

基于模拟退火算法和改进灰狼优化器的异构无线传感器网络路由协议

赵小强^{1,2}, 任少亚^{1,2}, 翟永智^{1,2}, 权恒^{1,2}, 杨婷^{1,2}

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 陕西省信息通信网络及安全重点实验室, 陕西 西安 710121)

摘要: 合理利用节点的能量异构特性延长网络生命周期是异构无线传感器网络(HWSN, heterogeneous wireless sensor network)的主要目标之一。因此, 根据节点能量的异构性提出了一种基于模拟退火(SA, simulated annealing)算法和改进灰狼优化器(GWO, grey wolf optimizer)的HWSN路由协议SA-MGWO(SA-modified grey wolf optimizer)。首先, 该协议通过为能量异构的节点定义不同的适应度函数进行初始簇的选取; 然后计算节点的适应值, 并将其视为灰狼优化器中的初始权重; 同时, 根据狼群与猎物的距离以及系数向量对权重进行动态更新, 提高灰狼优化器的寻优能力; 最后, 利用模拟退火算法保证异构网络中最优簇集的选取。仿真结果表明, 相比于SEP(stable election protocol)、分布式能量有效成簇(DEEC, distribute energy efficient clustering)、M-SEP及FIGWO(fitness value based improved grey wolf optimizer)协议, SA-MGWO协议的网络生命周期分别提高了53.1%、31.9%、46.5%和27.0%。

关键词: 异构无线传感器网络; 模拟退火算法; 灰狼优化器; 网络生命周期

中图分类号: TP212.9; TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00211

Heterogeneous wireless sensor network routing protocol based on simulated annealing algorithm and modified grey wolf optimizer

ZHAO Xiaoqiang^{1,2}, REN Shaoya^{1,2}, ZHAI Yongzhi^{1,2}, QUAN Heng^{1,2}, YANG Ting^{1,2}

1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an 710121, China

Abstract: It's one of the main goals of the heterogeneous wireless sensor network (HWSN) to extend the network life-cycle by reasonably utilizing the heterogeneity of node energy. Therefore, according to the heterogeneity of node energy, a routing protocol (SA-MGWO) for HWSN based on simulated annealing (SA) algorithm and modified grey wolf optimizer (GWO) was proposed. Firstly, the appropriate initial clusters were selected by defining different fitness functions for heterogeneous energy nodes. Secondly, The fitness values of nodes were calculated and treated as initial weights in the GWO. At the same time, the weights were updated dynamically according to the distance between the wolves and their prey and coefficient vectors to improve the GWO's optimization ability. Finally, simulated annealing algorithm was used to ensure the selection of optimal cluster set in heterogeneous networks. Compared with stable election protocol (SEP), distribute energy efficient clustering (DEEC), modified stable election protocol (M-SEP), and fitness value based improved grey wolf optimizer (FIGWO) protocols, the experimental results indicate that the network lifecycle of the SA-MGWO protocol improves by 53.1%, 31.9%, 46.5% and 27.0% respectively.

Key words: heterogeneous wireless sensor network, simulated annealing algorithm, grey wolf optimizer, network lifecycle

收稿日期: 2020-05-02; 修回日期: 2020-10-15

通信作者: 任少亚, 240786225@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.U1965102); 陕西省创新人才推进计划—科技创新团队项目(No.2019TD-28); 西安市科技计划项目(No.201806117YF05NC13-2); 陕西省教育厅产业化培育项目(No.18JF029); 陕西省国际合作计划项目(No.2018KW-025)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U1965102), The Shaanxi Innovative Talent Promotion Plan-Science and Technology Innovation Team (No.2019TD-28), The Science and Technology Projects of Xi'an (No.201806117YF05NC13-2), The Industrialization Cultivation Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No.18JF029), The Shaanxi International Cooperation Project (No.2018KW-025)

1 引言

近年来,随着低功耗数字电路和无线通信技术的发展,无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)在侦察、医疗救助、城市管理、智能家居、目标跟踪等诸多领域得到了广泛应用^[1]。无线传感器网络由成百上千个小型廉价传感器节点构成,它们被随机部署于目标区域内的不同位置,监测物理信息或环境信息,如温度、声音、振动、压力、运动或污染物等^[2]。WSN的寿命主要依赖于节点的电池电量,节点对目标区域信息的感知、处理、传输都将消耗电量,而在许多WSN应用中,传感器节点通常部署在恶劣的环境中,使得节点电池充电或更换变得困难。因此,在WSN路由协议的设计中,节点的能量效率是延长网络生命周期的关键^[3]。

在WSN路由协议中,设计一个基于分簇算法的WSN路由协议是节约节点能量和延长网络生命周期的有效方法之一^[4-5]。分簇算法的主要原理是将网络中全部节点划分为若干个簇域,每个簇域分别有一个簇首节点和多个成员节点,其成员节点主要执行数据的采集任务,簇首节点负责融合接收的数据,并转发至基站。

为了延长网络生命周期,国内外学者已经提出了许多基于分簇思想的WSN路由协议。WSN中最经典的分簇路由协议是低功耗自适应集簇分层型(LEACH, low energy adaptive clustering hierarchy)协议^[6]。在LEACH协议中,簇首根据阈值计算式被随机选取,全部节点周期性地轮询为簇首,将网络能耗平均划分给各个节点,从而延长网络生命周期,提高网络吞吐量。Zhao等^[7]提出了一种基于改进灰狼优化器的WSN节能路由协议——FIGWO协议。FIGWO协议利用中位数算法和改进的灰狼优化器(MGWO, modified grey wolf optimizer)选取簇首,使得簇首在网络中分布更均匀,并保证选取簇首更加合理。然而,大多数WSN分簇路由协议基于同构网络设计^[8],由于节点资源和网络拓扑结构的变化,HWSN在实际中的应用越来越广泛。SEP(stable election protocol)^[9]是著名的HWSN分簇路由协议之一,SEP在两级HWSN环境下被提出,即节点被划分为高级节点和普通节点。在SEP中,因初始能量差异,不同的加权选取概率被设计为高级节点和普通节点,使得高级节点成为簇首的概率更大,均衡网络中高级节点与普通节点的能耗。一种

