

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306441

分区能量均衡的多移动机器人 WSN 孤岛结盟方法*

景 荣 段云鹏

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要:为了提高多移动机器人无线传感器网络(WSN)中孤岛结盟方法的效率,提出了基于分区能量均衡的多移动机器人 WSN 孤岛结盟优化问题的解决方案,并给出解决该问题的近似算法。首先,在相关模型假设及符号定义的基础上,借鉴分治和局部优先思想,提出能量均衡的连接机制,引入轮次迭代过程,对该方法进行了公式化描述。其次,基于启发式算法,设计了基于移动机器人能量均衡的中继部署算法。最后,与现有方法进行对比试验,结果表明所提出的方法在保持能量均衡的前提下,能够节约连接成本,提高 WSN 孤岛结盟的效率,并延长网络生命周期。

关键词:无线传感器网络;孤岛结盟;分区部署;能量均衡

中图分类号: TP393;TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Multi-robot federating for disjoint segments in WSN based on partition energy balance

Jing Rong Duan Yunpeng

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of the federating for disjoint segments method in multi-robot wireless sensor networks (WSNs), this paper presents a solution for optimizing the federating for disjoint segments in WSNs based on partition energy balance, along with an approximate algorithm to address this optimization problem. Firstly, this research incorporates relevant model assumptions and symbol definitions to propose a sophisticated connection mechanism. Drawing inspiration from divide-and-conquer and local priority approaches, the proposed mechanism ensures energy balance within the network. Furthermore, a round-robin iterative process is introduced to iteratively refine the method, which is then precisely formulated using mathematical representations. Secondly, a relay deployment algorithm is designed using heuristic algorithms, taking into account the energy balance of the robots. Finally, through comparative experiments conducted with existing methods, the results demonstrate the effectiveness of the proposed approach. Notably, the approach successfully conserves connection costs while maintaining energy balance and significantly improves the efficiency of the federating for disjoint segments method in WSNs and demonstrates its capability to prolong the overall lifespan of the network. Overall, this research contributes a comprehensive solution for optimizing the federating for disjoint segments method in multi-robot WSNs.

Keywords: wireless sensor network; island alliance; partition deployment; energy balance

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN),由于其广泛的民用,科学和军事应用而引起了越来越多的关注和研究,在无线传感器网络中,部署了大量传感器以

形成网状拓扑并协调他们的行动以执行共同任务。因此传感器之间的连通性对无线传感器网络的有效性有着重要的影响并且应该始终保持这种连通性。

关于 WSN 孤岛结盟的方法中,人们提出了许多连接恢复技术。考虑到无线传感器网络中异构性的优势^[1],移动节点通常用于实现连接恢复和提高网络性能,如覆

收稿日期:2023-04-18 Received Date: 2023-04-18

* 基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A59)、新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(自然科学重点项目)(XJEDU20211029)、国家自然科学基金联合基金(U20A20167)、河北省自然科学基金(F2018203390)项目资助

盖率、网络寿命、吞吐量等^[2]。已发布的解决方案大多数都是利用固定中继节点的部署,并将恢复连通问题转化为找到中继节点最少的位置以形成稳定的段间拓扑^[3]。

在灾害环境下,当网络被分成很多孤岛,这样的连通性问题容易引起覆盖不全、路由错误、能量扩展、安全问题等诸多后果。此时,依靠网络自身难以完成修复。失去网络连接对应用程序有非常负面的影响,它会阻止数据交换和阻碍一些节点之间的协调。因此,需要引入多机器人进行中继节点部署以恢复网络连通性。恢复整体的网络连接是非常重要的,修复受损无线传感器网络的连接是保证网络提供符合实际需求的的前提,所以,研究如何恢复受损无线传感器网络的连接具有重要意义。目前关于 WSN 连通恢复的解决方案可以分为两类:节点重定位方法和额外中继节点部署方法。如今大多数的孤岛结盟方法都离不开移动机器人辅助部署中继节点。

张帆^[4]对无线传感器网络 K 重覆盖进行研究提出基于 Voronoi 图的 K 重覆盖节点自定位估算方案。赵新元^[5]以定位恢复范围并最小化节点的移动开销针对无线传感器/反应器网络中因多个反应器失效而造成的反应器网络连通性被破坏问题,以网络流理论为基础,提出了一个基于网络流的多目标规划模型来求解优化的反应器重定位方案。Baroudi 等^[6]提出了一种基于模糊逻辑的分布式节点重定位算法。Chouikhi 等^[7]提出了一种分布式解决方案,称为多信道无线传感器网络的连接恢复(connectivity restoration for multi-channel, CR-MC),用于恢复多信道无线传感器网络的连接丢失。Awad 等^[8]提出了一种基于 Physarum 的自愈式自治网络连通性恢复算法,该算法可以最小化移动开销并保持负载平衡。Lee 等^[9]提出了一种优化的策略,在每对段或单个 WSN 之间建立双顶点不同的路径,同时最小化部署的中继节点(relay nodes, RNs)的数量,并提高平均节点度的双连接拓扑的效率。Lee 等^[10]设计一种有效的方法,通过填充最少数量的中继节点来联合这些分段,部署区域被建模为具有相同大小单元格的网格,然后将优化问题映射到选择最少的单元数来填充中继节点。Khalilpour 等^[11]提出了一种简单而有效的算法(pickup non-critical node, PINC)来完成基于运动的 K 连接恢复,该恢复将节点划分为关键节点,即故障减少的节点和非关键组。

Abbas 等^[12]采用移动数据收集器在不相连的孤岛之间传输数据,并利用中继节点缩短移动数据收集器的移动路径。Chouikhi 等^[13]提出了一种方法,目的是重新部署最小数量的中继节点,减少对剩余可用节点的影响。Shen 等^[14]提出了一种移动中继调度(mobile relay scheduling, MRS)算法,通过调度移动中继连接选定的边界传感器对。以上方法集中于降低恢复连通过程的连接成本,而对恢复连通后网络的生命周期和鲁棒性考虑

较少。

Joshi 等^[15]提出了一种分布式资源约束恢复(resource constrained recovery, RCR)方法,该方法通过使用重新定位节点作为中继,重新连接一个被划分成不相交段的网络。Essam 等^[16]提出了一种恢复方法,该方法形成了一种拓扑结构,增强了对重复故障(robustness against recurrent, RIR)的鲁棒性,该方法倾向于用剩余能量最高的节点替换故障节点,以便在尽可能长的时间内维持网络连接。Liu^[17]设计了基于周围的节点分布状态感知生存性的连通性恢复(survivability-aware connectivity restoration, SACR)方法。Wang 等^[18]提出了一种使网络在恶劣环境中持久运行的连接恢复方案(durability-based connectivity establishment, DBCE)。文献[15-18]中考虑了部分约束条件并且在恢复连通过程中都考虑了如何延长网络生命周期、增强网络鲁棒性以及提高孤岛结盟效率,但是缺乏网络服务质量(quality of service, QoS)方面的考量。Lee 等^[19]首次提出了一种以满足孤岛 QoS 为约束的情况下,从故障中恢复的有效方法。景荣等^[20]设计了一种基于带宽的感知模型和流水迭代的中继部署方法,提高了未知感知区域环境中引入带宽约束的 WSN 孤岛结盟的有效性。Saeed 等^[21]提出了一种有效的连通性恢复解决方案(efficient solution for connectivity restoration, ESCR),并构建了一种以能量为约束的中继部署算法,在有效利用剩余能量和最小化节点移动的情况下恢复网络。

