

无线 Mesh 网络中基于演化博弈的 抗振荡信道分配策略

乐光学^{1,2}, 李明明^{1,2,3}, 丁 辉^{1,2}, 刘建生², 骆 丹^{1,2}, 马伯林²

(1. 嘉兴学院数理与信息工程学院, 浙江嘉兴 314000; 2. 江西理工大学理学院, 江西赣州 431000; 3. 嘉兴职业技术学院, 浙江嘉兴 314000)

摘 要: 为抑制无线 Mesh 网络中的信道振荡和提升网络效用, 综合分析路由端和客户端信道振荡产生的因素. 引入演化博弈理论, 联合改进的果蝇优化算法提出基于 ESS-PFOA (Evolutionary Stable Status-Promoted Fruit-Flies Optimal Algorithm) 算法的分布式信道分配策略. 实验分析发现当信道振荡宽容因子 $\beta \leq 0.5$ 时网络呈同构特征, $\beta > 0.5$ 时网络向异构转化, $\beta \geq 0.9$ 时网络呈异构特征; 网络效用和信道振荡抑制率与信道振荡宽容因子 β 紧密相关. 仿真结果表明, ESS-PFOA 算法的信道振荡率从 0.44 下降至 0.08, 在异构网络环境下其网络收益和信道振荡抑制率明显占优, 能有效提高网络效用.

关键词: 无线 Mesh 网络; 多信道多射频; 演化博弈; 信道振荡; 网络效用

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)01-0176-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.026

The Anti-Channel Oscillation Channel Assignment Scheme Based on Evolutionary Game in Wireless Mesh Network

YUE Guang-xue^{1,2}, LI Ming-ming^{1,2,3}, DING Hui^{1,2}, LIU Jian-sheng², LUO Dan^{1,2}, MA Bo-lin²

(1. College of Mathematics Physics and Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314000, China

2. School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 431000, China;

3. Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing, Zhejiang 314000, China)

Abstract: What caused channel oscillation among face-to route and face-to client have been analyzed. In order to reduce channel oscillation and promote throughput of channel assignment scheme, evolutionary game has been imported to joint with promoted fruit-flies optimal algorithm, a distributed channel assignment scheme based on ESS-PFOA algorithm has been proposed in wireless mesh network. The simulations reflect that network utility and channel oscillation ratio have been influenced by channel oscillation tolerance factor, and network topology presents homogeneous when $\beta \leq 0.5$, else it turns to be heterogeneous when $\beta > 0.5$ and $\beta \geq 0.9$. The result reflects that channel oscillation ratio has been fallen from 0.44 to 0.08, channel oscillation inhibition ratio has been restrained, and network utility has been improved in heterogeneous network.

Key words: wireless mesh network; multi-radio multi-channel; evolutionary game; channel oscillation; network utility

1 引言

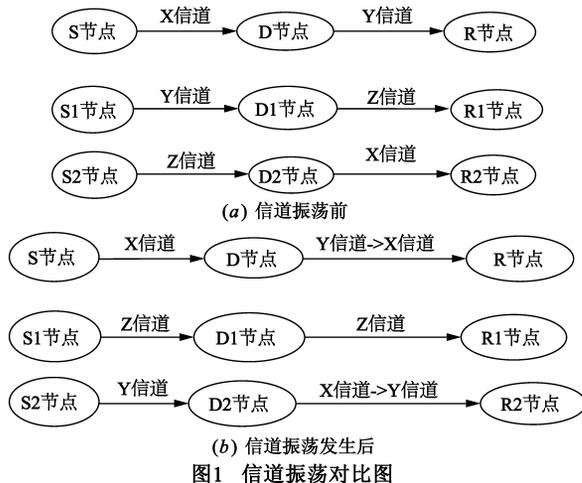
无线 Mesh 网络的信道连接依赖问题频繁发生, 在通信链路上形成信道空闲、拥塞状态, 如何解决信道连接依赖问题是多信道多射频无线 Mesh 网络信道分配方案的关键^[1-3]. 信道连接依赖在多冲突域内表征为信道振荡^[4], 发生信道振荡的通信链路, 存在流量分配不均、网络负载失衡等问题, 严重影响网络稳定性. 如何

有效规避信道振荡发生率、稳定提升网络吞吐量, 成为无线 Mesh 网络信道分配策略的研究热点之一.

大量研究报告表明, 无线 Mesh 网络信道分配是 NP 问题^[5-7]. 以提升网络吞吐量^[8-10]、降低链路干扰率^[11]、优化信道利用率^[12]等方面为研究侧重点, 实现信道分配策略的优化. 文献[1]研究多冲突域内节点之间频繁切换信道引发的信道振荡问题, 提出了基于局部自适应的分布式信道分配方案. 文献[13]提出适用于 Ad Hoc 网络

的集中式信道分配策略,并通过仿真实验验证信道振荡的存在性^[13];文献[14]在分析如何提升无线 Mesh 网络有效聚合吞吐量时,发现通信域内存在信道振荡问题^[14].将信道振荡发生率作为一种新的网络性能评价指标,以信道振荡发生作为研究入口,设计有利于规避信道振荡并实现信道重分配的优化策略.文献[15]提出了联合协议与接口分配策略相结合的信道分配优化方案(Protocol and Communicational Interface-Channel to Utility-Channel Assignment, PCU-CA),指出信道振荡对 Ad Hoc 网络信道分配结果的危害性,以给定的信道振荡概率因子 $p=0.4$ 作为评价指标,该算法仅适用于 Ad Hoc 网络.文献[16]提出了基于 C-Hyacinth(C-HYA)算法的增强型贪婪信道分配策略,以访问节点的优先级作为分配序列,依次分配信道.由于策略仅处理单冲突域内信道连接依赖问题,算法尚未计算信道振荡发生率.

如图 1 所示,若信道正常分配,多冲突域内源节点 S 通过信道 X 向目的节点 D 转发数据包,对应的目的节点 D 正通过信道 Y 与其目的节点 R 通信,一旦节点 D 切换信道 X 至信道 Y,将引起信道 X 通信拥塞、信道 Y 无数据包转发呈现空闲状态.并且在下一个冲突域范围内 D-R 通信链路上出现数据拥塞.同理 S1-R1、S2-R2 均产生类似的信道振荡问题^[4].



