

基于演化博弈的抗涟漪效应信道分配算法

代绍庆¹, 李明明¹, 乐光学²

(1. 嘉兴职业技术学院 信息技术分院, 浙江 嘉兴 314000; 2. 嘉兴学院 数理与信息工程学院, 浙江 嘉兴 314000)

摘 要: 为抑制涟漪效应并提升网络吞吐率, 提出联合演化博弈和改进果蝇优化算法的分布式抗涟漪效应信道分配算法。分析涟漪效应的发生机理, 构建终端节点群集的演化稳定均衡博弈模型, 评估稳定均衡状态下的涟漪效应, 实现单冲突域内信道的最优分配。实验结果表明, 当稳定演化均衡下的信道干扰阈值为 0.6 时, 该算法能够有效规避涟漪效应, 并使平均涟漪效应发生率从 28% 下降至 8%, 与 C-HYA 算法、EP-OCA 算法、RBA 算法、CDACA 算法相比, 具有更稳定的网络吞吐率。

关键词: 无线 Mesh 网络; 信道分配算法; 涟漪效应; 演化博弈; 稳定均衡

中文引用格式: 代绍庆, 李明明, 乐光学. 基于演化博弈的抗涟漪效应信道分配算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(4): 120-128.

英文引用格式: DAI Shaoqing, LI Mingming, YUE Guangxue. Channel Assignment Algorithm with Anti-ripple Effect Based on Evolutionary Game[J]. Computer Engineering, 2018, 44(4): 120-128.

Channel Assignment Algorithm with Anti-ripple Effect Based on Evolutionary Game

DAI Shaoqing¹, LI Mingming¹, YUE Guangxue²

(1. Information Technology Branch, Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing, Zhejiang 314000, China;

2. College of Mathematics Physics and Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314000, China)

[Abstract] In order to alleviate the ripple effect and improve network throughput, this paper produces a distributed channel assignment scheme with anti-ripple effect based on evolutionary game and promoted fruit-flies optimal algorithm. The genetic mechanism of ripple effect is analyzed, a stable equilibrium game model of terminal node cluster evolution is proposed, and the evaluation of ripple effect rate in the state of stable equilibrium is done to achieve the optimization of channel assignment in single collision domain. Experimental results demonstrate that the proposed scheme is able to alleviate the ripple effect and make the rate of ripple effect decrease from 28% to 8% on average, when channel interference threshold is 0.6 with a stable evolutionary equilibrium state. Compared with C-HYA algorithm, EP-OCA algorithm, RBA algorithm, CDACA algorithm, it has a more stable network throughput.

[Key words] Wireless Mesh Network(WMN); channel allocation algorithm; ripple effect; evolutionary game; stable equilibrium

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2018.04.019

0 概述

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Network, WMN)作为一种综合接入技术,在传输质量、通信速率、网络稳定性方面较传统无线网络有更高的要求^[1]。随着多信道多射频(Multi-channel Multi-radio, MCMR)技术的深入应用,无线 Mesh 网络通信技术对信道分配要求日趋严格。优化网络吞吐量、降低信道干扰率、提高网络收益、稳定网络拓扑结构,是无线 Mesh 网络信道分配技术的关键^[2-3]。

无线 Mesh 网络信道分配仍然面临这些问题:1)单冲突域内通信链路路上的涟漪效应问题^[4-5],采用集中式

信道分配算法如 C-HYA 算法^[2]、ELIA-OCA 算法^[6]等,一定程度上抑制了涟漪效应,但算法在动态无线 Mesh 网络中适用度较低^[7]。2)端到端节点上非重叠信道的分配问题,已有研究成果仅处理主干网的正交信道分配,仅通过网关热点节点或射频接口节点上的汇聚流量作为吞吐量,容易产生流量瓶颈问题,影响网络稳定性^[8-9]。3)由于无线 Mesh 网络节点存在自适应性,导致信道分配需要考虑节点之间的竞争。利用博弈相关理论分析节点行为,是近年来无线 Mesh 网络信道分配的有效研究方法之一^[10-14]。

为有效抑制多射频多信道无线 Mesh 网络中单冲突域内的涟漪效应,提升稳定网络吞吐量,本文基

基金项目: 浙江省教育厅科技项目(Y201636319);浙江省自然科学基金(LY12F02019)。

作者简介: 代绍庆(1972—),男,副教授、硕士,主研方向为网络通信、数据挖掘、分布式计算;李明明(通信作者),讲师、硕士;乐光学,教授、博士。

收稿日期: 2017-05-22 **修回日期:** 2017-09-17 **E-mail:** 574063581@qq.com

于演化稳定均衡思想,分析端到端节点竞争行为,展开信道分配方案的优化,联合果蝇优化算法,构建一种启发式的分布式信道分配算法。根据当前的单冲突域内节点信道分配问题,基于节点群体中信道干扰率,演化分析网络性能并求解博弈稳定均衡解。将稳定演化的节点干扰率、节点的在线流量比率作为演化稳定均衡条件,计算涟漪效应发生率。通过仿真实验,验证节点的干扰比率在不同值情况下的网络收益状况,并通过网络有效吞吐率和涟漪效应发生率,对比已有抗涟漪效应信道分配算法^[2,6,15-16]验证算法的可行性和有效性。

1 国内外研究现状

大量研究证明,多信道多射频环境中的信道分配技术是 NP 问题。针对局部信息展开端节点的信道分配,逐渐成为无线 Mesh 网络信道分配的重点^[6-8]。TAO 分析了网关热点问题和链路流量负载问题,提出了基于集中式的准静态信道分配方案,旨在提升网络吞吐量^[8]。文献[9]提出了联合组播路由的集中式信道分配方案,旨在处理网关热点和射频接口的混合流量转发,根据非重叠信道展开了干扰模型的设计。文献[17]提出了以局部拓扑和邻域内信道利用率为触发条件的自适应集中式信道分配算法(Local Information based Channel Assignment, LICA),算法有效提升了静态网络中的网络吞吐,但理想的启发式条件难以适用于动态无线 Mesh 网络。