文献[4-6]采用剩余节点重定方法来修复 WSN 的连通性,然而由于部署的传感器节点本身的能力容量和能源受限,这类方法很难以高效率进行修复。而文献[7-11]则采用额外中继部署方法来修复 WSN 的连通性,尽管这些方法考虑了中继节点部署的方式,但并未考虑在能量和带宽等约束条件下的中继部署问题。然而,这些问题对于 WSN 的服务质量具有关键影响。另一方面,文献[19-21]提出的方法虽然在问题上增加了带宽和能量等 QoS 约束,并提出了在未知环境下的孤岛结盟方法,但却未考虑到制约网络生命周期和影响孤岛结盟效率的能量均衡问题。

基于此,本文提出了基于分区能量均衡的无人机 WSN 孤岛结盟方法(multi-robot federating for disjoint segments in WSN based on partition energy balance, MR-PEB)。该方法从多移动机器人的能量均衡和中继分区部署两个方面出发,对现有的孤岛结盟方法进行改进,以提高具有能量均衡约束的移动机器人 WSN 孤岛结盟的适应性和效率。本文的主要贡献包括如下几点:

1) 为了提高孤岛结盟效率,在能量模型基础上,结合约束最优化方法,给出了该问题的建模过程;

2) 为了近似求解该最优化问题 MR-PEB,基于分治

思想相关理论,在相关启发式算法的基础上,提出能量均衡的连接机制,设计了多移动机器人的分区中继部署算法;

3) 从中继部署数量、中继部署时间和网络生命周期 3 个评价指标出发,与现在 WSN 孤岛结盟方法进行对比仿真,验证所提出方法的有效性。

与现有方法相比,本文方法的特点在于:

已有方法通常只考虑孤岛内部约束来实现 WSN 孤岛结盟,本文方法在考虑相关约束前提下,引入了移动机器人在结盟过程中本身的能量约束,通过考虑多移动机器人在结盟过程中的能量约束,提高全局网络的能量均衡,提高孤岛结盟效率。

MR-PEB 方法将孤岛分组为多个集群,考虑了支持孤岛间流量传输所需的能量消耗以及孤岛之间的接近程度。因此,形成的网络拓扑呈现出混合结构。在每个集群中,移动机器人负责为孤岛提供服务,并且移动机器人之间负责在集群之间进行数据传输。在集群形成的过程中,MR-PEB 采用基于移动和无线通信消耗能量的策略,以实现单个移动机器人负载的能量均衡。

1 系统模型及问题公式化描述

1.1 系统模型假设

1) 网络模型

WSN 由 n 个传感器节点和 1 个基站组成,已知 WSN 的感知区域 A 为 $K(m) \times K(m)$,所有传感器节点分布在 A 中;WSN 被抽象为连通图 $G(S,E)$,其中 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为感知区域内所有传感器节点的集合, E 为连接节点边的集合。传感器节点具有相同的最大感知半径 R_s 和通信半径 R_c ,且可通过定位算法获知自身位置。

2) 移动机器人模型

在感知区域 A 中存在 r 个移动机器人 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_r\}$,通信半径为 r_m 。移动机器人的速度 v 为恒定不变,移动机器人部署的中继节点为普通传感器节点,通信能力满足 MR-PEB 求解所需,且一个移动机器人有足够的缓冲区空间,可用于在一次移动过程中传输的数据。

3) 孤岛模型

在每个孤岛中通过适应度函数选取候选接入点集合 $RE_{seg(i)}$,在集合 $RE_{seg(i)}$ 中找到距离移动机器人最近的节点作为代表节点 $rep(Seg_i)$, $rep(Seg_i)$ 将作为 Seg_i 的接口,节点的极限发射次数为 N_{max} 。

为了形成孤岛之间的拓扑,在每个孤岛中都要定义一个代表节点 $rep(Seg_i)$,并且对代表节点的选取过程进行优化,其位置代表孤岛的位置。

4) 环境模型

基于 CORP 模型,CORP 方法采用贪婪的启发式方

法,该方法在恢复连接之前会进行迭代操作,然后执行修建过程中减少中继的数量,CORP 将感知区域 A 划分为网格单元组成的网格地图,以一个单元为中心的中继能够到达位于相邻单元中心的中继,每个单元都由其行和列标识,因此每个孤岛 Seg_i 的初始位置表示为 $rep(Seg_i)$ 所在的单元。

在移动机器人移动过程中,移动机器人将识别每个孤岛的候选节点,并且在候选节点中找到最优节点,以满足孤岛间的连接。在网格单元 C_i 中选取最优中继节点 BN_i , BN_i 的选取满足以下约束:

$$BN_i = \arg \min_{BN_i \in C_i} (f_M(C_i, S_i)) \quad (1)$$

其中, $f_M(C_i, S_i)$ 函数定义了两个网格之间网格数, S_i 为放置最近填充中继的网格, S_i 初始位置为代表节点 $rep(Seg_i)$ 。

5) 移动机器人能量模型

在结盟过程中使用一组 r 个移动机器人, $M = \{M_1, M_2, \dots, M_r\}$ 来连接不同孤岛 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,并且 M_i 在当前所消耗的能量 $E(M_i)$ 包括用于运动的能量 $E_M(M_i)$ 和通信的能量 $E_f(M_i)$ 。

移动机器人从孤岛 $s_i \sim s_j$ 传递数据之间的延迟 $D(s_i, s_j)$ 主要是由行程延迟为 D_T 和数据传输延迟为 D_C 决定,即:

$$D(s_i, s_j) = D_T(\text{Trip}_{i,j}) + \varepsilon D_C(\text{Data}_{i,j}) \quad (2)$$

行程延迟为 D_T ,且 D_T 只表示单个 M_i 行程距离函数,即:

$$D_T(\text{Trip}_{i,j}) = \left(\frac{1}{v} \cdot \text{Trip}_{i,j}\right) \quad (3)$$

