

一种基于演化博弈的分簇协作路由算法

张 继¹, 张大方¹, 谢 鲲¹, 何施茗², 乔 宏¹

(1. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 长沙理工大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410014)

摘 要: 现有的分簇协作路由没有依据协作通信的特点选择簇头, 也没能根据簇头节点的服务能力均衡簇成员负载, 因而不能充分发挥协作通信能量高效的优势. 本文提出了一种基于演化博弈的分簇协作路由算法 CCREG. 算法首先定义虚节点剩余能量作为簇头确立的指标, 然后通过动态演化博弈为簇联盟问题建立模型. 簇成员节点选择不同簇头结成联盟, 可获得不同的收益. 收益由簇头的能力、簇成员节点个数等因素决定. 簇成员节点都可以根据自身得到的信息有限理性的选择簇结成联盟, 直到网络中所有节点改变簇联盟都不能获得更高的收益. 实验结果表明, 与协作多输入多输出路由算法 CMIMO 相比, CCREG 算法的网络生存周期在两个簇头情况下延长 14% 到 70%, 三个簇头情况下延长 5% 到 80%.

关键词: 协作路由; 演化博弈; 分簇路由; 网络生存周期

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2158-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.020

A Cluster Cooperative Routing Algorithm Based on Evolutionary Game

ZHANG Ji¹, ZHANG Da-fang¹, XIE Kun¹, HE Shi-ming², QIAO Hong¹

(1. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Computer and Communication Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Since the existing cluster cooperative routing algorithms select cluster heads without considering the characteristics of cooperative communication and don't balance the cluster member according to the capacity of cluster heads, they can't fully exploit the advantage of cooperative communication on saving energy consumption. A cluster cooperative routing algorithm based on evolutionary game (CCREG) is proposed. Firstly, the energy of virtual node is the metric of cluster head selection. Secondly, the model of cluster membership based on the evolutionary game is formulated, where member nodes select different clusters to join in leading to different payoffs which are decided by the capacity of the cluster head and the number of cluster members. Each member node selects a cluster to join in, till it can't achieve more payoffs by changing the cluster to join in. The experiment shows that CCREG can prompt the network lifetime by 14% ~ 70% with two cluster headers, by 5% ~ 80% with three cluster headers, compared with cooperative multi-input multi-output routing (CMIMO).

Key words: cooperative routing; the evolutionary game; cluster routing; network lifetime

1 引言

无线传感器网络中的节点 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 通常是由小电池供电, 为这些传感器充电或更换电池是十分困难的: (1) 传感器被大规模部署后, 重新收集回来充电需消耗大量的时间和费用; (2) 在某些环境中 (如灾难区域), 传感器部署环境的特殊性限制了节点的回收. 因此, 提高能量利用效率, 延长网络生存周期, 一直是无线传感器网络研究的一个重要

目标.

现有的无线传输大多数是基于单输入单输出 (Single Input and Single Output, SISO) 传输方式, 存在重传率较高、能耗较高等缺点. 为了解决这个问题, 研究者们提出了协作通信技术. 它利用无线广播的优势, 通过网络中其他用户的天线, 形成虚拟天线阵列来实现数据的发送或接收, 获得空间分集增益, 可以有效减少信息传送的能量开销, 延长网络生存周期.

协作路由^[1]是联合物理层协作通信技术和网络层

路由选择技术的跨层路由方案. 协作路由算法通过确立源节点到目的节点的传输路径、为路径上的节点选择最优的协作节点和设计功率分配算法, 来最大化提高协作传输带来的增益, 完成有效节省网络的能量消耗目标. 现有的大部分协作路由算法^[1-5]没有充分挖掘无线网络的节点分布、拓扑结构对协作路由的影响, 没有根据这些网络特征进行算法设计, 对网络能量消耗的降低有限. 虽然存在少数分布式协作路由算法^[3], 但是这些算法仍然存在路由效率低下, 可扩展性差的缺点.

