

文章编号:1001-9081(2015)07-1815-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2015.07.1815

## 有效能量空洞避免的无线传感器网络混合多跳路由算法

杨晓峰\*, 王睿, 彭力

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

(\*通信作者电子邮箱 ulrical122@126.com)

**摘要:**针对在无线传感器网络(WSN)的分簇路由算法中,节点之间能量消耗不均衡容易引发“能量空洞”现象的问题,在研究平面和层次路由协议的基础上,提出了一种有效能量空洞避免的混合多跳路由算法。首先,引入热点区域划分的概念对监测区域进行划分;然后,在分簇阶段,对热点区域外的节点采用非均匀分簇结构,融合簇内数据以减少流入热点区域的数据量;其次,对热点区域内的节点不采取分簇以降低区域内节点的分簇能耗;最后,在簇间通信阶段,通过粒子群优化(PSO)算法寻找同时满足相邻两跳间最大通信距离的最小化和最大通信跳数的最小化的最优传输路径,实现整个网络的能量消耗最低。理论分析和实验结果均表明,所提算法在能量有效性和能耗均衡分配方面都要优于基于增强学习的生命期优化路由协议(RLLO)和基于模糊理论的多层次分簇式路由协议(MLFC),网络生存周期分别提高了20.1%和40.5%,可以有效避免“能量空洞”。

**关键词:**无线传感器网络;能量空洞;路由协议;粒子群优化;生存周期

**中图分类号:** TP393; TP915.04    **文献标志码:**A

## Hybrid multi-hop routing algorithm of effective energy-hole avoidance for wireless sensor networks

YANG Xiaofeng\*, WANG Rui, PENG Li

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** In the cluster-based routing algorithm of Wireless Sensor Network (WSN), “energy hole” phenomenon was resulted from energy consumption imbalance between sensors. For this problem, a hybrid multi-hop routing algorithm of effective energy-hole avoidance was put forward on the basis of the research of the flat and hierarchical routing protocols. Firstly, the concept of hotspot area was introduced to divide the monitoring area, and then in clustering stage, the amount of data outside the hotspot area was reduced by using uneven clustering algorithm which could integrate data within the clusters. Secondly, energy consumption was cut down in the hotspot area during clustering stage by no clustering. Finally, in inter-cluster communication phase, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was addressed to seek optimal transmission path which could simultaneously meet the minimization of the maximum next hop distance between two nodes in the routing path and the minimization of the maximum hop count, so the minimization of whole network energy consumption was realized. Theoretical analysis and experimental results show that, compared with the Reinforcement-Learning-based Lifetime Optimal routing protocol (RLLO) and Multi-Layer routing protocol through Fuzzy logic based Clustering mechanism (MLFC) algorithm, the proposed algorithm shows better performance in energy efficiency and energy consumption uniformity, and the network lifetime is raised by 20.1% and 40.5%, which can avoid the “energy hole” effectively.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); energy-hole; routing protocol; Particle Swarm Optimization (PSO); life cycle

## 0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)通过大量部署在监测区域内的传感器节点,对网络覆盖区域内感知对象的信息进行采集,并通过无线通信,将融合处理的信息传递到终端用户,在军事侦察、环境监测和灾害救援等领域有着广阔的应用背景<sup>[1-3]</sup>。然而,被监测区域环境的复杂性和不确定性以及匮乏的硬件资源,传感器节点能量有限,补给、更换的难度和代价都很大<sup>[4]</sup>,因此,如何均衡网络能耗,让有限

能量的微型传感器节点所构成的WSN实现最大限度的生存周期,是无线传感器网络路由协议面临的重大挑战。

在无线传感器网络拓扑协议中,平面路由协议简单,具有较强的鲁棒性和健壮性,能够实现网络总能耗的最小化。基于增强学习的生命期优化路由协议(Reinforcement-Learning-based Lifetime Optimal routing protocol, RLLO)<sup>[5]</sup>利用增强学习算法的优势,在传输路径选择时综合考虑节点剩余能量、传输距离和跳数等因素,尽量减少网络的总能耗和均衡网络中各节点能耗,但其可扩展性差,仅适合规模较小的网络场景。