通过最大化网络效益来实现信道分配的优化效果,是当前信道分配的主要目标。文献[6]认为无线 Mesh 网络中容量下降问题导致了信道分配的必要性,着重分析了终端节点上流量不相关的非重叠信道分配技术,提出了 EP-OCA (End-to-End Partially) 算法。算法的优势在于:分别从邻居-接口、接口-信道 2 种通信方式建立节点无向图和链路干扰模型,并计算邻域内节点的干扰率;算法的不足表现为:仅针对基于 IEEE802.11b/g 标准的 3 条非重叠信道展开信道分配,产生的网络开销较大,且信道分配基于集中式算法,在动态无线 Mesh 中容易导致冲突域内的信道依赖问题^[17]。文献[16]指出了集中式信道分配算法无法满足分布式节点通信的全局性,以匈牙利算法作为研究基础,提出基于一致性前向和反向拍卖机制的和分布式信道分配算法(Consensus-based Decentralized Auction for Channel Assignment, CDACA)。算法的优势体现在:以拍卖方式分析终端 Mesh 节点数量和其所在通信链路上空闲信道数量对信道分配的影响,通过前向拍卖实现。算法不足表现在:算法针对了离散的 Mesh 路由节点和 Mesh 终端节点展开局部不完全信息的拍卖机制,算法开销大,同时引入了较大的信噪比。

随着涟漪效应在无线 Mesh 网络信道分配过程中的发现,涟漪效应成为信道分配研究的重点^[5,18]。

文献[7]通过分析信道分配过程中影响信道利用率的几种网络缺陷,认为涟漪效应是导致网络有效带宽下降和网络不稳定的主要原因,提出了 LORA (Low-cost Ripple effect Attack) 缺陷检验方法。文献[2]根据链路优先级的排队顺序分配信道,通过实验验证了算法能有效抑制静态网络中的涟漪效应,但算法预处理信道资源导致算法缺乏灵活性,且算法时间复杂度未知。文献[15]提出了基于接收机制的分布式信道分配算法 RBA (Receiver-based channel Allocation),算法侧重于信道分配的路由路径寻找,通过信道分配结果分析单冲突域内的涟漪效应。文献[18]为了有效评价信道分配算法的性能,根据马尔科夫链的动态信道分配(Dynamic Channel Assignment, DCA)算法评价模型,将网络节点之间的干扰率作为评价指标,考虑了通信可靠性和网络吞吐量,但未深入讨论涟漪效应问题^[19]。

涟漪效应是信道分配过程中影响信道分配效率的主要因素,其产生原因主要为通信链路上部分信道空闲、部分信道拥塞引起的通信范围内的数据交换失败,其存在方式以群体繁殖为主,动态网络中的涟漪效应不仅在子节点之间繁殖,也存在于父节点之间^[5]。如图 1 所示,节点 1 从信道 1 切换至信道 3 时,由于信道之间存在连接依赖,节点 2、节点 3 均切换至信道 3,导致了节点 2 中止信道 2,节点 3 中止信道 1。涟漪效应发生后,信道 1、信道 2 通信中止,进入空闲状态,信道 3 疲于转发数据产生拥塞,继而在通信范围内广播^[3]。

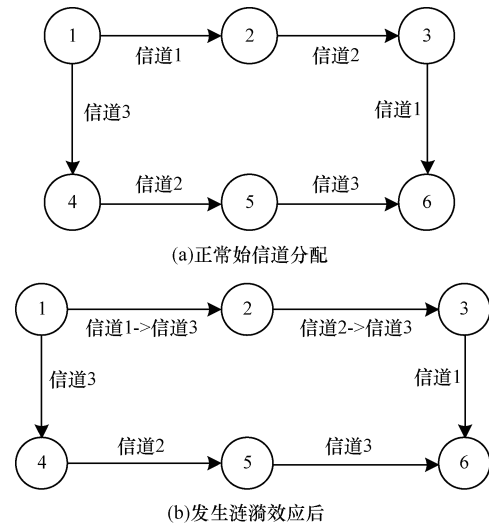


图 1 涟漪效应发生情况

随着无线节点自适应性的发现和深入研究,博弈理论逐渐应用于无线网络中^[20-23]。文献[4]针对动态的无线 Mesh 网络引入博弈理论分析异构网络节点行为模式,模型实现了收敛、提升了网络效益,但是增加了网络开销和延时。演化博弈作为一种全新的经济学博弈思想,在无线网络中侧重于分析节点群体性行为^[20]。文献[21]将演化博弈思想用于优化无线传感网络中的分簇路由,建立基于簇节点

的联盟式演化博弈模型,根据网络收益函数的动态方程展开稳定均衡分析。文献[22]将演化博弈思想用于分析无线传感网节点的模糊信任机制,旨在提升网络节点的信任值。

综合而言,在不稳定的动态网络拓扑中,采用演化博弈分析单冲突域内节点集的信道分配具有一定的优化效果。作为优化网络吞吐量的制约因素,有效抑制信道分配过程中的涟漪效应问题并提升动态无线 Mesh 网络的网络吞吐率,需要从以下 3 点展开深入研究:

1) 针对动态无线 Mesh 网络中节点的自适应特性,构建适合动态网络拓扑中节点群体的演化博弈环境,以实现节点的全局信道资源博弈过程。

2) 分析节点之间产生涟漪效应的原因,展开涟漪效应问题的信道分配优化方案。运用演化博弈稳定均衡思想求解抑制涟漪效应的稳定网络收益。

3) 通过仿真实验,记录演化过程中发生涟漪效应的节点数量,计算出涟漪效应发生率,以最优方式确定节点群体的稳定状态以获取稳定吞吐量,确保信道分配结果的可实施性。

2 稳定均衡演化博弈建模

2.1 模型假设

为了有效抑制涟漪效应,提升网络吞吐量,在非稳定动态网络拓扑中,采用演化博弈分析单冲突域内的节点行为,构建 WMN 信道分配算法的数学模型和算法,现作如下假设:

1) 假设每一个节点均具有 2 个可用通信接口,同一时间节点的该射频接口仅与同一信道通信。

2) 拓扑上的节点均为理性、贪婪节点,所有节点均参与博弈过程。

3) 假设稳定均衡下的涟漪效应发生率低于初始阶段的涟漪效应发生率,稳定均衡状态的网络有效聚合吞吐率高于初始阶段的网络有效聚合吞吐量。

2.2 系统建模

在 MCMR 的无线 Mesh 网络中,通信链路上存在的可用信道数量集合用 $C = \{c_j \in C, j = 1, 2, \dots, M\}$ 表示,Mesh 终端节点集用 $V = \{v_i \in V, i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示。因此,节点利用信道完成通信的算法表示为 $S_{v,c} = \{S_{v_1,c_1}, S_{v_2,c_2}, \dots, S_{v_i,c_j}, S_{v_N,c_M}\}$,设 $k_{i,j} = \{0, 1\}$ 表示节点 v_i 射频接口使用信道 c_j 的状态,成功通信则 $k_{i,j} = 1$,反之 $k_{i,j} = 0$ 。如果节点 v_i 与其邻域节点通信成功,则其信道分配算法为 $S_{i,j} = \{k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,M}\}$ 。