适用于HWSN的改进稳定选举协议(M-SEP, modified stable election protocol)于2015年被提出^[10]。M-SEP利用整个网络的平均能量和当前节点的剩余能量修改高级节点与普通节点选取簇首的概率阈值计算式,增加了网络的稳定周期和数据包的传输速率。2006年,HWSN的DEEC算法^[11]被提出。DEEC算法考虑了两种WSN,即二级HWSN和多级HWSN。节点剩余能量和网络中节点平均能量比率是簇首选取因素,以便初始能量和剩余能量较高的节点相对于能量低的节点有更大的概率成为簇首,降低节点之间的剩余能量差,达到延长网络生命周期的目的。然而,如何更加合理地利用节点能量的异构性来延长网络生命周期并增加网络吞吐量,是HWSN路由协议的主要问题之一^[12-13]。

本文针对HWSN分簇路由协议,提出一种基于模拟退火算法和改进灰狼优化器的HWSN路由协议。首先利用质心法选取初始簇首,并形成初始簇;然后,采用动态更新猎物权重的改进灰狼优化器选取初始簇内的最优簇首;最后,结合模拟退火算法找出网络中的最优簇首集合,完成数据传输。

2 改进的灰狼优化器

2.1 灰狼优化器

灰狼被认为是处于食物链顶端的食肉犬科动物,其大多喜欢群居的生活方式,每个灰狼群由5~12只灰狼组成,具有相对严格的社会等级管理制度,其社会等级管理制度形如一个金字塔^[14],灰狼群体等级制度如图1所示。

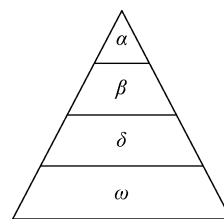


图1 灰狼群体等级制度

1) 金字塔顶端是狼群的领导者,领导者可以是雄狼,也可以是雌狼,称为 α 。其主要职责是对狼群的日常活动做出决策,例如,如何捕猎、何时休息、何时醒来以及关于食物的分配方案等。 α 在整个狼群中的战斗力不一定是最强的,但其管理团队的能力是最好的。

2) 金字塔的第二层是狼群的智囊团队,称作 β 。 β 的主要工作是除辅助 α 做出对狼群日常行为

的决策外，还将其他成员狼的执行情况反馈给 α 。当狼群中 α 出现死亡或者年老等情况时， β 将接替 α 的位置，担任新的领导者。

3) 金字塔第三层是 δ 。 δ 是 α 和 β 的跟随者，主要是听从 α 和 β 的命令，可以指挥其下层的 ω 。 δ 的主要职责是监视领地边界、保证狼群的安全、照顾狼群中虚弱、生病和受伤的狼等。受伤或者年老的 α 和 β 将会被降级为 δ 。

4) 金字塔的底层是 ω 。 ω 总是服从所有比它高等级的狼群的命令，其主要责任是保持整个群体是从高优势到低优势的结构。

灰狼除了具有严格的社会等级管理制度以外，其群体的狩猎行为也非常重要。灰狼狩猎可以分为 3 个主要阶段：跟踪、包围和攻击。在灰狼优化器的社会等级数学建模中，将 α 假设为最优解，其 β 和 δ 分别是第二最优解和第三最优解，其余候选解被假设为 ω 。在灰狼优化器中，狩猎（寻优）由 α 、 β 和 δ 指导， ω 则跟随这 3 只狼更新自身的位置。

1) 包围猎物

在捕猎时，灰狼要先对猎物进行包围，灰狼包围猎物的数学模型为

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p^t - \vec{X}^t \right| \quad (1)$$

$$\vec{X}^{t+1} = \vec{X}^t - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

其中， t 代表当前迭代次数， \vec{X}_p^t 是算法在第 t 次迭代时猎物位置， \vec{X}^{t+1} 是第 $t+1$ 次迭代时灰狼位置， \vec{D} 表示猎物与灰狼的距离。 \vec{A} 和 \vec{C} 表示系数向量，其计算式分别为

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (3)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4)$$

其中， \vec{a} 是收敛因子，随着迭代次数的增加 \vec{a} 从 2 线性减小为 0； \vec{r}_1 和 \vec{r}_2 是在 $[0,1]$ 取值的随机向量。

2) 狩猎猎物

灰狼根据自身以往的狩猎经验，可以识别出猎物位置并对其进行包围。狩猎通常是由 α 进行引导， β 和 δ 有时也参与狩猎活动引领其他狼群对猎物进行包围。将狼群的狩猎行为映射到抽象的搜索空间中，将每个搜索代理映射为一个灰狼个体，此时对最佳搜索代理的位置（最佳猎物的位置）并不了解。因此，根据灰狼对猎物位置的识别经验，利

用前 3 个最佳搜索代理的位置（ α 、 β 和 δ 的位置）可以估算出最佳猎物位置，其他搜索代理可根据最佳猎物位置更新自身位置。灰狼优化器中狼群跟踪猎物机制如图 2 所示。

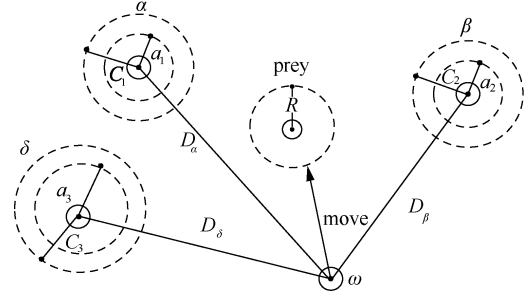


图 2 灰狼优化器中狼群跟踪猎物机制

综上所述，当其他灰狼更新自身位置时要先了解猎物位置，而猎物位置通过 α 、 β 和 δ 位置估算。在估算猎物位置前，需要知道 α 、 β 和 δ 狼与猎物的距离，计算式为

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_\alpha \cdot \vec{X}_p^t - \vec{X}_\alpha^t \right| \quad (5)$$

$$\vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_\beta \cdot \vec{X}_p^t - \vec{X}_\beta^t \right| \quad (6)$$

$$\vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_\delta \cdot \vec{X}_p^t - \vec{X}_\delta^t \right| \quad (7)$$

