

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209721

簇首优选改进算法设计及其网络能耗影响研究^{*}

冯程鹏 何汇成 邹杰 穆继亮

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 无线传感网络是由大量传感节点构成的分布式自组织网络,而传感节点采用电池供电,其有限的能量严重影响了网络的生存周期。本文提出了一种新的异构感知路由协议(ED-SEP),该协议在分簇阶段综合考虑节点的剩余能量和覆盖半径范围内邻居节点的疏密程度及与基站的相对距离大小,从而选举出更具优势的簇首。采用 MATLAB 仿真分析了 ED-SEP 协议在改变基站位置和节点初始能量下的性能表现,并与稳定选举协议 SEP、E-SEP 进行比较。结果表明:通过改变网络中的参数,ED-SEP 协议的网络稳定期相比 SEP 协议和 E-SEP 协议分别提高了 29.6% 和 25.7%,基站的数据接收量达到了 E-SEP 协议的近 3 倍,有效提高了网络的能量利用率,极大地改善了无线传感网络的性能。

关键词: 无线传感器网络;SEP 协议;剩余能量;邻居节点;能耗均衡

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Research on improved algorithm design of Cluster Heads optimization and influence of network's energy consumption

Feng Chengpeng He Huicheng Zou Jie Mu Jiliang

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education
(North University of China), Taiyuan 030051, China)

Abstract: Wireless sensor network (WSN) is a distributed self-organizing network composed of a large number of sensor nodes. The sensor nodes are powered by batteries, and their limited energy seriously affects the life cycle of the network. In this paper, we introduced a new heterogeneous awareness routing protocol to elect a more reasonable cluster head, which comprehensively considers the residual energy of the node, the density of neighbor nodes and the relative distance to the base station within the coverage radius in clustering stage. We used the MATLAB R2016b simulator to analyze the performance of ED-SEP protocol under the condition of changing the base station location and the initial energy of the node, and it is compared with the stable election protocols. Simulation results show that the network's stable period of ED-SEP protocol is increased by 29.6% and 25.7% respectively compared with SEP protocol and E-SEP protocol, and the data receiving capacity of base station is nearly three times that of E-SEP protocol. Therefore, the ED-SEP algorithm can effectively improve the energy utilization rate of the network and greatly improve the performance of the wireless sensor network.

Keywords: wireless sensor network; SEP protocol; residual energy; neighbor node; energy consumption balance

0 引言

无线传感网络(wireless sensor network, WSN)是一项通过无线通信技术将大量传感节点以自组织方式结合而成的网络^[1],能够以低成本的方式实现数据接收、处理和传输功能,在海洋监测、军事要地监测、农业生产等方面有着广泛应用^[2-4]。无线传感器网络主要能量来源于电池,受限于

传感节点在环境中的布放位置,给电池充电或是更换电池相对困难且不易实现,因此,如何减少网络通讯的能量消耗^[5-7],提高网络能源效率对延长网络生命周期至关重要。

目前,国内外专家学者已提出多种层次路由协议来改善网络稳定性、延长网络的生存周期。Smaragdakis 提出的 SEP 协议^[8]在 LEACH 协议的基础上基于节点初始能量的差异,影响簇首选举的概率形成的能量异构协议,在一

收稿日期:2022-04-24

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62171414,62101513)项目资助

一定程度上改善了节点因能量不足过早死亡的问题,效果优于 LEACH 协议。Zhao 等^[9]提出了一种改进的阈值敏感稳定选举协议 ITSEP,该算法让网络中一半的节点参与簇首选举,另一半充当成员节点,并使用新的因子对阈值表达式加权,以多跳的方式进行数据传输,延长了网络的使用寿命,但是流程更加复杂。Naem^[10]等提出了一种基于距离的剩余能量高效稳定选举协议 DARE-SEP,该协议将节点按照初始能量的大小分为三级,提供从传感器节点到簇头(CHs)的最优传输路径。CHs 节点和 sink 节点之间采用多跳路由,减少能量消耗。徐洪敏^[11]提出了一种稳定选举算法 E-SEP,该算法在簇首选举中考虑了节点的剩余能量,并结合了信息传输距离对网络能耗的影响,提高了网络的稳定性,但是两种协议均没有考虑节点的部署环境,可能产生不合理的簇首。