对于任意信道 $c_j \in C$,依赖于共享信道的节点射频数量为 n_{c_j} ,则冲突域内最大有效聚合吞吐量为 $R(n_j)^{[4]}$ 。此时,节点成功通信时其通信链路上的有效聚合吞吐率结果影响着节点的网络收益。构建节点的网络收益函数:

$$F_{i,j} = \frac{h \sum_i^N \sum_j^M S_{i,j}}{Dg} \times \frac{R_{n_j}}{n_j} \quad (1)$$

式(1)表示度数为 Dg 的节点 v_i 的射频接口 n_j 经过 h 跳成功与信道 c_j 通信得到的网络收益 R_{n_j} 。其中, h 表示数据流从当前节点 v_i 向下一个节点转发数据产生的跳数, Dg 为干扰范围内源节点 v_i 到目的节点 v_j 的度数。文献[7-8]分别给 Mesh 节点设置节点度数为 2,3,而实际应用中给定节点度数 ≤ 5 ,因此针对具有竞争特点的动态 Mesh 节点度数取值范围设置为 $3 \leq Dg \leq 5$ 。

为了实现节点的演化过程,给定节点 v_i 在 $t \in [0, T]$ 时刻的信道分配算法 $S_{i,j}$ 时状态为 $P_j^i(t)$,其中 $P_j^i(t)$ 表示节点 v_i 选择算法 $S_{i,j}$ 的概率。此时, $\phi(t)$ 表示 t 时刻节点的数量, $\phi_j^i(t)$ 表示在 t 时刻节点 v_i 通过信道 c_j 选择算法 $S_{i,j}$ 的总数。则在 t 时刻,有:

$$\begin{cases} P_{i,j}(t) = \{p_1^i(t), p_2^i(t), \dots, p_j^i(t), \dots, p_M^i(t) | p_j^i \geq 0 \\ \phi_j^i(t) = p_j^i(t) \phi(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\sum_{j=1}^M P_j^i = 1$,即与节点 v_i 成功通信的所有信道的发生概率。在 $t+1$ 时刻,节点 v_i 选择算法 $S_{i,j}$ 的总数为:

$$\begin{cases} \phi_j^i(t+1) = \phi_j^i(t) \times (\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t)) \\ P_j^i(t+1) = \frac{\phi_j^i(t+1)}{\phi(t)} = \frac{P_j^i(t) \phi(t) (\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t))}{\sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) (\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t))} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)、式(3),构建节点稳定网络收益演化方程:

$$\frac{\Delta P_j^i(t)}{P_j^i(t)} = \frac{P_j^i(t+1) - P_j^i(t)}{P_j^i(t)} \quad (4)$$

根据上述演化方程,构建节点的网络最大化收益的演化博弈模型。以节点 v_i 在 t 时刻和 $t+1$ 时刻选择算法 $S_{i,j}$ 时的网络收益,等价于其平均网络收益的总支付与所有算法集合中获得平均效用支付之差。则定义连续时间内的稳定演化动态方程如下:

$$\begin{cases} \bar{U} = \frac{\sum_{j \in M} R_{n_{c_j}}}{n_{c_j}} \\ \frac{\Delta P_j^i(t)}{P_j^i(t)} = \frac{\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) - \sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) (\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t))}{\sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) (\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t))} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表达了复制者动态系统中端节点 v_i 选择算法 $S_{i,j}$ 时产生的平均网络收益与总收益之差。根据连续时间规律,式(4)演化结果可以修正为:

$$\frac{\Delta P_j^i(t)}{P_j^i(t)} = \frac{1}{P_j^i(t)} \lim_{x \rightarrow T} \left(\frac{P_j^i(t+x) - P_j^i(t)}{x} \right) \quad (6)$$

即在任意的 $x \rightarrow T$ 时节点 v_i 选择算法 $S_{i,j}$ 可以实现一种稳定收敛。此时 $\Delta P_j^i(t)$ 可以改写为:

$$\Delta P_j^i(t) = P_j^i(t) \times \left(\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) - \sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) \left(\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) \right) \right) \quad (7)$$

3 抗涟漪效应的信道分配算法

3.1 演化稳定均衡算法

为实现 WMN 信道稳定分配,基于上述演化稳定均衡模型和参考节点流量模型^[2]、局部干扰模型^[9],令

$\left(\frac{\Delta P_j^i(t)}{P_j^i(t)} \right)' = 0$,根据定理 1 的约束条件,求解式(5)的一阶导数,得到稳定演化均衡解,如式(8)所示:

$$\left(\frac{\Delta P_j^i(t)}{P_j^i(t)} \right)' = \left(\frac{\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) - \sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) \left(\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) \right)}{\sum_{a=1}^n P_j^a(t) \phi(t) \left(\sum_{l=1}^n F_{l,j} P_j^l(t) \right)} \right)' = \frac{h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{i,j} R_{n_j} - \sum_{j=1}^M R_{n_j}}{Dg \quad n_j \quad \sum_{i \in N, j \in M} k_{i,j}} \quad (8)$$

基于式(8)的可导函数结果,给定阈值 $\Lambda = \frac{h}{Dg}$,

得到 $\frac{n_j}{\Lambda} = \frac{R_{n_j}}{\sum_{j \in C} R_{n_j}}$,当前节点的网络吞吐量比率等价于冲突域内成功通信的射频数量比率。

综合而言,当式(8)满足了以下 2 种条件时,演化模型均能达到稳定均衡状态。

1) 如果 $\left(\frac{\Delta P_{v_i, c_j}(t)}{P_{v_i, c_j}(t)} \right)' > 0$, 即 $\frac{n_{c_j}}{\Lambda} > \frac{R_{n_{c_j}}}{\sum_{j \in M} R_{n_{c_j}}}$ 。表明

当前状态下节点之间干扰影响了网络收益,通信链路上信道干扰明显,涟漪效应发生率明显增高;且 $\frac{n_{c_j}}{\Lambda}$

随 $\frac{R_{n_{c_j}}}{\sum_{j \in M} R_{n_{c_j}}}$ 值增加而增加,导致邻域网络收益下降,可

能引发多冲突域内信道振荡问题^[10],此时通过稳定均衡解不能实现信道分配算法的优化。

2) 当 $\left(\frac{\Delta P_{v_i, c_j}(t)}{P_{v_i, c_j}(t)} \right)' \leq 0$ 时, 即 $\frac{n_{c_j}}{\Lambda} \leq \frac{R_{n_{c_j}}}{\sum_{j \in M} R_{n_{c_j}}}$ 。表明

