

基于簇头节点能量均衡选择的LEACH优化算法

吴英浩¹, 石元博¹, 黄越洋²

(1. 辽宁石油化工大学 人工智能与软件学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 针对无线传感网络中LEACH协议在进行簇头节点选择时能量消耗过快导致的生存周期短、数据吞吐量低等问题,提出了一种基于簇头节点能量均衡选择的LEACH优化算法。该算法选取WSNs中剩余能量高的普通节点作为簇头节点,同时考虑普通节点与簇头节点、簇头节点与基站之间的距离,以及所有节点的剩余能量和平均能量等因素来选择通信方式和传输路径。通过MATLAB工具,对提出的算法进行了仿真实验。结果表明,在100 m×100 m的小面积监测区域和200 m×200 m的大面积监测区域内,与LEACH、DEEC、IMP-LEACH算法相比,该算法降低了WSNs中节点的能量消耗,延长了生存周期,同时提高了数据吞吐量。

关键词: 无线传感网络; LEACH协议; 簇头节点选择; 能量均衡; 网络生存周期

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi:10.12422/j.issn.1672-6952.2023.06.013

Energy Balanced Leach Optimization Algorithm Based on Cluster Head Node Selection

WU Yinghao¹, SHI Yuanbo¹, HUANG Yueyang²

(1. School of Artificial Intelligence and Software, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. School of Information and Control Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: In order to solve the problems of short life cycle and low data throughput caused by too fast energy consumption in cluster head node selection of LEACH protocol in wireless sensor networks, a leach optimization algorithm based on cluster head node energy balanced selection is proposed. The algorithm selects ordinary nodes with high residual energy in WSNs as cluster head nodes, and considers the distance between ordinary nodes and cluster head nodes and between cluster head nodes and base station, as well as the residual energy and average energy of all nodes to select communication mode and transmission path. The proposed algorithm is simulated by MATLAB. The simulation results show that in the 100 m×100 m small and monitoring area and 200 m×200 m large and monitoring area, compared with LEACH, DEEC and IMP-LEACH algorithms, the algorithm reduces the energy consumption of nodes in WSNs, prolongs the life cycle and improves the data throughput.

Keywords: Wireless sensor network; LEACH protocol; Cluster head node selection; Energy balance; Network lifetime

近年来,无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)在矿业开采、安防监控、工业控制、智能家居等领域得到了广泛应用^[1]。WSNs是由大量密集部署的具有通信和计算能力的传感器节点构成的分布式自组织网络^[2-3],在WSNs中,每个传感器节点收集自身所在区域的数据信息,直接或间接地将收集到的信息传输给基站(BS)。簇头

节点负责收集簇内普通节点传输的数据信息,或者作为中继节点转发其他簇头节点的数据信息并进行融合然后发送给BS。但是,由于距离BS近的簇头节点承担较多的中继转发的任务,可能会引起该节点的能量剧烈消耗而过早死亡,从而导致WSNs生存周期短、稳定性差;WSNs中传感器节点的计算能力、储存资源都有限^[4]。因此,如何充分利用传感

收稿日期:2022-08-02 修回日期:2022-08-20

基金项目:辽宁省教育厅科研项目(LJKMZ20220737);辽宁石油化工大学博士启动基金项目(2021XJL-017)。

作者简介:吴英浩(1997-),男,硕士研究生,从事无线传感网络方面的研究;E-mail:sdpywyh@163.com。

通信联系人:石元博(1981-),男,博士,副教授,从事无线传感器网络控制与应用、物联网应用、大数据分析技术方面的研究;
E-mail:syb2011@yeah.net。

