2021 年 第 21 卷 第 31 期
2021, 21(31): 13447-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:刘 涛, 庞 博. 能耗均衡的低功耗自适应集分区路由改进算法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13447-13453.
Liu Tao, Pang Bo. Improved LEACH routing algorithm based on partitioning and energy consumption balance[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13447-13453.

能耗均衡的低功耗自适应集分区路由改进算法

刘 涛, 庞 博
(西安科技大学通信与信息工程学院, 西安 710054)

摘 要 针对低功耗自适应集簇分层型协议(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)簇头选取不佳、网络寿命过短问题,提出一种基于分区的 LEACH 改进算法。该算法根据节点剩余能量、邻居节点数及距基站距离对簇头选举产生的影响,对簇头选举函数进行优化;对监测区域进行分区,不同分区采取不同的数据传输方式,减少基站附近簇头节点转发信息的负载量,有效避免基站附近"能量空洞"现象的发生。实验结果表明,相比于 LEACH 和 LEACH-EDP(LEACH energydistance-partition)算法,本文改进算法第一死亡节点出现轮次分别推迟了 23.32%、18.44%,网络寿命分别延长了 32.27%、21.49%。

关键词 LEACH; 分区; 簇头选举; 能量空洞; 数据转发
中图法分类号 TP393; **文献标志码** A

Improved LEACH Routing Algorithm Based on Partitioning and Energy Consumption Balance

LIU Tao, PANG Bo
(College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'An 710054, China)

[**Abstract**] Aiming at the problem of poor selection of LEACH algorithm cluster head and short network lifetime, an improved LEACH algorithm based on partition was proposed. The algorithm optimized the cluster head election function according to the remaining energy of nodes, the number of neighbor nodes, and the distance from the base station on the cluster head election, and optimized the cluster head election function, partitions the monitoring area, and uses different data transmission methods for different partitions to reduce cluster heads near the base station The load of the node forwarding information effectively avoids the occurrence of "energy holes" near the base station. The experimental results show that, compared with LEACH and LEACH-EDP(LEACH energydistance-partition) algorithms, the first dead node of the improved algorithm is delayed by 23.32% and 18.44%, respectively, and the network life is extended by 32.27% and 21.49% respectively.

[**Keywords**] LEACH; partition; cluster head election; energy hole; data forwarding

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)作为一种自组织网络,因其成本低廉、节点体积小等特点,被广泛应用在各种无人到达的复杂恶劣环境中[1-3],如监测山体滑坡、环境监测、泥石流预警等。然而 WSNs 也存在巨大缺陷,节点自身能量有限,实际情况下无法更换电池,一旦电池能量消耗完毕,节点失效,大量无效节点的出现就会破坏网络整体连通性,网络生存周期会缩短。因此,设计能量高效的路由算法成为国内外的热点研究问题[4]。

WSNs 路由算法主要分为平面路由算法和分簇路由算法。其中分簇路由算法将整个网络划分为多个簇,每一个簇群由簇首进行管理,具有层次性,便于管理和网络延伸扩展,已成为当前应用最广,最受关注的 WSNs 路由算法[5-6]。Tang[7] 提出一种基于非均匀分区的双簇头节能路由算法,该算法根据节点距基站距离将 WSN 划分为不均匀分区,在每个分区内选举主簇头(primary cluster head, PCH)和副簇头(secondary cluster head, SCH),簇间采用最小生成树算法进行数据传输,该方法能够有效延长 WSNs 寿命,避免热区现象,但簇间路由多跳传输时,只考虑了下一跳的距离因素,未考虑下一跳转发节点的剩余能量。Anzola 等[8] 提出了一种基于 k-d 树的分簇路由算法,采用空间分区将节点组织成簇,在簇头选择上提出反应式簇头形成机制,该算法相比 LEACH 提高了网络吞吐量和降低了时延,但该算法稳定阶段采用单跳方式传输数据,导致簇头节点能量消耗过快,节点间能耗不均衡。戚攀等[9] 提出一种智能分层路由 FCM-SI(WSN hierar-