当前信道分配方案中网络吞吐率随信道干扰率演化,节点网络有效吞吐率受信道干扰率的影响小。网络拓扑可以快速进入稳定均衡状态,网络吞吐量的优化率逐渐趋于稳定。

基于上述 2 种演化稳定均衡状态,冲突域内节点的网络吞吐率受节点干扰率演化而变化。即节点干扰率高于节点的吞吐率时,通信链路受阻;如果节点干扰率低于或等于节点的吞吐率,通信链路将实现网络数据传输,保持网络稳定性、优化网络吞吐率。

3.2 改进的果蝇优化算法

由于演化博弈理论应用于无线网络中,着重分析节点算法的选择和突变问题^[23],因此选择适合于

演化博弈模型的节点智能算法,以实现信道稳定分配,成为 Mesh 网络中信道分配的研究热点^[24-25]。粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法在无线网络节点行为分析中应用广泛,但是算法本身参数复杂、操作有难度,果蝇优化算法(Flies-flying Optimal Algorithm, FOA)基于粒子群算法完成了演化式计算^[26]。在无线 Mesh 网络的信道分配问题方面应用果蝇优化算法有以下优势:1)利用果蝇寻找食物的演化过程,分析无线 Mesh 网络节点的信道选择行为,用以实现无线 Mesh 网络节点信道分配的演化过程。2)以果蝇按食物气味寻觅路径的方法为导线,计算节点集的涟漪效应发生率,前者是通过一定范围内随气味变化切换寻觅路径,后者是拓扑中发生了涟漪效应转发信道实现重分配过程。

结合改进的果蝇优化算法(Promoted Flies-flying Optimal Algorithm, PFOA),将演化过程归一化,实现稳定的网络收益和 WMN 信道分配算法的演化式优化。

当系统达到稳定均衡状态(如式(5)),得到演化稳定均衡解(如式(7)),计算得到演化稳定均衡状态下的网络收益,并以此作为 ESS-PFOA^[3]((Evolutionary Stable Strategy Promoted Flies-flying Optimal Algorithm))算法的网络收益指标。因为网络拓扑中发生涟漪效应的节点会切换信道,在 ESS-PFOA 算法中以演化稳定拓扑内未聚集的节点数量比率作为涟漪效应发生率指标。算法实现的主要步骤为:

1) 网络拓扑初始化,通信节点的群体位置随机分配,其中, v_i, c_j 分别表示节点和信道, $S_{i,j}$ 表示节点的信道分配算法,也即适应度函数, $F_{i,j}$ 表示节点适应度函数的判断函数。在 t 时刻节点的网络收益的果蝇优化改进结果表示为:

$$S_{i,j}(t) = \sum_{i \in N, j \in M} k_{i,j}(t), F_{i,j} = \frac{1}{S_{i,j}(t)} \quad (9)$$

2) 果蝇寻径函数 $Smell_{i,j}(t)$,也即节点的网络收益函数 $F_{i,j}(t)$ 。其关键在于:计算在 $t \in [0, T]$ 时间周期内成功通信的节点数量、概率、接口总数以及干扰阈值;记录稳定状态的节点网络吞吐量;完成重复博弈。此步骤得到算法时间复杂度为 $O(\log n^2)$ 。

3) 保留稳定均衡状态下的节点转折位置,计算未聚集的节点数量,作为涟漪效应发生次数。此步骤得到算法时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

综上所述,ESS-PFOA 算法时间复杂度为 $O(n^2)$,即算法以聚集节点选择信道的迭代次数为代价,实现网络吞吐量的稳定增长并有效抑制涟漪效应发生。

3.3 算法收敛性分析

为了验证 ESS-PFOA 算法可行性、收敛性,经典收敛性算法的验证实验如图 2 所示。通过 200 次迭代,Mesh 网关的上行链路网络吞吐量以 10 Mb/s 为基准参考值,验证 PSO、FOA、PFOA、ESS-PFOA 算法吞吐率的收敛性。

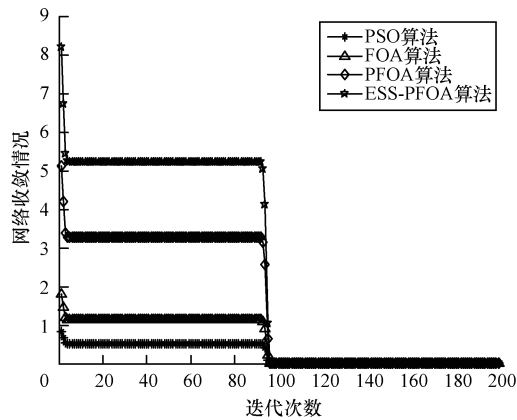


图2 算法收敛性对比

实验结果表明,4种算法收敛一致;ESS-PFOA算法的网络稳定吞吐量明显高于PFOA算法,其收敛结果从小到大依次为2.7959、3.9199、4.3119、9.7997,ESS-PFOA算法较PSO算法高3.5倍、较FOA算法高2.5倍、较PFOA算法高2.3倍,网络性能相对其他算法占优。

4 仿真实验与性能分析

为了验证算法有效性,参考已有的仿真环境^[6,8,16],假设网络中有25个随机的网络节点部署在1000 m ×

1000 m区域中,每个节点配置2个无线射频接口,通信半径为 $R = 250$ m,干扰半径为 $R_1 = 450$ m,非重叠的信道数量为12,网络拓扑为 5×5 ,信道数量为12,节点度数为1~5,节点跳数为2~5。通过3组实验验证基于演化博弈的信道分配算法涟漪效应发生率、网络有效聚合吞吐量,综合评价算法有效性。仿真环境描述及网络仿真参数如表1所示。

表1 参数设定

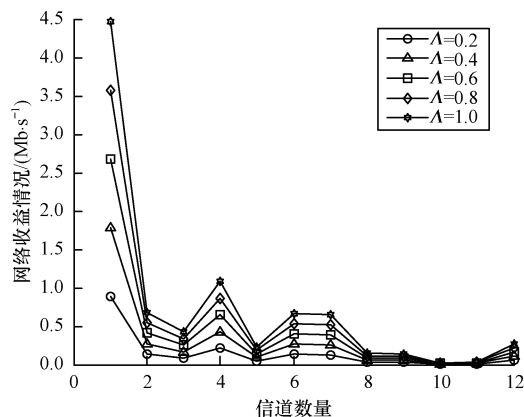
实验编号	博弈次数	最大网络吞吐量/(Mb · s ⁻¹)
1	-	20
2	200 ~ 500	50
3	200 ~ 500	50