收稿日期:2015-01-19;修回日期:2015-03-18。

基金项目:江苏省产学研联合创新资金—前瞻性联合研究项目(BY2013015-33, BY2014024, BY2014023-362014, BY2014023-25)。

作者简介:杨晓峰(1990-),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由算法;王睿(1990-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络定位算法;彭力(1967-),男,河北唐山人,教授,博士研究生,主要研究方向:视觉传感器网络、人工智能、计算机仿真。

基于分簇算法的层次路由协议可以改善无线传感器网络的能量负载均衡和网络的扩展性,但靠近基站的簇首因承担转发其他节点大量数据的任务,造成负载过大而较早死亡的“热点”问题,引发能量空洞<sup>[6]</sup>。

近年来,许多专家学者针对上述问题提出了非均匀分簇策略<sup>[7-10]</sup>,即利用非均匀的竞争半径来构造大小不一的簇,使靠近基站的簇的规模小于远离基站的簇,靠近基站的簇首为簇间数据的转发预留能量,可以有效缓解“能量空洞”问题。然而这些算法没有充分考虑簇首与基站间最优路径的选择而造成在传输路径上簇首之间能量消耗不均衡的问题。文献[11]在成簇完成后,根据簇首的剩余能量、簇首间的距离和簇首到基站的距离计算权值并以此构建路由树,能够有效均衡各簇首间的通信负载,但是当监测区域较大时,“能量空洞”问题仍不可避免;文献[12]借助蚁群优化算法在传输路径搜索过程中充分考虑路径传输消耗、节点剩余能量、传输距离和跳数等因素,平衡了簇首间的能量消耗,但路径选择太过繁琐,耗能较大,不能有效延长网络的生存周期。

本文在重点分析研究文献[8]中基于模糊理论的多层次分簇式路由协议(Multi-Layer routing protocol through Fuzzy logic based Clustering mechanism, MLFC)的基础上,提出了一种基于粒子群优化的能够实现网络总能耗的最小化,同时均衡网络中各个节点通信负载的混合多跳路由算法。该算法结合了平面和层次路由的优点,可以有效避免“能量空洞”现象,从而显著地延长了 WSN 的生存周期,并且通过仿真实验验证了该算法的可靠性。

## 1 系统模型

### 1.1 能耗模型

本文采用与文献[13]相同的一阶无线通信能耗模型。在此模型中,节点传输数据的能耗主要来自无线收发电路和功率放大电路。其中,功率放大电路的能耗与传输距离、环境有关,分为自由空间模型和多路径衰减模型。节点发送  $k$  比特数据到距离  $d$  的接收器消耗的能量  $E_{\text{TX}}$  和接收器接收  $k$  比特数据消耗的能量  $E_{\text{RX}}$  分别为:

$$E_{\text{TX}}(k, d) = \begin{cases} k \times (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} \times d^2), & d \leq d_0 \\ k \times (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} \times d^4), & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{\text{RX}}(k) = k \times E_{\text{elec}} \quad (2)$$

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{\text{fs}} / \varepsilon_{\text{amp}}} \quad (3)$$

其中: $E_{\text{elec}}$  代表收发电路的能量消耗, $\varepsilon_{\text{fs}}$ 、 $\varepsilon_{\text{amp}}$  为不同信道模型下的功率放大电路能耗系数, $d_0$  是两种模型的通信距离阈值。

### 1.2 网络模型

本文对无线传感器网络的网络结构作如下假设:

1)所有节点都被随机分布在监测区域内,部署完毕后,位置不再发生变化;

2)所有节点(基站除外)初始能量相同且有限,一旦耗尽,节点不工作;

3)每个节点具有唯一的 ID 号;

4)节点无线发射功率可调;

