

WSN中基于改进蝴蝶优化算法的簇首选取算法

杨诗雨, 赵冰, 彭月

引用本文

杨诗雨, 赵冰, 彭月. [WSN中基于改进蝴蝶优化算法的簇首选取算法](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220100166-5.

YANG Shiyu, ZHAO Bing, PENG Yue. [Cluster Head Selection Algorithm Based on Improved Butterfly Optimization Algorithm in WSN](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220100166-5.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[改进的粒子群蒙特卡洛WSN节点定位算法](#)

Improved Particle Swarm Monte Carlo WSN Node Location Algorithm

计算机科学, 2022, 49(11A): 210900156-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900156>

[传感器唤醒机制下的智能干扰源定位方法](#)

Intelligent Jammers Localization Scheme Under Sensor Sleep-Wakeup Mechanism

计算机科学, 2022, 49(11A): 211000165-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211000165>

[改进灰狼算法的无线传感器网络覆盖优化](#)

Coverage Optimization of WSN Based on Improved Grey Wolf Optimizer

计算机科学, 2022, 49(6A): 628-631. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500037>

[基于混沌序列相关性的峰均比抑制研究](#)

Study on PAPR Reduction Based on Correlation of Chaotic Sequences

计算机科学, 2022, 49(5): 250-255. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400292>

[基于跳数修正和遗传模拟退火优化DV-Hop定位算法](#)

Improvement of DV-Hop Location Algorithm Based on Hop Correction and Genetic Simulated Annealing Algorithm

计算机科学, 2021, 48(6A): 313-316. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000101>

WSN 中基于改进蝴蝶优化算法的簇首选取算法

杨诗雨 赵冰 彭月

黑龙江大学研究生院 哈尔滨 150080

(ysy203920@163.com)

摘要 针对无线传感器网络分簇路由协议的簇首选取不合理,造成网络负载不均和生命周期缩短的问题,提出了一种基于改进蝴蝶优化算法 IBOA 的簇首选取算法 CIBOA。首先,基于蝴蝶优化算法 BOA 进行改进,引入 Circle 混沌映射和非线性动态收敛因子来控制参数值,提高了蝴蝶优化算法的寻优速度、收敛精度,使搜索能力更强。在簇首选取过程中,根据剩余能量、节点基站间的距离和邻居节点平均间距设计了新的适应度函数,使用改进蝴蝶优化算法 IBOA 改进簇首选取随机的问题,综合择出更优簇首节点。仿真测试结果表明,基于改进蝴蝶优化算法的簇首选取算法 CIBOA 能够综合考虑节点能量和距离等因素,减少整体网络运行时间。

关键词: 无线传感器网络;蝴蝶优化算法;簇首;混沌序列;收敛因子

中图分类号 TP393

Cluster Head Selection Algorithm Based on Improved Butterfly Optimization Algorithm in WSN

YANG Shiyu, ZHAO Bing and PENG Yue

School of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China

Abstract Aiming at the problem that the cluster head selection of clustering routing protocol in wireless sensor networks is unreasonable, resulting in uneven network load and shortened network life cycle, a cluster head selection algorithm CIBOA based on improved butterfly optimization algorithm IBOA is proposed. Firstly, based on the butterfly optimization algorithm BOA, the Circle chaotic map and nonlinear dynamic convergence factor are introduced to control the parameter, which improves the search speed and convergence accuracy of butterfly optimization algorithm, and makes the search ability stronger. In the process of cluster head selection, a new fitness function is built on the basis of the residual energy, distance among the nodes and BS and average distance between neighbor nodes. The IBOA is used for improving the random problem of cluster head selection and comprehensively select better cluster heads. Simulation results show that the cluster head selection algorithm CIBOA based on the improved butterfly optimization algorithm can comprehensively consider the factors such as node energy and distance and prolong the network lifetime.

