Cross Layer Optimization Method for Wireless Sensor Network Data Transmission Considering Link Capacity and Power*

QU Junling[1*], FU Jianmei[2,3]

(1.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi Railway Vocational and Technical College, Taiyuan Shanxi 030013, China;
2.School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;
3.Department of Electronics, Xinzhou Normal University, Xinzhou Shanxi 034000, China)

Abstract: Due to the random distribution of source energy amplitude in the transmission matrix of cluster head nodes, collision congestion and redundancy issues may occur during concurrent transmission of multiple nodes, resulting in low packet loss rates. To address this issue, a cross layer optimization method for wireless sensor network data transmission considering link capacity and power is proposed. By designing a cross layer transmission scheme with automatic sleep of physical layer nodes, collision free protocols for media access control layer, and optimized forwarding nodes for routing layer, the problem of cross layer collision congestion is solved. Topology scanning mechanism and orthogonal rotation obfuscation technique are used to process the code source matrix and solve the redundancy problem. A bilinear mapping model is built to optimize the energy distribution of transmission sources and achieve cross layer transmission collision congestion optimization. The simulation analysis results show that the proposed method has a power overhead of less than 0.03 MW and a data packet loss rate of less than 2% after application, effectively reducing network overhead and packet loss rate, ensuring stable and secure data transmission.

Key words: wireless sensor network; data transmission optimization; topology scanning mechanism; bilinear mapping model; link power
EEACC: 6150P; 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.021

考虑链路容量和功率的无线传感器网络数据传输跨层优化方法*

屈俊玲[1*], 付建梅[2,3]

(1.山西铁道职业技术学院机电工程系, 山西 太原 030013; 2.太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024;
3.忻州师范学院电子系, 山西 忻州 034000)

摘 要: 由于簇头节点传输矩阵的信源能量幅度分布随机, 使得多节点并发传输时会出现碰撞拥塞和冗余问题, 导致丢包率低下, 对此, 提出考虑链路容量和功率的无线传感器网络数据传输跨层优化方法。通过设计物理层节点自动休眠、媒体访问控制层无碰撞协议和路由层转发节点优选的跨层传输方案, 解决跨层碰撞拥塞问题。采用拓扑扫描机制和正交旋转混淆技术处理码源矩阵, 解决冗余问题。构建双线性映射模型, 优化传输信源能量分布, 实现跨层传输碰撞拥塞优化。仿真分析结果表明, 所提方法应用后, 功率开销低于 0.03 MW, 数据分组丢包率低于 2%, 有效减少网络开销和丢包率, 保证数据传输稳定与安全。

关键词: 无线传感网络; 数据传输优化; 拓扑扫描机制; 双线性映射模型; 链路功率;
中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2082-06

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)作为物联网核心组成部分, 在环境监测、工业控制等众多领域展现出巨大应用潜力[1]。WSN 数据传输的跨层优化成为学术界和工业界共同关注的焦点。跨层优化作为一种先进的网络设计思想, 一般采用分簇式组网或链式组网的自组网跨层结构, 旨在打破传统网络协议栈中各层独立设计的局限, 综合考虑不同网络层之间的相互作用和依赖关系, 实现网络资源的全局优化和高效利用[2]。然而跨层结构密集复杂, 多节点并发容易在传输信道中出现碰撞, 造成数据拥塞和丢包, 因此 WSN 数据传输跨层优化不仅需要提升数据传输的效率, 还能增强网络可靠性, 避免拥塞和丢包。

关于数据传输优化问题, 王义君等[3]通过邻域节

项目来源: 山西省教育科学"十四五"规划 2023 年度规划课题项目(GH-230063); 2024 年度山西省高等学校科技创新计划项目(2024L578)
收稿日期: 2024-10-17 **修改日期**: 2024-11-06

