

无线多跳网络下基于过时信道状态信息的跨层资源分配

冯 维^① 冯穗力^{*①} 丁跃华^① 黄 鑫^{①②}

^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)

摘 要: 对于无线多跳网络跨层资源分配算法的研究大多是建立在假定每个节点能获得网络中其他节点的完美的信道状态信息(CSI)的基础上。但是由于信道的时变特性和 CSI 的反馈延时, 在动态变化较快的无线网络中, 节点所获得的 CSI 很可能是过时或者部分过时的。基于这个前提, 该文首次在动态无线多跳网络跨层资源优化分配算法中考虑了 CSI 这种变化的影响, 并提出了一种相应的分布式联合拥塞控制和功率分配算法。仿真结果证明该算法能够极大地提高网络效用和能量效用。

关键词: 无线多跳网络; 信道状态信息; 动态跨层资源分配; 分布式算法; 能量效用

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2750-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00546

Cross-layer Resource Allocation with Outdated Channel State Information in Wireless Multi-hop Networks

Feng Wei^① Feng Sui-li^① Ding Yue-hua^① Huang Xin^{①②}

^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)

Abstract: Most of the existing works on the cross-layer design of dynamic resource allocation in wireless multi-hop networks assume that every node can avail perfect Channel State Information (CSI) of other nodes in the networks. However, because of the channel fluctuations and the feedback delay, the availed CSI is usually outdated or partly outdated in a dynamic wireless network. In this paper, the impact of outdated channel information is firstly investigated in wireless multi-hop network, and a distributed joint congestion control and power control algorithm with outdated CSI is proposed. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm significantly improves network efficiency and energy efficiency of the multi-hop networks.

Key words: Wireless multi-hop networks; Channel State Information (CSI); Cross-layer design of dynamic resource allocation; Distributed algorithms; Energy efficiency

1 引言

无线多跳网络链路间的干扰和有限的容量导致传输性能的严重下降。跨层资源分配作为解决该问题的新方法, 成为研究的热点。跨层资源分配方法的主要思想是根据提前收集的诸如信道状态信息(Channel State Information, CSI)、流量需求等网络状态信息, 网络节点采用集中式或分布式的算法得到一种最优或者次优的网络资源分配的策略^[1-7]。

目前已有大量学者针对无线多跳网络跨层资源

分配算法展开了研究, 并取得了许多研究成果。文献[1]指出了跨层设计的动机和必要性, 并总结了近十年来跨层联合优化方面的相关研究成果。文献[2]针对多信道无线多跳网络, 提出了一种考虑时延因素的联合速率、路由和调度的跨层公平带宽分配算法。该算法将联合速率、路由和调度的跨层优化问题描述成一个网络效用最大化问题, 然后采用对偶分解的方法获得该问题的次优解。文献[3]将无线多跳网络的功率控制和信道分配问题联合建模为一个效用最大化问题, 并提出了求解此问题的集中式和分布式算法。文献[4-7]分别针对层与层之间不同的关系和不同的服务质量(Quality of Service, QoS)要求提出了一种跨层资源分配算法。尽管如此, 这些算法都依赖于一个重要的假设: 节点所收集的 CSI

2013-04-22 收到, 2014-08-07 改回

国家自然科学基金(61340035)和广州市科技计划项目(2014J4100246)资助课题

*通信作者: 冯穗力 fengsl@scut.edu.cn

是实时的, 完善的。而事实上, 节点所收集到的信道状态信息往往是不完善的, 过时的。这是因为: (1)接收端在估计出 CSI 之后, 需要将此 CSI 反馈至发送端, 有时甚至需要将此信息发送至其他节点, 不同的网络环境将会带来不可预计的延时; (2)网络状态信息不可能频繁地发布, 否则会极大地增加网络负载。上述两种因素对 CSI 的影响一般难以避免, 需要采取其它措施来消除或降低其影响。根据我们的调研, 目前只有少数文献在正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 的下行传输过程^[8,9]和认知无线电主从用户共享信道资源环境下的频谱感知过程^[10,11]中考虑了 CSI 过时的影响。但上述这些结果均无法解决无线多跳网络系统中 CSI 误差带来的问题。

本文首次研究了无线多跳网络跨层资源优化分配过程中过时 CSI 带来的影响, 并通过在建模资源优化问题时考虑 CSI 的过时以减少这种影响。本文考虑的优化问题是: 在已知存在过时 CSI 的基础上实现无线多跳网络的联合拥塞控制和功率控制。