在信道分配优化方面,国内外研究人员作了大量工作,并取得了突出成果.针对不同网络拓扑,尝试降低数据包的转发率以提升网络吞吐量^[8-10].在异构网络中,处理边界节点的流量拥塞控制问题,提出了基于预知拥塞控制的数学模型^[11].在多层异构无线网络中,针对射频接口能量流失问题,提出满足所有链路需求的最小化射频接口流量损失模型^[12].在多媒体异构 Mesh 网络中,建立多媒体异构 Mesh 网络的服务质量控制机制,提出了双层规划模型的蚁群优化路由算法^[17].为了实现完全的避免信道干扰,

提出了域内中心调度的接口分域信道分配(Interfaced-Clustered Channel Assignment, ICCA)方案,算法有效提升了网络吞吐量^[18].将博弈理论应用于多信道多射频无线 Mesh 网络信道分配策略,分析自适应节点的行为以及如何有效提升网络吞吐量^[19-24].由于节点位置和方向不定,无法计算网络拓扑上的信道振荡发生率,文献[25]将演化博弈引入无线传感器网络中,仅针对节点信誉机制分析不同的演化稳定均衡解.在异构网络环境下,文献[26,27]提出了基于非合作博弈的信道资源分配接入模型,算法分析了自私节点的聚集度和网络拓扑,仿真结果表明算法有效提升了网络吞吐量.

本文将针对异构无线 Mesh 网络网关节点和用户节点展开信道分配^[13]方案的优化,联合演化博弈理论和改进的果蝇优化算法,设计一种有效的抗振荡信道分配策略(Evolutionary Stable Status-Promoted Fruit-flies Optimal Algorithm, ESS-PFOA).首先,建立节点的演化博弈模型,以节点所在干扰域的干扰率与节点有效聚合吞吐率的比值作为演化稳定均衡解的方程.继而,分析不同演化稳定均衡状态下的网络收益.第三,评价不同信道振荡宽容因子下服务节点的网络收益,计算对应的信道振荡发生率.最后,与已有抗振荡的信道分配策略 PCU-CA、C-HYA 算法对比,综合评价抗振荡信道分配策略的有效性、稳定性.

2 问题提出及模型的建立

2.1 信道振荡问题描述

PCU-CA 算法采用线性模型处理给定节点之间的信道振荡问题^[15],但是线性模型无法处理离散节点的分布^[28].C-HYA 算法采用集中式的信道分配策略^[16],仅处理单冲突域内信道连接依赖问题,且仅适用于稳定的网络拓扑^[23].基于 ESS-FPOA 算法针对离散节点采用非线性数学模型,为自适应的无线 Mesh 网络设计分布式信道分配策略,实现业务稳定传输.

假设多信道多射频无线 Mesh 网络的每一个节点具有两个可用射频接口,如图 2(a)所示其路由端节点的特点是自上而下的数据转发方式,易造成通信链路信息冗余;如图 2(b)所示其用户端节点具有随机性和交互性,节点之间存在竞争行为.当节点 B 接收到来自不同冲突域的节点 A 和节点 D 的数据包,需要选择切换信道,出现信道选择停留状态,该状态是信道振荡发生的明显特征^[4].

2.2 演化博弈模型

针对自适应的多冲突域无线 Mesh 网络拓扑结构,建立动态演化博弈模型.模型设计思路为:

(1)在多冲突域内存在通信信道集 C ,服务节点集 V ,

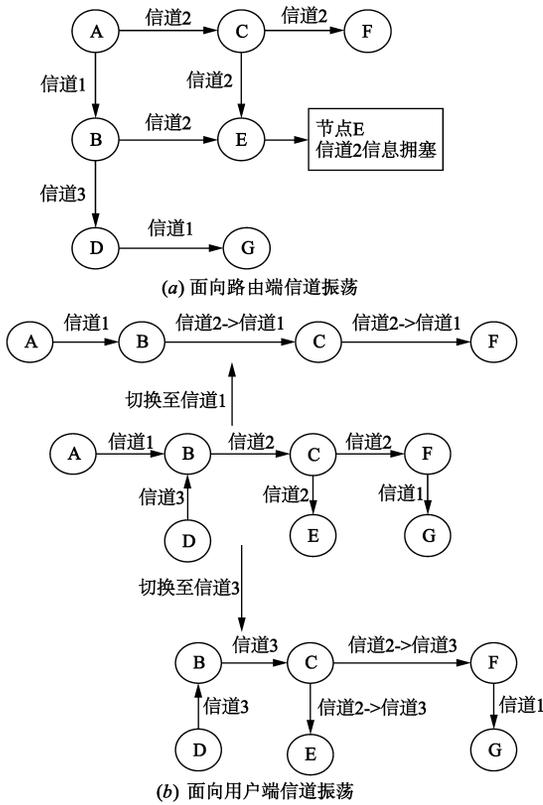


图2 两种不同的信道振荡类型

以及服务节点的信道接口集 K , 则通信过程中节点最大有效聚合吞吐量集合为 $B(C)$. 得到节点的信道分配策略为 $S(K, C, V)$. 如果节点在通信链路上通过射频接口成功通信, 则其网络效用函数表示为 $U(S(K, C, V), B(C))$.

(2) 由于服务节点群体数量受节点的在线时间、节点自组织、信道干扰等因素影响, 将信道分配过程中服务节点数量的变化理解为服务节点抑制信道振荡发生的演化过程. 节点在时刻 T 选择策略 S 的概率为 P , 则其混合策略为 P .

(3) 根据节点的信道分配策略 S 和混合策略 P 建立演化博弈模型, 得到演化博弈稳定均衡解. 根据演化稳定均衡解, 分析不同的演化稳定均衡状态, 选择最优状态. 并计算最优网络收益 $U(S, B, P)$.

通信节点 $v_i \in V$ 使用信道 $c_j \in C$ 的接口数量 $k_{v_i, c_j} \in K$. 第 i 个节点使用第 j 个信道成功通信策略 $S_i = \{k_{i,1}, \dots, k_{i,j}, \dots, k_{i,p}\}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, P, k_{i,j} = \{0, 1\}$. 节点成功通信 $k_{i,j} = 1$, 否则 $k_{i,j} = 0$. 节点在 $t \in [0, T]$ 时刻选择 S_i 的概率为 $P_{i,j}$, 可构建在 t 时刻所有节点的混合策略描述模型:

$$\begin{cases} P_{i,j} = \{P_1^{(i)}(t), P_2^{(i)}(t), \dots, P_j^{(i)}(t)\} \\ \theta_j^{(i)}(t) = P_j^{(i)}(t) * \theta(t) \end{cases} \quad (1)$$