其中， \vec{X}_p^t 是在第 t 次迭代时刻猎物位置， \vec{X}_α^t 、 \vec{X}_β^t 和 \vec{X}_δ^t 分别表示在第 t 次迭代时 α 、 β 和 δ 狼的位置。

在得知 α 、 β 和 δ 狼到猎物的距离后，可以根据式(8)至式(10)计算出第 $t+1$ 次迭代时 α 、 β 和 δ 狼的位置。

$$\vec{X}_\alpha^{t+1} = \vec{X}_\alpha^t - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \quad (8)$$

$$\vec{X}_\beta^{t+1} = \vec{X}_\beta^t - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \quad (9)$$

$$\vec{X}_\delta^{t+1} = \vec{X}_\delta^t - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (10)$$

在第 $t+1$ 次迭代时，猎物的位置为

$$\vec{X}_p^{t+1} = \frac{\vec{X}_\alpha^{t+1} + \vec{X}_\beta^{t+1} + \vec{X}_\delta^{t+1}}{3} \quad (11)$$

GWO 算法运行的流程如下所示。

1) 初始化灰狼种群，并初始化参数 a 、 A 和 C 。

2) 通过适应度函数计算每个灰狼个体对应的适应度值, 并将适应度值最好的前 3 只狼的适应度值和位置保存到 α 、 β 和 δ 狼中。

3) 根据 α 、 β 和 δ 狼位置, 利用式(11)更新猎物位置。

4) 根据式(8)、式(9)和猎物位置更新全部灰狼的位置, 并利用式(3)和式(4)更新参数 a 、 A 和 C 。

5) 重新计算每个灰狼个体的适应度值, 并更新 α 、 β 和 δ 狼的适应度值和位置。

6) 判断是否达到最大迭代次数, 若是, 则算法结束, 否则跳转至 3)。

2.2 改进的灰狼优化器

分簇路由协议的主要目的是将网络中的节点分为多个簇, 利用簇首完成消息的传输, 避免所有节点与基站通信, 节约节点能量, 如何选取合适的节点作为簇首是延长网络生命周期的关键。灰狼优化器具有较好的全局搜索能力, 在灰狼优化器的狩猎行为中, 其猎物位置根据 α 、 β 和 δ 狼的位置以相同权重因子进行估算。然而, 相对于 β 和 δ 狼, α 狼的狩猎经验更丰富, 因此, 灰狼优化器中猎物位置的权重因子分配并不合理。为了将灰狼优化器更好地应用于分簇路由协议, 利用其传感器节点特性对猎物位置权重进行动态更新, 提出了一种改进的灰狼优化器。本文主要利用改进的灰狼优化器进行簇首选取, 用改进的灰狼优化器的寻优能力选出最优簇首, 进而延长网络生命周期。首先, 应对 WSN 分簇路由协议的参数与灰狼优化器的参数进行一一映射。其中, 传感器节点被映射为灰狼个体, 利用狼群狩猎行为为选取最优簇首节点。在狼群狩猎结束后, 根据适应度值最大的前 3 只狼的位置估算猎物位置, 其猎物位置对应的就是簇首位置。

2.2.1 适应度函数设计

在灰狼优化器中, 除了需要初始化每个灰狼个体的位置外, 其适应度函数也应被给出。适应度函数进一步决定了哪 3 只狼会当选为 α 、 β 和 δ 狼, 而 α 、 β 和 δ 狼的位置对猎物位置的估算有至关重要的作用。在本文中, 灰狼优化器用于簇首的选取, 因此, 主要根据 WSN 节点参数进行适应度函数设计。适应度函数的设计主要考虑如下 4 个因素。

1) 节点剩余能量。簇首除了监测信息消耗能量外, 其能量还被用于接收簇内成员节点数据以及转发数据到基站两个方面。因此, 相对于普通节点,

簇首消耗的能量更多。在簇首选取时, 剩余能量高的节点被选为簇首, 可以更有效地确保数据的稳定传输, 而将剩余能量低的节点选为簇首, 将导致低剩余能量节点的死亡速率加快, 从而缩短网络生命周期。

2) 节点至基站距离。通过 WSN 通信模型可知, 节点距基站越近, 消耗的能量越少。就簇首选取方式而言, 选取距离基站越近的节点作为簇首, 其在数据传输阶段消耗的能量越少。

3) 节点初始能量。HWSN 和同构 WSN 的差异主要体现在传感器节点初始能量的配置上, 为了有效利用节点的能量异构特性, 对不同初始能量的节点分配不同的权重值。在高级节点中, 将节点能量作为主要影响因素, 而普通节点则将节点到基站的距离作为主要影响因子。

4) 节点的平均簇首能耗。节点的平均簇首能耗是指从网络运行开始到第 r 轮次时, 节点被选为簇首时所消耗的平均能量。其节点位置不同, 导致节点当选为簇首时所消耗的能量不同。节点的平均簇首能耗越少, 表明该节点更适合被选为簇首。

综上所述, 适应度函数的设计为

$$F_1 = \begin{cases} a_{11} \frac{E_r}{E_i} + a_2 \frac{d_{\text{MAXBS}} - d}{d_{\text{MAXBS}} - d_{\text{MINBS}}} + a_{12} \frac{C_{\text{AveCMax}}^r - C_{\text{AveC}}^r}{C_{\text{AveCMax}}^r - C_{\text{AveCMin}}^r}, & E_r > 0 \text{ 且是普通节点} \\ a_2 \frac{E_r}{E_i} + a_{11} \frac{d_{\text{MAXBS}} - d}{d_{\text{MAXBS}} - d_{\text{MINBS}}} + a_{12} \frac{C_{\text{AveCMax}}^r - C_{\text{AveC}}^r}{C_{\text{AveCMax}}^r - C_{\text{AveCMin}}^r}, & E_r > 0 \text{ 且是高级节点} \\ 0, & E_r \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, E_i 是节点初始能量, E_r 是节点剩余能量, d 是节点到基站的距离, d_{MAXBS} 和 d_{MINBS} 分别是网络中所有存活节点到基站距离的最大值和最小值。

