

文章编号:1671-6833(2022)01-0041-07

一种基于自适应信息素蒸发系数的 WSN 蚁群路由算法

王 恭<sup>1</sup>, 孙铭阳<sup>1</sup>, 孙汇阳<sup>2</sup>, 滕子铭<sup>3</sup>

(1.东北电力大学 自动化工程学院,吉林 吉林 132012; 2.北京电子科技学院 密码科学与技术系,北京 100070; 3.吉林大学 通信工程学院,吉林 长春 130012)

**摘 要:**目前无线传感器网络中存在的蚁群环路现象和网络节点能量分布不均衡等问题,容易导致节点过早休眠、网络生存周期短。以现有蚁群算法为基础,重构蚂蚁数据包包头结构,在前向蚂蚁数据包中增加数据包序列号、数据包源地址、数据包途径节点数目、途径中继节点消耗的全部能量、路径长度和数据包生存时间,在后向蚂蚁数据包中增加数据包初始能量和平均剩余能量等数据;重新设计信息素更新公式,引入自适应信息素蒸发系数,将路由跳数修正为多跳消耗的能量值,提高信息素更新公式的准确性,使网络中各节点的能量消耗更均衡;改进信息素增量公式,将数据包访问过的节点数重新定义为节点能量损耗函数,在信息素更新公式中,通过修正节点能量损耗函数,可以真实有效地反映出真实的节点能量损耗,提高信息素增量的精确度。通过仿真实验对比,结果表明:改进算法最短寻优路径缩短了 5.7%,网络中节点死亡数均小于其他两种对比算法。改进算法可以有效削弱蚂蚁环路效应,提高算法收敛速度,平衡网络节点能量,延长网络寿命。

**关键词:**无线传感器网络;环路效应;自适应信息素蒸发系数;路由;节点能量

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.01.006

0 引言

无线传感器网络 ( wireless sensor network, WSN)是由一系列具有感知、计算和无线通信能力的节点组成的无线网络,可以使用户对特定的环境和场合进行数据采集、处理和传输。在实际的应用当中,无线传感器网络受到其中各节点的计算能力、无线通讯能力、储存能力和能量供给能力等诸多限制,这就要求各个节点在传输信息时,要充分合理地利用有限的能量,提高能量的使用效率,从而延长无线传感器网络的生存时间。综上所述,选取合适的路由算法来提高节点在信息传输的能量使用效率,成为近年来无线传感器网络的重要研究内容。

蚁群算法是由 Dorigo 等<sup>[1]</sup>提出的仿生寻优算法,该算法具有正反馈和较强的鲁棒性等特点,在解决路径规划问题时效果较好。基于蚁群算法的路由协议被提出后,引起了各方学者的广泛关注。

Gravett 等<sup>[2]</sup>提出的 DAR 被动路由算法,限制前向蚂蚁包只使用信息素浓度作为选择下一跳节点的概率,后向蚂蚁在回到源节点的过程中释放信息素浓度为常量,从而节省在传输中损耗的能量,达到较小网络开销的目的,但因为后向蚂蚁更新的信息素为非真实值,导致选择下一跳概率不准确。Bean 等<sup>[3]</sup>提出了一种 ARA 路由算法,将各节点中的信息素浓度储存在路由表中,通过多次迭代不断更新在各节点中的信息素浓度,从而影响蚂蚁包在选择下一跳节点的概率。在该路由算法中,除汇聚节点以外,其余节点自身携带能量是有限的,当数据包多次经过某一节点时,节点因能量损耗会过早进入休眠状态,下一代蚂蚁无法再次经过该节点,因为其在选择节点时收敛过于迅速,从全局的角度来看容易使得网络陷入局部最优。李宪强等<sup>[4]</sup>提出一种精英蚁群算法,将每一次算法迭代中最优个体的信息素保留到下一代中以提高搜索效率,但是如果算法初期留存的信息素不够具有代表性,会导致算法寻优精度

收稿日期:2021-03-10;修订日期:2021-05-23  
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1500800);吉林省科技厅技术攻关项目(20190303023SF);国家电网科技合作项目(SGTJDK00DYJS2000148)  
作者简介:王恭(1980—),男,吉林吉林人,东北电力大学高级实验师,博士,主要从事新能源综合利用、新型节能技术研发等方面的研究,E-mail:wg\_neiep@163.com。