设 $P_j^{(i)}(t) \geq 0, i \in [1, N], j \in [1, P], \theta(t)$ 表示节点

的数量, $\theta_j^{(i)}(t)$ 表示在 t 时刻成功通信的节点数量. 多冲突域内节点具有随机性和可重复性, 其分布状态服从泊松分布^[26]. 对比分析单冲突域节点的状态函数, 增加节点的冲突域个数、节点的干扰距离等参数, 构建节点的状态描述模型:

$$P_{i,j} = \frac{k_{i,j}}{\sum_i k_{i,j}} * \left(1 - \left(\frac{1}{N}\right)^{\lfloor \frac{M}{d} \rfloor}\right) \quad (2)$$

式(2)定义了多冲突域内节点成功通信的概率, 即只允许第 i 个节点的射频接口利用第 j 个信道通信. 参考文献[2], 给定 M 为冲突域的个数, d 表示通信节点之间的距离. $\lfloor \frac{M}{d} \rfloor$ 表示节点干扰域内的干扰度, 即当前节点可能干扰其后 $\lfloor \frac{M}{d} \rfloor$ 个节点转发数据包. 成功通信的节点在 t 时刻使用策略 S_i 的网络收益为:

$$U(S_i, B_j) = K * \frac{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N S_i * P_{i,j}}{\lfloor \frac{M}{d} \rfloor} * \frac{B_j}{n_{i,j}} \quad (3)$$

其中 K 表示干扰范围内节点的跳数, $n_{i,j}$ 表示节点在干扰范围内节点与信道通信的射频数量, $\frac{B_j}{n_{i,j}}$ 表示节点上有效聚合吞吐量随 $n_{i,j}$ 变化的递减函数.

在 $t+1$ 时刻所有节点的混合策略描述模型可表征为:

$$\begin{cases} \theta_j^{(i)}(t+1) = P_j^{(i)}(t) U(S_i, B_j) \\ P_j^{(i)}(t+1) = \frac{\theta_j^{(i)}(t+1)}{\theta(t+1)} \\ = \frac{P_j^{(i)}(t) \theta(t) U(S_i, B_j)}{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N P_j^{(i)}(t) \theta(t) U(S_i, B_j)} \end{cases} \quad (4)$$

联合式(3)(4)求解节点的演化动态方程:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} = \frac{P_j^{(i)}(t+1) - P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} \\ = \frac{P_j^{(i)}(t) U(S_i, B_j) - \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N P_j^{(i)}(t) \theta(t) U(S_i, B_j)}{P_j^{(i)}(t) \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N P_j^{(i)}(t) \theta(t) U(S_i, B_j)} \\ = \frac{U(S_i, B_j) - \bar{U}(S_i, B_j)}{U(S_i, B_j)} \\ \bar{U}(S_i, B_j) = B_j * \frac{k_{i,j}}{\sum_{i \in N} k_{i,j}} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示随时间变化,节点状态的演化率与节点网络效用的演化率相同,其中 B 表示节点上行链路上的带宽常量平均值, $\bar{U}(S_i, B_j)$ 表示节点当前干扰域内所有成功通信的节点之间的平均带宽值. 求解式(5)极限,则节点动态演化方程转化为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} = \frac{1}{P_j^{(i)}(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P_j^{(i)}(t + \Delta t) - P_j^{(i)}(t)}{\Delta t} \right) \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P_j^{(i)}(t + \Delta t) - P_j^{(i)}(t)}{\Delta t} \right) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6)$$

联合求解式(5)(6),当满足式(7)时,达到网络稳定均衡状态,其中 Λ 为节点的干扰阈值.

$$\Lambda = \left\lfloor \frac{M}{d} \right\rfloor \leq \left(\frac{K * \left(\sum_{i \in N} k_{i,j} \right)^2}{k_{i,j} * n_{i,j}} \right) \quad (7)$$

3 抗振荡信道分配策略

为有效规避信道振荡问题并提升稳定网络收益,将达到演化稳定均衡状态 (Evolutionary Stable Status, ESS) 的节点收益进行聚类优化,实现多信道多射频无线 Mesh 网络的抗振荡信道分配策略. 引入果蝇演化算法 (Fruit-Flies Optimal Algorithm, FOA)^[29], 该算法原型为果蝇通过嗅觉寻找最优路径. 算法保证适应度函数的快速收敛、缩短运行时间、方便科研验证^[29]. 针对异构网络节点的行为特征,改进 FOA 算法. 分析基于 ESS-

$$\begin{cases} U(S_i, B_j)^* = K * \left(\varepsilon * \frac{\sum_i S_i^*}{\left\lfloor \frac{M}{d} \right\rfloor} * \frac{B_j}{n_{i,j}} \left(\sum_i P_{i,j}^*(t) - P_{i,j}(t) \right) + \frac{\sum_i S_i}{\left\lfloor \frac{M}{d} \right\rfloor} * \frac{B_j}{n_{i,j}} * P_{i,j}^*(t) \right) \\ U(S_i, B_j) = \frac{K \sum_i S_i^*}{\left\lfloor \frac{M}{d} \right\rfloor} * \frac{B_j}{n_{i,j}} * P_{i,j}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$\because P_j^{(i)}(t)^* \geq P_j^{(i)}(t), S_i^* \geq S_i$, 即式(9)满足条件(1)、(2)的信道分配策略为演化稳定均衡策略.

$$\therefore U(S_i)^* - U(S_i) \geq 0, U(S_i)^* \geq U(S_i).$$

根据定理 1 的约束条件,求解式(4)的一阶导数:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} \right)' &= \frac{U(S_i, B_j) - \bar{U}(S_i, B_j)}{U(S_i, B_j)} \\ &= \frac{K \sum_i k_{i,j} B_j}{\left\lfloor \frac{M}{d} \right\rfloor n_{i,j}} - B_{i,j} * \frac{k_{i,j}}{\sum_{i \in N} k_{i,j}} \end{aligned} \quad (10)$$

当 $\left(\frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} \right)' = 0$ 时,达到演化稳定均衡状态,得到其

PFOA 算法的信道分配策略可行性、收敛性以及算法的时间复杂度.