接下来的文章组织如下: 第 2 节提出了系统模型和优化模型; 第 3 节提出了分布式优化算法; 第 4 节对算法进行了仿真, 并对仿真结果进行了分析; 第 5 节总结全文。

2 系统模型和问题建模

2.1 系统模型

本文考虑动态无线多跳网络模型。本文假定网络中节点均可移动, 并分别用 N 和 L 表示无线节点和逻辑链路的集合, 用 (m, n) 表示发送端为 m 和接收端为 n 的逻辑链路。逻辑链路 (m, n) 在节点 n 处的接收信号可以表示为

$$y_n = h_{mn}x_m + w_n \quad (1)$$

$x_m \in \Omega$ 代表源点 m 发送的符号, 符号功率为 $P_m = E[|x_m|^2]$, $w_n \in \Omega$, 且 $w_n \sim CN(0, \sigma_w^2)$, $h_{mn} \in \Omega$ 为逻辑链路 (m, n) 的信道响应, 建模为瑞利衰落信道, 即 $h_{mn} \sim CN(0, 1)$ 。为了简化运算, 本文假设 $h_{mn} \in \Omega$ 在一个时隙内信道响应保持不变, 并且假设不同链路间信道独立同分布。为了分析过时的 CSI 对系统性能的影响, 将 h_{mn} 建模为^[9,11]

$$h_{mn} = \rho \hat{h}_{mn} + \sqrt{1 - \rho^2} e_{mn} \quad (2)$$

其中 \hat{h}_{mn} 为过去某一时刻的信道响应, e_{mn} 为均值为 0, 方差为 1 的复高斯随机变量, 且与 \hat{h}_{mn} 相互独立。根据 Jakes 模型, h_{mn} 和 \hat{h}_{mn} 之间的相关系数 $\rho = J_0(2\pi f_d \tau)$, 其中 f_d 代表多普勒频移, τ 为 h_{mn} 和 \hat{h}_{mn}

之间的时间间隔, $J_0(\cdot)$ 为第 1 类 0 阶贝塞尔函数。由此可知, h_{mn} 和 \hat{h}_{mn} 服从联合复高斯分布, 运用贝叶斯公式, 可知 $h_{mn} | \hat{h}_{mn}$ 服从复高斯分布:

$$h_{mn} | \hat{h}_{mn} \sim CN(\rho \hat{h}_{mn}, 1 - \rho^2) \quad (3)$$

由式(3)可知, 在给定的 \hat{h}_{mn} 下, 用 $\gamma_n = |h_{mn}|^2 / \sigma_w^2$ 表示信道噪声比(Channel Noise Rati, CNR), $\hat{\gamma}_n = |\hat{h}_{mn}|^2 / \sigma_w^2$ 表示过去时刻的 CNR 值, 则 $\gamma_n | \hat{\gamma}_n = |\hat{h}_{mn}|^2 / \sigma_w^2$ 服从以 2 为自由度的卡方分布^[9,11]:

$$f_{\gamma_n | \hat{\gamma}_n}(\gamma_n | \hat{\gamma}_n) = \frac{\sigma_w^2}{1 - \rho^2} e^{-\frac{\sigma_w^2}{1 - \rho^2}(\gamma_n + \rho^2 \hat{\gamma}_n)} \cdot I_0 \left(2 \frac{\sigma_w^2}{1 - \rho^2} \sqrt{\rho^2 \gamma_n \hat{\gamma}_n} \right) \quad (4)$$

2.2 问题建模

本文需要解决的问题是: 已知过时的 CSI, 在满足业务流速率分配公平性要求下, 联合功率分配和拥塞控制, 达到最大化网络总吞吐量的目标。

用 $|L|$ 表示集合 L 中元素的个数, 向量 $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_{|L|}]$ 表示所有逻辑链路的发送功率, $N_n^{\text{in}} \subset N$ 和 $N_n^{\text{out}} \subset N$ 分别表示节点 n 的输入邻居和输出邻居的集合, P_n^{max} 表示节点 n 总的最大功率限制。任意节点 $n \in N$ 的发送功率约束可以表达为

$$0 \leq \sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} \leq P_n^{\text{max}}, \quad n \in N \quad (5)$$

假定目前网络中存在 $S = \{1, 2, \dots, s\}$ 个业务流被激活, 用向量 $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_s]$ 表示每个业务流的流速, $L(s)$ 表示业务流传输路径, 则网络的链路容量限制可以表示为

$$\sum_{s: l \in L(s)} f_s \leq C_l(\mathbf{P}), \quad \forall i \neq l, \forall l \in L \quad (6)$$

