

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.01.007

低能耗高效率的分布式跨层资源分配算法^①

邱 彬

汕头职业技术学院 计算机系, 广东 汕头 515078

摘要: 为了最大化地减少过时 CSI(Channel State Information, 信道状态信息)对分布式无线多跳网络环境下跨层资源分配实际速率所造成的负面作用, 提出了一种优化的补偿式跨层联合资源分配算法. 该方法将信道存在相关性作为设计的理论前提, 对瞬时和过时信道两种状态信息的概率密度函数进行详尽运算, 并结合瑞利衰落信道模型进行分析, 在得出运算结果之后就可以获得信噪比(SINR)模型下条件容量的闭式解. 在提升网络性能方面, 运用一种对过时信道状态信息展开有效处理的、可以联合拥塞控制、信道分配和功率控制的算法, 将网络资源分配转变为一类 NUM 问题. 实验结果表明, 本文算法大幅度优化了分布式多跳网络资源分配机制, 提高了网络资源的效用, 并且减少了能耗.

关键词: 多跳网络; 跨层资源分配; 相关性; 信噪比; NUM 问题

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)01-0035-12

目前针对网络领域的跨层设计研究具有重要价值, 它的核心思想是系统按照已经获得的网络状态信息, 把层次有显著区别的网络资源通过建模的方式转变为一个联合最优化问题, 然后利用此类算法制定一个十分科学严谨的资源分配策略.

许多专家针对无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)跨层资源分配算法进行了详细地探究分析^[1-5]. 然而, 绝大部分学术成果都是建立在这样一个前提之下: 节点获得的 CSI 是实时的、完善的. 但在客观现实中, 节点接收到的信息通常情况下是残缺的^[6]. 就目前而言, 仅仅有十分稀少的文献在 OFDMA 的下行传输过程^[7-8]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^[9-10]里面研究了其时效性. 文献[7]研究了一类针对过时 CSI 影响的集中式联合多载波和功率分配的全新运算方法. 文献[8]研究了一类考虑了过时 CSI 影响的集中式联合多载波和功率分配的运算方法. 文献[9]探究了无线电频谱共享环境下次系统感知的 ST-PR 中 CSI 对容量形成的负面作用. 文献[10]研究了认知无线网络次系统.

在现实情况中, 延时的影响十分突出, 它对多跳的网络环境造成的负面作用尤其显著, 形成这种情况的原因是信息可能会通过大于一跳的传输反馈到另外的位置. 针对这种情况, 创设一类结合信道状态信息时效性的分布式运算方法来优化资源分配的精准性是一项有突出价值意义的工作.

本文将信道存在相关性作为理论研究的基础, 结合瑞利衰落信道模型的研究方法, 对瞬时和过时两种过时信道状态信息中的条件概率密度函数展开分析, 并由此获得特定条件容量的闭式解. 另外, 为显著优化网络整体性能, 本文提出了一种专门对过时信道状态信息展开分析的算法, 将网络节点资源分配问题归纳为一类 NUM 问题, 链路资源、功率限制等充当相应的约束规则, 最后利用拉格朗日对偶分解技术进行分布式运算并得出结果.

① 收稿日期: 2015-10-04

基金项目: 汕头职业技术学院科研重点课题(SZK2016Z01).

作者简介: 邱彬(1981-), 男, 广东汕头人, 讲师, 主要从事计算机网络、计算机应用等研究.

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

本文分析了动态的多射频多信道的无线网状网模型. 先后运用 N 与 L 来指代无线节点和链路的集合, $(m,$

$n)$ 具体指代接收端 n 与发送端 m 的链路, 先后利用 $f_{\gamma_n|\bar{\gamma}_n}(\gamma_n | \hat{\gamma}_n) = \frac{\sigma_w^2}{1-\rho^2} e^{\frac{\sigma_w^2}{1-\rho^2}(\gamma_n + \rho^2 \hat{\gamma}_n)}$ 与 $I_0\left(2 \frac{\sigma_w^2}{1-\rho^2} \sqrt{\rho^2 \gamma_n \hat{\gamma}_n}\right)$ 与 L_n^{out} 指代输出节点和输入节点的链路族, 同理, 分别通过 $N_n^in = \{m: (m, n) \in L_n^in\}$ 与 $N_n^{out} = \{m: (m, n) \in L_n^{out}\}$ 指代 n 实际的输入、输出邻居. L_n^k 的具体含义为 n 上射频端子 k 的链路, I_n 的具体含义为 n 上可用的射频端子. $\Theta = \{1, 2, \dots, C\}$ 表示网络中的可用信道数, 除此之外, 它的最大取值为 C . 网络工作方式是时分多址, 定义 T 为相应的时隙集. 同时, 初始网络拓扑的形成通过文献[11]的 Hyacinth 拓扑生成算法进行.

1.2 信道模型

运用上文所论述的链路模型, 可把 (m, n) 在 n 处的接收信号通过下述式子进行表达:

$$y_n = h_{nm}x_m + \omega_n \quad (1)$$

$x_m \in \Omega$ 是指 m 传送的符号, 实际的平均功率为 $P_m = E[|x_m|^2]$, 符合条件 $\omega_n \in \Omega$, 并且还满足 $\omega_n: CN(0, \sigma_w^2)$, $h_{nm} \in \Omega$ 为 (m, n) 的信道响应, 通过建模使其成为瑞利衰落信道, 即符合条件 $h_{nm}: CN(0, 1)$. 为了使求解的步骤得到简化, 在这里我们假设时隙里面 $h_{nm} \in \Omega$ 的信道响应是恒定不变的, 并且假设所有链路间信道独立同分布. 为分析过时的 CSI 具有的实际作用, 本文对 h_{nm} 进行如下建模^[9-10]:

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

其中: e_{nm} 为具体的复高斯随机变量, \hat{h}_{nm} 指代过时信道响应. 对(2)式进行整体分析可知 e_{nm} 与 h_{nm} 是没有关联的. 结合 Jakes 模型的相关理论可得 h_{nm} 和 \hat{h}_{nm} 的相关系数 $\rho = J_0(2\pi f_d \tau)$, 针对该系数而言, τ 指代 h_{nm} 和 \hat{h}_{nm} 的实际时间间隔, f_d 指代具体的多普勒频移, 除此之外, $J_0(\cdot)$ 为第一类 0 阶贝塞尔函数. 通过上述分析不难发现 h_{nm} 与 \hat{h}_{nm} 服从联合复高斯分布, 再结合贝叶斯公式对其进行运算, 可知 $h_{nm} | \hat{h}_{nm}$ 服从复高斯分布, 表示方式如下:

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

通过上述分析我们可知, \hat{h}_{nm} 恒定不变的时候, 将 $\gamma_n = \frac{|h_{nm}|^2}{\sigma_w^2}$ 指代载噪比 CNR, $\hat{\gamma}_n = \frac{|\hat{h}_{nm}|^2}{\sigma_w^2}$ 指的是之前某个时刻的 CNR 值, 针对此类情况, $\gamma_n | \hat{\gamma}_n$ 服从 χ^2 分布, 相应的自由度为 2 ^[9-10]:

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

1.3 问题建模

还需要解决如下问题: 在掌握过去某一时刻 CSI 并保证业务流速率公平性的前提下, 如何通过联合功率配置、信道配置和拥塞调控让网络整体运作效率提升到最大.