其中, $\text{Trip}_{i,j}$ 为网格单元 C_i 到网格单元 C_j 的距离。数据传输延迟为 D_C , D_C 表示两个从 S_i 到 S_j 过程中的数据传输延迟,即:

$$D_C(\text{Data}_{i,j}) = \frac{\text{Data}_{i,j}}{b} \quad (4)$$

移动机器人 M_i 在结盟过程中所消耗的能量为 $E(M_i)$,其中用于运动的能量为 $E_M(M_i)$ 和用于通信的能量 $E_f(M_i)$, M_i 的上传/下载数据量为 Data_{M_i} 。 M_i 的能量消耗与它所运动的距离成正比,以及 M_i 的通信能量消耗主要与上传/下载数据量 Data_{M_i} 呈正相关,即:

$$E(M_i) = E_M(M_i) + E_f(M_i) \quad (5)$$

$$E_M(M_i) = \omega \cdot \text{Trip}_{i,j} \quad (6)$$

$$E_f(M_i) = \text{Data}_{M_i} \cdot f(R) \quad (7)$$

其中, $\text{Data}_{M_i} = \sum_{\forall s_i, s_j \in S} \text{Data}(s_i, s_j)$, $f(R) = \alpha + \beta \cdot R^\theta$,

ω 为一个常数,在此本章假设为 $1j/m$;

1.2 问题公式化

在相关模型假设的基础上,以移动机器人移动一个网格单元变化为间隔,将移动机器人部署过程划分为多

个子过程。在当前过程中根据移动机器人行程距离以及数据传输消耗计算当前移动机器人能量消耗,并且移动机器人移动到最优网格单元,根据前一轮计算并部署最优中继,然后进行下一个子过程,该过程被称为轮次迭代。

对于孤岛结盟问题将使用 r 个移动机器人来实现,这些移动机器人根据数据量需求在孤岛之间进行中继部署。对于这种结盟方式的主要目标是优化移动机器人的移动路径,通过部署中继节点最终实现多目标的网络拓扑优化,以减少孤岛之间的通信延迟,平衡移动机器人在移动过程和传输数据的能量开销,并且使能量开销最小化。

移动机器人在感知区域网格中移动,并在当前轮次中识别当前轮次网格内是否有被标记为 $rep(Seg_i)$ 的网格单元或最优中继节点 BN_i ,通过在邻近网格单元 C_i 中选取最优中继节点 BN_i ,找到最优节点部署位置,并且在当前轮次中部署中继,以满足孤岛间的连接。 BN_i 的选取满足以下:

$$BN_i = \arg \min_{BN_i \in C} (f_M(C_i, S_i)) \quad (8)$$

其中, $f_M(C_i, S_i)$ 函数定义了两个网格之间网格数; S_i 为放置最近填充中继的网格, S_i 初始位置为代表节点 $rep(Seg_i)$ 。

通过优化移动机器人移动路径,可使移动机器人运动能量开销降低,这是因为网络所形成的混合型网络拓扑结构能够提高中继节点的利用率,所以部署尽可能少的中继节点能够降低移动机器人的能量开销。因此能量开销可由多移动机器人部署中继数量总和来表示,并在此基础上通过优化冗余中继节点以提高孤岛结盟效率,孤岛结盟效率在孤岛结盟方法中是一个关键的度量标准,可以通过移动机器人在孤岛中部署中继节点完成的总时间来表示。

鉴于此,本文方法通过考虑运动与通信相关能量来平衡 $E(M_i)$, 即 $E_T(M_i)$ 和 $E_r(M_i)$, 使移动机器人之间能耗标准差最小,标准差越小意味着移动机器人间的能耗越合理。本文将问题公式化为:满足拓扑模型中约束的最优候选中继集合 OST_c 中选择满足约束的最优中继集合 OST_{best} , 将连接成本即中继部署数量最小化的优化问题,即:

目标函数:

$$OST_{best} = \arg \min_{OST \in OST_c} \left(\frac{\sum_{i=1}^m (E_{M_i} - \frac{\sum_{i=1}^m E_{M_i}}{m})^2}{m} \right) \quad (9)$$

约束条件:

$$\sum_{i=0}^n dist(Seg_i, Seg_{i+1}) \leq \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^k Trip_{i,j} \quad (10)$$

$$T_f + T_M \leq T_{max} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \exists path(RE), RE = (v_i \text{ or } s, r_1^t, \dots, r_j^t, BS), \\ & \forall i \in 1, \dots, N_{MRS}^t, \forall s \in Seg_i^t, r_j \in BN^{1 \dots t}, t \in n_{ii} \end{aligned} \quad (12)$$

$$h_x \geq 1, \forall x = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

$$T_x \leq t_{max}, \forall x = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

在上述 MR-PEB 优化问题(9)~(14)中,约束条件(10)~(11)保证了移动机器人在孤岛之间部署中继过程中所移动的距离之和要小于移动机器人可以移动的最大路径长度,并且保证移动机器人最大运动时间大于中继部署时间与移动机器人移动时间之和,其中:

- 1) $\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^k Trip_{i,j}$ 为移动机器人在孤岛之间部署中继过程中所移动的距离之和;
- 2) TR_{max} 为移动机器人可以移动的最大路径长度;
- 3) $T_{max} = \frac{TR_{max}}{v}$, 若忽略中继部署时间,且移动机器人速度恒定,则 $T_{max} = T_M + T_f (T_f = 0)$ 。

约束条件(12)保证了在中继部署过程中要保证至少存在一条路由路径,该路由由已部署中继与新部署中继集合组成,其中, $BN^{1 \dots t}$ 为前 $t-1$ 轮中继集合下,当前轮迭代可利用的中继数量。

约束条件(13)保证了连接性要求,这意味着每个孤岛都有一个或多个到基站的完整路由。 h_x 是为孤岛的中继路径数, k 为网络的孤岛总数。

约束条件(14)保证了延迟要求,它表示每个孤岛的最大数据传递延迟不超过预定的阈值,其中, t_x 为从孤岛 Seg_i 到接收器的最大数据传输延迟, t_{max} 为允许的最大延迟,为预定值。

2 MR-PEB 算法求解

文献[20]所提出的方法与 MRF-SNSA 问题相同,MR-PEB 基于拓扑模型与能量模型,在不考虑缓冲约束和额外目标约束情况下,所解决的问题为多项式时间不可求解的,为 NP-hard 问题。

为了近似求解 MR-PEB 优化问题(9)~(14),建立能量模型,本文在启发式算法的基础上,引入分治的思想,将规模庞大的 WSN 孤岛结盟问题分解为若干的子问题,在分部完成每个子问题,以优化中继数量,提高孤岛结盟效率为目标。从新部署中继利用率角度出发设计了基于分区能量均衡的中继部署算法,以实现目标条件下的问题优化。

2.1 相关定义

在算法迭代过程中,MR-PEB 问题引入分治和局部

优先思想,算法将进行两次迭代过程,即内区迭代和外区迭代过程,优先在内区迭代过程中 MR-PEB 将在 Graham 算法的基础上,通过优化中继部署位置,形成内区骨干连接路径,并在外区连接时对中继部署进行冗余优化。由于内区与外区在迭代过程中对于中继部署过程算法一致,虽然在中继部署位置的选择上有所不同,但不影响迭代的一致性。在描述迭代过程时,本章将以第 t 轮为例,讨论移动机器人移动与中继部署过程,首先将描述中继部署方法所需的相关定义给出如下:

定义 1 (候选中继): $rep(Seg_i)$ 邻近网格单元中位于最短路径上的网格单元为候选中继。

定义 2 (最优中继): 中继节点部署位置为最优中继。

定义 3 (内区网络拓扑图): 在第 t 轮中,由 BN^t , $rep(Seg_i)^t$ 与 BS 集合动态的组成了网络拓扑图,由 $G_{inner}(t) = \{V, E_t(t)\}$ 表示,其中 V 为节点集合, $E_t(t)$ 为内区无向边集合。

定义 4 (外区网络拓扑图): 在第 $t+n$ 轮中,在 $G_{inner}(t)$ 集合的基础上,加入当前轮次中由 BN^{t+n} , $rep(Seg_i)^{t+n}$ 组成的动态拓扑 $G_{outer}(t) = \{V, E_t(t) \cup E_p(t)\}$, $E_p(t)$ 为外区节点连接内区的无向边集合。

定义 5 (候选中继集合): 在运行的任意轮次 t 中, $rep(Seg_i)^t$ 邻近网格单元中位于最短路径上的网格单元为候选中继集合 $BC^t = \{BC_1^t, \dots, BC_i^t\}$ 表示。

定义 6 (时间量): 为了减少冗余,提高中继节点利用率,为每个孤岛设置时间量 $T_{wait(i)}$,表示在未部署中继之前需要等待的时间。

定义 7 (最优中继集合): 在运行的任意轮次 t 中,在候选中继集合 BC^t 中,部署中继的网格单元集合 BN^t , 作为最优中继集合 $BN^t = \{BN_1^t, \dots, BN_i^t\}$ 。

定义 8 (局部集群): 内部区域中根据聚类算法形成的局部区域称为局部集群,局部集群集合用 $Cl = \{Cl_1, Cl_2, \dots, Cl_n\}$ 表示。

2.2 能量均衡的连接机制

能量均衡的连接机制旨在平衡移动机器人连接过程中的能量差异。为了保持单元之间较低的数据延迟,该机制可以减少单个移动机器人访问和传输数据时所消耗的能量开销。由于终端之间交换的数据量不同,即使在每个集群包含相同数量移动机器人的情况下,通过无线链路传输数据所消耗的能量也是不平衡的。

所以本节通过计算移动机器人之间的能耗率与剩余能级之比的标准差,来计算自身剩余能级所承担的通信负载。在移动机器人工作过程中本章更倾向于移动机器人的能量平衡,因此要求移动机器人之间的能量差异应该尽可能的小,将使用如下公式反应移动机器人之间的能量差异:

$$\Psi = \min \left\{ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \right\}, \quad (15)$$

其中, $\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$, $H_i = \frac{g_i}{E_i}$, g_i 为 M_i 的能耗率, H_i 的标准差越小,意味着移动机器人间的能耗越合理。

能量均衡的连接机制主要分为两个阶段:初始化、局部构建。

1) 初始化阶段

为了形成孤岛间拓扑,本章将每个孤岛定义为了一个具有代表性的传感器节点代表并用一个网格单元表示,并且使用幸存节点数来估计孤岛 S_i 的数据量,由于在某些应用场景中,孤岛内部具体拓扑细节不易了解,因此本节不假设孤岛内部的中继容量,因此孤岛间连接需要一个容量足够大的中继节点,以实现恢复孤岛间连通所需条件。在内区孤岛中根据孤岛中节点数据量大小为孤岛赋上相对的权值,对于外区孤岛本章将根据孤岛距离内区中心的欧氏距离将权值赋为 1 或 2,初始化如图 1(a) 所示。

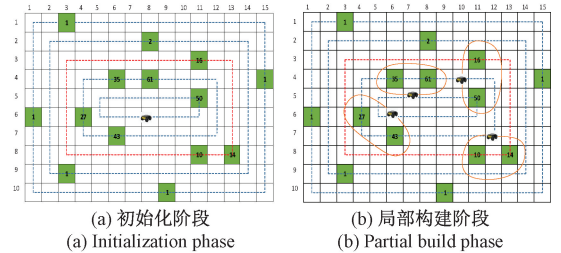


图 1 能量均衡的连接机制

Fig. 1 Connection mechanism for energy balance

2) 局部构建

根据聚类算法首先将内区孤岛构建为多个局部集群,形成局部集群集合 $Cl = \{Cl_1, Cl_2, \dots, Cl_n\}$,并建立了相关评价函数来评估局部构建标准,对于任意局部集群内构建结果更倾向于平衡各局部集群之间的数据量以平衡能量消耗。因此评价指标为局部集群间的欧氏距离与局域内权值大小,评价函数 Γ_{N_c} 如下:

$$\Gamma_{N_c} = \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n} + \beta \cdot \left(\sum_{j=1}^k dis(Cl_j, Cl_{j+1}) \right) \quad (16)$$

其中, $\sum_{i=1}^n \omega_i / n$ 为局部集群平均权值, $\sum_{j=1}^k dis(Cl_j, Cl_{j+1})$ 为局部集群经过 TSP 算法求解得到局部集群集合 Cl 的最短路径。示例如表 1 所示,通过聚类算法将内区孤岛分为 N_c 个局部集群集合,根据评价函数,当 $N_c = 4$ 时, Γ_{N_c} 的值最小。因此将内部区域分为 4 个集合,移动机器人将首先完成各局部集群间的连接,如图 1(b) 所示。

表1 集群划分表
Table 1 Cluster partition

$N_c=3$	$N_c=4$	$N_c=5$
$Cl_1=(27,43,35)$	$Cl_1=(27,43)$	$Cl_1=(27)$
$Cl_2=(61,16,50)$	$Cl_2=(35,61)$	$Cl_2=(43)$
	$Cl_3=(16,50)$	$Cl_3=(35,61)$
$Cl_3=(10,14)$	$Cl_4=(10,14)$	$Cl_4=(16,50)$
		$Cl_5=(10,14)$

因此移动机器人在部署过程中则先完成局部集群内的连通,然后根据 Graham 算法将各区域中心连接形成凸边形拓扑结构,后进行局域间连通。外区孤岛则根据最到内部区域中继节点的最短欧氏距离进行连接,完成中继节点部署。能量均衡的连接机制将最小化移动机器人之间的能量差异并最大限度的延长了网络生命周期。

2.3 MR-PEB 算法实现

在 2.1 节相关定义的基础上,利用分治和局部优先思想,在相关启发式算法^[22]的基础上,实现基于移动机器人能量均衡的分区迭代中继部署算法。

总步骤如下:

1) 首先选择孤岛的节点,在每个孤岛中计算节点重叠率 D ,根据节点功耗 $E_r(k,d)$,计算出当前节点 i 的剩余能量 N_i ,而后计算出在当前剩余能量的条件下可发送报文的最大次数为 N_i 。通过初始能量 E_{init} 和当前能量 E_{elec} 计算出极限发射次数,最后根据网络阈值和适应度函数 $F(i)$ 找到孤岛中的接入点 $rep(Seg_i)$,代表节点示意图如图 2 所示。