$C_{\text{AveC}}^r = C_{\text{Scons}} / NC_{\text{num}}$ 表示第 r 轮时节点的平均簇首能耗, $C_{\text{Scons}} = \sum_{i=1}^r C_{\text{Cons}}^i$ 表示从第一轮到第 r 轮节点

成为簇首时所消耗的能量总和, 其中, C_{Cons}^i 表示第 i 轮节点选为簇首的能耗, NC_{num} 表示从网络运行开始到第 r 轮时节点被选为簇首的次数。

C_{AveCMax}^r 、 C_{AveCMin}^r 分别表示第 r 轮次时, 网络中所有存活节点的平均簇首能耗最大值和最小值, a_{11} 、

a_{12} 和 a_2 是权重因子, 因高级节点和普通节点在初始能量上存在差异, 因此给予高级节点更多的能量权重, 给予普通节点更多的距离权重, 具体数值在第 4.1 节给出。

2.2.2 基于动态权重的灰狼优化器

考虑灰狼优化器中猎物位置权重因子分配不合理这一因素, 将对猎物位置的权重进行改善。在算法开始执行时, 为了充分利用节点初始状态, 将节点的适应度值作为猎物位置的初始权重。然而, 灰狼优化器是在每个选定的初始簇中进行最优簇首选, 在初始簇内节点的适应度值将不再变化, 因此, 在算法后续迭代过程中, 将根据猎物和灰狼的距离 D 以及系数向量 \vec{A} 进行猎物位置的动态权重更新。猎物的初始位置 \vec{X}_p^0 为

$$\vec{X}_p^0 = w_{1\alpha} \vec{X}_\alpha^0 + w_{1\beta} \vec{X}_\beta^0 + w_{1\delta} \vec{X}_\delta^0 \quad (13)$$

$$w_{1\alpha} = \frac{F_{1\alpha}}{F_{1\alpha} + F_{1\beta} + F_{1\delta}}, \quad (14)$$

$$w_{1\beta} = \frac{F_{1\beta}}{F_{1\alpha} + F_{1\beta} + F_{1\delta}}, w_{1\delta} = \frac{F_{1\delta}}{F_{1\alpha} + F_{1\beta} + F_{1\delta}}$$

其中, $w_{1\alpha}$ 、 $w_{1\beta}$ 和 $w_{1\delta}$ 代表 α 、 β 和 δ 狼对猎物位置的初始权重, 通过式(14)计算得到。 $F_{1\alpha}$ 、 $F_{1\beta}$ 和 $F_{1\delta}$ 表示 α 、 β 和 δ 狼的适应度值, 由式(12)计算得到。

\vec{X}_α^0 、 \vec{X}_β^0 和 \vec{X}_δ^0 是 α 、 β 和 δ 狼的初始位置。

在算法后续的迭代中, 权重根据式(15)至式(18)进行动态的更新。

$$W_\alpha^{t+1} = \frac{\left(\vec{D}_\alpha^t \times \vec{A}_\alpha \right)}{\left(\vec{D}_\alpha^t \times \vec{A}_\alpha + \vec{D}_\beta^t \times \vec{A}_\beta + \vec{D}_\delta^t \times \vec{A}_\delta \right)} \quad (15)$$

$$W_\beta^{t+1} = \frac{\left(\vec{D}_\beta^t \times \vec{A}_\beta \right)}{\left(\vec{D}_\alpha^t \times \vec{A}_\alpha + \vec{D}_\beta^t \times \vec{A}_\beta + \vec{D}_\delta^t \times \vec{A}_\delta \right)} \quad (16)$$

$$W_\delta^{t+1} = \frac{\left(\vec{D}_\delta^t \times \vec{A}_\delta \right)}{\left(\vec{D}_\alpha^t \times \vec{A}_\alpha + \vec{D}_\beta^t \times \vec{A}_\beta + \vec{D}_\delta^t \times \vec{A}_\delta \right)} \quad (17)$$

$$\vec{X}_p^{t+1} = W_\alpha^{t+1} \vec{X}_\alpha^{t+1} + W_\beta^{t+1} \vec{X}_\beta^{t+1} + W_\delta^{t+1} \vec{X}_\delta^{t+1} \quad (18)$$

其中, W_α^{t+1} 、 W_β^{t+1} 和 W_δ^{t+1} 是 α 、 β 和 δ 狼在 $t+1$ 次

迭代时猎物位置的权重, 通过式(15)至式(17)计算得到。 \vec{X}_α^{t+1} 、 \vec{X}_β^{t+1} 和 \vec{X}_δ^{t+1} 是 α 、 β 和 δ 狼在 $t+1$ 次迭代时的位置。 \vec{X}_p^{t+1} 表示在 $t+1$ 次迭代时猎物的位置。

MGWO 的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 MGWO

初始化灰狼种群、 a 、 A 和 C

根据式(12)计算每个灰狼个体的适应度值

保存适应度值最好的前 3 只狼, 并按顺序将适

应度值和位置赋值给 α 、 β 和 δ 狼

通过式(13)和式(14)计算出猎物的初始位置

根据式(8)、式(9)和猎物位置更新全部灰狼的位置

参数 a 、 A 和 C 的更新由式(3)和式(4)计算得到

根据式(15)至式(17)更新猎物的权重, 并利用

式(18)计算猎物位置

判断是否达到最大迭代次数, 若达到最大迭代次数, 算法结束, 否则, 跳转至 5)

