

无线 mesh 网络中基于效用最优的联合信道分配和功率分配算法

黄鑫^{*①②} 冯穗力^① 柯峰^① 庄宏成^③

^①(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)

^②(华南师范大学物理与电信工程学院 广州 510006)

^③(华为技术有限公司预研部 深圳 518100)

摘要: 该文针对多信道无线 mesh 网络, 采用基于效用最优的定价机制, 提出了一种功率-干扰价格模型, 并基于该模型提出了一种分布式联合信道分配和功率分配算法。每个节点根据自己所消耗功率状况合理地定功率价格, 并根据自己所受干扰状况合理地定干扰价格。通过功率价格和干扰价格来调节链路的信道分配和功率分配, 使网络效用最大化。仿真结果表明: 所提出的算法能够快速、平稳地收敛到近似最优解。同时还仿真了网络可用信道数目、节点射频数目和功率对系统性能的影响, 可以为网络配置提供参考。

关键词: 无线 mesh 网络; 效用最优; 定价; 信道分配; 功率分配

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2600-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01395

Jointly Channel Assignment and Power Allocation Algorithm Based on Utility Optimization for Wireless Mesh Networks

Huang Xin^{①②} Feng Sui-li^① Ke Feng^① Zhuang Hong-cheng^③

^①(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

^②(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

^③(Pre-research Dept. Huawei Technologies CO. Ltd, Shenzhen 518100, China)

Abstract: A power-interference pricing model is presented using pricing scheme based on utility optimization. Then, a distributed jointly channel assignment and power allocation algorithm is proposed for multi-channel wireless mesh networks. Each node adjusts its power price according to the amount of power expended, and adjusts its interference price according to the interference suffered. To maximize the network utility, the channel assignment and power allocation are adjusted through power prices and interference prices. Simulation results show that the proposed algorithm can converge to approximate optimal solution rapidly and smoothly. The influence of the available channels, radios and power equipped on each node is also simulated, which is a reference for the network configuration.

Key words: Wireless mesh networks; Utility optimization; Pricing; Channel assignment; Power allocation

1 引言

无线 mesh 网络(Wireless Mesh Network, WMN)具有部署灵活、鲁棒性好、覆盖范围广等优点, 已经成为无线接入网络的关键技术之一^[1]。合理的信道分配和功率分配机制可以显著地降低干扰、节省能耗、提高频率复用度, 从而提高网络容量^[1-3]。文献[2]提出一种联合速率分配和信道分配(Jointly Rate Assignment and Channel Allocation, JRACA)算法, 假设网络具有标称链路层速率^[2], 采

用梯度更新法^[4]给链路分布式的分配归一化链路层速率, 并由网关集中式地给链路分配信道, 使得网络效用最优。然而, JRACA 算法^[2]的收敛速度较慢, 且没有考虑如何获得所分配的链路速率, 而该速率是可以通过调整链路的传输功率来获得的。文献[5]假设传输功率固定, 提出一种分布式的拥塞感知信道分配算法, 文献[6]对单信道 WMN 利用最佳响应更新法^[7]进行功率分配。文献[8]基于博弈理论提出了一种分布式的异步联合功率分配和速率分配算法。

信道和功率共同影响网络的容量, 对其进行联合优化分配非常必要^[3], 而上述算法^[2,5,6,8]没有考虑两者的联合优化分配。现有的联合信道分配和功率

2010-12-23 收到, 2011-08-22 改回

国家自然科学基金(61001113)和广东省粤港关键领域重点突破项目(20060104-2)资助课题

*通信作者: 黄鑫 huang.xin1@mail.scut.edu.cn

分配算法^[3,9,10]都是针对无线局域网或 Ad hoc 网络提出的, 不适用于 WMN。因此, 为了优化网络效用, 本文在文献[2]的基础上考虑对链路进行分布式的功率控制, 并由各个节点分布式的对链路进行信道分配。近年来, 基于定价的资源分配方法^[6]成为无线资源管理的一种有效工具, 已被应用到频谱共享、协作传输和速率分配中^[11,12]。本文首先提出一种功率-干扰价格模型, 然后提出一种基于定价的分布式联合信道分配和功率分配 (Pricing based distributed Jointly Channel Assignment and Power Allocation, PJCAPA) 算法。

