



基于人工蜂群寻优算法的 WSN 中继节点布局方案

刘开南¹, 韩旭²

(1. 三亚学院信息与智能工程学院, 海南 三亚 572022;

2. 河南牧业经济学院信息与电子工程学院, 河南 郑州 450044)

摘要: 无线传感器网络 (WSN) 环境下, 中继节点位置布局性能优劣是影响网络寿命的关键因素之一。目前, 针对三维空间高密度 WSN, 缺少能够在硬件成本和连通性双重约束条件下提高网络寿命的中继节点位置布局方案。基于网格布局方式, 提出了一种基于人工蜂群优化算法的中继节点布局方案 (ABC-RNDS)。ABC-RNDS 方案采用双层网络拓扑结构, 首先使用最小生成树法构建骨干网络, 再使用人工蜂群优化算法通过网络参数寻优和限制中继节点总数的方法实现网络寿命的延长。实验验证分析表明, 在成本和连通性受约束的条件下, ABC-RNDS 算法与传统方案相比能够显著提高网络寿命。

关键词: 无线传感器网络; 中继节点; 人工蜂群优化; 网络寿命

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016221

Deployment scheme of WSN relay nodes based on artificial bee colony optimization

LIU Kainan¹, HAN Xu²

1. School of Information and Intelligent Engineering, Sanya University, Sanya 572022, China

2. School of Information and Electronic Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450044, China

Abstract: In wireless sensor network (WSN), the relay node deployment performance is one of the main factors to affect network life. Aiming at the WSN with 3-dimension high density, there is no existing relay node deployment schemes enhancing the network life efficiently with the constraints of hardware cost and network connectivity. Hence, a novel deployment scheme called artificial bee colony(ABC)-based relay node deployment scheme (ABC-RNDS) was proposed based on network-grid deployment method. In ABC-RNDS, double-layer topology was adopted to build WSN, which used minimum spanning tree to construct the backbone nodes of WSN, and applied ABC to extend the network lifetime by optimizing network parameters and constraining the number of relay nodes. The simulation results show that, compared to the traditional deployment scheme, ABC-RNDS can improve network lifetime significantly under constrains of cost and connectivity.

Key words: wireless sensor network, relay node, artificial bee colony optimization, network lifetime



1 引言

同时最大化无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的连通度和网络寿命性能是 WSN 研究领域的难点^[1], 因此通常使用中继节点(relay node, RN)协助减小传感器节点的能量消耗^[2]。例如在火山爆发预警的传感网立体感知空间中, 通常需要将中继节点布局在三维空间内收集和转发数据^[3]。因此, 在三维空间布局场景条件下, 合理布局中继节点分布位置实现在成本和连通度受限条件下的网络寿命最优化至关重要。

减小 WSN 中继节点数目能够降低全网硬件成本, 但由于三维空间搜索空间大, 已有研究表明, 同时考虑布局成本和网络性能的中继节点布局并不容易^[4]。参考文献[5]将节点布局方案归类为随机和基于网格的布局方式; 参考文献[6]提出了基于贪婪算法的节点随机布局方案, 存在密集网络中部分节点拥塞度高的问题; 参考文献[7]提出了一种基于网格的最短路径(shortest path 3D, SP3D)节点布局方案; 参考文献[8]在 SP3D 的基础上提出了改进方案——基于寿命受限的 3D 部署优化方案 (optimized 3D deployment with lifetime constraints, O3DwLC), 这两种方案均为网格布局方案, 分为两个阶段: 第一阶段通过使用最小生成树(minimum spanning tree, MST)并利用三维空间网格构建具有最少中继节点数目的骨干网; 第二阶段, 将后续增加的中继节点随机布局在离骨干节点较近的位置, 以实现全网节点全面连通。不同于 SP3D, O3DwLC 在网络寿命和网络节点硬件成本受限条件下使用了一种半正定优化算法提升网络连通性。参考文献[7]和参考文献[8]所提方案旨在提高网络连通性, 本文将部分参考该方案的主要算法过程, 但是主要关注全网寿命延长问题。