3 基于模拟退火算法和改进灰狼优化器的 HWSN 路由协议

3.1 网络模型

假设网络中节点总数为 N , 并随机布设在 $M \times M$ 区域范围内, 性质要求如下。

1) 网络中除节点初始能量是异构外, 节点的计算能力、通信能力等特性都相同。

2) 节点是被随机地部署在监测区域内, 其部署结束后的节点将不再移动。

3) 节点能量有限, 并且不可对电池进行充电或更换。

4) 基站是静止的, 能量没有限制, 并且部署在监测区域的中心位置。

5) 仅当节点的能量消耗完时, 节点才会死亡。

本文主要考虑二级能量异构模型, 即传感器节点有两种类型: 高级节点和普通节点。假设 α 是网络中高级节点的比例, 则节点的总数 N 为

$$N = (1 - \alpha) \times N + \alpha \times N \quad (19)$$

假设网络给予普通节点的初始能量为 E_0 , 给予高级节点的初始能量比普通节点的初始能量高 β 倍, 即 $E_0 \times (1 + \beta)$, 因此二级异构网络的初始总能量为

$$E_{\text{total}} = (1 - \alpha) \times N \times E_0 + \alpha \times N \times E_0 \times (1 + \beta) = NE_0(1 + \alpha\beta) \quad (20)$$

从式(20)可看出, 其二级异构网络的初始总能量比同构网络多 $\alpha\beta$ 倍, 也可认为其二级异构网络多部署了 $\alpha\beta \cdot N$ 个虚拟传感器节点在网络中。

3.2 WSN 通信模型

在 WSN 中, 节点是随机部署的, 即节点位置不是预先设计好的。节点的大部分能量由于节点间的通信耗散, 节点能量耗散的多少主要取决于节点间的通信距离, 因此发送和接收数据都将消耗节点能量。本文提出的路由协议采用的通信模型是常用的一阶无线电模型^[15], 一阶无线电模型如图 3 所示。

传感器节点在通信距离 d 上发送 m bit 数据, 消耗的总能量为

$$E_{TX}(m, d) = \begin{cases} m \times E_{elec} + m \times \varepsilon_{fs} \times d^2, & d < d_{crossover} \\ m \times E_{elec} + m \times \varepsilon_{mp} \times d^4, & d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (21)$$

其中, E_{TX} 为发送能量, E_{elec} 是电路发送或接收 1 bit 数据所消耗的能量, ε_{fs} 和 ε_{mp} 分别为自由空间和多径衰落信道模型下功率放大电路损耗系数, $d_{crossover}$ 是传输距离阈值, 计算方式如式(22)所示。

$$d_{crossover} = \sqrt{\varepsilon_{fs} / \varepsilon_{mp}} \quad (22)$$

接收者接收 m bit 数据所需要的能耗为

$$E_{RX}(m) = m \times E_{elec} \quad (23)$$

3.3 基于 SA 和 MGWO 的 HWSN 路由协议

3.3.1 质心法选取初始簇首

在 WSN 分簇路由协议中, 簇首选取的优劣将影响网络中数据的传输以及网络的生命周期, 初始簇首的选取决定 MGWO 的收敛速度。因此, 采用质心法进行初始簇首的选取。质心法主要是将网络中所有存活节点的适应度值做从小到大排序, 并将排序后的节点划分成 k_{opt} 个子集, 找出每个子集的质心, 利用欧氏距离选取距质心最近的节点将其作为初始簇首。然而, 本节对适应度函数的设计因节点初始能量的异同而有所差别, 因此, 对网络中高级和普通节点分别进行质心法选取初始簇首。在高级节点中选取 $k_{opt} \cdot \alpha$ 个簇首, 而在普通节点中选取 $k_{opt}(1-\alpha)$ 个簇首, 其适

应度函数采用第 2.2 节设计的 F_1 。

质心法选取初始簇首的伪代码如算法 2 所示。

算法 2 质心法

输入 N_{alive} = 存活节点的数目

k_{opt} = 预期的初始簇首数目

输出 k_{opt} 个初始簇首

步骤

- 1) 利用式(12), 计算每个存活节点的适应度值 F_1
- 2) 分别对存活的高级节点和普通节点的适应度值 F_1 从大到小进行排序
- 3) 将存活的高级节点和普通节点排序的 F_1 分别划分为 $k_{opt} \times \alpha$ 和 $k_{opt}(1-\alpha)$ 个子集

- 4) 在每个子集中, 找出其质心并选取距离质心最近的节点作为初始簇首

3.3.2 猎物位置映射簇首节点的适应度函数设计

上述利用质心法进行初始簇的选取, 而在该初始簇内, 所选取的簇首并不是全局最优簇首。因此, 在初始簇中利用 MGWO 选取最优簇首, 保证初始簇内选取的簇首是全局最优。在 MGWO 迭代结束时, 需要将猎物映射为相应的节点, 即簇首节点。一般映射采取欧氏距离的方式, 即距猎物最近的节点作为簇首节点。考虑节点剩余能量以及节点至猎物距离的影响, 对猎物与簇首的映射关系采用适应度值最小原则。适应度函数的设计为

$$F_2 = \begin{cases} a_3 \frac{E_{MAX} - E_r}{E_{MAX} - E_{MIN}} + (1 - a_3) \frac{d_{MAXP} - d_{toP}}{d_{MAXP} - d_{MINP}}, & E_r > 0 \text{ 且是普通节点} \\ (1 - a_3) \frac{E_{MAX} - E_r}{E_{MAX} - E_{MIN}} + a_3 \frac{d_{MAXCH} - d_{toP}}{d_{MAXP} - d_{MINP}}, & E_r > 0 \text{ 且是高级节点} \\ 0, & E_r < 0 \end{cases} \quad (24)$$

其中, a_3 是权重因子, 因高级节点和普通节点存在初始能量差异, 对高级节点的能量给予更高的权重值, 对普通节点给予距离更多的权重值, 具体数值在第 4.1 节给出。 E_r 是节点剩余能量, E_{MAX} 是簇内

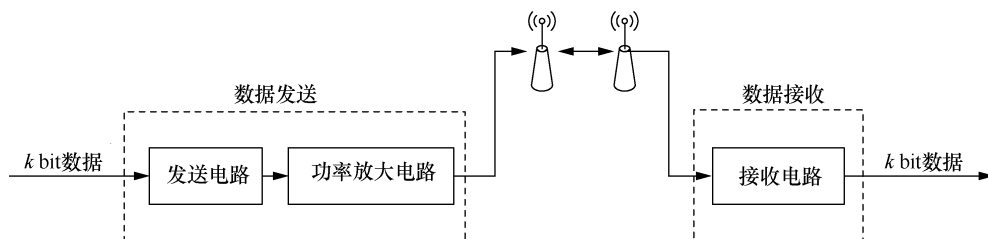


图 3 一阶无线电模型

最大剩余能量, E_{MIN} 是簇内最小剩余能量, d_{toP} 是簇内节点到猎物距离, d_{MAXP} 和 d_{MINP} 分别是簇内节点与猎物距离的最大值和最小值。

