

一种联合中继节点选择的博弈功率控制算法

吴丹^① 蔡跃明^{①②} 潘成康^① 盛雁鸣^① 徐友云^①

^①(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 有效的资源分配在协同通信中占有举足轻重的地位, 鉴于此, 该文研究了其中的中继节点选择和功率控制问题, 提出了一种联合中继节点选择的博弈功率控制算法。它的主要思想是从各节点信噪比的角度建立收益函数, 并具体针对源节点和中继节点建立不同的代价函数。在认为每个节点都“负责”的前提下, 通过调整各节点功率达到各自效用的最大化, 并依据中继节点发送功率的策略空间, 优化参与协同的中继节点集合。同时, 该文还对纳什均衡的性能进行了数学分析。从仿真结果可以看出, 所提算法在复杂度可接受的前提下, 能使各节点间的功率得到合理有效的使用, 确能改善系统性能。

关键词: 协同通信; 博弈论; 中继节点选择; 功率控制; 纳什均衡; 代价

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2829-05

A Game-theoretical Power Control Algorithm with Relay Selection

Wu Dan^① Cai Yue-ming^{①②} Pan Cheng-kang^① Sheng Yan-ming^① Xu You-yun^①

^①(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The performance in cooperative communication depends much on efficient resource allocation such as relay selection and power control. In this paper, a game-theoretical power control algorithm with relay selection is proposed. A payoff function is defined according to each node's SNR, and there are different pricing scheme between the source node and the relay nodes, because they play different roles in the networks. On the premise that these nodes are responsible, the goal is to maximize the utility function by adjusting the power. Then a choice among the relay nodes is made, according to the power criterion. Furthermore, the property of the Nash equilibrium is analyzed. Simulation results show that the algorithm can encourage the nodes to employ their power efficiently, and improve the performances of the systems.

Key words: Cooperative communication; Game theory; Relay selection; Power control; Nash equilibrium; Pricing

1 引言

协同通信作为一种潜在的无线网络增强技术, 因能有效地提升吞吐量、中断概率以及覆盖等性能, 近年来一直备受瞩目。它的核心思想是利用无线网络的广播特性, 使源节点在一个或多个中继节点的帮助下, 共同完成信息的发送与接收。采用协同通信后系统性能的提升在很大程度上依赖于有效、合理的资源分配, 包括中继节点的选择和功率控制等。目前已有大量文献^[1-5]研究节点的选择问题, 它们分别从不同的角度建立中继节点选择模型, 并在此基础上提出了不同的中继节点选择算法。在节点选

择的过程中加入功率控制, 可进一步提高协同通信的传输性能^[6,7]。例如, 文献[8]在系统中断概率最小化目标条件下得到各中继节点的功率值, 继而从最小误符号率的角度选择最优中继节点。文献[9]为减小运算量, 首先在固定功率分配条件下选出最佳中继节点, 再在源节点与最佳中继节点间进行功率分配。这些集中式算法需要大量全局状态信息, 且中继节点被认为是“绝对服从”的, 并不适用于实际的分布式系统。针对分布式系统的各节点只愿获悉和关注与自己有关的参量这一特点, 即节点具有“自私性”, 采用博弈论的思想来建模中继节点选择与功率控制的问题, 将变得十分有意义。文献[10]采用买方/卖方博弈(Buyer/Sell Game)方法提出了一种分布式中继节点选择与功率控制算法, 具体是将源节点建模成买方, 决定购买功率量; 将中继节点建模成卖方, 决定功率价格, 经过若干次博弈后, 达

2008-12-08 收到, 2009-05-11 改回

国家自然科学基金(60672079), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(N200814)和江苏省自然科学基金(BK2007002)资助课题

成买卖协议,但它没有涉及到对源节点发送功率的优化。文献[11]是在多源-目的节点对单中继节点的场景下,提出了分别基于信噪比和功率的拍卖机制来实现节点间的功率分配,但对多中继节点下的功率分配问题并未涉及。