分簇路由能充分利用网络节点分布和拓扑结构特征, 其优点已经在无线传感器网络和 Ad hoc 网络得到了广泛的证实. 将分簇结构和协作路由相结合, 设计分簇协作路由算法, 有利于提高无线网络的可靠性, 节省传输能量, 延长网络生命周期.

分簇协作路由需要解决的两个关键问题是如何选择簇头和如何确定簇成员. 现有的分簇协作路由^[6,7]一般根据单个节点的剩余能量确定主簇头, 然后为主簇头招募从簇头, 所招募的从簇头的能量无法保障; 由于从簇头的作用与主簇头同样重要, 因此它们无法选择出最优的簇头集. 进行簇成员确定时, 成员节点均选择信道最佳的簇头联盟, 无法根据簇头节点的服务能力均衡负载, 势必不能充分发挥协作通信能量高效的优势, 对网络生存周期提升有限.

为了均衡簇头节点的能量开销, 延长网络生存周期, 我们将演化博弈^[8]引入分簇协作路由中, 提出了一种基于演化博弈的分簇协作路由算法 (Cluster Cooperative Routing algorithm based on Evolutionary Game, CCREG). 算法定义虚节点剩余能量作为簇头确立的指标, 然后通过动态演化博弈为如何确定簇成员 (簇联盟) 问题建立模型. 剩余节点选择不同簇头结成联盟, 可获得不同的收益, 收益由簇头的能力、簇成员节点个数等因素决定. 每个节点都可以根据自身得到的信息有限理性的选择簇结成联盟, 直到网络中所有节点改变簇联盟都不能获得更高的收益. 簇与簇之间通信通过簇头的 VMIMO (Virtual Multi-Input Multi-Output) 协作传输进行通信, 在实际场景中可能由于簇节点数目不够, 达不到所设定需要的簇头节点数目, 簇间通信有可能退化为多对一 (Virtual Multi-Input Single-Output, VMISO) 或者一对多 (Virtual Single-Input Multi-Output, VSIMO), 甚至是一对一 (Single-Input Single-Output, SISO) 通信模式. 实验结果表明, 与协作多输入多输出路由算法 (Cooperative Multi-Input Multi-Output, CMIMO) 相比, CCREG 算法的网络生存周期在两个簇头情况下延长 14% 到 70%, 三个簇头情况下延长 5% 到 80%.

2 簇联盟演化博弈模型

我们用动态演化博弈为簇联盟问题建立模型. 簇联盟问题是指在簇头已经确定的基础上, 如何确定簇成员的问题. 一个簇头被确定时, 这个簇头通信范围所覆盖的区域就是这个簇的服务区. 服务区内的节点可以选择加入这个簇, 也就是与这个簇结成联盟, 加入后可获得一定的收益. 收益的多少由簇头的能力和簇所包含的成员节点个数等因素决定. 当节点处于多个簇的服务区时, 选择不同的簇进行联盟, 将获得不同的收益. 假设节点具有有限理性, 那么每个节点都会根据自身得到的信息尽可能选择收益大的簇结成联盟. 如果在相同服务区覆盖别的节点收益高于自己的收益, 节点可以选择收益更高的簇结成联盟. 簇联盟演化博弈的演化均衡解是: 网络中所有节点改变簇联盟都不能获得更高的收益.

本章中首先说明簇联盟演化博弈中的参与者、群组和策略, 然后设计收益函数和更新的复制动态方程, 最后分析演化博弈模型的均衡性.

2.1 参与者、群组和策略

参与者 (players): 参与者是未被选为簇头的剩余节点, 它们需要为自己选择一个簇进行联盟. 对于每一个簇的簇头, 都有一定的簇内通信半径. 我们把簇头通信半径所覆盖的区域称为该簇的服务区. 对于在簇服务区内的参与者, 它们都可以选择这个簇, 成为这个簇的成员节点. 反之, 对于某一个参与者, 它会被一个或者多个簇服务区所覆盖. 对于只被一个服务区覆盖的参与者, 它只有唯一簇头可以选择; 而被多个服务区覆盖的参与者, 就有多个选择权. 如图 1 中, 区域 a_1 中的节点只能选择簇 C_1 结成联盟, 所以这些节点并不参与演化博弈; 区域 a_2 中的参与者可选择簇 C_1 或 C_2 来获得更高的收益.