收稿日期: 2021-01-09; **修订日期**: 2021-04-26
基金项目: 国家自然科学基金(61674121);陕西省重点研发项目(2019ZDLSF07-06)
第一作者: 刘 涛(1972—),男,汉族,陕西西安人,博士,副教授。研究方向:数据挖掘和网络安全。E-mail: tianlongbabu720@126.com。

chical routing algorithm based on Fuzzy C-Means clustering and Swarm Intelligence),利用模糊 C-均值(fuzzy C-means, FCM)对 WSNs 进行分簇,同时通过人工蜂群算法选举簇群内部最优节点当选簇头,在数据传输时利用蚁群算法建立多跳路由机制,该算法能有效提高节点能量利用率,延长网络寿命,但由于基站附近簇头承担更大转发负载,相比其他节点耗能加快,容易出现“热区”现象。Fakhrosadat 等[10]提出一种基于模糊聚类的路由算法 FSFLA(fuzzy shuffled frog leaping algorithm),该算法采用蛙跳优化算法对 Mamdani 模糊规则进行优化,该方法分簇效果比较好,但采用单跳的数据传输方式,并不适合大规模 WSNs 使用。

针对上述研究存在的问题,提出一种基于分区的 LEACH 改进算法,该算法对阈值函数进行优化,为降低基站附近作为数据转发的簇头节点的能耗,避免能量空洞现象的发生,对监测区域进行分区,针对不同的分区,采取不同的数据传输方式,并对簇间数据转发路由进行改进。

1 系统模型

1.1 网络模型

为防止其他外部因素影响,对监测区域内部署的 WSNs 做如下假设。

(1)所有节点构造一样且具有相同初始能量。

(2)网络初始化之后,所有节点不可移动。

(3)基站唯一,具有无限的处理能力。

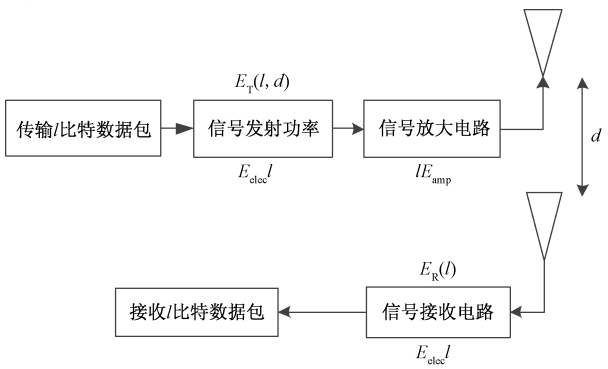
(4)所有节点可直接与基站进行通信。

(5)每个节点具有唯一标识,可获取自身位置信息。

(6)传感器节点可自动调节发射功率大小。

1.2 能耗模型

采用一阶无线电能量模型[11-12]来计算节点能耗,模型如图 1 所示。



E_{elec} 表示节点发射和接收功率;ε_{amp} 为放大电路的放大功率;ε_{fs} 和 ε_{mp} 表示放大电路的两种不同功率;d_0 为 d 的阈值。

图 1 无线电能量模型

Fig. 1 Radio energy model

由图 1 的一阶无线电能量模型可知,发送端发送传输距离为 d 的 l 比特数据的能耗为

$$E_T(l,d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d \geqslant d_0 \end{cases} \tag{1}$$

接收端接收 l 比特数据的能耗为

$$E_R(l) = lE_{elec} \tag{2}$$

阈值 d_0 计算公式为

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \tag{3}$$

2 LEACH 算法

LEACH 是一种层次型分簇路由算法[8]。该算法的核心思想采用了“轮”的概念,每轮节点会根据阈值函数重新选举簇头,当选过簇头的节点不再会当选簇头,保证每个节点都有机会成为簇头节点。一轮开始时,整个算法过程被分为簇群建立和数据传输两个阶段,簇群建立阶段根据节点生成的随机数与阈值进行比较选取出簇头进而建立簇群,之后的数据传输阶段簇头压缩成员节点采集的数据发送给基站。阈值 $T(n)$ 定义为

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{p}{1 - p[r\bmod(1/p)]}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中:p 表示预期当选簇头个数占总节点个数比例;r 为当前轮次;mod 为取模运算符;G 表示最后 $1/p$ 轮还未当选簇头的节点集合。

3 改进的 LEACH 算法

LEACH 算法在簇头选举时,未考虑其他因素对簇头选取产生的影响,节点当选簇头完全随机,存在距离基站较远低能量节点当选簇头的可能性,造成节点无线通信能耗急剧增大。一些基于 LEACH 改进的路由算法,通过单跳和多跳相结合的方式[13],克服了簇间能耗不均问题,但没有考虑到基站附近簇头节点由于承担距离基站较远的簇头节点所转发的数据信息,节点能量消耗过快,致使基站附近区域出现“能量空洞”问题。为解决以上问题,提出了一种改进算法,根据节点剩余能量、邻居节点数以及节点距基站距离因素对簇头选举产生的影响,该算法对阈值函数进行优化;为避免基站附近出现能量空洞问题,对部署区域进行分区,在不同的分区采取不同的数据传输方式,对簇间多跳数据转发方式进行改进。