5)节点间距离可根据两者间的信号强度近似计算得到。

## 2 基于粒子群优化的混合多跳路由算法

为了延长网络的生存周期,避免“能量空洞”问题的出现,本文提出了一种基于粒子群优化的混合多跳路由算法。

该算法将监测区域分为热点区域和非热点区域,采用 MLFC 算法对非热点区域进行非均匀分簇,而对热点区域不采取分簇;数据传输阶段,在非热点区域的簇首和热点区域内的节点之间通过粒子群优化算法构造满足相邻两跳间的通信距离最大值的最小化和监测区域内所有可能的传输路径中通信跳数最大值的最小化条件的最优路由树,将簇首和热点区域内的节点采集融合到的数据信息发送到基站。

### 2.1 热点区域划分

当节点以多跳通信的方式将数据传输至基站时,靠近基站的节点由于转发大量数据而负载过重,可能过早耗尽能量而失效,将导致基站从网络中被隔离出来,这是“热点”问题。本文将基站节点的最大通信距离的内部区域定义为热点区域,如图 1 所示。

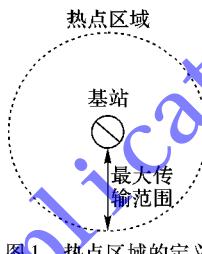


图 1 热点区域的定义

在以基站为基础的 WSN 中,多到一的数据通信流量汇聚模式会使靠近基站的节点收发的数据量多于远离基站的节点,这将导致靠近基站的节点以一种更快的方式耗尽自身的能量,继而迅速死亡。当所有位于热点区域内的节点死亡的时候,基站就无法获取那些仍活着的节点发送的数据。由于缺乏基站和热点区域外节点之间的可用路由,尽管网络中的剩余能量还很多,实际上整个 WSN 已经失效了。

### 2.2 非均匀分簇阶段

通过 MLFC 算法对热点区域外的节点进行非均匀分簇,MLFC 采用轮循环机制,每轮可以分为以下几个步骤:

1)为了构造不同规模的簇,根据通信距离与能量的关系将网络分为多个层,使得距离热点区域近的簇的规模小于远离热点区域的簇。节点根据与热点区域的距离确定自己所在的层级。每层的簇首数目由该层的节点数和与热点区域的距离决定,离热点区域远的层的簇首数目少;反之则多。

2)各层基于节点能量、密度和中心度等 3 个变量采用模糊算法选出多个簇首。

3)其他非簇首节点加入距离最近的簇首所形成的簇。

### 2.3 数据通信阶段

由于数据的传输能耗随着节点间的距离呈指数倍增长,因此需要在簇首和热点区域内的节点间形成一个骨干网,实现多跳通信,以节约能耗。本文采用粒子群优化算法,运用加权求和的方法设计满足网络能耗最小化的多目标适应值函数,寻找最优路由树。

#### 2.3.1 适应值函数

在粒子群优化算法应用到本问题域的情况下,适应值函数的设定是否理想直接决定选取的传输路径的优劣。为了整个网络能耗的最小化,设计的适应值函数应该满足以下两个条件:1)任意相邻两跳节点间的通信距离越小越好;2)监测区域内所有传输路径中的最大通信跳数越小越好,因此适应值函数可构造为:

$$\text{fitness} = W_1 \times \text{MaxDist} + W_2 \times \text{MaxHops} \quad (4)$$

其中: $W_1$  和  $W_2$  分别为距离影响因子和跳数影响因子, $W_1$ ,

$W_2 \in [0, 1]$  且  $W_1 + W_2 = 1$ ;  $MaxDist$  为数据通信阶段, 监测区域内任意相邻两跳节点间的最大通信距离;  $MaxHops$  为监测区域内所有传输路径中的最大通信跳数。

