

基于半固定分簇的无线传感器网络节能分簇路由算法

张朝辉, 周嘉琦

(西安电子科技大学数学与统计学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为了解决无线传感器网络中节点能耗不均衡和数据传输能耗大导致的网络生命周期短的问题, 提出了基于半固定分簇的节能分簇路由算法。在节点部署完毕后对每个簇进行调整, 保证每个簇的节点数相同, 从而达到负载均衡的目的。在簇头选择阶段, 主要考虑节点间距离以及节点的剩余能量; 在数据传输阶段, 算法根据节点的剩余能量、节点到基站的距离以及节点之间的距离构建了中继节点选择的优化模型, 同时实现了均衡和降低能耗的目标; 当网络运行一段时间后, 由于簇间的剩余能量差异过大, 再次对簇群进行优化, 尽可能使得每个簇群能量接近; 最后当簇头节点能量低于所设阈值时, 再次对簇头进行轮换优化, 以延长节点的工作时长。仿真结果表明, 所提算法有效降低了节点能耗, 延长了网络的生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 分簇; 路由; 簇群负载均衡; 能耗优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024080

Energy-saving clustering routing algorithm based on semi-fixed cluster for wireless sensor networks

ZHANG Zhaohui, ZHOU Jiaqi

School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: To solve the problems of short network lifetime, caused by unbalanced node energy consumption, and large energy consumption in data transmission of wireless sensor network, a semi-fixed clustering routing algorithm was proposed in order to achieve the load balance of each cluster. After the nodes were deployed, each cluster was adjusted to ensure that each cluster was well-matched in the number of nodes. In the beginning, the cluster heads were selected according to the distances between nodes and the residual energy of nodes. In data transmission phase, the optimization model of relay nodes was constructed according to the residual energy of nodes, the distances between nodes and the base station, and the distances between nodes. Then the goal of balancing and reducing energy consumption was achieved. Furthermore, when the network ran for a period of time, due to the large differences in residual energy between clusters, the clusters were optimized again to make the energy of each cluster as close as possible. Finally, when the energy of cluster heads was lower than the set threshold, the cluster heads were rotated and optimized again to extend the working life of nodes. The simulation results show that the proposed algorithm reduces the energy consumption of nodes and provides longer network lifetimes of WSN.

Keywords: wireless sensor network, clustering, routing, load balance of cluster, optimization of energy consumption

0 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor net-

work) 是一种由多个具有无线通信感知、数据处理和存储能力的无线传感器组成的自组织网络, 具有

收稿日期: 2023-11-16; 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62202351)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62202351)

低成本、可扩展性、可靠性、灵活性、易于部署等优点,目前已应用于医疗、工业、环境检测、智能化等领域^[1-4]。传感器节点为了实现监控功能,需要在数据收集、数据融合、数据转发等过程中消耗能量,因其工作环境大多是在野外,环境条件苛刻,从而难以进行人工维护,即能量无法得到补充,这就需要对有限的节点能量进行精细的管理,提高能量利用率,从而延长网络生命周期。

路由协议作为WSN中网络层的关键技术,负责选择传感器节点和基站间的数据传输路径。高效的路由协议可以有效提高节点能量利用率,从而延长网络生命周期,这对能量有限的WSN尤其重要。在目前的路由协议研究中,从网络结构方面可以分为平面路由协议和分簇路由协议。分簇路由协议因其良好的扩展性和稳定性,相较于平面路由协议在提高能量利用率方面有明显优势^[5],成为目前极具研究价值的课题。

分簇路由协议中常用的分簇方法有2种:动态分簇^[6-7]和固定分簇^[8-9]。动态分簇需要考虑节点的能量、节点的密集程度、节点距基站的距离等多种因素,还需设置重新分簇的条件,设计起来较为困难和烦琐;固定分簇虽然易于实现,但随着网络的运行会出现簇群过多和簇群节点数不均匀的情况。在数据传输阶段,有部分文献采用了群智能算法^[10-11],比如灰狼算法和蚁群算法等,尽管其可扩展性强,但通常比经典的分簇路由协议中的算法复杂度更高,并且由于算法包含的参数较多,如何对各类参数的最优值进行协同设定是一大难题。

鉴于固定分簇和动态分簇各自的特点,同时考虑到WSN分簇以及路由优化需求,将固定分簇中事先把网络分为几个区域的思想与动态分簇中网络运行时对部分节点的簇群归属进行调整的思想相结合,采用基于半固定分簇的方式,在成簇阶段为保证每个簇节点数相同,事先将监测范围划分为几个固定区域,节点部署之后再对每个簇群内的部分节点进行重新分配,以保证每个簇群的节点数相同,之后根据能量和距离因素选择簇头。在数据传输阶段,则根据节点的能量、节点距基站的距离和节点间的距离设置中继节点选择公式,在减少能耗的同时避免能量相对低的节点被选择为中继节点。为了更进一步平衡簇间的能耗,根据所有簇群的平均能量再次对簇群进行调整;形成了基于半固定分簇的

无线传感器网络节能分簇路由算法,实现数据的高效传输及网络寿命的提升。

1 相关工作

在分簇路由协议中,网络中所有节点被分为若干个集群,称为簇,每个簇一般由一个簇头节点和多个簇成员节点构成,拓扑结构如图1所示。

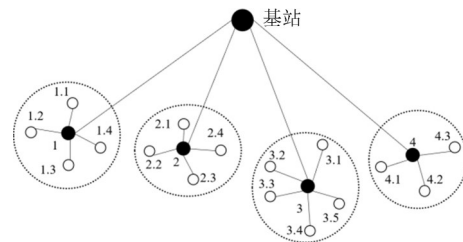


图1 分簇拓扑结构

簇头节点由相应的选择算法产生,用于管理或控制簇成员节点,负责簇内数据的收集和融合处理以及转发,因此簇头节点通常比其他节点更早地耗尽能量而死亡,鉴于WSN的应用场景限制,一旦部分节点死亡,部分通信链路就会断裂,将会给整个网络的数据收集以及传输带来较大的影响^[12]。因此如何选择数据传输路径和设置簇头轮换机制,降低和平衡能耗以延长网络的生命周期,已成为WSN分簇路由协议所面临的重大挑战。