本文综合考虑节点选择和功率控制问题,提出了协同通信中联合中继节点选择的博弈功率控制算法。该算法从各节点信噪比的角度建立收益函数,并根据源节点和中继节点在系统中的不同地位,建立不同的代价函数。具体而言,源节点一方面要鼓励中继节点多参与协同,对参与协同的中继节点要表现出友好;另一方面要对中继节点的帮助有所付出。而系统中的中继节点被视为是“热心”和“负责”的,这表现为它们希望能为源节点的转发提供满意的 QoS,但它们的“热心”会使它们消耗自身的功率,这可通过一定的代价来体现。源节点和各中继节点利用所建立的效用函数,即可实现各自的功率控制,同时根据所得功率值,能明确参与协同的中继节点集合。分析证明,所建立的博弈模型存在纳什均衡,且收敛到的纳什均衡具有帕累托有效性。根据该博弈模型,本文提出的具有可接受复杂度的博弈算法,能使各节点间的功率得到有效合理的使用,从仿真结果可以看出,系统性能确实能得以改善。

2 系统模型与问题公式化

考虑分布式多中继信道模型,包括一个源节点 s , 一个目的节点 d 和 N 个中继节点。 $h_{s,d}$, h_{s,r_i} 和 $h_{r_i,d}$ 分别表示源节点与目的节点间、源节点与中继节点 i 间以及中继节点 i 与目的节点间的信道系数, $i \in \mathcal{L}$, $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为中继节点的集合。假设源节点获知信道状态信息 h_{s,r_i} 和 $h_{s,d}$, 中继节点获知信道状态信息 h_{s,r_i} 和 $h_{r_i,d}$ 。

源节点传输过程分为两个阶段:联合中继节点选择的博弈功率控制阶段和源信息协同传输阶段。简单而言,源节点与各中继节点利用短帧的交互实现博弈过程,继而源节点依据博弈结果(包括各节点所确定的发送功率以及参与协同的中继节点集合)完成其信息的协同传输。为了准确描述博弈过程,首先说明源信息协同传输过程,博弈过程留待第3节讨论。

2.1 源信息协同传输

考虑时分半双工协同传输模式,整个协同传输阶段分为两个过程。在第1个过程中,源节点发送信息到各中继节点和目的节点。在目的节点和各中继节点处所获得的信噪比 $\gamma_{s,d}$ 和 γ_{s,r_i} 分别为

$$\gamma_{s,d} = p_s H_{s,d} / \sigma^2 \quad (1)$$

$$\gamma_{s,r_i} = p_s H_{s,r_i} / \sigma^2 \quad (2)$$

其中 p_s 为源节点的发送功率, $H_{s,d} = |h_{s,d}|^2$ 和 $H_{s,r_i} = |h_{s,r_i}|^2$ 。

在第2个过程中,中继节点将接收到的信息转发到目的节点。若 x_s 为源节点向中继节点 i 发送的信息,则中继节点 i 接收到的信号为

$$y_{r_i} = \sqrt{p_s} h_{s,r_i} x_s + n_{r_i} \quad (3)$$

其中 $n_{r_i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 为中继节点 i 处噪声。目的节点接收到经中继节点 i 转发的信号为

$$y_{r_i,d} = \frac{\sqrt{p_{r_i}} h_{r_i,d} (\sqrt{p_s} h_{s,r_i} x_s + n_{r_i})}{\sqrt{p_s H_{s,r_i} + \sigma^2}} + n_d \quad (4)$$

其中 p_{r_i} 为中继节点 i 的发送功率, $n_d \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 为目的节点处噪声,则转发信号信噪比为

$$\gamma_{r_i,d} = \frac{p_{r_i} H_{r_i,d} p_s H_{s,r_i}}{\sigma^2 (p_{r_i} H_{r_i,d} + p_s H_{s,r_i} + \sigma^2)} \quad (5)$$

若在第2个过程中,中继节点采用 TDMA 方式转发,则由式(1)和式(5)可得在 m 个中继节点协同传输时所获传输速率为

$$R = \frac{1}{m+1} \log_2 \left(1 + \gamma_{s,d} + \sum_{i=1}^m \gamma_{r_i,d} \right) \quad (6)$$