### 2.3.2 粒子群初始化

本文算法定义的每个粒子代表着数据传输时不同的路径, 每个粒子的维度  $M$  是相同的, 是非热点区域的簇首数目和热点区域的节点数目的总和。

随机初始化粒子  $i$  的位置  $X_{i,d}, X_{i,d} \in \text{Rand}[0, 1], 1 \leq i \leq N_p, 1 \leq d \leq M$ 。节点  $g_d$  选择下一跳节点  $g_k$  的方法如下:

$$g_k = \text{Index}(P\text{NextHops}(g_d), n) \quad (5)$$

其中,  $\text{Index}(P\text{NextHops}(g_d), n)$  是索引函数, 其功能是在  $P\text{NextHops}(g_d)$  区域内, 返回第  $n$  个单元格的值,  $P\text{NextHops}(g_d)$  是节点  $g_d$  的候选下一跳节点的集合,  $n$  的取值由式(6)确定:

$$n = \text{Ceiling}(X_{i,d} \times |P\text{NextHops}(g_d)|) \quad (6)$$

其中  $\text{Ceiling}$  是向上舍入函数。

现对上文作如下说明: 假设非热点区域的簇首数目和热点区域的节点数目的总和为 10, 可用集合  $\xi = \{g_1, g_2, \dots, g_{10}\}$  表示, 随机均匀分布在监测区域内, 也就是说每个粒子的维度  $M = 10$ , 如图 2 所示。初始化粒子  $i$  的位置  $X_{i,d}$  并用集合  $P_i$  作如下表示:

$$P_i = [0.38, 0.63, 0.46, 0.17, 0.86, 0.73, 0.94, 0.81, 0.34, 0.13] \quad (7)$$

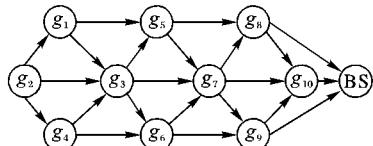


图 2 节点有向无环图

从图 2 中可以清晰看出, 节点  $g_2$  可在集合  $\{g_1, g_3, g_4\}$  选择一个作为自己的下一跳节点。根据集合  $P_i$ , 节点  $g_2$  的位置  $X_{i,2} = 0.63$ , 根据式(6)可求得  $n = 2$ , 再由索引函数可求得节点  $g_2$  的下一跳节点是集合  $\{g_1, g_3, g_4\}$  中的第 2 个, 即节点  $g_3$ 。其他节点也是以相同的方式选择自己的下一跳节点, 计算结果如表 1 所示。

表 1 实验参数

节点	$X_{i,d}$	$P\text{NextHops}(g_d)$	$ P\text{NextHops}(g_d) $	$\text{Ceiling}(X_{i,d} \times  P\text{NextHops}(g_d) )$	$\text{NextHop}(g_d)$
$g_1$	0.42	$\{g_3, g_5\}$	2	1	$g_3$
$g_2$	0.58	$\{g_1, g_3, g_4\}$	3	2	$g_3$
$g_3$	0.61	$\{g_5, g_7, g_6\}$	3	2	$g_7$
$g_4$	0.23	$\{g_6, g_3\}$	2	1	$g_6$
$g_5$	0.77	$\{g_7, g_8\}$	2	2	$g_8$
$g_6$	0.68	$\{g_7, g_9\}$	2	2	$g_9$
$g_7$	0.92	$\{g_8, g_9, g_{10}\}$	3	3	$g_{10}$
$g_8$	0.85	$\{g_{10}, \text{BS}\}$	2	2	$\text{BS}$
$g_9$	0.43	$\{g_{10}, \text{BS}\}$	2	1	$g_{10}$
$g_{10}$	0.23	$\{\text{BS}\}$	1	1	$\text{BS}$

根据表 1 绘制属于粒子  $P_i$  的传输路径, 如图 3 所示。将从表 1 中计算得到的相邻两节点间的通信距离的最大值和从图 3 中得到的通信跳数代入式(4), 可得  $\text{fitness}(P_i)$ 。