目前,在WSN分簇方面,已有不少学者基于强化学习^[13]、模糊逻辑算法^[14-15]及群智能优化算法^[16-18]等展开研究。一般来说,算法的设计主要围绕2个方面,一是成簇阶段^[8,19-21],因为簇头作为WSN中的重要节点,承担着大量的数据负载任务,而簇群的个数和每个簇群的节点数对平衡能耗有着重要的影响。如果没有合理的分簇以及选择簇头的策略,很容易造成部分节点过早死亡^[10];另一方面则是数据传输阶段^[22-25],在WSN中数据传输所消耗的能量占比较大,对路径算法的优化已成为降低能耗的主要方式。

Heinzelman等^[26]提出的LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)协议是基于分簇的经典分层路由协议。该协议根据节点当选簇头的次数、当前轮次以及概率阈值等对簇头进行选择,让每个节点都有均等的机会成为簇头,从而实现能耗均衡。基于此,Sun等^[27]在LEACH的簇头选择公式中加入了节点能量因素、节点密度因素以及距离

因素,使能量和密度更高且距离基站更近的节点更有可能当选簇头,缓解了低能量节点当选簇头导致过早死亡的问题。为了进一步均衡簇内负载,Darabkh等^[8]先将网络区域划分为大小相同的几个区域,成簇之后设定合并阈值和重新聚类阈值,如果簇群节点数小于阈值,则与邻簇合并,当存活节点平均能量低于所设阈值时进行重新聚类分簇。Wang等^[28]提出的(radio frequency multihop clustering routing protocol)从理论上求解出最优簇头数,然后基于此制定出了合理的簇头选择策略。赵小强等^[29]介绍了虚拟簇头与网络边界、节点以及其他虚拟簇头之间的3种虚拟力模型,该模型根据存活节点数、虚拟引力与斥力确定簇头的数量和位置,但对大规模且节点密度高的WSN优化效果并不理想。

Gong等^[30]提出的簇群调整机制虽然有效地缓解了簇群节点数不均的问题,但是在选择初始簇头时没有根据距离进行选择,而是随机选择,这使簇头节点的位置不能达到最优;再者,在数据传输阶段中所提出的中继节点选择公式并不能选出更接近基站的中继节点,导致所选择的传输路径跳数过多,增加了节点的能耗。文献[7]和文献[31]在数据传输阶段设置了能量阈值,使能量低于阈值的节点不能被选为中继节点,虽然保护了低能量节点,但会导致在网络中后期中继节点的选择范围减小,使距离基站较远的节点频繁单跳向基站传输数据,从而导致节点因能耗过大而过早死亡。

现代智能优化算法在WSN路由优化中常表现出优异的性能,Lipare等^[10]使用灰狼算法寻找数据传输路由,以实现总传输距离和路径跳数的最小化,仿真结果验证了该策略的有效性。Liu等^[11]在选择簇头阶段根据节点剩余能量、簇群节点数等设计了适应度函数,并利用蝴蝶优化算法从全局优化角度出发寻找最优簇头;另外,在数据传输阶段则使用蚁群算法优化路由,该策略是一种低复杂度且高效的分簇路由协议。Wang等^[23]提出了GA-APTEEN算法,在成簇阶段,先利用遗传算法选出初始最优簇头位置,然后以此作为果蝇算法的初始位置,克服了果蝇算法随机选择初始位置所带来的不确定性等缺点,但其在构建路由阶段只考虑了降低路由能耗,忽略了节点剩余能量这一重要因素,容易导致个别节点的数据由于链路的缺失使部分传

输数据无法传输。Qu等^[32]提出了模糊C均值和K-means相结合的EEDC(energy-efficient dynamic clustering)算法,在选择簇头时,首先根据节点的能量以及节点到基站的距离来设置回避时间,并设计了与节点能量、邻居节点数和普通节点到簇头的距离有关的适应度函数,最终利用遗传算法选出候选簇头。武小年等^[33]通过设置与能量、距离有关的适应度函数并利用粒子群算法选出最优簇头,优化了簇内的负载、节约了能耗,但在数据传输阶段没有考虑待选中继节点与基站的距离,导致数据传输路径跳数过多,时延较大。

2 系统模型

2.1 网络模型

基于网络模型对WSN做如下设定。

- 1) 所有节点都有唯一的ID,其他属性如初始能量等完全相同。
- 2) 节点随机均匀分布且确定位置后不会改变。
- 3) 节点可以根据信号的强度判断节点之间的距离。
- 4) 节点的发射功率可以根据距离自我调节。
- 5) 基站只有一个,位置固定且能量无限。

