

基于匹配信任度机制的移动传感网簇头更新算法

王 恒 郑笔耕

(荆楚理工学院电子信息工程学院 荆门 448000)

摘要:为解决移动传感网部署过程中存在的簇头节点更新质量不佳和节点生存率较低等不足,提出了一种基于匹配信任度机制的移动传感网簇头更新算法。首先,引入 K-means 算法,利用误差平方根函数来完成网络初始聚类,以快速定位聚类中心,提升聚类形成速度。随后,综合考虑备选簇头剩余能量、备选簇头与当前簇头的欧氏距离、备选簇头覆盖范围内节点总数 3 个因素,设计了基于匹配信任度的簇头更新方法,按权值对各因素进行平均分配,进而将信任度权值最高的节点作为备选簇头,从而选举出生存质量较高的节点。仿真实验表明,算法具有更高的网络稳定运行时间和簇头节点生存率,以及更低的节点故障概率。其中,网络稳定运行时间提升了 80% 以上,簇头节点生存率保持在 90% 以上,节点故障概率也较低,具有明显的优势。

关键词:移动传感网; 匹配信任度; 簇头更新; 欧氏聚类; 区域分割

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Cluster head updating algorithm for mobile sensor networks based on matching trust mechanism

Wang Heng Zheng Bigeng

(College of electronic and Information Engineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

Abstract: In order to the problems of poor update quality and low survival rate of cluster head nodes in the deployment process of mobile sensor networks, a cluster head update algorithm for mobile sensor networks based on matching trust mechanism is proposed. First, K-means algorithm is introduced to complete the initial clustering of the network by using the square root function of error to quickly locate the cluster center and improve the clustering speed. Then, considering the three factors of the residual energy of the candidate cluster head, the Euclidean distance between the candidate cluster head and the current cluster head, and the total number of nodes within the coverage range of the candidate cluster head, a cluster head update method based on matching trust is designed. Each factor is evenly distributed according to the weight value, and then the node with the highest trust weight value is used as the candidate cluster head, so as to elect the node with higher survival quality. Simulation results show that the algorithm in this paper has higher network stable running time, higher cluster head node survival rate, and lower node failure probability. Among them, the stable running time of the network has been improved by over 80%, the survival rate of cluster head nodes has been maintained at over 90%, and the probability of node failure is also low, which has obvious advantages.

Keywords: mobile sensor network; matching trust; head updating; euclidean clustering; region segmentation

0 引 言

移动传感网(mobile sensor network, MSN)作为无线传感网与新一代移动通信技术融合产物,正在“中国制造 2025”等国家规划中占据一席之地^[1]。该技术采取撒放可

移动传感器的方式进行节点部署,节点在一定空间范围内自行实现数据采集、汇聚及传输,可广泛运用于诸如环境监测、新冠肺炎防疫、战术数据链等领域^[2]。网络在运行过程中各节点可基于分簇算法自行实现区域组网并最终将数据传输至 Sink 节点(中央控制节点)^[3]。由于移动传

收稿日期:2023-08-30

* 基金项目:荆门市科学技术局科技计划项目(2023YFYB089)、荆楚理工学院科学研究项目(YB202319)资助

感网部署环境具有极端特性,发生故障时难以更换传感器节点,进而导致网络传输出现抖动,拓扑结构遭到破坏^[4]。因此采取一定的措施维护移动传感网网络结构稳定性,降低传感器节点故障概率,防止因簇头节点失效而导致网络瘫痪,正在日益成为热门研究领域^[5]。

当前,上述问题的研究点主要集中于路由算法、能量受限算法等方面^[6-7]。如 Xie 等^[8]考虑到传统平面路由方案存在拓扑易遭破坏的特点,提出了一种基于能量优选机制的移动传感网簇头更新算法,根据业务负载情况对网络区域进行层次分割,采用多层汇聚方式实现数据中继传输,降低因簇头失效而出现传输抖动的概率,可适应于各种复杂部署场景。然而,该算法需要对网络拓扑频繁进行扫描更迭,在节点移动速率较快时易导致层次结构遭破坏,数据传输将受到严重影响。Kanellopoulos 等^[9]引入能量均衡机制,提出了一种基于主备切换方案的移动传感网簇头更新算法,在分簇结束后指定网络中能量最佳的节点作为备用簇头节点,当簇头节点失效时将及时启动节点更换操作,具有简便易行的特性,部署成本较低。然而,该算法也存在对移动环境适应能力较差的不足,节点频繁更迭时亦将出现较为严重的拥塞现象,使得网络传输性能出现下降。Santosh 等^[10]提出了一种基于双源备份机制的移动物联网簇头更新算法,其利用临近区域内簇头节点具有相似特性,采取基于节点属性的索引建模实现对簇头节点的热备份,规避因簇内节点竞争而导致能耗过载的现象,可适应移动传感网超宽带传输的部署场景。然而,该算法在分簇结束后即需要频繁进行簇头节点间备份及切换操作,簇头节点能量消耗水平较高,节点处于移动状态时易发生较为频繁的簇头节点更换事件,使得该算法的稳定性较差。