目前已有人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法应用于 WSN 的节点位置布局方案中^[9], 虽然具有较好的优化性能, 但主要用于 WSN 中普通传感器节点的位置布局方法^[10]。由于人工蜂群算法具有高效的寻优效率和优越的全局寻优能力, 因此本文考虑使用 ABC 对 WSN 中继节点位置分布寻优。

三维空间 WSN 中继节点位置布局问题已经被证明为 NP 问题^[11], 寻求近似解是研究目标。为提高网络寿命, 本文提出了基于人工蜂群优化算法的中继节点布局方案 (artificial bee colony-based relay node deployment scheme, ABC-RNDS), 方案由两个阶段构成: 第一阶段, 从

硬件成本最小化角度使用最小数目的中继节点实现网络骨干节点的连通功能; 第二阶段, 使用 ABC 寻找全局最优, 通过优化网络参数实现网络目标函数最优并保持全局连通性。最后仿真结果验证了 ABC-RNDS 方案能够显著提高 WSN 的网络寿命。

2 问题描述

使用双层结构构建 WSN 的网络拓扑, 下层由普通传感器节点构成, 实现数据信息收集功能, 上层由簇头(cluster header, CH)节点、基站(base station, BS)节点和中继节点(RN)构成, 实现信息转发、汇集和处理功能。本文主要关注上层结构, 假设下层传感器节点有足够资源收集信息。简便起见, 假设如下:

- 所有节点静态;
- 信息以收发周期为最小单位, 周期性从传感器收集并发送其所属簇头节点, 再由簇头节点通过中继节点或邻居簇头节点实现转发;
- WSN 使用多跳通信机制;
- 所有簇头传输范围相同;
- 所有中继节点传输范围相同;
- MAC 使用理想的无冲突 MAC 接入协议。

本文使用传统能量消耗模型^[12], 接收机消耗能量表达式为:

$$J_n = L\beta \quad (1)$$

发射机消耗能量为:

$$J_n = L(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 d^\gamma) \quad (2)$$

其中, β 、 ε_1 、 ε_2 表示特定收发机的硬件参数, L 为分组长度, d 为收发机欧式距离, γ 为路径损耗指数。此外, 剩余能量 E_r 为:

$$E_r = E_i - TJ_n - QJ_n - AJ_a \quad (3)$$

其中, T 、 Q 、 A 分别为每一个收发周期内发送分组、接收分组和数据融合的速率, E_i 表示节点初始能量, J_n 、 J_n 、 J_a 分别表示在一个收发周期内单比特发送、接收和融合所消耗的能量。

使用的能量消耗模型对于中继节点而言, 需要考虑中继节点离汇聚节点的距离, 如果距离太近, 中继节点能量消耗很快, 因为该中继节点会转发很多数据到汇聚节点, 这将会降低网络性能。因此, 中继节点的能量消耗表达式为:

$$E_p = TJ_n + kQJ_n + AJ_a \quad (4)$$

其中, k 表示中继节点从其他节点收到的业务量。

WSN 寿命定义为从中继节点布局时刻到网络被动分割所经历的时间段,网络被动分割主要由部分簇头或中继节点能量耗尽所造成。由于节点密度和分布位置的不同,不同的网络会有不同的能量消耗判决门限,主要围绕骨干节点如中继节点和簇头节点,考虑网络所有骨干节点的总能量消耗。旨在解决下述问题:当给定一个网格 WSN 中所有节点的位置,通过优化中继节点位置分布来实现网络寿命最大化,同时网络需要满足硬件成本和连通度性能指标的限定。

3 布局方案 ABC-RNDS

3.1 骨干网构建

为了便于将 ABC-RNDS 和对照方案 O3DwLC 作比较,方案第一阶段同样使用 MST 实现 WSN 骨干网络构建。O3DwLC 在预先设定全网寿命时长的基础上,选择数目最少的中继节点构建骨干网络,其使用 MST 算法能够确定上层骨干网络完全连通。ABC-RNDS 第一阶段算法流程如下。

