doi：10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023316

基于改进 Harris 鹰优化的无线传感器网络分簇协议

胡黄水，范新纪，邓育欢
（长春工业大学 计算机科学与工程学院，长春 130012）

摘要： 针对无线传感器网络因能量效率低而导致网络生命周期短的问题，提出一种新的基于改进 Harris 鹰优化算法的无线传感器网络分簇协议(improved Harris hawk optimization based clustering protocols for wireless sensor networks，IHHOC). IHHOC 采用改进的 Harris 鹰优化算法获得最优簇头集，首先通过 Sobol 序列初始化种群，并考虑剩余能量、与基站距离以及节点密度这 3 个参数定义适应度函数，通过探索、过渡和开发逐次迭代最终求得最优解；其次，采用高斯随机游走策略避免 IHHOC 陷入局部最优. 成簇后，在簇头邻近簇中基于剩余能量、与簇头和基站距离找到最优转发节点，进一步降低网络能量消耗. 仿真实验结果表明，IHHOC 能有效提高网络能量效率，增大网络吞吐量，延长网络生命周期.

关键词： 无线传感器网络；分簇；Harris 鹰优化；网络生命周期
中图分类号： TP393 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671-5489(2024)05-1228-07

Improved Harris Hawk Optimization Based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks

HU Huangshui，FAN Xinji，DENG Yuhuan
（*College of Computer Science and Engineering*，*Changchun University of Technology*，*Changchun* 130012，*China*）

Abstract： Aiming at the problem of short network life cycle due to low energy efficiency in wireless sensor networks，we proposed a novel improved Harris hawk optimization algorithm based clustering protocols for wireless sensor networks (IHHOC). IHHOC adopted the improved Harris hawk optimization algorithm to obtain the optimal cluster head set. Firstly，the population was initialized by the Sobol sequence and the fitness function was defined by considering the three parameters of residual energy，the distance to the base station，and the density of nodes，and the optimal solution was finally obtained by iterating through the exploration，transition，and exploitation one after another. Secondly，Gaussian stochastic wandering strategy was used to avoid IHHOC falling into local optimum. After clustering，the optimal forwarding nodes were found in the neighboring clusters of the cluster head based on the residual energy，distance from the cluster head and base station to further reduce the network energy consumption. The simulation experiment results show that

收稿日期： 2023-07-26.

第一作者简介： 胡黄水(1974—)，男，汉族，博士，教授，从事无线传感器网络和机器人人机交互技术的研究，E-mail：huhuangshui@ccut.edu.cn. **通信作者简介：** 范新纪(1999—)，男，汉族，硕士研究生，从事无线传感器网络的研究，E-mail：fxinji@163.com.

基金项目： 吉林省科技发展计划技术攻关项目(批准号：20210201051GX).

IHHOC can effectively improve the network energy efficiency, increase the network throughput, and extend the network life cycle.

Keywords: wireless sensor network; clustering; Harris hawk optimization; network life cycle

随着物联网(Internet of Things, IOT)技术的迅速发展，无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)在军事侦察、灾害管理、安全监控、医疗卫生、工业自动化等领域应用越来越广泛. 无线传感器网络由大量资源受限且难以充电的传感器节点组成，这些节点被随机部署在目标区域执行监测任务. 为完成指定任务，节点必须将感知的数据传输至基站，这将消耗大量能量. 因此如何延长网络生命周期已成为无线传感器网络面临的最大挑战[1-6].