群组 (population): 被相同服务区覆盖的参与者都拥有相同的策略集, 我们称这些参与者所构成的集合称为群组. 如图 1, 区域 a_1 中的参与者是一个群组, 区域 a_2 中的参与者组成了另外一个群组.

策略 (strategy): 每个参与者选择不同簇头结成簇联盟称之为该参与者采取的策略. 如图 1 中, 区域 a_2 中参与者的策略集是 $\{C_1, C_2\}$, 区域 a_4 中参与者的策略

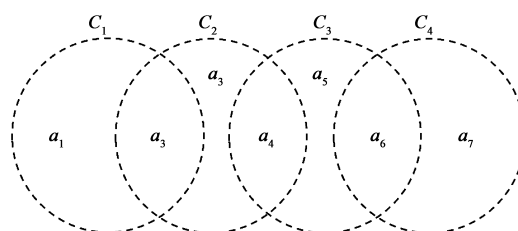


图1 簇联盟演化博弈模型

集是 $\{C_2, C_3\}$.

收益 (payoff): 收益是参与者获得的净效用 (net utility), 由所选择的簇头节点提供.

2.2 收益函数

为计算参与者的收益, 每个簇头提供一个收益函数, 这一函数与簇头剩余能量正相关, 与服务区内联盟节点数反相关. 当一个服务区比较拥挤时, 簇头给成员节点的收益较小, 促使成员节点离开此服务区, 以平衡各个簇之间的负载, 延长网络生存周期. 根据文献[9]中用于动态异构网络选择的收益函数, 我们设计区域 a 中的参与者选择簇 i 结成联盟的收益 π_i^a , 通过式(1)计算得到.

$$p_i^a = U_i(N_i) - P_i(N_i) \quad (1)$$

其中, 区域 a 是簇 i 的服务区的组成部分, N_i 是簇 i 的节点总数, $U_i(N_i)$ 是效用函数, $P_i(N_i)$ 是价格函数. 在以最大化网络生存周期为目的建立的演化博弈模型中, 效用函数 $U_i(N_i)$ 设定为簇 i 生存周期的估计值, 通过式(2)计算得到.

$$U_i(N_i) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{host}_i}} R_n}{N_i * R_{\text{intra}} * \bar{L}_{\text{intra}} + N_i * R_{\text{inter}} * \bar{L}_{\text{inter}}} \quad (2)$$

其中, N_{host_i} 表示簇 i 的簇头个数, $\sum_{n=1}^{N_{\text{host}_i}} R_n$ 表示簇头节点的剩余能量之和, N_i 表示簇 i 的节点总数, \bar{L}_{intra} 为簇内通信的平均链路能耗, R_{intra} 为单位时间内单个簇成员节点触发的簇内通信量, \bar{L}_{inter} 为簇间通信的平均链路能耗, R_{inter} 为单位时间内单个簇成员节点触发的簇间通信量.

簇 i 内的节点总数 N_i 是簇头的数目和所有区域内选择簇 i 的节点数目之和, 通过式(3)计算得到.

$$N_i = N_{\text{host}_i} + \sum_{a \in A_i} N^{(a)} x_i^{(a)} \quad (3)$$

其中, $N^{(a)}$ 表示区域 a 中节点的总个数, $x_i^{(a)}$ 表示区域 a 内选择簇 i 联盟的节点比率, A_i 为簇 i 的服务区.