算法 1 使用 MST 构建 WSN 骨干网 B

function 构建 B;

input: 簇头 CH 和基站(BS)节点的初始集合 IS;

output: 构建骨干网的 CH, BS 和 RN 的集合 CS;

begin

CS=初始集合 IS 中最近的两个节点;

CS=CS $\cup$ 3D 网格里能够连接 CS 的最少 RN;

IS=IS-CS;

N_i =不属于 CS 的剩余 IS 节点数目;

$i=0$;

for IS 中每个剩余节点

计算 M_i : 连接 n_i 和最近 CS 集合节点的最少数目 RN 坐标集合;

$i=i+1$;

end

$M=M_i$;

while $N_i > 0$ do

SM=最小 M_i ;

CS=CS $\cup$ SM $\cup$ N_i ;

IS=IS- N_i ;

$M=M-M_i$;

$N_i=N_i-1$;

end

end function

骨干节点集 B 由全向图 G 和拉普拉斯矩阵 L 表示,某元素 (i,j) 为 -1 时表示节点 i 和 j 未连接,否则表示连接,其中矩阵 L 的特征值为:

$$0=\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots \leq \lambda_n \quad (5)$$

当 $\lambda_2=0$ 时表示图 G 不连通,而通过使用 MST 算法增加 RN 数目,可以提高网络连通水平;反之, $\lambda_2=1$ 表示网络所有节点连通。图 1 给出了节点数目为 10 的网络示意。

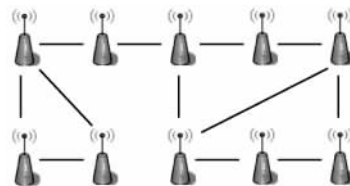


图 1 ABC-RNDS 网络示例

如图 1 所示,骨干网络有 10 个节点和 12 条链路。式(6)为图 1 网络的拉普拉斯矩阵 L,并且有 $\lambda_2=0.17$,表达式为:

$$L_{10} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

参考图论基础^[13],后文将使用如下定义。

• $V(G)$ 和 $E(G)$ 分别为图 G 的顶点集和边集, $d_G(u,v)$ 表示图 G 中节点 u, v 具有最小数目边的路径距离。

• $d_G(v)$ 表示图 G 中节点 v 和点集 V 中其他节点的最小路径,维纳指数 $W(G)$ 为:

$$W(G) = \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G(v) = \frac{1}{2} \sum_{(u,v) \in E(G)} d_G(u,v) \quad (7)$$

基于式(7),有平均路径 $\mu(G)$ 为:

$$\mu(G) = \frac{W(G)}{\frac{n}{2}} = \frac{W(G)}{\binom{|V(G)|}{2}} \quad (8)$$

其中,维纳指数 $W(G)$ 根据拉普拉斯矩阵 L 的特征值可计算如下:



$$W(G) = n \sum_2^n \frac{1}{\lambda_i} \quad (9)$$

3.2 中继节点位置布局优化

在限定中继节点数目的条件下,通过最小化骨干网络参数 $\mu_w(G)$ 实现中继节点位置最优化。由于硬件成本大小与中继节点数目正相关,中继节点数目最小时,有位置分解为:

$$\min \mu_w(L(\alpha)) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_i, \alpha_i \in (0,1) \quad (10)$$

$$L(\alpha) = L_i + \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_i A_i A_i^T \quad (11)$$

其中, A_i 为增加的中继节点集对应的关联矩阵, L_i 为使用 MST 生成的初始拉普拉斯矩阵, α_i 为 1 或 0 取决于中继节点是否放置在顶点 i 处。

ABC-RNDS 方案中,设初始收发周期数 I_R 指第一阶段部署中继节点后的总收发周期数目,表达式为:

$$I_R = \frac{B_1}{\sum_{p=1}^{FPRN} E_p} \quad (12)$$

其中, $FPRN$ 表示第一阶段所产生的中继节点数目, B_1 为使用 $FPRN$ 时网络的总能量,网络寿命时长为:

$$lifetime = T_R = \frac{\sum_{i=1}^2 B_i}{\sum_{p=1}^{FPRN+SPRN} E_p} \quad (13)$$