较差。

Maheshwari 等<sup>[5]</sup>提出的 LEACH 低功耗自适应簇分层型路由算法,与传统的通用多条协议相比,适用于低能耗网络,但该算法在一定程度上增加了算法复杂度,导致收敛速度较慢。Camilo 等<sup>[6]</sup>提出的 EEABR 伪随机路由算法采用伪随机的方式来发现目标路径,通过预估下一跳节点剩余能量,来影响下一跳节点概率,可加快算法的收敛,并减小网络开销,但过快的收敛速度很容易使搜寻路径陷入局部最优,从而影响了算法的准确性。Sun 等<sup>[7]</sup>提出的 EEABR 路由算法解决了原有蚁群算法在传输数据时对节点能量的过量损耗等问题,但没有考虑因缩短蚂蚁包存放的路径信息,导致蚂蚁包在传输过程中易生成蚁群环路的现象,从而导致节点多余的能量损耗。

为避免数据在节点间反复回传,发生蚁群环路和信息素增量计算不准确,导致节点能量开销增大、影响网络生命周期等问题,本文在 EEABR 算法的基础上,提出了一种基于自适应信息素蒸发系数的改进蚁群路由算法 APECARA (adaptive pheromone evaporation coefficient based ant colony routing algorithm)。该算法在前向蚂蚁数据包中添加生存时间、前向蚂蚁数据包源地址和序列号,避免数据包回传问题,有效削弱蚁群环路现象,同时改进原有算法的信息素公式,提高信息素公式准确性,从而在延长网络生命周期的同时,达到有效均衡无线传感器网络中各节点能量的目的<sup>[8-9]</sup>。

## 1 系统模型

### 1.1 数学模型

本文将 WSN 描述为一个无向加权图<sup>[10]</sup>  $G = (V, E)$ 。其中顶点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_r, \dots, v_s, \dots, v_m\}$  表示 WSN 中所有节点的集合,所有节点间链路的集合  $E = \{e_{12}, e_{13}, \dots, e_{rs}, \dots, e_{jk}\}$ ,网络中所有可能存在链路的节点集合  $C = \{c_{12}, c_{13}, \dots, c_{rs}, \dots, c_{gh}\}$ ,假设  $d$  为节点有效通信距离,且  $\sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2} \leq d$ ,节点  $r$  和节点  $s$  之间的链路和可能存在的有效链路分别表示为  $e_{rs} = e(v_r, v_s) \in E$  和  $c_{rs} = c(v_r, v_s) \in C$ 。

在 WSN 中,确定任意两节点间是否存在有效链路<sup>[11]</sup>可以用式(1)表示:

$$\begin{cases} c(r, s) = c(s, r) = 1, \text{当 } r \text{ 和 } s \text{ 之间存在链路;} \\ c(s, r) = c(r, s) = 0, \text{其他。} \end{cases} \quad (1)$$

假设在 WSN 中只存在唯一汇聚节点  $z, z \in V$ ,源节点表示为  $w \in \{V - \{z\}\}$ 。

### 1.2 EEABR 路由算法

EEABR 算法<sup>[6]</sup>将优化的重点放在如何降低节点能量消耗,通过减少节点存储 ID 数量<sup>[12-13]</sup>,降低节点能耗开销,提升网络寿命,以取得全局最优解。

在无线传感器网络中,每间隔一段时间在各个节点发出一个数据包,即前向蚂蚁数据包  $k$ ,其访问过的节点都会以节点标识的形式储存在邻居列表中。前向蚂蚁数据包  $k$  从源节点出发,更新沿途经过路径和节点的信息素浓度,最终到达汇聚节点。汇聚节点接收到数据包后,利用信息素公式并把计算后的信息素通过储存在后向蚂蚁数据包中的方式,将数据传回源节点。通过一次完整的蚂蚁包收发过程,标志着源节点到汇聚节点的信息素浓度更新完成。