针对当前研究中存在的问题,提出了一种基于匹配信任度机制的移动传感网簇头更新算法。考虑到当前研究中存在的簇内竞争现象,采用合 K-means 方案和误差平方根指标选取具有能量最优的节点作为簇头节点,能够较好地适应超宽带传输场景。随后,为达到及时更新簇头节点目的,将数值最高的信任值权值对应的节点作为备选簇头节点,从而降低了簇头节点失效概率,更好地适应拓扑频繁更迭的场景。最后,采用 NS2 仿真实验环境,证明了所提算法的性能。

1 移动传感网网络模型概述

考虑到移动传感网分布区域为矩形,节点具有随机游走特性^[11],如图 1 所示。网络节点分为簇头节点(cluster head, CH)、簇内节点(cluster member, CM)及 Sink 节点,其中,簇头节点负责收集簇内节点汇聚的信息并通过其他簇头节点传输至 Sink 节点,簇内节点采用周期收集机制对覆盖区域内数据进行采样并传输至簇头节点, Sink 节点为基站节点,在接收数据的同时负责全网拓扑维护工作, Sink 节点可采取无线方式对簇头节点和簇内节点进行远程供电。

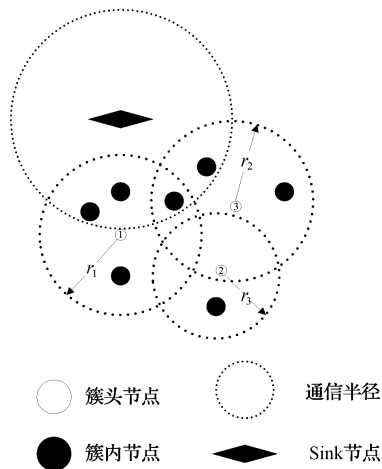


图 1 移动传感网示意图

此外,考虑到移动传感网部署过程中存在节点随机布撒特性,本文对网络模型做出如下假设。

1)簇内节点具有多样性特点。簇内节点在布撒完毕后,可以被选举为簇头节点,也可以持续承担数据采集工作。

2)Sink 节点兼备网络管理及电池角色。Sink 节点作为基站节点,可通过远程方式对簇头节点和簇内节点进行供电,但 Sink 节点承担能量供给工作时将不会影响自身持续进行的网络数据收集及网络路由维护角色。全网 Sink 节点个数为 1 个。

3)节点不可被人工更换。簇内节点和簇头节点在发生故障时,将不可通过人工方式进行更换,出现能量受限现象时仅能通过 Sink 节点接收能量,当仅当能量恢复至可进行数据采集及传输程度时将恢复相应角色。期间,簇头节点将被其余簇头节点或自身簇成员节点所更换,簇成员节点出现能量受限时将直接进入休眠状态。

此外,簇头节点在汇聚簇成员节点所传数据及接收 Sink 节点指令过程中将发挥核心作用,因此需要采取有力机制应对簇头节点失效情形,特别是在网络区域分割过程中应设法对簇头节点进行动态备份,以便网络能够随时应对簇头节点运行过程中出现的能量受限现象。

2 本文移动传感网簇头更新算法设计

分析可知,网络区域分割的过程也是簇头节点被选举的过程,网络区域分割完毕后,应及时采取备份机制或选举机制对簇头节点进行动态更新,以便降低因簇头节点更换失效而出现网络拥塞现象。鉴于此,本文算法由基于欧氏聚类机制的区域分割和基于匹配信任度的簇头更迭两个部分构成。