当一个簇的簇头节点的能量耗尽时, 这个簇就死亡了, 所以所有选择簇 i 联盟的节点都有相同的收益函数 π_i , 定义为式(4).

$$p_i = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{host}_i}} R_n}{N_i * R_{\text{intra}} * \bar{L}_{\text{intra}} + N_i * R_{\text{inter}} * \bar{L}_{\text{inter}}} - P_i(N_i) \quad (4)$$

因此我们可以得出不同区域如 a_m 和 a_l 选择簇 i 联盟的收益函数均相等, 可表示式(5).

$$\pi_i^{a_m} = \pi_i^{a_l} = \pi_i \quad (5)$$

以图 1 为例, a_2 和 a_4 区域选择簇 C_2 的效用相等,

$$\pi_{C_2}^{a_2} = \pi_{C_2}^{a_4} = \pi_{C_2} \quad (6)$$

根据式(3), 簇 C_2 内的节点总数 N_{C_2} 由下式计算得到, 代入式(4)中, 可以计算得到 a_2 和 a_4 区域选择簇 C_2

的效用值.

$$N_{C_2} = N_{\text{host}_C_2} + N^{(a_2)} + N^{(a_4)} x_{C_2}^{(a_2)} + N^{(a_4)} x_{C_2}^{(a_4)} \quad (7)$$

同样的方法可以计算 π_{C_1} , π_{C_3} 和 π_{C_4} .

2.3 复制动态公式

本文把参与者选择不同簇联盟 (即采用不同策略) 的过程设计为演化博弈. 这个博弈是反复的, 在某个时间段里, 参与者观察同群组中其他节点的收益, 在下一个时间段这个参与者可以改变自己的策略以获得更高的收益. 在这段时间里, 参与者策略的变化率由复制动态方程决定, 可以表示为:

$$\dot{x}_i^{(a)} = \sigma x_i^{(a)} (\pi_i^{(a)} - \bar{\pi}^{(a)}(x)) \quad (8)$$

其中, $x_i^{(a)}$ 表示区域 a 中选择簇 i 联盟变化率, $\sigma > 0$ 是控制参与者观察收益和改变策略时间间隔的参数, $x_i^{(a)}$ 表示当前时刻区域 a 中选择簇 i 联盟的节点比率, $\pi_i^{(a)}$ 表示当前时刻区域 a 中选择簇 i 联盟的收益, $\bar{\pi}^{(a)}(x)$ 表示的是区域 a 中参与者的平均收益, 其计算方法如式(9).

$$\bar{\pi}^{(a)}(x) = \sum_i x_i^{(a)} \pi_i^{(a)} \quad (9)$$

3 基于演化博弈的分簇协作路由算法设计

3.1 算法概述

基于演化博弈的分簇协作路由算法 CCREG 是一个分布式的自适应分簇路由算法. CCREG 算法以节省无线传感网络传输能量, 延长网络生存周期为目的. 它采用动态簇构建算法把网络划分成 N 个簇, 每个簇选定一个主簇头和 $k-1$ 个从簇头. 簇头节点集合构成 VMIMO 天线阵列与其他簇通过协作通信传输数据. 簇构建算法决定了分簇网络的基础特性, 对簇内通信与簇间通信的开销起决定性的作用. 簇内通信和簇间协作通信作为分簇协作路由的组成部分, 我们将沿用文献[7]提出的方法.

簇构建算法分为邻居发现, 簇头确立和簇联盟三个步骤. 邻居发现收集周围邻居状态信息, 以此作为确定簇头的依据. 与其他簇头确立算法不同, 我们以虚节点能量作为确立簇头的标准. CCREG 算法最大的贡献是簇联盟方案.

3.2 邻居发现

在邻居发现中, 节点通过 Hello 消息进行信息交互. Hello 消息包括节点自身的 ID、剩余能量、邻居表和虚节点剩余能量.

虚节点剩余能量是我们设计的一个新的指标, 将作为簇头选择的标准. 每个节点在邻居表中选择剩余能量最高的 $k-1$ 个邻居节点 (k 为算法设置的簇头个数) 作为该节点的备选伙伴. 将该节点 u 与其备选伙伴 $\{v_{k-1}, v_{k-2}, \dots, v_1\}$ 组成的节点集定义成虚节点 u' . 虚节点 u' 的剩余能量等于节点集合的平均剩余能量 ($R_u +$

$$R_{v,k-1} + \dots + R_{v,1})/k.$$

与其他无线路由协议发现邻居的方法一样,当节点 v 成功申请到信道,它就以一个固定的功率发送一个 Hello 消息给它的邻居,其中 Hello 消息包含节点 v 的 ID、剩余能量、邻居表和虚节点 v' 的剩余能量. 收到这一消息的节点 u 检查自己的邻居表是否含有节点 v 的项. 如果没有,则将节点 v 及其相关信息添加到邻居表中; 否则,找到节点 v 的项,比较表中信息,如不同则更新.