前向蚂蚁选择下一跳节点的概率为

$$P_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[T(r, s)]^\alpha [E(s)]^\beta}{\sum_{u \in M_k} [T(r, u)]^\alpha [E(u)]^\beta}, & \text{当 } s \notin M_k; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_k(r, s)$  为前向蚂蚁数据包  $k$  在  $r$  节点时选择  $s$  节点作为下一跳节点的概率; $T(r, s)$  为储存在节点  $r$  和节点  $s$  路径上的信息素浓度,被储存在邻居列表中; $M_k$  为蚂蚁数据包  $k$  当前经过所有节点的集合; $E(u)$  为节点  $u$  的可见性函数; $E(s)$  为节点  $s$  的可见性函数,即

$$E(s) = \frac{1}{E_{\text{ini}} - e_s} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{ini}}$  为节点初始能量值; $e_s$  为节点实际能量值,当节点  $s$  损耗的能量越大,节点  $s$  作为下一跳节点的概率越低。

当汇聚节点接收到前向蚂蚁数据包后,随即生成后向蚂蚁数据包,节点间的路径信息素浓度  $T_k(r, s)$  按式(4)进行更新:

$$T_{k+1}(r, s) = (1 - \rho)T_k(r, s) + \Delta T_k(r, s) \quad (4)$$

式中: $\rho$  为蚂蚁包走过路径上的信息素蒸发系数; $T_k(r, s)$  为蚂蚁数据包  $k$  从节点  $r$  到节点  $s$  途径路径上的信息素浓度; $\Delta T_k(r, s)$  为信息素增量。

EEABR 路由算法计算信息素增量  $\Delta T_k(r, s)$  如式(5)所示:

$$\Delta T_k(r, s) = \frac{1}{E_{\text{ini}} - \frac{E_{\text{Min}}^k - F_d^k}{E_{\text{Avg}}^k - F_d^k}} \quad (5)$$

式中:  $E_{\min}^k$  为前向蚂蚁数据包  $k$  访问过节点的最小能量;  $E_{\text{Avg}}^k$  为前向蚂蚁数据包  $k$  访问过节点的平均能量;  $F_d^k$  为前向蚂蚁数据包  $k$  访问过的节点数目;  $E_{\text{ini}}$  为节点的初始能量。

## 2 改进路由算法 APECARA

在 EEABR 路由算法中,将蚂蚁包分别定义为蚂蚁数据包和 Hello 数据包。WSN 中各个节点通过广播 Hello 数据包建立和维护与之对应的邻居列表,利用蚂蚁数据包传输数据和进行路径优化。本文提出的 APECARA 算法将在蚂蚁数据包和节点邻居列表中添加 TTL(蚂蚁数据包生存时间)、pkt\_src(前向蚂蚁数据包源地址)和 seq(前向蚂蚁数据包序列号),增加前向蚂蚁数据包的序列号和源地址,可有效减少在传输数据时产生的蚁群环路效应;改进原有信息素蒸发系数和信息素增量公式,解决中继节点因能量消耗,过早进入休眠的问题,提高网络节点能量均衡性和路径寻优准确性。

### 2.1 削弱蚁群环路效应

在无线传感器网络中,相邻的几个节点在传输蚂蚁数据包时,同一数据在相同几个节点传输多次,形成蚁群环路效应,严重影响了能量传输效率,造成不必要节点能量损耗。

图1分别为两种环路网络,节点 A、D 生成的数据包发生数据回传现象,将被锁定在局部网络中,二者的剩余能量将远低于 WSN 中其余节点平均能量,致使陷入环路的节点过早进入休眠状态,从而造成不必要的能量浪费,最终影响寻优结果。

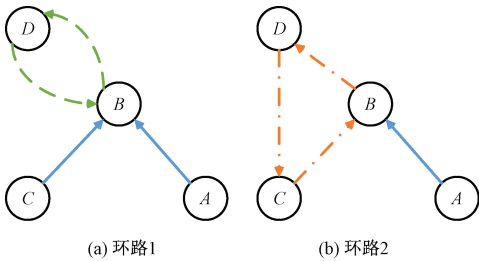


图1 网络环路

Figure 1 Network loop

针对在 WSN 中出现的蚁群环路效应,本文通过对蚁群环路效应的分析,重构了前向蚂蚁数据包包头结构和后向蚂蚁数据包包头结构。添加前向蚂蚁数据包序列号 seq 和前向蚂蚁数据包源地址 pkt\_src 并对蚂蚁数据包生存时间 TTL 进行约束。