本文基于二级初始能量异构环境,针对传感器网络出现的节点能耗不均匀和网络稳定周期短问题,对 SEP 协议进行改进,提出了一种考虑节点剩余能量和邻居节点信息的稳定选举算法(ED-SEP),即根据节点覆盖半径范围内所有的邻居节点的存活状态、部署位置等情况,对选举概率进行更新,从而挑选出更加具有综合优势的节点成为簇首。采用 MATLAB 对比分析了 SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议在改变基站位置和节点初始能量下的性能表现,结果表明,与 SEP 协议和 E-SEP 协议相比,ED-SEP 协议使得传感节点能耗更加均衡,有利于延长网络的生命周期。

1 SEP 路由协议

LEACH 协议以轮作为簇首选举的单位,每一轮分为两个阶段:分簇过程和稳定传输过程^[12]。SEP 协议在 LEACH 协议的基础上针对节点初始能量不同,将节点分为高级节点和普通节点,并设置了不同的选举阈值使得高级节点更容易被选举为簇首。

假设在网络中,高级节点的占比为 m , a 为高级节点多余能量与普通节点初始能量的比值,分簇过程中,每个传感节点都会生成一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数,如果随机数小于该节点的选举阈值 $T(n)$,则选择该节点作为簇首,否则作为成员节点,根据信号强度加入对应的簇,完成建簇^[13]。

其中,普通节点被选为簇首的概率及其选举阈值分别为

$$p_l = \frac{p}{1+ma} \quad (1)$$

$$T(n_l) = \begin{cases} \frac{p_l}{1-p_l \times \left[r \bmod \left(\frac{1}{p_l} \right) \right]}, & n_l \in G_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

高级节点被选为簇首的概率及其选举阈值分别为

$$p_a = \frac{p}{1+ma}(1+a) \quad (3)$$

$$T(n_a) = \begin{cases} \frac{p_a}{1-p_a \times \left[r \bmod \left(\frac{1}{p_a} \right) \right]}, & n_a \in G_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, p 表示最佳簇首比例, r 表示当前进行的轮数, G_1 表示在之前选举的 $1/p_l$ 轮内未被选举为簇首的普通节点集合, G_2 表示在之前选举的 $1/p_a$ 轮内未被选举为簇首的高级节点集合。

在稳定传输阶段,节点将采集的环境信息发送给簇首,簇首将自己采集的信息与成员节点的数据进行融合,并将融合后的数据发送至汇聚节点,由汇聚节点统一分析处理^[14]。稳定传输持续一段时间后,网络便进行新一轮选举过程。

2 能耗模型

本文采用一阶无线电能量消耗模型,主要考虑节点之间通信产生的能耗,节点运算和存储产生的能耗忽略不计。

当 N bit 的数据在间距为 d 的两个节点之间传输时,单节点所需要的发送能耗 E_{TX} 如式(5)所示。

$$E_{TX}(N, d) = N \times E_{elec} + N \times \delta_{amp}(d) \quad (5)$$

$$\delta_{amp}(d) = \begin{cases} \epsilon_{fs} \times d^2, & d < d_0 \\ \epsilon_{amp} \times d^2, & d > d_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_{elec} 表示发送或接收 1 bit 数据时需要的能量; δ_{amp} 是不同传播距离下功率放大电路的放大倍数,其中, ϵ_{amp} 和 ϵ_{fs} 分别代表两径传播衰减信道模型和自由空间衰落模型^[15],距离阈值 d_0 的定义如式(7)所示。

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{amp}}} \quad (7)$$

节点接收 N bit 的数据所需要消耗的能量 E_{RX} 如式(8)所示。

$$E_{RX} = N \times E_{elec} \quad (8)$$

3 算法描述

在 SEP 协议中,簇首需要承担繁重的信息传递任务,所以比普通节点要消耗更多的能量,且每个节点只有被选举为簇首时才会进行簇间通信,大部分情况下都是作为成员节点,仅需要进行簇内通信。基于此,本文提出了一种基于节点剩余能量和邻居节点信息的阈值改进算法,在每一轮的分簇阶段,计算节点的剩余能量,选取合适的覆盖半径,并根据该范围内邻居节点数量、部署位置情况,对选举概率进行实时更新,选举出更加合适的节点完成簇首任务。