分簇协议是延长网络生命周期的最有效方法之一，LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)是无线传感器网络最经典的分簇协议[7]. 但由于 LEACH 协议中簇头节点(cluster head, CH)的随机选择，低剩余能量节点和高剩余能量节点有相同的机会成为 CH，导致能量消耗不均衡. 为解决该问题，文献[8-9]对 LEACH 协议进行了改进，在选择 CH 时考虑了节点剩余能量、地理位置等参数，从而延长了网络生命周期. 文献[10-11]提出了一种双簇头的分簇协议，通过备份簇头分担簇头节点的任务，均衡了簇内能量消耗，有效提高了网络性能. 近年来，元启发式算法的引入为形成最佳分簇并延长网络生命周期提供了新思路. 文献[12]将动态人工鱼群优化算法与无线传感器网络分簇协议相结合，通过动态调整人工鱼的视野范围和前进步长等参数，有效减少了网络能耗. 文献[13]则使用改进的粒子群优化算法，将节点的剩余能量和位置信息作为适应度函数参数，计算节点的适应度值，并选出剩余能量更多且距离基站更近的节点为簇头. 仿真实验结果表明，这些方法都能在一定程度上提高网络性能，延长网络生命周期，但由于算法自身的局限性，易使算法在寻优过程中陷入局部最优，从而无法得到全局最优解. Heidari 等[14]提出了一种群体仿生智能优化算法，即 Harris 鹰优化(Harris hawks optimization, HHO)算法，该算法通过模仿 Harris 鹰的捕食特点，结合 Lévy 飞行实现对复杂多维问题的求解. 此外，该算法调节参数少，且具有较强的全局搜索能力[15].

本文将改进的 Harris 鹰优化算法应用于无线传感器网络的簇头选举中，提出一种新的基于改进 Harris 鹰优化算法的无线传感器网络分簇协议(improved Harris hawk optimization based clustering protocols for wireless sensor networks, IHHOC). 首先，在整个网络区域中根据剩余能量、到基站的距离以及节点密度这 3 个参数定义适应度函数，采用改进 Harris 鹰算法选出适应度值最高的簇头集；然后，根据节点剩余能量、与簇头和基站距离定义一个权重函数，在簇头邻近的簇内选出函数值大的成员节点作为数据转发节点. 仿真实验结果表明，IHHOC 能有效提高网络能量效率，延长网络生命周期.

1　系统模型

1.1　网络模型

本文网络模型如图 1 所示. 由图 1 可见，N 个节点随机部署在目标监测区域内，唯一的基站(base station, BS)是静态的，位于区域中. 先在监测区域中将节点划分为 n 个簇，再从成员节点中选出转发节点，BS 负责接收由转发节点和簇头传输的数据，转发节点负责接收由簇头从簇内成员节点(cluster member, CM)处感知的数据，而 CM 则收集感知数据. 此外，对网络进行如下假设：

1) BS 的能量不受限制；

2) 每个节点都有自己唯一的 ID；

3) 所有节点都有相同的初始状态；

4) 所有节点均有能力调整其发射功率.

1.2　能量模型

本文采用与文献[16-17]相同的能耗模型，由于节点之间的距离不同，节点之间的数据传输所选择的能量消耗模型也不同. 因此，向距离为 d 的目标节点发送 k 比特数据所消耗的能量表示为

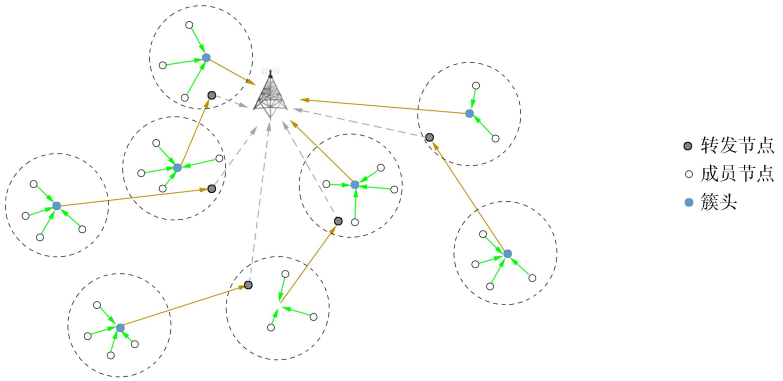


图1 网络模型

Fig. 1 Network model

$$E_{发}=\begin{cases}k\times E_{\text{elec}}+k\times\varepsilon_{\text{fs}}\times d^2, & d<d_0,\\ k\times E_{\text{elec}}+k\times\varepsilon_{\text{mp}}\times d^4, & d\geqslant d_0,\end{cases}\tag{1}$$

其中 E_{elec} 表示发射设备每比特消耗的能量，ε_{fs} 表示自由空间模型的能量消耗，ε_{mp} 表示多路径衰减模型的能量消耗，$d_0=\sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/\varepsilon_{\text{mp}}}$ 表示传输距离的阈值. 节点接收 k 比特数据所消耗的能量为

$$E_{rk}=k\times E_{\text{elec}}.\tag{2}$$

节点融合 k 比特数据所消耗的能量为 $E_{\text{DA}}=k\times E_{\text{pDb}}$，其中 E_{pDb} 表示融合单位数据所消耗的能量.