器中有限的能量,在WSNs中合理地选择簇头节点和中继节点,降低传输数据的能耗,从而延长生存周期,成为中外学者研究WSNs的重点。

LEACH协议最早由文献[5]提出,是一种低能耗自适应聚类分层路由协议(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)。LEACH协议中簇头节点的选择是随机的,因此可能产生簇头节点分布不均甚至剩余能量过低的普通节点也被选择为簇头节点的问题。针对簇头节点分布不均的问题,文献[6]提出了DEEC算法。该算法将普通节点的初始能量和剩余能量考虑在内,WSNs中的每个普通节点将自身的初始能量和剩余能量与WSNs中所有节点的平均能量进行比较判断,选择能量高的节点作为簇头节点,但DEEC算法并未考虑节点之间的距离问题,因此仍避免不了由于距离过远传输数据时能量过度消耗的问题;文献[7]提出的IMP-LEACH算法,在选择簇头节点的过程中,考虑了普通节点的能量以及节点与节点之间的距离等因素,通过重新定义的阈值公式进行簇头节点的选择,综合考虑了节点的通信范围和簇头节点当前的剩余能量,使簇头节点的能量得到均衡的消耗,但并未考虑数据传输阶段选择的中继节点剩余能量的问题。

综上所述,现有算法没有考虑节点之间距离以及传输过程中中继节点的剩余能量的问题,因此本文提出一种基于簇头节点能量均衡选择的LEACH优化算法即EBM_LEACH(Energy Balanced Multi-hop Based on LEACH)算法。EBM_LEACH算法在簇头节点选择阶段考虑上一轮的普通节点剩余能量以及普通节点与BS之间的距离,基于这些因素优化选择簇头节点的阈值公式,从而产生合理的簇头节点;在成簇阶段,考虑簇头节点的能量、普通节点到簇头节点的距离等因素形成对应的簇群;在通信阶段,结合普通节点与BS之间的距离以及簇头节点与BS之间的距离,对WSNs采用单跳通信或者多跳通信方式进行选择。通过MATLAB工具,对提出的算法进行了仿真实验,与LEACH、DEEC、IMP-LEACH算法进行了比较。

1 LEACH协议

LEACH协议的核心机制是将WSNs中所有的节点划分为若干簇群,并周期性地工作进行。在簇头节点选择阶段,WSNs中的所有节点会在0~1随机产生一个数,如果某一个普通节点产生的数值小于阈值 $T(n)$,那么该节点被选定为这一轮的簇头节点,否则该节点为簇内成员节点。阈值公式 $T(n)$

的计算方法^[8-10]见式(1)。

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

式中: p 为簇头节点在当前WSNs中所有节点的占比; r 为目前已经循环的迭代周期; G 为最近 $1/p$ 轮没有当选过簇头节点的集合。

当簇头节点的选择阶段结束时,簇头节点会进行广播,通知其他普通节点根据与簇头节点之间的距离选择加入最近的簇头节点,完成簇群的建立。在簇间通信阶段,普通节点将采集到的数据信息发送给簇头节点,由簇头节点进行数据信息的整合并将整合后的数据信息直接发送给BS。LEACH协议拓扑图如图1所示。

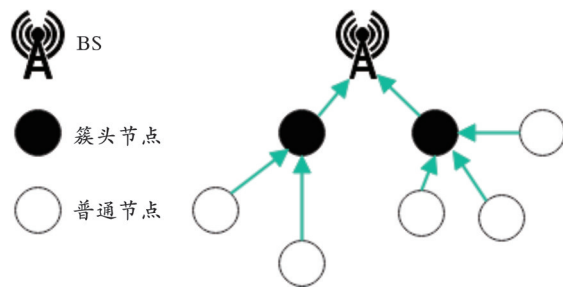


图1 LEACH协议拓扑图

虽然LEACH协议在一定程度上完成了数据的传输,并且降低了一部分能耗,从而延长了网络生存周期,但在实际应用中仍然存在很多不足之处^[11]。例如,在选择簇头节点的过程中,不能保证簇头节点均匀地分布,使有些成员节点无法加入簇群,造成能量负载的不平衡^[12],从而导致能量消耗过快,WSNs生存周期变短。

2 相关模型

WSNs是由多个功能节点之间通过无线通信连接形成的一个网络,主要包含两类节点:一类是传感器节点,负责在WSNs的监测区域内收集数据并进行简单的处理,从而完成与其他节点之间的通信;另一类是BS节点,负责将传感器节点中的簇头节点转发过来的数据进行融合并进行其他处理,然后将处理的数据信息传输到互联网。WSNs拓扑结构图如图2所示。