3.3 簇头确立

在本文的簇协作路由模型中,簇头包括主簇头和从簇头,且两者在数据聚合和转发中同等重要. 另外,簇头节点比成员节点要完成更多的工作(比如数据汇合,转发和分发等),因而簇头节点的剩余能量是一个簇生存的关键. 基于以上两个原因,我们把虚节点剩余能量作为簇头确立的指标.

以虚节点剩余能量为指标的簇头确立算法步骤如下:

步骤 1 所有节点都被初始化成“待定”状态;

步骤 2 网络中的每个“待定”节点 u 均与其“待定”邻居节点比较对应的虚节点剩余能量. 若虚节点 u' 的剩余能量比所有“待定”状态下邻居节点所对应的虚节点剩余能量都高,则确立节点 u 为“主簇头”,节点 u 的备选伙伴确立为“从簇头”;

步骤 3 主簇头和从簇头广播簇头信息给各自的邻居节点,收到消息的邻居节点把自己的状态设定为“成员”;

步骤 4 对于剩下的“待定”节点,重复簇头确立方法的步骤 2 和步骤 3,直到确定所有节点的状态.

3.4 簇联盟

簇联盟的主要工作是为每一个“成员”状态的节点确定一个簇联盟,这一步也是整个算法的核心.

簇联盟算法如算法 1 中所示. 每个“成员”节点开始时都随机选择一个簇联盟. 初始化完成后,进入动态演化博弈阶段,每个独立的节点都通过博弈寻找收益更高的簇联盟. 簇头节点通过式(4)计算出簇内成员节点可得到的收益,并广播给所有成员节点. 节点不但能收到各自本身的收益,也能观察到同区域内其他节点的收益. 通过式(9)计算能得到该区域的平均收益,如果节点收益小于平均收益,则进行策略调整随机选择收益高于平均收益的簇联盟. 所有成员节点做出策略调整后,簇头节点重新计算收益,成员节点再进行策略调整,直到达到演化博弈均衡点.

算法 1 簇联盟算法

// 初始化

1. 所有节点随机选择簇联盟.

Loop

2. 簇头节点通过式(4)计算成员节点的收益 $\pi_i(\pi_i^{(a)} = \pi_i)$, 并广播给成员节点.

3. for $u \in$ 成员节点

// 以下步骤,每个成员节点同步进行

4. 节点 u 观察同区域内其他节点的收益,并通过式(9) $\bar{\pi}^{(a)}(x)$
 $= \sum_i x_i^{(a)} \pi_i^{(a)}$ 计算平均收益.

5. if $\pi_i^{(a)} < \bar{\pi}^{(a)}(x)$ then

6. if $\text{rand}() < (\bar{\pi}^{(a)} - \pi_i^{(a)}) / (\bar{\pi}^{(a)})$ then

7. 成员节点随机选择簇 j 联盟,其中 $j \neq i, \pi_j^{(a)} > \pi_i^{(a)}$

8. end if

9. end if

10. end for

11. end Loop

4 仿真实验

我们在 Matlab 中通过仿真实验来说明所提算法的性能. 首先仿真演化博弈过程来分析演化博弈的均衡点,然后实验比较算法的性能,获得的实验结果表明我们算法能有效提高网络生存周期.