2 IHHOC设计

2.1 簇头选择

Harris鹰优化算法是一种仿生智能优化算法. 该算法通过模仿Harris鹰的捕食行为，结合Lévy飞行实现对复杂问题的求解. 本文用每只Harris鹰表示优化问题的一个候选解，即一个簇头集. 而猎物表示每次迭代的最优解，即最优簇头集. 适应度函数值大的簇头集可以更好地承担簇头职责，均衡网络能耗.

2.1.1 种群初始化

在原始HHO算法中，种群的产生采用随机的方式. 但这种伪随机方式产生的种群个体分布不均匀，使算法难以对整个搜索空间进行搜索，影响了算法的收敛速度和精度. 相比之下，Sobol序列是一种用确定性拟随机数产生的低差异化序列，它能尽可能地将点均匀分布在搜索空间中. 用Sobol序列生成种群的方式可表示为

$$X_i=lb+S_n\times(ub-lb),\tag{3}$$

其中 ub 和 lb 分别为搜索空间的上下界，$S_n\in[0,1]$ 为Sobol序列产生的随机数.

种群初始化完成后，需定义一个适应度函数计算种群个体适应度并排序，以确定猎物位置. 本文为更好地均衡网络负载，完成数据传输任务，在网络区域中，先将节点随机划分为 n 个簇，定义簇头ID集合为 $\text{CH}=\{\text{CH}_1,\text{CH}_2,\cdots,\text{CH}_n\}$. 在选择簇头时倾向于选择剩余能量多、节点密度大且距离基站较近的节点. 因此定义适应度函数为

$$F_1=\sum_{i=1}^{n}\left(\alpha\times E_i^{\text{CH}_{\text{res}}}+\beta\times\frac{1}{D_i^{\text{CH}_{\text{BS}}}}+\chi\times N_i^{\text{CH}_{\text{nei}}}\right),\tag{4}$$

其中：$\alpha+\beta+\chi=1$；$E_i^{\text{CH}_{\text{res}}}$ 表示簇头节点剩余能量；$D_i^{\text{CH}_{\text{BS}}}$ 表示簇头节点与基站之间的距离；$N_i^{\text{CH}_{\text{nei}}}$ 表示簇头节点的节点密度，

$$N^{\text{CH}_{\text{nei}}}=\frac{N_{\text{num}}}{N_{\text{max-num}}},\tag{5}$$

N_{num} 表示节点通信半径内的节点数量，$N_{\text{max-num}}$ 表示所有节点通信半径内节点数量最大值.

2.1.2 探索阶段

在种群初始化完成后，进入探索阶段，此时Harris鹰保持待命状态，并在$[lb,ub]$空间中根据两种

策略随机搜寻猎物，迭代时以概率 q 进行位置更新，可表示为

$$X_{t+1}=\begin{cases}X_{\text{rand}}-r_1\times|X_{\text{rand},t}-2r_2X_t|, & q\geqslant 0.5,\\ (X_{\text{rabbit},t}-X_{m,t})-r_3(lb+r_4(ub-lb)), & q<0.5,\end{cases}\tag{6}$$

其中：X_{t+1} 和 X_t 分别为个体在第$(t+1)$次和第 t 次迭代时的位置；$X_{\text{rabbit},t}$ 为猎物位置，即当前最优簇头集；q,r_1,r_2,r_3,r_4 为$(0,1)$内随机数；$X_{\text{rand},t}$ 表示随机选出的个体位置；$X_{m,t}$ 表示当前个体平均位置，即

$$X_{m,t}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_{i,t},\tag{7}$$

$X_{i,t}$ 为迭代 t 中每 i 个个体的位置，N 为种群规模.

2.1.3　过渡阶段

该阶段被用于维护探索和开发两个阶段的平衡. HHO 通过下式完成从探索到开发的过渡：

$$E=2E_0(1-t/T),\tag{8}$$

其中：E 表示猎物逃跑的能量；E_0 表示猎物能量的初始状态，$E_0=2\times\text{rand}-1$，rand 是$(0,1)$内的随机数；T 为最大迭代次数；t 为当前迭代次数. 当 $E\geqslant 1$ 时，Harris 鹰算法将执行探索；反之，则进行开发.