2.1 基于欧氏聚类的区域分割

不失一般性,进一步设定各节点分布满足随机均匀分布,这是由于实践中移动传感网业务具有集中特性,但用户特征具有随机特性所致。簇头节点和簇成员节点均可

通过 Sink 节点感知自身位置,簇头节点与簇成员节点的位置信息均可通过 Sink 节点予以共享。不过,由于节点处于频繁更迭状态,Sink 节点获取的坐标存在一定的不确定性,单纯采用广播方式更新坐标也将带来严重的网络冗余风险。因此,本文设计了基于欧氏聚类的区域分割。

首先,基于网络节点与 Sink 节点位置,计算相应的欧氏距离。由于移动传感网一般为平面网络,因而坐标具有二维特点,考虑到欧氏距离数据难以直接通过计算方式获取,本文使用误差平方根(square root of error, SRE)作为欧氏聚类目标函数,引入 K-means 算法对形成网络聚类^[12],相应的 SRE 公式如下:

$$SRE = \sum_{j=1}^n \sum_{y \in K_j} \sqrt{euc(K_j - y)^2} \quad (1)$$

式中: n 表示网络聚类的序号; euc 表示欧氏距离; y 表示待分类节点的坐标; K_j 表示采用 K-means 算法形成的网络聚类中心。

对式(1)求解 K_j 的位置,由该聚类中心将覆盖范围内的节点接纳为簇成员节点后,即可完成区域划分过程。因此,对 SRE 进行微分:

$$\frac{dSRE}{dK_j} = \frac{d \sum_{j=1}^n \sum_{y \in K_j} \sqrt{euc(K_j - y)^2}}{dK_j} \quad (2)$$

对式(2)微分取 0,并化简可得:

$$\sum_{y \in K_j} (K_j - Y_j) = 0 \quad (3)$$

式中: Y_j 可由如下公式获得:

$$Y_j = \sum y \quad (4)$$

对式(3)进一步化简可得:

$$K_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1,2,\dots,n} y_j \quad (5)$$

由式(5)可知,聚类中心即为各簇成员节点的几何中心,因此在区域分割过程中,首先根据 K-means 算法确定网络聚类数量,将距离聚类中心距离最近的节点设置为簇头节点后,其余节点将自身数据传输至该簇头节点,至此完成了对网络区域的分割。

步骤 1) 根据 K-means 算法确定网络聚类数量 C_num , 计算各聚类的中心坐标,如图 2 所示。

步骤 2) 根据式(1)计算 SRE, 遍历网络节点并按 SRE 值将各节点纳入步骤 1) 所确定的聚类。

步骤 3) 网络节点遍历完毕后,再次根据 K-means 算法重新更新网络聚类数量 C_num , 转步骤 2) 继续更新聚类。

步骤 4) 当仅当 C_num 大小不再发生变化时,选取区域内能量最佳的节点作为簇头节点,并将剩余节点进行能量排序,选取能量次佳的节点作为备用簇头节点,至此区域分割结束。

上述分割过程中,节点能量可通过初始化过程遍历获取,实践中诸如车联网节点可通过节点电池与 Sink 节点

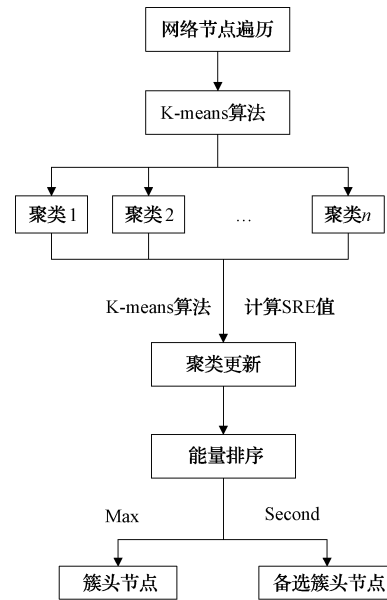


图 2 基于欧氏聚类机制的区域分割过程

周期性会话获取。由于簇头节点能够掌握聚类内部数据流并执行拓扑变动功能,且簇头节点承载了簇间传输中继效果,因此簇头选举过程也是区域分割过程。区域分割过程中需要对全部的簇头节点及其掌控的簇内节点予以初始化处理,因而通过欧氏聚类能够在快速遍历网络节点的前提下,迅速通过计算 SRE 值的方式对网络节点实现能量排序,从中筛选出性能最好的两个节点依次作为簇头节点和备选簇头节点,从而实现对区域的快速分割。此外,簇头节点失效时能够迅速在新区域形成之前实现对既往区域拓扑结构的有效维护,以降低网络失效概率,可提升网络运行质量。