3.1 相对剩余能量

在 SEP 协议中,簇首选举过程只考虑了节点的初始状态,经过数轮数据传输以后,节点成为簇首的概率依然不变,导致簇首与非簇首节点的能量差异过大,影响网络性能的稳定^[16]。通过引入节点剩余能量,使得簇首选举更加合理,减少了低能量节点成为簇首的可能,延长了网络的使用

时间。

假设在第 r 轮中,存活的节点数量为 K 个,簇首的数量为 M 个,其中,第 i 个成员节点的剩余能量为 $E_{mem}(i)$,第 j 个簇首的剩余能量为 $E_{CH}(j)$,则在本轮中,剩余总能量为:

$$E_{tol_res}(r) = \sum_{i=0}^{K-M} E_{mem}(i) + \sum_{j=0}^M E_{CH}(j) \quad (9)$$

$$E_{con}(r) = \sum_{i=0}^{K-M} E_{mem_con}(i) + \sum_{j=0}^M E_{CH_con}(j) \quad (10)$$

其中, $E_{mem_con}(i)$ 为第 r 轮中第 i 个成员节点的能量消耗, $E_{CH_con}(j)$ 为第 r 轮中第 j 个簇首的能量消耗。

所以,经过 r 轮周期后,节点的剩余平均能量为:

$$E_{avg}(r) = \frac{E_{tol_res}(r)}{N} \quad (11)$$

当 $(r+1)$ 轮开始时,节点 i 的剩余能量为:

$$E_{res}(i) = \begin{cases} E_{CH}(i) - E_{CH_con}(i), & i \text{ 是簇头} \\ E_{mem}(i) - E_{mem_con}(i), & i \text{ 是成员节点} \end{cases} \quad (12)$$

节点 i 的相对剩余能量为:

$$E_{rel}(i) = \frac{E_{res}(i)}{E_{avg}(r)} \quad (13)$$

将节点的相对剩余能量 $E_{rel}(i)$ 引入 SEP 协议的簇首选举概率因子中,得到普通节点和高级节点新的簇首选举概率分别为:

$$p_{nrm} = \frac{p \times e^{E_{rel}(i)}}{1 + ma} \quad (14)$$

$$p_{adv} = \frac{p \times e^{E_{rel}(i)}}{1 + ma} (1 + a) \quad (15)$$

3.2 邻居节点信息

在实际的无线传感器网络中,传感节点的布放是随机的,引入 Nei 因子可以有效增加密集区域内节点的选举概率,减少稀疏区域内节点的选举概率,均衡网络的能量消耗,延长网络生存周期。因此,在每轮选举之前,需要重新统计节点覆盖半径 R 内的存活节点数量:

$$Nei = 1 - \frac{1}{count} \quad (16)$$

$count$ 为在节点 i 的覆盖半径 R 内邻居节点的个数。邻居节点的数量越多,节点 i 覆盖范围内存活的节点也就越多, Nei 值也就越大,则该节点成为簇首的概率也就越大。

D_{tosink} 反映了节点与汇聚节点之间的距离关系,通过比较节点在传感网络中的位置,可以判断节点作为簇首的合理性,选举出更具优势的簇首。 D_{tosink} 的表达式如式(16)所示。

$$D_{tosink} = \frac{d_{max} - d_{sink}(i)}{d_{max} - d_{min}} \quad (17)$$

其中, $d_{sink}(i)$ 为节点 i 到汇聚节点之间的距离, d_{max} 为在节点 i 以 R 为半径的覆盖范围内,所有存活节点中到 sink 节点的最大距离。 d_{min} 节点 i 以 R 为半径的覆盖范围

内,所有存活节点中到 sink 节点的最小距离。

引入综合因子 ND 作为节点的部署位置理想与否的判决条件:

$$ND = C_1 \times Nei + C_2 \times D_{tosink} \quad (18)$$

$$C_1 + C_2 = 1 \quad (19)$$

其中, C_1 为 Nei 因子在簇首选举中所占权重, C_2 为 D_{tosink} 因子在簇首选举中所占权重。

综合上述因子的影响,改进以后普通节点的阈值公式为:

$$T(n_{nrm}) = \begin{cases} \frac{p_{nrm} \times ND}{1 - p_{nrm} \times \left[r \bmod \left(\frac{1}{p_{nrm}} \right) \right]}, & n_{nrm} \in G'_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