点交换同步信息,实现数据传输优化。但参考节点或邻域节点构成的节点传输矩阵的信源能量幅度分布不理想,在信道同一时隙并发的节点传输存在碰撞拥塞,常导致丢包问题严重。孟超等[4]通过贝努利方法找出最优数据传输路径。但贝努利采样过程中未综合考虑不同跨层网络的链路容量和功率约束条件,采样数据量超出链路容量,导致传输数据稳定性较差,丢包率较高。Meena 等[5]将数据传输优化划分为网络设计、数据速率预测与可靠性评估三个步骤。利用 NS-2.35 采集通信数据,采用贝叶斯正则化神经网络算法预测传输功率,达到最小化丢包。但该算法运行时,未设置无数据传输节点休眠期,无数据传输任务节点仍保持较高的发射功率,导致传输能耗较大。周绍军等[6]通过改善传输时隙和功率来优化数据传输。但在能耗优化的同时无法保证能量采集效率和稳定性。但该方法考虑信道传输时隙时仅对单传感节点时域进行能量划分,当跨越网络信道中多节点并发时,存在传输碰撞,无法保证数据传输的稳定性,丢包情况有必要进行进一步提升。

由此,提出一种考虑链路容量和功率的 WSN 数据传输跨层优化方法。设计传输优化的数据传输链路容量与功率约束条件,增加吞吐量,保证传输数据量和信道队列容量匹配,初步避免丢包问题。同时根据网络容量需求上限约束节点功率,避免超额分配造成功率无效消耗。设计物理层、媒体访问控制层、路由层的跨层传输方案,解决资源浪费和跨层拥塞问题。采用正交旋转混淆策略压缩信号,降低数据冗余,提升传输效率;构建双线性映射模型将跨层传输节点传输矩阵映射为双线性传输矩阵,优化传输信源能量分布,最终解决跨层传输碰撞拥塞问题,减少丢包率。

1　无线传感器跨层网络传输优化的链路容量和功率约束

综合考虑链路容量和功率约束条件,让跨层优化算法找到最优数据传输路径和传输策略[7]。首先,考虑信道中的噪声干扰,精准计算链路信道时隙传输物理功率,获得传输业务量。然后,创新性地考虑数据传输队列链路容量约束用户传输业务量,同时基于用户队列状态功率约束用户节点功率分配量。以上约束在最大化吞吐量的同时,确保功率分配不过载,降低网络开销。

输送节点 i 成功在链路 j 传输的概率为 q_{ij}。节点 i 的总传输潜力为 q_i,则 q_{ij} 和 q_i 之间的内在关联为:

$$q_i=\sum_{j\in \boldsymbol{U}_i} q_{ij} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{U}_i$ 是节点输出数据集。

设定节点 i 向节点 j 发送信息;节点 j 在此期间不向其他节点发送信息[8],则链路 (i,j) 的吞吐量 z_{ij} 为:

$$z_{ij}=e_{ij}q_{ij}(1-q_j) \tag{2}$$

式中:e_{ij} 表示节点能量消耗。

考虑传输数据包中的噪声数据对信道资源的占用量,设 δ 为噪声占用功率。若 M 个用户共享独立分布的传感网络信道,即各用户在同一时隙 k 内传感系数保持不变,设定 $a_i(k)$ 为用户 i 在第 k 时隙的复传感系数,$B_i(k)$ 为该时隙分配给用户 i 的功率,$i\in M$。则数据接收信噪比为:

$$C_i(k)=\frac{a_i(k)^2B_i(k)}{z_{ij}\delta} \tag{3}$$

设用户 i 在第 k 个时隙的等效噪声功率为 $\delta_i(k)$,定义包含噪声数据链路信道的传输效率,通过香农定理计算用户 i 在第 k 个时隙的频谱效率:

$$D_i(k)=\frac{1}{2}\lg\left[1+\frac{B_i(k)C_i(k)}{\delta_i^2(k)}\right] \tag{4}$$

由此可得用户 i 在第 k 个时隙传输的业务量:

$$d_i(k)=MD_i(k) \tag{5}$$

基于计算出的传输业务量,设定功率与链路容量分配方案的约束条件为:

用户传输业务量不可超过 t 时刻队列的总业务量,即 $d_i(k)\leqslant r_i(k)$,其中 $r_i(k)$ 为队列长度,则用户容量需求 $D_i(k)$ 的约束条件:

$$D_i(k)\leqslant\frac{r_i(k)}{2M} \tag{6}$$

数据传输链路容量需求上限为:

$$S_i(k)=\frac{d_i(k)r_i(k)}{2M} \tag{7}$$

鉴于用户物理层容量需求上限受其队列状态制约,超额分配功率给用户非但不能提升网络总吞吐量,反而会造成功率冗余[9]。因此,WSN 基站总功率拥有上限值 $B_{\max}$,设定约束条件:

$$\sum_{i=0}^{L-1}B_i(k)\leqslant B_{\max} \tag{8}$$

式中:L 代表功率分配次数。

跨层优化时,必须确保分配给每个用户的功率不超过队列状态所决定的最大需求,避免功率无效消耗[10]。基于用户队列状态设定功率约束条件:

$$\frac{1}{2}\lg\left[1+\frac{B_i(k)}{\delta_i(k)}\right]\leqslant S_i(k) \tag{9}$$

基于以上业务量计算和功率约束条件,探索既能满足用户数据传输需求,又能提升传输效率的WSN 数据传输跨层优化方案。

2 正交旋转混淆下 WSN 数据传输跨层优化

上节虽然约束了传输方案的功率分配量,但无线传感器跨层传输网络拓扑结构密集,多节点并发传输时,由于采集时间相同,数据内容相似性很高,造成数据传输冗余,传输效率较低[11-12]。因此,本文采用正交旋转混淆技术压缩处理传感信号,减少相同数据的传输冗余量,提高传输效率。跨层自组网络同一时隙节点传输矩阵的信源能量随机分布,在信道同一时隙并发的节点传输容易发生碰撞拥塞,导致丢包问题严重。为此,本文创新性地采用双线性形式映射技术构建双线性映射模型,将传感信号从单节点离散时域转换为多节点联合离散双线性传输矩阵,根据传输信源节点的能量分布优化传输矩阵,避免碰撞拥塞,实现跨层传输优化。

无线传感器跨层网络采取分簇式组网结构或链式组网结构,包含物理层、媒体访问控制层和路由层。根据每个网络层的属性特征,分别设计三层跨层传输方案,避免拥塞、丢包问题。

物理层中的主要属性特征是连通性,默认设定分簇式组网或链式组网在信息跨层时为全连通状态。但连通状态下,部分节点无数据传输仍保持传输时的发射功率,造成能量浪费[13]。因此本文利用正交旋转混淆技术和时分多址调度策略,控制所有运行节点依据链式路由层指示的下一跳信息,动态调整发射功率。如果无下一跳信息,则控制节点自动进入休眠模式,有效节省能量。

媒体访问控制层中,跨层自组网多媒介接入媒体节点在高负载条件下并发传输容易在信道中出现碰撞,造成数据拥塞和丢包,为此,本文设计无碰撞协议,实现高负载条件下的信道利用,改善数据拥塞和丢包问题:选择接收节点时,设定发射节点所在区域及其紧邻的下个区域中节点为潜在接收者。例如,若 A 区域中的某节点正在发送数据,则 A 区域内未发送的节点以及相邻的 B 区域所有节点均被设定为可能的接收节点,它们将处于接收状态准备接收数据。同时为了节能,C 区域等非直接相关节点保持休眠状态。

路由层主要负责在跨层中转发数据,选择转发概率最优的下一跳节点。利用上节的式(1)计算节点 i 的总传输潜力 q_i,并通过双线性形式映射技术在传输节点矩阵中寻找总传输潜力最高的节点作为路由转发节点。

基于上述三层传输结构,跨层数据传输优化步骤如下:

首先,采用拓扑扫描机制对三层跨层传输的信号码源矩阵 $\boldsymbol{J}_1,\boldsymbol{J}_2,\cdots,\boldsymbol{J}_m$ 进行节点扫描[14-15]。采用正交旋转混淆技术对矩阵 $\boldsymbol{J}_1,\boldsymbol{J}_2,\cdots,\boldsymbol{J}_m$ 实施正交旋转压缩处理:

$$\boldsymbol{K}_a=\frac{\sum_{m=1}^{J}\boldsymbol{J}_m[B_i(k)-S_i(k)]}{\boldsymbol{J}_m} \tag{10}$$

利用离散余弦变换对 $\boldsymbol{K}_a$ 进行置乱处理,将数据从频率域转换回空间域,优化数据恢复质量,生成最终的传输信号矩阵:

$$\boldsymbol{K}'_a=\boldsymbol{K}_a(i)\sum_{i=1}^{J-1}d_i(k)[B_i(k)-S_i(k)]\cos\left[\frac{\pi(2k+1)j}{2n}\right] \tag{11}$$

