q)} + \frac{C(q)}{1 + C(q)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

当获得所有可能的阈值后,在 CH 选择周期内逐一尝试阈值,其中节点按照期望的能量和距离特征随机分布。此时,任意节点 n_i 基于概率 $T(k, m, q)$ 来决定是否成为 CH:

$$n_i = \begin{cases} T_{CH}(n_i) & \delta \leq T(k, m, q) \\ F_{CH}(n_i) & \delta > T(k, m, q) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{CH}(n_i)$ 表征节点 n_i 成为 CH; $F_{CH}(n_i)$ 表征节点 n_i 不为 CH; δ 为预先设定的阈值,且有 $\delta \in (0, 1)$ 。

接下来,决定不成为 CH 的节点将被分配到与 CH 最近的集群中。集群创建后,正常节点将其数据包发送给其 CH,而 CH 在选择周期 p_g 内将其数据包及其成员的数据包发送给汇聚节点。当完成 p_g 轮迭代后,重新选择 CH 并再次执行上述过程。

2.2 执行过程

MHTRP-AHP 执行流程图如图 1 所示。在 CH 选择周期 p_g 后,节点需要获取其相邻节点到汇聚节点的能量和距离信息,根据邻居的能量和距离信息,节点可以确定 $D_{g,p}(E, u) \in D_{g,p}$ 的 E 和 u

索引号,并假设 g 和 p 的值在网络安装前已经确定。在 CH 选择阶段,如果节点的 $D_{g,p}(E,u) \in D_{g,p}$ 不超过设定阈值 δ ,则节点声明自己为 CH。CH 选择阶段在每轮 p_g 之后开始。节点在 CH 选

择阶段从汇聚节点广播其能量和距离。在 CH 选择阶段结束后,正常节点将其数据传输到离其最近的 CH。CH 将所有数据传输到汇聚节点。在 p_g 迭代中,正常节点和 CH 始终保持正常通信。