前向蚂蚁数据包包头结构由 pkt\_src、seq、E\_s、E\_m、F\_d、Fromsrc\_len 和 TTL 等组成。其中 pkt\_

src 和 seq 分别为前向蚂蚁数据包源地址和序列号, E\_s 为该数据包途径中继节点消耗的全部能量, E\_m 为该数据包经过的所有中继节点中损耗能量最低值, F\_d 为该数据包经过的节点数, Fromsrc\_len<sup>[14-15]</sup> 为该数据包走过路径长度, TTL 表示为该数据包的生存时间。TTL 限制前向蚂蚁数据包生存时间,每经过一个节点 TTL 值减小 1,当 TTL=0 时,前向蚂蚁数据包被放弃。通过添加 pkt\_src 和 seq 到前向蚂蚁数据包,可以有效避免数据在临近节点反复回传:在发生或将要发生回传现象时,蚂蚁数据包头中 <pkt\_src, seq> 的组合项生效,使接收端节点感知到已经收发过此数据包,因此发送端节点会将数据优先传输给未有标识项的其他节点,最终达到削弱网络环路的目的。

邻居列表通过 Hello 包维护和更新,用于记录邻居节点的信息,该表结构由 Neigh\_addr、pheromone、Neigh\_eng 和 hops 组成。其中 Neigh\_addr 为邻居节点地址, pheromone 为邻居节点与当前节点路径上的信息素浓度, Neigh\_eng 为当前邻居节点所具有的能量, hops 为前向蚂蚁数据包途径中继节点的个数。

后向蚂蚁数据包包头结构由 pkt\_src、E\_i、E\_a、pheromone、Next\_haddr 和 TTL 组成。其中 E\_i 为节点初始能量, E\_a 为经过路径的平均能量。

### 2.2 修正信息素更新公式

在蚁群路由算法的一次迭代中,当多个蚂蚁数据包经过同一节点时,该节点的路由数增加,伴随着节点能量损耗加快,该节点会过早地进入休眠状态,同时加快了蚁群路由算法的收敛速度,最终影响到寻优路线的准确性,更容易获得局部最优解。

为使网络中节点能量更加均衡,本文在式(4)的基础上,改进了信息素蒸发系数  $\rho$ , 将其重新定义为自适应信息素蒸发系数,并得到全新的信息素更新公式:

$$\delta = \rho(1 + \lg n); \quad (6)$$

$$T_{k+1}(r, s) = (1 - \delta)T_k(r, s) + \Delta T_k(r, s)。 \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为自适应信息素蒸发系数;  $n$  为节点路由数,当  $n$  增加时,自适应信息素蒸发系数值  $\delta$  增加,信息素持久函数  $(1 - \delta)$  减小,节点  $r$  到节点  $s$  的信息素浓度  $T_k(r, s)$  减小,从全局的角度来看,降低了下一次蚂蚁数据包选择该节点的概率,从而平衡 WSN 中节点能量,获取更理想的全局最优路径。

在计算信息素增量  $\Delta T_k(r, s)$  时,现有的

EEABR路由协议与基本的蚁群路由协议的区别在于传统的路由算法在设计时,疏忽对各节点能量损耗的考量而更倾向于对路径的寻优。这样设计的好处在于各节点剩余能量充沛时,往往可以得到最佳的路径。但是在实际数据传输过程中使同一节点多次传输数据可能导致该节点能量过度损耗,会过早进入休眠状态,从而影响最终路径的优化。

因此本文对式(5)进行改进和优化如式(8)所示。将前向蚂蚁访问过的节点数  $F_d^k$  重新定义为前向蚂蚁  $k$  访问过的节点能量损耗函数  $EF_d^k$ ,如式(9)所示。其中,  $Ant_{Len}$  为前向蚂蚁数据包长度;  $e_b$  为传输 1 bit 信息量所损耗的能量。在信息素增量公式中,通过修正节点能量损耗函数  $EF_d^k$ ,可以有效反映出真实的节点能量损耗值,并最终影响信息素增量的准确性。

$$\Delta T_k(r,s) = \frac{1}{E_{ini} - \frac{E_{Min}^k - EF_d^k}{E_{Avg}^k - EF_d^k}}; \tag{8}$$