高级节点的阈值公式为:

$$T(n_{adv}) = \begin{cases} \frac{p_{adv} \times ND}{1 - p_{adv} \times \left[r \bmod \left(\frac{1}{p_{adv}} \right) \right]}, & n_{adv} \in G'_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

r 表示当前进行的轮数, G'_1 为之前选举的 $1/p_{nrm}$ 轮中没当选过簇首的普通节点集合, G'_2 为之前选举的 $1/p_{adv}$ 轮中没当选过簇首的高级节点集合。

4 网络仿真与性能分析

为了验证提出的解决方案,利用 MATLAB 进行了实验与仿真,仿真参数如表 1 所示。本文将 100 个传感节点随机部署在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的监测区域内,设定汇聚节点的坐标为(50,50),高级节点高于普通节点初始能量的倍数 $\alpha=1$,将 SEP 协议、E-SEP 协议与 ED-SEP 协议的存活节点数量、基站接收到的数据包量和平均剩余能量进行了比较。

表 1 仿真参数表

参数	取值
簇首比例 p	0.1
高级节点比例 m	0.2
节点总数 N	100
发送/接收 1 bit 数据能耗 E_{elec}	50 nJ
融合 1 bit 数据能耗 E_{DA}	5 nJ
数据包大小	4 000 bits
节点初始能量	0.5 J
r_{max}	5 000

4.1 性能对比分析

SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议运行 5 000 个周期以后存活节点的数量对比如图 1 所示,在网络开始运行时,ED-SEP 协议性能便表现出了最好的性能。结合表 2

中各个阶段节点死亡轮数的对比,SEP 协议在第 506 轮产生第一个死亡节点,网络开始不稳定,在第 767 轮时,节点死亡数量达到 10%,并于随后的一百多轮内出现大面积的节点死亡。采用 E-SEP 协议的网络中,虽然在开始阶段节点的死亡速度较快,但是随着网络的运行,其可以选举出合适的簇首来增加网络的活跃度,降低了节点死亡的速度。而 ED-SEP 协议网络不稳定出现在第 656 轮,与 SEP 协议相比,网络的稳定性能提升了 29.6%,较 E-SEP 协议提升了 25.7%,同时,10~60% 节点死亡的轮数相比 SEP 协议和 E-SEP 协议均要延后。因此,ED-SEP 算法能有效提升了网络的稳定性能。

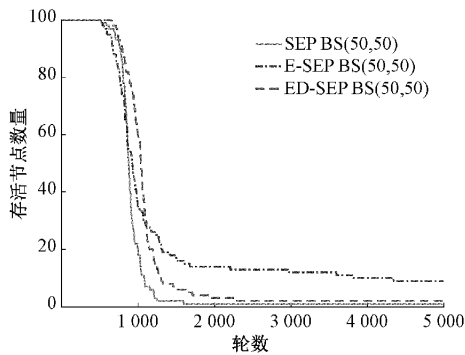


图 1 存活节点数量仿真图

表 2 节点死亡数量对比

节点死亡阶段	SEP	E-SEP	ED-SEP
首个节点死亡	506	522	656
10%节点死亡	767	675	791
20%节点死亡	804	756	883
30%节点死亡	838	820	950
40%节点死亡	859	856	995
50%节点死亡	876	920	1 035

节点向基站传送数据信息是无线传感器网络的主要任务。如果网络长时间处于活跃状态,则会感知到更多的数据,形成更多的环境信息并传递到基站^[17]。图 2 显示了在给定的网络周期下,基站接收的数据包数量。在 900 轮后,SEP 协议和 E-SEP 协议网络中的传感器节点死亡数量达到 50%,基站接收数据量的增长速度变缓,而采用 ED-SEP 协议的网络中依然有将近 80% 的存活节点继续传递和转发数据,大概在 1 000 轮后增长速度变缓。在网络运行 5 000 轮之后,采用 ED-SEP 协议的网络基站接收数据包数量达到了 30 000 多个,大约是 SEP 协议的两倍,而 E-SEP 协议仅仅收到了 10 000 多的数据包数量。结果表明,ED-SEP 协议比 SEP 协议和 E-SEP 协议具有更高的数据包接收量。