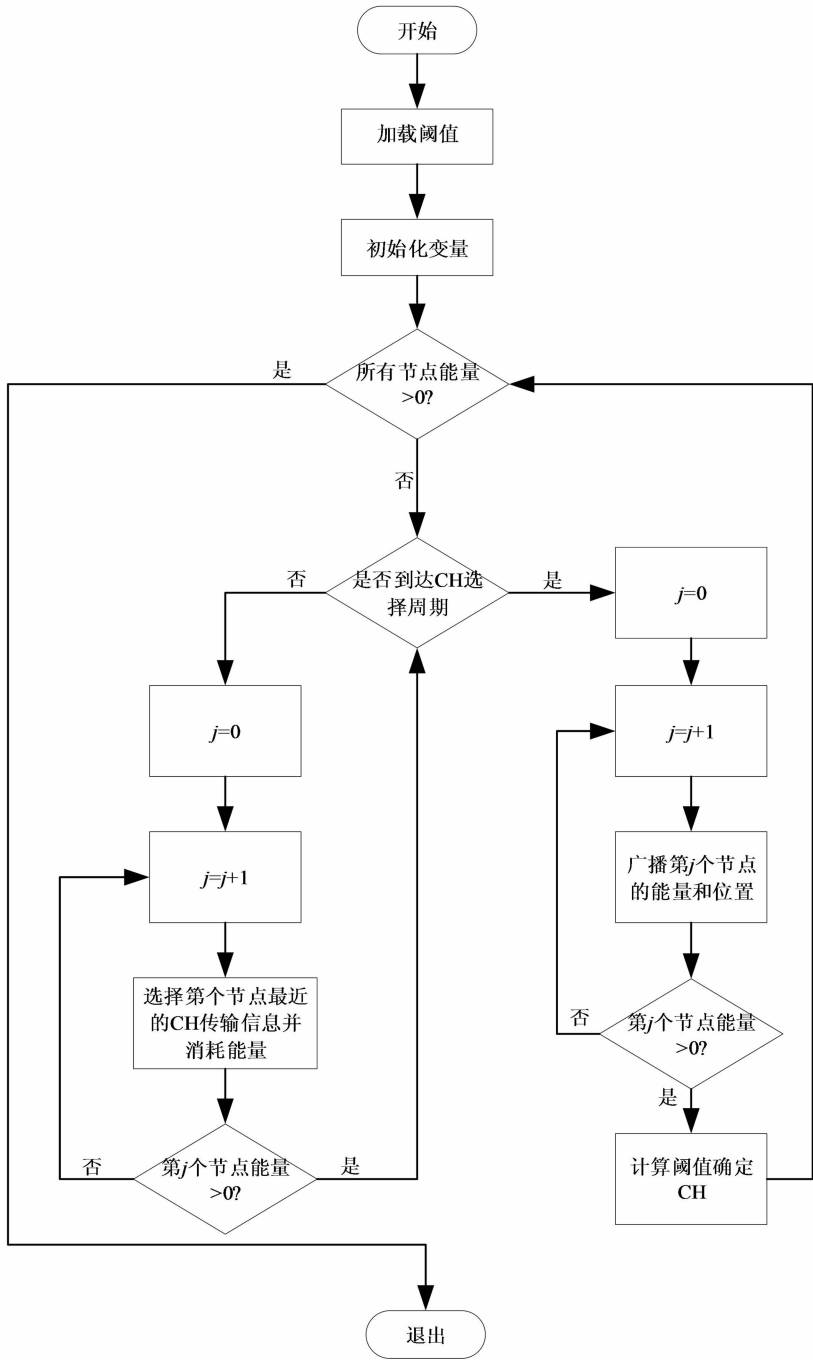


图 1 MHTRP-AHP 执行流程图

3 实验与分析

3.1 实验环境与设置

实验软件环境为 MATLAB R2019 a; 硬件环

境配置为一台浪潮高性能服务器。该服务器搭载了 Intel Xeon Gold 6248 CPU,具备 20 个物理核心,支持超线程技术,因此可提供高达 40 个逻辑处理单元。内存方面,服务器配置了 256 GB 的 DDR4 ECC RAM,确保了大数据处理和复杂计算

任务的高效运行。存储系统则采用了 1 TB 的 NVMe SSD 作为系统盘,用于快速启动操作系统和加载应用程序,同时配备了 4 TB 的 SAS 企业级硬盘作为数据存储盘,确保了海量数据的可靠存储与高速访问。

实验时将所提 MHTRP-AHP 与几种主流路由协议进行了对比,具体包括稳定选举路由协议 (Stable Election Routing Protocol, SERP)、基于网关的能量感知多跳路由协议 (Gateway-Based Energy-Aware Multi-hop Routing Protocol, GB-EAMRP) 以及基于扇形链路策略的改进蚁群分簇路由协议 (Improved Ant Colony Clustering Routing Protocol Based on Fan Shaped Link Strategy, RACO-SL)。在稳定选举路由协议中,尽管协议方案的主要差异仅在于头部设计,但基站(汇聚节点)最初被置于网络中心,靠近各个节点。由于基站的位置及其与节点的距离,其能耗最高,从而导致能量迅速耗尽。为了提升网关节点多跳路由系统的性能,研究利用了部署于所有区域的初始同质节点。

在仿真过程中,传感器节点根据预设阈值被划分为四个区域,而基站和网关节点则位于检测区域之外且处于网络中心。就网络场景而言,仿真相关参数设置如下:WSN 范围为 200 m×200 m;网络节点数据设置为 200;传输信息的大小设置为 5000 bits;常规节点初始能量设置为 1 J;仿真最大迭代次数设置为 5000 代;通信时间(含随机延迟)设置为 20 s 至 200 s 之间的随机数。