若中继节点采用分布式波束成形方式同时转发(同相位传输),可获得的传输速率同样由式(6)给出,只是此时分母变为2。

2.2 效用函数

参考文献[12]为源节点和中继节点设计收益函数,它是从各节点信噪比的角度建立的,同时根据源节点和中继节点在系统中的不同地位,设计不同的代价函数,则效用函数由收益函数减去代价函数得到,具体表示为

$$u_s = \left(\frac{1}{1 + \exp(-\alpha_s (\gamma_{s,d} - \beta_s))} + \sum_{i \in \mathcal{L}} \frac{p_{r_i}}{\sum_{j \in \mathcal{L}} p_{r_j}} \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_{r_i} (\gamma_{s,r_i} - \beta_{r_i}))} \right) - \left(c_s p_s + \sum_{i \in \mathcal{L}} \frac{c_{r_i} p_{r_i}}{p_{r_i, \max}} \right) \quad (7)$$

$$u_{r_i} = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_{r_i} (\gamma_{r_i,d} - \beta_{r_i}))} - \frac{c_{r_i} p_{r_i}}{p_{r_i, \max}} \quad (8)$$

其中, u_s 和 u_{r_i} 分别为源节点和中继节点 i 的效用函数, $p_{r_i, \max}$ 为中继节点 i 的最大发送功率。 α_s 、 β_s 、 α_{r_i} 和 β_{r_i} 为正实数,分别反映函数的陡峭度和中心点位置, c_s 和 c_{r_i} 为代价因子。这些参量的取值可因各节点的业务要求而有所不同,例如,针对数据业

务, 可取 $\alpha_s = \alpha_{r_i} = 1$, $\beta_s = \beta_{r_i} = 10$ 。这里考虑各节点具有同样的业务要求, 即有 $\alpha_s = \alpha_{r_i} \triangleq \alpha$, $\beta_s = \beta_{r_i} \triangleq \beta$ 以及 $c_{r_i} = c_{r_i} \triangleq c$, $\forall i \in \mathcal{L}$ 。

下面具体说明所设计的效用函数。式(7)中前两项和即为收益函数, 其中第 2 项可以理解为源节点对各中继节点的友好程度, 它实质是用中继节点为转发信息所消耗的功率占总共所消耗的功率的比重值来衡量的。式(7)中后两项和即为代价函数, 其中第 3 项反映了源节点对增加不必要的发射功率的抑制; 第 4 项表示源节点对于中继节点的帮助所付出的“费用”, 用各中继节点为转发信息所消耗的功率占自身拥有的功率的比重值来表示, 可避免一些中继节点虽然付出的功率很多, 对它而言却是“九牛一毛”, 或者一些中继节点付出的功率很少, 对它而言却是“倾囊相授”的情况。另外, 各中继节点被视为是“热心”和“负责”的, 这表现为它们希望能为源节点的转发提供满意的 QoS, 即希望其收益函数(式(8)中的第 1 项)尽可能大, 但它们的“热心”会使它们消耗自身的功率, 这可通过式(8)中的第 2 项来体现。

3 联合中继节点选择的博弈功率控制算法

本文综合考虑中继节点选择和功率控制问题, 提出了联合中继节点选择的博弈功率控制算法, 具体步骤(博弈过程)如下。

步骤1 给定系统参数 α , β 和 c 。

步骤2 源节点发布协同中继请求帧, 该帧包含初始发送功率 p_s 信息, 接收到该请求帧的中继节点 i 计算最大化 u_{r_i} 的 p_{r_i} , 并反馈给源节点。

步骤3 源节点依据本文所设计的效用函数 u_s 和反馈的 p_{r_i} 值, 调整发送功率 p_s 。

步骤4 重复步骤 2 和步骤 3, 直至 \mathbf{p} 收敛到固定值。当 $\gamma_{r_i,d} < \beta$, 节点 i 将不参与协同。若无中继节点协同, 则采用直传。