$$EF_d^k = e_b \cdot F_d^k \cdot Ant_{Len} \circ \tag{9}$$

3 APECARA 路由算法流程

**Step 1** 广播 Hello 数据包。在 APECARA 路由算法运行的初期,各节点广播 Hello 数据包来搭建临近节点的相互关系,将每条相邻路径上的信息素浓度设置为 1,为计算下一跳概率做好准备。

**Step 2** 发送前向蚂蚁数据包。由源节点向下一跳节点发送前向蚂蚁数据包,该数据包每经过一个中继节点时都按式(2)计算下一跳中继节点概率,同时把访问过的中继节点储存在邻居列表中,前向蚂蚁数据包发送流程如图 2 所示。

**Step 3** 汇聚节点向源节点发送后向蚂蚁数据包。如图 3 所示,前向蚂蚁数据包到达汇聚节点后,该节点随即生成后向蚂蚁数据包,该数据包中的信息素浓度按照式(7)进行更新,完成信息素更新后的后向蚂蚁数据包返回到源节点时,该数据包随即死亡,标志着一次蚂蚁数据包的收发完成。

4 仿真实验及算法结果对比

为验证 APECARA 算法改进后的有效性,对改进后的算法进行仿真实验,并与现有的典型蚁群路由算法 EEABR、ARA 进行对比,通过实验得出相应的数据和曲线,并分析本文算法的性能。

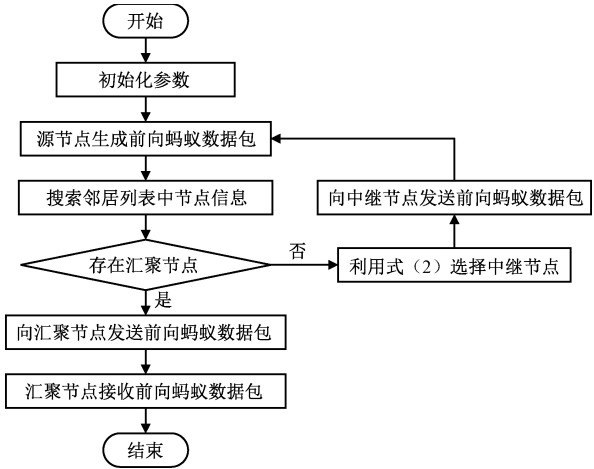


图 2 前向蚂蚁数据包发送流程  
Figure 2 Flow chat of forward ant package transmit

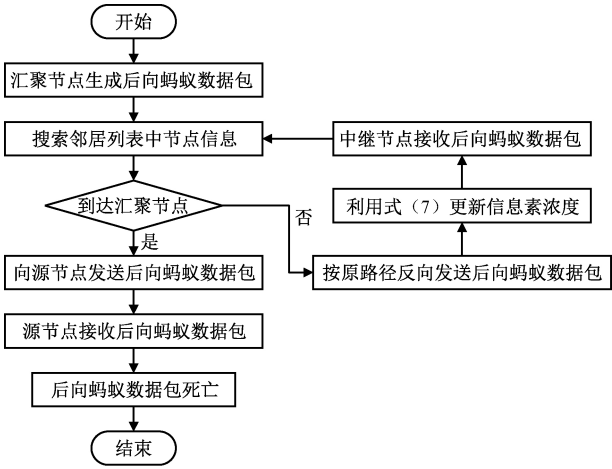


图 3 后向蚂蚁数据包发送流程  
Figure 3 Flowchat of backward ant package transmit

4.1 实验环境及相关参数

本文实验环境采用 MATLAB R2016a 搭建仿真平台,仿真环境设置为 10 m×10 m 的封闭、无干扰的正方形区域内部署 100 个节点。无线传感器网络为同构静态网络,拓扑结构采用平面网状结构,其他仿真参数如表 1 所示。部署结果如图 4 所示,其中正方形节点为源节点,圆形节点为中继节点,五角星形节点为汇聚节点,细实线代表各节点间的链路,粗实线代表改进算法收敛后的最短路径。