2.1.4　开发阶段

根据猎物的逃跑行为和 Harris 鹰的追逐策略，HHO 算法提出了 4 种可能的策略模拟攻击行为. 设 λ 为$(0,1)$内随机数，表示猎物成功逃脱的概率，用于选择不同的开发策略.

1）软围攻.

当 $E\geqslant 0.5$，$\lambda\geqslant 0.5$ 时，猎物有足够的能量且以跳跃的方式逃脱追捕，而 Harris 鹰会逐渐消耗猎物的能量，然后选择最佳的位置俯冲逮捕猎物. 位置更新公式如下：

$$\begin{aligned}X_{t+1}&=\Delta X_t-E\times|J\times X_{\text{rabbit},t}-X_t|,\\ \Delta X_t&=X_{\text{rabbit},t}-X_t,\end{aligned}\tag{9}$$

其中 ΔX_t 表示最优个体和第 t 次迭代中个体的差值，$J=2\times(1-r_5)$ 表示猎物逃跑过程中的随机跳跃距离，r_5 为$(0,1)$内随机数.

2）硬围攻.

当 $E<0.5$，$\lambda\geqslant 0.5$ 时，猎物没有足够能量逃脱，Harris 鹰选择迅速突袭. 位置更新公式如下：

$$X_{t+1}=X_{\text{rabbit},t}-E\times|\Delta X_t|.\tag{10}$$

3）累速俯冲式软围攻.

当 $E\geqslant 0.5$，$\lambda<0.5$ 时，猎物有足够的能量 E 逃跑，Harris 鹰在突袭前会建立一个软围攻. 为模拟猎物的逃跑模式和跳跃动作，将 Lévy 函数 LF 集成在 HHO 算法中. 更新位置的策略为

$$X_{t+1}=\begin{cases}Y:\ X_{\text{rabbit},t}-E\times|J\times X_{\text{rabbit},t}-X_t|, & F(Y)<F(X_t),\\ Z:\ Y+\boldsymbol{S}\times LF(D), & F(Z)<F(X_t),\end{cases}\tag{11}$$

其中 D 为问题维度，$\boldsymbol{S}$ 为 D 维随机行向量，F 为适应度函数.

4）累速俯冲式硬围攻.

当 $E<0.5$，$\lambda<0.5$ 时，猎物能量低，Harris 鹰在突袭前构建硬围攻捕捉猎物. 位置更新公式为

$$X_{t+1}=\begin{cases}Y:\ X_{\text{rabbit},t}-E\times|J\times X_{\text{rabbit},t}-X_{m,t}|, & F(Y)<F(X_t),\\ Z:\ Y+\boldsymbol{S}\times LF(D), & F(Z)<F(X_t).\end{cases}\tag{12}$$

Lévy 飞行函数如下：

$$LF(x)=0.01\times\frac{u\times\delta}{|v|^{1/\beta}},$$

$$\delta=\left(\frac{\Gamma(1+\beta)\times\sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right)\times\beta\times 2\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}\right)^{1/\beta},\tag{13}$$

其中 u,v 是(0,1)内随机数，$\beta=1.5$.

2.1.5 高斯扰动策略

在寻找最优适应度函数值的过程中，算法可能会陷入局部最优，此时算法是否陷入停滞可利用优势种群的平均值判断，如果在连续两次的迭代过程中优势种群的平均值未变化，则认为算法陷入停滞，此时利用高斯随机游走策略通过生成新个体的方式帮助算法跳出此时状态，用公式可表示为

$$X(t+1)=\mathrm{Gaussian}(X(t),\sigma), \tag{14}$$

$$\sigma=\cos\left(\frac{\pi}{2}\times\left(\frac{t}{T}\right)^2\right)\times(X(t)-X^*(t)), \tag{15}$$

其中 X^* 为优势种群中随机选择的一个个体. 高斯随机游走的步长调整是通过余弦函数 $\cos\left(\frac{\pi}{2}\times\left(\frac{t}{T}\right)^2\right)$ 在迭代前期施加较大扰动，而在后期扰动迅速减小，进而平衡算法的探索和开发能力.