1.3.1 信道分配约束条件

以 $\mathbf{x}_l = (x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lC})$ 指代信道分配向量(二进制), 在这里不可忽视的一个问题为: 只有当 l 被分配了信道 c 的时候, $x_{lc} = 1$, 否则 $x_{lc} = 0$. 所以, $C_l(X, P) = B \log_2(1 + K \times SINR_l(X, P))$, $\forall l \in L$, 其中只有 1 个数值是 1, 另外的全部都是 0. 其原因是 1 条链路在 1 个时隙只能使用 1 个信道. $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_L^T)$ 则可以代表网络里面全部 L 条链路的信道分配矩阵. 通过上文的分析, 信道约束则可利用下述方法进行表达:

$$\mathbf{x}_l \mathbf{1}^T = 1, \forall l \in L \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{x}_i, \forall l, i \in L_n^k, n \in N, k \in I_n \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T = \begin{cases} 0, & \mathbf{x}_i \neq \mathbf{x}_l \\ 1, & \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_l \end{cases}, i \neq l \quad (7)$$

式(5)的含义为 1 条链路在 1 个时隙只可以使用 1 个信道. 式子(6)的含义为共享同一个射频端子的链路只能在一样的信道上进行运作. 式子(7)的含义为当信道一样时, 各个 $\mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T = 1$, 否则该数值为 0.

1.3.2 功率约束条件

$|L|$ 指代 L 里面元素的实际数量, $P = (P_1, P_2, \dots, P_{|L|})$ 指代实际传输功率, P_n^{\max} 指代 n 所能到达的最大功率, $N_n^m \subset N$ 与 $N_n^{\text{out}} \subset N$ 指代 n 输入与输出邻居的整个集合. 针对此类情况, $n \in N$ 的发送功率约束则可以运用下述式子进行描述:

$$0 \leq \sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_m \leq P_n^{\max}, n \in N \quad (8)$$

1.3.3 链路可用容量约束条件

假定网络里面成功激活的业务流的总量有 s 个, 在这里以 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_s\}$ 来代表业务流的实际流速, $L(s)$ 代表的是传输路径, 因此, 可通过下述式子对链路容量限制进行描述:

$$\sum_{s, l \in L(s)} f_s \leq C_l(P), \forall i \neq l, \forall l \in L \quad (9)$$

链路可用容量则可以利用下述式子展开描述:

$$C_l(X, P) = B \log_2(1 + K \times \text{SINR}_l(X, P)), \forall l \in L \quad (10)$$

其中: K 指代与调制方法密切相关的部分常数, B 指代实际的信道带宽, SINR_l 指代 l 中有价值的信号和无用信号的强度比值. 根据消息的并发传输机制, 可通过(11)式计算 l 的 SINR :

$$\text{SINR}_l(X, P) = \frac{P_l |h_{ll}|^2}{\sum_{i \neq l} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T P_i |h_{il}|^2 + \sigma_w^2} = \frac{P_l \gamma_l}{\sum_{i \neq l} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T P_i \gamma_i + 1} \quad (11)$$

其中: σ_w^2 指代接收到的噪声功率. 易知节点在正常情况下获得瞬时 CSI 的难度较大, 但是节点知道 $h_{mm} | \hat{h}_{mm}$ 的分布函数特性. 按照 $h_{mm} | \hat{h}_{mm}$ 所具有的分布函数, 可知条件容量的实际期望是:

$$\hat{C}_{l, \gamma}^{\wedge}(X, P) = E_{\gamma} \left\{ B \log_2 \left[1 + K \frac{P_l \gamma_l}{\sum_{i \neq l} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T P_i \gamma_i + 1} \right] \right\} \quad (12)$$

$$\forall i \neq l, \forall l \in L$$

其中: $\gamma = \{\gamma_{1l}, \gamma_{2l}, \dots, \gamma_{|L|l}\}$ 指代 l 中所有的瞬时信道噪声比集合, $\hat{\gamma} = \{\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|l}\}$ 指代整体的过时值集合, γ_{il} 指代 i 的传输端到 l 的接收端信道的信道噪声比. 如此, 可展开重新建模的工作, 业务流速率分配约束条件(6)可以利用下述方式进行描述:

$$\sum_{s, l \in L(s)} f_s \leq \hat{C}_{l, \gamma}^{\wedge}(X, P), \forall i \neq l, \forall l \in L \quad (13)$$

对式(13)进行分析可知基于 SINR 模型的条件容量为比较繁杂的多重积分. 但是, 按照文献[12]中式(33)有:

$$E_{\gamma} \{ (\log(1 + \kappa \gamma)) | \hat{\gamma} \} = \alpha + \beta \{ \log(\kappa \theta) + \psi(\alpha) \} \quad (14)$$

其中: $\psi\{\cdot\}$ 代表的是 Euler PSI 函数,

$$\alpha = \log(1 + z) - \frac{z}{1+z} \log(z), \beta = \frac{z}{1+z}, z = \kappa \hat{\gamma}$$

$$a = \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma} + 1 \right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma} + 1 \right)}, \theta = \frac{\left(\rho^2 \hat{\gamma} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2} \right)^2}{(a)}$$