又链路可用容量可表示为

$$C_l(\mathbf{P}) = B \log_2(1 + K \times \text{SINR}_l(\mathbf{P})), \quad \forall l \in L \quad (7)$$

其中, B 为信道带宽, K 是一个与调制方式相关的常数, SINR_l 表示链路 l 的接收端接收到的有用信号的强度与接收到的干扰信号(噪声和干扰)的强度的比值。基于消息的并发传输机制, 链路 l 的 SINR 可以通过(8)式计算

$$\text{SINR}_l(\mathbf{P}) = \frac{P_l |h_{ll}|^2}{\sum_{i \neq l} P_i |h_{il}|^2 + \sigma_w^2} = \frac{P_l \gamma_l}{\sum_{i \neq l} P_i \gamma_i + 1} \quad (8)$$

其中 σ_w^2 表示接收端接收到的噪声功率。由前面的讨论可知, 由于传播延时, 节点无法得到链路的瞬时 CSI, 但节点知道 $h_{mn} | \hat{h}_{mn}$ 的分布函数特性。根据 $h_{mn} | \hat{h}_{mn}$ 的分布函数, 可以得到条件容量的期望为

$$\hat{C}_{l, \gamma | \hat{\gamma}}(\mathbf{P}) = E_{\gamma | \hat{\gamma}} \left\{ B \log_2 \left[1 + K \frac{P_l \gamma_l}{\sum_{i \neq l} P_i \gamma_i + 1} \right] \right\} \quad (9)$$

其中 γ_{il} 表示链路 i 的发送端至链路 l 的接收端信道的信道噪声比, $\gamma = \{\gamma_{11}, \gamma_{21}, \dots, \gamma_{|L|1}\}$ 表示链路 l 的干扰链路的瞬时信道噪声比集合, $\hat{\gamma} = \{\hat{\gamma}_{11}, \hat{\gamma}_{21}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|1}\}$ 为对应的过时值集合。基于此, 业务流速率分配约束条件式(6)可以重新建模为

$$\sum_{s:l \in L(s)} f_s \leq \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}), \quad \forall i \neq l, \forall l \in L \quad (10)$$

综上所述, 我们的优化目标是求解如下的网络效用最大化(Network Utility Maximization, NUM)问题:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}, \mathbf{P}} \sum_{s \in S} U(f_s) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{s:l \in L(s)} f_s \leq \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}), \quad \forall i \neq l, \forall l \in L \\ & \quad 0 \leq \sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} \leq P_n^{\text{max}}, \quad n \in N \end{aligned} \right\} (11)$$

$$\hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}) = E_{\hat{\gamma}} \left\{ B \log_2 \left(1 + K \frac{P_l \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} P_i \gamma_{il} + 1} \right) \right\}$$

我们采用 $U(f_s) = \ln(f_s)$ 这一连续可微、单调递增的严格凹效用函数来获得业务流间的比例公平性。

3 分布式联合优化算法

第2节中得到的 NUM 问题计算复杂度很高, 难以集中在某个控制节点中完成。本节基于拉格朗日对偶分解技术^[12], 提出一种分布式优化算法来求解式(11)。该分布式算法通过求解原问题式(11)的对偶问题的解来代替求解原问题式(11)。原问题式(11)的对偶问题表达为

$$\min_{\mathbf{F}, \mathbf{P}} \max_{\mathbf{F}, \mathbf{P}} D(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}, \mathbf{P}) \quad (12)$$

对偶函数为

$$\begin{aligned} D(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}, \mathbf{P}) &= \sum_{s \in S} U(f_s) - \sum_{l \in L} \xi_l \left(\sum_{s:l \in L(s)} f_s - \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}) \right) \\ &\quad - \sum_{n \in N} \lambda_n \left(\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} - P_n^{\text{max}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\xi_l \geq 0$ 和 $\lambda_n \geq 0$ 为引入的拉格朗日乘子, 也称对偶变量, 用 $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{|L|}]^T$ 和 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]^T$ 表示对偶变量向量。进一步运用对偶分解理论, 问题式(13)可分解为如下的两个子问题:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}} D_1(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{F}) \\ & D_1(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{F}) = \sum_{s \in S} U(f_s) - \sum_{l \in L} \xi_l \sum_{s:l \in L(s)} f_s \end{aligned} \right\} (14)$$

