



无线 mesh 网络中可信协同信道资源分配策略

李明明¹, 乐光学², 代绍庆¹, 马柏林²

(1. 嘉兴职业技术学院, 浙江 嘉兴 314001; 2. 嘉兴学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 为了有效提升无线 mesh 网络信道资源的利用率和网络服务质量, 提出基于可信协同的信道资源分配策略。针对节点自适应特点, 引入博弈理论、建立节点的信誉机制以实现节点可信协同并优化信道分配结果。仿真实验分别对节点服务等级、网络收益结果作相应评价。实验结果发现节点服务等级对节点网络收益有直接影响, 当协同服务等级达到 3 时, 网络收益状况最佳, 此时节点跳数与服务等级呈协同关系; 对比经典协同算法, 在相同网络拓扑环境下, 可信协同信道资源分配策略分别是 UACRR 算法、DMP-MBA 算法的 1.04 倍、1.069 倍, 明显占优。

关键词: 无线 mesh 网络; 信誉机制; 协同服务

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017128

Dependable-cooperative channel resource allocation scheme in wireless mesh network

LI Mingming¹, YUE Guangxue², DAI Shaoqing¹, MA Bolin²

1. Jiaxing Vocational Technology College, Jiaxing 314001, China

2. Jiaxing University, Jiaxing 314001, China

Abstract: For improving utilization of channel resources and service quality effectively in wireless mesh network, a dependable-cooperative channel resource allocation scheme was proposed. According to the adaptive features of mesh node, engaging game theory and establishing reputation mechanism to achieve dependable-cooperative of nodes, and channel resource allocation result was utilized. The comparison of this experiment proves the situation of service level and network utility of cooperative service. The result of it shows that networks benefit will be optimal when the cooperative service level is 3 and node hops synergies with the service level. Comparing with classic synergistic algorithm, with the same context of network topology, dependable-cooperative channel allocation strategy is clearly dominated with 1.04 on UACRR and 1.069.

Key words: wireless mesh network, reputation mechanism, cooperative service

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-04-03

通信作者: 乐光学, guangxueyue_111@163.com

基金项目: 浙江省教育厅科技项目基金资助项目 (No.Y201636319); 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LY12F02019); 中央财政支持地方高校发展专项 “无线 mesh 网络若干关键技术研究”

Foundation Items: Zhejiang Provincial Science and Technology Fund of China (No.Y201636319), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LY12F02019), Central Government Support for Local Development Project “Research on Some Critical Technologies of Wireless Mesh Networks”

1 引言

随着移动互联技术的深入和边缘业务对带宽需求量的增加,在异构无线网络中通过部署基础设施,如基站、无线网络接入点等方式以缓解带宽需求^[1,2]。然而,传统无线网络可用信道数量有限,用户接入数量的增加会导致通信链路负荷加重,信道资源分配成为异构无线网络的研究关键^[3]。无线 mesh 网络作为一种接入式异构网络,其网络节点特性决定了终端节点可自组织分配信道以缓解节点接入压力。但具有自适应能力的 mesh 节点之间存在恶意竞争、抢夺资源等问题,导致通信域内节点接收信道资源的可信度下降,降低了网络服务质量^[4]。如何设计一种新的信道分配策略,有效提升网络服务质量并充分利用无线 mesh 网络的可信信道资源,是当前无线 mesh 网络信道分配技术中急需解决的问题之一。

可信服务的关键技术之一是对 mesh 网络的可信信道资源实现自适应有效分配。通过可信服务机制,稳定提升服务质量、保证节点自适应性,实现信道资源的有效分配^[5]。Ye Q 等人^[6]提出了多用户协作模式,旨在降低信道资源分配的能耗,以提升网络服务质量。从认知协同技术层面出发,异构网络节点之间的资源协同管理对减小跨层干扰、提升网络性能有较好的效果^[7,8]。因此,寻找可信协同式作业的节点应用于信道资源分配,提升网络性能、保证负载均衡,是无线 mesh 网络可信协同信道资源分配的研究关键。

为了进一步完善无线 mesh 终端节点的协同服务,建立节点信誉机制^[4]。剔除非合作节点,保留具有协同服务能力的节点,根据节点信任度,展开信道资源的重新分发和使用^[9]。信道资源主要指同时满足主干网络上 mesh 路由和终端节点通信链路上数据流正常通信的一类信道资源^[10]。Pedro B 等人^[11]提出了基于可协调转发—固定接收的信道分配策略,策略指出给接收端(mesh 终

端节点)所服务的信道是固定且可信的。无线 mesh 网络节点的自适应一方面使得节点自由转发、接收信道资源,另一方面也导致了恶意节点、竞争节点非法占有资源、浪费资源,因而很难确定信道资源在终端节点上是否能够充分被利用^[12]。如何通过信道资源分配以保证服务质量^[13,14]、网络稳定性和连通性,是无线 mesh 网络整体性能提升的关键研究点。

基于已有研究结果,建立无线 mesh 网络节点的信誉机制,根据信誉机制产生的节点服务等级,将具有协同作业能力的服务节点用于转发信道资源。联合博弈理论建立节点可信协同服务机制,分析并计算这些信道资源的网络收益状况,以评价这一协同服务机制的有效性和可行性;对比已有经典的协同服务机制和信道资源分配机制,通过网络仿真实验平台对比验证。

2 相关工作

网络服务质量作为无线 mesh 网络的核心经济目标之一,对可信协同信道资源的分配,其关键在于提升网络服务质量。由于参与服务的数量有限,无线 mesh 网络信道作为一种可用资源被网络节点服务于不同的通信域。参考文献[15]从可靠信道资源有限和动态节点服务易中断等问题出发,展开动态无线网络的资源评估与调度研究,目标在于提升网络服务质量(quality of service, QoS)和稳定网络收益,提出了基于自适应节点的可信信道资源收益与风险均衡博弈模型,由于模型依赖于传统的单链路通信,节点通信时易增加信道资源冗余。