其中, $SPRN$ 表示第二阶段所产生的中继节点数目:

$$E_p = TL(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \mu_w^\gamma) + kQL\beta + AJ_a \quad (14)$$

其中, B_2 是第二阶段中继节点数目消耗的能量。因此,网络总的寿命时长为:

$$lifetime = T_R = I_R + \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_i E_R \quad (15)$$

其中, E_R 指第二阶段中继节点所对应增加的收发周期数目。

3.3 ABC 算法寻优网络关键参数

ABC 算法是模拟自然界蜜蜂群体采蜜行为的仿生启发式优化算法,蜂群分为雇佣蜂、侦察蜂和跟随蜂 3 类,雇佣蜂随机搜索食物并将食物位置作为最优解,雇佣蜂通过跳舞实现信息交流,跟随蜂则通过跳舞长度、类型和频率来区别蜜源的优劣,从跟随蜂中挑选一部分作为侦察蜂对新蜜源进行再搜寻^[14]。ABC 算法步骤如图 2 所示。搜索空间中的蜜源位置为:

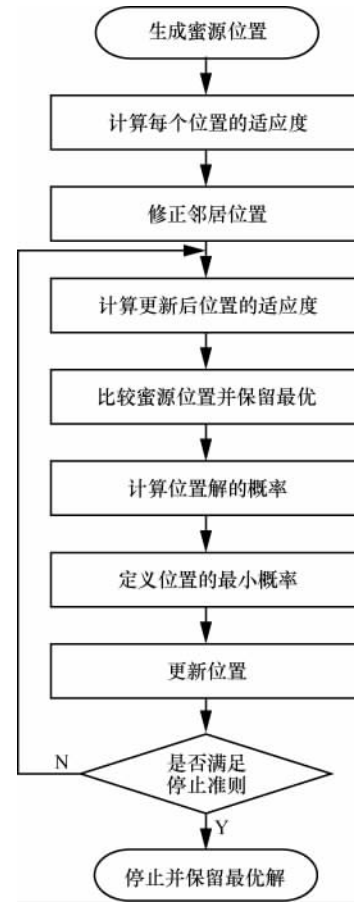


图 2 ABC 算法步骤流程

$$x_{ij}^{\text{new}} = x_{ij}^{\text{old}} + u(x_{ij}^{\text{old}} - x_{kj}) \quad (16)$$

其中,跟随蜂选择蜜源的概率为:

$$P_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{E_b} fitness_i} \quad (17)$$

其中, $i=1,2,\dots,E_b$ 表示蜂群大小, $j=1,2,\dots,D$, j 指 D 维空间下的位置数目, $fitness_i$ 表示适应度, $k \in (1,2,\dots,E_b)$, u 是介于 0 和 1 之间的数目,如图 4 所示。

使用 ABC 算法更新第一阶段得到的矩阵 L_i 。根据传统概率通信模型,两个距离为 d 的节点能够互相通信的概率为:

$$P_c = K e^{-\mu d^\gamma} \quad (18)$$

其中, γ 是基于实验数据的路径损耗指数, μ 表示服从均值为 0 和方差为 σ^2 的对数正态分布的随机变量,用以描述信号衰落特性。因此, P_c 会受收发距离和环境因素影响。本文中网络连通性界限设为 $\lambda_2^{\min} \leq \lambda_2 \leq \lambda_2^{\max}$, 仿真中分别令 $\lambda_2^{\min}=0.4$ 和 $\lambda_2^{\max}=0.6$ 为上下限。

第二阶段给 WSN 再补充中继节点,并更新矩阵 L ,并且利用能够使用目标函数最小的网络结构确定中继节点集的位置,方案中使用的适应度函数表达式为:

$$fit=n \sum_{i=2}^n \frac{1}{\lambda_i} \tag{19}$$

适应度函数寻优是指在硬件成本和连通性 λ_2 受约束条件下的函数最小值。ABC 算法被用于优化矩阵 L 上三角元素的值同时并更新对角元素。除去对角线元素以外,矩阵 L 上三角的每个元素值均会被优化为 0 或-1,该计算取决于链路是否连通。优化结果被选定前需要先确定是否满足网络连通性的限制条件。方案使用式(8)计算得到中继节点或簇头节点,使用式(12)计算总的收发周期数目。