和

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}} D_2(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{P}) \\ & D_2(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{P}) = \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}) \\ & \quad - \sum_{n \in N} \lambda_n \left(\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} - P_n^{\text{max}} \right) \\ & \text{s.t.} \quad \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P}) = E_{\hat{\gamma}} \left\{ B \log_2 \left(1 + K \frac{P_l \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} P_i \gamma_{il} + 1} \right) \right\} \end{aligned} \right\} (15)$$

子问题 1(式 14)关系到业务流速率的分配, 涉及拥塞控制问题; 子问题 2(式 15)是一个功率控制问题, 这两个子问题之间的交互作用通过对偶变量 ξ_l 控制。由式(14)可以看出, 对偶变量 ξ_l 协调了传输层的速率需求以及物理层的速率供应, 所以 ξ_l 也被称为链路 l 的拥塞价格^[12]。同理, 对偶变量 λ_n 协调了传输层的功率需求和物理层的功率分配, 可称之为节点 n 的功率价格。问题式(14)可通过 $\boldsymbol{\xi}$ 和 \mathbf{F} 相互调整来使得网络中各节点缓存区相对稳定, 解决拥塞控制问题, 具体求解过程在文献[13]中详细讨论, 此处不再赘述。本文接下来主要讨论已知过时 CSI 下的分布式功率控制问题式(15)。因为 $D_2(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \tilde{\mathbf{P}})$ 中 $\boldsymbol{\xi}$ 已求得, 所以在下文中用 $D_2(\boldsymbol{\lambda}, \tilde{\mathbf{P}})$ 来代替 $D_2(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \tilde{\mathbf{P}})$ 。

3.1 分布式功率控制子问题

分布式功率控制问题式(15)可以解释为: 在已知过时 CSI 和节点总功率约束条件下, 根据拥塞价格 $\boldsymbol{\xi}$ 来合理分配功率以达到最大化业务流速率的目的。因为我们的应用场景为无线多跳网络, 集中式算法复杂度太高, 延时长, 所以需要借助分布式算法来求解功率控制问题式(15)。分析式(15)可知, 数据速率为多个发送端功率的耦合, 很难将它分解为本地优化问题。而 $\gamma_{mn} | \hat{\gamma}_{mn}$ 服从非中心卡方分布, $\hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P})$ 是一个复杂的多重积分, 导致解耦更加困难。对此我们提出一种基于过时 CSI 的消息传递机制来解决这一问题。

$\hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\mathbf{P})$ 是一个关于 \mathbf{P} 的非凸函数, 通过 $\tilde{\mathbf{P}} = \ln \mathbf{P}$ 变换, 式(15)可转变为一个凸优化问题。所以考虑式(15)的变形:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\tilde{\mathbf{P}}} D_2(\boldsymbol{\lambda}, \tilde{\mathbf{P}}) = \max_{\tilde{\mathbf{P}}} \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\tilde{\mathbf{P}}) \\ & \quad - \sum_{n \in N} \lambda_n \left(\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} e^{\tilde{P}_{nm}} - P_n^{\text{max}} \right) \\ & \text{s.t.} \quad \hat{C}_{l, \hat{\gamma}}(\tilde{\mathbf{P}}) = E_{\hat{\gamma}} \left\{ B \log_2 \left(1 + K \frac{e^{\tilde{P}_l} \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} e^{\tilde{P}_i} \gamma_{il} + 1} \right) \right\} \end{aligned} \right\} (16)$$

首先, 根据拉格朗日对偶分解技术, 采用梯度下降法^[7]来更新对偶变量 λ 。

$$\lambda_n(t+1) = \left[\lambda_n(t) + \varepsilon \left(\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} - P_n^{\text{max}} \right) \right]^+ \quad (17)$$

其中 ε 为一个非常小的正数步长, $[\cdot]^+ = \max(0, \cdot)$, 也就是说取 0 和 \cdot 之间的较大值。式(17)的物理意义很明显: 节点使用的总功率超过节点功率限制, 则增加功率的价格, 节点使用的总功率小于节点总功率限制, 则减小功率的价格。