2.1 WSNs模型

假设WSNs中的所有节点均在一个稳定的环境之中,分布在 $Mm \times Mm$ 的平面中,每个节点都有自己唯一的标识ID,并作如下假设。

1) WSNs中存在1个BS和100个节点,其中BS位于区间中心位置且能量充足,而且用于发送和接

收信息的无线链路是对称的^[13-14]；所有节点随机分布在区域内，部署完成后，所有节点的位置均不再发生改变。

2)除 BS 外的所有节点的初始能量有限，并且它们的处理信息、转发数据以及配置信息等均完全一致。

3)所有节点都具有相同的能力，即具有感知自己的位置信息、剩余能量以及通信半径范围内邻居节点的能力，且可以在簇头节点和普通成员节点之间进行角色切换。

4)所有节点之间可以通信，并可以根据信号的强度判断两者之间的距离。

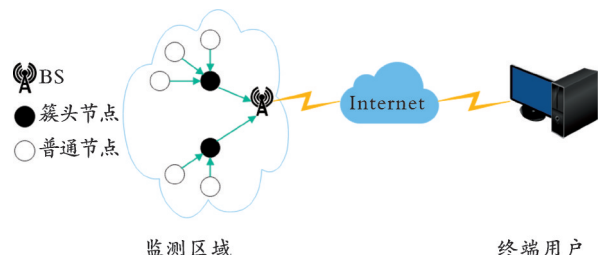


图2 WSNs拓扑结构图

2.2 能耗模型

从实际情况考虑，WSNs的路由算法设计与信道能量损失模型密切相关^[15]，因此本文采用文献[16—19]提到的能耗模型：WSNs中节点之间传输数据所消耗的能量与数据包的大小和节点之间的距离成正比。节点发送 m bit 数据时需要消耗的能量为：

$$E_{tx}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： m 为数据包的大小； E_{elec} 为发送或者接收 1 bit 数据时电路消耗的能量； d 为节点与节点之间的通信距离； d_0 为切换两种空间模型的距离阈值，当 $d < d_0$ 时，采用自由空间模型^[20-21]，其能量模型系数为 ϵ_{fs} ，而当 $d \geq d_0$ 时，采用多径衰减模型^[20-21]，其能量模型系数为 ϵ_{mp} 。 d_0 的计算公式为：

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

节点接收 m bit 数据时的能量消耗为：

$$E_{rx}(m) = mE_{elec} \quad (4)$$

WSNs中数据融合时也会进行能量的消耗，消耗能量的大小用 E_{DA} 表示。

3 EBM_LEACH算法

EBM_LEACH算法与LEACH协议类似，都以选择簇头节点、成簇阶段以及簇间通信三个阶段为一个周期。首先，确定BS的位置，向整个WSNs区

域内广播信息，每个普通节点根据自身与BS的距离 d_{COB} 、节点自身与邻居节点的距离 d_{Nei} 、自身的剩余能量以及邻居节点的数量等因素选择簇头节点；然后，普通节点根据自身与簇头节点的距离、自身的剩余能量以及当选簇头节点的剩余能量等因素得到一个成本函数，经过比较选择加入适合自己的簇头节点，形成相应的簇群；最后，簇群内普通节点将采集到的数据信息转发给簇头节点，由簇头节点进行融合，比较判断簇头节点和基站之间的距离 d_{CHB} 与节点的通信半径 R 的大小，然后决定采取单跳或者多跳的方式传输给BS。EBM_LEACH算法示意图如图3所示。