通过采用 ED-SEP 协议,避免了网络中能量过低的节点被选举为簇首,保证了在每一轮的选举过程中可以让剩

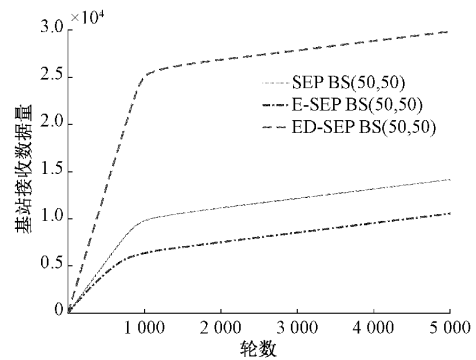


图 2 基站接收数据包数量仿真图

余能量更多、部署位置更合理的节点担任簇首,完成繁重的信息传输任务,使得网络中的能耗更加均衡。图 3 描述了在网络运行过程中节点平均剩余能量的变化情况。如图所示,SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议网络中的节点能量均平稳下降,且 ED-SEP 协议中每轮节点的平均剩余能量都大于 SEP 协议,即每传递一轮信息消耗更少的节点能量,而 E-SEP 协议与 SEP 协议相比,在 800 多轮后才表现出了优异性。结果表明,ED-SEP 协议有效降低了网络的能耗。

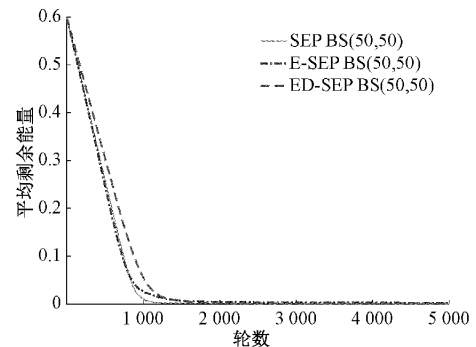


图 3 平均剩余能量仿真图

4.2 改变基站的位置

根据式(7)可知,两径传播衰减信道模型和自由空间衰落模型的临界距离 d_0 约为 87 m,在上述的网络中,所有节点到基站的距离都小于 d_0 ,数据传输均采用自由空间衰落模型。为了进一步验证 ED-SEP 协议的性能,本文在基站坐标为(50,100)的情况下,对比了 SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议网络的存活节点数量、基站接收数据包数量、平均剩余能量,仿真结果如图 4~6 所示,表 3 给出了 3 种协议的首个节点死亡以及 10%~50% 节点死亡相应的轮数对比结果。

仿真结果表明,改变基站的位置对存活节点数量、平均剩余能量以及基站接收数据包数量都产生了影响,数据传输不再是单一的采用自由空间衰落模型,加入了两径传播衰减信道模型,由式(6)可知,当数据传输距离大于 d_0 时,能耗是距离 4 次方的倍数,网络的能量消耗增大,导致第一