由于不一样的信道独立同分布, 因此:

$$\begin{aligned}
 & E\left(\text{Blog}_2\left(1 + \frac{KP_l}{\sum_{i \neq l, i \in L} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1} \gamma_{ll}\right) \mid (\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|, l})\right) = \\
 & \frac{B}{\log 2} \left\{ \alpha_l + \beta_l \psi(a_l) + \beta_l E\left(\log\left(\frac{KP_l \theta_l}{\sum_{i \neq l, i \in L} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1}\right) \mid (\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{(l-1), l}, \hat{\gamma}_{(l+1), l}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|, l})\right)\right\} = \\
 & \frac{B}{\log 2} \alpha_l + \frac{B}{\log 2} \beta_l \psi(a_l) + \frac{B}{\log 2} \beta_l \log KP_l \theta_l - \\
 & \frac{B}{\log 2} \beta_l E(\log(1 + \sum_{i \neq l, i \in L} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{(l-1), l}, \hat{\gamma}_{(l+1), l}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|, l})) \tag{15}
 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \alpha_l &= \log(1 + z_l) - \frac{z_l}{1 + z_l} \log(z_l), \quad \beta_l = \frac{z_l}{1 + z_l}, \quad z_l = \frac{KP_l \hat{\gamma}_{ll}}{\sum_{i \neq l} X_i X_i^T P_i \hat{\gamma}_{il} + 1} \\
 a_l &= \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{ll} + 1\right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{ll} + 1\right)}, \quad \theta_l = \frac{\left(\rho^2 \hat{\gamma}_{ll} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2}\right)^2}{(a_l)}
 \end{aligned}$$

以 $M' = \{1', 2', \dots, i', \dots, m'\} \in L$ 指代链路 l 的干扰链路族, 我们可得:

$$\sum_{i \neq l} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1 = \sum_{i \neq l, i \in M'} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1 = \sum_{i \neq l, i' \in L} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1$$

所以, 根据式(14)式, 可得

$$\begin{aligned}
 & E\left(\text{Blog}_2\left(1 + \frac{KP_l}{\sum_{i \neq l, i \in L} x_i^* (x_i^*)^T P_i \gamma_{il} + 1}\right) \mid (\hat{\gamma}_{1l}, \hat{\gamma}_{2l}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|, l})\right) = \\
 & \frac{B}{\log 2} \alpha_l + \frac{B}{\log 2} \beta_l \psi(a_l) + \frac{B}{\log 2} \beta_l \log KP_l \theta_l - \\
 & \frac{B}{\log 2} \beta_l E(\log(1 + \sum_{i \notin M'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{1'l}, \hat{\gamma}_{2'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) \tag{16}
 \end{aligned}$$

且

$$\begin{aligned}
 & E\{\log(1 + \sum_{i \neq l, i' \in M'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{1'l}, \hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})\} = \\
 & E\left[\log\left((1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \left(1 + \frac{(P_{1'} \gamma_{1'l})}{(1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il})}\right)\right) \mid (\hat{\gamma}_{1'l}, \hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})\right] = \\
 & E\left(\log\left(1 + \frac{P_{1'}}{1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}} \gamma_{1'l}\right) \mid (\hat{\gamma}_{1'l}, \hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})\right) + \\
 & E(\log(1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) = \\
 & \alpha_{1'} + \beta_{1'} \psi(a_{1'}) + \beta_{1'} \log P_{1'} \theta_{1'} - \\
 & \beta_{1'} E(\log(1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) + \\
 & E(\log(1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) = \\
 & \alpha_{1'} + \beta_{1'} \psi(a_{1'}) + \beta_{1'} \log P_{1'} \theta_{1'} - (\beta_{1'} - 1) E(\log(1 + \sum_{i' \neq l, i' \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) \tag{17}
 \end{aligned}$$

因此, 使 $\tau_i = \alpha_i + \beta_i \psi(a_i) + \beta_i \log P_i \theta_i$, 式子(17)可相应简化为

$$\begin{aligned}
 & E(\log(1 + \sum_{i \in M'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{1'l}, \hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) = \\
 & \tau_{1'} - (\beta_{1'} - 1) E(\log(1 + \sum_{i \in M', i' \neq 1'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{2'l}, \hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) = \\
 & \tau_{1'} - (\beta_{1'} - 1) (\tau_{2'} - (\beta_{2'} - 1) E(\log(1 + \sum_{i \in M', i' \neq 1', i' \neq 2'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l}))) = \\
 & \tau_{1'} - \tau_{2'} (\beta_{1'} - 1) + (\beta_{1'} - 1) (\beta_{2'} - 1) E(\log(1 + \sum_{i \in M', i' \neq 1', i' \neq 2'} P_i \gamma_{il}) \mid (\hat{\gamma}_{3'l}, \dots, \hat{\gamma}_{m'l})) = \\
 & \tau_{1'} - \tau_{2'} (\beta_{1'} - 1) + \tau_{3'} (\beta_{1'} - 1) (\beta_{2'} - 1) - \dots - + \\
 & (-1)^{m-1} (\beta_{1'} - 1) (\beta_{2'} - 1) \dots (\beta_{(m-1)'} - 1) E(\log(1 + P_i \gamma_{il}) \mid \hat{\gamma}_{m'l}) = \\
 & \tau_{1'} - \tau_{2'} (\beta_{1'} - 1) + \tau_{3'} (\beta_{1'} - 1) (\beta_{2'} - 1) - \dots - +
 \end{aligned}$$

$$(-1)^{m-1}(\beta_{1'} - 1)(\beta_{2'} - 1)\cdots(\beta_{(m-1)'} - 1) + (-1)^m(\beta_{1'} - 1)(\beta_{2'} - 1)\cdots(\beta_{m'} - 1) \quad (18)$$

其中：

$$\alpha_{i'} = \log(1 + z_{i'}) - \frac{z_{i'}}{1 + z_{i'}} \log(z_{i'}), \beta_{i'} = \frac{z_{i'}}{1 + z_{i'}}, z_{i'} = \frac{KP_{i'} \hat{\gamma}_{i'l}}{\sum_{j' \in (i'+1, i'+2, \dots, m')} P_{j'} \hat{\gamma}_{j'l} + 1}$$

$$a_{i'} = \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{i'l} + 1\right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{i'l} + 1\right)}, \theta_{i'} = \frac{\left(\rho^2 \hat{\gamma}_{i'l} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2}\right)^2}{(a_{i'})}, i' \in M$$

把式(18) 带入式(16), 获得 SINR 模型下的条件容量为

$$\hat{C}_{l, \gamma_l}^{\wedge}(X, P) = \frac{B}{\log_2}$$

$$\left[\tau_l - \tau_{1'}\beta_l + \tau_{2'}\beta_l(\beta_{1'} - 1) - \tau_{3'}\beta_l(\beta_{1'} - 1)(\beta_{2'} - 1) + \cdots + \right. \\ \left. (-1)^m \tau_m \beta_l (\beta_{1'} - 1)(\beta_{2'} - 1)\cdots(\beta_{(m-1)'} - 1) + (-1)^{m+1} \beta_l (\beta_{1'} - 1)(\beta_{2'} - 1)\cdots(\beta_{m'} - 1) + \beta_l \log K \right] \quad (19)$$