4.1 信道干扰阈值分析

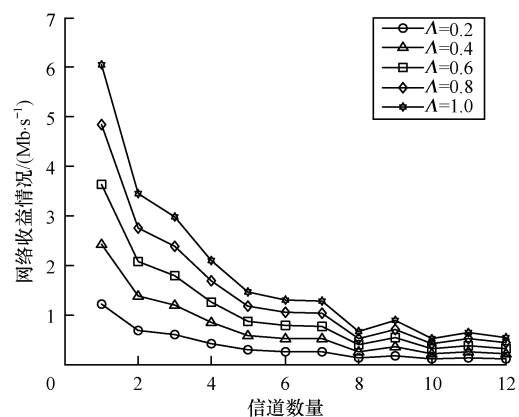
实验1根据式(8)所得阈值为仿真参数,验证在不同的网络带宽下节点度数和跳数对网络收益结果的影响。根据提出的无线Mesh网络节点跳数范围,给定 h 值范围为 $1 \leq h \leq 5$,联合式(8)得到:

$$\frac{1}{5} \leq \Lambda = \frac{h}{Dg} \leq 1 \quad (10)$$

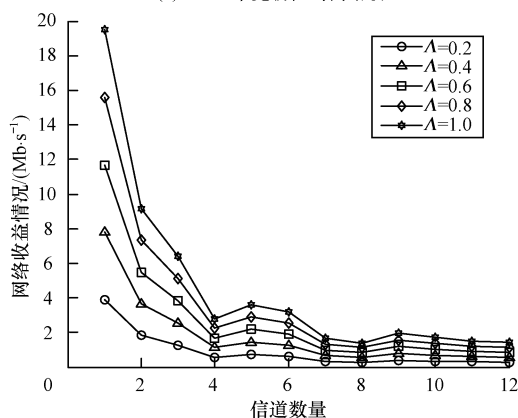
根据式(10)所示结果,分别选取 Λ 值为0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,分别从5 Mb/s、10 Mb/s、20 Mb/s、50 Mb/s带宽初值状态展开12条非重叠信道的网络收益分析,实验结果如图3所示。



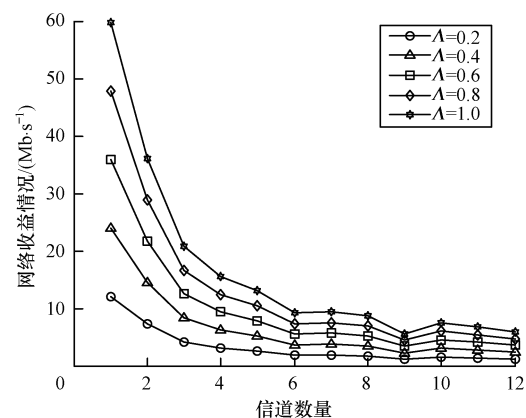
(a)5 Mb/s带宽初值的网络收益



(b)10 Mb/s带宽初值的网络收益



(c)20 Mb/s带宽初值的网络收益



(d)50 Mb/s带宽初值的网络收益

图3 干扰阈值 Λ 对网络收益的影响结果

仿真结果表明:

1) 基于这 4 种带宽初值, 5 Mb/s 和 10 Mb/s 时的网络收益存在波动, 20 Mb/s 和 50 Mb/s 时的网络收益稳定收敛; 网络初始带宽在 20 Mb/s ~ 50 Mb/s 的网络稳定性高于 5 Mb/s ~ 10 Mb/s, 其中 50 Mb/s 带宽初值下的网络收敛速度明显占优。

2) 干扰阈值在 1 处, 即节点度数、跳数为 $H = 5$, $Dg = 5$ 时; 4 种网络拓扑虽然均实现了稳定收敛, 但是这一演化稳定状态下的网络收益均呈现理想化状态, 这一结果更适用于信道分配结果不受涟漪效应影响的静态信道分配环境。

3) 当阈值小于 1 时, 4 种带宽初值下的网络收益效果和收敛情况均相似, 但稳定收敛的信道数量逐渐降低。当干扰阈值为 0.2 时, 网络收益结果最小, 此时节点度数、跳数为 $H = 1$, $Dg = 5$, 当干扰阈值为 0.8 时, 网络收益结果最优, 此时节点度数、跳数为 $H = 4$, $Dg = 5$ 。

4) 节点上有效聚合带宽值随信道数量的增加逐渐减少, 4 种带宽初值状态下的网络收益均呈现一定程度的下降, 网络收益下降率为 $\Delta = 0.6 \leq \Delta = 0.2 < \Delta = 0.4 \leq \Delta = 0.8$ 。从收益效果来看, 当 $\Delta = 0.6$ 时, 4 种带宽初值下的网络收益效果最优, 此时节点度数、跳数为 $H = 3$, $Dg = 5$ 。

4.2 网络收益分析

上述实验结果表明, 在 50 Mb/s 带宽初值下, 当信道干扰阈值为 0.6 时, 满足演化稳定均衡条件。因此, 基于 $H = 3$, $Dg = 5$ 的实验条件, 以实现算法稳定均衡为目标, 实验 2 分别从节点数量、信道数量对网络有效聚合吞吐量的影响方面展开 ESS-PFOA 算法、EP-OCA 算法、CDACA 算法、C-HYA 算法、RBA 算法的网络收益分析, 算法的收益分析结果如图 4 所示。并分别验证了 200 次、500 次迭代的网络收益状况, 结果如图 5 所示。相应网络稳定收益数据如表 2 所示。

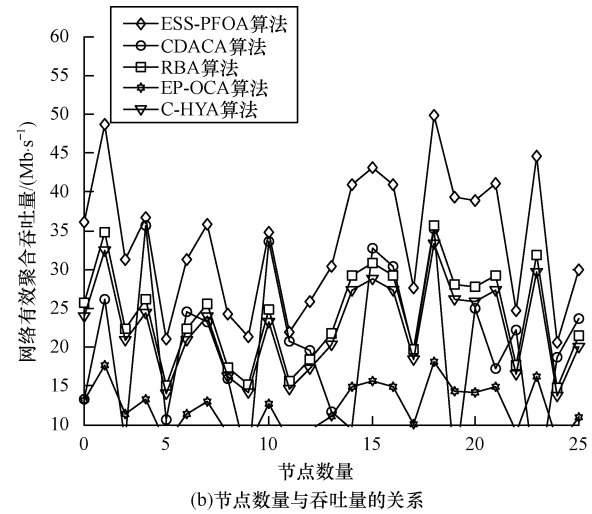
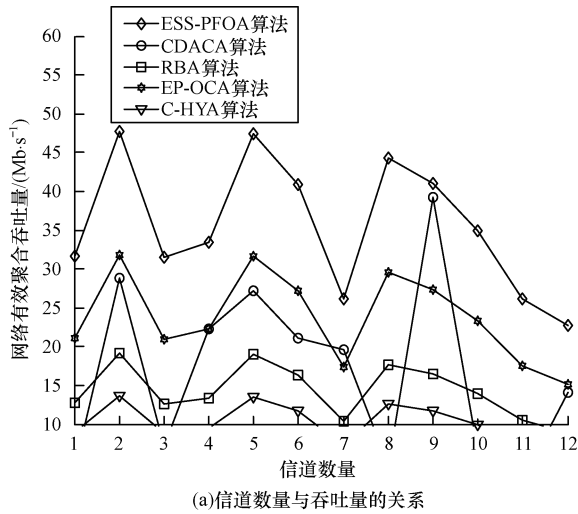