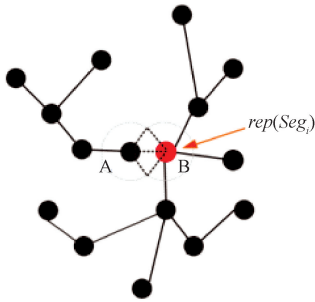


图 2 代表节点示意图

Fig. 2 Representative node schematic

2) 移动机器人首先以移动速度 v ,在感知区域 A 的内区网格单元集合内出发到达局部集群网格处,从第 t 轮迭代的内层网格集合 C_t^i 中开始移动。利用定义 1,找出 BN^t 和 $rep(Seg_i)^t$ 的候选节点;

3) 更新内区局部集群最优中 BN^t 继集合,并结合定义 5,更新候选 BC^t 中继集合;

4) 根据定义 5,由 BN^t 和 $rep(Seg_i)^t$ 组成的内区网络拓扑 $G_{inner}(t)$,利用能量模型与欧氏距离为度量标准,

在内区局部集群集合 Cl 中的候选节点集合 BC^t 中。利用定义 2,找出部署中继的网格单元,并部署中继,形成中继路由序列集合 $bpath$,将其加入到全局最优路由序列集合 $Apath^t$ 中,其中 $bpath = \{rep(seg_1)^t, \dots, rep(seg_i)^t, \dots, BC_i^t, \dots, BC_i^t\}$;

5) 局部集群内部网格部署完成后,进行局部间部署,通过运行 Graham 算法,找到区域间候选中继集合加入到集合 BC^t 中。然后利用定义 1,找出 BN^t ,将其加入到全局最优路由序列集合 $Apath^t$ 中;

6) 内区在 n 轮迭代后结束,移动机器人以速度 v ,在感知区域 A 边界网格集合 C_t^i 从第 $t+n$ 轮开始迭代,移动机器人移动到外部孤岛 $rep(Seg_i)^{t+n}$ 网格单元位置。结合定义 5,将候选节点加入到步骤 2) 所形成的候选中继集合 BC^{t+n} 中,选择第 $t+n$ 轮中外区代表节点 $rep(Seg_i)^{t+n}$ 到中继路由序列集合 $bpath$ 中网格单位最少的一条路径,选出最优中继 BN^{t+n} 。利用定义 6,根据孤岛等待时间部署中继节点。最后在候选集合 BC^{t+n} 中选择内外区连接中继节点加入到集合 $bpath$ 中,并且将外部代表节点集合 $rep(Seg_i)^{t+n}$ 与加入到全局最优路径集合 $Apath^t$ 中,直至迭代结束。

在步骤 5) 中,由于外区孤岛连接时,可能存在某孤岛 $rep(Seg_i)$ 正好在离中心更远孤岛 $rep(Seg_j)$ 的路径中,因此引入等待时间量的方法。假设移动机器人的速度为 v ,计算区域最远点到中心的运动时间为: $T_{max_inner} = L_{region}/2v, L_{region}$ 为感知区域 A 的对角线,计算每个孤岛 Seg_i 到内部中继连接时间为:

$$T_{to_inner(i)} = dist(rep(Seg_i), rep(Seg_j))/v$$

为了确保利用已部署的中继节点,提高节点的利用率,因此求出每个孤岛部署中继需要等待的时间量。在未部署节点之前,使 Seg_i 与先前中继节点部署的时间量为 $T_{wait}(i) = T_{max_inner} - T_{to_inner}(i), \forall i \in n$ 。

此等待时间可确保如果内部段位于朝向内区孤岛的外部孤岛路径上,则不会不必要地部署中继,从而节省部分移动机器人的能量,如图 3 所示。

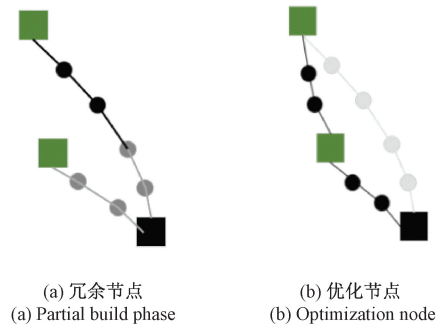


图 3 冗余优化

Fig. 3 Redundancy optimization

上述步骤 1)~5) 的伪代码描述如算法 1 与算法 2 所示。

算法 1 内区中继部署算法

输入:通信半径 R_c ;时间等待量 T_{wait} ,孤岛代表节点集合 $rep(Seg_i)^t$;
输出:内区最优中继集合 $Apath^t$ 。

```

1   $Apath^t \leftarrow null$ ;  $bpath \leftarrow null$ ;
2   $IRT^t \leftarrow rep(Seg_i)^t$ ;
3   $Data \leftarrow Data_{i,j}$ ;
4   $E^t(M_i) \leftarrow null$ ;
5   $BC^t \leftarrow null$ ;  $T_{wait} \leftarrow null$ ;  $L \leftarrow null$ ;
6  while each  $IRE^t$  do
7    while  $dist(rep(Seg_i), C_i) < R_c$  do
8       $BC^t \leftarrow$ 选择  $Seg_i$  的候选中继  $BC_i^t$ ;
9    end while
10   while  $dist(rep(Seg_i), rep(Seg_j)) > 2R_c$  do
11      $bpath \leftarrow bpath \cup$  在候选中继集合  $BC^t$  中,根据  $Seg_i$  到  $Seg_j$  的距离部署新中继;计算  $M^t$  中的  $E^t(M_i)$  并在集  $M^t$  中更新  $E^t(M_i)$  的值;
12      $L \leftarrow L + dist(rep(Seg_i), rep(Seg_j))$ ;
13   end while
14 end while
15 更新最优中继集合  $Apath^t \leftarrow bpath$ ;
16   $bpath \leftarrow null$ ;
17  return  $Apath^t$ 

```

算法 2 外区中继部署算法

输入:通信半径 R_c ;时间等待量 T_{wait} ,内区最优中继集合 $Apath^t$ 。
输出:全局最优中继集合 $Apath^{t+n}$ 。

```

1   $ORT^{t+n} \leftarrow rep(Seg_i)^{t+n} - rep(Seg_i)^t$ ;
2  while each  $ORT^{t+n}$  do
3  if  $T_{wait}(i) = 0$  do
4    for  $1 \leftarrow length(bpath)$  do
5      计算  $ORT^{t+n}$  中  $rep(Seg_i)$  到  $bpath$  中路径最短的候选中继节点位  $BC_i^{t+n}$ ;
6      if  $dist(rep(Seg_i), BC_i^{t+n}) > 2R_c$  do
7         $bpath \leftarrow bpath \cup$  根据  $rep(Seg_i)$  到  $BC_i^{t+n}$  的距离在路径中部署新中继;计算  $M^{t+n}$  中的  $E^{t+n}(M_i)$  并在集合  $M^{t+n}$  中更新  $E^{t+n}(M_i)$  的值;
8         $L \leftarrow L + dist(rep(Seg_i), BC_i^{t+n})$ ;
9      end if
10     end for
11   end if
12 end while
13  $Apath^{t+n} \leftarrow Apath^t \cup bpath$ ;
14 return  $Apath^{t+n}$ ;