2.2 基于匹配信任度的簇头更迭

若一个节点具有较高的剩余能量,且能够以较高的欧氏距离覆盖更多的节点,那么 Sink 节点对其信任程度将会更高,会以较高的概率将其设置为簇头节点。因此,完成基于欧氏聚类机制的区域分割后,可将由聚类中能量最优节点承担簇头节点的功能,能量次优节点承担簇头节点的备份。不过,由于移动传感网簇头节点需要承担更多的数据汇聚功能,单纯选取能量次佳节点作为备用簇头存在一定的服务不确定性。此外,备用簇头除需要满足能量要求外,也需要考虑与成员节点间的欧氏距离以及其覆盖范围内节点总数。备用簇头节点与其余成员节点间距离过长,则能量消耗亦将呈现加剧态势;备用簇头节点覆盖范围内节点总数过少,则说明该备用节点将存在较高概率难以同其余聚类内的簇头节点进行数据交互。因此,本文针对备用簇头节点选取问题,设计了基于匹配信任度的簇头更迭,其中,信任度权值(matching trust, MT)由备选簇头剩余能量、备选簇头与当前簇头的欧氏距离、备选簇头覆盖范围内节点总数 3 部分构成,如图 3 所示。

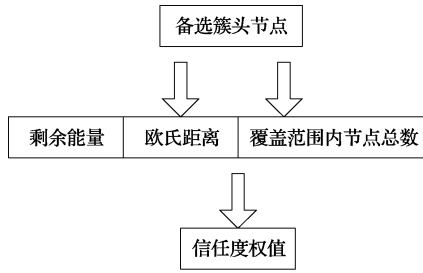


图3 信任度权值构成

考虑到备选簇头剩余能量、备选簇头与当前簇头的欧氏距离、备选簇头覆盖范围内节点总数3个因素,本文将这3个因素占据的比重均设置为1/3,因此构建等值评估公式,用以量化信任度权值 MT :

$$MT = \frac{1}{3}Elast + \frac{1}{3} \frac{1}{euc(CH)} + \frac{1}{3}Num(CH) \quad (6)$$

式中: $Elast$ 表示备选簇头节点剩余能量; $euc(CH)$ 表示备选簇头节点与当前簇头的欧氏距离; $Num(CH)$ 表示备选簇头传输链路节点总数。

1) 备选簇头节点剩余能量。表示在区域分割完成后,与簇头节点有数据交互关系的簇成员节点可用能量值。

备选簇头节点剩余能量作为信任度权值的重要构成因子之一,应给予重点关注。节点传输数据时能量消耗 E_{tran} 主要由如下模型所决定:

$$E_{tran} = E_{send}(B,ecu) + E_{recv}(B,ecu) \quad (7)$$

式中: B 表示备选簇头节点传输带宽; ecu 表示备选簇头节点与簇头之间的欧氏距离; $E_{send}(B,ecu)$ 表示备选簇头节点发送数据的能耗; $E_{recv}(B,ecu)$ 表示备选簇头节点接收数据的能耗。

$E_{send}(B,ecu)$ 可由如下模型唯一决定:

$$E_{send}(B,ecu) = BP + BP_0ecu^2, \quad ecu < R \quad (8)$$

$$E_{send}(B,ecu) = BP + BP_0ecu^4, \quad ecu \geq R \quad (9)$$

式中: P 表示备选簇头节点启动功率,该功率表示传输单位带宽所需要的启动功率; P_0 表示备选簇头节点发射功率; R 表示备选簇头节点最大传输距离。

备选簇头节点接收数据的能耗 $E_{recv}(B,ecu)$ 可由如下公式唯一决定:

$$E_{recv}(B,ecu) = BP \quad (10)$$

不妨设备选簇头节点初始能量为 E ,则备选簇头节点剩余能量 E_{last} 可由如下公式唯一决定:

$$E_{last} = E - E_{send}(B,ecu) - E_{recv}(B,ecu) \quad (11)$$

考虑到备选簇头节点应该以较高的能量承担网络传输任务,当剩余能量低于一定数值时将无法稳定传输网络数据,因此,本文规定备选簇头节点剩余能量小于初始能量 $2/3$ 时将被剔除出备选簇头序列。