此外,实验时选取活跃节点、死亡节点、网络能效等为指标。

3.2 结果与分析

3.2.1 活跃节点数对比

图 2 所示为不同路由协议下活跃节点对比结果。从中可以观察到各协议在迭代过程中的性能差异。具体而言,相较于其他路由协议,MHTRP-AHP 在每次迭代中的活动节点数量呈现出一种平稳且逐步减少的趋势。在经过 3000 次迭代后,MHTRP-AHP 的性能优势尤为明显。与 SERP 的 10%存活节点比例、GB-EAMRP 的 0.5%存活节点比例以及 RACO-SL 的 60%存活节点比例相比,MHTRP-AHP 成功维持了 70%的存活节点比例。这一数据对比清晰地揭示出 MHTRP-AHP 在保持节点存活时间方面具有更为出色的表现。

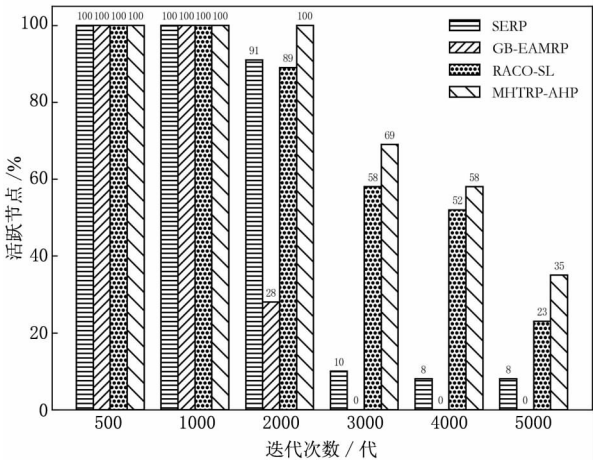


图 2 不同路由协议下活跃节点对比结果

3.2.2 死亡节点对比

图 3 所示为死亡节点对比结果,进一步揭示了不同路由协议在节点存活率方面的性能差异。在迭代的过程中,MHTRP-AHP 路由协议展现出了较优的稳定性,其死亡节点总数与 SERP、GB-EAMRP 和 RACO-SL 等现有方法形成了鲜明对比。尤其是在 2000 次迭代时,SERP、GB-EAMRP 和 RACO-SL 等方法死亡节点均超过 70%,而所提 MHTRP-AHP 仅 15%死亡节点。随着迭代次数增加,这种优势不断扩大。

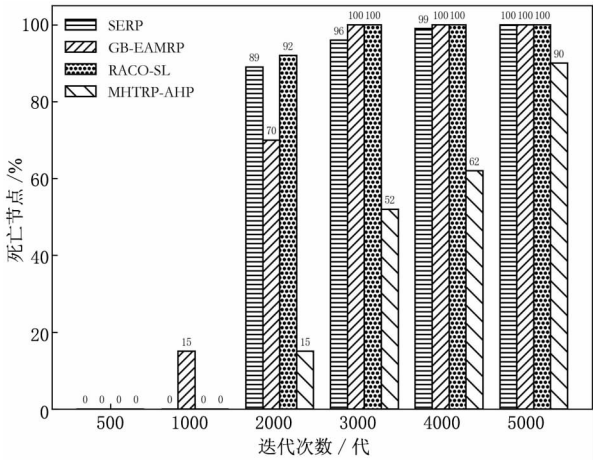


图 3 死亡节点对比结果

3.2.3 网络能效对比结果

网络能效对比结果如图 4 所示,该结果清晰地展示了不同协议在迭代周期内容网络能量消耗方面的表现。具体而言,与 SERP、GB-EAMRP 以及 RACO-SL 等协议相比,MHTRP-AHP 协议在降低能量消耗方面展现出了显著优势。