基于以上设定,本文网络模型如图2所示。监测范围为 $L\text{ m}\times L\text{ m}$ 的正方形区域,基站位于区域中心。

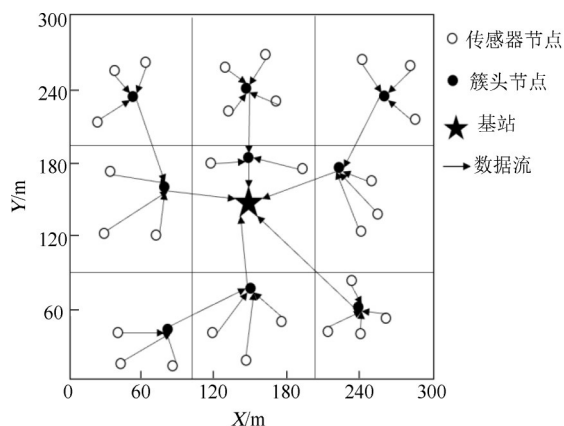


图2 网络模型

2.2 网络能耗模型

假设节点间的数据传输基于无线通信能耗模型,如图3所示。

根据通信距离的远近,可分为自由空间通信与多径衰落通信2种类型^[29]。

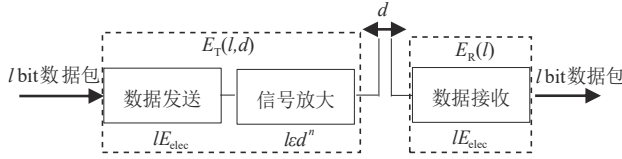


图3 能耗模型

单次完整的通信过程包括数据的发送与接收。数据发送模块包括发送单元和信号放大单元，将 l bit 的数据传输 d 距离时的能耗 E_T 为

$$E_T(l, d) = \begin{cases} IE_{elec} + lE_{fs}d^2, & d \leq d_0 \\ IE_{elec} + lE_{mp}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中，无线电发送器或接收器的电路能耗为 $E_{elec} = 50$ nJ/bit；2种信道模型下运行发送放大器的能耗分别为 $E_{fs} = 10$ pJ·bit·m² 和 $E_{mp} = 0.0013$ pJ·bit·m⁴， $d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}}$ 是划分信道模型临界值，当距离小于或等于 d_0 时，采用自由空间信道模型，发射功率呈 d^2 衰减，当距离大于 d_0 时，采用多径衰减信道模型，发射功率呈 d^4 衰减。

数据接收模块接收 l bit 数据的能耗为

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

簇头数据融合 l bit 数据的能耗为

$$E_F(l) = lE_{DA} \quad (3)$$

其中， $E_{DA} = E_{elec}$ 。

3 基于半固定分簇的能量高效分簇路由协议

3.1 网络初始化阶段

首先将网络分为 N 个大小相同的区域，把 n 个节点部署到网络区域中，之后每个节点根据自身位置判断所属簇群，形成初始簇群后对每个簇群进行编号。

为了展示网络的分簇结构及编号规则，当 $N=9$ 时，簇群分布如图4所示。



图4 簇群分布

因为节点随机均匀分布在监测区域中，所以难以保证每个簇群的节点数相同，为了让每个簇群节点数相同从而使能耗均衡，对所有簇群中节点数过多或过少的簇群进行调整，具体调整方法如下。

①节点部署完毕后，每个节点根据自身位置信息来判断所属簇群。

②计算 $N_{avg} = \frac{n}{N}$ ，按簇群编号从小到大开始调整，如果簇群 i 的节点数 $N_i = N_{avg}$ ，则不需要操作；如果 $N_i < N_{avg}$ ，执行步骤③，否则执行并保证步骤④。

③计算出需要获得的节点数 $a = N_{avg} - N_i$ ，然后依次从未调整的邻簇中获得 a 个节点，调整时应保持未调整的邻簇间节点数均衡，即每次应从未调整的邻簇中节点数最多的簇群获得节点，调整后簇群 i 的节点数应为 N_{avg} 。

④计算出需要分配出去的节点数 $a = N_i - N_{avg}$ ，然后依次向未调整的邻簇分配 a 个节点，调整时应保持未调整的邻簇间节点数均衡，即每次应向未调整的邻簇中节点数最少的邻簇分配节点，调整后簇群 i 的节点数应为 N_{avg} 。

⑤所有的簇群调整完后，基站向所有节点广播调整的结果。

算法1 簇群调整算法

输入 网络的簇群数 N ，所有簇群的平均节点数 N_{avg} ，每个簇群的节点数

输出 分簇结果

- 1) 节点部署后，每一个节点根据自身的位置判断所属初始簇群
- 2) for 所有簇群 N 按编号从小到大 do
- 3) $B \leftarrow$ 簇群 i 的未调整的邻簇
- 4) if 簇群 i 内的节点数 $N_i < N_{avg}$ then
- 5) $a = N_{avg} - N_i$
- 6) for $j = 1$ to a do
- 7) $b \leftarrow B$ 中节点数最多的簇
- 8) 簇群 i 从 b 中获得一个节点
- 9) end for
- 10) end if
- 11) if 簇群 i 内的节点数 $N_i > N_{avg}$ then
- 12) $a = N_i - N_{avg}$
- 13) for $j = 1$ to a do
- 14) $b \leftarrow B$ 中节点数最少的簇

- 15) 簇群 i 将一个节点分配给 b
- 16) end for
- 17) end if
- 18) end for

簇群调整完毕后, 每个簇群选择簇内到其他节点距离和最小的节点当选簇头。

3.2 数据传输阶段

数据传输阶段产生的能耗比其他阶段高很多, 所以在选择传输路径时需要尽可能地降低能耗, 同时也要避免让能量相对低的簇头节点成为中继节点。对于簇内路由, 数据收集完毕后簇内节点直接将数据发给簇头, 而对于簇间路由, 则应选择与当前节点和基站距离较近, 且能量较高的簇头作为中继节点, 这样有利于降低能耗和延缓节点死亡时间。基于此, 本文提出了基于能量和距离的中继节点选择优化算法, 具体如下。

如果基站在当前簇头节点的通信范围内, 则通过单跳的方式将数据传给基站, 否则采用多跳的方式传给基站, 选择中继节点的方法为: 首先计算自身和其他簇头节点到基站的距离, 然后将比自身距基站近的簇头节点记为集合 $\text{shorter_clusterhead}$, 如果该集合为空, 则直接将数据传给基站, 否则进行中继节点的选择, 选择公式为

$$E_i = \left(\frac{1}{d(\text{relay}, \text{node})} + \frac{1}{d(\text{node}, \text{BS})} \right) \frac{E(\text{node})}{E_{\text{avg}}} \quad (4)$$