```

由上述步骤可知,算法以中继部署,通过主方法间嵌套循环的方式,实现内外区的中继部署算法,其中,主方法间嵌套循环次数为 m ;内区中继部署代码位于算法 1 的 6~14 行,其时间复杂度为 $O(n^2)$;外区中继部署代码

位于算法 2 的 2~12 行,其时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

综上所述,在算法运行最糟糕的情况下,算法 1 和 2 的时间复杂度为 $O(mn^2)$ 。

在此给出了一个过程图如图 4~7 所示。

图 4 为移动机器人进行内区部署的初始位置,移动机器人分别移动到各个局部集群 $\{Cl_1, Cl_2, Cl_3, Cl_4\}$ 中,在当前局部集群中选择候选中继节点部署位置,并在候选中继节点集合中,根据选择各个局部集群中的最优中继节点集合 BN_i 。

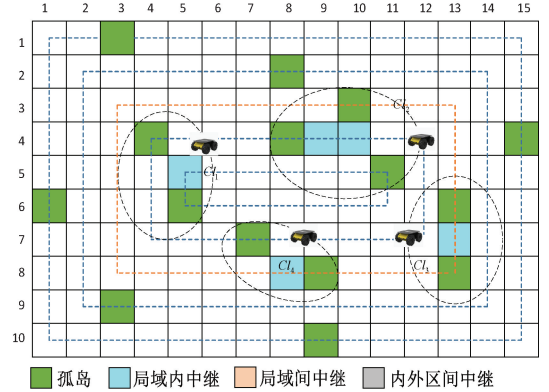


图 4 中继部署过程 1

Fig. 4 Relay deployment process1

图 5 根据 Graham 算法求解得出的路径,在路径中选取候选中继节点部署位置集合,并在集合中选取最优中继节点部署集合,然后移动机器人移动到最优中继部署位置部署中继。

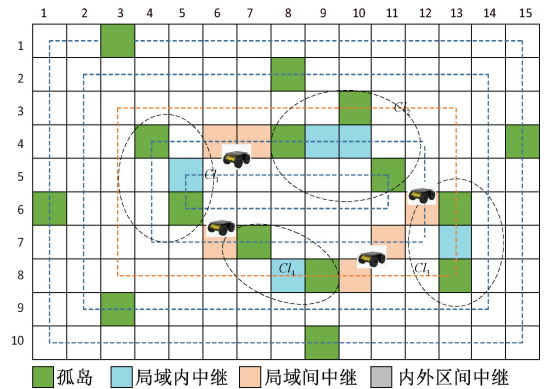


图 5 中继部署过程 2

Fig. 5 Relay deployment process2

图 6 为移动机器人在开始外区部署时的初始位置,根据内区部署中继数量情况计算最近路径,选择候选中继部署位置,部署中继节点,并且在过程中引入时间等待量的方法,提高中继的利用率。图 3(a) 表示优化前所需的中继数量为 6,图 3(b) 表示优化后所需中继数量减少。

图 7 为中继部署完成后的完整部署图。

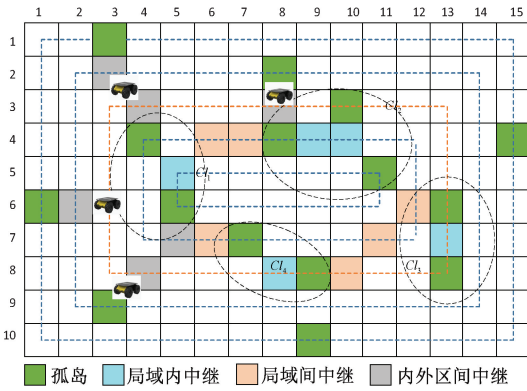


图6 中继部署过程3

Fig. 6 Relay deployment process3

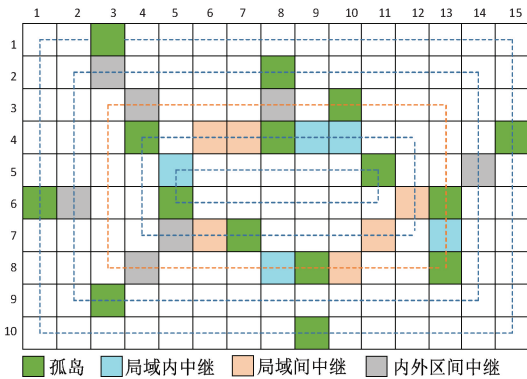


图7 中继部署过程4

Fig. 7 Relay deployment process4

3 性能评估

为了评估 MR-PEB 的性能,在变化的中继通信半径 R_c 、孤岛数量 N 、感知区域 A 和移动机器人数量 D 下,以中继部署数量、中继部署时间和网络生命周期为评价指标,采用 MATLAB 作为仿真平台,进行了 MR-PEB 与 2C-Spiderweb、CRAFT 和 QRP 的对比仿真实验。仿真环境和初始条件设置如下:1)网络由 1 200 个随机部署于感知区域 A 内的传感器节点和 1 个基站组成,如图 8 所示,且基站位于 A 的中心位置;2)传感器节点的感知与通信半径分别为 7 和 10 m;3)移动机器人初始化于感知区域 A 的中心位置,且其移动速度 $v = 3 \text{ m/s}$;4)移动机器人的感知与通信半径分别 14 和 20 m;5)中继为普通的传感器节点,由于网络拓扑的随机性,进行了 30 次仿真实验,并将每个数据点的结果取平均值。

1) 中继部署数量

图 9 给出了随着中继通信半径 R_c 、孤岛数量 N 、感知区域 A 和移动机器人数量 D 逐渐增加,MR-PEB 与 2C-Spiderweb、QRP 和 CRAFT 在中继数量对比结果。

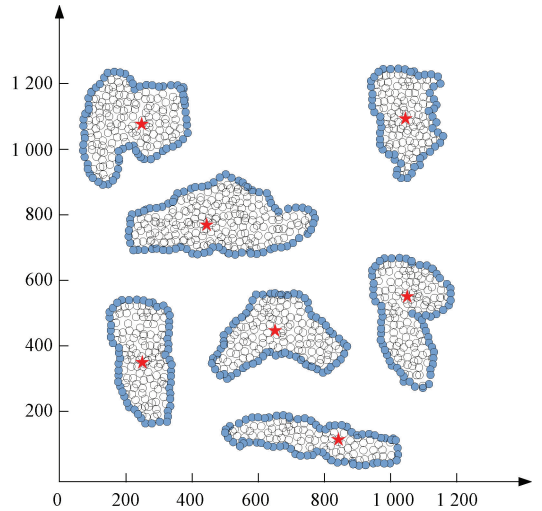


图8 仿真实验图

Fig. 8 Simulation experiment diagram

图 9(a)中,在 $N = 10, A = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}, D = 10$ 条件下,随着 R_c 的增加,MR-PEB 中继部署数量均逐渐减少。这是因为中继部署数量由孤岛间路由跳数决定,而其恰与 R_c 成反比。此外,与另外 3 种方案相比,MR-PEB 的效果更为明显。这是因为 MR-PEB 的最终连通路长度小于 2C-Spiderweb、QRP 和 CRAFT,并且引入了中继节点优化机制,提高了中继节点的利用率,使得中继节点的部署数量更少。