Keywords Wireless sensor network, Butterfly optimization algorithm, Cluster head, Chaotic sequence, Convergent factor

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中的传感器体积小、价格低,能实现不同环境下的信息监测和数据采集^[1]。目前,在农业、国防以及医疗等各种领域^[2-3],无线传感器网络都有广泛的应用。传感器多放置在恶劣环境中,当节点能量耗尽,整个无线传感器网络都会受到严重影响。因此,减小传感器节点能耗,提高网络生命周期成为了无线传感器网络研究的热点^[4-5]。

LEACH 协议^[6]是经典的分簇路由算法,通过周期性替换簇首,减少普通节点长距离传输数据的问题,从而延长网络生存时间。但其簇首选取随机,易导致某些节点过载。如何合理地选取簇首成为分簇路由算法的关键之一。

以优化能量利用率为目的,改进簇首选取的方法被相继提出。文献[7]在 R-LEACH 分簇算法基础上增添节点初始能量和剩余能量因素,但未考虑距离等因素。文献[8] LEACH-DT 算法从簇首选取的角度出发,考虑传感器节点到基站距离,从而优化平衡了传感器节点之间的能耗。在此基础上,各种智能优化算法涌现,其因实现简单、收敛快和搜索精度高等优点,目前应用广泛。粒子群优化算法^[9]、灰狼优化算法^[10]、生物地理学优化算法^[11]和鲸鱼优化算法^[12]等被用于优化簇首选取,均提升了分簇路由协议性能,说明智能优化算法结合簇首选取具有一定研究意义。

2019 年,蝴蝶优化算法(Butterfly Optimization Algorithm, BOA)^[13]首次被提出,并应用于旅行商问题、节点部署

基金项目:国家自然科学基金(61801173)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61801173).

通信作者:赵冰(zhaobing@hlju.edu.cn)

和路由协议等领域。

针对上述问题,本文提出一种基于改进蝴蝶优化算法的多因素簇首选取算法(Clustering Routing Protocol based on Improved BOA algorithm in WSN, CRIBOA)。该算法利用 Circle 混沌序列进行种群初始化,同时引入非线性动态收敛因子,均衡蝴蝶优化算法的全局搜索能力,之后结合剩余能量因素、节点到基站的距离因素和节点之间的距离因素,构建新的适应度函数,综合评估和筛选候选簇首,选举能量和位置合理的簇首,构建分簇。仿真结果表明,本文算法能够优化无线传感器节点传输过程,减少节点能耗,从而延长网络生命周期。

2 系统模型

2.1 网络模型

假定传感器节点随机分布在网络区域并具备以下性质:

- (1)节点与基站位置固定,节点能量有限且相同,基站能量无限。
- (2)节点根据传输距离调整自身发射功率。
- (3)所有节点结构相同且均有各自 ID 号。

2.2 能耗模型

本文研究的改进算法根据无线传感器网络一阶无线电能耗模型进行能耗计算。接受信号的功率会随着传播距离的增加而减少,而能量的损耗则与之相反。自由空间模型和多路径衰减模型根据节点之间的通信距离进行区分。综上所述,发送节点将 m 比特数据传输到距离为 d 的节点损耗能量以及接收节点接收 m 比特数据损耗能量如下式所示:

$$E_T(l) = \begin{cases} m \times E_{\text{elec}} + m \times \epsilon_{\text{fs}} \times d^2, & d < d_0 \\ m \times E_{\text{elec}} + m \times \epsilon_{\text{amp}} \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_R(l) = m \times E_{\text{elec}} \quad (2)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{fs}}}{\epsilon_{\text{amp}}}} \quad (3)$$

其中, E_{elec} 为收发器的能量消耗; ϵ_{fs} 与 ϵ_{amp} 分别为自由空间模型和多路径衰减模型中的功率放大的能量损耗; d 为数据传输节点间距; d_0 为模型区分的通信距离分界值。

3 改进蝴蝶优化算法

3.1 蝴蝶优化算法

BOA 算法模仿蝴蝶的觅食和交配行为。群体中每只蝴蝶均有产生和感知香味的能力,香味浓度计算式为:

$$f = cI^a \quad (4)$$

$$c = 0.01 + (0.025/0.1T_{\text{max}}) \quad (5)$$

其中, f 代表蝴蝶自身香味浓烈度,也是种群中其他蝴蝶能够感知到的香味浓度; c 是感觉通道; I 是刺激强度; a 是幂指数; T_{max} 表示最大迭代次数。