其中, relay 为当前中继节点, node 为待选的中继节点, BS 为基站, $d(\text{node}, \text{BS})$ 为节点到基站的距离, $d(\text{relay}, \text{node})$ 为当前中继节点和待选的中继节点的距离, $E(\text{node})$ 为待选的中继节点的能量, E_{avg} 为网络存活节点的平均能量。设计 WSN 的数据传输路由算法有 2 个目标: 降低能耗和平衡能耗, 分别体现在式(4)的第一项和第二项, 这样可以选出距离当前节点和基站都近且能量相对较高的节点为中继节点。

算法 2 基于能量和距离的中继节点选择算法

输入 网络的簇群数 N , 每个簇头节点的位置, 节点的通信半径 R

输出 每个簇头节点到基站的数据传输路径

- 1) for $i = 1$ to N do
- 2) $\text{Path}_i = \emptyset$
- 3) $\text{relay} \leftarrow$ 当前簇群的簇头
- 4) while $d(\text{relay}, \text{BS}) > R$ do

- 5) $\text{relaynode_election} = []$
- 6) $J \leftarrow$ 当前中继节点通信范围内且比其更接近基站的簇头节点数
- 7) for $k = 1$ to J do
- 8) $\text{relaynode_election}(k) = E_i(\text{relay}, k)$
- 9) end for
- 10) $\text{next_relay} \leftarrow$ $\text{relaynode_election}$ 中数值最高的簇头节点
- 11) $\text{Path}_i = \text{Path}_i \cup \text{next_relay}$
- 12) $\text{relay} \leftarrow \text{next_relay}$
- 13) end while
- 14) end for

3.3 能量调整阶段

虽然在簇群调整后已使每个簇的节点数相同, 但因为每个簇群到基站的距离不同, 从而导致簇群间能耗不均衡, 使不同的簇群之间出现能量差异, 为了缓解这种现象, 当簇群间能量差异达到 $\alpha = 10\%$ 时则进行簇群间的能量调整, 调整时按照簇的编号从小到大进行, 如果簇群的能量大于簇群平均能量, 则将部分成员节点分给未调整的邻簇中能量较低的簇群, 若小于簇群平均能量, 则从未调整的邻簇中能量较高的簇群中获得部分节点。调整过程如下。

①计算出所有簇群的平均能量 C_{avg} , 然后根据簇群的编号由小到大开始调整。

②如果簇群 i 的能量 $C_i = C_{\text{avg}}$ 则不需要操作, 若 $C_i < C_{\text{avg}}$, 则执行并保证步骤③, 否则执行步骤④。

③簇群 i 从未调整的能量较高的邻簇中依次获得节点, 在调整时应保持未调整邻簇之间的能量均衡, 即每次从未调整的邻簇中能量最高的簇群获得节点, 调整后簇群 i 的能量应大于或等于 C_{avg} 。

④簇群 i 向未调整的能量较低的邻簇依次分配节点, 在调整时应保持未调整邻簇之间的能量均衡, 即每次应向未调整的邻簇中能量最低的簇群分配节点, 调整后簇群 i 的能量应小于或等于 C_{avg} 。

⑤所有的簇群调整后, 基站向所有节点广播调整的结果。

算法 3 簇间能量调整算法

输入 网络的簇群数 N , 所有簇群的平均节点数 N_{avg} , 每个簇群的能量, 所有簇群的平均能量 C_{avg}

输出 簇群调整结果

- 1) for 所有簇群 N 按编号从小到大 do
- 2) if 簇群 i 的能量 $C_i \neq C_{avg}$ then
- 3) $B \leftarrow$ 簇群 i 的未调整的邻簇
- 4) if 簇群 i 的能量 $C_i < C_{avg}$ then
- 5) while $C_i < C_{avg}$ do
- 6) $b \leftarrow B$ 中能量最高的簇
- 7) 簇群 i 从 b 中获得一个节点
- 8) end while
- 9) else
- 10) while $C_i > C_{avg}$ do
- 11) $b \leftarrow B$ 中能量最低的簇
- 12) 簇群 i 将一个节点分配给 b
- 13) end while
- 14) end if
- 15) end if
- 16) end for

3.4 簇头轮换

因为簇头节点负责收集信息和转发其他簇头的信息，从而能耗相较于其他节点大很多，这就需要在簇头能量较低时进行簇头轮换，避免低能量节点频繁担任簇头导致过早死亡。

大多数文献中提到的簇头轮换规则一般有2种方法，一种是设置固定的能量阈值，如果簇头节点能量低于阈值则轮换簇头，另一种是每过一定的轮数进行簇头轮换。这2种方法都有各自的局限性：对于设置固定能量阈值的方法，阈值如果过高会导致簇头更换过于频繁，过低会导致节点间能量方差较大，即使设置得恰到好处，在网络的中后期，节点能量普遍低于能量阈值，会导致簇头轮换过于频繁；对于设置一定轮数进行轮换的方法，如果轮数过大会导致能耗不均，过小则不能很好地发挥高能量或位置优的节点的优势，即便在网络运行过程中设置不同的轮换轮数，也容易因为没有直接考虑到节点能量这一关键因素导致效果不理想。基于此，本文提出了基于动态阈值的簇头轮换算法，具体如下。

当簇头的能量低于簇内节点的平均能量时进行簇头轮换。开始簇头轮换时，设置2个集合： E_factor 和 dis_factor ，每个节点计算当前剩余能量与节点初始能量的比值 $\frac{E_{res}(i)}{E_0}$ ，然后放入 E_factor 中，之后再计算自身到其他节点距离和的倒数