由于备选簇头节点数量一般不会超过簇内节点总数,这是由于移动传感网在簇头失效时将不会主动将新节点纳入旧聚类。因此,本文算法判定某节点是否有资格被选

取为簇头节点的判定方式 ΔE 如下:

$$\Delta E = 1, \quad Elast \geq \frac{2}{3}E \quad (12)$$

$$\Delta E = 0, \quad Elast < \frac{2}{3}E \quad (13)$$

甄备用簇头节点时,当仅当某节点 ΔE 为1时,方有资格进入备用簇头节点的待选序列。

2) 备选簇头节点与当前簇头的欧氏距离。参照 K-means 算法可直接求得备选簇头节点与当前簇头的欧氏距离 $euc(CH)$,不过,由于备选簇头节点已经位于某聚类之中,因此欧氏距离 $euc(CH)$ 为:

$$euc(CH) = \sqrt{(x_0 - x_{ch})^2 + (y_0 - y_{ch})^2} \quad (14)$$

式中: (x_0, y_0) 表示备选簇头节点的坐标; (x_{ch}, y_{ch}) 表示当前簇头节点的坐标。

显然,备选簇头节点与当前簇头节点间欧氏距离越短,说明备选簇头节点与当前簇头节点的拓扑相似性也就越高,进行节点切换过程时发生链路抖动的概率也将越低。

3) 备选簇头传输链路节点总数。备选簇头节点传输链路总数表示该节点路由表覆盖范围,由于移动传感网节点均需要通过簇头节点进行数据传输,而某节点在被选成为簇头节点前,在簇内传输路径均为1条。因此,若备选簇头节点传输链路节点总数越多,说明该节点与其余聚类内簇头节点的交互程度也就越高,因而具有更高的价值被选为簇头节点。

综上所述,基于匹配信任度的簇头更迭过程如下:

步骤(1)按式(6)构建信任度权值。

步骤(2)对簇成员节点,逐个按式(12)检测其剩余能量值,当仅当该节点满足式(12)时方被选入备选簇头节点集合 Ω ,如图4所示。

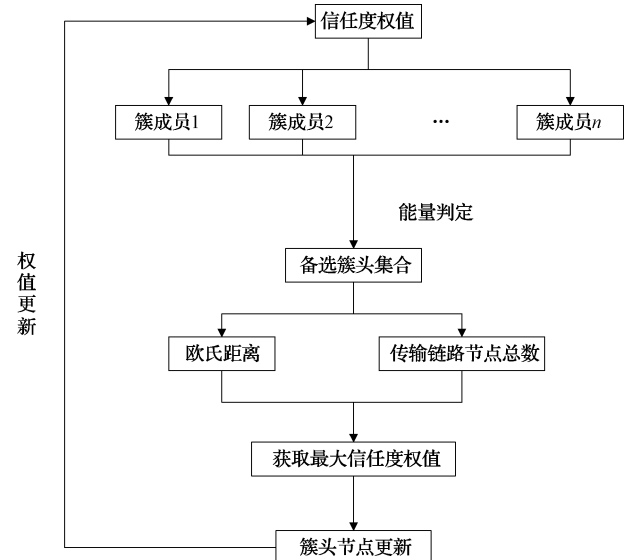


图4 基于匹配信任度的簇头更迭

步骤(3)从备选簇头节点集合 Ω 中,逐项获取备选簇

头节点与当前簇头的欧氏距离 $euc(CH)$ 及传输链路节点总数 $Num(CH)$, 代入式(6)计算信任度权值。

步骤(4)选取信任度权值最高的节点作为备选簇头, 流程结束。

采用信任度方式实现簇头更新时, 首先基于能量方式对备选簇头进行集合化处理, 结合欧氏距离和传输链路节点总数两个指标设计信任度权值, 选取权值最高的节点作为簇头节点。通过这种方式能够快速更新簇头节点, 进而降低网络节点故障发生概率。