针对(19) 式而言, $M' = \{1', 2', \dots, m'\}$, $l \notin M'$ 代表的是路 l 的干扰链路族

$$(\mathbf{x}_i^* \mathbf{x}_l^*)^T = \begin{cases} 1, & \text{if } i \in M' \\ 0, & \text{if } i \notin M' \end{cases}$$

$$\tau_i = \alpha_i + \beta_i \psi_i(a_i) + \beta_i \log_2 P_i \theta_i$$

$$\alpha_i = \log(1 + z_i) - \frac{z_i}{1 + z_i} \log(z_i), \beta_i = \frac{z_i}{1 + z_i}$$

$$Z_i = \begin{cases} \frac{KP_i \hat{\gamma}_{il}}{\sum_{j \in (i+1, i+2, \dots, m')} P_j \hat{\gamma}_{jl} + 1}, & i \neq l, i \in M' \\ \frac{KP_i \hat{\gamma}_{il}}{\sum_{j \in (1, 2, \dots, m')} P_j \hat{\gamma}_{jl} + 1}, & i = l \end{cases}, a_i = \begin{cases} \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{il} + 1\right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{il} + 1\right)}, & i \neq l, i \in M' \\ \frac{\left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{ii} + 1\right)^2}{\left(2 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_e^2} \rho^2 \hat{\gamma}_{ii} + 1\right)}, & i = l \end{cases}$$

$$\theta_i = \begin{cases} \frac{\left(\rho^2 \hat{\gamma}_{il} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2}\right)^2}{(a_i)}, & i \neq l, i \in M' \\ \frac{\left(\rho^2 \hat{\gamma}_{ii} + \frac{\sigma_e^2}{\sigma_w^2}\right)^2}{(a_i)}, & i = l \end{cases}, \forall i \in M' \cup l$$

1.3.4 NUM 问题

NUM 问题可利用下述式子对其进行描述：

$$\max_{F, X, P} \sum_{s \in S} U(f_s)$$

subject to

$$\mathbf{x}_l \mathbf{1}^T = 1, \forall l \in L,$$

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{x}_i, \forall l, i \in L_n^k, n \in N, k \in I_n,$$

$$0 \leq \sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{nm} \leq P_n^{\text{max}}, \quad (20)$$

$$\sum_{s, l \in L(s)} f_s \leq \hat{C}_{l, \gamma_l}^{\wedge}(X, P), \forall l \in L$$

$$\hat{C}_{l, \gamma_l}^{\wedge}(X, P) = E_{\gamma_l}^{\wedge} \left\{ B \log_2 \left[1 + K \frac{P_l \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_l^T P_i \gamma_{il} + 1} \right] \right\},$$

$$\forall i \neq l, \forall l \in L$$

针对上式而言, $U(f_s)$ 代表的是效用函数, 其选取可以根据具体的优化目标来进行. 在这里, 业务流间的比例公平性利用式子 $U(f_s) = \log(f_s)$ 获得^[13].

2 分布式算法

针对集中式算法而言, 在动态网络优化的实际规模比较庞大的时候, 求解需要耗费比较长的时间, 如此就导致求得的优化结果不能够很好应用于网络中. 针对这种情况, 本文将论述一种全新的分布式算法. 首先, 利用 Lagrange duality 分解方法^[14] 得到原始问题的 Lagrange duality 问题; 然后根据分解原理把该问题不断细分获得若干个子问题, 所有子问题通过拉格朗日对偶变量进行协调, 式(20)的对偶问题可描述为:

$$\min_{\xi \geq 0} \max_{F, P} D(\xi, F, X, P) \quad (21)$$

对偶函数可利用下述式子展开描述:

$$D(\xi, F, X, P) = \sum_{s \in S} U(f_s) - \sum_{l \in L} \xi_l \left(\sum_{s, l \in L(S)} f_s - \hat{C}_{l, \gamma} \hat{\gamma}(X, P) \right) \quad (22)$$

针对式(22)而言, $\xi_l \geq 0$ 是对偶变量, 它代表的是引入的拉格朗日乘子, 通过 $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{|L|}]^T$ 来代表其实际向量. 在这个前提上, 运用对偶分解原理将式(21)再一次分解为如下两个子问题:

$$\begin{aligned} & \max_F D_1(\xi, F) \\ D_1(\xi, F) &= \sum_{s \in S} U(f_s) - \sum_{l \in L} \xi_l \sum_{s, l \in L(S)} f_s \end{aligned} \quad (23)$$

与

$$D_2(\xi, X, P) = \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma} \hat{\gamma}(X, P) \quad (24)$$

1) 式(23)对于分配业务流速率发挥了决定性作用, 它是一类比较典型的拥塞控制问题, 详细来讲, 可通过下述式子展开相应的运算:

$$f_s^* = U_s'^{-1} \left(\sum_{l \in L(S)} \xi_l \right) \quad (25)$$

2) 式(24)是指联合信道分配和功率控制问题, 通过对偶变量 ξ_l 对 X 与 P 间的影响进行良好控制. 运用次梯度算法对 ξ_l 进行更新, 相应的运算步骤为:

$$\xi_l(t+1) = \left[\xi_l(t) + \frac{\mu}{\hat{C}_{l, \gamma} \hat{\gamma}(X, P)} \left(\sum_{s, l \in L(S)} f_s(t) - \hat{C}_{l, \gamma} \hat{\gamma}(X, P) \right) \right]^+ \quad (26)$$

其中: f_s 可通过式(25)得出, X 与 P 可通过式(24)得出, $[\cdot]^+ = \max(0, \cdot)$, t 是迭代时隙, μ 是更新步长. 对式(26)进行分析可知对偶变量为 l , 其取值需考虑传输层的实际速率需求和物理层的信道状态, 从总体上讲, 相应的需求越低, 信道状态就越好, ξ_l 就越大, 因此, ξ_l 还被称之为 l 的拥塞价格^[15].

根据原始分解技术^[16], 可以对子问题 2) 进行进一步分解, 使它变为子问题: 换言之, 就是分析过时信道状态信息作用的信道分配与功率控制这两个问题.