2 系统模型及问题描述

令 mesh 节点的集合为 N , 任意节点 m 部署的射频数目为 I_m , 最大可分配功率为 P_{\max} 。主要考虑下行链路的信道分配和功率分配, 但所提出的模型和算法同样适用于上行链路。令 L 表示所有下行链路的集合, 其中 $(m, n) \in L$ 表示源节点为 m 目的节点为 n 的链路。节点 m 的输出链路集合为 L_m^{out} , 输入链路集合为 L_m^{in} , 以 m 为端节点的链路集合为 L_m , 有 $L_m = L_m^{\text{in}} \cup L_m^{\text{out}}$ 。 $|L_m|$ 表示以 m 为端节点的链路数目。总的时隙集合为 $\Gamma = \{1, 2, \dots, T\}$ 。可用于数据传输的正交信道集合为 $\Theta = \{1, 2, \dots, C\}$ 。有一个公共控制信道在时隙集合 Γ_G 中以 T_G 个时隙为周期传输指令。

对任意链路 (m, n) , 定义一个 $C \times 1$ 维的链路信道分配向量 \mathbf{x}_{mn} 。如果第 c 个信道分配给了链路 (m, n) , 则 \mathbf{x}_{mn} 的第 c 个元素 $x_{mn}^c = 1$; 否则, $x_{mn}^c = 0$ 。链路 (m, n) 的信道分配限制为 $\mathbf{1}^T \mathbf{x}_{mn} = 1$ 。其中, $\mathbf{1}$ 表示元素全为“1”的 $C \times 1$ 维向量。在任意时隙 t , 定义分配给链路 (m, n) 的信道为 $C_{mn}(t)$ 。对任意节点 m , 定义一个 $C \times 1$ 维的节点信道分配向量 \mathbf{y}_m 。如果第 c 个信道分配给了节点 m 的某个射频接口, 则 \mathbf{y}_m 的第 c 个元素 $y_m^c = 1$; 否则 $y_m^c = 0$ 。在任意时刻每个射频只能工作在一个信道上, 所以节点 m 的信道分配限制为 $\mathbf{1}^T \mathbf{y}_m \leq I_m$; 对任意节点 m , 当且仅当存在 $x_{mn}^c = 1$ 或 $x_{nm}^c = 1$ 时, $y_m^c = 1$; 否则 $y_m^c = 0$ 。令 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_{mn}, \forall (m, n) \in L)$ 表示所有链路的信道分配向量, $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_m, \forall m \in N)$ 表示所有节点的信道分配向量, $S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 表示一个信道分配方案, Ω 表示所有可行的信道分配方案集合。当 $S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 中的所有变量都满足信道分配限制时, 则称其可行, 即 $S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \in \Omega$ 。

定义节点 m 的输出链路的功率分配向量为 $\mathbf{P}_m = (P_{mn}, \forall (m, n) \in L_m^{\text{out}})$, 其中 P_{mn} 为链路 (m, n) 的传输功率。定义 $\mathbf{P}_{-m} = (P_{nd}, \forall n \in N \setminus \{m\}, (n, d) \in L_m^{\text{out}})$

表示除节点 m 外其他节点的传输功率向量。因此, 可定义整个网络的功率分配向量为 $\mathbf{P} = (P_{mn}, \forall (m, n) \in L)$ 。节点 m 的传输功率限制为 $\sum_{(m, n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn} \leq P_{\max}$ 。

使用 $h_{mn} = (4\pi f_c / c)^{-2} (d_{mn})^{-2}$ 建模链路 (m, n) 的信道衰落。其中 d_{mn} 为信号传播距离, f_c 为载频, c 为光速常量。在时隙 t , 链路 (m, n) 的信号干扰噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) γ_{mn} 可以表示为 $\gamma_{mn} = h_{mn} P_{mn} / (I_n^{C_{mn}} + W\eta)$ 。其中, $I_n^{C_{mn}}$ 表示目的节点 n 在信道 C_{mn} 上所受到的总干扰功率, W 表示信道带宽, η 为高斯白噪声的功率谱密度。根据模型可知:

$$I_n^{C_{mn}(t)} = \sum_{a \in N \setminus \{m\}} \sum_{b \in N_m^{\text{out}}} h_{an} P_{ab}(t) x_{ab}^{C_{mn}(t)}$$