在标准 BOA 算法中,蝴蝶种群随机初始化的计算式为:

$$X_{N \times d} = lb + rand(N, d) \times (ub - lb) \quad (6)$$

其中, N 表示蝴蝶种群规模, d 表示搜索空间维度, lb 和 ub 分别表示搜索空间的上界和下界。

为增强算法搜索能力,蝴蝶在运动中主要包括两个步骤:

全局搜索和局部搜索。两个步骤交替进行,利用转换概率 p 来控制。全局搜索阶段,蝴蝶会朝着香味更浓的方向运动,而在局部搜索阶段,蝴蝶感知香味浓度弱于自身,则开始进行随机移动。每次迭代利用随机函数生成数 r , 并与 p 进行对比来确定搜索模式。

$$r = rand(0, 1) \quad (7)$$

当 $r > p$, 进行全局搜索,蝴蝶将向最优解 g^* 移动,可表示为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 + g^* - x_i^t) \times f_i \quad (8)$$

其中, x_i^t 表示第 i 只蝴蝶在第 t 次迭代中的解向量。这里 g^* 表示目前最优解。第 i 只蝴蝶的香味用 f_i 来表示。

当 $r < p$, 进行局部搜索,可表示为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 + x_j^t - x_i^t) \times f_i \quad (9)$$

其中, x_j^t 和 x_k^t 表示从解向量空间中随机选择的第 k 只和第 j 只蝴蝶。

蝴蝶优化算法结构简单,调节参数少,局部搜索能力强,但也存在易陷入局部最优和收敛精度低的不足。

3.2 改进的蝴蝶优化算法

BOA 算法中蝴蝶随机初始化,蝴蝶位置易在搜索空间中分布不均,算法过早陷入局部最优。针对分布不均和局部最优的问题,本文引入 Circle 混沌映射和非线性动态收敛因子,平衡算法的全局搜索和局部搜索能力。

3.2.1 混沌序列种群初始化

种群随机初始化易导致蝴蝶位置分布不均,而混沌具有伪随机性和非周期的特点,本文采用 Circle 混沌映射^[17]来生成蝴蝶初始群体,先将变量映射到混沌变量空间内,然后再将解线性变换映射到优化变量空间。本文采用 Circle 映射定义如下:

$$x_{i+1} = \text{mod}(x_i + 0.2 - (0.5/2\pi)\sin(2\pi x_i), 1) \quad (10)$$

相比于随机分布的种群,利用 Circle 混沌映射进行种群化,能使种群初始位置分布更加均匀,增大了其搜索范围和多样性,在一定程度上能够改善种群易陷入局部极值的缺陷,从而提高了算法的寻优效率。

3.2.2 非线性动态收敛因子

不同的控制策略会对算法寻优过程产生不同的影响,曲线的斜率表示算法寻优过程中的速度,如图 1 所示。

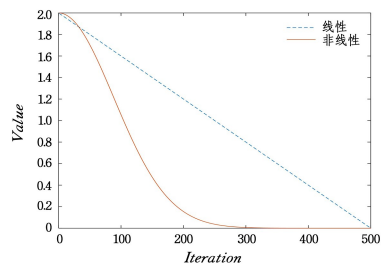


图 1 收敛因子

Fig. 1 Convergence factor

为进一步增强 BOA 算法的探索能力和收敛精度,本文将非线性动态收敛因子引入蝴蝶优化算法全局位置更新处。迭代前期, ω 值较大,可以增强全局勘探能力且递减速度较快,中间加快变化,可以降低搜索时间,而迭代后期值缓慢收敛,

能够提升后期的收敛精度,寻找最优解。非线性动态收敛因子 ω 公式如下:

$$\omega(t) = \omega_{\text{initial}} \times \exp(-(4 \times t / T_{\text{max}})^2) \quad (11)$$