3.1 阈值优化

3.1.1 剩余能量因子

随着 WSNs 的不断运行,网络中的传感器节点

能量不断下降。能量消耗较大的节点,如果重复多次被选举为簇头节点,将会因为能量下降过快,过早死亡。因此,簇头选举时节点剩余能量应被考虑在内。文献[14]对阈值函数 $T(n)$ 进行优化,引入了剩余能量因子,即

$$\mathrm{ren}f = \frac{E_{i,\mathrm{cur}}}{E_0} \tag{5}$$

式(5)中:$E_{i,\mathrm{cur}}$ 为节点 i 的剩余能量;E_0 为节点初始能量。将式(5)进行改进,定义新的剩余能量因子 E 为

$$E = \frac{E_{i,\mathrm{cur}} - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \tag{6}$$

式(6)中:$E_{i,\mathrm{cur}}$ 是节点 i 的剩余能量;$E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别表示节点剩余能量的最小值和最大值。从式(6)可看出,剩余能量因子在设置上,考虑了节点 i 的剩余能量在当前轮次下所处的能量等级,不会因为节点 i 的剩余能量随着时间运行而减少,导致剩余能量因子权重一直降低,在网络运行后期,新剩余能量因子有更好的性能表现。式(6)中 E 能降低低能量节点当选簇头的可能性。

3.1.2　距离因子

WSNs 中传感器节点之间,通过无线通信的方式进行数据传输。根据图 1 的无线电能量模型以及式(1)、式(2)可知,发送相同比特的数据信息时,距离越远,消耗的节点能量越多。因此,距离因素在簇头选举时必须被考虑在内。

文献[15]提出的基于 LEACH 的分区路由算法中引入距离因子修正簇头阈值选举函数,采用的是节点距基站(Sink 节点)的距离因子,即

$$D_{\mathrm{Sink}} = \frac{d_{\max} - d_i}{d_{\max} - d_{\min}} \tag{7}$$

式(7)中:d_i 代表节点 i 和基站之间的距离;$d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别表示网络中节点距基站距离的最大值和最小值。

通过图 1 和式(1)可知,传输相同比特数据,传输距离越大,消耗的能量越多,尤其当 $d \geqslant d_0$ 时,传输数据消耗的能量由正比传输距离平方转变为正比传输距离四次方。根据阈值 d_0 对能耗计算公式产生的影响,对式(7)进行优化改进,重新定义距离因子为

$$D = \begin{cases} \dfrac{d_0 - d_i}{d_0}, & d_i < d_0 \\ \dfrac{d_{\max} - d_i}{d_{\max}}, & d_i \geqslant d_0 \end{cases} \tag{8}$$

式(8)中,d_0 计算方法为式(3);d_i 代表节点 i 和基站之间的距离;$d_{\max}$ 表示节点距基站距离的最大值。重新定义的距离因子 D 以阈值 d_0 为分界线,根据传输距离 d 的大小,设置两种不同的距离因子。当 $d_i < d_0$ 时,距离因子 $D = (d_0 - d_i)/d_0$,其值随 d_i 的增大而减小;当 $d_i \geqslant d_0$ 时,$D = (d_{\max} - d_i)/d_{\max}$,$D$ 同样随 d_i 的增大而减小。

3.1.3　邻居节点数

待选簇头竞争半径以内节点数的多少,影响最终形成的簇群大小。因此,节点的邻居节点数在簇头选举时,必须被考虑在内。

根据式(9)计算节点 i 的竞争半径[16],即

$$R_i = \left(1 - c\frac{d_{\max} - d_{i\_\mathrm{Sink}}}{d_{\max} - d_{\min}}\right)R_{\max} \tag{9}$$

式(9)中:$d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别表示节点与基站之间距离的最大和最小值;d_{i_Sink} 表示节点 i 与基站之间的距离;c 是用来控制取值范围;$R_{\max}$ 为节点竞争半径最大取值。这里取 $R_{\max} = d_0$ 限制节点竞争半径最大不得超过 d_0。

节点 i 的邻居节点数定义为

$$M = \{\mathrm{NUM} \mid d_{i,j} \leqslant R_i, \mathrm{Node}_i \neq \mathrm{Node}_j\} \tag{10}$$

式(10)中:$d_{i,j}$ 为节点 Node_i 和 Node_j 之间的距离;R_i 为 Node_i 节点的竞争半径。

3.2　分区

簇间采用多跳数据转发方式时,基站附近簇头将会承担更重的转发压力,能耗耗尽大片簇头节点死亡导致发生“能量空洞”现象。为减轻基站附近簇头节点的压力,改善能量空洞问题,对 WSNs 部署区域进行分区。如图 2 所示,以基站节点为圆中心,分别以距离 R、距离 d_0 为圆半径进行分区($0 < R < d_0$),半径 R 以内的圆形区域记为区域 I,大于半径 R、小于半径 d_0 之间的圆环区域记为区域 II,半径 d_0 以外的剩余区域记为区域 III。