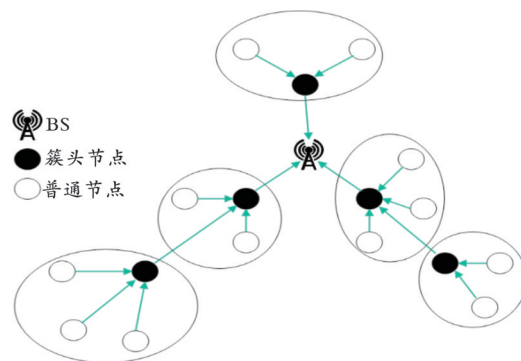


图3 EBM_LEACH算法示意图

3.1 簇头节点选择

EBM_LEACH算法是在LEACH协议中对选择簇头节点的阈值公式的基础上进行改进，将普通节点的剩余能量以及普通节点与BS之间的距离考虑在内，弥补了LEACH协议的不足，其计算公为：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p[rm \bmod (1/p)]} \times (1 - \frac{E_r}{E_{opt}}) \times \frac{1}{d_{BS}} & n \in G \\ 0 & n \notin G \end{cases} \quad (5)$$

式中： E_r 为上一轮节点的剩余能量； d_{BS} 为所有节点到BS的平均距离； E_{opt} 为当前轮节点的能量阈值，其计算公式为：

$$E_{opt} = \frac{E_r - E_u}{E_{avg} - E_u} \quad (6)$$

式中： E_u 为上一轮中节点消耗的能量； E_{avg} 为当前所有节点的剩余平均能量。

在每一轮选择簇头节点时，所有的节点都会在 $(0, 1)$ 随机产生一个数，如果小于阈值 $T(n)$ ，那么该节点将会被选作簇头节点。簇头节点选择过程的具体伪代码如下。

算法1 簇头节点选择过程：

For $i=0:n$ do


```

IF 节点能量  $E(i) > 0$ 
  IF 该节点在本轮未被选作簇头
    Set  $T(n)$ 
    Set  $Q = (d_{\text{COB}})^2 + (d_{\text{Nei}})^2$ 
    IF
       $\text{rand}(0, 1) \leq W1 * T(n) * (E(i) / E_{\text{avg}})^{1/4} +$ 
 $W2 * P / Q \&\& d_{\text{COB}} > R \&\& E(i) > E_{\text{avg}}$ 
    THEN 节点为簇头节点
      IF  $R > d_0$ 
         $E(i) = E(i) - (E_{\text{elec}} * CM + \epsilon_{\text{mp}} * CM * R^4)$ 
      ELSE
         $E(i) = E(i) - (E_{\text{elec}} * CM + \epsilon_{\text{fs}} * CM * R^2)$ 
      END
    ELSE 节点为普通节点
  END
END
END
END

```

3.2 成簇阶段

当一个节点被选作簇头节点后,便会在其通信半径范围内发送这一消息,广播信息中包含的簇头节点的位置信息、剩余能量信息等。普通节点接收到这一信息之后,综合考虑自身到簇头节点之间的距离、当选簇头节点的邻居节点的位置、剩余能量等信息以及当选簇头节点的剩余能量信息,得到一个成本函数,其计算公式为:

$$\text{Cost}(i) = c_1 \times \frac{d_{\text{CH}}}{d_{\text{max BS}}} + c_2 \times \frac{|N_{\text{CH}(k)}|}{n} + c_3 \times \frac{E_0}{E_{\text{CH}(k)}} \quad (7)$$

式中: d_{CH} 为簇内成员节点到当选簇头节点的距离; $d_{\text{max BS}}$ 为簇内成员节点到BS的最大距离; $|N_{\text{CH}(k)}|$ 为加入到簇头节点的成员节点个数; n 为所有节点个数; E_0 为所有节点的初始能量; $E_{\text{CH}(k)}$ 为当选簇头节点 k 的剩余能量; c_1 、 c_2 、 c_3 均为权重系数,分别可以调节距离因素、成员节点个数以及剩余能量对成本函数的影响程度,且 $c_1 + c_2 + c_3 = 1$ 。

3.3 簇间通信

当簇群建立完成,所有节点都得到部署,WSNs开始传输数据。在传输数据的过程,簇内成员节点将感知到的信息发送到簇头节点,由簇头节点将信息进行融合然后发送到BS。但是,当簇头节点到BS的距离较远时,如果直接进行单跳通信,则会使簇头节点能量消耗过快,导致节点快速死亡。因此,采用单跳和多跳模式相结合的方式通信,