其中, ω_{initial} 为初始值, t 为当前迭代次数, T_{max} 为最大迭代次数。

改进后的蝴蝶优化算法 IBOA 全局和局部搜索公式为:

$$x_i^{t+1} = \omega \times x_i^t + (r^2 + g^* - x_i^t) \times f_i \quad (12)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 + x_j^t - x_i^t) \times f_i \quad (13)$$

IBOA 算法利用混沌初始化种群,使得种群分布更加均匀,为后续算法寻优打下基础。通过引入非线性收敛因子,能够增强算法跳出局部最优的能力,增强及平衡全局和局部搜索能力。

4 基于 IBOA 多因素簇首选取算法

利用 IBOA 算法的适应度函数从网络中的一组传感器中选择最优的簇首。在聚类过程中,利用适应度函数中考虑的剩余能量和网络中节点平均能量来避免死节点成为簇首。接下来,利用节点之间的距离因素和候选簇首到基站的距离因素来选择最优簇首以最小化节点的能量消耗。此外,候选簇首对其所在簇中心性较高,使得簇成员到簇首节点的平均传输距离最小。

适应度函数要对初始簇首集中的所有候选簇首节点进行综合评估,这需要考虑到所有候选簇首节点的能量与位置均衡。适应度函数值越小,表明选出的簇首集越优。

4.1 剩余能量因素

在网络中,簇首节点执行从正常传感器节点收集数据并将数据传输到基站的任务。因此簇首节点需要较高的能量来完成上述任务,剩余能量较高的节点被当选为簇首节点更有利于延长簇和整个网络的生存时间。剩余能量因素 f_1 计算式如下:

$$f_1 = \frac{m}{\sum_{i=1}^m E_i / E_{\text{total}}} \quad (14)$$

其中, E_i 表示候选节点 i 此时的剩余能量, E_{total} 表示存活节点的总能量, m 为簇首数量。

4.2 节点到基站的距离因素

节点的能耗取决于通过传输路径的距离。根据能耗模型已知,如果基站位于节点的位置,则它需要更多的能量用于数据传输。被选取的簇首节点能量突然下降可能是由于较高的能耗所致。因此在数据传输期间,优选与基站距离较小的节点,可以有效减少数据传输过程中的能量损耗。

$$f_2 = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}} \quad (15)$$

其中, d_i 表示候选簇首到基站的距离; d_{\max} 和 d_{\min} 分别为节点到基站的距离和最小距离。

4.3 节点之间的距离因素

节点之间的距离因素表示簇首节点与其所在簇内的其他普通传感器节点之间的距离情况。节点的能量消耗主要取决于能耗公式提到的传输路径距离。当传输距离较小时,该节点的能耗较小,反之亦然。本文采用就近入簇的原则,普通

节点按照接收到信号的功率大小选择入簇,一般与距离直接相关。当选的簇首节点应当选择距离周围节点平均距离较短的节点,用等式 f_3 表示,如式(16)所示:

$$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j \in R} \text{dis}(i, j)}{n_i} \quad (16)$$

其中, n_i 表示节点 i 在 R 范围内的邻居节点数量; R 表示定义的邻居节点范围; $\text{dis}(i, j)$ 表示在 R 范围内节点 i 与节点 j 距离。

在这种情况下,本文将多目标函数转化为单目标函数,并为每个目标值分配权重值,分别为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 。单目标函数如下式所示。

$$f = \delta_1 f_1 + \delta_2 f_2 + \delta_3 f_3 \quad (17)$$

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1 \quad (18)$$

其中, δ_1 和 δ_2 的值较大表示将剩余能量和节点到基站的间距作为更高优先级,以此来降低节点能耗。随后考虑 δ_3 ,从而使簇内通信能量消耗最小。

4.4 多因素背景下的簇首选取算法

蝴蝶优化算法结构简单、调节参数少,本文将 IBOA 算法与 WSN 结合,构造一种用于求解无线传感器网络分簇路由最优簇首的算法,把适应度函数 f 与蝴蝶的香味公式中强度 I 对应,即适应度函数越高的位置,蝴蝶香味越浓,簇头选取的最优解向着香味最浓的蝴蝶靠近。