将链路通信与节点分簇模式相结合,展开可信信道资源分配,已广泛应用于无线网络的资源分配研究中^[16]。参考文献[17]针对 Ad Hoc 网络中因节点数量增加导致的节点性能下降问题,采用了 0-1 规划的信道资源分配和网络优化模型,提出了基于分簇的 TBCA&LS (tree based channel



assignment & link scheduling) 资源分配算法。该算法的优势是将信道分配和链路调度相结合,降低相邻链路冲突、增加并行传输量,实现了网络吞吐量的提升和信道资源优化分配。算法的不足为:采用集中式信道资源分配和调度,产生的网络开销和算法时间复杂度较大,虽然提升了节点的网络性能,未分簇的节点上服务质量没有较大提升。参考文献[18]针对传统蜂窝网中的信道分配和链路通信问题,提出了基于 D2D 链路整合的资源分配机制,该方案优势体现在:采用启发式算法实现信道资源分配,较单一资源优化方案在性能和复杂度方面明显占优;但尚未体现节点的协同服务能力。将信道资源分配方案应用于宏蜂窝网 (macrocell) 研究中,参考文献[19]基于用户速率公平原则和凸优化机制,展开了分布式信道资源分配设计。算法的优势在于针对不同簇的用户展开基于功率的子信道分配,算法有效缓解节点跨层干扰、提升节点通信的平均速率、让节点获取更高的满意度。但尚未提出节点的性能和网络服务质量方面的优化情况和研究结果。参考文献[20]的算法重点以保证用户性能为主要研究目标,基于联合的斯坦克尔伯格博弈思想,作为宏用户的资源分配接入策略,对于传统的信道资源分配有一定优化效果。为了体现终端用户的协作服务能力,参考文献[21,22]针对云虚拟机提出了灰色波形预测算法的资源分配机制,重点在于实现节点的随机服务请求能力,提高用户综合服务质量。但算法尚未体现节点之间的协同作业能力和节点的可信度。综合而言,仅通过资源调度的方式来实现信道资源优化分配,难以有效提升网络服务质量。

将协同通信应用于可信信道资源分配,是当前协同服务研究的热点。参考文献[23]定义了网络协同服务,指出所有节点之间共同协调,并协作以优化的方式完成使网络终端互联互通的任务。对于异构无线网络环境,首要考虑的是无线

信道资源的可靠性。如果终端节点上的可用信道资源存在冗余或空闲状态、恶意竞争节点已占用信道资源,通信链路上将无法提供协同服务节点。参考文献[24]联合研究节点协同通信和可信信道资源分配,提出了基于信道资源分配的认知无线 mesh 网络跨层优化设计方案,其研究侧重点在通过跨层设计优化信道分配结果以提升网络服务质量。但该算法在资源优化中尚未指出网络中的信道资源是否可信、可靠,因而需要根据节点可信度来评价无线 mesh 网络节点是否具有可信信道资源。参考文献[4]提出了基于节点信誉机制的路由安全协议方法,该方法虽然侧重于处理多跳无线网络中的路由协议设计,但是以评估节点之间的信任关系为基础。参考文献[5]设计了一种基于 FOAF (friend of a friend) 演化博弈的网络资源可信度判断方法,重点在于计算节点的可信度,即当可信节点转发信道资源时,直接以节点上的网络吞吐量的收益为主要评价指标。为了获取更多网络收益,参考文献[25]提出了效用驱动下的网络资源协同预留算法 UACRR (utility-driven-based algorithm for co-allocation resource reservation),其侧重点为通过量化资源竞争力、收益、市场价格三者的协同服务,使网络资源的获取途径以网络收益为主要手段。但是,算法尚未提出如何协同以上 3 种资源以及调度竞争、贪婪节点窃取信道资源的方法,且该协同预留机制以网格计算为主。

为了进一步实现节点的协同服务和优化信道分配结果。将具有协同服务能力的节点进行分簇,分簇方式为不同服务等级的节点分工协作。因此,协同服务成为无线 mesh 网络节点转发信道资源的主要工作方式。参考文献[26]提出基于参数优化的网络范围扩展技术,通过协同调度技术减小上下行链路干扰,但是节点之间的博弈问题容易导致多信道冲突。将博弈理论应用于节点行为分析,是近年来无线网络节点行为分析的热

点^[27]。为了缓解服务节点自适应性,参考文献[28]设立了一种基于顽健性的离线资源分配方法,假设动态网络中的节点分配资源属于非合作博弈过程,最终实现资源的帕累托最优。参考文献[29]提出了基于 SPA (second price auction, 第二竞价拍卖机制) 机制的博弈理论应用于网格计算中,其方法为通过重复拍卖机制以获取网格节点的最优网络收益。参考文献[30]将这种博弈方法应用于处理对等网络的多播研究中,通过多拍卖博弈缓解节点之间的恶意竞争和节点自私行为,提出了基于多拍卖机制的分布式多播协议 DMP-MBA (distributed multicast protocol based multi-bids auction mechanism), 但该模型的主要应用环境为 P2P 网络。为了有效评价认知无线网络的信道可靠性, 参考文献[31]引入了基于价格预测最优的用户竞价拍卖机制, 联合高斯回归过程, 完成节点博弈过程。然而, 上述基于博弈思想的节点行为分析不完全适用于无线 mesh 网络环境中, 针对存在的恶意节点和具有协同服务能力的节点需做深入的博弈分析。

结合已有研究结果, 根据节点行为分析结果, 无线 mesh 网络节点之间存在的恶意竞争等问题严重影响信道资源的分配。基于已有的 DMP-MBA 协同调度算法和 UACRR 资源预留算法, 针对无线 mesh 网络中的信道资源, 其协同可信信道资源分配需要考虑以下几点。

- 如何获取可靠的信道资源: 针对无线 mesh 网络中的可靠信道资源, 展开基于网络效用驱动的信道分配策略, 优化信道分配结果, 并将信道分配结果服务于可以参与服务的节点群集。
- 如何处理节点之间的竞争和恶意争夺资源问题: 针对节点的自适应性问题, 通过节点的可信度判断并剔除节点群集中无法服务的节点。
- 如何实现协同服务: 将以获取到可靠信道

资源的节点群集进行缓存, 引入基于网络效用与节点服务等级均衡的博弈关系思想, 将可靠信道资源应用于具有协作能力的 mesh 终端节点上, 以提升网络整体服务能力。

3 可信信道资源分配建模与分析

为了有效提升网络服务质量, 将无线 mesh 终端节点群集中无法完成协同作业的节点剔除, 保留具有服务能力的节点。根据节点的不同服务等级, 将不同服务等级的节点进行聚类完成协同服务。针对无线 mesh 网络中参与信道资源获取的所有节点, 做如下假设:

- 所有节点均具有获取信道资源和服务主干网络的能力;
- 所有节点上具有 2 个射频接口;
- 所有节点均具有参与节点群集的博弈资格;
- 所有节点的服务过程均在给定周期 t 内完成。

在无线 mesh 网络节点之间, 针对可信资源建立节点服务机制, 以选取适合协同作业的节点。协同过程通过信誉机制来判断节点之间是否正常通信和数据转发, 继而完成博弈评价。

3.1 问题描述

用户要获取网络节点上可靠的信道资源, 需要考虑节点是否愿意服务。这时在终端节点上存在以下几种情况: 愿意服务的节点和不愿意服务的节点。其中愿意服务的节点分布状况如下: 服务能力较差的节点, 其网络效用也会受到影响; 服务能力较好但是在服务期间抢占资源但不转发的节点, 严重影响节点的服务能力^[32]。问题模型示例如图 1 所示, 假设在两个通信域内, 分别采用 4 条通信信道进行数据转发, 其中 A、B、C 节点属于通信域 1, 其他节点属于通信域 2。现在, A、B 节点均通过要信道 1 转发数据, C、D 的接口相连存在信道冲突问题, 这时可能产生信道资源的占用或者抢