具体的通信规则如下。

1)如果成员节点到簇头节点的距离大于该成员节点到BS的距离,那么该成员节点直接以单跳的方式与BS进行通信。

2)如果成员节点到簇头节点的距离小于该成员节点到BS的距离,那么该成员节点将数据转发给簇头节点,再由簇头节点与BS进行通信。

3)当簇头节点与BS的距离小于簇头节点的通信半径时,直接以单跳形式将数据传输给BS;当簇头节点与BS的距离大于簇头节点的通信半径时,则需要全面考虑当前簇头节点的邻居节点个数、邻居候选簇头节点剩余能量、邻居候选簇头节点与BS的距离以及当前簇头节点与邻居候选簇头节点的距离等因素之后,在邻居候选簇头节点中选择一个最优节点作为中继节点进行转发数据。

4)中继节点仍需按上述规则进行转发数据,直到将数据传送到BS。

具体的通信过程伪代码如下。

算法2 节点数据通信过程:

```

For i=0:n do
  IF 节点存活
    IF 节点为普通节点
      IF  $d_{\text{CH}} < d_{\text{COB}}$ 
        普通节点与簇头节点以式(2)进行通信
      ELSE
        普通节点与BS直接进行通信
      END
    ELSE 节点为簇头节点
      IF  $d_{\text{CHB}} < R$ 
        簇头节点直接与BS通信
      ELSE
        选择中继节点,利用中继节点进行多跳与BS进行通信
      END
    END
  END
END
END

```

4 仿真结果和分析

为了验证本文提出的EBM_LEACH算法的性能,采用MATLAB在两种不同的WSNs环境(100 m×100 m小面积监测区域和200 m×200 m大面积监测区域)下,对LEACH、DEEC、IMP-LEACH以及EBM_LEACH进行了仿真实验,仿真参数设置如表1所示。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
网络范围	100 m×100 m/200 m×200 m
节点个数 n	100
基站位置	(50,50)/(100,100)
节点初始能量 E_0/J	0.2
数据信息大小/bit	4 000
控制信息大小/bit	32
$E_{\text{DA}}/(\text{NJ}\cdot\text{bit}^{-1})$	5×10^{-8}
$E_{\text{elec}}/(\text{NJ}\cdot\text{bit}^{-1})$	5×10^{-7}
$\epsilon_{\text{ls}}/(\text{J}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	10^{-12}
$\epsilon_{\text{mp}}/(\text{J}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	1.3×10^{-15}
运行周期/轮	1 000
簇头概率 p	0.1
W_1/W_2	0.5/0.5
$c_1/c_2/c_3$	0.5/0.3/0.2