4 博弈模型分析

根据前文得出的效用函数, 可将联合中继节点选择的博弈功率控制模型表示如下:

$$\max_{p_s} u_s(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in \mathcal{P} \quad (9)$$

$$\max_{p_{r_i}} u_{r_i}(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in \mathcal{P} \quad (10)$$

其中 $\mathcal{P} = \{\mathbf{p} : p_{s,\min} \leq p_s \leq p_{s,\max}, p_{r,\min} \leq p_{r_i} \leq p_{r,\max}, \forall i \in \mathcal{L}\}$ 为节点的策略空间。

定理 1 联合中继节点选择的博弈功率控制模型具有纳什均衡。

证明 从文献[13]可知, 如果某效用函数的策略空间是紧密凸集, 且此函数关于它的策略空间是拟

凹函数, 那么它一定存在纳什均衡。本文给出的策略空间是闭集, 而闭集必为紧密凸集, 因此现只需证明效用函数是关于其策略空间的凹函数即可, 因为凹函数必为拟凹函数^[14]。

将式(1)和式(2)代入式(7)中, 将式(5)代入式(8)中, 并对它们求 2 阶偏导可得

$$\frac{\partial^2 u_s}{\partial p_s^2} = \frac{e^{\alpha\left(\beta + \frac{p_s H_{s,d}}{\sigma^2}\right)} \left(e^{\alpha\beta} - e^{\frac{\alpha p_s H_{s,d}}{\sigma^2}} \right) \alpha^2 H_{s,d}^2}{\left(e^{\alpha\beta} + e^{\frac{\alpha p_s H_{s,d}}{\sigma^2}} \right)^3 \sigma^4} + \sum_{i \in \mathcal{L}} m_i \frac{\left(e^{\alpha\left(\beta + \frac{p_s H_{s,r_i}}{\sigma^2}\right)} \left(e^{\alpha\beta} - e^{\frac{\alpha p_s H_{s,r_i}}{\sigma^2}} \right) \alpha^2 H_{s,r_i}^2 \right)}{\left(e^{\alpha\beta} + e^{\frac{\alpha p_s H_{s,r_i}}{\sigma^2}} \right)^3 \sigma^4} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 u_{r_i}}{\partial p_{r_i}^2} = -B_{r_i} \alpha H_{r_i,d}^2 H_{s,r_i} p_s A_{r_i} (C_{r_i} H_{r_i,d} p_{r_i} + A_{r_i} \left((C_{r_i} + (-1 + B_{r_i}) \alpha H_{s,r_i} p_s) \right) \left[(1 + B_{r_i})^3 \sigma^4 (A_{r_i} + H_{r_i,d} p_{r_i})^4 \right]) \quad (12)$$

这里 $A_{r_i} = \sigma^2 + H_{s,r_i} p_s$, $B_{r_i} = \exp(\alpha(-\beta + \gamma_{r_i,d}))$, $C_{r_i} = 2(1 + B_{r_i})\sigma^2$, $m_i = p_{r_i} / \sum_{j \in \mathcal{L}} p_{r_j}$ 。

下面给出策略空间的范围, 以保证式(11)和式(12)给出的 2 阶偏导小于等于零, 即保证 u_s 和 u_{r_i} 在该策略空间上为凹函数。显然当 $e^{\alpha\beta} - e^{\frac{\alpha p_s H_{s,d}}{\sigma^2}} \leq 0$ 和 $e^{\alpha\beta} - e^{\frac{\alpha p_s H_{s,r_i}}{\sigma^2}} \leq 0, \forall i \in \mathcal{L}$ 时, $\partial^2 u_s / \partial p_s^2 \leq 0$ 必成立。

由此得 $p_s \geq \beta\sigma^2 / H_{s,d}$ 和 $p_s \geq \beta\sigma^2 / H_{s,r_i}, \forall i \in \mathcal{L}$ 。进一步, 令 $p_{s,\min} = \beta\sigma^2 / H$, $H = \min\{H_{s,d}, H_{s,r_1}, \dots, H_{s,r_N}\}$, 即可保证 $\partial^2 u_s / \partial p_s^2 \leq 0$ 。