占。E、F、G 节点具有一定服务能力，但是无法获取信道资源，H 节点占有信道 4 但是其不愿意服务。

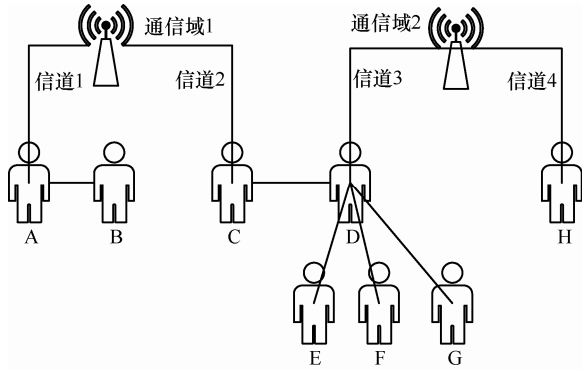


图1 问题模型示例

对于类似这样的网络节点状况：没有信道资源（如 E、F、G 节点）、抢夺信道资源（如 C、D 节点）、不参与服务（如 H 节点）、没有协作能力（如 A、B 节点），急需提出新的信道分配策略以缓解问题。

定义 1 在无线 mesh 网络的主干网络上，在第一次用户资源转发时只考虑两种网络终端节点：服务节点和不参与服务的节点，机制剔除不参与节点，对于在过程中再参与服务的节点不考虑加入机制内，对于服务节点，根据节点与信道通信情况展开节点信誉机制，根据信道资源在节点上的信任度计算节点的服务等级。

根据上述定义，设定节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，信道资源的集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ ，参与服务的节点集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}, m \leq n$ 。根据节点的信誉度挑选符合条件的节点群集，针对节点群集，展开信道资源的分配。

定义 2 在无线 mesh 网络中，可靠信道资源，即满足所有节点之间通信时均能保证节点正常通信的信道资源。由于无线 mesh 网络中信道分配是 NP 问题，信道分配由参与服务的节点群集网络收益决定。

根据定义 1、定义 2，无线 mesh 网络信道资源分配策略出发点为根据服务节点群集的网络收

益。如果可服务节点 $v_i \in V$ 与可靠信道资源 $c_p \in C$ 成功通信，则有其资源分配的优化方案： $S = \{S(v_{ij}, c_p) | v_i, v_j \in V, i \neq j, c_p \in C\}$ 。其中 $S(v_{ij}, c_p)$ 表示任务节点 v_i 通过信道资源 c_p 与其邻居内的目标节点 v_j 完成一次通信， $v_{i,j}$ 表示节点 v_i 与节点 v_j 通信。

3.2 服务节点信誉机制

为了实现节点通信时的信道资源是优化分配的，对于无线 mesh 网络拓扑存在的不稳定性，其信道分配结果取决于节点通信过程中是否使用了可靠信道资源，因此给定其信道分配方案为：

$$S(v_{ij}, c_p) = \sum_{i,j \leq n} \sum_{p \leq l} k(v_{ij}, c_p) \quad (1)$$

其中， $k(v_{ij}, c_p)$ 表示任务节点与目标节点的通信值，当 $k(v_{ij}, c_p) = 1$ 时表示可靠信道资源已应用于通信过程，否则任务节点与目标节点未用可靠信道资源进行通信。因此，判断信道资源是否是可靠的依据是节点是否在通信链路上。如式 (2) 所示，如果节点在通信链路上，则 $c_{l,p}$ 为 1，此时可记为 c_p ，表示节点通信已采用信道 c_p ：

$$c_{l,p} = \begin{cases} 1, & \text{信道 } p \text{ 在链路 } l \text{ 上} \\ 0, & \text{信道 } p \text{ 不在链路 } l \text{ 上} \end{cases} \quad (2)$$

在无线 mesh 网络中，任务节点利用可靠信道资源与目标节点通信，目标节点的信誉度未知，需要计算每一个节点的信誉度，以实现信道资源的优化分配。根据经济学概论中对于信誉度的定义：“评定年份累计到期贷款归还额与评定年份累计到期贷款总额的商即企业信誉度评价指标”^[17]。因此，任务节点与目标节点通信时某一次的信道分配方案与这两个节点通信总次数内的商，即评价目标节点的信誉度结果，如式 (3) 所示：

$$\Phi(v_{i,j}, c_p) = 10 \cdot \frac{S(v_{i,j}, c_p)}{\sum S(v_{i,j}, c_p)} \quad (3)$$

其中， $\Phi(v_{i,j}, c_p)$ 表示目标节点的信誉度，如

果给定[1,10]为信誉度空间, 则式(3)作为节点服务等级需要在此基础上乘以10, 因而 $\Phi(v_{i,j}, c_p)$ 为节点的服务等级。

3.3 协同信道资源分配建模与分析

为了获得最优信道分配结果, 参考文献[15,16]均提出以网络收益作为信道分配策略的主要评价指标。参考文献[17]指出节点群集性服务的收益与风险并存。使 $U(v_{i,j}, c_p)$ 表示通信时间内将数据从节点 v_i 通过信道资源 c_p 与其邻居节点 v_j 完成转发所获得的所有网络收益。

$$U(v_{i,j}, c_p) = \sum S(v_{i,j}, c_p) \cdot B_{v_{i,j}} \quad (4)$$

其中, $B_{v_{i,j}}$ 表示目标节点接收到的有效带宽。如定义1所述, 愿意参与的节点中同时存在热心节点和贪婪节点, 热心节点愿意重复利用信道资源, 贪婪节点可能中途关闭通信接口而占用信道资源不进行数据转发。因此, 需要考虑节点的网络收益和节点承担的网络支付, 其网络支付为节点服务过程中产生的流量损失, 定义其支付函数 $H(v_{i,j}, c_p)$ 为:

$$H(v_{i,j}, c_p) = \sum S(v_{i,j}, c_p) \cdot \left(\frac{B_{v_{i,j}}}{n_{c_p}} \right) \quad (5)$$

其中, $\frac{B_{v_{i,j}}}{n_{c_p}}$ 表示服务节点之间的网络带宽消耗, n_{c_p} 表示服务节点通过信道 c_p 时的节点射频接口数量。

根据不完全信息的非合作博弈思想, 得到参与协同服务的节点群集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 的网络效益期望结果为:

$$E(v_{i,j}, c_p) = (U(v_{i,j}, c_p) - H(v_{i,j}, c_p)) \cdot \Phi(v_{i,j}, c_p) \quad (6)$$