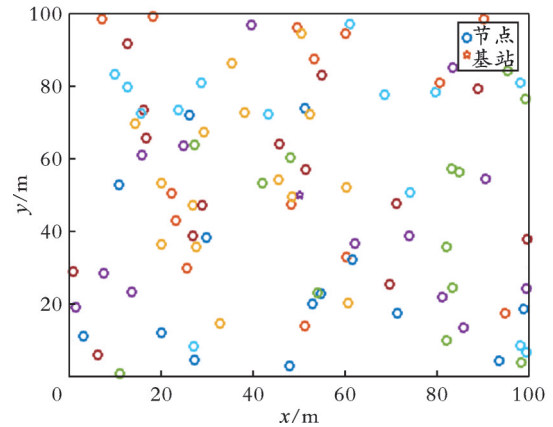
4.1 不同面积监测区域内的节点部署

将 100 个传感器节点随机分布在 100 m×100 m 的小面积和 200 m×200 m 的大面积监测区域,不同面积区域的节点部署如图 4 所示。

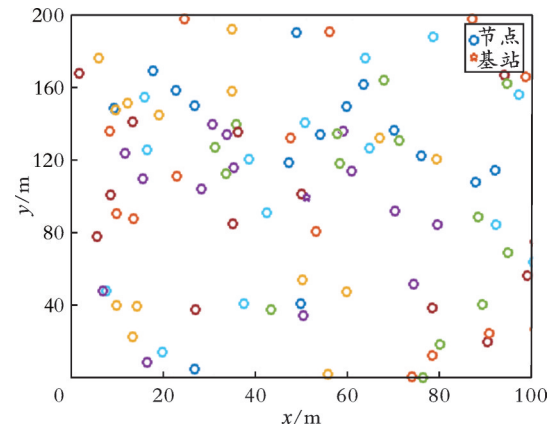
4.2 WSNs 生存周期对比

100 m×100 m 的小面积及 200 m×200 m 的大面积监测区域的生存周期仿真结果如图 5 所示,从图 5(a)中可以看出,EBM_LEACH 算法较

LEACH、DEEC 和 IMP-LEACH 算法生存周期长。从图 5(b)可以看出,EBM_LEACH 算法较 LEACH、DEEC、IMP-LEACH 算法的生存周期长,经计算得分别延长了约 50%、20%、10%。

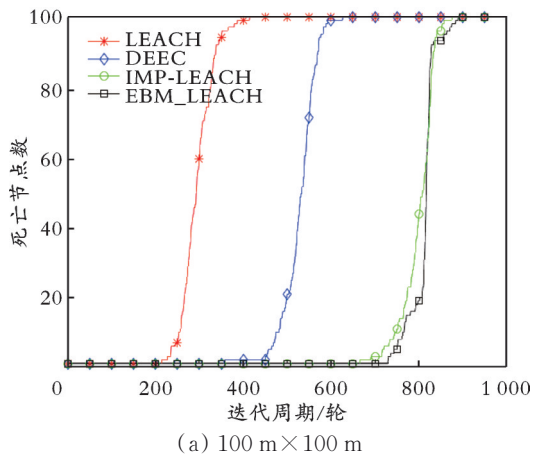


(a) 100 m×100 m

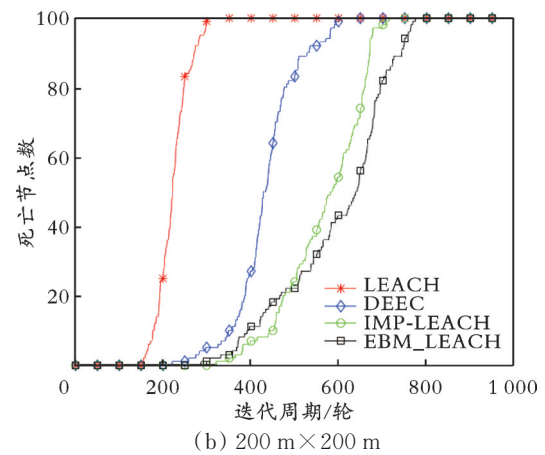


(b) 200 m×200 m

图 4 不同面积区域的节点部署



(a) 100 m×100 m



(b) 200 m×200 m

图 5 WSNs 的生存周期对比

4.3 WSNs 剩余能量对比

WSNs 在不同面积区域的剩余总能量对比如图 6 所示。从图 6 可以看出,与 LEACH、DEEC、IMP-LEACH 三种算法相比,在 100 m×100 m 的监测区域内,EBM_LEACH 算法有效地均衡了 WSNs 中能量的消耗,随着迭代周期的递增,网络中节点

的总剩余能量在不断减少,但 EBM_LEACH 算法减少速度最慢,存活时间最长;在 200 m×200 m 的大面积监测区域,EBM_LEACH 算法的剩余能量的减少速度最为缓慢,经计算得,相较于 LEACH、DEEC、IMP-LEACH 算法分别延长了约 50%、20%、5%。