3.1 策略分析

定理 1 考虑不完全信息博弈的无线 Mesh 网络环境,保证节点的顺序理性和可信程度弱一致,顺序理性主要保证节点之间不会出现某一节点单方面偏离. 因而有限理性节点通信时能够达到演化稳定均衡状态条件如下:

$$(1) \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N k_{i,j} \leq P$$

(2) 存在任意参数 $\varepsilon \in (0, 1)$, 在稳定均衡状态下,节点以稳定均衡策略 $P_j^{(i)}(t)^* \geq P_j^{(i)}(t)$ 选择稳定策略 $S_i^* \geq S_i$, 其稳定网络效用期望满足 $U(S_i, B_j)^* \geq U(S_i, B_j)$. 其中:

$$\begin{cases} U(S_i, B_j)^* = \varepsilon U(S_i, B_j) + (1 - \varepsilon) U(S_i, B_j)^* \\ U(S_i, B_j) = \varepsilon U(S_i, B_j)^* + (1 - \varepsilon) U(S_i, B_j) \end{cases} \quad (8)$$

证明 为确保网络拓扑稳定转发数据包,节点通信信道总数 P 至少与节点的接口总数等值,所有节点的射频接口成功通信的数量之和小于等于通信节点的接口总数,体现动态无线 Mesh 网络节点的移动交互能力^[20],故(1)可证. 在动态信道分配中,处于稳定均衡状态的节点为全局最优状态^[22],采用反证法证明(2):

最大化网络效用^[9],即得到演化稳定状态时的条件:

$$\frac{\Lambda}{K} = \frac{n_{i,j} * k_{i,j}}{\left(\sum_{i \in N} k_{i,j} \right)^2} \quad (11)$$

式(11)表示多个冲突域内路由端、客户端节点在其干扰域内的干扰率等同于其当前的节点的网络效用随节点成功通信接口数量的变化率.

当 $\frac{\Lambda}{K} > \frac{n_{i,j} * k_{i,j}}{\left(\sum_{i \in N} k_{i,j} \right)^2}$ 时,即 $\left(\frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)} \right)' > 0$,即当前网

络有效聚合吞吐量小于平均网络效用,网络之间的干扰率大于网络有效聚合吞吐量的变化率,当前稳定状态为网络拓扑受信道振荡干扰,网络收益无法提高.

当 $\frac{\Delta}{K} \leq \frac{n_{i,j} * k_{i,j}}{(\sum_{i \in N} k_{i,j})^2}$ 时, 即 $\left(\frac{\Delta P_j^{(i)}(t)}{P_j^{(i)}(t)}\right)' \leq 0$, 即当前网

络有效聚合吞吐量的变化率与网络当前干扰率相关, 网络拓扑将随节点的度数、数量而演化. 当前网络有效聚合吞吐量变化率趋于网络之间的干扰率, 当前网络效用高于平均网络效用值, 当前稳定状态表明网络拓扑干扰率较低, 网络拓扑趋于稳定, 节点网络效用有所提升.

综合分析上述演化稳定均衡状态, 当 $\frac{\Delta}{K} \leq$

$\frac{n_{i,j} * k_{i,j}}{(\sum_{i \in N} k_{i,j})^2}$, 信道分配策略逐渐达到稳定状态, 网络干扰

率对节点的网络效用影响较小, 网络拓扑逐渐趋于稳定均衡.

3.2 算法描述

基于 FOA 算法中果蝇根据气味浓度分辨食物的位置产生的路径择优方法, 改进 FOA 算法用来计算信道振荡发生率. 在无线 Mesh 网络拓扑中以节点的干扰阈值来判断信道振荡的发生, 根据节点聚集度来分析信道振荡发生率, 核心算法步骤如下:

Step1 初始化网络拓扑, 随机分配通信节点的群体位置, 其中 $x(i), y(i)$ 表示节点的方向与相互之间的距离, $T(i)$ 表示节点与源节点之间的迭代距离, $\text{Fit}(i)$ 为适应度函数的判断函数, 判断节点是否收益. 此时, 计算复杂度为 $O(\log n^2)$.

$$\begin{cases} T(i) = \exp((x^2(i) + y^2(i))) \\ \text{Fit}(i) = T(i) \end{cases} \quad (12)$$

Step2 计算节点的最大化网络效用. 首先初始化网络数据, 计算节点成功通信的概率; 其次计算成功通信节点的网络效用值, 分析演化稳定状态, 并录入最大的网络效用值于 $U_{\max}()$ 表中, 其中 $U_{\max}((S_i, B_j))$ 为信道振荡宽容因子影响下的网络收益. 此时, 计算复杂度为 $O(n * \log(n))$.

$$\begin{cases} \text{Fitness}(i) = \text{Fit}(i) * U_{\max}() \\ U_{\max}((S_i, B_j)) = \arg \max(1 + \beta * \log(U(S_i, B_j))) \end{cases} \quad (13)$$

Step3 重复博弈, 记录转折点位置, 计算转折点发生的比率, 计算信道振荡发生率. 此时, 计算复杂度为 $O(n^2)$.

综合 step1 ~ step3, 得到算法的计算复杂度为 $O(n^2)$.

4 仿真实验与结果分析

参考文献[14, 16, 30] 仿真环境参数值, 给定表 1 所示实验参数, 并通过 16 组实验验证 ESS-PFOA 算法

在不同网络信道振荡宽容因子条件下的网络效用收敛结果并与 PCU-CA、C-HYA 算法对比, 分析不同算法在两种实验带宽区间的网络稳定性.

4.1 网络有效性

实验 1 是三种抗振荡信道分配策略的网络收益对比分析情况, 以效用函数为对比指标. 文献[31]给出了恶意竞争节点的网络收益宽容因子 β 值, 调整宽容因子取值以详细描述网络节点收益, 信道振荡宽容因子取值如表 2.

为了验证 ESS-PFOA 算法的有效性, 实验中增加 β 取值区间和密度. 为缩小篇幅, 取宽容因子 $\beta = 0.5, \beta = 0.9$ 的网络收益结果如图 3, $\beta = 0.01 \sim 0.9$ 之间网络收益数据如表 3.

表 1 仿真实验参数

实验编号	网络拓扑	节点干扰阈值	信道数量	跳数	网络最大带宽值	博弈次数
实验 1	5 * 5	2	12	5	54Mbps	100
实验 2	5 * 5	3	12	5	5.4 ~ 54Mbps	100
实验 3	5 * 5	3	12	5	6Mbps	100

表 2 信道振荡宽容因子 β 取值

文献[27] β 取值	ESS-PFOA β 取值
-	0.01
0.1	0.1
-	0.2
0.5	0.5
0.7	0.7
0.9	0.9

实验结果表明:

(1) PCU-CA、C-HYA 算法均属于静态无线网络的集中式信道分配策略, 对于动态无线 Mesh 网络环境适用性较小. 对比其它算法在不同宽容因子 β 条件下的网络收益, C-HYA 算法虽然网络吞吐量偏低, 却具有较为平稳的网络收益.