4.1 演化均衡性分析

我们分析成员节点簇联盟的演化博弈过程. 在图 1 所示的网络中,每个簇均有 3 个簇头节点,即 $N_{\text{host}_C1}, N_{\text{host}_C2}, N_{\text{host}_C3}$ 和 N_{host_C4} 的值都为 3. 服务区 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 和 a_7 包含的节点个数依次为 10, 20, 10, 20, 10, 20 和 20. 区域 a_1, a_3, a_5 和 a_7 中的节点均只能加入一个簇,不参与演化博弈. 演化博弈的参与者是 a_2, a_4 和 a_6 中的节点. 其博弈过程如图 2 所示. 坐标轴 $x_1^{(a_2)}$ 表示区域 a_2 中选择簇 C_1 联盟节点的比率; 坐标轴 $x_2^{(a_4)}$ 表示区域 a_4 中选择簇 C_2 联盟节点的比率; 坐标轴 $x_3^{(a_6)}$ 表示区域 a_6 中选择簇 C_3 联盟节点的比率. 图 2 中圆圈表示初始值,菱形表示最终结果,曲线描述了博弈过程中 $x_1^{(a_2)}, x_2^{(a_4)}$ 和 $x_3^{(a_6)}$ 变化过程. 不论参与者初始状态如何设置,随着时间的推移,参与者经过多次博弈之后, $(x_1^{(a_2)}, x_2^{(a_4)}, x_3^{(a_6)})$ 无限趋向于一个稳定的比率 (0.88, 0.76, 0.63), 为演化博弈的均衡点.

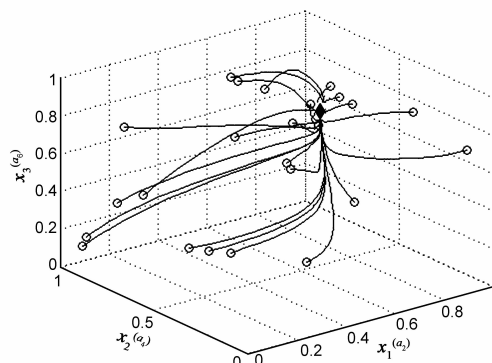


图2 a_2, a_4 和 a_6 区域节点的博弈过程

从实验中可以得出,不管参与者选择各个簇联盟的初始化比率是多少,都能通过演化博弈达到均衡点.

4.2 性能分析

4.2.1 实验配置

我们在不同簇头节点个数下,将 CCREG 与协作 MIMO 路由算法 CMIMO^[7] 进行比较.

实验中数据将按轮进行传输.定义在一轮的数据传输过程中,所有成员节点按顺序随机选择一个目的节点进行一个单位的数据传输.所有节点传输完成后,一轮传输结束,进入下一轮的传输.比较的指标为不同路由选择方式下获得的网络生存周期.网络生存周期为网络开始到第一个节点能量耗尽之间的数据传输的轮数.为了比较网络的生存周期,需要根据功率分配方式^[10] 确定数据传输时所消耗的能量.实验中,我们采用文献[2]定义能量模型.采用 VSISO 和 VSIMO 通信模型的能量开销为式(10)所示.

$$L_{st} = \hat{P}_t = \frac{\text{SNR}_{\min} P_\eta}{[\min(\alpha_{s_1}, \alpha_{s_2}, \dots, \alpha_{s_t})]^2}, \forall t \in T \quad (10)$$

其中, s 为发送节点, T 为接收节点集, L_{st} 为 s 发送给节点集 T 所需要的能量, P_η 是接收端噪声的方差, SNR_{\min} 为最小信噪比大于门限值(当接收端的信噪比大于门限值时,接收端就能正确解码), α_{s_t} 是节点 s 到节点 t 的功率损耗因子.

采用 VMISO 和 VMIMO 协作通信模型的能量开销为式(11)、(12)所示.

$$L_{st} = \hat{P}_t = \sum_{s=1}^n |\omega_s|^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_s |\omega_s|^2 \\ \text{s. t.} \quad & |\omega_s|^2 \leq P_{\gamma_s}, \forall s \in S \\ & \frac{|\sum_{s=1}^n \omega_s \alpha_{s_t}|^2}{P_\eta} \geq \text{SNR}_{\min}, \forall t \in T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{节点 } s \text{ 直接传输一个单位数据所需要的能量为} \\ e_s = (D/4000)^2 \quad (13)$$

其中, D 表示发送节点与接收节点间的距离.