式(6)表示节点网络吞吐量随着节点对其邻居节点的服务能力和节点的支付能力而变化, 节点的服务等级越高, 节点支付量越大, 节点的服务成本同时增大。

综合式(1)~式(6)得到协同服务节点的网络

络效益博弈模型:

$$\begin{cases} E(v_{i,j}, c_p) = (U(v_{i,j}, c_p) - H(v_{i,j}, c_p)) \cdot \Phi(v_{i,j}, c_p) \\ E_{(v_{i,j}, c_p)}^{\max} = \max((U(v_{i,j}, c_p) - H(v_{i,j}, c_p)) \cdot \Phi(v_{i,j}, c_p)) \\ E_{(v_{i,j}, c_p)}^{\min} = \min((U(v_{i,j}, c_p) - H(v_{i,j}, c_p)) \cdot \Phi(v_{i,j}, c_p)) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $E(v_{i,j}, c_p)$ 表示服务节点的网络效益期望值。 $E_{(v_{i,j}, c_p)}^{\max}$ 表示服务节点的最大网络效益, $E_{(v_{i,j}, c_p)}^{\min}$ 表示服务节点的最小网络效益。

如果节点 v_i 在时间 t 内成功完成服务并获得最大收益, 而在多跳无线 mesh 网络中, 竞争节点之间的纳什均衡具有唯一性。针对节点信誉度与网络收益之间的能量损失, 参考文献[12]将信道资源之间存在的物理噪声误差认定为信誉度贴现因子。

服务节点之间的协同关系体现在时间的统一性, 在 t 时刻, 对于协同服务的节点, 其协同服务等级为 $\Phi(t, v_{i,j}, c_p) = \Phi(v_{i,j}, c_p) \cdot t$ 。同理, 节点此时的网络收益和网络支出函数为: $U(t, v_{i,j}, c_p)$ 、 $H(t, v_{i,j}, c_p)$ 。则 $t+1$ 时, 协同服务的节点的协同服务等级为: $\Phi(t+1, v_{i,j}, c_p) = \Phi(t, v_{i,j}, c_p) + \Delta t$, 网络收益和网络支出分别为: $U(t+1, v_{i,j}, c_p)$ 、 $H(t+1, v_{i,j}, c_p)$, 此时, 协同服务节点之间最大的网络效用为:

$$E_{(t+1, v_{i,j}, c_p)}^{\max} = \max((U(t+1, v_{i,j}, c_p) - H(t+1, v_{i,j}, c_p)) \cdot \Phi(t+1, v_{i,j}, c_p)) = \max((U(t, v_{i,j}, c_p) - H(t, v_{i,j}, c_p)) \cdot (\Phi(t, v_{i,j}, c_p) + \Delta t)) \quad (8)$$

其中, Δt 是 $t+1$ 时刻节点 v_i 的网络效用时间调度因子, 在博弈过程中, 时间调度因子作为节点服务其他节点所消耗的时延, 其范围在 $0 \leq \Delta t \leq 1$ 。

根据演化博弈理论, 简化式(8), 得到:

$$0 \leq \max((U(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p) - H(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p, t)) \cdot (\Phi(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p))) / \max((U(t, v_{i,j}, c_p) - H(t, v_{i,j}, c_p)) \cdot (\Phi(t, v_{i,j}, c_p))) \leq 1$$

(9)



根据纳什均衡稳定求解的唯一性, 协同服务节点群集旨在最大化网络收益, 因此, 当且仅当式 (9) 满足 $U(t, v_{i,j}, c_p)$ 最大化而网络支付函数低于网络效益平均值。因此, 博弈模型改进模型为:

$$\begin{cases} 0 \leq \max((U(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p) - H(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p, t)) \cdot \\ (\Phi(t + \Delta t, v_{i,j}, c_p))) / \max((U(t, v_{i,j}, c_p) - \\ H(t, v_{i,j}, c_p)) \cdot (\Phi(t, v_{i,j}, c_p))) \leq 1 \\ \max((U(t, v_{i,j}, c_p) - H(t, v_{i,j}, c_p)) \cdot (\Phi(t, v_{i,j}, c_p))) \\ \leq \bar{E}(t, v_{i,j}, c_p) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\bar{E}(t, v_{i,j}, c_p)$ 为平均的网络效益期望值, 即 $\sum_{N,l} (\bar{U}(v_{i,j}, c_p) - \bar{H}(v_{i,j}, c_p)) n$ 。参考文献[31]提出了一种基于稳定均衡的最优政府状态和最差结果的无政府状态博弈方法, 该方法提出当无线 mesh 网络节点处于这两种状态时, 其稳定均衡解为平均政府状态与最优政府状态的比值。简化式 (10), 得到式 (11), 即可满足纳什均衡条件:

$$\frac{\sum_{i,j \leq n} \sum_{p \leq l} k(v_{i,j}, c_p)}{\sum_{i,j \leq n} \sum_{p \leq l} k(v_{i,j}, c_p)} = \Phi(v_{i,j}, c_p) \leq \frac{\frac{\bar{B}_{v_{i,j}}}{n_{c_p}}}{B_{v_{i,j}} - \frac{B_{v_{i,j}}}{n_{c_p}}} \quad (11)$$

式 (11) 表示节点的服务等级受节点上信道资源通信的平均带宽值与评定的带宽值之商影响, 当达到稳定均衡时, 其网络服务等级的值小于或等于服务节点的有效带宽利用率。

4 实验与分析

为了有效评价可信协同服务机制的有效性和可行性, 展开节点服务等级评价和节点网络收益状况评价。两组实验中, 节点服务等级评价主要基于 5 组随机节点的聚类过程, 通过聚类过程完成博弈, 在博弈结果中评价节点服务等级对节点

网络吞吐量的影响; 节点网络收益状况评价则侧重于对比已有经典信道分配策略如参考文献[25]中的 UACRR 算法、参考文献[29]中的 DMP-MBA 算法与协同服务机制资源分配模型, 通过对比参数、结果综合分析基于可信协同信道资源分配 (dependable-cooperative channel resource allocation, DCCRA) 策略的有效性。

实验基于 MATLAB 仿真平台模拟实际网络拓扑, 通过数据拟合, 给定 5×5 网络拓扑环境的 mesh 网络, 网络初始带宽范围为 $50 \sim 100$ Mbit/s。一方面分析无线 mesh 网络节点为其邻域内其他节点服务时, 产生的网络效益受服务等级影响的具体等级数量; 另一方面针对不同信道分配策略和协同服务机制, 分析在协同服务下网络节点用于能量消耗后的网络收益状况。

4.1 节点服务等级评价

为了有效验证节点服务等级协同资源分配的影响, 在无线 mesh 网络中随机分布 5 组实验节点, 每组网络拓扑中包括 25 个节点, 通信范围在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。图 2 结果即所有节点的初始状态, 此时节点的通信域中节点状态较分散。图 3 结果为 5 组节点在节点服务等级分别为 1~5 时的网络有效吞吐量结果, 其中网络带宽的初始值范围为 $54 \sim 100$ Mbit/s。