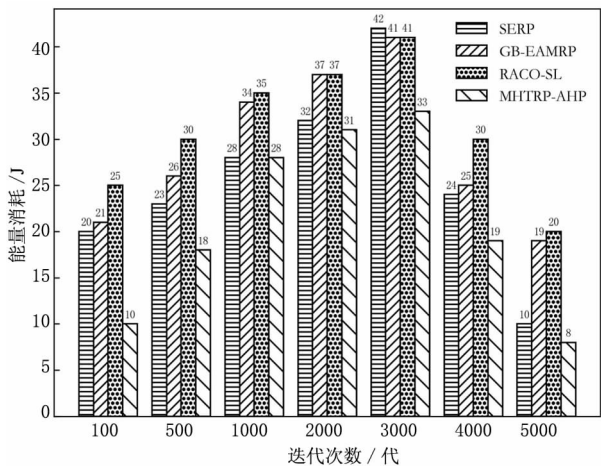


图 4 网络能效的对比结果

可以看出,MHTRP-AHP 实现了最低的能量消耗水平。尤其是 3000 次迭代时,与 SERP、GB-EAMRP 以及 RACO-SL 等方法相比,MHTRP-AHP 能量消耗均降低 8%左右。

综上所述,MHTRP-AHP 协议通过优化节点部署策略、采用多跳通信策略以及发挥网关节点的高效聚合和转发能力,成功实现了网络能量消耗的最小化。这些优势使得 MHTRP-AHP 协议在无线网络能效优化方面具有较高的应用价值。

4 结 论

在 WSN 的研究领域,网络的拓扑结构和路由协议对于实现高效的数据传输和降低能耗具有决定性作用。为此,提出了一种 MHTRP-AHP 以优化 WSN 中的数据传输效率和能耗。研究首先构建了 WSN 的拓扑优化模型,考虑了节点的状态可感知特性、同构与异构特性等多个影响因素。接着,利用 AHP 方法确定 CH 节点,实现了从普通节点到汇聚节点的数据收集和转发。MHTRP-AHP 的主要创新在于综合考虑了节点的能量状态和与汇聚节点的相对距离,通过 AHP 方法动态选择簇头节点,以实现能量消耗和数据传输效率之间的平衡。

参考文献

[1] PUSHPALATHA A, PRADEEP S,PULLARAO V M, et al. Optimized memory augmented graph neural network-based DoS attacks detection in wireless sensor network[J]. Network,2024,1-27.

[2] ABINAYAA S S, ARUMUGAM P, MOHAN D B, et al. Securing the edge: CatBoost classifier optimized by the lyrebird algorithm to detect denial of service attacks in Internet of Things-based wireless sensor networks[J]. Future Internet,2024,16(10):381.

[3] MURTHY B Y M ,KOTESWARARAO A. Applications, merits and demerits of WSN with IoT: a detailed review[J]. International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems,2024,17(1):68-88.

[4] SHENE S J,EMMANUEL W R S,STEPHEN K V K. Review on energy conservation and congestion mechanism in mobile WSN: taxonomy, software programs, challenges, and future trends[J]. Wireless Networks, 2023, 29 (6): 2649-2669.

[5] 陈昆仪,高宏. 无线传感器网络中数据收集算法研究综述[J]. 智能计算机与应用,2023,13(1):1-4+11.

[6] 金一琳,迟阔. 基于改进蚁群算法信息素因子的 WSN 路由选择研究[J]. 办公自动化,2024,29(19):63-66.

[7] ALI E S,SAEED R A,ELTAHIR I K. Depth based stable election routing protocol for heterogeneous internet of underwater things (IoUT) energy efficiency[J]. Computers and Electrical Engineering,2024,119:109507.

[8] 殷彤丽. 一种新的物联网能量感知多跳路由协议[J]. 微型电脑应用,2021,37(5):16-18+26.

[9] 王丽芳,杨康杰,郭晓东,等. 基于扇形链路策略的改进蚁群分簇路由协议[J]. 计算机工程与设计,2024,45(9):2620-2626.