每个蝴蝶的位置根据无线传感器节点的 ID 来定义,一个蝴蝶对应簇首数量的 ID 号,分别为 1, 2, 3, 4, 5, 这 5 个 ID 分别随机对应 1~100 之间的 ID 号, ID 号对应到节点的坐标上。

簇首选取算法如算法 1 所示。

算法 1 簇首选取算法

输入: $(p, c, a, \omega, T_{\text{max}}, f)$

输出: (ID)

1. 创建蝴蝶初始种群
2. 在初始化刺激强度 I
3. 初始化开关概率、传感器模态和功率指数;
4. for $j =$ 最大迭代次数
5. for $i =$ 种群数
6. 计算香味
7. 检测最佳蝴蝶种群
8. 创建随机数 r
9. if $r < p$
10. 使用等式向最优解前进
11. else
12. 使用等式随机移动
13. end if
14. 更新幂指数的值
15. end for
16. 输出簇头选择方案

5 仿真实验

网络节点数目、规模和运行轮数以及数据传输过程的参数设置参照文献[14],如表 1 所列。假设在 100×100 区间内,有 100 个普通节点同构且位置随机,基站则处在中心位置,具体分布如图 2 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	取值
节点数目	100
基站位置	(50,50)
网络规模/m	100 * 100
最大轮数/r	2000
发送和接受数据报长度/bits	4000
普通节点初始能量/J	0.5
单位比特发送能耗	50
单位比特发送能耗	10
自由空间模型下功率放大器损耗系数	10
多径衰减模型下功率放大	0.0013

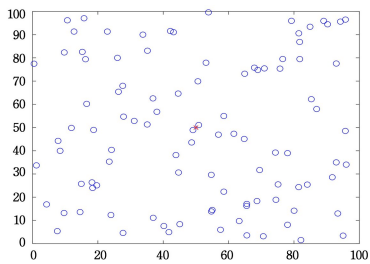


图 2 网络节点分布图

Fig. 2 Diagram of network node distribution

通过网络生命周期和网络能量两个指标综合地评估本算法的性能,网络生命期是本文研究的传感器网络中最重要的性能,将网络生命周期定义为网络开始运行到首个节点死亡和全部节点死亡的运行轮数,如图 3、图 4 所示。本文算法将与 LEACH 和 LEACH-improved^[14] 进行性能比较。此时算法的首个节点死亡轮数为 1 132 轮,比 LEACH 和 LEACH-improved 分别延长了 20% 和 11.4%。网络运行开始到网络中全部节点死亡所运行的轮数为 1 640 轮,比 LEACH 和 LEACH-improved 分别延长了 15.5% 和 5%。如图 3 所示,LEACH-I 首个节点和全部节点死亡轮数均大于 LEACH 和 LEACH-improved,网络运行的时间很长,且不稳定运行时间短,可以看出,本算法相比 LEACH 和 LEACH-improved 有效提升了网络生命周期。

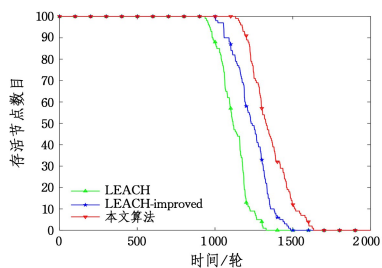


图 3 存活节点数目

Fig. 3 Number of surviving nodes

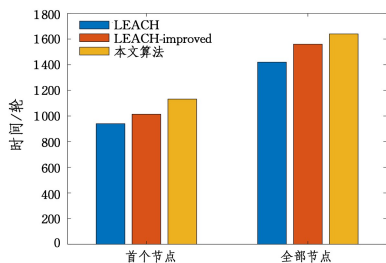


图 4 节点死亡时间对比

Fig. 4 Comparison of network node death time

在 WSN 中网络采用的协议节能效率越好,相同的初始能量下,网络生命周期越长,因此能源使用效率决定了网络的使用寿命。如图 5 所示,随着网络的运行,3 种路由算法的网络剩余能量均随之下下降,但是可以明显看出下降趋势有所不同。能量曲线在 1 200 轮之前斜率较大,之后又趋于平缓,网络在工作前期能量消耗较快。对比 LEACH 和 LEACH-improved,因 CIBOA 采用改进蝴蝶算法结合多因素,包括剩余能量因素、距离因素和邻居节点因素,综合选取簇首,所以网络运行能耗较为均衡,随着接近全部节点死亡轮数,网络剩余能量曲线斜率逐渐趋于平缓。