4.2 仿真分析

4.2.1 网络能量消耗

在无线传感器网络中,各节点的消耗能量越小,则网络生存时间越长。图 5 对应 3 种蚁群路由算法的 20 个节点所消耗的能量。从图 5 中可以看出,本文提出的蚁群改进算法在收敛后的大部分节点能耗低于 EEABR 和 ARA 算法,这得益

表 1 仿真实验参数设置

Table 1 Parameters settings of simulation experiment

参数	取值
迭代次数	100
节点初始能量/J	1
汇聚节点能量/J	100
发送功率(txPower)/W	0.04
接收功率(rxPower)/W	0.02
节点通信距离/m	1.5
启发因子 $\alpha$	1
期望启发因子 $\beta$	5
源节点坐标/m	(0, 0)
汇聚节点坐标/m	(10, 10)
数据包大小/Byte	256

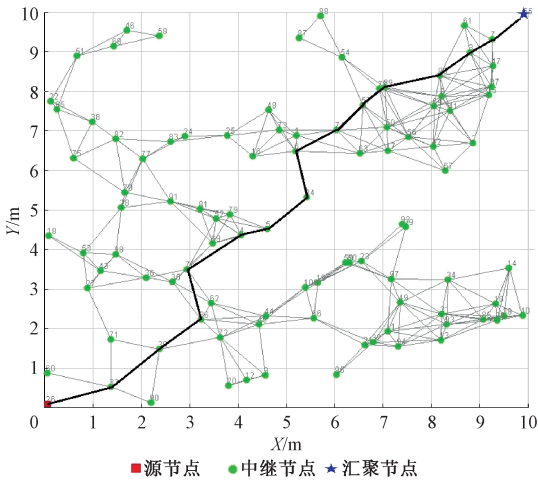


图 4 节点分布图

Figure 4 Distributed node graph

于本文在改进的信息素更新公式中将路由跳数更改为节点能量损耗函数,通过修正  $EF_a^k$ ,使信息素增量更加趋于真实值,提升了下一跳节点概率的准确性。对比其他两种算法,APECARA 算法在网络能量消耗方面更具优势。

从图 6 可以看出,本文提出的改进算法,在迭

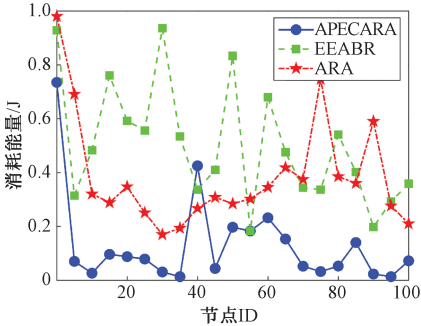


图 5 节点消耗能量

Figure 5 Energy consumption of the node

代初期对于节点平均剩余能量的大小并未有明显优势,这是因为改进的算法为了削弱路径中出现蚂蚁环路效应,在前向蚂蚁数据包中添加了生存时间、源地址和序列号 3 种标识,增加了节点发送数据的开销。随着仿真实验的进行,改进算法的节点平均剩余能量明显低于 EEABR 和 ARA 算法的节点平均剩余能量,这是由于本文改进算法考虑了路径上节点的路由数和前向蚂蚁数据包途径节点损耗能量,提高了下一跳概率的准确性,避免了网络中生成冗余节点,降低了节点传输数据开销的同时延长了网络寿命。

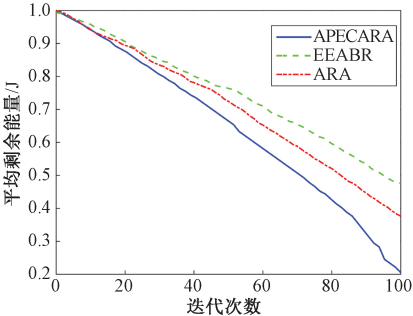


图 6 节点平均剩余能量

Figure 6 Average remaining energy of the node

4. 2. 2 路径曲线收敛速度

路径收敛速度表明了各算法的寻优能力。在图 7 中,本文提出的改进算法的最短路径与 ARA 相比缩短了 5.7%。在初始迭代时改进算法的收敛速度与 EEABR 和 ARA 算法相比较慢,这是因为本文改进的算法中提出了自适应信息素蒸发系数这一概念。从全局的角度来看,这是为了防止网络中同一节点的路由数过多,造成单一节点能量损耗过大,使节点过早陷入休眠状态,但同时也会提高数据包选择更远的节点作为下一跳节点的概率,故在算法计算初期,收敛速度较慢。随着算法迭代次数的增加,引入的自适应信息素蒸发函数提高了下一跳概率的准确性,使网络中节点能量更加均衡,达到了获取全局最优的目的。