### 2.3.3 速度和位置更新

根据式(8)和式(9)更新粒子的速度和位置:

$$V_{i,d}(t) = (w \times V_{i,d}(t-1)) + c_1 \times r_1 \times (X_{\text{best},d} -$$

$$X_{i,d}(t-1)) + c_2 \times r_2 \times (X_{\text{gbest},d} - X_{i,d}(t-1)) \quad (8)$$

$$X_{i,d}(t) = X_{i,d}(t-1) + V_{i,d}(t-1) \quad (9)$$

求出新的位置信息如果满足以下情况需要进行调整:

- 1) 如果新的位置信息的数值是负值或 0, 则随机产生一个新的趋近于零的数值替代当前的位置信息;
- 2) 如果新的位置信息的数值比 1 大, 则用 1 替代当前位置信息。

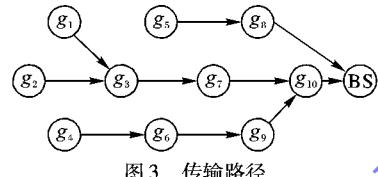


图 3 传输路径

### 2.3.4 算法描述

在数据通信阶段, 利用粒子群优化算法选择最优路径的具体步骤如下。

- 1) 初始化粒子  $i$  的每一维随机速度  $X_{i,d}$ , 并用集合  $P_i$  表示。
- 2) 计算每个粒子  $i$  的适应值  $\text{fitness}(P_i)$ :
  - a) 结合式(5)和式(6)绘制粒子  $i$  的路由树;
  - b) 根据绘制的路由树得到  $MaxDist$  和  $MaxHops$ , 再结合式(4)计算  $\text{fitness}(P_i)$ 。
- 3) 求出个体极值  $P_{\text{best},i}$  和全局极值  $G_{\text{best}}$ 。
- 4) 根据式(8)和式(9)更新粒子的速度和位置并作相应调整。
- 5) 重复步骤 2) ~ 4), 直到预定的迭代次数  $N_p$  为止。
- 6) 根据步骤 5) 得到的个体极值  $P_{\text{best},i}$  和全局极值  $G_{\text{best}}$ , 确定粒子  $i$  的传输路径即为符合条件的最优路径树, 进行数据传输。

### 2.4 算法分析

热点区域内的节点数比热点区域外的少很多, 因此热点区域内的节点产生的数据量和数据传输过程中流入热点区域内的相比, 可以忽略不计, 这意味着热点区域内节点的能耗大部分来自转发热点区域外的数据。所以在热点区域外通过 MLFC 算法构造非均匀分簇结构不仅可以均衡各簇首的网络负载, 而且能够有效减少流入热点区域的数据量; 相反, 热点区域内的节点主要承担转发数据的任务, 对这部分节点采取非均匀分簇是没有必要的, 节省下分簇和采集融合数据过程产生的能量消耗用于数据传输阶段, 更能有效缓解“热点”问题。在簇间通信阶段, 选择同时满足最小化两跳间最大距离和最大通信跳数的路径进行数据传输, 可以使整个网络的能量消耗最小化, 均衡网络负载。

如上面所讨论的, 热点能耗主要来源于转发热点区域外的数据, 所以热点能耗  $E_{\text{Hotspot}}$  如式(10)所示:

$$E_{\text{Hotspot}} = M \times r/d \times E_{\text{TX}}(1, d) \quad (10)$$

$$M = kN(1 - \pi r^2/(4l^2)) \quad (11)$$

其中:  $r$  表示热点区域的半径,  $M$  为流入热点区域的数据量,  $N$  是网络中节点的数目,  $l$  代表监测区域的边长。因为  $\varepsilon_{\text{fs}}d^2 \gg E_{\text{elec}}$ , 所以热点区域能耗可近似由式(12)表示:

$$E_{\text{Hotspot}} = r/d \times \varepsilon_{\text{fs}}d^2 \times kN(1 - \pi r^2/(4l^2)) = \varepsilon_{\text{fs}}krdN(1 - \pi r^2/(4l^2)) \quad (12)$$