针对子问题 1), 可利用下述式子对其展开描述:

$$\begin{aligned} & \max_X \sum_{l \in L} \xi_l E_{\gamma} \left\{ \text{B} \log_2 \left[1 + K \frac{P_l^* \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} x_i x_i^T P_l^* \gamma_{il} + 1} \right] \right\} \\ & \text{subject to} \\ & x_l 1^T = 1, \quad \forall l \in L, \\ & x_l = x_i, \quad \forall l, i \in L_n^k, n \in N, k \in I_n \end{aligned} \quad (27)$$

其中 P_l^* 可通过式(29)获得. 此类问题可利用集中式获得相应的解, 然而该运算步骤比较繁琐. 为了简化求解过程, 可利用分布式方式对式(27)展开运算, 具体的运算方式为:

$$\begin{aligned} & \max_{x_j, j \in L_n} \sum_{l \in L} \xi_l E_{\gamma_l} \left\{ \text{B} \log_2 \left[1 + K \frac{P_l^* \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} x_i x_l^T P_l^* \gamma_{li} + 1} \right] \right\} \\ & \text{subject to} \\ & x_l \mathbf{1}^T = 1, \forall l \in L, \\ & x_l = x_i, \forall l, i \in L_n^k, n \in N, k \in I_n \end{aligned} \quad (28)$$

在式(28)中,各节点 n 负责为链路 j ($j \in L_n$) 分配信道,并且会定期对信息进行更换,除此之外,以 $|V_{\max}|$ 代表与网络相互衔接的节点的最大连接数,并且还符合条件 x_j ($j \in L_n$),最大可能取值一共有 C 种,所以,针对各节点来讲,求解式(28)的复杂程度最多为 $C^{|V_{\max}|}$. 其主要原因为,尽管网络的规模不断扩大,通常而言, $|V_{\max}|$ 状态保持恒定,所以,本地运算的信道分配问题的复杂程度也不发生变化.

针对子问题 2), 可通过下述式子对其展开描述:

$$\begin{aligned} & \max_p \sum_{l \in L} \xi_l E_{\gamma_l} \left\{ \left[\text{B} \log_2 \left[1 + K \frac{P_l \gamma_{ll}}{\sum_{i \neq l} x_i^* x_l^{*T} P_l \gamma_{li} + 1} \right] \right] \mid \gamma \right\} \\ & \text{subject to} \\ & 0 \leq \sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{mm} \leq P_n^{\text{max}}, n \in N \end{aligned} \quad (29)$$

其中 x_i^* 为式(28)的解.

2.1 分布式功率控制子问题

式(29)的含义为:在之前某个时刻 CSI 和节点总功率已知的前提下,按照 ξ 对功率进行科学调配,以此让业务流的实际速率提升到最大. 除此之外, $\hat{C}_{l, \gamma_l} (P)$ 是一类繁琐程度比较高的多重积分, $\gamma_n \mid \hat{\gamma}_n$ 符合非中心卡方分布,如此就导致解耦难度显著提升. 本文结合过时 CSI 影响的消息传递机制来消除该问题.

拉格朗日对偶变换可得式(29)的对偶函数,具体如下所示:

$$L(P, \zeta) = \sum_{n \in N} \sum_{l \in L_n^{\text{in}}} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l} (P) - \sum_{n \in N} \zeta_n \left\{ \sum_{l \in L_n^{\text{in}}} P_l - P_n^{\text{max}} \right\} \quad (30)$$

其中 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{|L|})^T$ 表示对偶变量向量. 对应的对偶问题为 $\min_{\xi \geq 0} \max_P L(\xi, P)$.

$\hat{C}_{l, \gamma_l} (P)$ 为非凸函数,利用 $\hat{p} = \ln P$ 变换,转化式(29)使其成为凸优化问题. 因此,式(30)可以转化为下面的形式:

$$L(\hat{P}, \zeta) = \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l} (\hat{P}) - \sum_{l \in L_n^{\text{in}}} e^{\hat{P}_l - P_n^{\text{max}}} \quad (31)$$

对应的对偶问题为 $\min_{\xi \geq 0} \max_{\hat{P}} L(\hat{P}, \xi)$.

根据拉格朗日对偶分解方法,可利用梯度下降法^[18-19]对 ζ_n 展开更新

$$\zeta_n(t+1) = [\zeta_n(t) + \varepsilon (\sum_{m \in N_n^{\text{out}}} P_{mm} - P_n^{\text{max}})^+] \quad (32)$$

其中: ε 指代具体的正数步长, $[\cdot]^+ = \max(0, \cdot)$. 一般情况下, 0 与 \cdot 哪一个数值比较大则选择哪一个. 另外,式(22)还具有一定的物理意义:根据总功率是否在限制功率内来判定是否应该对功率价格进行改变.

就各功率价格来说,应当计算对偶问题式(31)的解. 通过函数求导,可得到下述公式:

$$\nabla_l L(\hat{P}, \zeta) = \frac{\xi_l B \beta_l}{\log_2} - \sum_{n \in N} \sum_{i \neq l, l \in L_n^{\text{in}}} x_i^* (x_i^*)^T \frac{\xi_l B \beta_l \beta_{li}}{\log_2} - \zeta_n e^{\hat{P}_l} \quad (33)$$

$$L(\hat{P}, \zeta) = \sum_{l \in L} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l} (\hat{P}) - \sum_{n \in N} \zeta_n (\sum_{l \in L_n^{\text{in}}} e^{\hat{P}_l} - P_n^{\text{max}}) \quad (34)$$

$$f(\hat{P}) = \sum_{n \in N} \sum_{l \in L_n^{\text{in}}} \xi_l \hat{C}_{l, \gamma_l} (\hat{P}) =$$

$$\overbrace{\xi_1 \hat{C}_{l, \gamma_l} (\hat{P})}^{\text{for link } l} + \overbrace{\sum_{n \in N} \sum_{i \in L_n^{\text{in}}, i \neq l} \xi_i \hat{C}_{l, \gamma_l} (\hat{P})}^{\text{for link } i, i \neq l} =$$

$$f_l(\tilde{P}) + f_i(\tilde{P}) \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{l, \gamma}(\tilde{P}) = & \left\{ B \log_2 \left[1 + \frac{K e^{\tilde{P}_i} \gamma_{ii}}{\sum_{j \neq i} x_j^* (x_i^*)^T e^{\tilde{P}_j} \gamma_{ji} + 1} \right] \mid (\hat{\gamma}_{1, i}, \hat{\gamma}_{2, i}, \dots, \hat{\gamma}_{|L|, i}) \right\} = \\ & \frac{B}{\log 2} \alpha_i + \frac{B}{\log 2} \beta_i \psi(a_i) + \frac{B}{\log 2} \beta_i \ln K e^{\tilde{P}_i} \theta_i - \\ & \frac{B}{\log 2} \beta_i [\alpha_i + \beta_i \psi(a_i) + \beta_i \log e^{\tilde{P}_i} \theta_i - (\beta_i - 1) E(\log(1 + \sum_{j \neq i, j' \neq l, j' \in N} e^{\tilde{P}_j} \gamma_{j' i}) \mid (\gamma_{2', i}, \dots, \hat{\gamma}_{n', i}))] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\nabla_l f_i(\tilde{P}_l) = \sum_{n \in N_{i \neq l}} \sum_{l \in L_n^m} x_l^* (x_i^*)^T \frac{\xi_l B \beta_l \beta_{li}}{\log 2} \quad (37)$$