同理, 若有 $B_{r_i} \geq 1$, 即 $\gamma_{r_i,d} \geq \beta$, 必可保证 $\partial^2 u_{r_i} / \partial p_{r_i}^2 \leq 0$ 。当 $\gamma_{r_i,d} < \beta$, 节点 i 将不参与协同。

证毕

通过上述证明, 本文所获得的效用函数可以保证是凹函数, 因而纳什均衡一定存在, 且它可表示为

$$p_s^* = \arg \max_{p_s} u_s(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in \mathcal{P} \quad (13)$$

$$p_{r_i}^* = \arg \max_{p_{r_i}} u_{r_i}(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in \mathcal{P}, \forall i \in \mathcal{L} \quad (14)$$

下述定理将证明所给博弈模型的纳什均衡具有全局最优性, 即具有帕累托有效性。

定理 2 中继节点选择和功率控制的博弈模型

的纳什均衡具有帕累托有效性。

证明 令 $\mathbf{p} = [p_s, p_{r_1}, \dots, p_{r_N}]$, $\mathbf{p}_{-r_i} = [p_s, p_{r_1}, \dots, p_{r_{i-1}}, p_{r_{i+1}}, \dots, p_{r_N}]$, $\forall r_i$ 和 $\mathbf{p}_{-s} = [p_{r_1}, \dots, p_{r_N}]$ 。按照文献[15]定理 7 的证明思路, 可知本文设计的博弈模型收敛到最小的纳什均衡。下面证明该最小的纳什均衡具有帕累托有效性。

令 \mathbf{p} 为任一纳什均衡, $\tilde{\mathbf{p}}$ 为其中最小的纳什均衡, 即 $\mathbf{p} \geq \tilde{\mathbf{p}}$ 。在 p_s 不变的情况下, u_s 随着 \mathbf{p}_{-s} 的增大而减小, 因为当 $c \geq 1$ 时, u_s 是 p_{r_i} 的单调递减函数:

$$\frac{\partial u_s}{\partial p_{r_i}} = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(\gamma_{s,r_i} - \beta))} \cdot \frac{\sum_{j \neq i} p_{r_j}}{\left(\sum_{j \in L} p_{r_j}\right)^2} - \frac{c}{p_{r,\max}} \leq 1 - \frac{c}{p_{r,\max}} \leq 0 \quad (15)$$

这里 c 是代价因子, 其值是人为设定的, 可以保证 $c \geq p_{r,\max}$ 。其实, \mathbf{p}_{-s} 的增大意味着参与协同的中继节点消耗的功率增多, 则源节点得到的“帮助”增多, 源节点为此需付出的“费用”自然会增多, 从而导致 u_s 减小。由此可得: $u_s(p_s, \mathbf{p}_{-s}) \leq u_s(p_s, \tilde{\mathbf{p}}_{-s})$ 。而由纳什均衡的定义可知 $u_s(p_s, \tilde{\mathbf{p}}_{-s}) \leq u_s(\tilde{p}_s, \tilde{\mathbf{p}}_{-s})$ 。综上可得: $u_s(p_s, \mathbf{p}_{-s}) \leq u_s(\tilde{p}_s, \tilde{\mathbf{p}}_{-s})$, 即 $u_s(\mathbf{p}) \leq u_s(\tilde{\mathbf{p}})$ 。同理, 在 p_{r_i} 不变的情况下, u_{r_i} 只与 p_{r_i} 和 $p_s \triangleq f(p_{r_1}, \dots, p_{r_N})$ 有关, 且是 p_s 的单调递增函数, 而 p_s 是 $p_{r_j}, j \neq i$ 的单调递减函数, 故 u_{r_i} 也随着 \mathbf{p}_{-r_i} 的增大而减小, 于是有 $u_{r_i}(\mathbf{p}) \leq u_{r_i}(\tilde{\mathbf{p}})$ 。由此得知所得纳什均衡具有帕累托有效性。 证毕