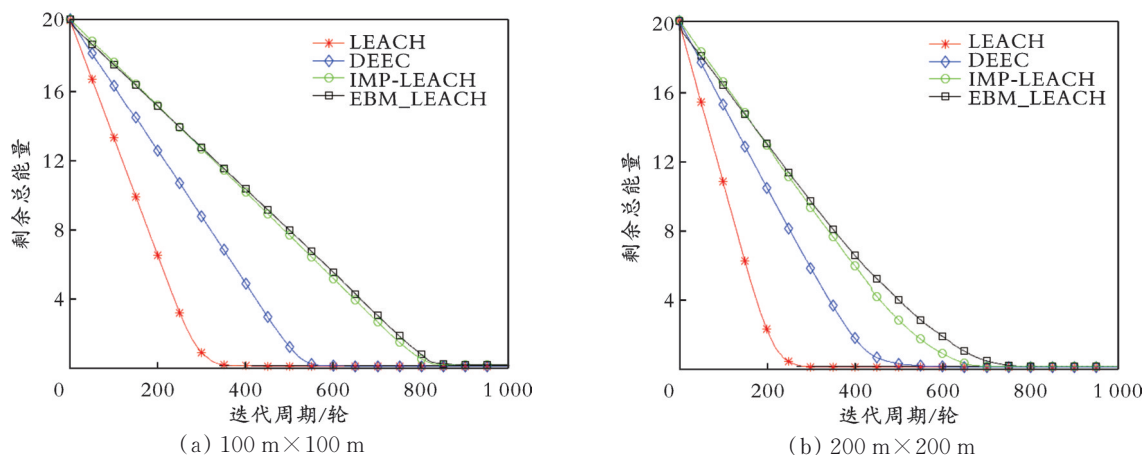


图6 WSNs在不同面积区域的剩余总能量对比

4.4 WSNs数据吞吐量对比

WSNs在不同面积区域的数据吞吐量对比如图7所示。从图7可以看出,在100 m×100 m的小面积监测区域,与LEACH、DEEC、IMP-LEACH算法

相比,EBM_LEACH算法的数据吞吐量有了明显的提升;在200 m×200 m的大面积监测区域,由于节点的提早死亡,四种算法的数据吞吐量都有所下降,但EBM_LEACH算法的数据吞吐量最大。

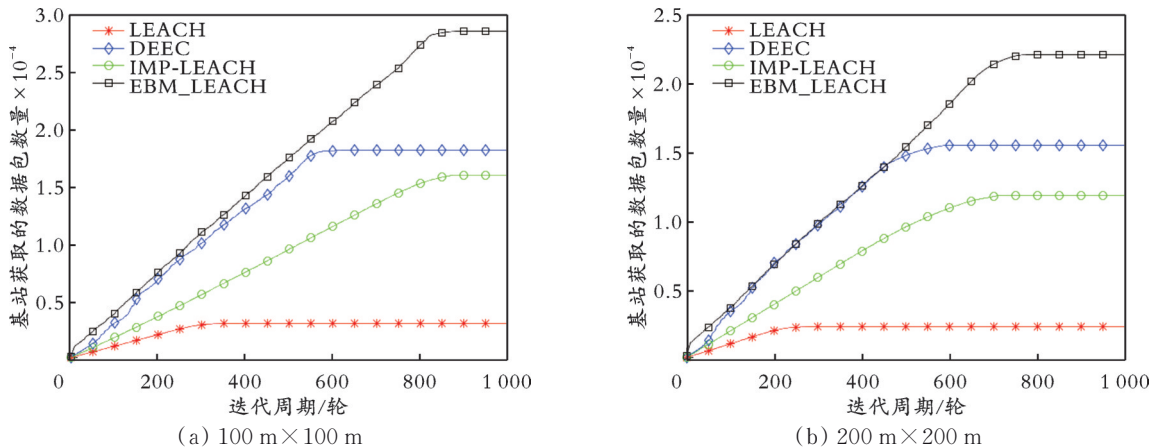


图7 WSNs在不同面积区域的数据吞吐量对比

5 结 论

针对传统LEACH协议中存在的簇头节点选择不合理的问题,本文提出了以均衡节点能量消耗、提高WSNs数据吞吐量、延长生存周期为目的的EBM_LEACH算法。该算法主要是根据节点剩余能量、节点与BS之间的距离、邻居节点的信息优化簇头节点选择的阈值公式;在簇间通信阶段,根据节点剩余能量,成员节点与BS、成员节点与簇头节