3 仿真实验

为便于对比本文算法性能, 设置 NS2 作为仿真实验环境^[13]。仿真实验环境部署在 Win11 操作系统宿主主机平台, 内存 16 G, CPU 主频 1.024 GHZ。传感节点采取随机布撒模式, 移动速度可设定; 网络部署区域为矩形, 大小为 10 240 m×10 240 m; 其余仿真参数如表 1 所示。为突出所提算法的优势, 将常用的基于优化簇头选举的 WSN 分簇路由协议^[14](optimized cluster head election, OCHE)和基于多因素的能量优化分簇路由算法^[15](energy optimized clustering routing algorithm based on multi factors, EO-MF)作为对照组。测试指标选取为网络稳定运行时间、网络节点故障率、簇头节点生存率, 其仿真结果对比如表 2~4 所示。

表 1 仿真参数

参数	数值
网络部署区域	1 024 m×1 024 m
节点布撒模型	可移动, 速率不低于 1 m/s
节点通信方式	5 G
节点通信距离(最大)	20 m
信道环境	高斯/莱斯平稳噪声信道
节点个数	不低于 10/100 m ²
节点传输率	不低于 4.096 Mbps
网络运行时间	不低于 20 min

表 2 主要仿真结果对比(低速条件) (min)

仿真结果	本文算法	OCHE算法	EO-MF算法
网络稳定运行时间(最低)	99.7	88.1	92.4
网络稳定运行时间(最高)	694	387	446
簇头节点全部失效发生时间	189	162.7	141

表 3 主要仿真结果对比(高速条件) (min)

仿真结果	本文算法	OCHE算法	EO-MF算法
网络稳定运行时间(最低)	107	87	92
网络稳定运行时间(最高)	197	152	119
簇头节点全部失效发生时间	180	132	111

表 4 主要仿真结果对比(节点密度不同) (%)

仿真结果	本文算法	OCHE算法	EO-MF算法
高密度条件节点故障率	~8	~15	~25
低密度条件节点故障率	~6	~14	~18

3.1 网络稳定运行时间测试

图 5 所示分别为本文算法与 OCHE 算法及 EO-MF 算法网络稳定运行时间的测试结果。由图 5 可知, 本文算法具有更高的网络稳定运行时间。这是由于本文算法在网络区域分割过程中采用聚类方案, 反复针对形成的聚类进行优化筛选, 所形成的簇头一簇成员结构较为稳固。此外, 本文算法针对簇头节点更换过程中可能出现的传输瘫痪现象, 通过节点剩余能量、欧氏距离等多因素构建了信任度权值, 可兼顾能量、链路、节点稳定等多变量对网络传输抖动的抑制效果, 因而网络运行较为稳定, 具有较高的网络稳定运行时间, 较 OCHE 算法提升了 70% 以上, 较 EO-MF 算法也提升了 58% 以上。OCHE 算法主要通过节点初始能量和剩余能量、全网的初始能量和剩余能量、节点到基站的距离等因子进行簇头筛选, 未对簇头与备选簇头之间的网络距离因素进行评估, 因而所选簇头节点稳定性较差, 易导致网络出现大面积瘫痪现象。EO-MF 算法主要依据节点的相对剩余能量、相对中心度、相对密度选出最优簇头, 更换过程依赖于节点能耗单一指标, 被选节点有较高概率处于簇头节点覆盖范围之外, 因而容易发生数据频繁重传输现象, 导致网络稳定运行性能较低。