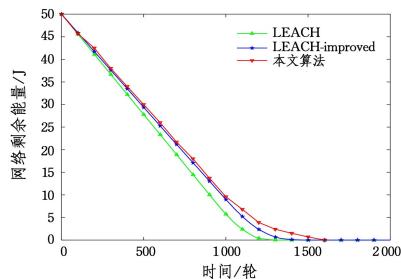


图 5 网络剩余能量

Fig. 5 Residual network energy

结束语 本文提出了一种基于改进蝴蝶优化算法的多因素簇首算法。该算法参考普通节点剩余能量、节点与基站的间距以及节点分布稠密多个重要因素,构造并且改进选取簇首的适应度函数,并通过 IBOA 优化簇首选择过程,使网络分簇更加合理。仿真结果表明,相较于 LEACH 和 LEACH-improved,本文算法 CIBOA 协议网络能耗和总体生命周期两个重要能量指标都有所提升。在本文算法中,节点与基站直接通信,因此在接下来的工作中,将重点关注簇首节点多跳通信的问题。

参考文献

- [1] XU J J,ZHANG X H,XUE B X,et al. Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2017,44(2):31-37.
- [2] RODGERS M M,PAI V M,CONROY R S,et al. Recent Advances in Wearable Sensors for Health Monitoring[J]. IEEE Sensors Journal,2015,15(6):3119-3126.
- [3] XIA C,WEI L,DENG Q. Cost Minimization of Wireless Sensor Networks with Unlimited-lifetime Energy for Monitoring Oil Pipelines[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(3):290-295.
- [4] HAQUE M,AHMAD T,IMRAN M. Review of Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Personal Communications,2018,72(2):1077-1104.
- [5] HASEEB K,ISLAM N,ALMOGREN A,et al. Secret Sharing-Based Energy-Aware and Multi-Hop Routing Protocol for IoT Based WSNs[J]. IEEE Access,2019,7(99):79980-79988.
- [6] HEINZELMAN W R. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// 2000 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000:1-10.
- [7] BEHERA T M,MOHAPATRA S K,SAMAL U C,et al. Resi-

- dual Energy-Based Cluster-Head Selection in WSNs for IoT Application[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5132-5139.
- [8] KANG S H, NGUYENT. Distance Based Thresholds for Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1396-1399.
- [9] SHANTHI G, SUNDARAMBAL M. FSO-PSO based multihop clustering in WSN for efficient Medical Building Management System[J]. Cluster Computing, 2018, 22(4).
- [10] DANESHVAR S M M H, MOHAJER P A A, MAZINANI S M. Energy-Efficient Routing in WSN: a Centralized Cluster-Based Approach via Grey Wolf Optimizer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 170019-170031.
- [11] WANG Y, DUAN Y, DI W, et al. Optimization of Submodularity and BBO-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Deployment[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1286.
- [12] HU C, YE J. Clustering routing algorithm for wireless sensor networks with whale algorithm[J]. Computer engineering and design, 2019, 40(11): 3067-3072.
- [13] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23(3): 715-734.
- [14] HUANG X L, WANG H, YUAN L Y. Improved LEACH protocol algorithm for WSN based on energy balance and high efficiency[J]. Journal on Communications, 2017(S2): 6.



YANG Shiyu, born in 1995, postgraduate. Her main research interest is wireless sensor networks.



ZHAO Bing, born in 1981, postdoctoral, associate professor, master supervisor. Her main research interests include broadband communication, secure communication, digital signal processing.