其中 α, β, a, θ 可通过式(14) 解得.

$$\nabla_l L(\tilde{P}, \zeta) = \frac{\xi_l B \beta_l}{\log 2} - \sum_{n \in N_{i \neq l}} \sum_{l \in L_n^m} x_l^* (x_i^*)^T \frac{\xi_l B \beta_l \beta_{li}}{\log 2} - \zeta_n e^{\tilde{P}_l} \quad (38)$$

其中 β_l 和 β_i 可以利用式(15) 来获得最终解, B_{li} 可通过式(18) 求解.

除此之外, 因为 $\nabla_l L(P, \zeta) = (1/P_l) \nabla_l L(\tilde{P}, \zeta)$, 转换式(33) 至 P 域, 可知:

$$\nabla_l L(P, \zeta) = \frac{\xi_l B \beta_l}{\log 2} - \sum_{n \in N_{i \neq l}} \sum_{l \in L_n^m} x_l^* (x_i^*)^T \frac{\xi_l B \beta_l \beta_{li}}{\log 2} - \zeta_n \quad (39)$$

再利用梯度算法^[14] 对式(30) 展开相应的运算得

$$\begin{aligned} P_l(t+1) = & P_l(t) + \eta \nabla_l L(P, \zeta) = P_l(t) + \eta \frac{\xi_l(t) B \beta_l}{P_l(t) \log 2} - \\ & \eta \zeta_n - \eta \frac{B}{P_l(t) \log 2} \sum_{n \in N_{i \neq l}} \sum_{l \in L_n^m} x_l^* (x_i^*)^T \xi_l \beta_l \beta_{li} \end{aligned} \quad (40)$$

其中: η 是指 1 个迭代步长, ξ_n 可以通过式(32) 展开相应的计算. 将式(40) 进行重写, 使其能够运用本地测量和消息传递机制的分布式功率更新算法:

$$P_l(t+1) = P_l(t) + \eta \frac{\xi_l(t) B \beta_l}{P_l(t) \log 2} - \eta \zeta_n - \eta \frac{B}{P_l(t) \log 2} \sum_{n \in N_{i \neq l}} \sum_{l \in L_n^m} x_l^* (x_i^*)^T m_{li}(t) \quad (41)$$

其中: η 与 B 是指预定义的常数; $\xi_l(t)$, β_l 与 ξ_n 可通过本地测量得到相应的解; $m_{li} = \xi_i \beta_i \beta_{li}$ 是从 i 发送端传输至 l 发送端的功率信息, 该参数的作用是反映 i 的实际拥塞情况. 因为 ξ 被称之为拥塞价格, 它的具体数值可以反映出区域拥塞的实际情况, 所以, 如果本地拥塞的情况十分严重, 链路 l 增加相应的发射功率. 对式(41) 进行分析可知该方法和本链路与邻居链路的具体情况有十分密切的联系, 而不是所有节点都能够增加或者减少发射功率. 在这之后, 本文将对结合过时信息的功率更新算法进行详尽论述:

1) 在时隙 t , 对所有链路 $i \in L$ 的发射节点通过下述式子求出 i 和 l 间进行交换的功率信息:

$$m_{li} = \xi_i \beta_i \beta_{li} \quad (42)$$

其中 ξ_i , β_i , β_{li} 可通过式(26), 式(15) 与式(18) 求得最终解;

2) 利用路由协议, i 的发送端将 m_{li} 朝 l 的发送端传输;

3) l 的发送端根据该节点的功率损耗情况, 结合式(32) 对相应的功率价格展开更新;

4) 当 l 接收到特定的信息后, 结合式(41) 对发射的实际功率更新;

5) 根据下述公式对 l 的发送端 $\beta_l(t)$ 展开求解

$$\begin{aligned} \beta_l(t) = & \frac{z_0(t)}{1 + z_0(t)} \\ z_0(t) = & K \times \frac{P_l^* \hat{\gamma}_{ll}}{\sum_{i \neq l} x_i^* (x_l^*)^T P_l^* \hat{\gamma}_{il} + 1} \end{aligned} \quad (43)$$

6) $t = t + 1$. 以(1)式为起点, 重复上述流程, 直到收敛时结束.

在设计 ξ_l 与 m_l 等诸多指标时, 全部都要考虑过时信道状态作用后的值, 对过时信道状态信息导致的资源分配差错进行良好的弥补, 故本文方法对动态网络的适用性更加突出.

2.2 算法的实现步骤

1) 利用 2.1 节里面的 Hyacinth 算法构建初始网络, 在这个前提下, 设定链路在初始信道 $\mathbf{x}_l = [1, 0, 0, \dots, 0]$, $\forall l \in L$ 中运作.

2) 对所有时隙 t , 节点在相同时间内完成下述 3 个操作:

a) 所有发送节点 $n \in N$ 利用式(26)、式(42)与式(32)获得下述三组参数: $\xi_n = \{\xi_l, \forall l \in L_n^{out}\}$ 、 $m_n = \{m_l, \forall l \in L_n^{out}\}$ 以及 $\zeta_n = \{\zeta_l, \forall l \in L_n^{out}\}$.

b) 所有的 $n \in N$ 将 ξ_l 传输至业务流的源节点区域, 利用该方法对发送率展开更新.

c) 所有的 $n \in N$ 通过路由协议将 m_l 和 ξ_l 传输至干扰位置和该链路互相作用的链路的传输端节点, 利用该方式对发送功率展开更新.

3) 时隙 $t = t + 1$, 所有节点 $n \in N$ 分布式地进行下述操作:

a) 若为业务流的源节点, 针对此类情况, 根据式(25)运算 f_s^* .

b) 所有节点根据式(28)的运算结果对本地的信道分配展开更新, 并且还会将全新的分配信息传输至干扰位置中链路的发送端.

c) 根据式(41)对相应的发射功率展开调整.