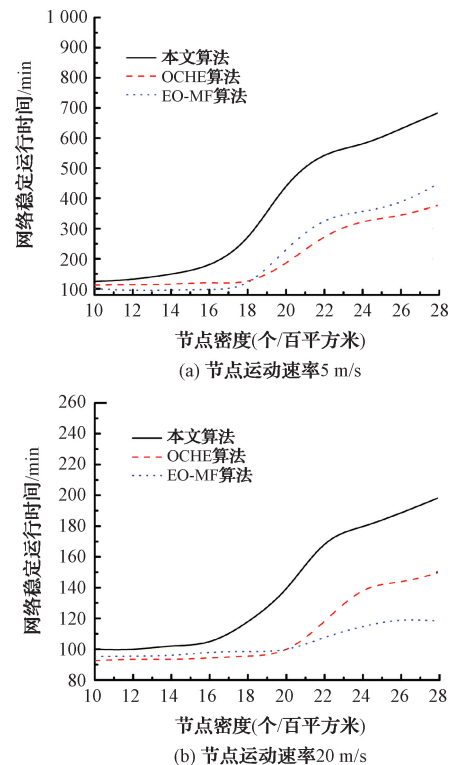


图 5 网络稳定运行时间测试结果

3.2 网络节点故障率测试

图6所示分别为本文算法与OCHE算法及EO-MF算法网络节点故障率性能测试结果。由图6可知,本文算法具有更低的网络节点故障率。这是由于本文算法针对传输过程中可能出现的网络瘫痪现象,采取K-means算法优选聚类中心并筛选具有能量最佳特点的节点作为簇头节点。此外,针对簇头节点失效现象,同时选取能量、链路、节点稳定等多变量构建信任度权值,可有效消除传输过程中出现的能量受限、链路抖动、簇头更换失败等因素,因而网络节点性能稳定,故障率亦较低,在节点密度较低时本文算法网络节点故障率低于10%,在节点密度较高时也保持在8%左右,优势明显。OCHE算法针对簇头节点可能发生的失效现象,仅采取调整备选节点集合Gnode值更新时间的方式进行周期管理,未通过调整链路及拓扑距离等方式进一步优化备选簇头节点质量,容易因簇头节点崩溃而导致网络节点出现大面积瘫痪,因而该算法的网络节点故障率要高于本文算法。EO-MF算法主要依托节点能耗与通信链路质量建立线性规划模型,虽然可在一定程度上改善簇头节点运行过程中出现的抖动现象,不过该算法主要依赖单一因素更换簇头节点,更换过程存在一定的盲目性,因而网络分区运行稳定性较差,使得该算法网络节点故障率较高。

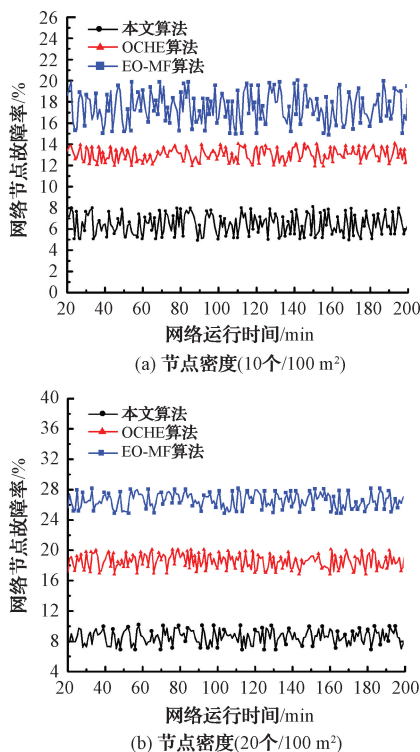


图6 网络节点故障率测试结果

3.3 簇头节点生存率测试

图7所示分别为本文算法与OCHE算法及EO-MF算法在簇头节点生存率性能测试结果。由图7可知,本文

算法在较长时间内均维持较高的簇头节点生存率。这是由于本文算法在区域分割伊始即通过聚类模型优选簇头节点,所选取簇头具有较高能量及拓扑分布质量。此外,本文算法鉴于单一因素进行簇头节点选举过程存在的不足,设计了基于能量、链路、节点稳定等多变量的信任度权值评估模式,可在较广范围内进一步选取较高质量的备选节点用以更换簇头,因而簇头节点生存质量较高,使得本文算法具有较高水平的簇头节点生存率。OCHE算法主要针对簇头数目的不稳定、稳定期和半数节点期过短、网络运作有效轮数少等问题,采取调整调整备选节点集合Gnode值更新时间的方式更新簇头节点,未对备选簇头节点进行优化筛选,因而所选取的簇头节点易因拓扑位置分布不合理而出现传输拥塞现象,使得节点生存质量不高,最终导致簇头节点生存率较低,簇头节点生存率将以较快速度收敛于0。EO-MF算法虽然采取线性规划模型兼顾节点能耗与通信链路,可在一定程度上减缓簇头节点出现崩溃的概率,然而由于该算法在簇头节点更新方面单纯依赖能量因素进行更换操作,难以同时兼顾诸如欧氏距离等制约因素,使得该算法选取的簇头节点性能不高,其生存率亦要低于本文算法。