(2) 当 $\beta < 0.50$, ESS-PFOA 算法网络收益的波动率较其它算法小, C-HYA 算法的网络收益小于 PCU-CA、ESS-PFOA 算法. 当 $\beta \geq 0.50$, ESS-PFOA 算法网络收益较其它算法稳定, ESS-PFOA 算法的网络收益高于其它算法.

(3) 当 $\beta = 0.90$ 时 ESS-PFOA 算法具有最大网络有效聚合吞吐量, 其网络效用和稳定性整体占优.

(4) 在 100 次迭代过程中, 当 $\beta = 0.50$ 时, 三种算法的首次收敛时间分别为 24、22、22; 当 $\beta = 0.90$ 时, 三种算法的首次收敛时间分别为 16、16、14, ESS-PFOA 算法收敛时间略优于其它两种算法.

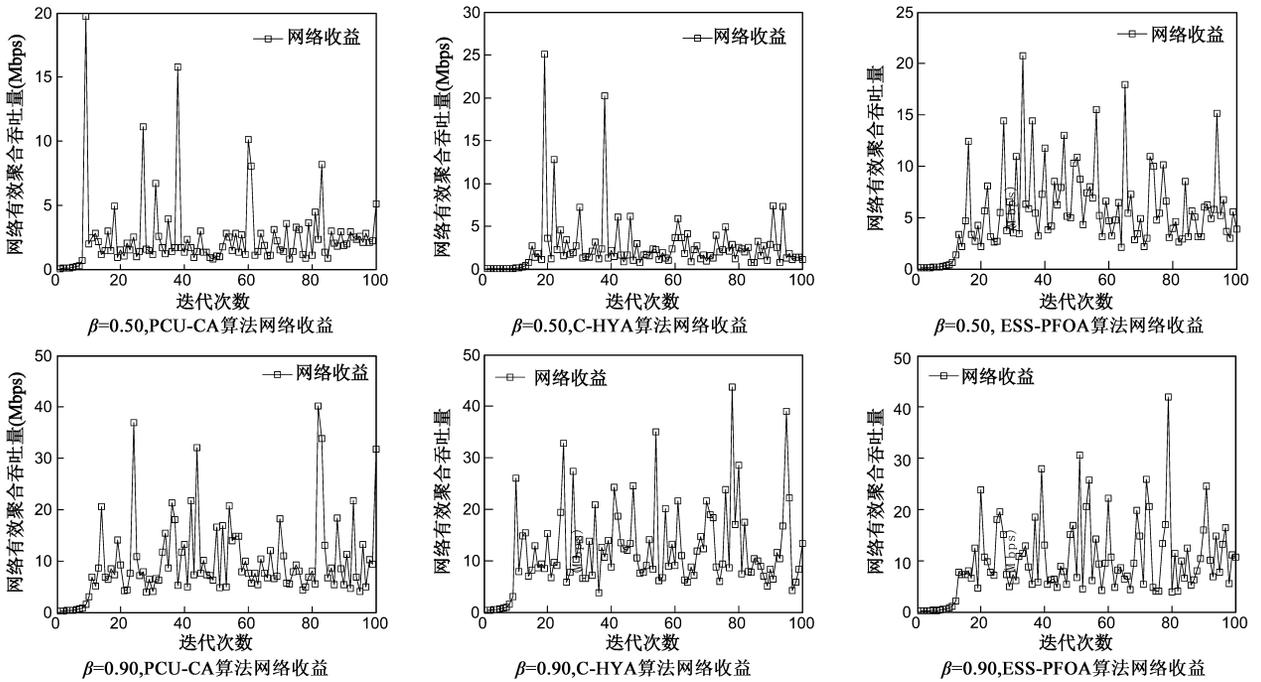


图3 $\beta=0.50$ 、 $\beta=0.90$ 时PCU-CA、C-HYA、ESS-PFOA算法的网络收益情况

表3 信道振荡宽容因子 β 下对不同抗振荡信道分配策略的最大网络收益和平均网络收益

抗振荡信道分配策略网络收益 (kbps) 宽容因子 β 取值	PCU-CA	C-HYA	ESS-PFOA
$\beta=0.01$	-	-	2.7649/0.4481
$\beta=0.10$	10.5947/2.1374	11.4966/2.1589	13.1401/2.2006
$\beta=0.20$	-	-	17.9901/4.9811
$\beta=0.50$	197152/2.4965	20.2065/2.8415	20.7573/5.5321
$\beta=0.70$	25.5425/3.8501	26.2060/4.1332	33.0284/6.5326
$\beta=0.90$	40.1737/97261	43.7566/10.9884	43.8350/11.4695

表3 结果表明:

(1) 随宽容因子 β 值的增加,算法的网络收益 ESS-PFOA > PCU-CA > C-HYA.

(2) 增加宽容因子 β 从 0.01 到 0.1 之间、0.1 到 0.2 之间变化,ESS-PFOA 算法的平均网络收益增加了约 4.9 倍、2.3 倍,突出了节点的网络收益稳定提升的增长率.

4.2 信道振荡影响率对比分析

通过仿真节点的聚集度,分析当前网络拓扑的信道振荡发生情况.根据图3网络所示仿真结果观测信道振荡发生率(Channel Oscillation Ratio, COR)如图4,信道振荡发生率数据结果如表4.

实验结果表明:

(1) 节点聚集度与通信链路上信道振荡发生率成

正比,异构网络的聚集度明显低于同构网络.

表4 不同宽容因子 β 下的信道振荡发生率

不同信道分配策略的信道振荡发生率 宽容因子 β 取值	PCU-CA	C-HYA	ESS-PFOA
$\beta=0.01$	-	-	11/25 = 0.44
$\beta=0.10$	8/25 = 0.32	10/25 = 0.40	6/25 = 0.24
$\beta=0.20$	-	-	5/25 = 0.20
$\beta=0.50$	7/25 = 0.28	6/25 = 0.24	5/25 = 0.20
$\beta=0.70$	6/25 = 0.24	5/25 = 0.20	4/25 = 0.16
$\beta=0.90$	4/25 = 0.16	4/25 = 0.16	2/25 = 0.08

(2) 当宽容因子 $\beta \leq 0.50$ 时,网络同构特征明显,PCU-CA、C-HYA、ESS-PFOA 算法三种算法网络效用和信道振荡抑制率基本处于同一水平;当宽容因子 $\beta > 0.50$ 时,网络由同构特征向异构特征转化;当 $\beta \geq 0.90$ 时,网络异构特征明显. ESS-PFOA 算法的网络效用和信道振荡抑制率明显优于 PCU-CA、C-HYA 算法.