能量消耗模型中表示收发距离的变量影响优化结果,最小化 $W(G)$ 能够将平均节点间距离 $\mu_w(G)$ 最小化,从而延长网络寿命,因此将维纳指数 $W(G)$ 作为优化问题的目标函数。此外,根据 WSN 骨干网(包括簇头节点、中继节点和基站节点的数目)即可确定矩阵 L 的维数和特征值数目。通过在候选位置上增加第二阶段产生的中继节点(second phase relay node,SPRN)实现拉普拉斯矩阵更新,选择能够使平均节点间距离 $\mu_w(G)$ 最小的位置成为优化目标。算法能够在所有可能的候选位置上随机搜索特定数目的中继节点。当目标函数值符合预定范围时计算并确定矩阵 L ,否则放弃当前时刻的解。

最后,使用矩阵 L 最优特征集评估平均距离,而具有最小平均距离的最优布局解将由更新过的矩阵 L 表示。根据观察矩阵 L 元素,可获知中继节点中的相邻连通节点。

最后,给出了 ABC-RNDS 方案流程。

算法 2 ABC-RNDS

```
function ABC-RNDS; B 表示骨干网络节点集
input: B;
output: SPRN 集合  $X_p$ 
begin
     $L_i=B$  的初始化拉普拉斯矩阵;
     $I_Q=B$  运行的收发周期数目;
     $A_i$  和顶点  $i$  匹配的邻接矩阵
    评估  $\mu_w(G)$ 
     $E_R$ =给顶点  $i$  分配中继节点所增加的收发周期数目;
    得到算法最优解;
end function
```

4 仿真结果与性能分析

4.1 仿真数据设置

使用 MATLAB 仿真 ABC-RNDS 方案性能,并和对照方案 O3DwLC 进行性能对比。仿真过程中,将 9 个簇头节点和 1 个基站节点部署在距离其各自簇成员节点近的网格里,中继节点数目分别为 10、20、30、40 和 50。简便起见,使用中继节点布局数目和网络寿命作为度量标准,前者能够体现方案在硬件成本上的有效性,后者使用网络被动分割前的收发周期数目作为表征,能够体现中继节点部署后网络所增加的寿命时长。由前文可知,收发周期数目很大程度上取决于网络区域、传感器分布密度、数据生成速率等,主要参数配置见表 1。ABC 优化目标为代表网络架构的拉普拉斯矩阵中的非对角元素,由雇佣蜂数目表示。种群规模是指蜂群搜索最优解的搜索空间大小。表 2 给出了网络规模为 20~60,ABC 需要优化的参数数目和迭代次数。

表 1 ABC-RNDS 主要仿真参数配置

参数	取值
n_c	110
J_a/J	$50 \times e^{-7}$
$\varepsilon_1/(J \cdot \text{bit}^{-1})$	$50 \times e^{-9}$
$\varepsilon_2/(J \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^{-2})^{-1})$	$10 \times e^{-12}$
γ	4.8
$\beta/(J \cdot \text{bit}^{-1})$	$50 \times e^{-9}$
L/bit	512
E_c/J	15
$T/\text{个}$	100
R	100
A	10
r/m	100

表 2 ABC 主要优化参数配置

网络规模	优化参数数目	种群大小	迭代次数
20	190	400	200
30	445	600	200
40	780	800	200
50	1 205	1 000	200
60	1 780	1 200	200

实验寻优迭代次数为 200,不同网络规模下种群大小不同,每种网络规模条件下分别进行 8 次独立不同参数的方案寻优。以表 3 为例,当网络规模为 20 时,随着迭代次数增加至 200,适应度函数值变化并不明显,而网络规