图 4 不同迭代次数下的网络有效聚合吞吐量

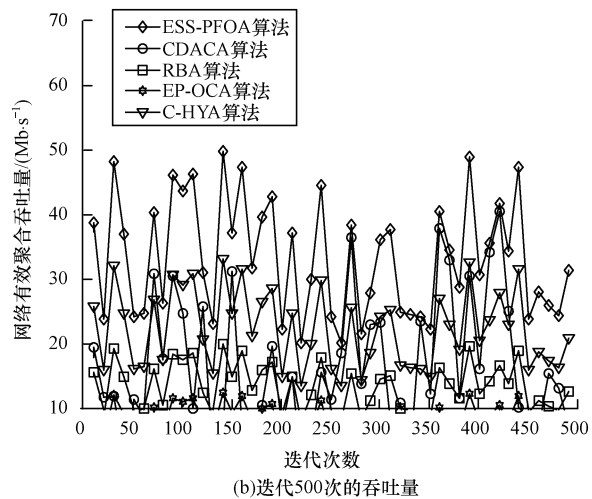
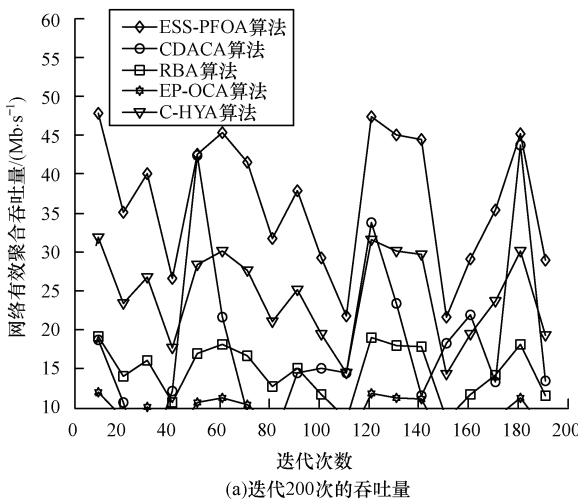


图 5 不同信道分配算法的网络有效聚合吞吐量

表2 不同信道分配算法的网络收益结果

(Mb · s⁻¹)

算法	节点类型	算法类型	受信道数量影响的网络收益	受节点数量影响的网络收益	迭代次数200时的稳定收益	迭代次数500时的稳定收益
C-HYA 算法	分布式	集中式	10.519 6	20.586 8	11.858 7	11.622 4
EP-OCA 算法	端节点	集中式	24.545 7	19.909 1	25.466 3	25.172 5
RBA 算法	-	分布式	14.727 4	20.824 6	23.772 3	23.220 4
CDACA 算法	端节点	分布式	24.883 2	26.688 3	17.014 4	16.914 5
ESS-PFOA 算法	端节点	分布式	36.818 5	37.363 7	36.818 5	36.720 5

实验结果表明:

1) 如图4所示,随着信道数量的增加,5种信道分配算法的网络收益均发生变化,其中收益效果依次为:ESS-PFOA, CDACA, EP-OCA, RBA, C-HYA; 随着节点数量的增加,5种信道分配算法的网络收益效果依次为:ESS-PFOA, CDACA, RBA, C-HYA, EP-OCA。结果表明,随着信道数量的增加,考虑端节点的信道分配算法所得网络收益较其他算法明显占优;随着节点数量的增加,分布式算法的网络收益较集中式算法的网络收益明显占优。

2) 如图5所示,5种信道分配算法,在200次迭代次数下的稳定网络收益和500次迭代次数下的网络稳定收益差异均不明显,均呈现了迭代次数越多,网络稳定收益越小的趋势。网络收益值在2种迭代次数下从大到小依次为:ESS-PFOA, EP-OCA, RBA, CDACA, C-HYA。

对比图4、图5结果与表2数据,得出如下结论:

1) 受信道数量影响的端到端节点的网络收益较其他节点类型网络收益高,受节点数量影响的分布

式算法网络收益较集中式算法高。

2) 2种迭代下,由于EP-OCA算法针对端到端节点采用了非重叠信道分配,只在12条信道转发时产生网络开销,相对于其他信道分配算法其网络收益明显占优,但是其收益结果呈现出了较大的波动性;CDACA算法因为采用的是一致性公平竞争的原则,其网络收益较其他算法整体上呈现稳定变化的趋势,但其收益结果较其他算法明显偏低;ESS-PFOA算法较另外2种分布式信道分配算法在网络收益方面明显占优。

4.3 涟漪效应发生率分析

为了有效分析ESS-PFOA算法在抑制单冲突域内涟漪效应的效果,结合实验1、实验2仿真数据,展开多组验证实验,分析并计算平均的稳定均衡环境下涟漪效应发生率。此时,干扰阈值为0.6,即 $H = 3$, $Dg = 5$,网络有效初始带宽值为50 Mb/s,经过200次迭代后,基于式(9)所示的果蝇寻径计算方法,计算信道分配过程中聚合节点上存在涟漪效应而发生寻径转折数量,涟漪效应发生率如图6所示,涟漪效应发生率数据结果如表3所示。