实验场景为一定区域内随机分布节点,节点 s 和 t 之间的功率损耗因子 α_{s_t} 与它们的距离的平方成反比.簇内通信的最大通信半径为 160m,簇间通信半径设定为簇内通信的 2.5 倍.每个节点都可以调整发送功率以调整通信半径.节点的初始能量为 1.实验中,节点按轮进行数据传输,直至第一个节点能量耗尽网络死亡.在相同的网络拓扑与节点初始状态下,顺序执行 CMIMO 和 CCREG 两种路由方式来获得的生存周期.我们在不同节点密度,网络大小以及簇内通信半径条件下评估算法性能.每组试验中,我们都会对比两个和三个簇头

下两种路由方式的性能.

4.2.2 节点密度

在固定大小的区域(320m * 320m)内随机分布 40, 80, 120, 160, 200 和 240 个节点,对比两个和三个簇头下两种路由算法的网络生存周期.在这组实验中簇内通信半径为 100m,簇间通信半径为 250m.

图 3 是在不同节点密度网络中的网络生存周期对比图,纵坐标是网络生存周期,即网络死亡前已完成的数据传输的轮数;横坐标是节点密度,即固定区域内随机分布的节点个数.随着网络密度的增加,网络中数据传输量增加,网络生存周期随之降低.但不管在哪种密度下,CCREG 算法的网络生存周期都比 CMIMO 算法长.随着网络密度的增加,CCREG3 算法的网络生存周期比 CMIMO3 算法分别延长 36%、24%、14%、25%、72% 和 70%;使用 CCREG2 算法的网络生存周期比 CMIMO2 算法分别延长 5%、40%、23%、59%、48% 和 80%.在高密度网络中,CCREG 算法的性能更加优秀,这是因为有更多的节点能参加博弈.在 240 节点的网络中,CCREG 算法的网络生存周期比两个簇头和三个簇头的 CMIMO 算法分别延长 70% 和 80%.

4.2.3 网络大小

在不同网络区域(240m * 240m, 320m * 320m, 400m * 400m 和 480m * 480m 区域)内随机分布 160 个节点,簇内通信半径为 100m,簇间通信半径为 250m.

图 4 是不同网络大小的网络生存周期对比图,纵坐标是网络生存周期,横坐标为网络大小.随着网络区域扩大,网络被划分为更多的簇,需要部署更多的簇头节点,网络生存周期相应延长.两个簇头的情况下,CCREG2 算法比 CMIMO2 算法的生命周期分别延长 49%、59%、55% 和 53%.三个簇头的情况下,CCREG3 算法比 CMIMO3 算法的生命周期分别延长 14%、25%、34% 和 40%.

4.2.4 簇内通信半径

在固定大小的区域(320m * 320m)内随机分布 160 个节点,设定簇间通信半径是簇内通信半径的 2.5 倍,簇内通信半径从 60m 增加到 160m.

图 5 是不同的簇内通信半径下的网络生存周期图,纵坐标是网络生存周期,横坐标是簇内通信半径.网络生存周期随着簇内通信半径增加而减少.这是因为簇内通信半径增加,能形成的簇的个数减少,使得为网络服务的簇头个数减少,从而缩短了网络生存周期.随着通信半径增加,CCREG2 算法比 CMIMO2 算法的生命周期分别延长 77%、64%、59%、33%、69% 和 11%.CCREG3 算法比 CMIMO3 算法的生命周期分别延长 41%、37%、25%、23%、14% 和 20%.