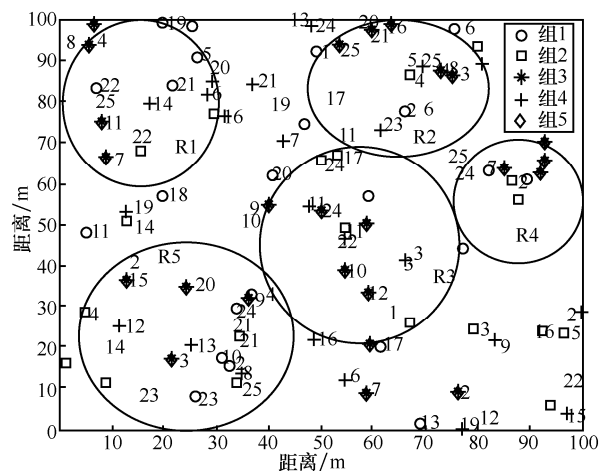


图2 不同服务等级节点的初始状态

在实验过程中,不同服务等级的节点上的有效网络吞吐量变化结果如图3所示。根据式(11)所示,根据节点带宽比值情况分析不同节点的服务等级,其中网络吞吐量数据情况

结果见表1。

图3结果表明:

- 所有节点在服务等级为3时,网络有效带宽变化较其他服务等级更为平缓,而在此服

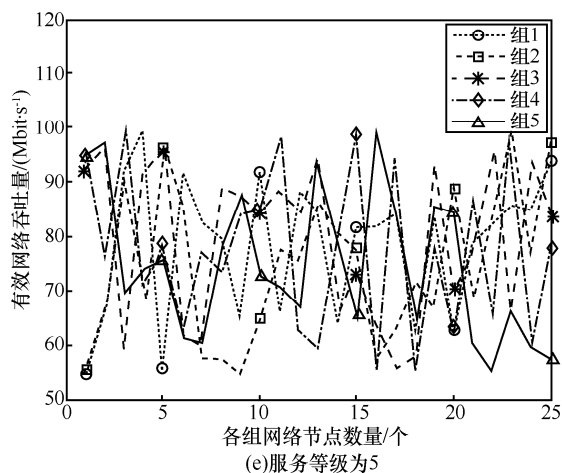
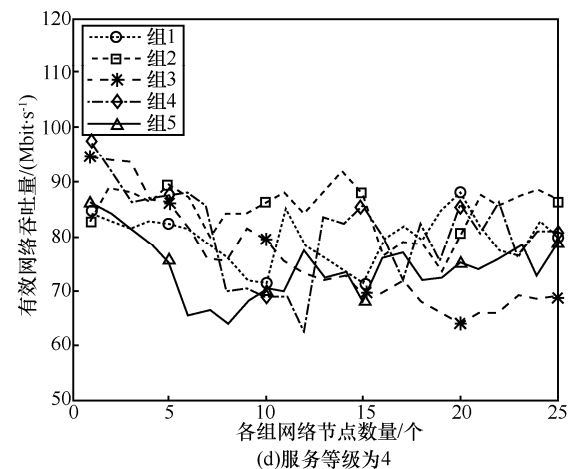
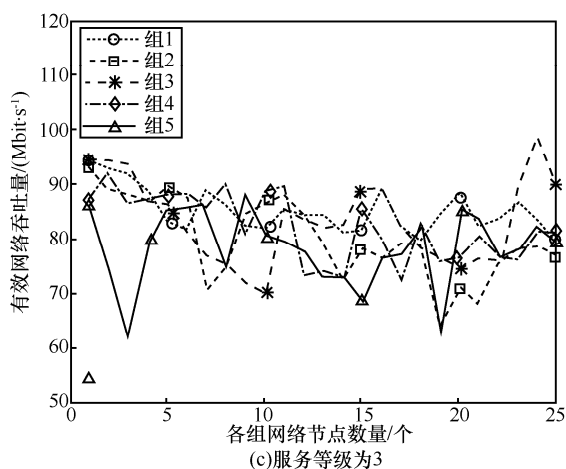
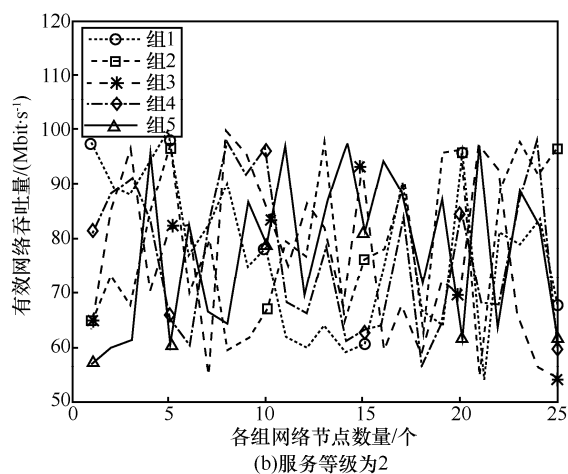
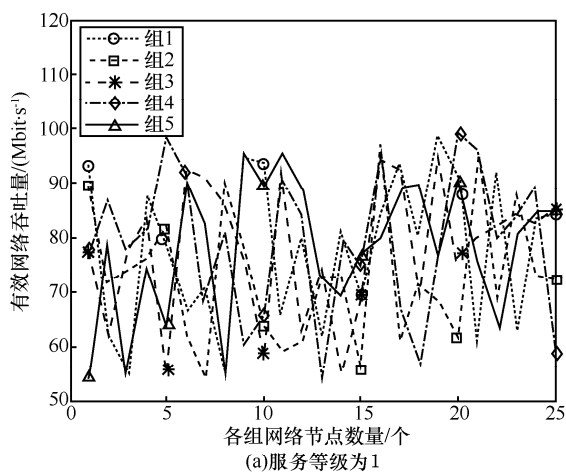


图3 不同服务等级节点的有效网络吞吐量



表 1 各组节点上平均网络带宽值数据结果

分组服务等级	队列 1 平均带宽值 (/Mbit·s ⁻¹)	队列 2 平均带宽值 (/Mbit·s ⁻¹)	队列 3 平均带宽值 (/Mbit·s ⁻¹)	队列 4 平均带宽值 (/Mbit·s ⁻¹)	队列 5 平均带宽值 (/Mbit·s ⁻¹)
等级 1	77.928 9	72.820 1	78.039 3	79.119 3	78.189 8
等级 2	81.928 9	77.820 1	78.039 3	80.717 4	78.435 8
等级 3	85.039 5	79.858 7	83.287 8	82.023 9	78.618 7
等级 4	82.247 8	75.490 4	79.037 8	80.624 6	76.638 0
等级 5	78.545 3	74.704 1	79.805 8	84.145 2	74.615 6

务等级上得到的平均网络带宽值、各组网络节点均收益高于其他服务等级情况；

- 在服务等级<3 时,有效网络吞吐量的振动幅度较其他几种服务等级大,同时,5 组网络节点的平均网络带宽值没有发生较大改变；
- 在服务等级>3 时,各组网络节点的有效网络吞吐量振动幅度明显提升,同时,5 组网络节点的平均网络带宽值均呈现下降趋势。