当算法迭代次数达到最大迭代次数时，输出结果为具有当前最优适应度值的个体，即最佳簇头集. IHHOC 算法流程如图 2 所示. 确定最佳簇头集后，簇头向网络区域内广播一条包含自身 ID 和身份的消息，成员节点根据接收信息强度选择最近的簇头加入，并向其簇头发送一条消息表明身份，待成簇阶段结束，簇头开始在相邻且距离基站更近的簇中选择转发节点.

2.2 转发节点选择

转发节点的主要任务是接收簇头的数据并将接收到的数据传输给基站. 因此，本文主要考虑了节点的剩余能量和位置信息.

转发节点选择如图 3 所示. 由图 3 可见，将簇头与基站连线，D_{MP} 为节点到连线的距离. 对于 CH_2，CH_3 较 CH_1 距离基站更近，因此 CH_2 在 CH_3 所在簇中搜寻转发节点，而 D_{MP_2} 虽然长度小于 D_{MP_1}，但由于 CM_1 的剩余能量大于 CM_2，故 CH_2 的转发节点最终确定为 CM_1. 定义如下权重函数：

$$F_2=\partial\times E_{\mathrm{res}}+(1-\partial)\times\frac{1}{D_{\mathrm{MP}}}. \tag{16}$$

由式(16)可见，F_2 由 $\partial\times E_{\mathrm{res}}$ 和 $(1-\partial)\times\frac{1}{D_{\mathrm{MP}}}$ 两部分组成，分别表示节点剩余能量和节点与连线之间的距离，其中 ∂ 表示权重，其取值范围为[0,1].

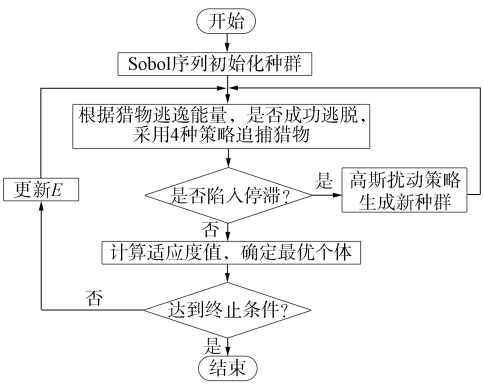


图 2 IHHOC 算法流程

Fig. 2 Flow chart of IHHOC algorithm

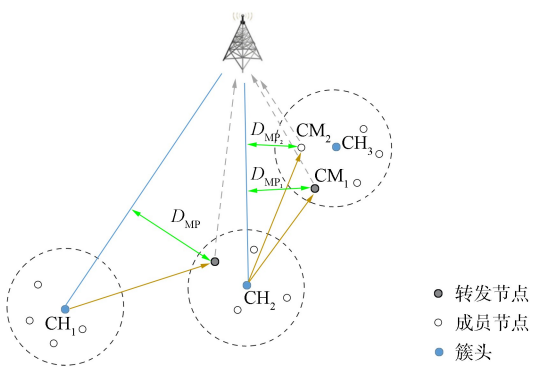


图 3 转发节点选择

Fig. 3 Forwarding node selection

转发节点选择完成后，进入数据传输阶段. 簇头建立一个 TDMA 时间表分配间隙，并将此表广播给簇内成员节点，避免消息冲突. 在数据传输阶段，普通节点根据 TDMA 时间表向其簇头传输数据. 簇头则对数据进行融合，并将融合后的数据发送给转发节点，转发节点则负责将消息传输给基站.

3 仿真分析

为验证 IHHOC 的性能，在 MATLAB 2022a 环境下对其进行仿真，并与 LEACH[7]，UDCH[11] 和 IPSOCH[13] 进行性能比较. 网络中节点数设为 100，簇头比设为 10%，节点随机分布在 400 m×400 m 的目标区域. 基站位于网络区域中心，仿真参数设置如下：节点初始能量为 1 J，$E_{\mathrm{elec}}=50$ nJ/bit，

$E_{pDb}=5$ nJ/bit，$\varepsilon_{fs}=10$ pJ/(bit·m^{-2})，$\varepsilon_{MP}=0.001\ 3$ pJ/(bit·m^{-4})，$d_0=87.7$m，数据包大小为 4 000 bit，控制包大小为 200 bit，网络区域大小为 400 m×400 m，BS 位置为(200,200)，转发节点占比为 0.1，节点通信范围为 50 m.