$\frac{1}{\sum_{j \in cluster} dis(i, j)}$ 并放入 dis_factor 中，最后将2个集

合内的数据进行归一化。簇头轮换考虑到节点能量和到簇内其他节点的距离2种因素，计算式为

$$r(i) = w_1 E_factor(i) + w_2 dis_factor(i) \quad (5)$$

其中， w_1 和 w_2 为所设权值，满足 $w_1 + w_2 = 1$ 。最终选择 r 值最大的成为新的簇头。

算法4 基于动态阈值的簇头轮换算法

输入 网络的簇群数 N ，每个簇群的簇头节点的能量，每个簇群中所有节点的平均能量

输出 每个簇群的新簇头

- 1) for $i = 1$ to N do
- 2) $head_E \leftarrow$ 当前簇群的簇头节点能量
- 3) $C_{avg} \leftarrow$ 当前簇群的节点平均能量
- 4) if $head_E < C_{avg}$ do
- 5) $head_election = []$
- 6) $J \leftarrow$ 簇内节点数
- 7) for $k = 1$ to J do
- 8) $head_election(k) = r(k)$
- 9) end for
- 10) $next_head \leftarrow head_election$ 中数值最高的节点
- 11) end if
- 12) end for

3.5 算法流程

网络运行包括2个阶段：簇群形成阶段和稳定传输阶段。在簇群形成阶段，网络被分为 N 个节点数目相同的簇群。稳定传输阶段则分为3个子段：簇间路由搜寻、数据收集和传输以及簇间能量调整，如图5所示。

4 仿真结果及分析

实验在 Intel (R) Core (TM) i9 CPU、16 GB 内存、2.50 GHz 主频的计算机上，采用 MATLAB R2020a 对本文算法、文献[27]中的 LPLL-LEACH 算法、文献[29]中的 EERPVF (energy-efficient routing protocol based on virtual force) 算法和文献[30]中的 CEEC (centralized energy-efficient clustering) 算法进行仿真分析。

4.1 算法中参数的设定

1) 轮换簇头阶段的权值

在轮换簇头的公式中存在2个权值，即 w_1 和

w_2 ，前者对应节点能量因素所占比重，后者对应距离因素所占比重，为了延长网络的生命周期，比较不同的权重系数值对网络运行轮数的影响，以得到合理的权重系数值，这里分别在 $w_1 = 0.4, w_2 = 0.6$; $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$; $w_1 = 0.6, w_2 = 0.4$; $w_1 = 0.7, w_2 = 0.3$ 这 4 种情况下进行仿真实验，在不同参数下存活节点数随网络运行轮数的变化如图 6 所示。

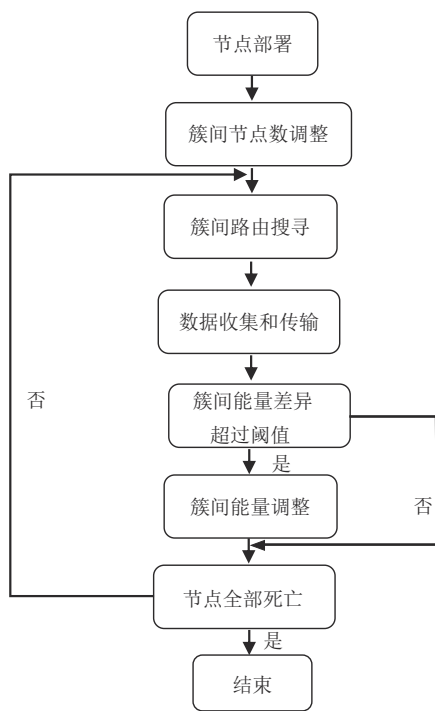


图 5 算法流程

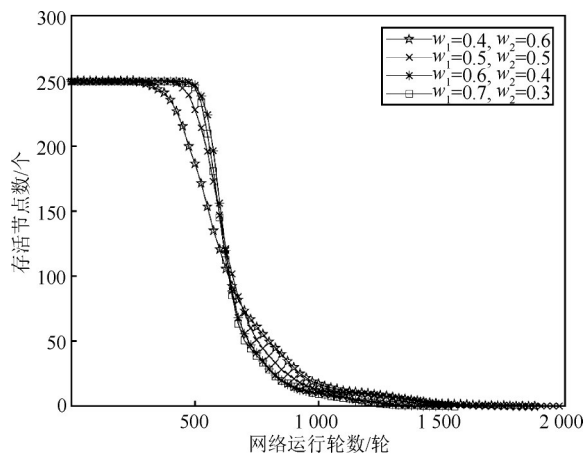


图 6 在不同参数下存活节点数随网络运行轮数的变化

由图 6 可知，当 $w_1 = 0.4$ 和 0.5 时，首次出现节点死亡的轮数较靠前；当 $w_1 \geq 0.6$ 时，首次出现节

点死亡的轮数基本相同；当 $w_1 = 0.7$ 时，在 750 轮左右存活节点数较少，这是因为此时距离权值较小，导致簇头节点的位置没有更接近簇的中心，所以簇头轮换阶段的权值确定为 $w_1 = 0.6, w_2 = 0.4$ 。

2) 网络中其他参数的设定

系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数	
参数	取值
监测区域边长 L/m	300
sink 位置/m	(150,150)
簇的数量 N	25
节点数目 n	250
初始能量 J	0.4
通信半径 R/m	150
数据包大小/bit	2 000
簇头数据融合比例	80%

4.2 时间复杂度分析

时间复杂度是体现算法运行效率的重要指标，现将本文算法按流程进行如下分析。

1) 簇间节点数调整。网络中的簇群数为 N ，按簇群的编号从小到大进行调整，每个簇群只从邻簇获取或向邻簇分配节点，所以该阶段时间复杂度为 $O(N)$ 。

2) 簇间路由搜寻。每个簇头节点将从周围的簇头节点中选择比自身更接近基站的节点作为中继节点，如果基站仍在中继节点的通信范围外则重复此流程，所以该阶段时间复杂度为 $O(N^2)$ 。