(3) 当 $\beta=0.90$ 时,PCU-CA、C-HYA 算法由于节点之间协同服务质量降低,聚集度下降,因而通信链路上信道振荡发生率下降.

表4 数据结果表明:

(1) 在整个宽容因子 β 的取值区间内,链路上的信道振荡发生率由 0.44 下降至 0.08,提高了信道分配成功几率,提升了网络稳定性.

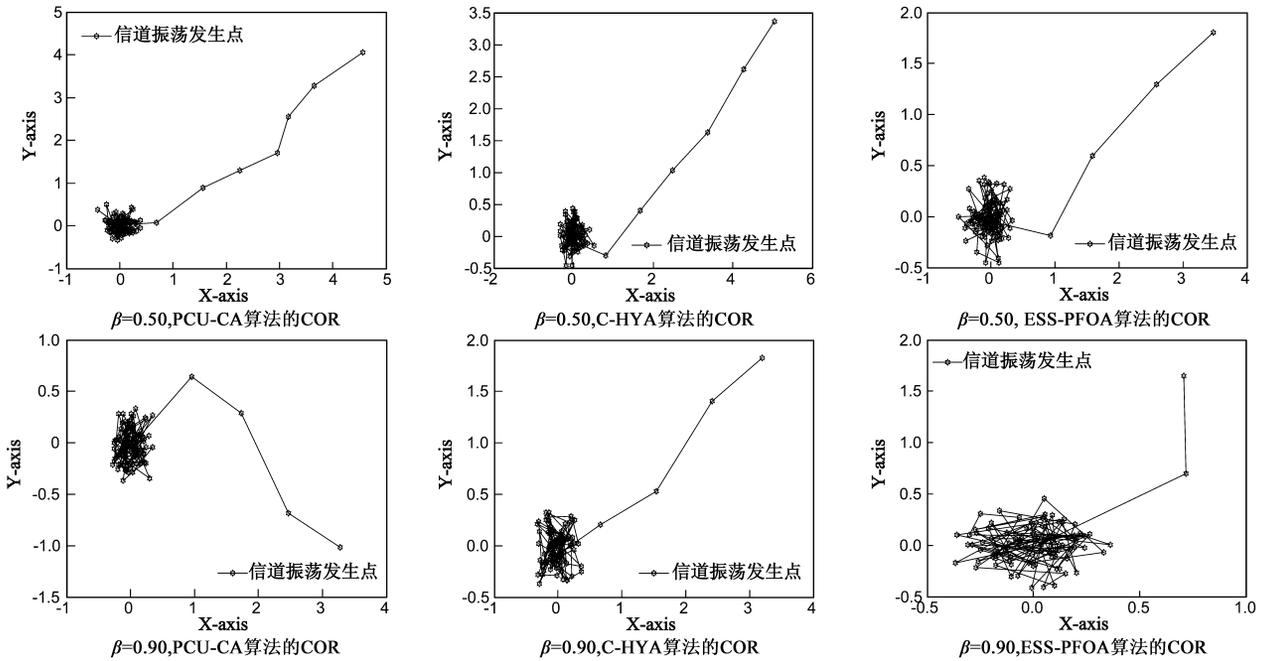


图4 $\beta=0.50$ 、 $\beta=0.90$ 时PCU-CA、C-HYA、ESS-PFOA算法的COR

(2) 在宽容因子 β 取值区间内,ESS-PFOA 算法的信道振荡发生率均小于其它两种算法,当 $\beta = 0.90$ 时,ESS-PFOA 算法具有最小信道振荡发生率.

4.3 网络稳定性分析

实验2 根据 $B_c \in [0, 5.4]$ 和 $B_c \in [5.4, 54]$ 两种上行链路给定的网络带宽值区间,验证宽容因子对网络稳定性的影响,其中 β 仿真结果如图5,其数据结果如表5所示.

实验结果表明:

(1)PCU-CA 算法适合应用于带宽区间 $B_c \in [0, 5.4]$ 的通信链路,具有稳定的网络收益. 在带宽区间 $B_c \in [5.4, 54]$,只有当 $\beta = 0.9$ 时存在唯一稳定的网络收益.

(2)C-HYA 算法在 $B_c \in [0, 5.4]$ 、 $B_c \in [5.4, 54]$ 中,因为剔除了发生信道振荡的节点,可通信节点数量减少、网络收益逐渐降低,但是其网络收益稳定收敛.