在得到功率价格后, $D_2(\lambda, \tilde{\mathbf{P}})$ 可表示为 $D_2(\tilde{\mathbf{P}})$ 。

为了简化 $D_2(\tilde{\mathbf{P}})$ 求解过程描述, 令

$$L(\tilde{\mathbf{P}}) = \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l}(\tilde{\mathbf{P}}) = \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l}(\tilde{\mathbf{P}}) + \sum_{i \neq l, i \in L} \hat{C}_{l, \gamma_l}(\tilde{\mathbf{P}}) = L_l(\tilde{\mathbf{P}}) + L_i(\tilde{\mathbf{P}}) \quad (18)$$

其中 $L_l(\tilde{\mathbf{P}}) = \xi_l E_{\gamma_l} \left\{ B \log_2 \left(1 + K \frac{e^{\tilde{P}_l} \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} e^{\tilde{P}_i} \gamma_{li} + 1} \right) \right\}$, 则

$D_2(\tilde{\mathbf{P}})$ 可以简单表示为

$$D_2(\tilde{\mathbf{P}}) = L_l(\tilde{\mathbf{P}}) + L_i(\tilde{\mathbf{P}}) - \sum_{n \in N} \lambda_n \left(\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} e^{\tilde{P}_{nm}} - P_n^{\text{max}} \right) \quad (19)$$

接着用梯度算法求解式(16)。根据式(19), 首先可求得 $\nabla_l D_2(\tilde{\mathbf{P}}) = \nabla_l L_l(\tilde{P}_l) + \nabla_l L_i(\tilde{P}_l) - \lambda_n e^{\tilde{P}_l}$ 。

接下来分别求解 $\nabla_l L_l(\tilde{P}_l)$ 和 $\nabla_l L_i(\tilde{P}_l)$ 。

令 $\hat{\gamma}^l = \{\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{(l-1)l}, \hat{\gamma}_{(l+1)l}, \dots, \hat{\gamma}_{Ll}\}$ 代表除 $\hat{\gamma}_l$ 外的信道噪声比集合。根据参考文献[10]中式(33)可知式(20)成立:

$$L_l(\tilde{\mathbf{P}}) = \xi_l \frac{B}{\ln 2} \alpha_{ll} + \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_{ll} \psi(a_{ll}) + \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_{ll} \cdot \ln K e^{\tilde{P}_l} \theta_{ll} - \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_{ll} E \left\{ \ln \left(\sum_{i \neq l} e^{\tilde{P}_i} \gamma_{li} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^l \right\} \quad (20)$$

其中 $\psi(\cdot)$ 为欧拉 (Euler) 函数, $\alpha_{ll} = \ln(1 + z_{ll}) - (z_{ll}/(1 + z_{ll})) \ln(z_{ll})$, $\beta_{ll} = z_{ll}/(1 + z_{ll})$, $z_{ll} = K \hat{P}_l \hat{\gamma}_{ll} / (\sum_{i \neq l} \hat{P}_i \hat{\gamma}_{li} + 1)$, $a_{ll} = \left(\frac{\sigma_w^2}{1 - \rho^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{ll} + 1 \right) / \left(2 \frac{\sigma_w^2}{1 - \rho^2} \cdot \rho^2 \hat{\gamma}_{ll} + 1 \right)$, $i \neq l, i \in L$ 。上式中 α, β, a, θ 均只与节点

上一时隙的功率 \hat{P}_l 和信道信息 $\hat{\gamma}$ 相关, 所以对上式求 \tilde{P}_l 的导数, 可得

$$\nabla_l L_l(\tilde{P}_l) = \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_{ll} \quad (21)$$

而对于 $L_i(\tilde{\mathbf{P}})$, 链路 l 作为链路 i 的干扰, 其发射功率 \tilde{P}_l 只能出现在干扰项中。所以

$$L_i(\tilde{\mathbf{P}}) = \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i E_{\gamma_l} \left\{ B \log_2 \left(1 + \frac{K e^{\tilde{P}_i} \gamma_{ii}}{\sum_{j \neq i} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1} \right) \right\} \quad (22)$$

与式(20)同理可得

$$L_i(\tilde{\mathbf{P}}) = \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \frac{B}{\ln 2} \alpha_{ii} + \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \frac{B}{\ln 2} \beta_{ii} \psi(a_{ii}) + \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \frac{B}{\ln 2} \beta_{ii} \ln K e^{\tilde{P}_i} \theta_{ii} - \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \frac{B}{\ln 2} \beta_{ii} E \left\{ \ln \left(\sum_{j \neq i} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii} \right\} \quad (23)$$