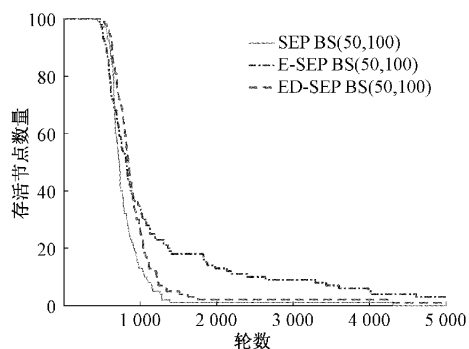


图 4 存活节点数量仿真图

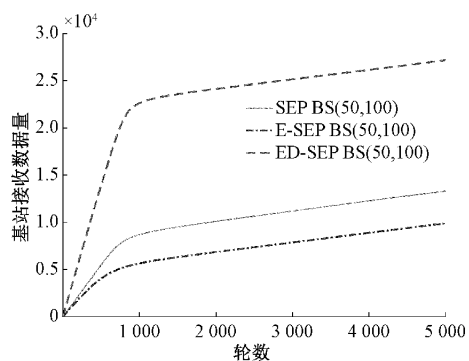


图 5 基站接收数据包数量仿真图

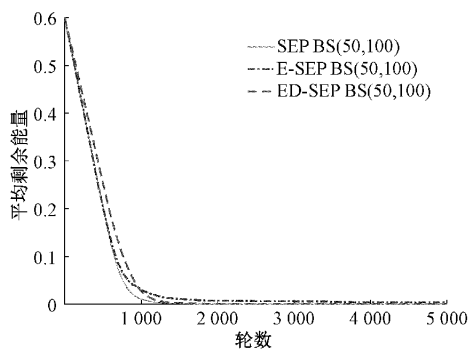


图 6 平均剩余能量仿真图

表 3 节点死亡数量对比

节点死亡阶段	SEP	E-SEP	ED-SEP
首个节点死亡	439	457	523
10%节点死亡	604	548	633
20%节点死亡	647	598	689
30%节点死亡	665	658	730
40%节点死亡	678	726	801
50%节点死亡	722	813	846

个节点死亡提前,基站接收到的数据包数量下降,节点平均剩余能量减少。

通过对比 3 种协议在改变基站位置情况下的性能表现可以得出,在第一个节点死亡后,经过 283 轮,SEP 协议网

络中节点的死亡数量达到了 50%,同样的情况 E-SEP 协议和 ED-SEP 协议分别用了 356 轮和 323 轮,节点的死亡速率均得到了有效缓解,且 ED-SEP 协议的稳定期相比 SEP 协议依然有 19.1% 的提升,具有更高的数据包发送量及更低的能量消耗。因此,ED-SEP 协议算法要优于 SEP 协议和 E-SEP 协议。

4.3 改变节点初始能量

电池的不可更替特性使得传感节点的初始能量对整个网络的性能起着至关重要的作用。将传感节点的初始能量增加至 0.8 J,保持其他条件不变,对比了 SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议网络的存活节点数量、基站接收数据包数量、平均剩余能量,仿真结果如图 7~9 所示,各个阶段节点死亡数量相应的轮数对比如表 4 所示。通过对比可以发现,在改变节点初始能量的情况下,提出的 ED-SEP 协议比其他两种协议有更好的效果。SEP 协议、E-SEP 协议和 ED-SEP 协议分别在第 815 轮、第 948 轮和第 1 023 轮出现第一个节点死亡,与能量初值为 0.5 J 相比,网络的稳定期均得到了延长,节点死亡的速度也得到了极大的改善。在数据传输率方面,SEP 协议和 E-SEP 协议在 5 000 个工作周期内仅有不到 20 000 的数据包接收量,而 ED-SEP 协议在相同的工作周期内基站的数据接收量超过了 45 000 个数据包,是 SEP 协议两倍之多。同时,在数据传输过程中,ED-SEP 协议消耗的能量要远低于 SEP 协议和 E-SEP 协议,延长了网络的寿命和稳定期。因此,节点的能量初值发生改变时,改进后的算法具有更好的适应性。