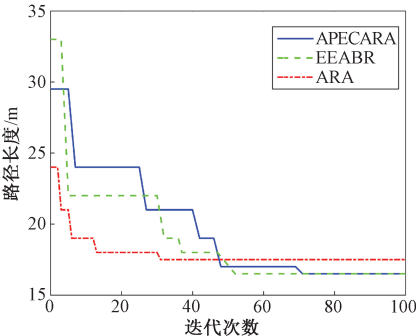


图 7 路径收敛曲线

Figure 7 Convergence curve of the path

4.2.3 网络生存周期

仿真实验将网络中剩余节点数和节点死亡数作为评判网络生命周期优劣的重要考量参数。

因上述仿真实验中,3 种算法均在 100 次迭代内各自完成收敛,故图 8 分别对比了 3 种算法在各自完成第 100 次迭代时的节点死亡数目,从图 8 中可以看出,在网络中 ARA 算法和 EEABR 算法的节点死亡数均高于本文提出的改进算法,其中 ARA 算法收敛迅速,造成死亡节点的自身路由数目较多,单一节点能量过度损耗,导致网络中死亡节点数较多,网络生存周期较短。

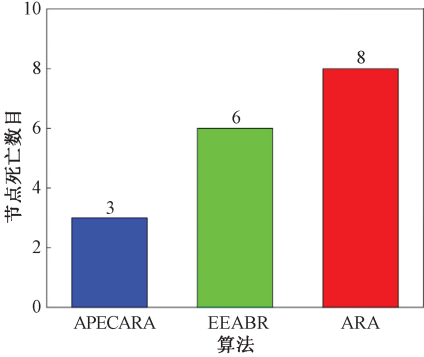


图 8 节点死亡数目

Figure 8 Number of node deaths

为了进一步验证本文提出的改进算法的网络生命性能,仿真实验对比各算法不同迭代次数对应的死亡节点数,如图 9 所示,在 ARA 算法和 EEABR 算法中,节点首次死亡分别出现在第 28 次迭代和第 41 次迭代时,而改进算法节点首次死亡出现在第 58 次迭代。由实验可知,两种对比算法的首次节点死亡时间均早于本文的改进算法。随着算法迭代的终止,APECARA 算法的剩余节点数均高于 EEABR 和 ARA 算法。这说明 APECARA 算法延长了网络生存周期。

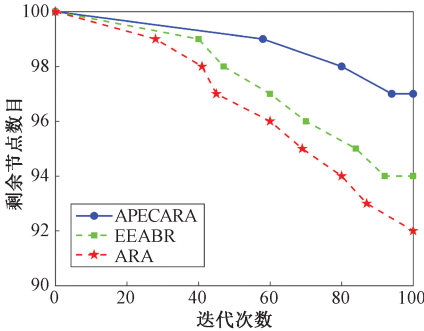


图 9 剩余节点数目

Figure 9 Number of survived nodes

5 结论

本文在深入研究典型蚁群路由算法的基础

上,对 EEABR 路由算法进行了研究与分析,提出了改进蚁群路由算法(APECARA)来解决无线传感器网络中的蚁群环路效应、能量分布不均和网络生命周期较短等问题。通过在前向蚂蚁数据包中添加生存时间、源地址和序列号,同时改进了信息素更新公式,引入节点路由数和数据包途径节点损耗能量,平衡了网络中节点能量分布。通过仿真实验的对比与分析可知,改进算法的寻优最短路径较对比算法缩短了 5.7%,算法终止迭代时,剩余节点数均高于对比算法。证明改进后的蚁群路由算法可以有效削弱蚁群环路效应,在兼顾网络中节点能量均衡性的同时延长了网络生命周期。未来的主要工作将侧重研究启发因子  $\alpha$  和期望启发因子  $\beta$  对信息素及下一跳概率函数的影响,以提出自适应的启发因子和期望启发因子,从而进一步提升整个网络的性能。

参考文献:

[1] DORIGO M,MANIEZZO V,COLORNI A.Ant system; optimization by a colony of cooperating agents [ J ]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part B (cybernetics), 1996, 26(1): 29-41.