$\alpha_{ii}, \beta_{ii}, a_{ii}, \theta_{ii}$ 同式(20)中所求。因为在信道建模时已经假设不同链路间信道独立同分布, 所以可得

$$E \left\{ \ln \left(\sum_{j \neq i} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii} \right\} = E \left\{ \ln \left(\sum_{j \neq i, j \neq l} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii, l} \right\} + E \left\{ \ln \left(1 + \frac{e^{\tilde{P}_l} \gamma_{li}}{\left(\sum_{j \neq i, j \neq l} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right)} \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii} \right\} \quad (24)$$

对式(24)的第 2 部分再次运用参考文献[10]中式(33)得

$$E \left\{ \ln \left(\sum_{j \neq i} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii} \right\} = \alpha_{li} + \beta_{li} \psi(a_{li}) + \beta_{li} \ln K e^{\tilde{P}_l} \theta_{li} - \beta_{li} E \left\{ \ln \left(\sum_{j \neq i, j \neq l} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1 \right) \middle| \hat{\gamma}^{ii, l} \right\} \quad (25)$$

其中 $\alpha_{li} = \ln(1 + z_{li}) - \frac{z_{li}}{1 + z_{li}} \ln(z_{li})$, $\beta_{li} = \frac{z_{li}}{1 + z_{li}}$,

$$z_{li} = \frac{K \hat{P}_l \hat{\gamma}_{li}}{\sum_{j \neq i, j \neq l} \hat{P}_j \hat{\gamma}_{ji} + 1}, a_{li} = \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{li} + 1 \right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{li} + 1 \right)}, \theta_{li} =$$

$\left(\rho^2 \hat{\gamma}_{li} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2} \right)^2 / (a_{li}), i \neq l, i \in L$ 。综合式(23)和式(25), 并对 \tilde{P}_l 求导可得

$$\nabla_l L_i(\tilde{P}_l) = - \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \frac{B}{\ln 2} \beta_{ii} \beta_{li} \quad (26)$$

至此, 我们可以求得

$$\nabla_l D_2(\tilde{P}_l) = \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_l - \sum_{i \neq l, i \in L} \frac{B}{\ln 2} \beta_{ii} \beta_{li} - \lambda_n e^{\tilde{P}_l} \quad (27)$$

根据梯度算法^[14]来更新功率 \tilde{P}_l 得:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_l(t+1) = & \tilde{P}_l(t) + \eta \nabla_l D_2(\tilde{P}) = \tilde{P}_l(t) + \eta \xi_l \frac{B}{\ln 2} \beta_l \\ & - \eta \frac{B}{\ln 2} \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \beta_{ii} \beta_{li} - \eta \lambda_n e^{\tilde{P}_l} \end{aligned} \quad (28)$$

将式(28)转换到 P 域得

$$\begin{aligned} P_l(t+1) = & P_l(t) - \eta \lambda_n + \eta \xi_l \frac{B}{P_l(t) \ln 2} \beta_l \\ & - \eta \frac{B}{P_l(t) \ln 2} \sum_{i \neq l, i \in L} \xi_i \beta_{ii} \beta_{li} \end{aligned} \quad (29)$$

这里的 $\eta \geq 0$ 为一个足够小的正数步长。重新将式(29)表达为

$$\begin{aligned} P_l(t+1) = & P_l(t) - \eta \lambda_n + \eta \xi_l \frac{B}{P_l(t) \ln 2} \beta_l \\ & - \eta \frac{B}{P_l(t) \ln 2} \sum_{i \neq l, i \in L} m_{li} \end{aligned} \quad (30)$$

其中, η, B 为已知常数, $\lambda_n, \xi_l, \beta_l$ 均可本地测量, $m_{li} = \xi_i \beta_{ii} \beta_{li}$ 代表从干扰链路 i 的发送端传递到 l 的发送端的功率消息, 它表征了链路 i 的拥塞状况。因为 ξ 定义为拥塞价格, 它的大小反映了区域拥塞情况, 所以式(30)可以解释为以下功率更新机制: 当本地拥塞严重时链路 l 增大自身的发射功率, 当邻居区域拥塞严重时链路 l 减小自身发射功率。下面简要地描述一下考虑过时信息的功率更新算法步骤:

步骤 1 在时隙 t , 每条链路 $i \in L$ 的发射节点通过式(31)计算其与链路 l 之间需交换的功率信息

$$m_{li} = \xi_i \beta_{ii} \beta_{li} \quad (31)$$

其中参量 $\xi_i, \beta_{ii}, \beta_{li}$ 都可以通过节点自身地测量得到;