为了与平面路由协议 RLLO 和层次路由协议 MLFC 作比

较,现将它们和本文算法的热点能耗作如下规定:

$$E_{\text{Flat}}^{\text{Hotspot}} = \varepsilon_{\text{fs}} k r d_{\text{Flat}} N(1 - \pi r^2 / (4l^2)) \quad (13)$$

$$E_{\text{Hierarchical}}^{\text{Hotspot}} = \varepsilon_{\text{fs}} k r d_{\text{Hierarchical}} \sigma N(1 - \pi r^2 / (4l^2)) \quad (14)$$

$$E_{\text{Hybrid}}^{\text{Hotspot}} = \varepsilon_{\text{fs}} k r d_{\text{Flat}} \sigma N(1 - \pi r^2 / (4l^2)) \quad (15)$$

其中:参数  $d_{\text{Hierarchical}}$  和  $d_{\text{Flat}}$  表示热点区域内 RLLO 和 MLFC 算法的平均传送距离,  $\sigma$  为数据融合比。

通常在无线传感器网络中,簇首的数量远远少于普通节点的数量,这将导致  $d_{\text{Flat}} < d_{\text{Hierarchical}}$ ,而且  $0 < \sigma < 1$ ,故由式 (13) ~ (15) 可得:

$$E_{\text{Hybrid}}^{\text{Hotspot}} / E_{\text{Flat}}^{\text{Hotspot}} = \sigma < 1 \quad (16)$$

$$E_{\text{Hybrid}}^{\text{Hotspot}} / E_{\text{Hierarchical}}^{\text{Hotspot}} = d_{\text{Flat}} / d_{\text{Hierarchical}} < 1 \quad (17)$$

通过式(16)和式(17)可作出如下判定:本文提出的基于粒子群优化的混合多跳路由算法在热点区域内节点的能量消耗这一方面比 RLLO 和 MLFC 算法的更低,可以有效避免因“热点”问题的产生而造成的“能量空洞”现象。

### 3 实验仿真及性能分析

为了更好地评估文中提出的通过解决“热点”问题,实现有效能量空洞避免的混合路由算法的性能,本文采用基于非均匀分簇的 MLFC 算法和平面路由 RLLO 算法对文中提出的混合算法从能耗性和有效性方面加以对比验证。

本文使用 Matlab 对算法进行仿真,仿真环境如下:500 个节点均匀随机分布在半径为 2000 m 的圆形覆盖区域,基站位于监测区域圆心,其他实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

参数	值	参数	值
$\varepsilon_{\text{fs}}$	100 pJ	$c_1$	1.4962
$E_{\text{elec}}$	50 nJ	$c_2$	1.4962
$\varepsilon_{\text{mp}}$	0.0013 pJ	$w$	0.7968
$\sigma$	0.7	最大通信距离	600 m
$N_p$	60	初始能量	1000 J

图 4 对比了距离基站  $d$  m 处的节点在 3 种算法中的平均通信距离。与 RLLO 算法相比,MLFC 算法中点到点的通信距离更远。从图 4 可以看出,本文在热点区域内外采取了不同的路由策略,所以节点的平均通信距离曲线在热点区域附近发生了偏折。

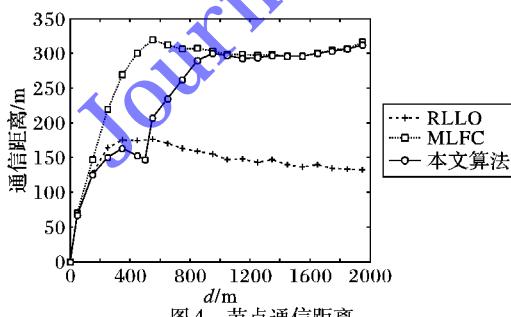


图 4 节点通信距离

图 5 对比了距离基站  $d$  m 处的节点在 3 种算法中的平均数据通信量。与其他两种路由算法相比,RLLO 算法的通信量是最多的。通过图 5 可以明显看出,距离基站越近的节点的通信量越多。在热点区域附近,本文算法的通信量变化的趋势有明显的不同,这主要是因为本文算法在热点区域外通过非均匀分簇的方法减少了数据通信量。