4) 转到步骤 2), 重复进行循环运算.

本算法主要根据网络拥堵状况来确定发送速率, 可以在 IP 网应用层业务流的控制协议中进行调控. 此类技术不仅仅兼顾了拥塞状况, 并且还考虑了对其他节点形成的影响, 因此该技术的特性十分良好.

2.3 复杂度和收敛性分析

本文算法中所有节点一定要解得参量: ξ_l, m_n, ξ_n, f_s 和 P_l , 除此之外, 还要对本地的拥塞控制子问题展开详尽运算. 所有节点的求解繁琐程度为 $o(5 + C^{|V_{\max}|})$, C 代表的是网络里面可用信道的实际数量, $|V_{\max}|$ 代表的是与网络进行衔接的节点的最大连接数. 此类方法的求解繁琐程度通常是不发生变化的, 它和网络规模并无实质上的联系. 因此, 此类算法得到了一定的简化, 对特定网络环境具有十分突出的适用性. 除此之外, 还可以利用分布式信道分配运算方法准确求得次优解.

3 数值仿真和性能分析

通过 MATLAB 对本文所设计的算法进行仿真测试. 在 $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ 的区域里面构成 15 个移动节点, 把其中的一个移动节点设定为中心网关. 所有的路由器装配 3 个射频端, 网络里面能够良好使用的正交信道数量为 3 个. 假如另外 14 个非中心网关全部传输业务流到网关节点, 仿真环境并非是静止的, 14 个非中心网关可以不受约束地进行移动, 移动的实际速率为 50 km/h , 由于速度会发生一定变化, 故引入多普勒频移, 它的作用是通过 Jakes 模型建模. 仿真实验参数如表 1 所示, 本文主要采用文献[20]的运算方法来明确实际的步长.

为了更好地进行对比, 本文引入下述 3 种方法:

1) 补偿过时信道状态信息作用的集中式最优资源分配方法(简称 CoC_ORAA)^[9];

2) 不补偿过时信道状态信息作用的资源分配方法(简称 TRAA)^[5];

3) 本文阐述的补偿过时信道状态信息影响的分布式资源分配方法(简称 CoC_DsRAA).

对下述性能参数进行比较和研究: ① 网络的实际效用; ② 公平性; ③ 总功率的消耗情况; ④ 能量的实际效用. 参数 ① 利用式(15)里面优化目标来展开相应的描述, 参数 ② 利用文献[21]里面的描述, 即取

$$\frac{(\sum_{s \in S} f_s)^2}{(S \sum_{s \in S} (f_s)^2)}; \text{参数 ④ 定义为 } \frac{\sum_{s \in S} f_s}{\sum_{l \in L} P_l}.$$

表 1 仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
噪声功率/W	1.0×10^{-11}	功率价格更新步长	0.01
信道带宽/Mbps	2	p_n^{\max} /W	0.5
处理增益	128	仿真时隙	4 000
拥塞价格更新步长	0.006		

网络效用曲线如图 1 所示. 另外, 需考虑下述问题:

1) 针对 ρ 来讲, 本文算法可以确保其尽可能接近最优值, 以此获得相应的次优解.

2) 随着相关系数的持续减少, 网络效用也随之缩减, 这符合正常情况. 因为在节点运动比较剧烈, 拓扑在较短时间中进行频繁改变的时候, 所有时间点的信道相关性都会调低, 这反映出之前的 CSI 和现阶段的资源分配不匹配, 尽管结合最优的集中式算法, 依然不可以对相关系数减少所导致的网络效用损耗进行补偿.

3) 如果网络的 CSI 为最佳, 并且未发生延时, 本文算法和以往的算法均可以得到一致性非常高的网络效用. 这是因为当信道状态信息可以在任何时间都准确获得的时候, 就没有必要研究过时信道状态信息对网络形成的影响, 有鉴于此, 本文算法可以和传统的算法一样得到完全相同的优化结果.

4) 当 $\rho=0.75$ 和 $\rho=0.35$ 时, 本文算法就能体现出更加明显的优势, 具有十分良好的网络效率.

5) 当 ρ 值比较小时, 本文算法的性能优势更加的明显. 探究其根本原因, 当 ρ 值非常大时, 这表明之前的某个时刻和现阶段的 CSI 具有非常远的差距, 针对此类情况, 即便是运用之前某个时刻的 CSI 能够得到较好的性能, 而本文算法所能发挥的补偿作用十分微弱. 但是, 当 ρ 变差时, 本文算法所能体现的补充功能会显著提升.

图 2 是 3 类方法的公平性指标曲线. 对该曲线进行系统分析不难发现本文算法能够找出次优解. 本文算法兼顾了过时信道信息所发挥的作用, 在这个前提下, 算出平均容量, 极大缩小了和瞬时容量的实际差距, 使得资源分配和实际情况更加匹配, 令公平性得到提升.

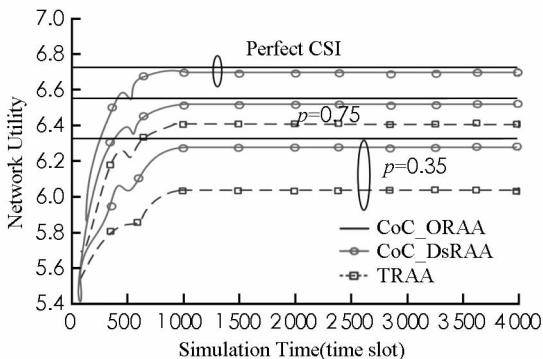


图 1 网络效用

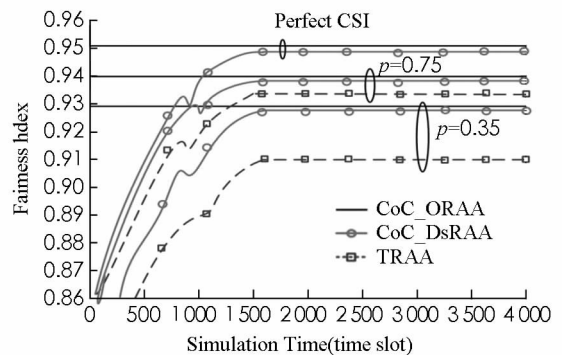


图 2 公平性

当节点位移速率增加的时候, 不管有没有进行补偿, 它和最优值都十分接近.