步骤 2 链路 i 的发送端使用路由协议将功率信息 m_{li} 传递给链路 l 的发送端;

步骤 3 链路 l 的发送端根据本节点的功率消耗情况, 利用式(17)更新其功率价格;

步骤 4 链路 l 的发送端收集到所有干扰链路发送过来的功率消息之后, 利用式(30)更新其发射功率;

步骤 5 $t = t + 1$ 。返回到步骤 1。重复上述过程直到收敛。

3.2 算法的实现步骤

定义 $L_n^{\text{out}} \in L$ 为节点 n 的输出逻辑链路集合。综合上面讨论, 本文所提出的分布式的联合拥塞控制和功率控制算法步骤如下:

步骤 1 初始化所有变量。

步骤 2 在时隙 t , 节点 $n \in N$ 计算两组参数: 拥塞价格参量 $\xi_n = \{\xi_l, \forall l \in L_n^{\text{out}}\}$ 和功率信息 $m_n =$

$\{m_l, \forall l \in L_n^{\text{out}}\}$, 并通过路由协议, 将拥塞价格参量发送至业务流的源节点处用以更新业务流的发送速率, 将功率信息通过路由协议发送至干扰链路的发送端节点, 用来更新干扰链路发送端的发送功率。

步骤 3 在时隙 $t = t + 1$, 任意节点 $n \in N$ 分布式地执行如下计算: (1)如果属于某个业务流的源节点则求解拥塞控制问题式(14); (2)根据式(17)更新其功率价格; (3)根据式(30)调整输出链路的发射功率。

步骤 4 返回到步骤 2 直至结束。

3.3 计算复杂度和收敛性分析

在所提出的分布式算法中, 每个节点需要计算 4 个参量: 拥塞价格 ξ_l 、功率信息 m_n 、功率价格 λ_n 、业务流速率 f_s 和传输功率 P_l 。所以, 每个节点的计算复杂度均为常数阶, 为 $O(1)$ 时间复杂度。而集中式全局优化算法具有指数时间复杂度。由此可知, 本文提出的算法复杂度明显降低, 可适应于无线多跳网络环境。

又由强对偶原理^[12]可知, 凸优化问题经过拉格朗日对偶分解方法求出的对偶问题的极值点也为原始优化问题的最优解。所以, 该算法在迭代步长能满足收敛步长要求的前提下, 能保证动态追踪到原始问题的最优解。

4 数值仿真和性能分析

这部分通过 MATLAB 对所提出的资源分配算法进行仿真, 并分析其性能。在仿真过程中, 我们在 $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ 的区域内随机地生成 16 个移动节点, 设置其中一个为中心网关。随机选择两个节点以 60 km/h 的速度向网关节点匀速移动。拥塞价格更新步长和功率价格更新步长分别为 0.006 和 0.01, 步长是根据文献[12]所提供方法确定。

考虑 3 种性能参数的比较: (1)网络效用; (2)公平性指标; (3)能量效用。网络效用由式(11)中优化目标定义; 公平性指标定义为^[15]: $(\sum_{s \in S} f_s)^2 / (S \sum_{s \in S} (f_s)^2)$; 能量效用定义为 $\sum_{(f_s)^2} f_s / \sum_{l \in L} P_l$ 。为了便于比较, 考虑如下的 3 种算法: (1)根据瞬时 CSI 来分配资源的资源分配算法(算法 1); (2)根据 CSI 过时值来分配资源的传统资源分配算法(算法 2); (3)本文提出的分布式资源分配算法(算法 3)。

网络效用曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 使用过时的 CSI 来进行资源分配只能收敛到网络效用的次优值, 这是因为根据过时 CSI 所分配的流速率可能超过了链路实际可利用的速率, 所以实际的网络

效用会降低。

公平性指标曲线如图 2 所示。由图 2 可知, CSI 过时时间越长, 公平性越不理想。这是因为过时时间越长, 网络在进行资源的优化分配计算时对现状的了解越少, 越难公平的分配资源。而在本文的算法中, 由于考虑过时 CSI 的影响, 公平性性能得到改善。能量效用曲线如图 3 所示。在有限的功率约束下, 传统算法根据过时 CSI 来分配资源, 会导致下面两种情况: (1) 节点分配的链路速率超过链路实际可利用容量, 流传输的实际速率降低; (2) 节点分配的链路速率低于链路实际可利用容量, 造成链路