区域 I 作为距离基站最近的区域,区域内的传感器节点只有两种工作任务:①获取节点自身周围环境的感知数据信息;②对来自区域 II 和区域 III

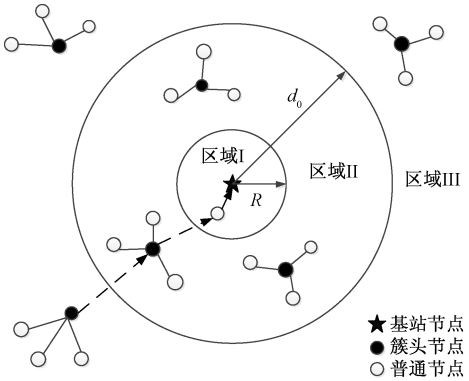


图 2　部署区域分区模型

Fig. 2　Deployment area partition model

的簇头节点的数据信息,进行融合处理并转发给基站节点。区域 I 内的节点主要作用就是为了减轻基站附近簇头节点转发数据的工作量,避免能量空洞问题。区域 I 面积大小占部署区域的比重定义为

$$\text{Ratio} = \frac{\pi R^2}{\text{Area}M^2}, \quad 0 < R < d_0 \tag{11}$$

式(11)中:R 为区域 I 圆形面积的半径;Area$M$ 为正方形部署区域的边长。

区域 II 和区域 III 内的节点进行簇头选举,成簇操作。采取簇内直接通信,簇间簇头节点间多跳传输的通信方式。根据一阶无线电能量模型可知,区域 II 和区域 III 两个区域内簇头节点采用不同的能耗计算公式,对簇头阈值函数选取进行优化,即

$$T'(n) = \begin{cases} T_1(n), & n \in G, n \in \text{Area2} \\ T_2(n), & n \in G, n \in \text{Area3} \\ 0, & n \notin G, n \notin \text{Area1} \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} T_1(n) = T(n)\left[\alpha E + \beta\left(\dfrac{d_0 - d_i}{d_0}\right) + \gamma\dfrac{M}{N}\right] \\ T_2(n) = T(n)\left[\alpha E + \beta\left(\dfrac{d_{\max} - d_i}{d_{\max}}\right) + \gamma\dfrac{M}{N}\right] \end{cases} \tag{13}$$

式(13)中:$T(n)$ 为 LEACH 算法的阈值函数;α、β、γ 分别为剩余能量因子、距离因子、邻居节点数的权重系数,取值均在 0~1,三者系数之和为 1;N 为网络中节点总个数。

3.3 数据传输阶段

针对 LEACH 算法采用直接通信的方式传输数据给基站存在簇头节点能量消耗过快的缺点,目前常采用簇间单跳和多跳相结合的传输方式,有效减少簇头节点转发能耗。但此方法选择的转发路径并非最优,在选择下一跳转发节点时未考虑簇头节点与基站之间的方向性问题,为此考虑到簇头节点数据转发的方向性问题以及下一跳转发节点的剩余能量对多跳的数据传输方式进行改进,选择最优下一跳转发数据节点的选择函数计算公式为

$$f(i,j) = \begin{cases} \dfrac{d(C_i,C_j) + d(C_j,\text{Sink}) - d(C_i,\text{Sink})}{d(C_i,\text{Sink})}, \\ \quad E(C_j) > E(C_i),\ i \neq j \\ \dfrac{E_{\text{nei}}^{\text{avg}}(C_i)}{E(C_j)} + \dfrac{d(C_i,C_j) + d(C_j,\text{Sink}) - d(C_i,\text{Sink})}{d(C_i,\text{Sink})}, \\ \quad E(C_j) \leqslant E(C_i),\ i \neq j \end{cases} \tag{14}$$