图 3 是 3 类方法的能量效用曲线. 在最大功率受到限制的前提下, 在进行资源分配的进程中, 以往的运算方法根据过时 CSI 进行, 会产生两个问题:

1) 节点分配的链路速率超出链路容量, 降低了流传输的实际速率.

2) 链路容量高于节点分配的链路速率, 如此就使链路资源没有发挥理想的效用.

图 4 显示实际状况和理论研究的结果没有明显差别. 根据信道真值对业务流速率和功率资源进行合理分配, 可以使网络能量效用达到最大值. 兼顾之前某一时刻的 CSI 运算方法不仅仅使分配的准确率提升, 并且也让功率资源得到充分利用, 以此让整体的能量效用得到大幅度的优化.

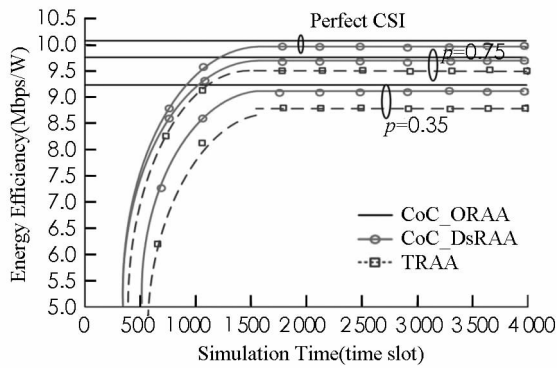


图 3 能量效用

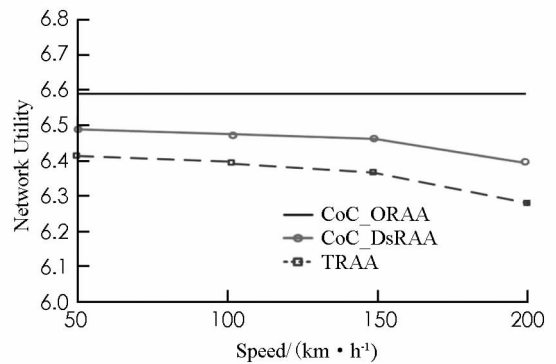


图 4 网络效用与节点速度的关系

另外, 本文还对网络性能和节点位移速率之间的关联展开分析. 对图 4 进行分析不难发现, 如果节点在进行位移时的实际速率从 50 km/h 增加到 200 km/h, 所有的点都为 2 000 个时隙的平均值, 产生的结果和理论推测的结果一样.

参考文献:

- [1] 宋建锋, 李建东. 移动 WiMAX 网络下行链路 TCP 吞吐量公平性的跨层优化 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1548—1552.
- [2] 耿植, 陈琴. 多信道无线网状网的多信道多径路由实现 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 153—158.
- [3] 张永敏, 徐伟强, 黄炯. Ad Hoc 网络节能型功率控制与拥塞控制的跨层优化 [J]. 软件学报, 2013, 24(4): 900—914.
- [4] 侯忠伟, 吴磊, 王礼刚. 无线传感器网络中一种基于能量判决门限的改进 AODV 路由算法 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(7): 25—29.
- [5] AUGUSTO C, CARVALHO C B. REUSE: A Combined Routing and Link Scheduling Mechanism for Wireless Mesh Networks [J]. Computer Communications, 2011, 34(18): 2207—2216.
- [6] XIE R, YU F R, 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] MALLICK S, RASHID M M, BHARGAVA V 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.
- [8] AHMAD A, ASSAAD M. Margin Adaptive Resource Allocation in Downlink OFDMA System with Outdated Channel State Information [C]// IEEE, International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. New York: IEEE Computer Society Press, 2009: 1868—1872.
- [9] 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(11): 284—295.
- [10] 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.
- [11] RANIWALA A, CHIUH T C. Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network [C]// INFOCOM. New York: IEEE Computer Society Press, 2005: 2223—2234.
- [12] AHMAD A, ASSAAD M. Optimal Power and Subcarriers Allocation in Downlink OFDMA System with Imperfect Channel Knowledge [J]. Optimization & Engineering, 2013, 14(3): 477—499.
- [13] MO J, WALRAND J. Fair End-to-End Window-Based Congestion Control [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(5): 556—567.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

- [15] CHIANG M. Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Jointly Optimal Congestion Control and Power Control [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 1041–1116.
- [16] CHIANG M, LOW S H, CALDERBANK A R, et al. Layering As Optimization Decomposition: A Mathematical Theory of Network Architectures [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 255–312.
- [17] KLIAZOVICH D, GRANELLI F. Cross-Layer Congestion Control in Ad Hoc Wireless Networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(6): 687–708.
- [18] BERTSEKAS D P. *Nonlinear Programming* [M]. Belmont: Athena Scientific, 1995.
- [19] PAPANDEIPOULOS J, Evans J. Low Complexity Distributed Algorithm for Spectrum Balancing in Multi-User DSL Networks [C]//*IEEE International Conference on Communications*. New York: IEEE Computer Society Press, 2006: 3270–3275.
- [20] SUBRAMANIAN A P, GUPTA H, DAS S R, et al. Minimum Interference Channel Assignment in Multiradio Wireless Mesh Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(12): 1459–1473.
- [21] JAIN R, CHIU D M, HAWE W R. *A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System* [M]. Maynard: Digital Equipment Corporation, 1984.

On Low Energy Consumption and High Efficiency Distributed Cross Layer Resource Allocation Algorithm

QIU Bin

Department of Computer, Shantou Polytechnic, Shantou Guangdong 515078, China

Abstract: In order to maximize the reduction of outdated CSI (Channel State Information channel state information) for distributed wireless multi-hop network environment the actual rate of cross-layer resource allocation resulting from the negative effects, an optimization compensating cross-layer joint resource allocation algorithm has been presented in this paper. With this method, in which channel correlation has been taken as a design theory premise, the two instantaneous and outdated channel states' probability density function have been calculated thoroughly, and Rayleigh fading channel model been combined to analysis, after calculation results could obtain the closed capacity solution under the conditions of SNR (SINR) model. In improving network performance, using an outdated channel state information algorithm which could develop effective treatment, congestion control, channel allocation and power control have been combined, and network resource allocation problem convert to a class of NUM has been taken. Experimental results show that the algorithm greatly optimizes distributed multi-hop network resource allocation mechanism, improves the effectiveness of the network resources and reduces energy consumption.

Key words: multi-hop network; cross-layer resource allocation; correlation; SNR; NUM problem

责任编辑 张 梅