资源的浪费。这两种情况都会导致网络总能量效用降低。

5 结束语

本文首次在动态无线多跳网络中考虑了过时 CSI 对跨层资源分配带来的影响, 并提出了一种考虑过时 CSI 影响的联合拥塞控制和功率控制的算法。相比集中式的优化算法, 该算法具有较低的计算复杂度, 因此更适用于无线多跳网络环境, 且仿真结果进一步表明, 算法能够改进网络资源分配的合理性, 提高网络总体效用, 降低能耗。

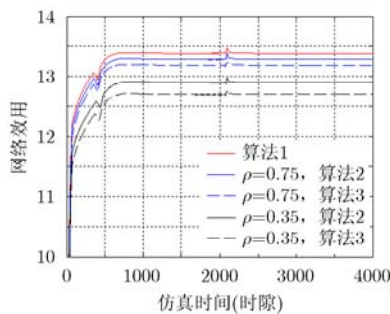


图 1 网络效用

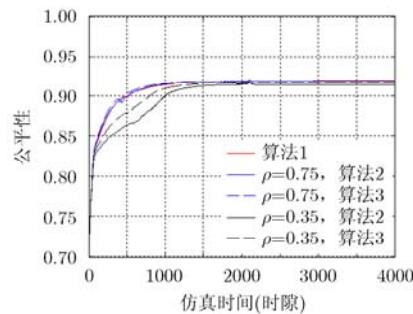


图 2 公平性

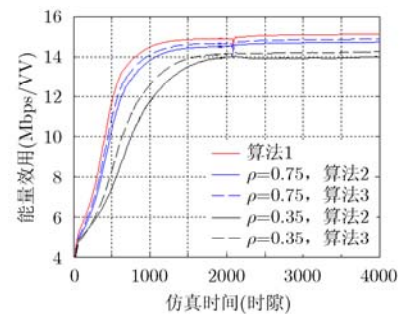


图 3 能量效用

参考文献

- [1] Path H and Rudra D. A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 396–426.
- [2] Xiong H, Li R, Eryilmaz A, et al. Delay-aware cross-layer design for network utility maximization in multi-hop networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(5): 951–959.
- [3] 黄鑫, 冯穗力, 柯峰, 等. 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[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(11): 2600–2604.
- [4] Augusto C, Carvalho C, da Silva M, et al. REUSE: a combined routing and link scheduling mechanism for wireless mesh networks[J]. *Elsevier Computer Communications*, 2011, 34(18): 2207–2216.
- [5] Shi Y, Hou Y, Kompella S, et al. Maximizing capacity in multihop cognitive radio networks under the SINR model[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(7): 954–967.
- [6] Xie R, Yu F, and Ji H. Dynamic resource allocation for heterogeneous services in cognitive radio networks with imperfect channel sensing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(2): 770–780.
- [7] Cui H, Song L, and Jiao B. Weighted amplify-and-forward relay selection with outdated channel state information[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(6): 651–654.
- [8] Shankhanaad M, Mohammad M, and Vijay K. Joint relay selection and power allocation for decode-and-forward cellular relay network with channel uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(10): 3496–3508.
- [9] Ayaz A and Mohamad A. Margin adaptive resource allocation in downlink OFDMA system with outdated channel state information[C]. *Proceedings of the IEEE 20th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 2009: 1868–1872.
- [10] Kim H, Wang H, Lim S, et al. On the impact of outdated channel information on the capacity of secondary user in spectrum sharing environments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 284–295.
- [11] Lim S, Wang H, Kim H, et al. Mean value-based power allocation without instantaneous CSI feedback in spectrum sharing systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(3): 874–879.
- [12] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 307–390.
- [13] Huang X, Feng S, and Zhuang H. Jointly optimal congestion control, channel allocation and power control in multi-channel wireless multi-hop networks[J]. *Elsevier Computer Communications*, 2011, 34(15): 1848–1857.
- [14] Bertsekas D. *Nonlinear Programming*[M]. Belmont: Athena Scientific, 1995: 200–210.
- [15] Jain R, Chiu D, and Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system[R]. Eastern Research Laboratory, No. DEC-TR-301, 1984.

冯 维: 女, 1984 年生, 博士, 研究领域为无线多跳网络的跨层资源分配。

冯穗力: 男, 1955 年生, 博士, 博士生导师, 研究方向为信息网络理论与技术、通信信号处理等。

丁跃华: 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 研究方向为信息网络理论与技术。

黄 鑫: 女, 1984 年生, 博士, 研究多跳网络的资源分配。