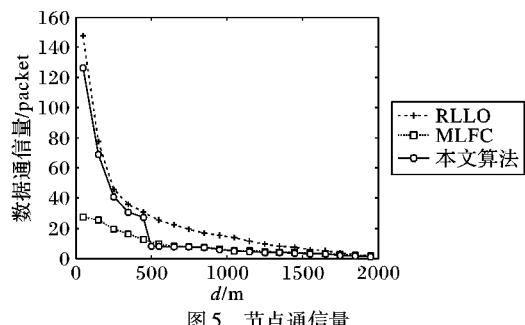


图 5 节点通信量

图 6 是距离基站  $d$  m 处的节点的能量消耗分布折线。从图 6 可以看出,距离基站越近的节点,产生的通信能耗越多,且在本文定义的热点区域内达到最大值。可以发现,本文提出的混合多跳路由算法改变了热点区域内的节点能量消耗增长的趋势。很显然,与平面 RLLO 算法和层次 MLFC 算法相比,本文算法中的热点区域内的各个节点的功耗更低,同时从表 3 可以看出,本文提出算法的网络生存周期最长。这主要得益于本文算法在热点区域外采用非均匀分簇减少了流入热点区域的数据量,均衡了网络负载;在数据通信阶段,通过选择两跳间距离短且通信跳数少的路由树,降低了网络的整体能耗,从而有效地延长了网络的生存周期。

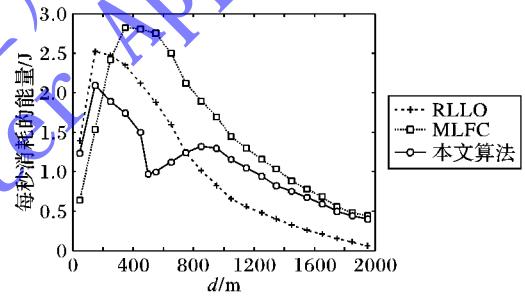


表 3 3 种算法的网络生存周期对比 s

算法	网络生存周期
RLLO	4653
MLFC	3978
本文算法	5589

### 4 结语

针对现有分簇路由算法的不足,本文提出了一种有效避免能量空洞的基于粒子群优化的混合多跳路由算法。与其他同类算法相比,本文算法较好地避免了因“热点”问题而产生的能量空洞现象,有效地延长了网络的生存周期。但是文中算法采用迭代的方式,造成了一定的时间和能量资源的消耗且属于静止的路由算法,所以下一阶段将着重研究与其他算法的结合或将动态节点考虑在内。

#### 参考文献:

- [1] SHOKOUIHIFAR M, JALALI A. A new evolutionary based application specific routing protocol for clustered wireless sensor networks [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(1): 432~441.
- [2] GUO X, DENG F. Hybrid routing protocol based on time-component for wireless sensor networks [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 30~35.