图 9(b)中,在 $R_c = 30, A = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}, D = 10$ 下,随着 N 的增加,MR-PEB 与对比方法的中继部署数量均逐渐增加。这是因为孤岛数量与网络总流量成正比。

图 9(c)中,在 $R_c = 30, N = 10, D = 10$ 下,随着 A 的增加,MR-PEB 与对比方法的中继部署数量均逐渐增加,MR-PEB 相对具有优势,这是因为 2C-Spiderweb 和 CRAFT 对于距离在孤岛之中起关键作用,这是因为孤岛间距与感知区域成正比,故而随着感知区域增长,结盟孤岛需要部署更多中继。

图 9(d)中 $D = 10, A = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}, R_c = 30$ 下,随着移动机器人数量的增加与对比方法相比,中继部署数量保持在基本不变趋势,因为 MR-PEB 平衡了移动机器人每段行程。

2) 中继部署时间

图 10 给出了随中继通信半径 R_c 、孤岛数量 N 、感知区域 A 和移动机器人数量 D 逐渐增加,MR-PEB 与 2C-Spiderweb、QRP 和 CRAFT 在中继部署时间上对比结果。

图 10(a)在 $N = 10, A = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}, D = 10$ 下,随着 R_c 的增加,图 11(a)中的中继部署时间和 MR-PEB 与其他对比方法的部署时间都在逐渐降低。中继部署时间主要与中继的分布和移动机器人的速度有关,但是不同的

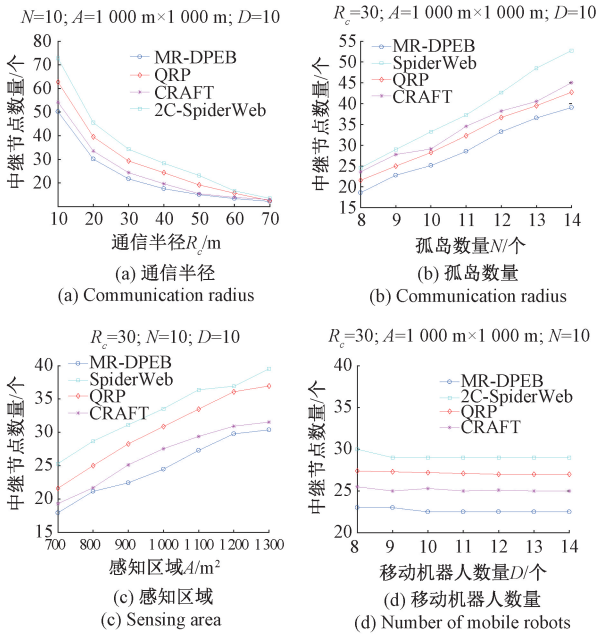


图 9 中继部署数量
Fig. 9 Number of relay deployments

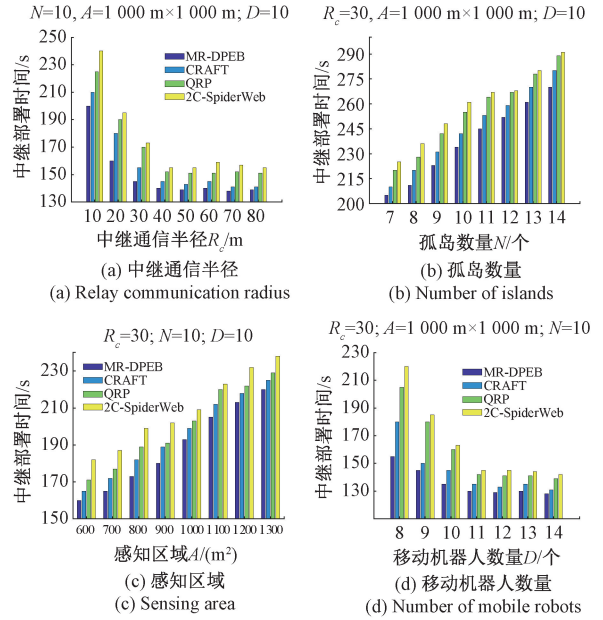


图 10 中继部署时间
Fig. 10 Relay deployment time

部署方法也会影响中继部署时间。总体而言, 中继数量是影响部署时间的最主要因素。

图 10(b) 中, 在 $R_c = 30, A = 1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}, D = 10$ 下, 随着 N 增加, 结盟孤岛所需的网络流数量呈指数递增, 因此需要消耗更多的中继部署时间来部署中继。

图 10(c) 中, 在 $R_c = 30, N = 8$ 下, $D = 10$ 感知区域 A 越小, 当感知区域较小时, 已部署中继的利用率更高, 需要部署的新中继数量也较少。相比较较大的感知区域, 各种方法的时间复杂度对中继部署时间的影响更为显著。综上所述, 根据特定的参数选择合适的中继部署方法可以降低部署时间并提高效率。

图 10(d) 中 $N = 10, A = 1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}, R_c = 30$ 下, 随着移动机器人数量的增加与对比方法相比, 中继部署时间逐渐减小并趋于稳定, 因为 MR-PEB 平衡了移动机器人每段行程, 且本文假设移动机器人在部署时不消耗过多的能量。

3) 网络生命周期

该实验部分主要探究 WSN 连通恢复后的网络生命周期, 连通恢复后所有节点均在相同的能耗模型下开始正常工作, 节点的能量耗尽时代表该节点死亡。

图 11 给出了算法所形成的拓扑结构在正常运行期间的网络生命周期, 给出了随着中继通信半径 R_c 、孤岛数量 N 、感知区域 A 和移动机器人数量 D 逐渐增加, MR-PEB 与 2C-Spiderweb、QRP 和 CRAFT 在轮次上的对比结果, 通过最后一个节点死亡的轮次来表示整个网络的运行时间。