其次,应用双线性映射方法,结合上节的容量约束值,将传输信号矩阵中节点 i 和对应时隙 k 的矩阵映射为双线性传输矩阵:

$$\boldsymbol{H}(i,k)=\boldsymbol{F}(i)\boldsymbol{F}(k)\sum_{x=1}^{N-1}\sum_{y=1}^{\gamma-1}f(\boldsymbol{K}'_a)[B_i(k)-S_i(k)]\times\sin\left[\frac{1}{N}\left(\boldsymbol{K}'_a\frac{\pi}{N\gamma}\right)\right]\cos\left[\frac{1}{\gamma}\left(\boldsymbol{K}'_a\frac{\pi}{N\gamma}\right)\right] \tag{12}$$

式中:$f(\boldsymbol{K}'_a)$ 是信号衰落量;$N\gamma$ 是信号空间面积;N 为信号空间长度;γ 为信号空间宽度;$\boldsymbol{F}(\cdot)$ 是矩阵变换。

最后,采用双线性形式映射技术将单节点离散时域转换为多节点联合离散双线性传输矩阵,通过式(13)优化传输信源的能量分布,确保每次数据传输均通过当前带宽最优节点,避免碰撞拥塞,实现传输跨层优化:

$$\boldsymbol{R}_e=\frac{1}{r_u}\sum_{i=1}\boldsymbol{H}(i,k)\kappa_i\eta_i \tag{13}$$

式中:r_u 是节点归一化能量指数;κ_i 是节点频谱能量;η_i 是失真校准因子。

由此通过设置数据传输链路容量与功率约束条件,设计物理层、媒体访问控制层、路由层传输方案,利用正交旋转混淆压缩传输矩阵,构建双线性映射模型,完成 WSN 数据传输跨层优化。

3 仿真分析

3.1 仿真分析环境设置

将某井下管道的 TMP100NA/3K 温度传感器无线网络作为设备对象,测量范围为-25 ℃~+100 ℃,

精度为±2.5 ℃。传感器节点的初始发射功率设定为 10 mW。工作频段为 2.4 GHz。无线网络的链路为开放链路,包括 300 个传感器节点,设定链路的理论最大容量为 200 kbit/s,汇聚节点的接收灵敏度与传感器节点的无线通信模块相同,为-92 dBm。汇聚节点的初始缓存大小设定为 100 kB,用于临时存储接收到的数据以防数据拥塞。采用 OPNET14.5 仿真工具,模拟构建一个覆盖于 700 m×700 m 平面区域内井下管道的 WSN,布局如图 1 所示。

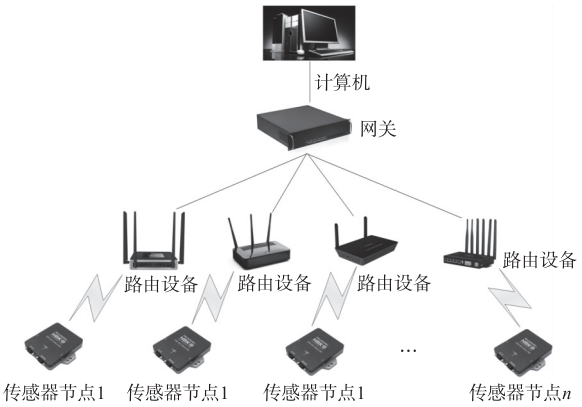

图 1　WSN 结构示意图

在图 1 所示网络中,IP65 型号网关被置于网络中心位置。300 个传感器节点通过 120 个 TL-XTR6680 型号的路由设备传输到中心网关。除了作为数据汇聚中心的网关之外,所有传感器节点的能量资源均设定为有限且初始能量相等。将节点初始能量分为 2^n-1 个能量层级,这里 n 值为 5。仿真分析参数配置如表 1 所示。