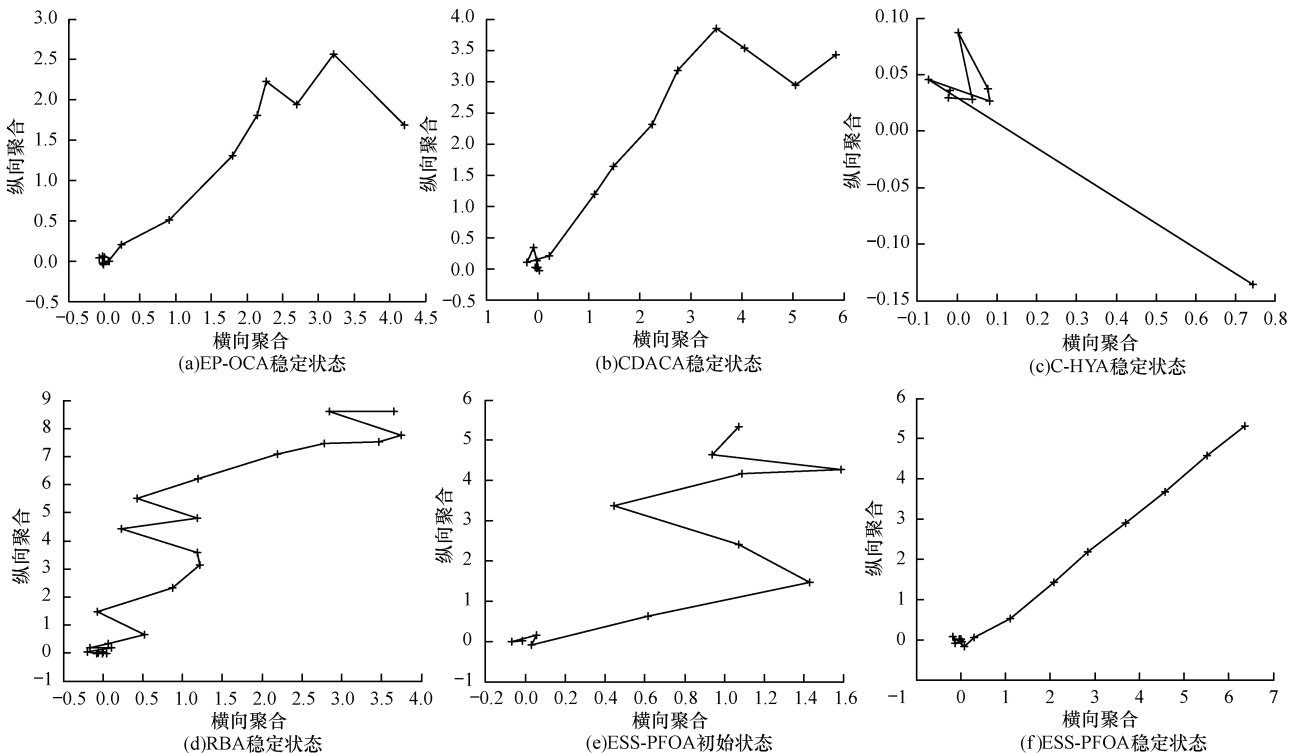


图6 不同信道分配算法下涟漪效应发生率情况

表 3 涟漪效应发生率对比结果

算法	算法类型	初始状态	稳定状态
C-HYA 算法	集中式	3/25 = 12%	0/25 = 0
EP-OCA 算法	集中式	5/25 = 20%	3/25 = 12%
RBA 算法	分布式	7/25 = 28%	5/25 = 20%
CDACA 算法	分布式	5/25 = 20%	3/25 = 12%
ESS-PFOA 算法	分布式	7/25 = 28%	2/25 = 8%

基于 $\left(\frac{\Delta P_{v_i, c_j}(t)}{P_{v_i, c_j}(t)}\right)' \leq 0$ 所得演化稳定情况, 针对

ESS-PFOA 算法, 选取 200 次迭代内的网络收益, 对比初始稳定状态和完全稳定状态下的网络收益和涟漪效应发生率结果, 并深入分析, 仿真结果如图 7 所示。

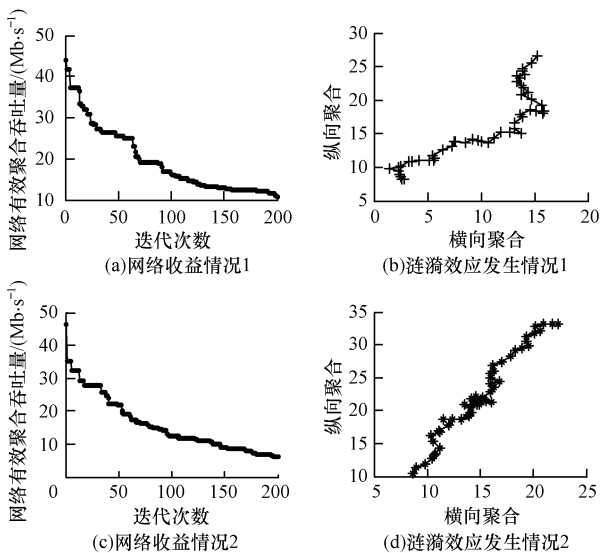


图 7 稳定均衡条件下的网络收益和涟漪效应发生情况

图 6、图 7 所示结果表明:

1) 初始状态下的稳定网络收益在迭代 40 次开始进入稳定收敛, 涟漪效应发生率维持在 28% 左右; 达到稳定演化均衡状态下的网络收益在迭代 20 次时进入第 1 次稳定收敛, 迭代 40 次时进入第 2 次稳定收敛, 收敛效果较初始状态下明显占优, 多次实验验证下的平均涟漪效应发生率为 8%, 如图 7(涟漪效应发生率 2) 所示, 最理想状态时得到了涟漪效应发生率为 4%, 如图 6(f) 所示。

2) 经过多次实验验证和网络收益对比分析(如实验 2 结果), 不同算法得到的稳定状态下涟漪效应发生率从大到小依次为: RBA, EP-OCA, CDACA, C-HYA, ESS-PFOA。

实验结果表明:

1) 5 种信道分配算法中未发生涟漪效应的节点成聚集状态, 且所有算法的涟漪效应在初始状态高于稳定状态; 节点发生涟漪效应的时间和位置是随机的, 证明了演化稳定均衡环境的随机性和节点演化特点。

2) 表 3 结果表明, 在静态环境下的集中式信道分配算法中, 涟漪效应发生率明显低于动态的分布式信道分配算法, 其中 C-HYA 算法实现了涟漪效应发生率由 12% 下降至 0, 但是动态的 Mesh 网络中涟漪效应不可避免。

3) 在动态 WMN 中存在信道重叠和节点的贪婪、自私行为等不可预测问题, 涟漪效应的发生不可避免。因此, 采用分布式信道分配算法的 3 种算法, 在稳定状态时仍然存在涟漪效应。其中 ESS-PFOA 算法实现的涟漪效应在稳定时最小, 相对于其他信道分配算法, 其涟漪效应下降率最为明显。

5 结束语

本文从提升无线 Mesh 网络的吞吐量和降低涟漪效应发生率角度出发, 展开基于演化博弈的分布式信道分配算法研究, 建立了端节点的演化博弈模型, 分析模型实现稳定均衡的条件, 并通过实验验证算法的有效性, 平均涟漪效应发生率从 28% 下降至 8%, 网络吞吐量优化明显, 有效提升了网络吞吐率, 抑制了涟漪效应发生率, 保证了网络稳定性。