式(14)中:$d(C_i,C_j)$ 表示簇头节点 i 和簇头节点 j 之间的距离;$d(C_i,\text{Sink})$ 和 $d(C_j,\text{Sink})$ 分别表示簇头 i 与簇头 j 到基站的距离;$E(C_i)$ 和 $E(C_j)$ 分别表示簇头 i 和簇头 j 的剩余能量;$E_{\text{neighbor}}^{\text{avg}}(C_i)$ 表示簇头 i 的下一跳邻居簇头的平均能量。从式(14)可知,下一跳节点剩余能量越多,与基站连线的方向跟簇头 i 到基站之间连线的方向越一致,$f(i,j)$ 的值就会越小,最终选择的转发节点越优。区域 II 与区域 III 内簇头选择下一跳采用式(14)进行判断,当传输下一跳为区域 I 内节点时,根据式(15)进行选择,k 取值越接近 1,越适合当选下一跳转发节点,即

$$k = \frac{d(C_i,\text{Sink})}{d[C_i,\text{Node}(j)] + d[\text{Node}(j),\text{Sink}]}, \quad \text{Node}(j) \in \text{Area1} \tag{15}$$

式(15)中:$d[C_i,\text{Node}(j)]$ 和 $d[\text{Node}(j),\text{Sink}]$ 分别表示簇头节点 i 距区域 I 内节点 j 之间的距离和区域 I 内节点 j 与基站之间的距离。

3.4 改进算法流程图

改进 LEACH 算法流程如图 3 所示。

4 实验仿真与分析

本实验在 Windows 平台下,使用 MATLAB R2012a 软件对改进算法进行代码仿真,并跟 LEACH、LEACH-EDP[17] 算法进行性能比较。具体实验参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Simulation experiment parameters

参数	数据值
网络区域/(m×m)	200×200
传感器节点数	100
基站(Sink)节点坐标/(m,m)	(100,100)
数据包长度/bit	4 000
控制信息大小/bit	100
节点初始能量/J	0.5
ε_{fs}/(nJ·bit^{-1}·m^{-2})	10
ε_{mp}/(pJ·bit^{-1}·m^{-2})	0.001 3
E_{elec}/(nJ·bit^{-1})	50
融合单位比特数据能耗 EDA/(nJ·bit^{-1})	5

4.1 确定权重系数

为确定权重系数对 WSNs 造成的影响,进而选出最佳的权重系数比,通过实验仿真测试多组不同权重系数下 WSNs 总能量的消耗情况,如图 4 所示。从图 4 中可以看出在相同轮次下,$a=0.6$,$b=0.1$,$c=0.3$ 所对应的曲线,在所有曲线中消耗的总能量最少,这表明此曲线对应的 WSNs 节点能量利用率最高,由此确定最优的权重系数为 $\alpha=0.6$,$\beta=0.3$,$\gamma=0.1$(这里 a 代表 α,b 代表 γ,c 代表 β)。