使用效用函数 $U(\gamma_{mn}) = \lg(\gamma_{mn})$ 来度量链路 (m, n) 的 QoS^[2,7]。令 $\theta = \sum_{(m, n) \in L} U(\gamma_{mn})$ 表示网络的总效用。系统的优化目标是通过给链路分配信道和传输功率使得网络的总效用 θ 最大化, 即 maximize $\theta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{P})$; 限制条件为信道分配方案可行, 即 $S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \in \Omega$, 以及节点的传输功率限制: $\sum_{(m, n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn} \leq P_{\max}$ 。该优化问题可以由网关集中式的求解。为了得到最优的信道分配方案, 需要进行 $C^{|L|}$ 次的穷举搜索。对于任意信道分配方案, 可以通过注水定理进行功率分配来求得该问题的最优解。因此, 该集中式最优化算法的计算复杂度为 $O(|L|C^{|L|})$, 随着链路数目 $|L|$ 呈指数增长。文中接下来提出一种复杂度较低的分布式联合信道分配和功率分配算法。

3 分布式联合信道分配和功率分配算法

使用没有信道分配连锁反应^[5]的 TiMesh 拓扑生成算法^[13]来生成拓扑, 因此, 可以为任意链路 (m, n) 确定负责对其进行信道分配的端节点 A_{mn} , 从而保证了节点间信道分配的独立性。针对 WMN, 本文提出一种功率-干扰价格模型, 引入功率价格和干扰价格来协调节点间的信道分配和功率分配。

3.1 功率-干扰价格模型

对任意节点 m , 定义 $\varphi_m(t)$ 表示其在时隙 t 的单位功率价格, $T_{m, \varphi}$ 表示更新该功率价格的时隙集合。如果节点 m 使用功率 P_{mn} 在链路 (m, n) 上传输数据, 则需要消耗 $P_{mn} \varphi_m(t)$ 单位的功率费用。因此, 节点 m 消耗的总功率费用为 $\sum_{(m, n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn} \varphi_m(t)$ 。在时隙 $t \in T_{m, \varphi}$, 节点 m 根据其消耗的功率利用梯度更新法^[4]更新下一时隙的功率价格为

$$\varphi_m(t+1) = \left[\varphi_m(t) + \alpha \left(\sum_{(m,n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn}(t) - P_{\max} \right) \right]^+ \quad (1)$$

其中 $\alpha > 0$ 是更新步长, $[y]^+ = \max\{y, 0\}$ 。规定所有节点以 T_G 个时隙为周期同步地更新功率价格, 且称 T_G 为梯度更新周期, 则有

$$T_{m,\varphi} = T_{n,\varphi}, \forall m, n \in N$$

在 WMN 中, 使用相同信道工作的链路相互干扰。定义干扰价格 $\phi_m^c(t)$ 表示在时隙 t 节点 m 向其他节点收取的信道 c 上的单位功率的干扰费用。定义 $T_{m,\phi}$ 和 T_L 分别表示节点 m 更新干扰价格的时隙集合和周期。节点 m 的干扰价格向量为 $\Phi_m = \{\phi_m^c, \forall c \in \Theta\}$ 。令节点 m 在信道 c 上随着所受单位干扰的减少而获得效用的边际增量表示其干扰价格, 即

$$\phi_m^c(t) = - \frac{\partial \sum_{(a,m) \in L_m^{\text{in}}, C_{am}=c} U(\gamma_{am}(t))}{\partial I_m^c} = \frac{1}{(I_m^c + W\eta) \ln 10} \quad (2)$$

任意节点 m 在时隙 t 需要对所有其他节点造成的干扰进行补偿, 支付的总补偿为

$$\sum_{a \in N \setminus \{m\}} \sum_{(m,n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn}(t) h_{ma} \phi_a^{C_{mn}}(t) \quad (3)$$