5 仿真分析

考虑 N 个中继节点的系统, 源节点和目的节点各一个, 中继节点随机位于它们周围, 节点之间的信道增益表示为 $h = 0.097/l^\nu$, 其中, l 为节点之

间的距离, ν 为路径损耗指数, 若假设仿真环境为市区蜂窝无线传播, 可令 $\nu = 3$ [16]。 $\sigma^2 = 5 \times 10^{-12}$ W, 各节点最大发送功率为 $p_{s,\max} = p_{r,\max} = 1$ W。

图 1 是考虑系统中有两个中继节点时, 相距 1000 m, 在多组不同系统参数下的源节点与其中一中继节点发射功率的收敛情况。从图中可以看出, 它们最多经过 6 次左右的迭代就可趋于稳定。这说明源节点与中继节点之间的博弈过程只需经历为数不多的几次信息交互, 且它们是以短帧的交互来实现的, 继而源节点依据博弈结果再完成其信息的协同传输。这反映了所提算法的实现复杂度在可容忍范围内。

下面考察所提算法的功率效率性能, 这里功率效率定义为单位功率上所获速率, 即 Rp_s^{-1} 。该性能指标一方面表征了源节点到目的节点所获速率的提升程度, 另一方面也反映了速率改善所带来的功率开销是否合理。

图 2 是本文算法在不同 β 下的功率效率的性能比较。从图中可以看出, 随着 β 取值的增加, 本文算法所获功率效率在增加。这是因为中继节点的发送功率的策略空间的确定, 与 β 值有关, 根据确定的策略空间, 可以排除一些“无所作为”或“鲜有作为”的中继节点。换言之, β 值取得越合理, 则越能选出有效的中继节点, 从而避免了一些节点不必要的功率开销, 优化了系统的功率效率的性能。

图 3 反映了直接传输、本文算法与半分布式中继节点选择和功率分配算法[9](先在平均功率下选出最优中继节点, 再在该节点与目标节点间进行功率分配)功率效率的性能比较。从图中可以看出, 随着源节点与目的节点间距离的增大, 两者之间的信道状态趋于恶化, 虽然 3 种算法所获功率效率均呈下

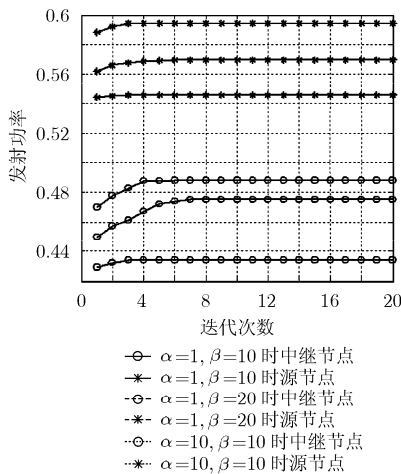


图 1 中继节点与源节点发射功率与迭代次数关系

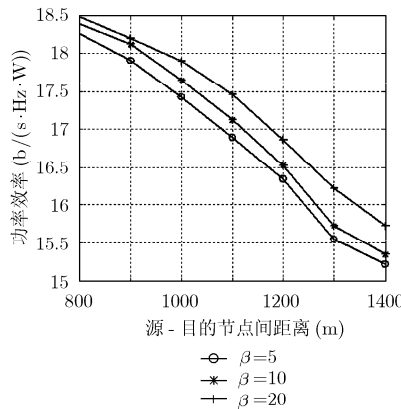


图 2 不同 β 值下功率效率比较

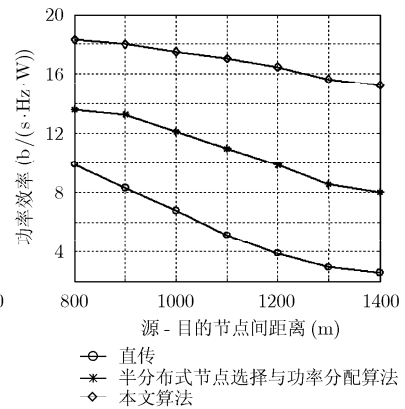


图 3 3 种算法功率效率比较

降趋势,但本文算法所获功率效率一直优于半分布式中继节点选择和功率分配算法所获功率效率,且后者又优于直接传输时所获功率效率。另外,本文所获功率效率的下降趋势也较为平缓。这是因为本文算法综合考虑了中继节点选择和功率分配问题,能依据信道状态合理地控制功率,使得目的节点在所获速率有所改善的前提下,还能有效降低源节点和中继节点的功率开销。