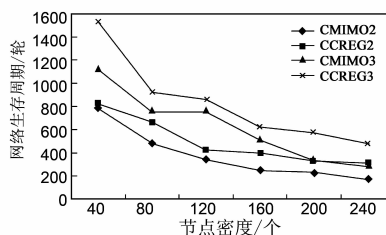


图3 不同节点密度下的网络生存周期对比图

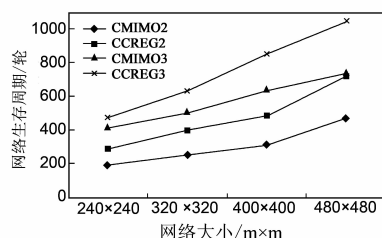


图4 不同网络大小下的网络生存周期对比图

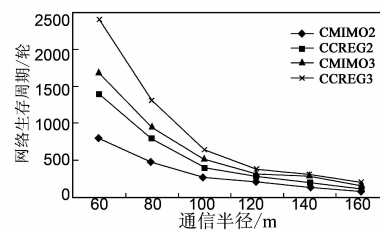


图5 不同的簇内通信半径下的网络生存周期对比图

5 结论

针对分簇协作路由的簇头选择和成员节点确定问题,本文提出了一种基于演化博弈的分簇协作路由算法 CCREG. 算法定义虚节点剩余能量作为簇头确立的指标,然后通过动态演化博弈为簇联盟问题建立模型. 剩余节点选择不同簇头结成联盟,可获得不同的收益,收益由簇头的能力、簇成员节点个数等因素决定. 每个节点都可以根据自身得到的信息有限理性的选择簇结成联盟,直到网络中所有节点改变簇联盟都不能获得更高的收益. 实验结果表明,与 CMIMO 相比,CCREG 算法的网络生存周期在两个簇头情况下延长 14% 到 70%,三个簇头情况下延长 5% 到 80%.

参考文献

- [1] Khandani A E, Abounadi J, Modiano E, et al. Cooperative routing in static wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(11): 1-23.
 - [2] LI F, WU K, LIPPMAN A. Energy-efficient cooperative routing in multi-hop wireless ad hoc networks [A]. IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference [C]. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006. 215-222.
 - [3] IBRAHIM A S, HAN Z, LIU KJR. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3930-3941.
 - [4] ELHAWARY M, HAAS Z. Energy-efficient protocol for cooperative networks [J]. IEEE/ACM Trans Netw, 2011, 19(2): 561-574.
 - [5] ZHANG J, ZHANG D, Xie K, et al. A cooperative routing algorithm for maximizing network lifetime [A]. Advances in Wireless Sensor Networks [C]. Huangshan, China Springer Berlin Heidelberg, 2013. 665-675.
 - [6] 谢鲲, 孙家奇, 龚闯, 文吉刚. 无线多跳网络分簇协作路由算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 210-215.
- XIE Kun, SUN Jia-qi, GONG Chuang, WEN Ji-gang. A cluster cooperative routing algorithm in wireless multi-hop

networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(2): 210-215. (in Chinese)

- [7] Krunz M, Siam M Z, Nguyen D N. Clustering and power management for virtual MIMO communications in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(5): 1571-1587.
 - [8] SMITH J M. Evolution and the Theory of Games [M]. New York: Cambridge University Press, 1982.
 - [9] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: An evolutionary game approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008-2017.
 - [10] 王俊波, 曹哲, 陈明, 焦媛. 无线并行放大转发中继传输中基于信噪比的功率分配研究 [J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1663-1667.
- WANG Jun-bo, CAO Zhe, CHEN Ming, JIAO Yuan. SNR-Based power allocation in wireless parallel amplify-and-forward relay transmissions [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1663-1667. (in Chinese)

作者简介



张 继 男, 1984 年生, 湖南长沙人, 湖南大学博士生. 主要研究方向为协作路由、无线传感网.
E-mail: tosky984@163.com

张大方 男, 1959 年生, 上海人, 湖南大学教授、博士生导师. 主要研究方向为可信系统与网络、软件容错.
E-mail: dfzhang@hnu.edu.cn

谢 鲲 女, 1978 年生, 湖南黔阳人, 湖南大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为分布式计算、协作路由.
E-mail: xiekun@hnu.edu.cn

何施茗 女, 1986 年生, 湖南本州人, 博士, 长沙理工大学讲师. 主要研究方向为机会路由.
E-mail: heshiming_hsm@163.com

乔 宏 男, 1984 年生, 湖南岳阳人, 湖南大学博士生. 主要研究方向为无线 Mesh 网、协作路由.
E-mail: hqiao@hnu.edu.cn