3.3.3 SA 中目标优化函数的设计

在初始簇中使用 MGWO 进行最优簇首选取, 形成的簇首集合在整个网络中不一定最优。因此, 将 SA 应用到最优簇首集合的选取中, 以一定的概率选取差解作为下次迭代时的初始解, 使其避免陷入局部最优解, 从而找出全局最优解。SA 的目标优化函数定义为

$$F_3 = a_{41} \times d_{\text{TCH}} + a_{42} \times d_{\text{TBS}} + a_{43} \times \frac{1}{C_{\text{num}}} \sum_{i=1}^{C_{\text{num}}} \left(\text{CM}_{\text{num}} - \frac{N_{\text{alive}}}{C_{\text{num}}} \right)^2 \quad (25)$$

其中, CM_{num} 表示该簇内包括簇首的节点数目, C_{num} 是网络中选取的簇首数量, N_{alive} 表示网络中存活的节点数目, d_{TCH} 是总的簇内通信距离,

$$d_{\text{TCH}} = \sum_{i=1}^{C_{\text{num}}} \sum_{j=1}^{\text{CM}_{\text{num}}} d(x_j, \text{CH}_i), d(x_j, \text{CH}_i) \text{ 表示簇内节点 } x_j \text{ 到其对应簇首 } \text{CH}_i \text{ 的欧氏距离, } d_{\text{TBS}} =$$

$$\sum_{i=1}^{C_{\text{num}}} d(\text{BS}, \text{CH}_i) \text{ 是总的簇首至基站的通信距离, } d(\text{BS}, \text{CH}_i) \text{ 表示簇首 } \text{CH}_i \text{ 到基站的距离, } a_{41}、a_{42} \text{ 和 } a_{43} \text{ 是权重因子, 由于总的簇内通信距离、总的簇首到基站通信距离以及簇内节点数量分布的均匀性 3 个因素对最优簇首集合的选取缺一不可, 因此, 本文给予一样的权重, 实现降低节点能耗的目的。}$$

3.3.4 数据传输阶段

当簇首选取结束后, 存活的传感器节点将进行数据传输, 传输其采集到的数据至相应的簇首节点, 簇首节点将接收的数据进行融合分析并传输至基站, 完成网络中数据的稳定传输。当簇内成员节点进行数据传输时, 先判断节点到簇首距离 d_{NtoCH} 和节点至基站距离 d_{NtoBS} 的大小。若 $d_{\text{NtoCH}} < d_{\text{NtoBS}}$, 簇内节点直接将采集到的数据传送给簇首; 反之, 簇内节点径直传输数据至基站。然而, 簇首传送融合数据到基站将采用多跳传送机制。根据欧氏距离, 找出距离其最近的中继簇首, 判断该簇首到中继簇首距离 d_{AtoB} 和该簇首至基站距离 d_{AtoBS} 的大小, 如果 $d_{\text{AtoB}} < d_{\text{AtoBS}}$, 簇首将传输融合数据至中继簇首; 否则, 簇首将转发融合数据到基站。数据传输机制如图 4 所示。

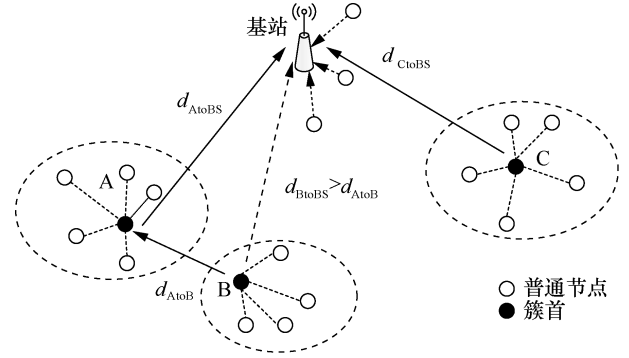


图 4 数据传输机制

4 仿真与性能分析

4.1 仿真环境以及参数设置

为验证 SA-MGWO 协议的性能, 采用 MATLAB 软件对 SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP、FIGWO 协议进行仿真。在相同实验条件下, 将 SA-MGWO 协议的网络生命周期、簇首能耗等性能与 SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO 协议进行比较分析。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

实验参数	场景
网络区域	100 m × 100 m
网络中节点数目	100
基站位置	{50 m, 50 m}
发送和接收数据报长度	4 000 bit
普通节点初始能量	0.5 J
高级节点初始能量超过普通节点初始能量的倍数	1
高级节点占节点总数比例	1:10
最优簇首选取比例	1:10
单位比特发送能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
单位比特数据融合能耗 E_{DA}	50 nJ/bit
自由空间模型下功率放大器损耗系数 ϵ_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
多径衰减模型下功率放大器损耗系数 ϵ_{mp}	0.0013 pJ/(bit · m ⁴)
适应度函数的权重	$a_{11} = \frac{1}{3}, a_{12} = \frac{1}{6}, a_{13} = \frac{1}{2}, a_{14} = 0.2$
目标优化函数的权重	$a_{41} = a_{42} = a_{43} = \frac{1}{3}$

本文主要采用网络生命周期、总的剩余能量 (TRE, total residual energy)、剩余能量差和基站接收的数据包数作为算法性能的评价指标。由于 SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP、FIGWO 等协