3) 簇间能量调整。类似于簇间节点数调整阶段，同样是从邻簇获取或向邻簇分配节点，时间复杂度也为 $O(N)$ 。

综上所述，本文算法的时间复杂度为 $O(N^2)$ ，因为簇群数远小于节点数，所以该时间复杂度是可以接受的。

4.3 初始簇群节点数的分析

本节将本文提出的簇群调整算法（算法 1）与按位置分簇的算法进行对比，先将边长为 300 m 的正方形网络区域划分为 25 个簇，然后将 250 个节点按照随机均匀分布部署在网络区域中，每个簇的节点数如图 7 所示。

为了更好地说明本文算法 1 的有效性，同时也计算了 2 种算法在不同运行次数下的方差，如表 2 所示。

表2 2种算法在不同运行次数下的方差

算法	运行次数			
	50	100	150	200
本文算法1	0.008 3	0.017 5	0.019 4	0.002 1
按位置分簇的算法	10.580 0	9.996 7	9.859 4	10.032 5

从表2可以看出, 本文的算法1的方差明显优于按位置分簇的算法, 这意味着在节点部署后, 进行簇间数量调整时, 对于每个簇来说, 将多余的节点分配给节点数较少的簇, 以及从节点数较多的簇中获取缺少的节点, 可以很好地保证每个簇群的节点数相同。

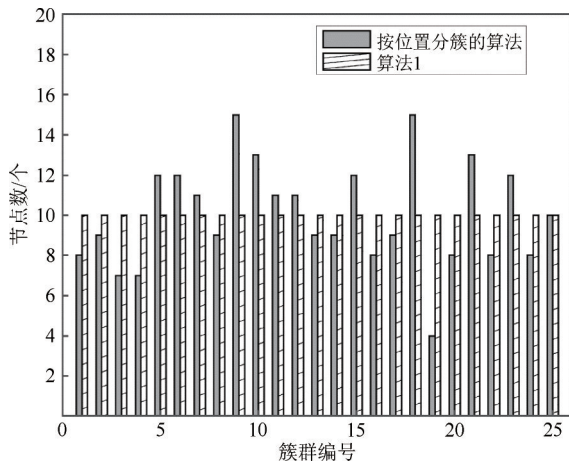


图7 每个簇的节点数

4.4 剩余能量和存活节点数的实验与分析

节点的剩余能量是衡量WSN路由算法的重要性能指标。4种算法随网络运行轮数变化的网络剩余能量、节点平均能量和节点能量方差对比如图8~图10所示。

从图8可以看出, 本文所提算法的剩余能量在网络运行期间始终比其他3种算法多, 这是因为本文所提算法在数据传输路径和簇头的选择方面都更好地考虑到了距离与能量这2个因素。图9中本文所提算法的节点平均能量虽然在450轮到700轮低于EERP VF算法, 但是在此期间本文所提算法的平均存活节点数为173, EERP VF算法则为54, 而且网络剩余能量也比EERP VF算法高, 综合来看, 本文所提算法仍然优于EERP VF算法。从图10可以看出, 本文所提算法的平均方差是最低的, 这是因为在轮换簇头方面进行了动态阈值设置和簇间能量调整, 从而在网络运行过程中避免了低能量节点当选簇头, 这使节点间能耗均衡。