参考文献

- [1] 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, 2010.
- [2] 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, 33(10): 44-50.
- [3] 李明明. 基于演化博弈的无线 Mesh 网络信道分配策略研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2014.
- [4] 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, 2011.
- [5] RANIWALA A, CHIUEH T. Architecture and algorithms for an IEEE 802. 11-based multi-channel wireless mesh network [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM' 05. Washington D. C., USA:IEEE Press, 2005: 2223-2234.
- [6] WANG Jihong, SHI Wenxiao. Partially overlapped channels and flow-based end-to-end assignment for multi-radio multi-channel wireless mesh networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA:IEEE Press, 2015: 3770-3775.
- [7] KYUNGJUN K, JONGHOON P. Performance analysis of the multi-channel wireless mesh networks[C]//Proceedings of International Conference on Computer Applications for Communication, Networking. Washington D. C., USA:IEEE Press, 2012: 161-166.
- [8] JING Tao, SHI Hongbin, HUO Yan, et al. A novel channel assignment scheme for multi-radio multi-channel wireless mesh networks[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Algorithms. Washington D. C., USA:IEEE Press, 2011: 261-270.
- [9] WANG Jihong, SHI Wenxiao, JIN Feng. On channel assignment for multicast in multi-radio multi-channel wireless mesh networks: a survey[J]. China Communications, 2015, 12(1): 122-135.
- [10] 乐光学, 李明明, 丁 辉, 等. 无线 Mesh 网络中基于演

- 化博弈的抗振荡信道分配策略[J]. 电子学报, 2015, 44(1):176-185.
- [11] ROHITH D V, ARUN A K, MURTHY C S R. A non-cooperative game-theoretic approach to channel assignment in multi-channel multi-radio wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2011, 17(6):411-435.
- [12] 邱振谋, 姚国祥, 官全龙, 等. 多信道无线 Mesh 网络的多播信道分配算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(6):107-109.
- [13] 刘蔚, 赵宇, 陈锐. 基于 0-1 规划的网络优化模型及其在信道分配中的应用[J]. 计算机工程, 2016, 42(5):93-101.
- [14] LAI Xiaochen, LIU Quanli, WANG Wei, et al. An algorithm of channel assignment of MAC layer in Ad Hoc network based on dynamic game with perfect and complete information[C]//Proceedings of International Conference on Industrial Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems. Berlin, Germany: Springer, 2012: 144-155.
- [15] ALMASAEID H M, KAMAL A E. Receiver-based channel allocation in cognitive radio wireless mesh networks[J]. *ACM Transactions on Networking*, 2015, 23(4):1286-1299.
- [16] 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.
- [17] KAUR A, SINGH P. Distributed channel assignment in 802.11: a survey[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 105(1):20-22.
- [18] 张招亮, 陈海明, 黄庭培, 等. 无线传感器网络中一种抗无线局域网网络干扰的信道分配机制[J]. 计算机学报, 2012, 35(3):504-517.
- [19] 贾杰, 李燕燕, 陈剑, 等. 认知无线网状网中基于差分演化的功率控制与信道分配[J]. 电子学报, 2013, 41(1):62-67.
- [20] 黄开枝, 洪颖, 罗文字. 基于演化博弈机制的物理层安全协作方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1):193-199.
- [21] 张继, 张大方, 谢鲲, 等. 一种基于演化博弈的分簇协作路由算法[J]. 电子学报, 2016, 44(9):2158-2163.
- [22] 梁锤焯, 曹奇英, 沈士根. 无线传感网络节点模糊信任演化模型[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(8):131-135.
- [23] 刘保见, 张效义, 李青. 基于演化博弈论的无线传感网监测节点分群算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(8):2157-2162.
- [24] MARTINEZ D M, ANDRADE A G. FPGA implementation of dynamic channel assignment algorithm for cognitive wireless sensor networks [J]. *International Journal of Electronics*, 2015, 102(7):1177-1189.
- [25] GHAHFAROKHI B S. Distributed QoE-aware channel assignment algorithms for IEEE 802.11 WLANs [J]. *Wireless Networks*, 2015, 21(1):21-34.
- [26] 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):231-237.

编辑 顾逸斐

(上接第 119 页)

参考文献

- [1] HELOU M E, IBRAHIM M, LAHOUD S, et al. A network-assisted approach for RAT selection in heterogeneous cellular networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(6):1055-1067.
- [2] ALGHAMDI S A. Load balancing Ad hoc on-demand multipath distance vector (LBAOMDV) routing protocol[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 2015(1):1-11.
- [3] TRESTIAN R, ORMOND O, MUNTEAN G M. Performance evaluation of MADM-based methods for network selection in a multimedia wireless environment[J]. *Wireless Networks*, 2015, 21(5):1745-1763.
- [4] 郑杰, 李建东, 刘勤, 等. 异构网络中时延最小的多接入业务分配算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(2):1-9.
- [5] 张丽娜, 朱琦. 异构网络中多网络并行传输的网络选择算法[J]. 信号处理, 2014, 30(10):1176-1184.
- [6] DAI Jingyi, WANG Shaowei. Clustering-based interference management in densely deployed femtocell networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2016, 11(4):175-183.
- [7] ALI T, SAQUID M. Analysis of an instantaneous packet loss based vertical handover algorithm for heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(5):992-1006.
- [8] 余思翰, 张晓玲, 梁炜. 无线多媒体传感器网络并发传输性能建模及实验评估[J]. 信息与控制, 2016, 45(3):328-334.
- [9] AHUJA K, SINGH B, KHANNA R. Optimal network selection in heterogeneous wireless environment for multimedia services [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(1):441-454.
- [10] 江振华. 基于业务重要性的异构无线网络资源管理技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] MA Xiao, SHENG Min, LI Jie. Interference migration using concurrent transmission for energy-efficient HetNets[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2):1-10.
- [12] LIM G, XIONG C, CIMINI L J, et al. Energy-efficient resource allocation for OFDMA-based multi-RAT networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(5):2696-2705.
- [13] 廖洁, 张磊, 马飒飒. 一种低能耗的 WSN 覆盖控制优化策略[J]. 计算机工程, 2016, 42(11):109-113.
- [14] HYUNGSIK J, ZHANG Rui. Throughput maximization in wireless powered communication networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1):418-428.
- [15] 孙毅, 葛雨明, Herborn S, 等. 异构网络中多模终端业务流分发技术研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(6):1004-1013.

编辑 刘冰