议都是单跳路由协议，因此在指标评估时没有考虑端到端时延。对指标和名词的解释如下。

1) 网络生命周期是指网络正常运行开始于第一个传感器节点死亡的时间段，也称为网络的稳定传输期。

2) 总的剩余能量是指网络中所有存活节点剩余能量之和，其总的剩余能量越多，表明网络对节点能量的利用率越高。

3) 剩余能量差是指网络中节点的剩余能量最大值和最小值之差，其主要是用以衡量节点间能耗平衡，网络中剩余能量差值越小，表明节点间能耗越均衡。

4) 基站接收数据包数是指从网络正常运行开始基站接收的数据包数量。

4.2 网络生命周期

网络生命周期是评价 WSN 路由协议的重要指标之一，网络生命周期越长，证明该网络数据传输越稳定，接收的数据包越多。网络生命周期如图 5 所示，表示当高级节点数量与节点总数的比例为 1:10 时，SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO 分簇路由协议随时间变动网络中节点死亡数的曲线。

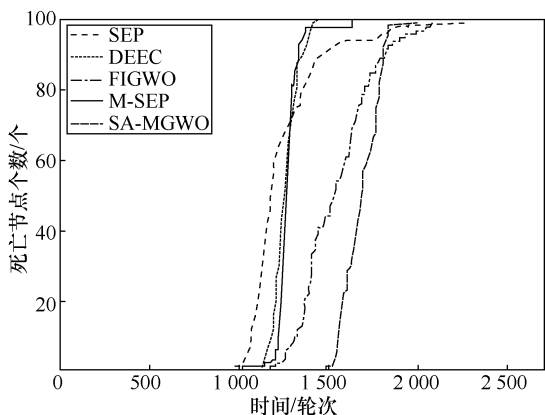


图 5 网络生命周期

从图 5 中可以明显看出，相比于其他 4 种分簇路由协议，SA-MGWO 分簇路由协议第一个节点死亡时间更晚。相比于 SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO，SA-MGWO 的网络生命周期分别提高了 53.1%、31.9%、46.5%和 27.0%。SEP 采用随机方式选取簇首，致使剩余能量低的节点被选作簇首，进一步加快了节点的死亡速率。DEEC 协议在簇首选取阶段仅将节点能量作为簇首选取参数，并未考虑节点到基站距离等因素，导致距基站较远的节点因能量消耗过快而过早死亡的现象。M-SEP 利用节点能量对

阈值计算式进行改进，造成阈值计算式整体增大，使得每轮中选取的簇首数目增多，加剧了节点能量的消耗速率。FIGWO 协议利用灰狼优化器选取了最优簇首，其整个网络中的最优簇首集合并不是最优的。而 SA-MGWO 协议中 MGWO 算法选取的簇首更优、更合理；其次，利用 SA 算法对网络中最优簇首集合的选取，避免簇首集合陷入局部最优的问题，使得最终形成的簇首集在整个网络中是全局最优。

4.3 总的剩余能量及剩余能量差

总的剩余能量如图 6 所示，表示 SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO 协议随时间变化的总的剩余能量曲线。从图 6 中可知，SA-MGWO 协议总的剩余能量高于其他 4 种协议。例如，在网络运行至 1 000 轮时，SEP 协议总的剩余能量百分比为 19.6%，DEEC 协议总的剩余能量百分比为 20.8%，M-SEP 协议总的剩余能量百分比为 21.28%，FIGWO 协议总的剩余能量百分比为 33.74%，而 SA-MGWO 协议总的剩余能量百分比为 40.2%；在第 1 200 轮数据传输结束后，SEP 协议总的剩余能量百分比为 7.3%，DEEC 协议总的剩余能量百分比为 4.2%，M-SEP 协议总的剩余能量百分比为 5.8%，FIGWO 协议总的剩余能量百分比为 20.4%，而 SA-MGWO 协议总的剩余能量百分比为 28.3%。从上述结果可以看出，SA-MGWO 协议总的剩余能量百分比高于其他 4 种协议，表明 SA-MGWO 协议的性能更优。

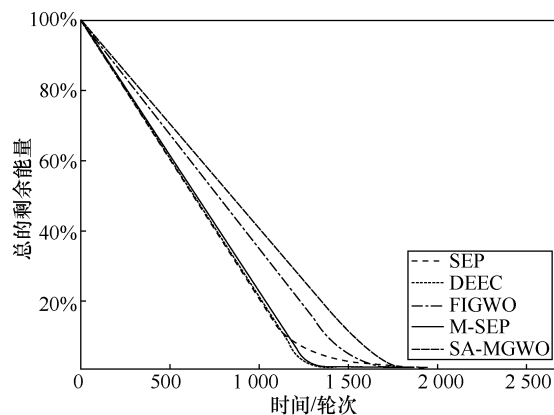


图 6 总的剩余能量

剩余能量差如图 7 所示，表示当高级节点占比为 0.1 时，SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO 协议中剩余能量差随时间变动的关系。在运行环境相同情况下，SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP 和 FIGWO 协议剩余能量差的峰值分别是

23.0%、57.7%、25.5%、31.2%和24.8%。SA-MGWO的剩余能量差相对于其他4种协议分别减少了3/2、11/100、36/100以及8/100。相比于其他4种协议, SA-MGWO的峰值更小, 说明SA-MGWO更好地均衡了节点间能耗。

4.4 基站接收数据包数

基站接收的数据包越多, 表明该网络数据传输效率越高, 路由协议的性能越好。基站接收数据包数如图8所示, 当网络运行至最大轮次时, SA-MGWO、SEP、DEEC、M-SEP和FIGWO协议基站接收数据包数分别是36 852、14 720、16 622、21 615和31 377。相对于SEP、DEEC、M-SEP和FIGWO, SA-MGWO协议发送给基站的数据包分别提高了150.4%、121.7%、70.5%和17.5%。SA-MGWO中利用模拟退火算法选取最优簇首集合进一步提高了网络的生命周期, 从而提高了基站接收的数据包数。