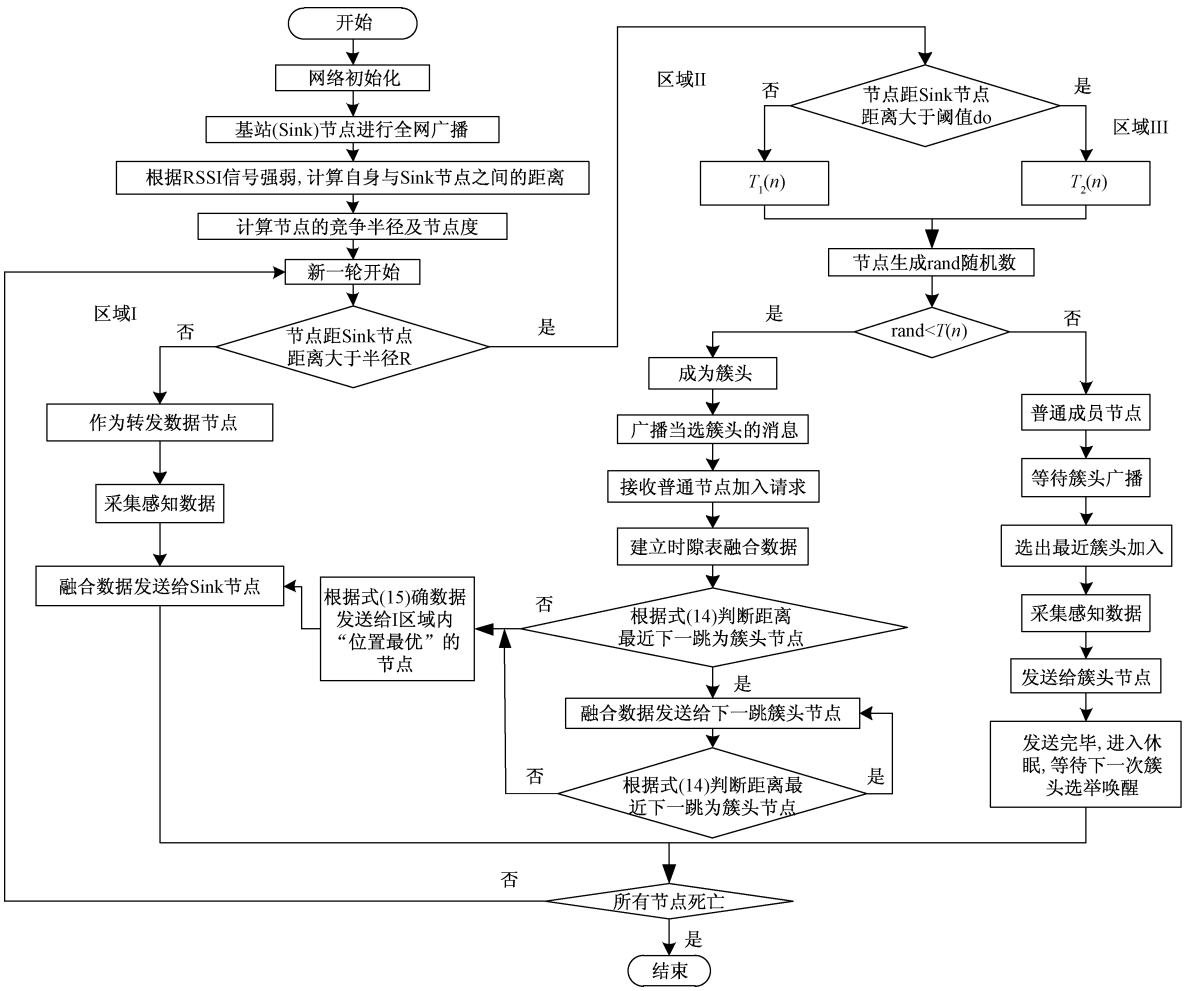


图 3　算法流程图

Fig. 3　Algorithm flowchart

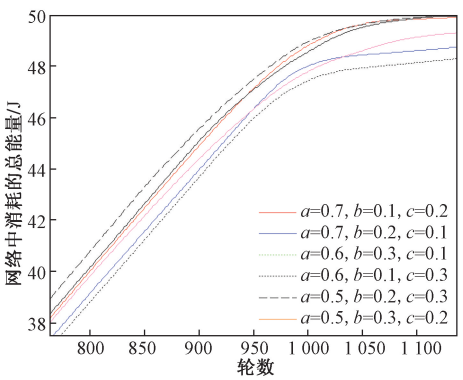


图 4　不同权重系数下网络消耗的总能量

Fig. 4　Total energy consumption of network under different weight coefficients

4.2　区域 I 大小设置

区域 I 内节点主要作用是为了减轻基站附近簇头节点数据转发的负载压力,降低能量空洞现象的发生。区域 I 设置越大,网络中直接与基站进行数据通信的节点数目增多,分簇结果不明显,WSNs 的稳定性会受到影响;若区域 I 设置的比较小,区域 I 则无法起到缓解基站附近簇头节点的转发负载压力的作用。为了确定区域 I 的大小对能量空洞问题产生的影响,进而选出最优的区域 I,本文中通过比较区域 II 内节点数先后轮次的变化情况,作为衡量区域 I 对能量空洞的抑制能力。根据式(11),针对区域 I 面积占部署区域比重 R 取值进行多次实验,结果如表 2 所示。

表 2　区域 II 内节点数的变化情况

Table 2　Change of node number in Area Ⅱ

R/%	第一死亡节点	全部节点死亡	区域 II 内初始节点数	区域 II 内节点数为 0
5	882	1 205	50	1 037
10	899	1 447	48	1 046
15	727	1 477	44	1 037
20	829	1 542	37	1 027
25	844	1 523	34	1 041
30	836	1 535	29	1 026
35	759	1 564	28	1 026
40	751	1 652	20	1 032
45	807	1 538	14	1 023
50	844	1 605	11	1 013

第一死亡节点时间(first node dead,FND)是衡量传感器网络稳定性的重要性能评价指标,是首要考虑的因素,第一死亡节点时间越靠后,代表网络稳定性越好。区域 II 内节点数前后变化越缓慢,表示区域 I 内节点对簇头节点的数据转发负载压力分担效果越好,能够很好抑制能量空洞现象的发生。从表 2 可知,当区域 I 面积大小占部署区域的比重 $R=10\%$ 时 WSNs 的稳定性最好,区域 II 内节点数最终清零处在 1 046 轮次,在所有数据中最靠后,同时该比重下网络生命周期也有不错的表现。这说明在此情况下,区域 I 内的节点能够最大程度降低基站附近簇头节点的数据转发负载,均衡簇头节点间能耗。