式(3)即为节点 m 的所有输出链路 L_m^{out} 传输到其它节点 $N \setminus \{m\}$ 处的干扰功率与干扰价格的乘积。同理, 其它节点在时隙 t 也需要对节点 m 进行干扰补偿:

$$\sum_{a \in N \setminus \{m\}} \sum_{(a,b) \in L_a^{\text{out}}} P_{ab}(t) h_{am} \phi_m^{C_{ab}}(t) \quad (4)$$

式(4)即为所有其他节点 $N \setminus \{m\}$ 传输到节点 m 的干扰功率与干扰价格的乘积。令节点 m 所有输出链路的效用和表示其获得的效用。因此, 节点 m 在时隙 t 所获得的总收益 $Z_m(t)$ 为

$$\begin{aligned} Z_m(t) = & \sum_{(m,n) \in L_m^{\text{out}}} U(\gamma_{mn}(t)) - \sum_{(m,n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn} \varphi_m(t) \\ & - \sum_{a \in N \setminus \{m\}} \sum_{(m,n) \in L_m^{\text{out}}} P_{mn}(t) h_{ma} \phi_a^{C_{mn}}(t) \\ & + \sum_{a \in N \setminus \{m\}} \sum_{(a,b) \in L_a^{\text{out}}} P_{ab}(t) h_{am} \phi_m^{C_{ab}}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 PJCAPA 算法

近年来, 有学者指出最佳响应更新法相比梯度更新法具有更快的收敛性^[6,7]。最佳响应更新法^[7]是指某一用户假定其它用户的资源分配策略不变, 通过调整自身的资源分配来使系统性能达到最优。在 PJCAPA 算法中, 节点异步地根据最佳响应更新法^[7]以 T_L 个时隙为周期更新信道分配和功率分配, 且称 T_L 为最佳响应更新周期。令 $T_{m,C}$ 和 $T_{m,P}$ 分别表示节点 m 更新信道分配和功率分配的时隙集合, 则有: $T_{m,P} \cap T_{m,C} = \emptyset$, $T_{m,C} \cap T_{n,C} = \emptyset$, $\forall m, n \in N$ 。所有节点在信令传输时隙集合 Γ_G 内将当前的干扰

价格、信道和功率信息广播给其他节点。

由于任意节点不会同时更新功率和信道分配, 当节点进行信道分配时, 可假定网络的功率分配 \mathbf{P} 固定。定义 $\mathbf{X}_m = (\mathbf{x}_l, \forall l, A_l = m)$ 表示由节点 m 负责进行信道分配的链路信道分配变量的向量。节点 m 可通过信令传输获得其它节点的信道分配策略 \mathbf{X}_{-m} 。在时隙 $t \in T_{m,C}$, 如果存在链路 l , 且 $A_l = m$, 节点 m 根据最佳响应更新法^[7]给其负责的链路重新分配信道:

$$\mathbf{X}_m = \arg \max_{\mathbf{X}_m} \theta(\mathbf{X}_m; \mathbf{X}_{-m}, \mathbf{P}) \quad (6)$$

同理, 当节点更新功率分配时, 可假定所有链路使用的信道不变。任意节点 m 在时隙 $t \in T_{m,P}$ 根据最佳响应更新法^[7]调整输出链路 L_m^{out} 的传输功率来最大化获得的总收益:

$$\mathbf{P}_m = \arg \max_{\mathbf{P}_m} Z_m(\mathbf{P}_m; \mathbf{X}, \mathbf{P}_{-m}) \quad (7)$$

根据 KKT 条件^[4], 可求得

$$P_{mn} = \left[\frac{1}{\left(\varphi_m + \sum_{a \in N \setminus \{m\}} \phi_a^{C_{mn}} h_{ma} \right) \ln 10} \right]^{P_{\max}} \quad (8)$$