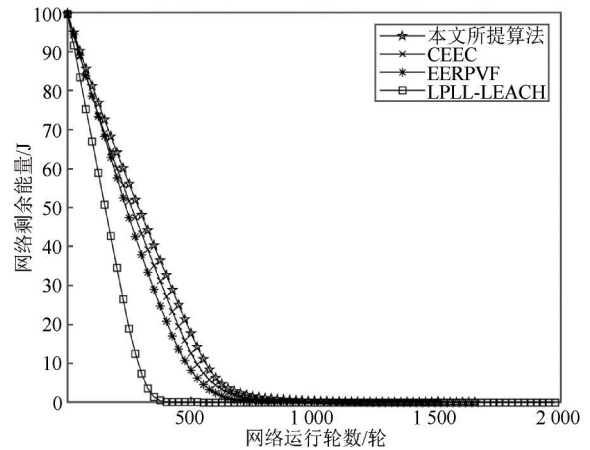


图8 网络剩余能量对比

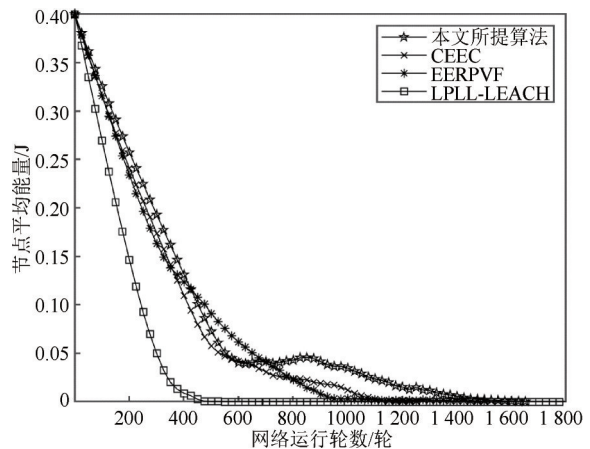


图9 节点平均能量对比

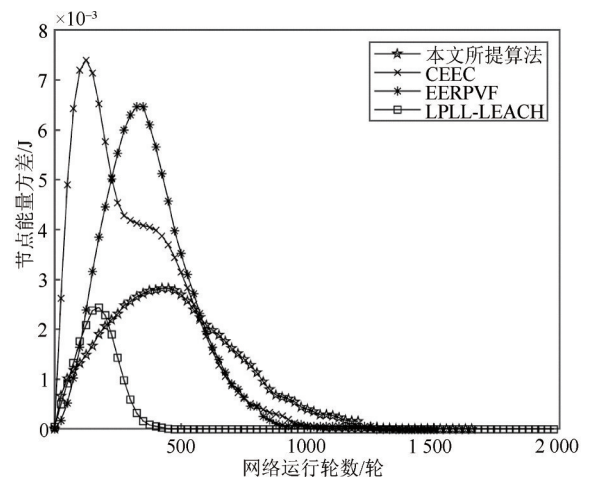


图10 节点能量方差对比

网络生命周期是衡量路由协议的关键, 4种算法的存活节点数对比如图11所示。

从图11可以看出, 本文所提算法相较于其他3种算法, 网络生命周期分别延长了25%、54%、191%, 这是因为本文所提算法在数据传输阶段选

择了距离当前节点和基站更近的节点为中继节点，同时也避免了低能量节点成为中继节点，而簇头轮换时所设置的动态阈值，使在所有节点的能量都较低的时候仍能进行合理的簇头轮换，从而在降低与平衡能耗方面相较于其他 3 种算法表现更优。

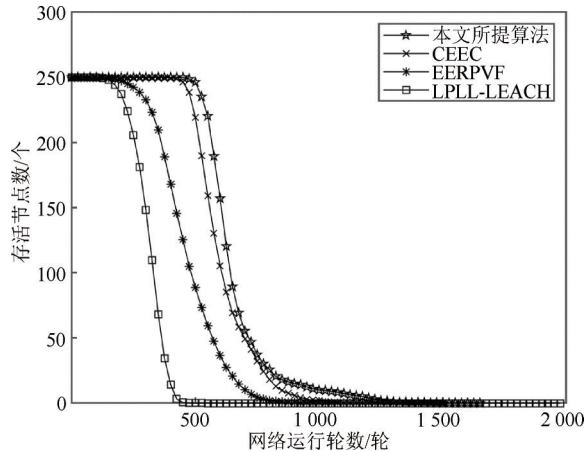


图 11 存活节点数对比

网络生命周期中有 3 个重要的时间点，即第一个节点死亡的轮数、一半节点死亡的轮数和全部节点死亡的轮数，这 3 个时间点可以反映算法在初期、中期、末期的性能表现，判断算法的优越性，更适用于特定的场景，从而比较全面地了解算法的优缺点，同时这 3 个时间点也是比较直观和易于理解的指标。

本文所提算法、CEEC 算法、EERPVF 算法和 LPLL-LEACH 算法的 3 个时间点对比如表 3 所示。

表 3 4 种算法的 3 个时间点对比

算法	第一个节点死亡的轮数/轮	一半节点死亡的轮数/轮	全部节点死亡的轮数/轮
本文所提算法	472	622	1 303
CEEC	423	581	1 039
EERPVF	170	451	848
LPLL-LEACH	137	314	447

从表 3 可以看出，本文所提算法在 3 个时间点上相较于其他 3 种算法都有不同程度的延后，这是因为本文所提算法中簇间节点数的调整以及簇间能量的调整很好地平衡了节点能耗。LPLL-LEACH 虽然在 LEACH 的基础上进行了改进，但还是基于概率决定簇头的个数以及进行簇头的选择，难以实现簇头个数和簇头选择的最优。EERPVF 算法的虚

拟力策略在节点密度较大的环境中，会使虚拟簇头与节点间的虚拟力相较于其与边界及其他虚拟簇头之间的虚拟力过大，导致所选出的簇头分布不均。对于 CEEC 算法，虽然其也进行了相应的簇间节点数调整，但是本文所提出的调整策略相较于 CEEC 算法来说更好地实现了簇间节点数的均衡，除此之外，本文提出的中继节点选择公式以及簇头轮换策略更优于 CEEC 算法。

5 结束语

本文提出了一种基于半固定分簇的无线传感器网络节能分簇路由算法，网络初始化阶段将网络分为大小相同的 25 个簇群，在节点部署完毕后再对每个簇群的节点数进行调整，使每个簇群的节点数相同；数据传输阶段基于节点的剩余能量、节点间的距离和节点距基站的距离选择中继节点，网络运行一段时间后，如果簇群之间的能量差异过大则会对簇群的节点进行调整，使每个簇群的能量尽可能相同；当簇头节点低于所设阈值时，则根据簇内节点的剩余能量和与其他节点的距离和来选择新的簇头。本文的主要贡献在于所提出的簇群调整算法和簇头轮换策略，簇群调整算法保证了簇群间的能耗均衡，而簇头轮换策略采用了动态阈值，在网络运行过程中始终保持着合理的簇头轮换，有效地平衡了节点能量，也降低了数据收集所产生的能耗。仿真结果表明，本文算法与 CEEC 算法、EERPVF 算法和 LPLL-LEACH 算法相比，能有效均衡和降低网络能耗以及延长网络生命周期。

参考文献:

- [1] REN R T, SU J Q. A security-enhanced and privacy-preserving certificate-less aggregate signcryption scheme-based artificial neural network in wireless medical sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7440-7450.
- [2] HUAN X T, KIM K S, LEE S, et al. Improving multi-hop time synchronization performance in wireless sensor networks based on packet-relaying gateways with per-hop delay compensation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(9): 6093-6105.
- [3] KAUR G, CHANAK P, BHATTACHARYA M. Obstacle-aware intelligent fault detection scheme for industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(10): 6876-6886.
- [4] TARIQ U U, ALI H, HUSSAIN M, et al. Shuffled ARSH-FATI: a novel