4.3 节点存活数

图 5 为网络存活节点个数图。从图 5 可知,在 729 轮时 LEACH 第一个死亡节点出现,在 759 轮 LEACH-EDP 算法第一死亡节点出现。直到 899 轮本文提出的改进算法第一死亡节点才出现,对比于 LEACH、LEACH-EDP 算法时间分别推迟了 23.32% 和 18.44%。LEACH 算法全部节点死亡在 1 094 轮,LEACH-EDP 算法全部节点死亡在 1 191 轮,而本文算法全部节点死亡时间出现在 1 447 轮,比 LEACH、LEACH-EDP 网络寿命分别延长了 32.27%、21.49%。以上分析可得出,改进算法在网络整体稳定性、延长网络寿命方面要优于 LEACH、LEACH-EDP 算法。这是因为本文算法考虑了节点剩余能量、邻居节点数以及距基站距离因素,对于不同分区采取不同阈值选举函数,选择综合能力优秀的节点作为簇头,降低节点能耗,延缓节点死亡时间。

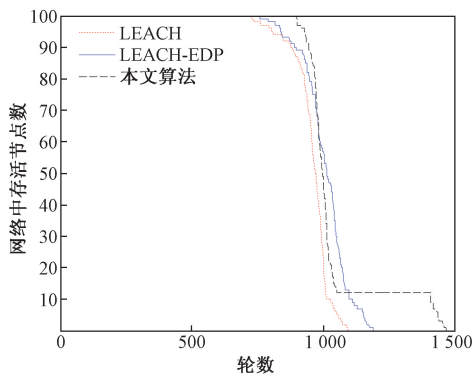


图 5 网络存活节点个数

Fig. 5 Number of surviving nodes in network

4.4 网络剩余能量

图 6 是网络剩余能量变化图。从图 6 可知,相同轮次下本文算法 WSNs 中剩余能量是最多的。大约在 1 200 轮,LEACH 和 LEACH-EDP 算法网络中已经没有剩余能量情况下,本文算法网络中大约还有 1 J 的剩余能量,在网络节点能量利用率方面要优于 LEACH 和 LEACH-EDP 算法。这主要是因为改进算法的簇头选取方式更加合理,有效降低节点通信能量损失。

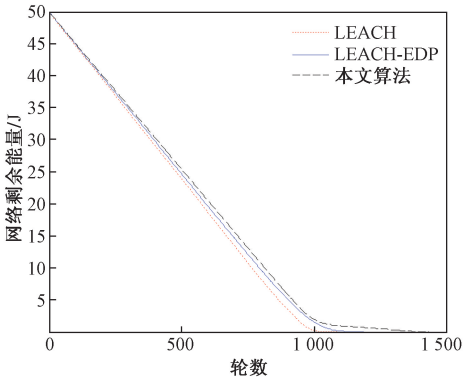


图 6 网络剩余能量

Fig. 6 Network residual energy

4.5 剩余能量方差

图 7 是剩余能量方差变化图。由图 7 可知,LEACH 算法的节点剩余能量方差最大。本文算法节点剩余能量方差要远小于 LEACH 和 LEACH-EDP 算法,说明本文算法中传感器节点的剩余能量与所有节点剩余能量的平均值差值的平方是最小的,WSNs 的节点能耗更加平均。这是因为部署区域分区使得基站附近簇头节点能耗降低,同时改进的簇间多跳传输方式降低了转发节点的能耗。

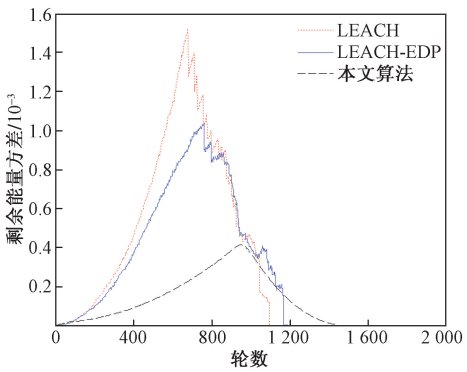


图 7 节点剩余能量方差的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of node residual energy variance

5 结论

本文提出的改进算法,通过分析三种不同因素对簇头选举产生的影响,优化簇头阈值选举函数;对部署区域进行分区操作,不同区域采用不同的数据传输方式,减缓基站附近簇头节点的数据转发工作量,避免基站附近“能量空洞”,并对簇间多跳转发方式进行改进。通过与 LEACH、LEACH-EDP 算

法进行实验对比得到以下结论。

(1)本文提出的改进算法相比于 LEACH、LEACH-EDP 算法第一死亡节点出现轮次分别推迟了 23.32%、18.44%,全部节点死亡出现轮次分别延长了 32.27%、21.49%,可知该算法能够有效提高 WSNs 的稳定性,提高网络寿命。