表 1　仿真分析参数配置

参数	数值
传感器节点个数	150
传感器节点初始能量/J	1.5
路由器节点通信范围/m	40
数据分组长度/bit	4 107

仿真分析软硬件环境设置如下:中心网关连接计算机处理器采用博通 BCM2711,四核 Cortex-A72 (ARM v8)64-bit SOC,运行频率为 1.5 GHz。内存采用 8 GB 的 LPDDR4-3200 SDRAM。网络接口采用双频 802.11ac 无线网络接口。

传感器节点操作系统为 TinyOS 2.1.2,网关节点操作系统采用 Raspbian Buster。采用 Contiki-NG 进行数据采集与传输。选择 MATLAB R2020a 进行仿真分析可视化。算法的编程语言采用 Python 3.8。采用的温度传感器无线网络节点数据如表 2 所示。

表 2　温度传感器无线网络节点数据

节点	功率消耗/mWh	数据传输成功率/%	链路利用率/%
节点 1	100	95	80
节点 2	110	96	83
节点 3	105	94	79
节点 4	103	95	81
…	…	…	…
节点 300	104	94	83

为保证仿真分析结果可信性,考虑到时间同步法(文献[3])在实时数据处理领域能够确保数据的时间一致性,相关性传输模型(文献[4])能够揭示数据之间的关联性并优化数据传输效率而备受推崇,贝叶斯正则化方法(文献[5])能够平衡模型的复杂度和训练数据的拟合度,三者皆较为成熟,可以保证在设置单一变量时,有效获取实验样本。由此,将时间同步法(文献[3])、相关性传输模型(文献[4])、贝叶斯正则化方法(文献[5])作为对照组,在相同条件下完成对比仿真分析。

3.2　仿真结果分析

3.2.1　链路容量和功率约束跨层网络传输优化效果

本文在第 1 节研究的链路容量和功率约束跨层网络传输优化目标在于通过链路容量上限约束提升网络总吞吐量,同时通过功率约束避免功率无效消耗,降低网络开销。因此仿真分析链路容量和功率约束跨层网络传输优化后的数据传输吞吐量和数据传输功率开销。

相同仿真分析环境下四种方法数据传输时的吞吐量变化情况如图 2 所示。由图 2 可以看出,所提方法吞吐量达到了 85 bit/s,是四种方法中最高的。这主要归因于该方法通过链路容量上限约束提升网络总吞吐量,降低信道占用率,提升数据传输吞吐量。相关性传输模型由于需要频繁地进行信息交换和同步操作,导致网络总吞吐量较低;时

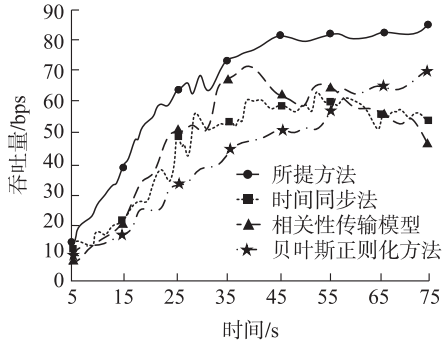

图 2　数据传输吞吐量仿真分析对比

间同步法在采用的链路传输时,多条链路同时受到相同干扰时,会导致传输质量同时下降,从而影响了整个网络的吞吐量;贝叶斯正则化方法主要关注于数据链路层和网络层的某些方面,没有全面考虑如何在各个网络层之间实现协同工作以最大化吞吐量。

比较不同方案的数据网络开销,评估其对网络性能的改善程度。四种方法网络开销仿真分析对比结果如图 3 所示。

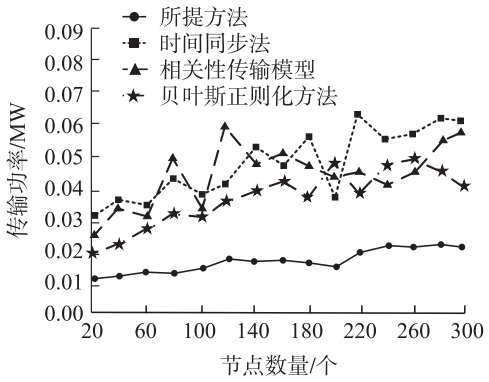

图 3 数据网络开销仿真分析对比

观察图 3 看到,所提方法在不同节点密度场景下均保持较低的开销水平,功率开销始终低于 0.03 MW,在传输控制开销上具备显著优势。相关性传输模型通过识别数据间的冗余减少传输量,但不是所有数据都具备强相关性,导致数据压缩性能较差网络开销变多;时间同步法在复杂网络环境中无法迅速调整传输计划,存在碰撞拥塞,网络开销也随之增多;贝叶斯正则化方法未设置无数据传输节点休眠期,导致传输能耗较大。