从表 1 数据结果看,在每个队列中,从初始化状态到稳定状态,网络上的有效带宽值由频繁抖动趋于稳定继而再次频繁。有效吞吐量结果中队列 1~队列 5 均从由服务等级 1 开始上升,到服务等级 3 时结果稳定,到服务等级 5 时逐渐频繁。

初始状态时,节点不断聚类,将非协同节点剔除,完成协同信道资源的转发,随着服务等级的不断升高,有效网络吞吐量逐渐提升;当服务等级为 3 时,达到了最佳稳定状态,所有队列中的网络平均带宽值均最优;当服务等级继续提升时,随着网络节点出现的疲劳或者倦怠、节点转发资源的开销增加,导致平均网络带宽值的不断下降,因而网络吞吐量出现抖动。

服务等级为 3 时组各节点的稳定状态如图 4 所示。

图 4 结果表明,当服务等级为 3 时,各组节点的有效网络吞吐量均达到最优状态,此时队列 3、队列 5 中的节点聚集度最高,对应的协同信道资源分配效果优于其他几组网络节点,当前的网络处于稳定均衡状态。

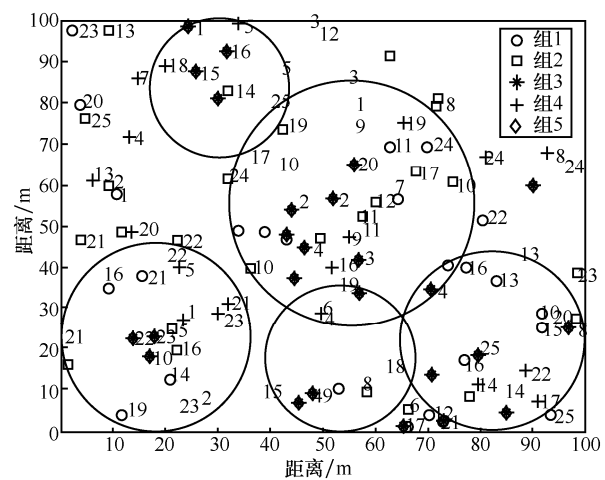


图 4 服务等级为 3 时各组节点的稳定状态

无线 mesh 网络节点的自适应性不仅体现在网络节点的不同服务等级上,网络节点转发数据产生的节点跳数,对于协同信道资源的转发也产生了较大影响。参考文献[6]认为当协同服务的节点完成 3 跳时,其获得的网络有效聚合吞吐量达到最大。为了有效验证本模型中节点的跳数对网络有效聚合吞吐量的影响,根据节点的跳数和节点的服务等级相关度公式,进行仿真实验。给予参数 ∂ 作为带宽调节因子,满足:

$$T_{\partial} = \partial F + (1 - \partial)G \quad (12)$$

其中, $\partial = \frac{B_{v_{i,j}}}{\sum B_{v_{i,j}}}$ 。将式 (12) 代入式 (11)

得到节点的跳数与节点的服务等级的相关公式如式 (13) 所示:

$$n_{C_p} = 1 + (\partial \cdot \frac{B_{v_{i,j}} \cdot \Phi(v_{i,j}, c_p)}{\bar{B}_{v_{i,j}}} + (1 - \partial) \cdot \frac{\bar{B}_{v_{i,j}}}{\sum B_{v_{i,j}}}) \quad (13)$$

其中, n_{c_p} 表示节点与信道通信的接口数, 即随着节点不断往下一跳转发, 其对应的信道发生变化。根据式 (12) 得到节点跳数与节点的服务等级关系, 即节点的跳数与节点的服务等级呈一定比例关系。当 $B_{v_{i,j}} < \bar{B}_{v_{i,j}}$, 即当前的网络有效带宽值小于平均带宽值, 呈现结果为最差博弈效果; 当 $B_{v_{i,j}} > \bar{B}_{v_{i,j}}$, 节点的跳数随着服务等级提升而增加。仿真验证结果得到如图 5 所示。

根据图 5 结果, 可以发现:

- 当 5 组节点的服务等级从 1 到 5 变化时, 在所有节点的跳数趋于 3 时, 函数明显平缓, 而随着跳数和服务等级的增加, 函数结果发生较大抖动, 如图 5(a) 所示;
- 当 5 组节点的跳数随着节点的服务等级变化时, 节点服务等级为 3 的函数结果明显平缓, 而随着节点服务等级的增加、节点转发的可信信道资源量增加, 接口变化越来越快, 节点的跳数变化抖动增加, 如图 5(b) 所示。

根据以上仿真结果, 得出结论: 为了成功转发可信协同资源并有效降低节点转发开销, 节点最优跳数和节点的服务等级均为 3 时, 博弈效果最优。

4.2 节点网络收益评价

为了进一步分析信道分配策略有效性, 通过

相同网络参数对比分析 UACRR 算法、DMP-MBA 算法和 DCCRA 策略的有效性。由于 UACRR 算法、DMP-MBA 算法均采用有限信道数量进行仿真实验。实验参数设置为: 初始状态下给定 12 个信道资源, 演化过程中参与服务的节点数量允许最大值为 10 000 个, 仿真结果如图 6 所示。

对于 UACRR 算法, 当节点服务等级为 3 时, 节点群集的网络资源收益达到峰值为 6.56×10^5 , 但是节点能量归一化结果变化不明显; 对应的多条通信信道中, 服务等级越高的节点, 其网络收益不一定越高, 在收敛过程中节点的网络收益情况成离散状态; 协同服务节点数量与协同服务等级成正比, 但是协同服务等级高于 3 时, 其网络收益逐渐下降; 稳定状态时, 其网络收益曲线弯曲率在 3 种算法种最大, 即能量损失最大。

对于 DMP-MBA 算法, 当节点的服务等级在 3~4 时节点群集的网络资源收益达到峰值为 4.96×10^5 , 其能连归一化数据收敛稳定、连续, 较 UACRR 算法有较小占优。

对于 DCCRA 策略, 当节点的服务等级在 3 时, 其网络效益数据达到峰值为 6.53×10^5 ; 网络归一化结果与 DMP-MBA 算法相同, 持续稳定收敛; 得到的网络收益最大化网络收益结果为 100 Mbit/s, 稳定状态下的网络收益曲线弯曲率在 3 个算法中最小, 即能量损耗最小; 对比图 6(a)、