模是指第一阶段和第二阶段中继节点、簇头节点和基站节点的总和。

4.2 仿真结果

表3和表4分别给出了网络规模分别为20和60的实验结果,其他网络规模实验结果略。以网络规模为20为例,表示WSN骨干节点有1个基站、9个簇头和10个中继节点。由实验结果可知,8次实验求得的平均结果和每次独立实验结果相近,这表明虽然算法迭代次数仅为200,但ABC-RNDS方案具有顽健性。表4结果表明,WSN的网络全局连通性在预期范围,如连通骨干网络的平均距离随着中继节点数目的增加而下降。因为ABC-RNDS的第一阶段和对照方案O3DwLC相同,ABC对中继节点分布寻优,可以使网络得到更小的平均节点间距,仿真结果如图3所示。由图3可知,当网络规模为40时,使用ABC-RNDS得到的归一化平均距离比O3DwLC减小50%。据式(15)可知,网络运行收发周期数目取决于节点通信距离,故ABC-RNDS能够大大提高网络存活时长,结果如图4所示。

5 结束语

研究了无线传感器网络寿命延长问题。由于中继节点的能量消耗受传输范围影响,将延长网络寿命转换为寻优问题,提出了基于双层分布式结构的双阶段节点布局方案ABC-RNDS,第一阶段使用最小生成树实现骨干网络布局,第二阶段使用人工蜂群算法ABC通过优化第二阶段中继节点SPRN布局实现网络寿命最大化。最后,使用

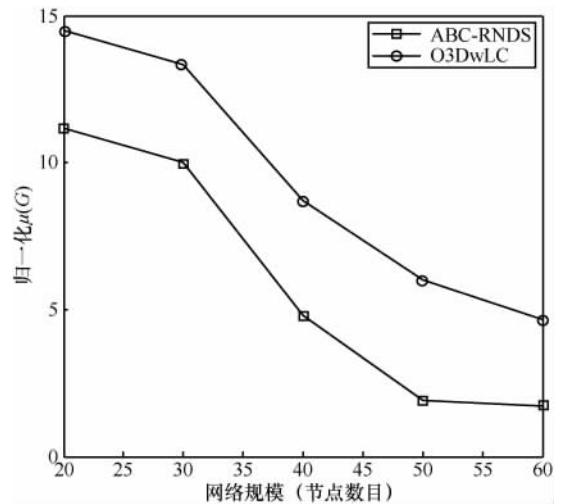


图3 不同网络规模条件下平均节点间距 $\mu(G)$ 实验结果

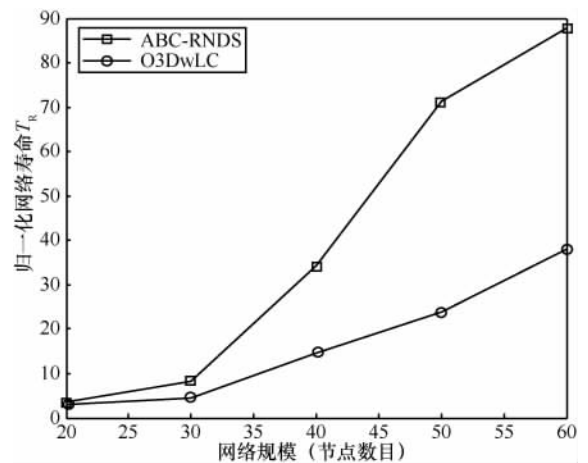


图4 不同网络规模条件下网络寿命时长 T_R 实验结果

表3 网络规模为20时参数优化仿真结果

参数	实验次数/次								平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$W(G)$	20.007 0	20.422 4	22.046 2	20.043 3	19.489 9	20.668 1	20.014 5	20.421 5	20.389 1
$\mu(G)$	10.515 5	11.174 9	11.221 2	11.703 5	11.704 7	12.018 0	13.775 5	11.184 4	11.662 2
E_p	0.567 9	0.634 0	0.638 8	0.690 3	0.690 5	0.725 3	0.942 0	0.635 0	0.690 5
T_R	4.274 5	3.576 1	3.529 7	3.065 9	3.064 8	2.781 4	1.418 0	3.566 5	3.159 6
λ_2	0.597 8	0.595 8	0.583 3	0.596 8	0.598 5	0.598 1	0.599 5	0.597 3	0.595 9