3.1　网络生命周期

首先对网络生命周期进行测试，网络生命周期与存活节点的数量直接相关. IHHOC 与 LEACH，UDCH,IPSOCH 的比较结果如图 4 所示. 由图 4 可见：LEACH 协议由于其簇头选择的随机性，导致能量消耗不均衡进而影响了整体网络生命周期；UDCH 通过将簇头能耗分摊的方式，相比 LEACH 延长了整体网络生命周期；IPSOCH 则根据节点能量和位置信息使用改进后的粒子群优化(PSO)算法选出了最适合的节点完成数据传输任务；由于 IHHOC 综合考量了节点的能量、位置、节点密度等参数，且分担了簇头任务，因此可以更好地均衡网络负载，延长了网络生命周期.

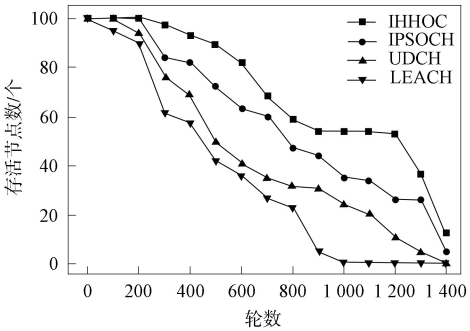


图 4　不同协议的网络生命周期对比

Fig. 4　Comparison of network life cycles for different protocols

3.2　网络吞吐量

下面测试网络吞吐量，其表示网络节点向 BS 传输的数据量. 吞吐量越高，说明网络中能量的利用率越高. 不同协议的网络吞吐量对比结果如图 5 所示. 由图 5 可见，IHHOC 的网络吞吐量比 IPSOCH，UDCH，LEACH 分别提高了 23.09%，30.56%，49.13%. 显然，IHHOC 不仅延长了网络生命周期，而且增加了数据传输量，进一步提高了网络的能量效率.

3.3　网络能量消耗

下面对网络总能耗进行测试，以验证网络的整体性能. 总能耗越小，网络性能越好. 测试结果如图 6 所示. 由图 6 可见，网络能耗随着运行轮数的增加而增加，很明显 IHHOC 的网络能耗低于其他协议，且稳定性好. 结果表明，在消耗 1/2 网络能量时，IHHOC 运行轮数比 IPSOCH，UDCH，LEACH 分别提高了 9.04%，16.99%，63.58%.

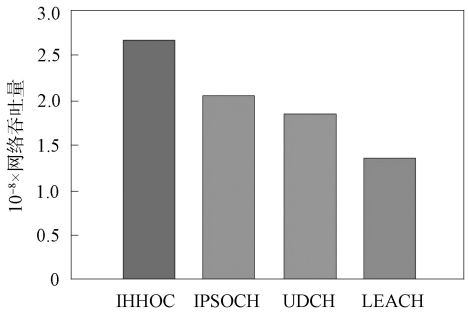


图 5　不同协议的网络吞吐量对比

Fig. 5　Comparison of network throughput for different protocols

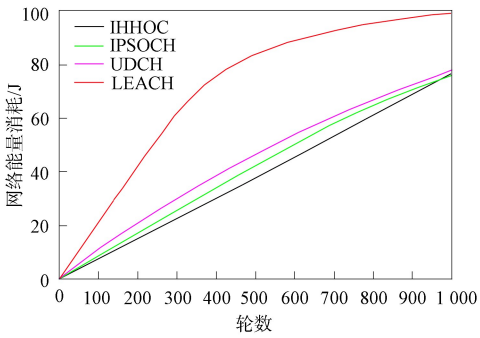


图 6　不同协议的网络能量消耗对比

Fig. 6　Comparison of network energy consumption for different protocols

综上所述，IHHOC 采用 Sobol 序列初始化种群和高斯扰动策略有效提高 Harris 鹰优化算法的全局寻优能力，从而选择最优的簇头集. 此外，通过转发节点和簇头的配合使网络能量消耗更均衡，延长了网络生命周期. 从网络生命周期、吞吐量以及网络的能量消耗方面对算法进行仿真分析的结果表明，IHHOC 相比其他算法更能有效降低网络能耗，具有更长的网络生命周期.