- meta-heuristic for lifetime maximization of range-adjustable wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(3): 1217-1233.
- [5] 窦佩佩, 曾玉琴, 卢毅, 等. 无线传感器网络能量高效分簇的一种改进方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2022, 49(3): 68-73.
- DOU P P, ZENG Y Q, LU Y, et al. Improved method for energy efficient clustering of the wireless sensor network[J]. *Journal of Xidian University*, 2022, 49(3): 68-73.
- [6] KUMAR M, MUKHERJEE P, VERMA K, et al. Improved deep convolutional neural network based malicious node detection and energy-efficient data transmission in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2022, 9(5): 3272-3281.
- [7] ZHU B T, BEDEER E, NGUYEN H H, et al. Improved soft-k-means clustering algorithm for balancing energy consumption in wireless sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4868-4881.
- [8] DARABKH, KHALID A, SAJA M, et al. Energy-aware and density-based clustering and relaying protocol (EA-DB-CRP) for gathering data in wireless sensor networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 80, 154-166.
- [9] CHITHALURU P, AL-TURJMAN F, KUMAR M, et al. MTCEE-LLN: multilayer threshold cluster-based energy-efficient low-power and lossy networks for industrial Internet of Things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(7): 4940-4948.
- [10] LIPARE A, EDLA D R, KUPPILI V. Energy efficient load balancing approach for avoiding energy hole problem in WSN using grey wolf optimizer with novel fitness function[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 84: 105706.
- [11] LIU X Y, MEI K, YU S J. Clustering algorithm in wireless sensor networks based on differential evolution algorithm[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 478-482.
- [12] 魏振春, 傅宇, 马仲军, 等. 带时间窗的无线可充电传感器网络多目标路径规划算法[J]. *电子学报*, 2022, 50(8): 1819-1829.
- WEI Z C, FU Y, MA Z J, et al. Multi-objective path planning algorithm for WRSN with time window[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(8): 1819-1829.
- [13] ZHU B T, BEDEER E, NGUYEN H H, et al. UAV trajectory planning in wireless sensor networks for energy consumption minimization by deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 9540-9554.
- [14] VERMA A, KUMAR S, GAUTAM P R, et al. Fuzzy logic based effective clustering of homogeneous wireless sensor networks for mobile sink[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5615-5623.
- [15] ZHAO C K, WU Q, LIN D Y, et al. An energy-balanced unequal clustering approach for circular wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 132: 102872.
- [16] SAHOO B M, AMGOTH T, PANDEY H M. Particle swarm optimization based energy efficient clustering and sink mobility in heterogeneous wireless sensor network[J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, 106: 102237.
- [17] 李翠然, 王雪洁, 谢健骊, 等. 基于改进PSO的铁路监测线性无线传感器网络路由算法[J]. *通信学报*, 2022, 43(5): 155-165.
- LI C R, WANG X J, XIE J L, et al. Routing algorithm for railway monitoring linear WSN based on improved PSO[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(5): 155-165.
- [18] 孙爱晶, 李世昌, 张艺才. 基于PSO优化模糊C均值的WSN分簇路由算法[J]. *通信学报*, 2021, 42(3): 91-99.
- SUN A J, LI S C, ZHANG Y C. WSN clustering routing algorithm based on PSO optimized fuzzy C-means[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(3): 91-99.
- [19] SINGH S, NANDAN A S, MALIK A, et al. An energy-efficient modified metaheuristic inspired algorithm for disaster management system using WSNs[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 15398-15408.
- [20] DONG Y, LI S Y, BAO G J, et al. An efficient combined charging strategy for large-scale wireless rechargeable sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 10306-10315.
- [21] KOTARY D K, NANDA S J, GUPTA R. A many-objective whale optimization algorithm to perform robust distributed clustering in wireless sensor network[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 110: 107650.
- [22] XIE M, PI D C, DAI C L, et al. A novel clustering strategy-based sink path optimization for wireless sensor network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(20): 20042-20052.
- [23] WANG M H, WANG S B, ZHANG B W. APTEEN routing protocol optimization in wireless sensor networks based on combination of genetic algorithms and fruit fly optimization algorithm[J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, 102: 102138.
- [24] LI J P, HAN Q, WANG W T. Characteristics analysis and suppression strategy of energy hole in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 135: 102938.
- [25] YAO Y D, XIE D Y, LI Y, et al. Routing protocol for wireless sensor networks based on archimedes optimization algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(15): 15561-15573.
- [26] HEINZELMANWB, CHANDRAKASANAP, BALAKRISHNANH. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4):

660-670.

- [27] SUN H B, PAN D J, WANG D, et al. LPLL-LEACH: a study of a low-power and low-delay routing protocol based on LEACH[J]. *Ad Hoc Networks*, 2023, 140: 103064.
- [28] WANG J H, GE Y Y. A radio frequency energy harvesting-based multi-hop clustering routing protocol for cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 7142-7156.
- [29] 赵小强, 崔砚鹏, 郭铮, 等. 基于虚拟力的 WSNs 能量高效分簇路由协议[J]. *软件学报*, 2022, 33(2): 622-640.
- ZHAO X Q, CUI Y P, GUO Z, et al. Energy-efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks based on virtual force[J]. *Journal of Software*, 2022, 33(2): 622-640.
- [30] GONG Y D, GUO X Y, LAI G M. A centralized energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(2): 1623-1634.
- [31] LI H B, WANG S F, CHEN Q, et al. IPSMT: multi-objective optimization of multipath transmission strategy based on improved immune particle swarm algorithm in wireless sensor networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 121: 108705.
- [32] QU Z Y, XU H H, ZHAO X, et al. An energy-efficient dynamic clustering protocol for event monitoring in large-scale WSN[J]. *IEEE Sensors*

Journal, 2021, 21(20): 23614-23625.

- [33] 武小年, 张楚芸, 张润莲, 等. WSN 中基于改进粒子群优化算法的分簇路由协议[J]. *通信学报*, 2019, 40(12): 114-123.
- WU X N, ZHANG C Y, ZHANG R L, et al. Clustering routing protocol based on improved PSO algorithm in WSN[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(12): 114-123.

[作者简介]



张朝辉 (1987-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 西安电子科技大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为网络拓扑优化、资源分配等。



周嘉琦 (2000-), 男, 陕西渭南人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络等。