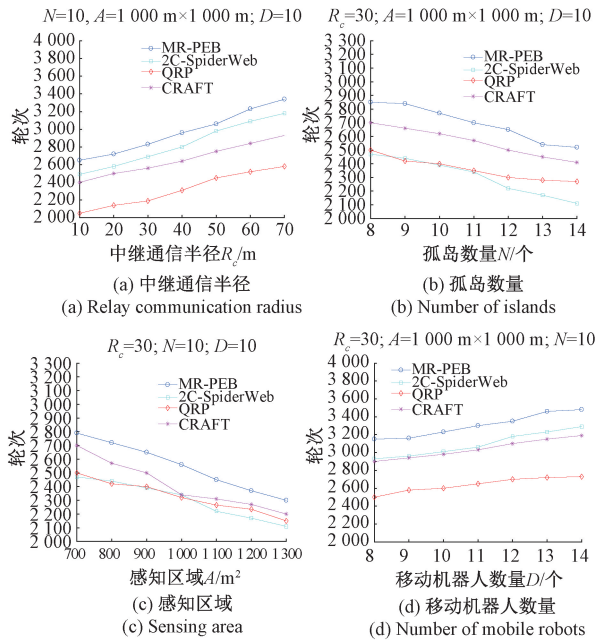


图 11 网络生命周期
Fig. 11 Network life cycle

研究表明, MR-PEB 算法的网络生命周期优于其他两种方法, 并且能够降低连接时的平均节点度。随着中继通信半径、孤岛数量、感知区域 A 和移动机器人数量的增加, MR-PEB 算法的网络生命周期表现出良好的稳定性。然而, 随着孤岛数的增加, MR-PEB 算法的网络生命周期会有所下降, 这是因为网络内的数据量增加, 导致数据传输路径增多。

另外由于网络拓扑结构的变化 2C-Spiderweb、QRP 和 CRAFT 的网络生命周期都相对于 MR-PEB 都具有劣势,这是由于 2C-Spiderweb 与 CRAFT 提高了连接时的平均节点度。因此本文所提出的算法在网络生命周期方面具有显著的优势。

4 结 论

孤岛结盟是无线传感器网络拓展自身应用领域和提高资源受限环境下应急响应速度的关键。本文在这方面进行了有益的探索和尝试,MR-DPEB 最终形成了一个混合型拓扑结构,通过与现有方法进行对比实验,结果表明:MR-DPEB 能够在满足移动机器人能量平衡消耗约束下,在中继部署数量、中继部署时间、移动机器人平均能耗和网络生命周期等方面都优于对比方法,MR-DPEB 的有效性随着移动机器人的通信范围,以及孤岛数量和移动机器人数量的增加而增加,提高了网络的适应性效率,能高效地实现孤岛结盟。

参考文献

- [1] LIANG J, CAO J, LIU R, et al. Distributed intelligent MEMS: A survey and a real-time programming framework[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2016, 49(1): 1-29.
- [2] LIN F, CHEN C, ZHANG N, et al. Autonomous channel switching: Towards efficient spectrum sharing for industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 3(2): 231-243.
- [3] YOUNIS M, SENTURK I F, AKKAYA K, et al. Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2014, 58: 254-283.
- [4] 张帆. 无线传感器网络 K 重覆盖节点部署与研究[J]. 网络安全技术与应用, 2016(9):85-86,87.
ZHANG F. Wireless sensor network K-coverage node deployment and research [J]. Network Security Technology and Applications, 2016(9):85-86, 87.
- [5] 赵新元. 无线传感器/反应器网络中反应节点优化重定位机制研究[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(6): 1101-1101.
ZHAO X Y. Research on optimization relocation mechanism of reacting nodes in wireless sensor/actuator networks[J]. Computer Engineering and Science, 2015, 37(6):1101-1101.
- [6] BAROUDI U, ALDARWBI M, YOUNIS M. Energy-aware connectivity restoration mechanism for cyber-physical systems of networked sensors and robots[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 3093-3104.
- [7] CHOUIKHI S, EL KORBI I, GHAMRI-DOUDANE Y, et al. Distributed connectivity restoration in multichannel wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2017, 127: 282-295.
- [8] AWAD A, PANG W, COGHILL G M. Physarum inspired connectivity and restoration for wireless sensor and actor networks [C]. Advances in Computational Intelligence Systems: Contributions Presented at the 18th UK Workshop on Computational Intelligence, 2019: 327-338.
- [9] LEE S, YOUNIS M, LEE M. Optimized bi-connected federation of multiple sensor network segments[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 38: 1-18.
- [10] LEE S, YOUNIS M. Optimized relay placement to federate segments in wireless sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(5): 742-752.
- [11] KHALILPOUR AKRAM V, AKUSTA DAGDEVIREN Z, DAGDEVIREN O, et al. PINC: Pickup non-critical node based k-connectivity restoration in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6418-6425.
- [12] ABBAS A, YOUNIS M. Establishing connectivity among disjoint terminals using a mix of stationary and mobile relays[J]. Computer Communications, 2013, 36(13): 1411-1421.
- [13] CHOUIKHI S, EL KORBI I, GHAMRI-DOUDANE Y, et al. Recovery from simultaneous failures in a large scale wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2017, 67: 68-76.
- [14] SHEN Z, JIANG H. Mobile relay scheduling in partitioned wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5563-5578.
- [15] JOSHI Y K, YOUNIS M. Restoring connectivity in a resource constrained WSN[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 66: 151-165.
- [16] ESSAM H, YOUNIS M, SHAABAN E. Minimum cost flow based approach for connectivity restoration in WSN [J]. International Journal of Sensor Networks, 2018, 27(1): 37-51.
- [17] LIU X. Survivability-aware connectivity restoration for partitioned wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(11): 2444-2447.
- [18] LIU X, LIU A, QIU T, et al. Restoring connectivity of

damaged sensor networks for long-term survival in hostile environments [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(2): 1205-1215.

- [19] LEE S, YOUNIS M, ANGLIN B, et al. LEEF: Latency and energy efficient federation of disjoint wireless sensor segments [J]. Ad Hoc Networks, 2018, 71(11): 88-103.

- [20] 景荣, 孔令富, 赵逢达, 等. 基于搜索带宽感知的多机器人 WSN 孤岛结盟方法 [J]. 软件学报, 2019, 30(9): 2718-2732.

JING R, KONG L F, ZHAO F D, et al. Multi-robot federating method for disjoint segments in wireless sensor network based on search and bandwidth aware [J]. Journal of Software, 2019, 30(9): 2718-2732.

- [21] SAEED M K, UL HASSAN M, MAHMOOD K, et al. Efficient solution for connectivity restoration (ESCR) in wireless sensor and actor-networks [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 117: 2115-2134.

- [22] 葛斌, 吴波, 代陈. 混沌蚁群算法在划分区域中能量均衡路由方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 786-793.

GE B, WU B, DAI CH. Research on energy balancing routing method in partitioned area based on chaotic ant

colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 786-793.

作者简介



景荣 (通信作者), 2006 年于辽宁工业大学获得学士学位, 2010 年于燕山大学获得硕士学位, 2016 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学副教授, 主要研究方向为无线传感网络理论与技术、移动计算、物联网。

E-mail: jingrong@ysu.edu.cn

Jing Rong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning University of Technology in 2006, M. Sc. degree from Yanshan University in 2010 and Ph. D. degree from Yanshan University in 2016, respectively. Now he is an associate professor in Yanshan University. His main research interests include wireless sensor network theory and technology, mobile computing, and Internet of Things.

段云鹏, 2019 年于保定学院获得学士学位, 现为燕山大学研究生, 主要研究方向为无线传感网络理论与技术。

E-mail: 376684352@qq.com



Duan Yunpeng received his B. Sc. degree from Liaoning Baoding College in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Yanshan University. His main research interests include wireless sensor network theory and technology.