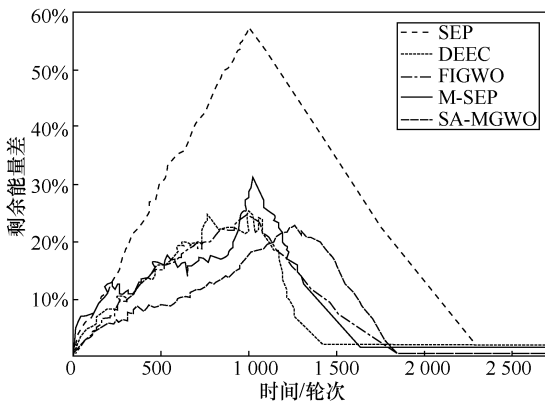


图7 剩余能量差

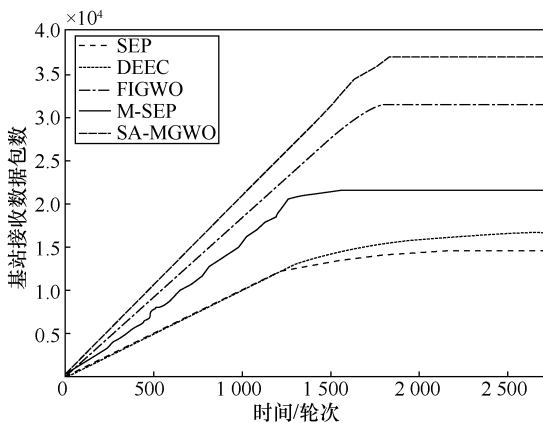


图8 基站接收数据包数

4.5 算法复杂度分析

针对本文中含有 N 个节点、 N_{CH} 个簇首的网络($N \geq N_{CH}$), 在质心法选取簇首、初始成簇部分的

时间复杂度为 $O(N)$ 、 $O(N \times N_{CH})$, 基于SA和MAWO选簇部分的时间复杂度为 $O(N_{iter1} \times N_{iter2} \times N_{pop} \times N)$, 其中 N_{iter1} 代表SA的迭代次数, N_{iter2} 代表MAWO的迭代次数, N_{pop} 代表灰狼种群数量, 将猎物位置映射为簇首节点的时间复杂度为 $O(N)$, 最终簇形成复杂度为 $O(N \times N_{CH})$, 考虑簇首数量远小于种群数量与SA-MAWO迭代次数的乘积, 因此在每轮选举簇首及通信过程中, 本文算法的时间复杂度为 $O(N_{iter1} \times N_{iter2} \times N_{pop} \times N)$ 。

对比算法中SEP、DEEC以及M-SEP算法的复杂度较低, 这是因为其算法过程简单, 同时也导致其性能远远不及本文算法。而FIGWO的复杂度为 $O(N_{iter2} \times N_{pop} \times N)$, 本文算法由于在外层加入了SA, 所以复杂度稍显劣势, 然而在网络生命周期等方面效果更好。总之, 本文在略微牺牲复杂度的情况下, 算法性能有了较明显的改善。

5 结束语

在本文中, 提出了一种基于模拟退火算法和改进灰狼优化器的HWSN路由协议。该算法通过对高级节点和普通节点定义不同的适应度函数, 对GWO算法中猎物权重进行动态改进, 采用模拟退火算法选取最优簇首集合, 保证了每轮簇首数目的均衡性以及网络中簇首分布的均匀性。仿真结果表明, 与传统的SEP、DEEC、M-SEP和FIGWO协议相比, 本文方案的网络能耗、生命周期以及吞吐量都有了显著提高。本文主要以节点能量异构作为研究对象, 并未考虑节点其他性能上的异构, 后续将同时考虑能量异构和节点其他性能异构, 研究在异构特性更复杂的环境下, WSN路由协议延长网络生命周期问题。

参考文献:

- [1] 徐一秋. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 黑龙江科学, 2016, 7(9): 8-9.
XU Y Q. Research status and application of wireless sensor network[J]. Heilongjiang Science, 2016, 7(9): 8-9.
- [2] SRIVASTAVA S, SINGH M, GUPTA S. Wireless sensor network: a survey[C]//2018 International Conference on Automation and Computational Engineering (ICACE). Piscataway: IEEE Press, 2018: 159-163.
- [3] 刘宏, 关业欢, 吕孟伟. 基于自适应权重的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(12): 2603-2607.
LIU H, GUAN Y H, LYU M W. Clustering routing protocol based on adaptive weight for wireless sensor networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(12): 2603-2607.
- [4] OSAMY W, SALIM A, KHEDR A M. An information entropy

- based-clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(3): 1869-1886.
- [5] LOGAMBIGAI R, KANNAN A. Fuzzy logic based unequal clustering for wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(3): 945-957.
- [6] 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: IEEE Press, 2000: 1-10.
- [7] ZHAO X, ZHU H, ALEKSIC S, et al. Energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks based on improved grey wolf optimizer[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2018, 12(6): 2644-2657.
- [8] MA Z F, LI G M, GONG Q C. Improvement on LEACH-C protocol of wireless sensor network (LEACH-CC)[J]. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(2): 183-192.
- [9] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//*Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications*. [S.l.: s.n.], 2004.
- [10] SINGH D, PANDA C K. Performance analysis of modified stable election protocol in heterogeneous WSN[C]//*2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*. [S.l.: s.n.], 2015: 1-5.
- [11] 卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效簇算法[J]. *软件学报*, 2006(3): 139-147.
QING L, ZHU Q X, WANG M W. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor network[J]. *Journal of Software*, 2006(3): 139-147.
- [12] NARANJO P G V, SHOJAFAR M, MOSTAFAEI H, et al. P-SEP: a prolong stable election routing algorithm for energy-limited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2017, 73(2): 733-755.
- [13] WANG J, GAO Y, LIU W, et al. An improved routing schema with special clustering using PSO algorithm for heterogeneous wireless sensor network[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 671-687.
- [14] BANU S S, BASKARAN K. Hybrid FGWO based FLCs modeling for performance enhancement in wireless body area networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 100(3): 1163-1199.
- [15] 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.

[作者简介]



赵小强（1977- ），男，博士，西安邮电大学教授，主要研究方向为物联网技术及应用。



任少亚（1994- ），女，西安邮电大学硕士生，主要研究方向为物联网技术及应用、路由协议。



翟永智（1976- ），男，博士，西安邮电大学讲师，主要研究方向为物联网技术及应用。



权恒（1994- ），男，西安邮电大学硕士生，主要研究方向为物联网技术及应用、智慧农业。



杨婷（1998- ），女，西安邮电大学硕士生，主要研究方向为物联网技术及应用。