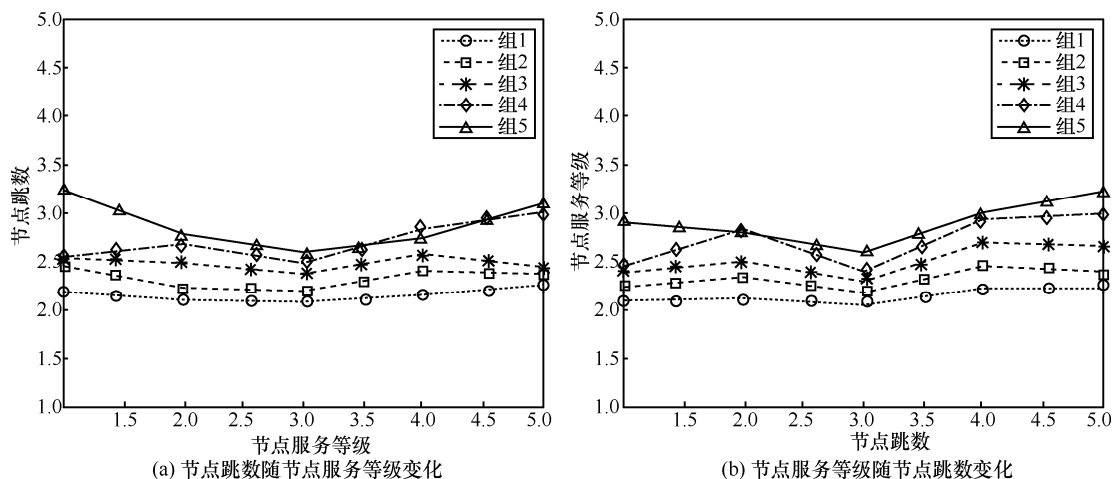


图 5 节点服务等级与节点跳数关联度结果



图 6(b)的结果, DCCRA 算法增加了博弈理论分析节点的稳定均衡状态, 因而, 当节点网络收益最优时, 每一个节点的网络负载和收益是稳定连续的; 节点的网络收益符合博弈模型中的稳定均衡环境下, 节点的网络收益保持最优状态, 有效提升了网络服务质量。

其中图 6 对应的网络仿真数据见表 2。

综合本组实验结果, 发现: 3 种无线资源分配策略中, 当节点的服务等级为 3 时, 其网络收益均能达到峰值, 此时网络 UACRR 算法的网络收益最高, 原因是该算法重点在于预留资源; 但是从能量归一化结果, DMP-MBA 算法、DCCRA 算法具有的能量损失较 UACRR 算法小, 是因为该算法预留资源需要产生大量开销。

综合分析网络拓扑中实际最大的任务数量和网络收益结果, 3 种无线资源分配策略的节点平均网络收益分别为: 65.6、63.59、67.96, DCCRA 算法收益是 UACRR 算法的 1.04 倍, 是 DMP-MBA 算法的 1.069 倍, 其具有的网络收益分别较其他两种算法的网络收益更为稳定和占优。

5 结束语

基于无线 mesh 网络节点自适应特点分析信道资源分配策略的关键, 建立服务节点的信誉机制和协同信道资源的网络博弈模型, 以实现可信资源分配。通过仿真实验验证节点的服务等级与网络收益情况, 实验结果表明可信协同信道资源分配的服务等级与节点转发资源的跳数呈比例关系, 且节点的服务等级在 3 时得到的网络收益效果最优; 对比已有的经典资源分配算法, DCCRA 策略的网络收益效果明显占优。数据结果均为实验数据, 在实际应用与不同网络环境中可能存在偏差。

参考文献:

- [1] 匡为君, 张静, 陈迎春, 等. 认知无线 mesh 网络跨层设计研究[J]. 电信科学, 2011, 27(2): 62-67.
KUANG W J, ZHANG J, CHEN Y C, et al. Research on cross-layer design for cognitive wireless mesh networks[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(2): 62-67.
- [2] 张平, 李建武, 冯志勇, 等. 认知无线网络基础理论与关键技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(2): 1-13.

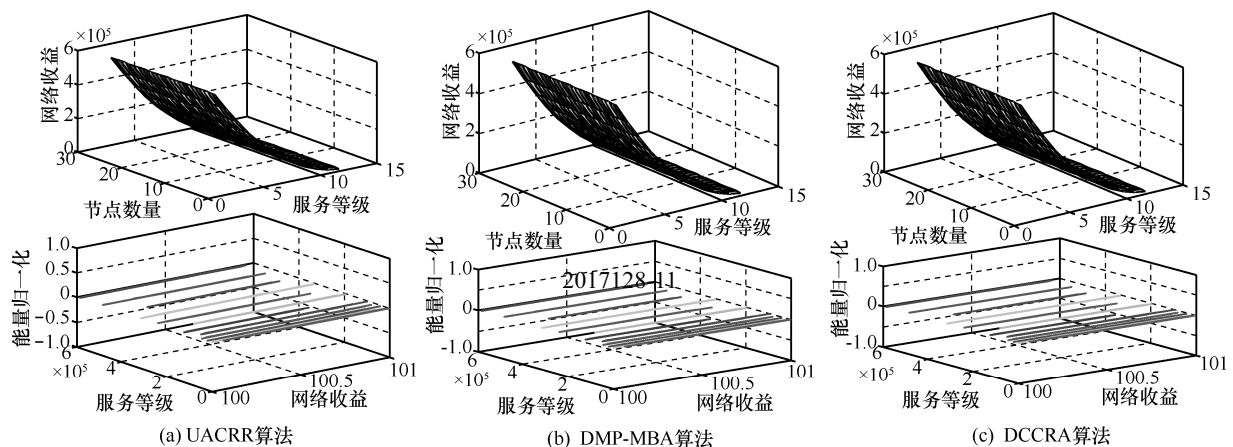


图 6 3 种信道分配策略网络收益结果

表 2 3 种服务机制网络收益数据结果

分配策略	实际最大任务数	网络效益	网络资源数量	网络带宽/(Mbit·s ⁻¹)	最优服务等级
UACRR 算法	10 000	6.56×10 ⁵	10~30	—	5
DMP-MBA 算法	7 800	4.96×10 ⁵	10	50~100	3
DCCRA 策略	9 608	6.53×10 ⁵	10	50~100	3