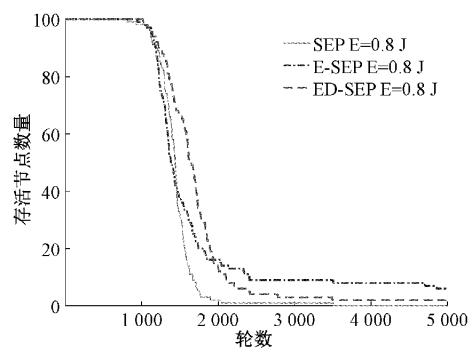


图 7 存活节点数量仿真图

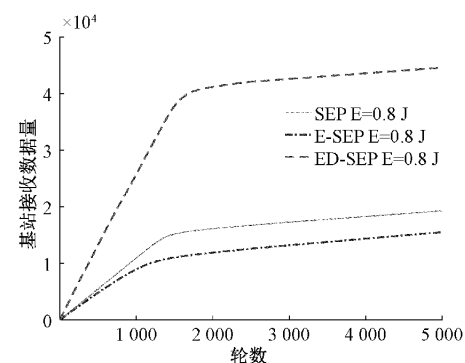


图 8 基站接收数据包数量仿真图

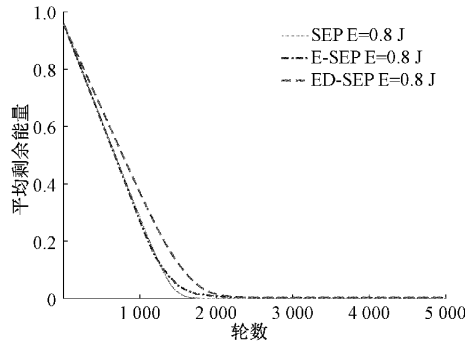


图 9 平均剩余能量仿真图

表 4 节点死亡数量对比

节点死亡阶段	SEP	E-SEP	ED-SEP
首个节点死亡	815	948	1 023
10%节点死亡	1 170	1 118	1 218
20%节点死亡	1 296	1 182	1 361
30%节点死亡	1 350	1 283	1 441
40%节点死亡	1 394	1 354	1 583
50%节点死亡	1 436	1 478	1 650

5 结 论

在无线传感网络中,高效的能源利用和网络稳定期的延长是主要的改进方向。本文针对 SEP 协议易出现节点能耗不均匀导致网络生存周期短的问题,提出了一种考虑节点剩余能量和邻居节点信息的簇首选举算法,通过仿真试验与 SEP 协议和 E-SEP 协议进行了性能对比,表明本文提出的算法在稳定性、数据接收量以及网络能耗方面都有良好的性能,对比分析了基站不同位置和节点在不同初始能量下该算法的性能,结果表明本文提出的算法可以有效减少网络的能量消耗,延长网络的生存周期。

参考文献

[1] 陈雪娇. 异构无线传感器网络的分区稳定路由协议[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 50-54.
 [2] 彭海军, 杨建新, 钱玉莹. 基于 WSN 的机棚温湿度精确监测系统的设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 228-233.
 [3] 张雪峰. 面向海洋监测的船舶无线传感网络节点部署方法优化[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(20): 145-147.
 [4] FAN O Y, CHENG H, LAN Y B, et al. Automatic delivery and recovery system of Wireless Sensor Networks(WSN) nodes based on UAV for agricultural applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 31-43.

[5] 吴誉兰. 基于蚁群和能量有效的改进 Ad Hoc 路由协议[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 13-17.
 [6] 冯笑晨, 邵壮, 文玉梅, 等. 利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 131-140.
 [7] 高梅, 王丙元. 图论在无线传感网络路由协议中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 25-31.
 [8] 曹宇. 基于改进 SEP 协议的 WSN 能量优化方案研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2019.
 [9] ZHAO L Q, TANG Q. An improved threshold-sensitive stable election routing energy protocol for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Information, 2019, 10(4): 125.
 [10] NAEEM A, JAVED A R, RIZWAN M, et al. DARE-SEP: A hybrid approach of distance aware residual energy-efficient SEP for WSN [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(2): 611-621.
 [11] 徐洪敏. 基于 SEP 协议改进的最优稳定选举算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 28-33.
 [12] 伍敏君. 基于能量的非完全分簇路由算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 60-64.
 [13] 胡乃平, 王冬, 周艳平. 基于 SEP 协议的最优分簇改进算法[J]. 计算机与现代化, 2019(9): 17-23, 30.
 [14] 朱江, 雷云, 王雁. 认知无线传感器网络中基于稳定性的能效路由协议[J]. 计算机科学, 2018, 45(11): 97-102.
 [15] 施开林. 基于能量优化的无线传感器网络路由协议研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
 [16] 李云亮. 无线传感网络的能量优化算法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
 [17] URLAN Z, ZHUKABAYEVA T, OTHMAN M. EZ-SEP: Extended Z-SEP routing protocol with hierarchical clustering approach for wireless heterogeneous sensor network[J]. Sensors, 2021, 21(4):1021.

作者简介

冯程鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络。
 E-mail: fengchengpeng@126.com
 何汇成, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表工程。
 E-mail: hehuicheng9512@163.com
 邹杰, 硕士研究生, 主要研究方向为智能感知微系统。
 E-mail: 15735659591@163.com
 穆继亮(通信作者), 教授, 主要研究方向为智能感知微系统。
 E-mail: mujiliang@nuc.edu.cn