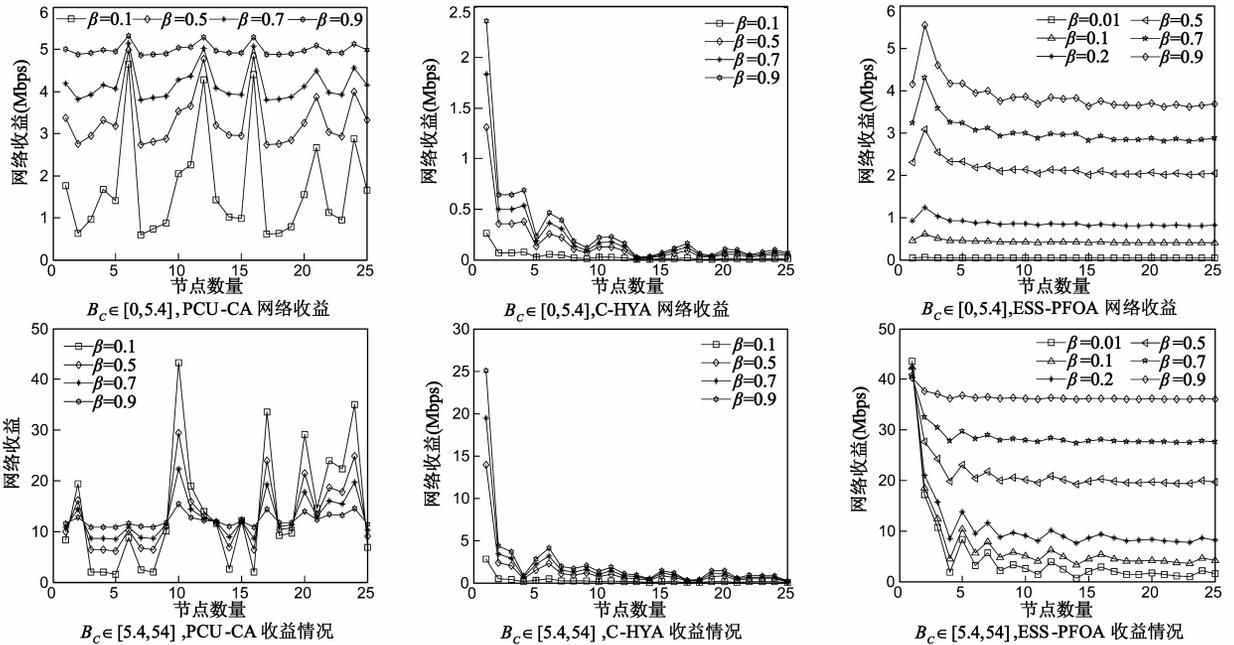


图5 PCU-CA、C-HYA、ESS-PFOA算法受宽容因子 β 作用的网络收益

表 5 各算法在不同网络带宽时的稳定网络收益结果

算法 (β 值)	PCU-CA		C-HYA		ESS-PFOA	
	$B_c \in [0, 5.4]$	$B_c \in [5.4, 54]$	$B_c \in [0, 5.4]$	$B_c \in [5.4, 54]$	$B_c \in [0, 5.4]$	$B_c \in [5.4, 54]$
$\beta = 0.01$	-	-	-	-	0.0606	4.3289
$\beta = 0.10$	3.1311	32.8061	0.2623	2.8399	0.6057	6.7172
$\beta = 0.20$	-	-	-	-	1.2113	10.5042
$\beta = 0.50$	4.1395	23.5589	1.3114	14.1994	3.0283	21.0651
$\beta = 0.70$	4.6437	18.9354	1.8359	198792	4.2396	28.5391
$\beta = 0.90$	5.1479	4.4664	2.3605	25.5589	5.4009	36.4130

(3) PCU-CA、C-HYA 算法均为集中式的抗振荡信道分配策略. 集合 PCU-CA、C-HYA 算法的优点, ESS-PFOA 算法在带宽区间 $B_c \in [0, 5.4]$ 和 $B_c \in [5.4, 54]$ 均具有较高网络收益; 当 $\beta \geq 0.5$ 时 ESS-PFOA 算法在可容忍范围内保留贪婪节点, 通信链路上网络收益稳定收敛; 当 $\beta \leq 0.2$ 时宽容因子太小, 贪婪节点行为明显, 网络收益存在波动, 但是 ESS-PFOA 算法的稳定网络收益整体上较 PCU-CA、C-HYA 算法占优.

表 5 结果表明:

(1) ESS-PFOA 算法在带宽区间 $B_c \in [0, 5.4]$ 和带宽区间 $B_c \in [5.4, 54]$ 的网络收益均优于 PCU-CA、C-HYA 算法的网络收益.

(2) PCU-CA 算法在 $B_c \in [5.4, 54]$ 带宽区间的网络收益随宽容因子 β 值的增加而变小; C-HYA 算法在 $B_c \in [5.4, 54]$ 带宽区间的网络收益随宽容因子 β 值的增加而稳定下降并收敛, 但是其网络收益较小; 当 $\beta = 0.9$ 时, ESS-PFOA 算法 $B_c \in [5.4, 54]$ 带宽具有最高的稳定均衡网络收益.

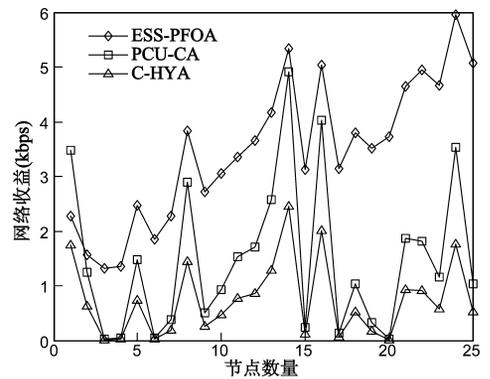
实验 3 为基于演化博弈的抗振荡信道分配策略与其它经典抗振荡的信道分配策略对比结果. 仿真结果如图 6.

实验 3 结果表明:

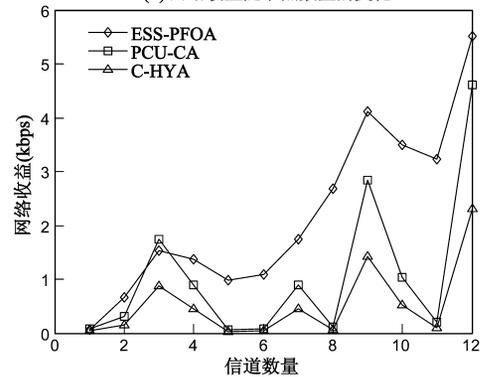
(1) 在节点数量分别为 1、8、12 时, PCU-CA 算法占优, C-HYA 算法的网络收益随节点数量变化稳定变化.

(2) 当网络节点数量大于 12 时, ESS-PFOA 算法的抗振荡信道分配策略在提升网络有效聚合吞吐量方面较其它算法明显占优, 宽容因子 β 取值与网络有效聚合吞吐量的增加成正比, 网络最大带宽取值范围对网络稳定性影响不明显.

(3) 分布式的抗振荡信道分配策略比集中式的抗振荡信道分配策略在网络收益方面明显占优, 当网络宽容因子 β 取值为 0.9 时, 基于演化博弈的抗振荡信道分配策略的网络收益和信道振荡抑制率优于 PCU-CA、C-HYA 算法.



(a) 网络收益随节点数量的变化



(b) 网络收益随信道数量的变化

图 6 ESS-PFOA 算法与经典策略的网络收益变化对比

5 总结与展望

本文从提升无线 Mesh 网络的节点网络效用和有效降低信道振荡发生率的角度, 展开无线 Mesh 网络信道分配策略的研究, 提出了基于演化博弈的信道分配策略, 并进行了仿真实验, 仿真结果表明当网络宽容因子 β 取值为 0.9 时, 基于 ESS-PFOA 算法的信道分配策略在降低信道振荡和提升网络吞吐量方面较其它抗振荡的信道分配策略明显占优. 本文基于 Matlab 仿真平台完成实验, 与实际应用可能存在误差, 接下来的研究工作将展开多平台仿真实验, 以及基于演化博弈的路由协议研究工作.