6 结束语

本文综合考虑中继节点选择和功率分配问题,提出了一种联合中继节点选择的博弈功率控制算法。各节点从信噪比的角度建立收益函数,并为源节点和中继节点建立不同的代价函数。对源节点而言,通过代价机制反映出它对于请求中继节点的帮助需有所付出;对中继节点而言,通过代价机制反映了它的“热心”会对它自身性能造成影响。在认为每个节点都是“负责”的前提下,通过对自己发送功率的调整,达到各自效用函数最大化的目的。根据中继节点发送功率的策略空间,将“无所作为”或“鲜有作为”的中继节点排除,以减小中继节点不必要的功率开销。从仿真结果可以看出,所提算法在复杂度不太高的前提下,一方面能提高目的节点所获速率,另一方面能使各节点间的功率得到有效合理的利用,与文献[9]算法相比,确实能改善系统性能。但本文未考虑更加复杂和更加接近实际的信道情况,也未考虑存在信道估计误差或信道状态信息不完全获悉时的算法性能,这将是以后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Bletsas A, Shin H, and Win M Z. Outage optimality of opportunistic amplify-and-forward relaying. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(3): 261-263.
- [2] Zhao Y, Adve R, and Lim T J. Symbol error rate of selection amplify-and-forward relay systems. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(11): 757-759.
- [3] Simic L, Berber S M, and Somerby K W. Partner choice and power allocation for energy efficient cooperation in wireless sensor networks. *IEEE ICC 2008*, Beijing, China, May 2008: 4255-4260.
- [4] Bletsas A, Reed D P, and Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672.
- [5] Lin Z, Erkip E, and Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(7): 1323-1334.
- [6] Luo J, Blum R S, Cimini L J, and Greenstein L J. Decode-and-forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(3): 793-799.
- [7] Deng X and Haimovich A M. Power allocation for cooperative relaying in wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(11): 994-996.
- [8] Zhao Y, Adve R, and Lim T J. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 3114-3123.
- [9] Cai J, Shen X, Mark J W, and Alfa A S. Semi-distributed user relaying algorithm for amplify-and-forward wireless relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1348-1357.
- [10] Wang B, Han Z K, and Liu J R. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. *INFOCOM 2007*, Alaska, USA, May 2007: 544-552.
- [11] Huang Jian-wei, Han Zhu, Chiang Mung, and Vincent Poor H. Auction-based resource allocation for cooperative communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(7): 1226-1237.
- [12] Xiao M, Shroff N B, and Chong E K P. A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(2): 210-221.
- [13] MaKenzie A and DaSilva L. *Game Theory for Wireless Engineers*. San Francisco, USA: Morgan & Claypool publishers, 2006, Chapter 3.
- [14] Boyd S and Lieven Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge, Britain: Cambridge university press, 2004, Chapter 2.
- [15] Saraydar C, Mandayam N B, and Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 50(2): 291-303.
- [16] Rappaport T S. *Wireless communications principles and practice*. Second Edition, Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2004, 3: 95.

吴 丹: 女, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为无线资源管理技术、博弈论在移动通信中的应用。

蔡跃明: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、通信信号处理、无线传感器网络等。

潘成康: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为下一代移动通信关键技术、无线网络等。

盛雁鸣: 男, 1974 年生, 讲师, 研究方向为下一代移动通信关键技术。

徐友云: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代移动通信、卫星通信、战术无线通信网、信道编码与控制、网络信息论等。