综上, PJCAPA 算法流程可以描述如表 1 所示 (由任意节点 m 执行)。

表 1 PJCAPA 算法流程

- | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) | 设定所有链路都工作在第 1 个信道上, 即设置 $\mathbf{X}^* = [[1 \ 0 \ \dots \ 0] \dots [1 \ 0 \ \dots \ 0]]^T$; |
| (2) | 选择初始功率价格 $\varphi_m(0) \geq 0$, 干扰价格 $\Phi_m(0)$ 和功率 $\mathbf{P}_m(0)$; |
| (3) | 使用 TiMesh 拓扑生成算法 ^[13] 生成没有信道分配连锁反应的逻辑拓扑; |
| (4) | for all $t \in \Gamma$ do |
| (5) | if $t \in \Gamma_G$ then 将当前的 $\mathbf{P}_m, \mathbf{X}_m^*$ 和 Φ_m 广播给其它节点, 设定 $\theta^* = 0$ 。 |
| (6) | end if |
| (7) | if $t \in T_{m,\varphi}$ then 根据式(1)更新功率价格, 求得 $\varphi_m(t+1)$ 。 |
| (8) | end if |
| (9) | if $t \in T_{m,\phi}$ then 根据式(2)更新任意信道 c 上的干扰价格, 求得 $\phi_m^c(t+1)$; |
| (10) | end if |
| (11) | if $t \in T_{m,C}$ then |
| (12) | 求解优化问题式(6)获得 \mathbf{X} , 并计算 $\theta = \sum_{(m,n) \in L} U(\gamma_{mn})$ 。 |
| (13) | if $\theta > \theta^*$ then 设定 $\mathbf{X}^* = \mathbf{X}$ 和 $\theta^* = \theta$ 。 |
| (14) | end if |
| (15) | 根据 \mathbf{X}^* 给负责的链路分配信道。 |
| (16) | end if |
| (17) | if $t \in T_{m,P}$ then 根据式(8)更新输出链路上传输功率, 求得 $P_{mn}(t+1), (m,n) \in L_m^{\text{out}}$ 。 |
| (18) | end if |
| (19) | end for |

3.3 计算复杂度和收敛性分析

对任意节点 m ，问题式(6)的计算复杂度为 $O(C^{|L_m|})$ 。令 $L^{\max} = \max_{m \in N} |L_m|$ ，有 $L^{\max} \ll |L|$ 。当网络规模增大时， $|L|$ 增大，而 L^{\max} 几乎保持不变。PJCAPA 算法的计算复杂度为 $O(|N|(3 + C^{L^{\max}}))$ ，该复杂度远低于集中式最优化算法的复杂度。在 PJCAPA 算法中，节点循环地进行信道分配和功率分配，通过迭代求得联合优化问题的解。然而，现在尚未有文献从理论上对这种迭代联合算法的收敛性进行证明，参照文献[2]，本文接下来通过数值仿真分析 PJCAPA 算法的收敛性。

4 仿真结果与分析

采用 MATLAB 软件对所提出的 PJCAPA 算法和文献[2]中的 JRACA 算法进行 10 次不同的仿真。每一次仿真步骤如下：

(1)产生 20 个 mesh 节点，令其随机分布在 $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$ 的区域中，将处于中间位置的节点设置为网关。给任意节点 m 部署 $I_m = 3$ 个射频，假设可用正交信道数为 $C = 6$ 。

(2)仿真参数为： $P_{\max} = 200 \text{ mW}$ ， $\alpha = 0.01$ ， $W = 5 \text{ MHz}$ ， $\eta = -174 \text{ dBm/Hz}$ ， $T_G = 50$ ， $T_L = 10$ ， $f_c = 5 \text{ GHz}$ 。运行 PJCAPA 算法，求得网络的总效用 θ_{PJCAPA} 。利用优化工具 LINGO 求得集中式最优化算法的全局最优解 θ_{PJCAPA}^* 。

(3)设定节点的通信范围和干扰范围分别为 250 m 和 400 m， $T_{\text{MAC}} = 1$ ， $T_{\text{CI}} = 50$ ，其它参数和文献[2]采用的参数相同。运行 JRACA 算法[2]，求得网络的总效用 θ_{JRACA} 。利用优化工具 LINGO 求得文献[2]的全局最优解 θ_{JRACA}^* 。