参考文献

- [1] 王崧琦. 无线 Mesh 网络路由协议关键技术的研究[D]. 成都:国防科技大学计算机科学与技术系,2009.
- [2] 冯云霞. 多接口无线 mesh 网络动态信道资源分配关键问题研究[D]. 上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院计算机系,2008,9.
- [3] Li K Q. Analysis of cost and quality of service of time-based dynamic mobility management in wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2014, 20 (2): 261 – 288.
- [4] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. *Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8 (2): 50 – 65.
- [5] Tao J, Shi H B, Huo Y, et al. A novel channel assignment scheme for multi-radio multi-channel wireless mesh networks [A]. *Wireless Algorithms, Systems, and Applications Lecture Notes in Computer Science (Volume 6843)* [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 261 – 270.
- [6] LIU J, XIE X F. Cognitive network channel allocation method based on the queuing delay and game analysis [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33 (6): 73 – 81.
- [7] 林闯. 基于随机博弈模型的网络安全分析与评价 [M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [8] Vedantham B, Kakumanu S, Lakshmanan S, et al. Component based channel assignment in single radio, multi-channel ad hoc networks [A]. *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* [C]. NY, USA: ACM, 2006. 378 – 389.
- [9] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18 (3): 535 – 547.
- [10] Mantri D, Prasad N R, Prasad R. BECPA: Bandwidth efficient cluster based packet aggregation in wireless sensor network [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 76 (3): 335 – 349.
- [11] Lehrieder F, Menth M. RCFT: A termination method for simple PCN-based flow control [J]. *Journal of Network and Systems Management*, 2014, 22 (1): 12 – 146.
- [12] Chavarria R, Akyildiz I F. Radio access network energy minimization in multi-layer heterogeneous wireless systems [A]. *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* [C]. USA: IEEE, 2013. 3259 – 3263.
- [13] Luong T, Lee B, Yeo C K. Channel allocation for multiple channels multiple interfaces communication in wireless ad hoc networks [A]. *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet Lecture Notes in Computer Science (Volume 4982)* [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 87 – 98.
- [14] 徐晶. 多接口无限网络信道分配与路由技术研究 [D]. 武汉:华中科技大学信息与通信工程学院, 2011.
- [15] Kyasanur P, Vaidya N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2006, 10 (1): 31 – 43.
- [16] 冯琳函, 钱志鸿, 金冬成. 增强型的无线 mesh 网络信道分配方法 [J]. *通信学报*, 2012, 39 (3): 44 – 50. Feng Lin-Han, Qian Zhi-Hong, Jin Dong-Cheng. Research on enhanced channel assignment scheme in wireless mesh network [J]. *Journal on Communications*, 2012, 39 (3): 44 – 50. (in Chinese)
- [17] 杜振国, 洪佩琳, 周武旸, 等. 多射频无线 Mesh 网中的接口分域信道分配 [J]. *电子学报*, 2011, 38 (10): 723 – 726. Du Zhen-guo, Hong Pei-lin, Zhou Wu-yang, et al. ICCA interface-clustered channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 38 (10): 723 – 726. (in Chinese)
- [18] 张晖, 董育宁, 杨龙祥, 等. 多媒体异构 Mesh 网络体系设计及跨层 QoS 路由算法研究 [J]. *电子学报*, 2010, 38 (10): 2436 – 2440. Zhang Hui, Dong Yu-ning, Yang Long-xiang, et al. Architecture design for heterogeneous multimedia mesh networks and research on cross-layer QoS routing algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38 (10): 2436 – 2440. (in Chinese)
- [19] Gapone A, Carello G, Filippini I. Solving a resource allocation problem in wireless mesh networks: A comparison between a CP-based and a classical column generation [J]. *Network Optimization*, 2010, 55 (3): 221 – 233.
- [20] Anandprabhu S, Himanshu G, Samir R D. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [J]. *Mobile Computing*, 2008, 7 (12): 1459 – 1473.
- [21] Fuarte P B F, Fadlullah Z M, Vasilakos A V, et al. Channel assignment on wireless mesh network backbone with potential game approach [A]. *Game Theory for Networks Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (Volume 75)* [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. 43 – 56.

- [22] 李云,于季红,尤肖虎. 资源受限的机会网络节点激励策略研究[J]. 计算机学报,2013,36(5):947-956.
Li Yun, Yu Ji-Hong, You Xiao-hu. An incentive protocol for opportunistic networks with resources constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5):947-956. (in Chinese)
- [23] 任娟. 无线 Mesh 网络的资源分配及拥塞控制算法研究[D]. 北京:北京交通大学信号与信息工程学院, 2011,01.
- [24] Zhao H Q, Sun J. A study of algorithm for testing route oscillation based on algebraic method[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(10):1763-1769.
- [25] 沈士根,马绚,蒋华,等. 基于演化博弈论的 WSNs 信任决策模型与动力学分析[J]. 控制与决策,2012,27(8):1133-1138.
Shen Shigen, Ma Xuan, Jiang Hua, et al. Evolutionary game theory based trust strategy model and dynamics analysis in wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2012, 27(8):1133-1138. (in Chinese)
- [26] Kim T S, Yang Y, Hou J C, et al. Resource allocation for QoS support in wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 12(5):2046-2054. (in Chinese)
- [27] 李明欣,陈山枝,谢东亮,等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. 软件学报,2010,1(8):2037-2049.
Li Mingxin, Chen Shanzhi, Xie Dongliang. Based on non-cooperative game theory in heterogeneous wireless network resource allocation and access control[J]. Journal of Software, 2010, 1(8):2037-2049. (in Chinese)
- [28] 徐雷,徐大专,张小飞,等. WLAN 中基于多包接收的跨层资源分配方案[J]. 电子学报,2011,39(10):2402-2406.

Xu Lei, Xu Da-Zhuan, Zhang Xiao-Fei, et al. Cross-layer resource allocation scheme for WLAN based on multi packet reception [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10):2402-2406. (in Chinese)

- [29] Pan W T. Combining PSO cluster and nonlinear mapping algorithm to perform clustering performance analysis: take the enterprise financial alarming as example[J]. Quality & Quantity, 2011, 45(6):1291-1302.
- [30] 胡洁,赵祚喜,陈润恩. 分布式网络中基于一致性的信道分配算法[J]. 电子学报,2014,42(6):1132-1138.
Hu Jie, Zhao Zuo-Xi, Chen Run-En. Consensus-based channel assignment in decentralized network [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6):1132-1138. (in Chinese)
- [31] 许力,陈志德,黄川,著. 博弈理论在无线网络中的应用[M]. 北京:科学出版社,2012.

作者简介



乐光学 男,1963年11月出生,贵州天柱人.工学博士,嘉兴学院数理与信息工程学院教授,硕士研究生导师,主要从事计算机网络、无线 Mesh 网络等方面的研究工作.

E-mail: guangxueyue_111@163.com



李明明 女,1988年8月出生,湖北黄冈人.硕士,现为嘉兴职业技术学院信息分院教师,主要从事计算机网络、无线 Mesh 网络等方面的研究工作.

E-mail: leecag201@126.com