点、簇头节点与BS之间的通信距离,确定是否需要选取中继节点采用多跳形式进行转发数据,完善了传统LEACH协议中只采用单跳形式进行通信的弊端。对100 m×100 m和200 m×200 m的监测区域进行了仿真实验。结果表明,本文提出的EBM_LEACH算法的WSNs生存周期、剩余总能量和数据吞吐量都优于LEACH、DEEC和IMP-LEACH算法。

参 考 文 献

- [1] MENG Y H, CHEN Y W, ZHANG Q W, et al. MNCE: Multi-hop node localization algorithm for wireless sensor network based on error correction[J]. Information, 2020, 11(5): 269.
- [2] 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.
- [3] 黄晓璐, 欧峰. 担任确保覆盖和连通性的WSN寿命最大化[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 61-68.
- [4] ZOU Z F, QIAN Y. Wireless sensor network routing method based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of

- Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 991-998.
- [5] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] MAHBOUB A, EN-NAIMI E M, ARIOUA M, et al. Distributed energy efficient clustering algorithm based on fuzzy logic approach applied for heterogeneous WSN[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computing and Wireless Communication Systems. Larache: Association for Computing Machinery, 2017: 1-6.
- [7] 潘华, 陈佳品, 丁凯, 等. 一种基于多跳与按数据量-距离分发的 LEACH 协议优化[J]. 电光与控制, 2018, 25(11): 89-92.
- [8] 田鹏, 陈桂芬, 孙开蔚. 基于 LEACH 改进的多跳多路径分簇路由协议[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 117-123.
- [9] KHEDIRI S E L, NASRI N, WEI A N, et al. A new approach for clustering in wireless sensors networks based on LEACH[J]. Procedia Computer Science, 2014, 32: 1180-1185.
- [10] SAXENA M, JOSHI A, DUTTA S, et al. Comparison of different multi-hop algorithms to improve the efficiency of LEACH protocol[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118(4): 2505-2518.
- [11] XIE X, WANG J A, GE S L, et al. An improved spatial-temporal correlation algorithm combined with compressed sensing and LEACH protocol in WSNs[J]. International Journal of Information and Computer Security, 2020, 12(4): 383-396.
- [12] 张伟华, 李腊元, 张留敏, 等. 无线传感器网络 LEACH 协议能耗均衡改进[J]. 传感技术学报, 2008, 21(11): 1918-1922.
- [13] 严斌亨, 刘军, 刘广斌, 等. 基于改进蚁群算法的 LEACH 协议研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(12): 136-138.
- [14] SUN Y J, DONG W X, CHEN Y H. An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1317-1320.
- [15] KUKUNURU N. Secure and energy aware shortest path routing framework for WSN[M]. Singapore: Springer, 2018: 379-390.
- [16] 张雁东, 赵宏伟, 王出航, 等. 基于模糊控制的环形 WSN 多跳分簇路由算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(4): 467-473.
- [17] 郭建莉, 施惠元, 王杰, 等. 基于无线网络的工业过程控制系统的设计与开发[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(3): 80-86.
- [18] ZHANG W B, WEI X R, HAN G J, et al. An energy-efficient ring cross-layer optimization algorithm for wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 16588-16598.
- [19] RADHIKA M, SIVAKUMAR P. Energy optimized micro genetic algorithm based LEACH protocol for WSN [J]. Wireless Networks, 2021, 27(1): 27-40.
- [20] ZHAO F Z, YOU X, RU L. Improved LEACH routing communication protocol for a wireless sensor network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 8(12): 649609.
- [21] LIU S. Energy-saving optimization and matlab simulation of wireless networks based on clustered multi-hop routing algorithm[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2020, 27(2): 280-288.

(编辑 张 芳)