定义 PJCAPA 算法和 JRACA 算法[2]的归一化优化值分别为 $\theta_{\text{PJCAPA}}/\theta_{\text{PJCAPA}}^*$ 和 $\theta_{\text{JRACA}}/\theta_{\text{JRACA}}^*$ 。图 1 所示为两种算法在第 1 次仿真中所获得的归一化优化值。由图 1 可知：PJCAPA 算法经过 50 个时隙的迭代后平稳地收敛到最优值的 98%；JRACA 算

法的曲线存在较大波动，经过 150 个时隙的迭代后收敛到最优值的 95%。这是因为：对比算法采用步长为 0.01 的梯度更新法调整速率，且网关以 50 个时隙为周期集中式地更新信道分配，在信道分配时网络总效用值波动较大；而本文算法通过最佳响应更新法来分布式地调整信道分配和功率分配，实质上是采用自适应调整步长[4]的更新方法：当远离最优解时采用较大的步长；当靠近最优解时采用较小的步长。由此可见，PJCAPA 算法的收敛速度比 JRACA 算法[2]快。

图 2 分析了当梯度更新周期 T_G 为 50 个时隙，最佳响应更新周期 T_L 为 10, 20, 30, 40, 50 个时隙时 PJCAPA 算法的归一化优化值，其中每个点是 10 次随机拓扑仿真测量值的平均。由图 2 可知，随着最佳响应更新周期 T_L 的增大，PJCAPA 算法的收敛速度减慢，但是最终都能收敛到近似最优解。各个近似最优值之间相差较小，且均能达到最优解的 90%以上。因此，每个梯度更新间隔内的最佳响应更新数目对算法的收敛性影响较小。

由于网络效用的物理意义不直观，而 SINR 的物理意义较直观。图 3 和图 4 通过对 PJCAPA 算法的仿真来分析射频、信道和功率对链路平均 SINR 的影响，其中每个点是 10 次随机拓扑仿真测量值的平均。图 3 反映了当射频数目为 1~4，可用信道数目为 1~6 时的链路平均 SINR。由图 3 可知：多射频多信道 WMN 相比单射频单信道 WMN 能够获得更高的链路平均 SINR；当射频数目不变时，随着信道数目增加，链路平均 SINR 增加；当信道数目为 n 时，射频数目从 1~ n 增加的过程中可以增加链路平均 SINR，给节点配置大于 n 个射频不能进一步增加链路平均 SINR。因此，需要根据具体的应用需求来配置节点的射频数目和网络可用信道数目。