- ZHANG P, LI J W, FENG Z Y, et al. Research on basic theory and key technology of cognitive radio network [J]. Telecommunications Science, 2014, 30(2): 1-13.
- [3] XIE K, WANG X, LIU X L, et al. Interference-aware cooperative communication in multi-radio multi-channel wireless networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(5): 1528-1542.
- [4] XIE K, CAO J N, WANG X, et al. optimal resource allocation for reliable and energy efficient cooperative communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 4994-5007.
- [5] 林晖, 马建峰, 许力. MWNs 中基于跨层动态信誉机制的安全路由协议[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(7): 1486-1496.
- LIN H, MA J F, XU L. The research on cross-layer reputation mechanism based secure routing protocol in MWNs[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(7): 1486-1496.
- [6] 张云璐, 刘咏宁, 谢铭, 等. 基于 FOAF 演化博弈的网络资源可信度判别[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(s3): 334-342.
- ZHANG Y L, LIU Y N, XIE M, et al. Next generation network resource trust distinguish based on foaf evolutionary game theory[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(s3): 334-342.
- [7] YE Q, RONG B, CHEN Y, et al. User association for load heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2706-2715.
- [8] XIE K, WANG X, WEN J G, et al. Cooperative routing with relay assignment in multi-radio multi-hop wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(2): 859-872.
- [9] 韩冰青, 张宏, 刘凤玉, 等. 无线 Ad Hoc 网络中 QoS 感知的跨层资源分配算法[J], 2010, 21(12): 3138-3150.
- HAN B Q, ZHANG H, LIU F Y, et al. QoS-aware cross layer resource allocation algorithm in wireless Ad Hoc networks[J]. Journal of Software, 2011, 21(12): 3138-3150.
- [10] SHOJAFAR M, POORANIAN Z. LLLA: new efficient channel assignment method in wireless mesh networks[M]// Advances in Intelligent Systems and Computing. Heidelberg: Springer, 2014(237): 143-152.
- [11] FUARTE P B F, ZUBAIR M D, FADLULLAH A, et al. Channel assignment on wireless mesh network backbone with potential game approach [J]. Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2012: 43-56.
- [12] LI K Q. Analysis of cost and quality of service of time-based dynamic mobility management in wireless networks [J]. Wireless Networks, 2014(20): 261-288.
- [13] FU Q, CHEN Z G, JIANG Y X, et al. A cross-layer QOS scheme based on EDCA in multi-hop wireless mesh networks [J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10(2): 817-825.
- [14] ACELAS P, ARCE P, GUERRI J C, et al. Evaluation of the MDC and FEC over the quality of service and quality of experience for video distribution in ad hoc networks [J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 68(3): 969-989.
- [15] 胡周君, 胡志刚, 丁长松, 等. 基于博弈论健壮性增强的资源分配模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(8): 102-110.
- HU Z J, HU Z G, DING C S, et al. Game-theory-based robust-enhanced model for resource allocation in computational grids[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(8): 102-110.
- [16] 丁长松, 胡志刚, 胡周君. 基于收益与风险均衡的网格资源预留策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 88-94.
- DING C S, HU Z G, HU Z J. Grid resource reservation strategy based on balance between benefits and risks[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(2): 88-94.
- [17] 刘蔚, 赵宇, 陈锐. 无线 Ad Hoc 网络中基于 0-1 优化的两步骤资源分配算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(1): 103-108.
- LIU W, ZHAO Y, CHEN R. Zero-One integer programming based optimization model and two-phase resource optimization algorithm for wireless Ad Hoc networks[J]. Computer Science, 2017, 44(1): 103-108.
- [18] 朱正仓, 赵季红, 唐睿, 等. LTE-A 上行终端直通中面向能效的资源分配方案[J]. 通信学报, 2017, 38(2): 158-164.
- ZHU Z C, ZHAO J H, TANG R, et al. Energy-efficient resource allocation scheme for device-to-device communication underlying LTE-A uplink[J]. Journal of Communications, 2017, 38(2): 158-164.
- [19] 张海波, 邹剑, 刘开健, 等. Femtocell 网络中基于分簇的资源分配机制[J]. 通信学报, 2017, 38(1): 16-25.
- ZHANG H B, ZOU J, LIU K J, et al. Cluster-based resource allocation mechanism for Femtocell network[J]. Journal on Communications, 2017, 38(1): 16-25.
- [20] 王学婷, 朱琦. 分层异构网络中基于斯坦克尔伯格博弈的资源分配算法[J]. 信号处理, 2017, 33(2): 168-177.
- WANG X T, ZHU Q. An algorithm of resource allocation based on stacklberg game in heterogeneous[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(2): 168-177.
- [21] ZHANG L M, LIU J, YANG K. Quality of service modeling of virtualized wireless networks: a network calculus approach [J]. Mobile Network Applications, 2014(3): 1-11.
- [22] 曹洁, 曾国荪, 匡桂娟, 等. 支持随机服务请求的云虚拟机按需物理资源分配方法[J]. 软件学报, 2017, 28(2): 457-472.
- CAO J, ZENG G S, KUANG G J, et al. On-demand physical resource allocation method for cloud virtual machine to support random service requests[J]. Journal of Software, 2017, 28(2): 457-472.
- [23] 江甲沫. 分层异构无线网络中高效协同通信技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- JIANG J M. Research on high efficiency cooperative communication technology in hierarchical heterogeneous wireless net-



- works[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [24] AHMED M H U, HONG C S, LEE S. Energy efficient smart-relay-based cooperative MAC for wireless networks[J]. Computing, 2014(96): 133-161.
- [25] 丁长松, 王志英, 胡志刚. 基于效用驱动的网络资源协同预留策略[J]. 通信学报, 2016, 35(5): 101-107.
DING C S, WANG Z Y, HU Z G, et al. Utility-driven based co-allocation resource reservation strategy in computational grid[J]. Journal on Communications, 2016, 35(5): 101-107.
- [26] 朱赞, 潘成康, 徐友云, 等. 一种无线 mesh 网络中基于协同通信的多包接收方法[J]. 电子与信息学报. 2010, 32(5): 1200-1204.
ZHU Y, PAN C K, XU Y Y, et al. A multi-packet reception method based on cooperative communication for wireless mesh networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1200-1204.
- [27] SHEN S G, MA X, JIANG H, 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.
- [28] YONG X, DASILVA L A. Dynamic pricing coalitional game for cognitive radio networks [J]. International Federation for Information Processing, 2012: 19-26.
- [29] 王浩云, 张顺颐, 龙华, 等. 基于多竞价拍卖机制的对等网络分布式组播协议研究[J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2373-2379.
WANG H Y, ZHANG S Y, LONG H, et al. Distributed multicast protocol based multi-bids auction mechanism in P2P networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(11): 2373-2379.
- [30] 刘军, 谢秀峰. 基于排队时延及博弈分析的认知无线网络信道分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(6): 73-81.
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.
- [31] 刘觉夫, 杨将, 王建旭, 等. 基于拍卖理论和高斯过程回归学习的频谱分配算法[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(5): 914-920.
LIU J F, YANG J, WANG J X, et al. A spectrum allocation algorithm based on auction theory and Gaussian process regression[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(5): 914-920.

- [32] 冯剑, 王平阳, 王琳, 等. 基于能量获取的无线通信系统研究[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 124-131.

FENG J, WANG P Y, WANG L, et al. Research on energy harvesting communication system [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 124-131.

[作者简介]



李明明 (1988-), 女, 嘉兴职业技术学院助教, 主要研究方向为计算机网络、无线 mesh 网络等。



乐光学 (1963-), 男, 博士, 嘉兴学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机网络、无线 mesh 网络等。



代绍庆 (1972-), 男, 嘉兴职业技术学院副教授, 主要研究方向为数据挖掘、分布式计算等。



马柏林 (1961-), 男, 博士, 嘉兴学院教授, 主要研究方向为数据分析与处理、计算机网络和智能计算。