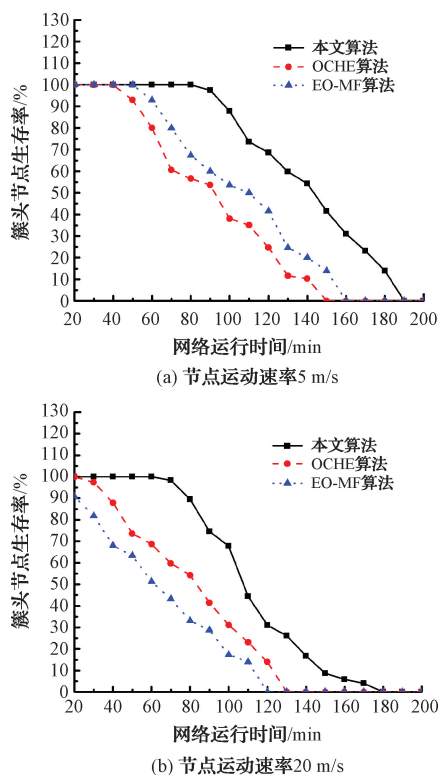


图7 簇头节点生存率测试

4 结论

为解决移动传感网部署过程中存在的区域分割性能较低、簇头节点存活质量较差及节点失效概率较高等不足,提出了一种基于匹配信任度机制的移动传感网簇头更

新算法。算法主要由基于欧氏聚类机制的区域分割和基于匹配信任度的簇头更迭两部分构成,可优化网络初始过程中的分割质量,筛选具有优越性能节点作为簇头节点,采取多维度参数甄选备用簇头节点,显著提高簇头节点存活质量,降低网络因簇头节点失效而导致的传输瘫痪现象。

下一步,将针对本文算法在立体传感网部署环境中难以进行拓扑预测的不足,拟通过二分图算法提高网络初始过程中的拓扑形成效率,增强算法对高拓扑漂移场景的适应能力,扩大算法在实际场合的应用范围。

参考文献

- [1] HAROUN F M E, DEROS S N M, ALKAHTANI A A, et al. Towards self-powered WSN: The design of ultra-low-power wireless sensor transmission unit based on indoor solar energy harvester [J]. *Electronics*, 2022, 11(13): 2077-2086.
- [2] VERMA V. An efficient wormhole detection and optimal path selection for secure data transmission in WSN environment [J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 121(4): 2927-2945.
- [3] 景荣,段云鹏.分区能量均衡的多移动机器人 WSN 孤岛结盟方法[J/OL]. *电子测量与仪器学报*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.TN.20231010.1313.020>.
- [4] 齐炫凯,仇超群,王子杰,等.圆弧螺旋型压电能量收集器的有限元模型研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 146-154.
- [5] 陈立万,曾蝶,赵尚飞,等.基于 EGWOEO 算法的三维无线传感网络覆盖优化[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(4): 25-34.
- [6] 马雪芬.基于节点相遇判断机制的移动延迟容忍传感网传输算法[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(1): 28-34.
- [7] 李文.基于蚁群粒子适应机制的移动传感网簇头生成算法[J]. *计算技术与自动化*, 2021, 40(2): 86-90.
- [8] XIE P H, LV M. An improved energy-low clustering hierarchy protocol based on ensemble algorithm[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2020, 32(7): 73-83.
- [9] KANELLOPOULOS N. A probability-based clustering algorithm with CH election for expanding WSN life span [J]. *International Journal of Electronics, Communications, and Measurement Engineering*, 2020, 9(1): 1-14.
- [10] SANTOSH V P, DESHPANDE R S. Clustering algorithm for deployment of independent heterogeneous wireless sensor network [J]. *Wireless Personal Communications: An International Journal*, 2020, 112(2): 1303-1317.
- [11] NAIM K. Energy efficient clustering algorithm for WSN with distributed structure [J]. *Emerging Materials Research*, 2020, 3(12): 1107-1114.
- [12] ZBIGNIEW L. Routing algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor network for broadcast transmission[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 101(1): 251-268.
- [13] AVT A, AIK B, LM, et al. Construction of one-way hash functions with increased key space using adaptive chaotic maps[J]. *Chaos, Solitons and Fractals: The Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena*, 2020, 21(59): 141-148.
- [14] 梁壮,李刚,雷丽婷.基于优化簇头选举的 WSN 分簇路由协议研究[J]. *温州大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 47-54.
- [15] 田纪尧,刘广钟. WSN 中基于多因素的能量优化分簇路由算法[J]. *计算机工程*, 2021, 46(1): 179-186.

作者简介

王恒,硕士,讲师,主要研究方向为图像处理、通信与信息系统。

郑笔耕(通信作者),硕士,副教授,主要研究方向为图像处理、通信与信息系统。

E-mail: 16826033@qq.com