表4 网络规模为60时参数优化仿真结果

参数	实验次数/次								平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$W(G)$	149.298 0	146.547 8	144.895 1	151.623 6	148.246 8	146.998 2	147.852 2	149.748 4	148.151 3
$\mu(G)$	1.870 0	1.493 5	1.267 2	2.188 3	1.726 1	1.555 2	1.672 1	1.931 6	1.713 0
E_p	0.032 3	0.019 5	0.012 2	0.043 6	0.027 3	0.021 6	0.025 5	0.034 4	0.027 0
T_R	88.888 6	95.168 0	99.188 0	83.949 4	91.230 5	94.105 2	92.127 9	87.906 3	91.570 5
λ_2	0.554 2	0.535 2	0.548 6	0.567 1	0.572 4	0.559 6	0.537 1	0.551 9	0.553 3

MATLAB 仿真对比了 ABC-RNDS 和对照方案 O3DwLC 的网络性能。仿真结果表明,ABC-RNDS 能够有效提升 WSN 的网络寿命,下一步将研究基站移动性对网络寿命的影响。

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
REN F Y, HUANG H N, LIN C. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] 王翥, 王祁, 魏德宝, 等. 无线传感器网络中继节点布局算法的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 95-104.
WANG Z, WANG Q, WEI D B, et al. Relay node placement and addition algorithms in wireless sensor networks [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 95-104.
- [3] SONG W, HUANG R, XU M, et al. Design and deployment of sensor network for real-time high-fidelity volcano monitoring [J]. IEEE Transactions on Parallel Distributed System, 2010, 21(11): 1658-1674.
- [4] YANG I, KE X, HAN S T. Optimal node placement strategies of linear wireless sensor networks with sensor node uniformly distributed[C]//Chinese Control Conference, July 26-28, 2013, Xi'an, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 7365-7370.
- [5] 王翥, 吕翠翠, 王玲. 无线传感器网络中继节点的布局算法[J]. 仪器技术与传感器, 2014(1): 85-88.
WANG Z, LV C C, WANG L. Relay node placement algorithm in wireless sensor networks [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(1): 85-88.
- [6] 魏德宝. 无线传感器网络中继节点设置算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
WEI D B. Research on relay node placement algorithm in wireless sensor networks [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [7] AL-TURJMAN F, HASSANEIN H, IBNKAHLA M. Connectivity optimization for wireless sensor networks applied to forest monitoring[C]//IEEE International Conference on Communications, June 14-18, 2009, Dresden, German. New Jersey: IEEE Press, 2009: 145-159.
- [8] AL-TURJMAN F, HASSANEIN H, IBNKAHLA M. Efficient deployment of wireless sensor networks targeting environment monitoring applications[J]. Computer Communication, 2013, 36(2): 135-148.
- [9] MINI S, UDAGATA S K, SABAT S L. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensor Journal, 2014, 14(3): 636-644.
- [10] ABIDIN H, DIN N, YASSIN I, et al. Sensor node placement in wireless sensor network using multi-objective territorial predator scent marking algorithm[J]. Arabian Journal Forence & Engineer, 2014, 39(1): 6317-6325.
- [11] LEE S, YOUNIS M. Optimized relay placement to federate segments in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans Select Area Commun, 2010, 28(5): 742-752.
- [12] XU K, HASSANEIN H, TAKAHARA G, et al. Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2): 145-159.
- [13] 张先迪, 李正良. 图论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
ZHANG X D, LI Z L. Graph theory and application[M]. Beijing: High Education Press, 2005.
- [14] 罗钧, 李研. 具有混沌搜索策略的蜂群优化算法 [J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1913-1916.
LUO J, LI Y. Artificial bee colony algorithm with chaotic-search strategy[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1913-1916.

[作者简介]



刘开南(1970-),男,博士,三亚学院信息与智能工程学院教授,CCF 会员(E200030723M),主要研究方向为数据挖掘与模式识别。



韩旭(1980-),女,河南牧业经济学院信息与电子工程学院硕士生,主要研究方向为通信网络。