- (郭新, 邓飞其. 无线传感器网络中基于时间分量的混合路由协议[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 30–35.)
- [3] WANG B, CHEN Y, YI W. An energy-aware routing for maximum lifetime in wireless sensor networks [C]// CWSN 2012: Proceedings of the 6th China Conference on Advances in Wireless Sensor Networks. Berlin: Springer, 2013: 413–423.
- [4] ANTOO A, RAMEEZ MOHAMMED A. EEM-LEACH: energy efficient multi-hop LEACH routing protocol for clustered WSNs [C]// ICCICCT 2014: Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies. Piscataway: IEEE, 2014: 812–818.
- [5] GUO W. The research on lifetime optimal routing protocols in wireless sensor networks [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. (郭文静. 无线传感器网络生命期优化路由协议的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2013.)
- [6] JIANG C, SHI W, TANG X, et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222–1232. (蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议 [J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222–1232.)
- [7] QIAN K, DAI Z, SHEN S. Heterogeneous node distribution clustering routing algorithm for wireless sensor network [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12): 3415–3418. (钱开国, 戴祖诚, 申时凯. 非均匀分布的无线传感器网络分簇路由算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(12): 3415–3418.)
- [8] LU Y, YI K, FENG X, et al. Efficient multi-layer routing protocol for wireless sensor networks through fuzzy logic based clustering mechanism [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2014, 27(7): 933–938. (陆亚芳, 易可夫, 冯绪, 等. 基于模糊理论的无线传感器网络多层分簇式路由算法 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 933–938.)
- [9] HAN Z, WANG R, FAN G, et al. An unequal clustering algorithm in wireless sensor networks based on ARMA [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 865–869. (韩志杰, 王汝传, 凡高娟, 等. 一种基于 ARMA 的 WSN 非均衡分簇路由算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 865–869.)
- [10] SUN Y, PENG J, LIU T, et al. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 198–206. (孙彦清, 彭帆, 刘唐, 等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀分簇路由协议 [J]. 通信学报, 2014, 35(1): 198–206.)
- [11] QIAO X, WANG Z, WANG H, et al. An uneven cluster routing algorithm based weight [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2014, 27(1): 107–112. (乔学工, 王哲, 王华倩, 等. 基于权值的非均匀分簇路由算法 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(1): 107–112.)
- [12] MIAO C, CHEN Q, CAO J, et al. Energy balanced uneven clustering algorithm based on ant colony for wireless sensor network [J]. 2013, 33(12): 3410–3414. (缪聪聪, 陈庆奎, 曹剑炜, 等. 基于蚁群的无线传感器网络能量均衡非均匀分簇路由算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(12): 3410–3414.)
- [13] 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. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005–3014.

(上接第 1808 页)

- [5] YAN Y, HUANG J, ZHONG X, et al. Dynamic spectrum negotiation with asymmetric information [C]// GAMENETS 2011: Proceedings of the 2nd International ICST Conference Game Theory for Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 516–529.
- [6] LIU Y, TAO M, HUANG J. An auction approach to distributed power allocation for multiuser cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 237–247.
- [7] FENG X, CHEN Y, ZHANG J, et al. TAHEs: a truthful double auction mechanism for heterogeneous spectrums [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(11): 4038–4047.
- [8] GAO L, XU Y, WANG X. MAP: multiauctioneer progressive auction for dynamic spectrum access [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(8): 1144–1161.
- [9] HUANG J. Market mechanisms for cooperative spectrum trading with incomplete network information [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(10): 201–207.
- [10] KALATHIL D M, JAIN R. Spectrum sharing through contracts [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum. Piscataway: IEEE, 2010: 1–9.
- [11] GAO L, WANG X, XU Y, et al. Spectrum trading in cognitive radio networks: a contract-theoretic modeling approach [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 843–855.
- [12] DUAN L, GAO L, HUANG J. Contract-based cooperative spectrum sharing [C]// Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway: IEEE, 2011: 399–407.
- [13] DUAN L, GAO L, HUANG J. Cooperative spectrum sharing: a contract-based approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(1): 174–187.
- [14] SHENG S, LIU M. Profit incentive in a secondary spectrum market: a contract design approach [C]// Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2013: 836–844.
- [15] ZHOU Z, FENG X, GAN X. Energy-sensitive cooperative spectrum sharing: a contract design approach [C]// Proceedings of the 2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [16] KALATHIL D M, JAIN R. A contracts-based approach for spectrum sharing among cognitive radios [C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks. Piscataway: IEEE, 2010: 91–97.
- [17] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415–2425.
- [18] BOLTON P, DEWATRIMONT M. Contract theory [M]. Cambridge: MIT Press, 2005: 127–157.