参　考　文　献

[1]　李雄. 无线传感器网络分簇路由协议研究 [D]. 西安：西安邮电大学，2022.(LI X. Research on Cluster Routing

Protocol for Wireless Sensor Networks [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2022.)
[2] 杨诗雨. 无线传感器网络中能量优化分簇路由算法研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2022. (YANG S Y. Research on Energy-Optimized Cluster Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2022.)
[3] 张铭悦. 无线传感器网络分簇路由算法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021. (ZHANG M Y. Research on Cluster Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.)
[4] 龚冬阳. 无线传感器网络对农业电气自动化播种设备的影响 [J]. 南方农机, 2023, 54(8): 174-176. (GONG D Y. Impact of Wireless Sensor Networks on Agricultural Electrical Automation Seeding Equipment [J]. Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 174-176.)
[5] WANG Y Z, ZHANG J D, QIAO J L. An Information Entropy-Based Method of Evidential Source Separation and Refusion [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(1): 77-84.
[6] QIAO J L, ZHANG J D, WANG Y Z. An Improved Multi-sensor D-S Rule for Conflict Reassignment of Failure Rate of Set [J]. Soft Computing, 2020, 20: 15179-15188.
[7] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 1-10.
[8] 黄利晓, 王晖, 袁利永, 等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法 [J]. 通信学报, 2017, 38(增刊2): 164-169. (HUANG L X, WANG H, YUAN L Y, et al. Improved Algorithm for LEACH Protocol Based on Energy-Balanced Efficient WSN [J]. Journal of Communication, 2017, 38(Suppl 2): 164-169.)
[9] 谢佳, 张玲华. 基于能量均衡高效的 LEACH 改进算法 [J]. 电子技术应用, 2023, 49(1): 63-68. (XIE J, ZHANG L H. An Improved LEACH Algorithm Based on Energy Balanced and Efficient [J]. Electronic Technology Applications, 2023, 49(1): 63-68.)
[10] 刘壮, 冯欣, 王雁龙, 等. 基于双簇头聚类分簇和数据融合的无线传感器网络路由算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2015, 53(5): 1013-1017. (LIU Z, FENG X, WANG Y L, et al. An Improved Clustering Routing Algorithm Based on Duable-CH Clustering and Data Fusion in WSN [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2015, 53(5): 1013-1017.)
[11] ZHU F, WEI J F. An Energy-Efficient Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(9): 1-15.
[12] 刘向东, 宋欣, 王翠荣. 基于动态人工鱼群优化的 WSN 分簇算法 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(8): 43-46. (LIU X D, SONG X, WANG C R. WSN Clustering Algorithm Based on Dynamic Artificial Fish Population Optimization [J]. Microelectronics and Computer, 2011, 28(8): 43-46.)
[13] 王宁, 周圆, 刘敬浩. 一种基于改进粒子群的无线传感器网络层次化分簇协议 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(1): 120-125. (WANG N, ZHOU Y, LIU J H. An Improved Particle Swarm-Based Hierarchical Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(1): 120-125.)
[14] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.
[15] 展广涵, 王雨虹, 刘昊. 混合策略改进的哈里斯鹰优化算法及其应用 [J]. 传感技术学报, 2022, 35(10): 1394-1403. (ZHAN G H, WANG Y H, LIU H. Mixed-Strategy Improved Harris Hawk Optimization Algorithm and Its Application [J]. Journal of Sensing Technology, 2022, 35(10): 1394-1403.)
[16] 林新宇, 李明. 异构 WSN 中基于改进哈里斯鹰的分簇算法 [J]. 计算机系统应用, 2023, 32(1): 233-240. (LIN X Y, LI M. Improved Harris Hawk-Based Clustering Algorithm in Heterogeneous WSNs [J]. Computer System Applications, 2023, 32(1): 233-240.)
[17] HOUSSEIN E H, SAAD M R, HUSSAIN K, et al. Optimal Sink Node Placement in Large Scale Wireless Sensor Networks Based on Harris' Hawk Optimization Algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 19381-19397.

(责任编辑: 韩 啸)