3.2.2 正交旋转混淆下无线传感网络跨层传输优化效果

本文在第 2 节研究中采用正交旋转混淆技术减少重复数据的传输冗余量,因此以跨层簇内数据重复率作为仿真分析指标。仿真分析结果如图 4 所示。

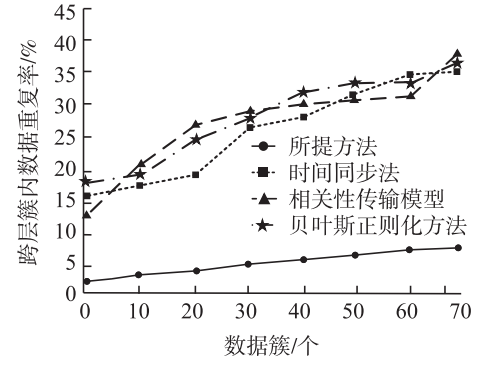

图 4 跨层簇内数据重复率仿真分析对比

由图 4 可知,与其他三种方法相比,所提方法在不同数据簇场景下均保持较低的数据重复率,重复率始终低于 10%,传输冗余量较低,可以提升传输效率。相关性传输模型采用的多边形拓扑结构会导致数据在多个邻域节点之间重复传输,传输数据稳定性较差,增加了跨层簇内数据重复率;时间同步法并未明确考虑数据重复性的问题,存在碰撞拥塞,因此其跨层簇内数据重复率较高;贝叶斯正则化方法并没有深入探讨如何在物理层、数据链路层和网络层之间实现有效的跨层协作来减少数据重复率。

本文采用双线性形式映射技术优化了传输信源节点的能量分布,以避免碰撞拥塞导致丢包,因此采用丢包率作为衡量数据传输质量的指标。四种方法不同网络节点个数下,数据传输丢包率仿真分析结果如图 5 所示。

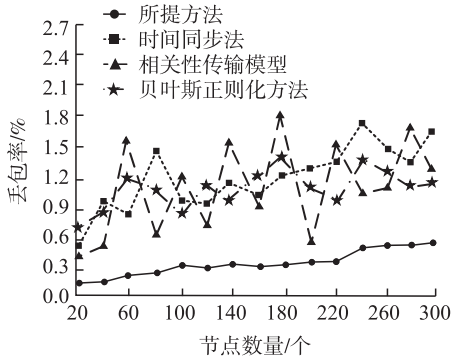

图 5 数据传输丢包率仿真分析对比

从图 5 可知,随着网络节点数量的逐步增加,不同方法之间出现差距。相关性传输模型的拓扑结构的动态调整不够及时,导致部分节点在同步过程中失去与邻域节点的通信联系,传输数据稳定性较差,从而增加数据传输的丢包率;时间同步法采用的无线链路之间的强相关性,会导致多条链路同时处于不良状态,从而增加了数据传输的丢包率;贝叶斯正则化方法在面对网络规模扩张时,无数据传输任务节点未能全面考虑其他影响丢包率的因素,导致数据分组丢包率增加。而所提方法展现出较高的数据传输可靠性,数据分组丢包率均低于 2%。这是因为所提优化方法采用双线性形式映射技术优化了传输信源节点的能量分布,有效缓解信道竞争压力,确保数据分组的高效、可靠传输,降低了丢包率。

4 结论

针对 WSN 在数据传输过程中面临的链路容量和功率双重约束问题,提出一种改进的跨层优化方法。通过设计跨层传输方案,解决跨层碰撞拥塞问题,有效提升数据传输的吞吐量至 85 bit/s。同时,

结合拓扑扫描机制和正交旋转混淆技术处理码源矩阵,将跨层簇内数据重复率降低至 10%以下,有效解决了冗余问题。最终构建了双线性映射模型来优化传输信源能量分布,实现跨层传输碰撞拥塞的优化,优化后的数据分组丢包率低于 2%,显著提高了数据传输的稳定性和安全性。但本文所提出的方法主要针对特定规模的 WSN,对于更大规模的网络,其数据传输的效率和稳定性可能不足。未来可以探索将本文所提出的方法与其他人工智能技术相结合的可能性,以进一步提升数据传输的效率和稳定性。

参考文献:

[1] 刘芳,汤永利. 基于反馈协作的无线传感器网络数据传输研究[J]. 计算机仿真,2022,39(5):375-379.