(2)本文提出的改进算法在剩余能量方差方面表现要优于 LEACH、LEACH-EDP 算法,可知该算法能够有效均衡所有节点间的能耗,降低节点间的能量差异。

参 考 文 献

[1] 王　军, 张亚君, 徐万一, 等. 等量线模型下的 LEACH 优化协议[J]. 沈阳化工大学学报, 2019, 33(1): 87-92, 96.
Wang Jun, Zhang Yajun, Xu Wanyi, et al. Leach optimization protocol under isometric model[J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2019, 33(1): 87-92, 96.

[2] Dutt S, Agrawal S, Vig R. Cluster-head restricted energy efficient protocol(CREEP) for routing in heterogeneous wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 100(4): 1477-1497

[3] 贾银亮, 张驰宇, 梁康武. 基于多重竞争的无线传感器网络簇头选择算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(2): 140-142, 146.
Jia Yinliang, Zhang Chiyu, Liang Kangwu. Cluster head selection algorithm for wireless sensor networks based on multiple competition[J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(2): 140-142, 146.

[4] 赵　亮, 兰智高, 熊志利. 基于 LEACH 的无线传感器网络簇首选取改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 86-93.
Zhao Liang, Lan Zhigao, Xiong Zhili. Improved cluster head selection algorithm for wireless sensor networks based on LEACH[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 86-93.

[5] Khan K, Mehmood A, Khan S, et al. A survey on intrusion detection and prevention in wireless ad-hoc networks[J]. Journal of Systems Architecture, 2019, 105: 101701.

[6] 贺道德, 徐　计, 黄正鹏. 基于簇首负载均衡的无线传感器网络分层路由协议[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9122-9127.
He Daode, Xu Ji, Huang Zhengpeng. Layered routing protocol for wireless sensor networks based on cluster head load balancing[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 9122-9127.

[7] Tang C. A clustering algorithm based on nonuniform partition for WSNs[J]. Open Physics, 2020, 18(1): 1154-1160.

[8] Anzola J, Pascual J, Tarazona G, et al. A clustering WSN routing protocol based on *k*-D tree algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(9).

[9] 戚　攀, 包开阳, 马晶源. 基于模糊 *C* 均值聚类及群体智能的 WSN 分层路由算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 1974-1980, 1988.
Qi Pan, Bao Kaiyang, Ma Yuyuan. WSN hierarchical routing algorithm based on fuzzy *C*-means clustering and swarm intelligence[J]. Computer Applications, 2018, 38(7): 1974-1980, 1988.

[10] Fakhrosadat F, Kuchaki R M. Memetic fuzz-y clustering protocol for wireless sensor networks: shuffled frog leaping algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2018, 71: 568-590.

[11] Jia Y L, Ji K L, Liang K W. An unequal clustering algorithm based on spacing and residual energy for wireless sensor networks-sciencedirect[J]. Procedia Computer Science, 2019, 154: 400-405.

[12] Amir A B, Keivan N. HQCA-WSN: high-quality clustering algorithm and optimal cluster head selection using fuzzy logic in wireless sensor networks[J]. Fuzzy Sets and Systems 2020, 389: 114-144.

[13] Lee J Y, Jung K D, Moon S J, et al. Improvement on LEACH protocol of a wide-area wireless sensor network[J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76(19): 19843-19860.

[14] 黄利晓, 王　晖, 袁利永, 等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法[J]. 通信学报, 2017, 38(S2): 164-169.
Huang Lixiao, Wang Hui, Yuan Liyong, et al. Improved LEACH protocol algorithm based on energy balance and efficient WSN[J]. Journal on Communications, 2017, 38(S2): 164-169.

[15] 方旺盛, 陈朕浩, 胡中栋. 分区和能耗均衡的 LEACH 路由改进算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(10): 2746-2751.
Fang Wangsheng, Chen Zhenhao, Hu Zhongdong. Improved LEACH routing algorithm based on partition and energy consumption[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(10): 2746-2751.

[16] 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 Hong, Guan Yehuan, Lü Mengwei. Clustering routing protocol for wireless sensor networks based on adaptive weights[J]. Small Microcomputer System, 2019, 40(12): 2603-2607.

[17] 卞有为, 张玲华. 基于分区和能量距离因子的 LEACH 改进协议[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(5): 920-929.
Bian Youwei, Zhang Linghua. Improved LEACH protocol based on partition and energy distance factor[J]. Data Acquisition and Processing, 2020, 35(5): 920-929.