图 4 反映了当每个节点的最大功率限制为 0.01~6 W，射频数目为 3，可用信道数目为 6 时的链路

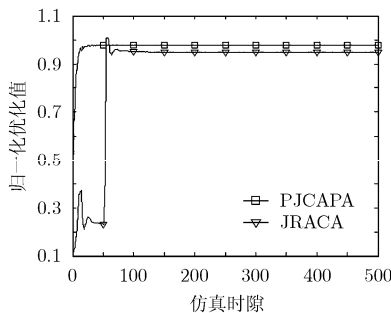


图 1 各种算法的归一化优化值

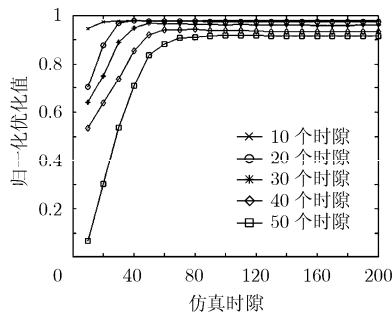


图 2 梯度更新周期为 50 个时隙时，最佳响应更新周期对收敛性的影响

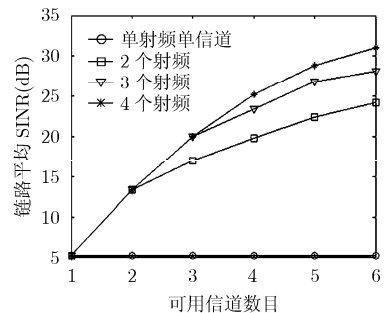


图 3 节点的射频数目和网络可用信道数目对链路平均 SINR 的影响

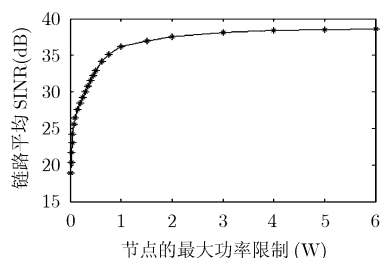


图 4 节点的最大功率限制对链路平均 SINR 的影响

平均 SINR。由图 4 可知,随着每个节点的最大功率限制增加,链路平均 SINR 迅速增加并趋于稳定值。因为,增加链路的发射功率可以增加 SINR,然而也会增加对其他节点的干扰。因此,在 WMN 中,不能无限制的增加发射功率来提高链路 SINR,需要进行联合信道分配和功率分配来优化网络性能。

5 结束语

本文研究了多信道无线 mesh 网络的信道分配和功率分配问题,由于集中式的优化算法存在复杂度高的问题,本文提出了一种复杂度较低的基于定价的分布式联合信道分配和功率分配 PJCAPA 算法,能够利用有限的频率和功率资源提高网络中所有链路的效用之和。所提出的算法使用功率价格鼓励节点根据功率需求来调节链路的功率分配;同时使用干扰价格来鼓励节点合理地分配信道和功率。每个节点根据自己所消耗功率状况合理地定功率价格,并根据自己所受干扰状况合理地定干扰价格。通过功率价格和干扰价格来调节链路的信道分配和功率分配,使网络效用最大化。仿真结果表明:所提出的 PJCAPA 算法能够快速、平稳地收敛到近似最优解。同时仿真了节点的射频数目、网络可用信道数目和节点最大功率限制对链路平均 SINR 的影响,可以为网络配置提供参考。

参 考 文 献

- [1] Mahesh K M, Samir R D, and Anand P S. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(2): 241-256.
- [2] Rad A H M and Wong V W S. Cross-layer fair bandwidth sharing for multi-channel wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3436-3445.
- [3] Chen Jia-yuan, Olafsson S, Yang Yang, *et al.* Joint distributed transmit power control and dynamic channel allocation for scalable WLANs[C]. *IEEE Wireless*

- Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, Apr. 5-8, 2009: 1-6.
- [4] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 466-474.
- [5] Hamed Mohsenian-Rad A and Wong V W S. Congestion-aware channel assignment for multi-channel wireless mesh networks[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(14): 2502-2516.
- [6] Hamed Mohsenian-Rad A, Wong V W S, and Leung V C M. Two-fold pricing to guarantee individual profits and maximum social welfare in multi-hop wireless access networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4110-4121.
- [7] Huang J, Berry R A, and Honig M L. Distributed interference compensation for wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(5): 1074-1084.
- [8] Stepan Kucera, Sonia Aissa, Koji Yamamoto, *et al.* Asynchronous distributed power and rate control in Ad hoc networks: a game-theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2536-2548.
- [9] Choong Ming Chin, Moh Lim Sim, and Olafsson S. A dynamic channel assignment strategy via power control for Ad hoc network systems[C]. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, Ireland, Spring, 2007: 3006-3010.
- [10] Sim T C K and Chuah M L. Game theoretic approach for channel assignment and power control with no-internal-regret learning in wireless Ad hoc networks[J]. *IET Communications*, 2008, 2(9): 1159-1169.
- [11] Niyato D and Hossain E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of nash equilibrium, and collusion[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 192-202.
- [12] Ng C Y, Lok T M, and Wong T F. Pricing games for distributed cooperative transmission[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7): 3393-3406.
- [13] Hamed Mohsenian-Rad A and Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(12): 4432-4440.

黄 鑫: 女, 1984 年生, 博士, 研究方向为多射频多信道无线 mesh 网络的资源分配和跨层优化。

冯穗力: 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带移动通信系统与通信信号处理。

柯 峰: 男, 1975 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为宽带移动通信、数字集成电路方面的研究。