[2] 张倩,任秀丽. 基于信任机制的无线传感器网络可靠传输路由协议[J]. 计算机应用研究,2022,39(5):1514-1518,1533.

[3] 王义君,钱志鸿. 自适应高效无线传感器网络时间同步优化算法[J]. 电子与信息学报,2022,44(8):2802-2813.

[4] 孟超,周倩,郭林,等. 基于相关性传输模型的无线链路质量估计方法及路由优化算法[J]. 电子学报,2022,50(10):2409-2424.

[5] Pundir M,Sandhu J K,Gupta D,et al. Data Rate Aware Reliable Transmission Mechanism in Wireless Sensor Networks using Bayesian Regularized Neural Network approach[J]. Physical Communication,2023,59:102115.

[6] 周绍军,刘晓霞,胡云冰. 基于时隙和功率分配的联合优化算法[J]. 火力与指挥控制,2023,48(5):110-115.

[7] Reddy M I,Reddy M P,Reddy R O,et al. Improved Elliptical Curve Cryptography and Chaotic Mapping with Fruitfly Optimization Algorithm for Secure Data Transmission[J]. Wireless Networks,2024,30(3):1151-1164.

[8] 冒海微,吴彬彬. IoT 网络中基于多天线技术的无人机通信传输性能优化[J]. 现代电子技术,2023,46(9):6-12.

[9] 张杰,夏蕊,李博,等. 基于长短期记忆-深度 Q 值网络的异构机器人煤矸协同分选方法[J]. 中国粉体技术,2024,30(3):28-38.

[10] 高云波,程璇,李翠然,等. T2T 和 T2G 混合网络中的功率分配算法[J]. 西南交通大学学报,2023,58(5):1126-1134,1179.

[11] Gandikota R Q, Narayanan R, Karunamurthy A, et al. Energy Harvesting and Optimization Using Broadcast Channel Approach for MIMO Systems in Wireless Sensor Networks[J]. ECS Transactions,2022,107(1):16519-16530.

[12] 王琦,沈宏杰,潘秀卫,等. 基于聚类算法的无人机辅助 WSN 节点能量优化方案[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2022,36(6):68-74.

[13] Cengiz K,Kumari R,Sah D K,et al. SOHCL-RDT:A Self-Organized Hybrid Cross-Layer Design for Reliable Data Transmission in Wireless Network[J]. Physical Communication,2023,60:102132.

[14] 余开文,樊仁和,苟文龙,等. 面向语义通信网络的能效跨层优化[J]. 中国科学:信息科学,2024,54(4):758-776.

[15] 孙佳鑫,万振凯. CNT 纱线传感器配置算法在健康监测中的应用[J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(2):129-133.

屈俊玲(1989—),女,汉族,山西襄汾人,中共党员,讲师,硕士研究生学历,电工考评员、1+X 城市轨道交通车辆维护和保养考评员,研究方向:信息与通信工程、控制理论与控制工程。2018 年 12 月进入机电工程系工作,现担任铁道信号自动控制专业负责人,铁路信号基础设备施工实训室负责人。主讲铁道概论、PLC、单片机等课程。曾获学院优秀教师、“最美教师”等荣誉。从教以来,主持省级高等学校科技创新项目 1 项,参与省级教育科学规划课题 2 项,横向课题 1 项,公开发表学术论文 5 篇,实用新型专利 1 项,获省级职业院校技能大赛教学能力比赛二等奖 1 项,省级职教“金课”1 门,院级教学创新成果奖、在线精品课程、课程思政示范课程等多项。指导学生参加全国大学生电子设计竞赛山西赛区和山西省职业院校技能大赛多次获奖,qqqjl96311@ 126.com。