[2] GRAVETT A S, PLESSIS M C, GIBBON T B. A distributed ant-based algorithm for routing and wavelength assignment in an optical burst switching flexible spectrum network with transmission impairments [ J ]. Photonic network communications,2017,34(3):375-395.

[3] BEAN N,COSTA A.An analytic modelling approach for network routing algorithms that use “ant-like” mobile agents[ J ].Computer networks, 2005,49(2):243-268.

[4] 李宪强,马戎,张伸,等.蚁群算法的改进设计及在航迹规划中的应用[ J ].航空学报,2020,41(增刊2):213-219.

[5] MAHESHWARI P,SHARMA A K,VERMA K.Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization[ J ].Ad hoc networks,2021,110:102317.

[6] CAMILO T,CARRETO C,SILVA J S,et al.An energy-efficient ant-based routing algorithm for wireless sensor networks [ C ]//Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. Berlin: Springer, 2006: 49-59.

[7] SUN G D,SHANG X N,ZUO Y.La-CTP: loop-aware routing for energy-harvesting wireless sensor networks [ J ]. Sensors,2018,18(2):434-454.

[8] 张文柱,孔维鹏,高鹏,等.基于改进蚁群算法的无线传感网络路由算法研究[ J ].计算机测量与控制, 2020,28(7):274-279.

[9] 冯冬青,邢凯丽.基于能量平衡的无线传感器网络

分布式成簇机制[J].郑州大学学报(工学版), 2015,36(3):6-10.

[10] 童孟军,俞立,郑立静,等.基于蚁群算法的无线传感器网络能量有效路由算法研究[J].传感技术学报,2011,24(11):1632-1638.

[11] LI F, LIU M, XU G W. A quantum ant colony multi-objective routing algorithm in WSN and its application in a manufacturing environment[J]. Sensors, 2019, 19(15):3334-3348.

[12] KULKARNI P K H, JESUDASON P M. Multipath data transmission in WSN using exponential cat swarm and fuzzy optimisation[J]. IET communications, 2019, 13(11):1685-1695.

[13] 滕志军,张帆,宋明辉.无线传感器网络能量均衡蚁群路由算法[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(1):327-332.

[14] NAVNATHDATTATRAYA K, RAO K R. Maximising network lifetime and energy efficiency of wireless sensor network using group search ant lion with levy flight[J]. IET communications, 2020, 14(6):914-922.

[15] ANANDH S J, BABURAJ E. Energy efficient routing technique for wireless sensor networks using ant-colony optimization[J]. Wireless personal communications, 2020, 114(4):3419-3433.

**An Adaptive Pheromone Evaporation Coefficient Based Ant Colony Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks**

WANG Gong<sup>1</sup>, SUN Mingyang<sup>1</sup>, SUN Huiyang<sup>2</sup>, TENG Ziming<sup>3</sup>

(1.School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2.Department of Cryptographic Science and Technology, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China; 3.College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** At present, the ant colony loop phenomenon and uneven energy distribution of nodes in the wireless sensor networks could cause nodes to go dormant prematurely and shorten the network lifetime. To improve the accuracy of the pheromone update formula and further balance nodes energy consumption, the following improvements could be made based on the original ant colony algorithm: add data into ant data packet, such as the sequence number of the forward ant data packet, the source address on the packet of the forward ant, number of packet path nodes, energy consumed by relay nodes, length of path, survival time of the ant data packet, initial energy and average remaining energy of packet. The adaptive evaporation coefficient could be introduced into the pheromone update formula whose number of routing hops was altered to the energy consumption of multiple hops; the pheromone increment formula could be improved, the number of nodes visited by packets was redefined as the node energy loss function. In experimental results, there was a 5.7 percent reduce in the shortest path. It was obvious that this algorithm could effectively mitigate the ant loop effect, balance nodes energy consumption and extend the network lifetime.

**Keywords:** wireless sensor network; loop effect; adaptive pheromone evaporation coefficient; routing; node energy