

基于 Stackelberg 博弈的协作网络功率分配策略

卫萌菡*, 秦爽, 孙三山

(四川师范大学 物理与电子工程学院, 成都 610101)

(*通信作者电子邮箱 martha82@163.com)

摘要:针对协作网络中的功率分配问题,提出基于 Stackelberg 博弈的分配策略。首先建立博弈模型,源节点根据中继节点分配的功率给出价格;中继节点根据自身资源情况、信道状态、位置信息以及源节点提出的价格,进行协作传输功率的分配,从而构建用户效用函数;接着证明了该效用函数满足凹函数的条件,且存在均衡点,因此参与决策的用户可以通过求解协作功率和价格的 Stackelberg 均衡解(SE)最大化自己的效用;最后,通过仿真实验验证了均衡点的存在,并对源节点位置不同情况下节点的价格、功率和效用进行了分析,实验中离中继更近的源节点的协作功率和效用分别是距离较远用户的 1.29 倍和 1.37 倍。理论分析与实验结果证明了策略的有效性,而且该策略能适用于协作网络及其他分布式网络。

关键词:协作网络;无线资源分配;定价;功率分配;Stackelberg 博弈

中图分类号: TP393.3 **文献标志码:** A

Stackelberg game-based power allocation strategy for cooperative networks

WEI Menghan*, QIN Shuang, SUN Sanshan

(School of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan 610101, China)

Abstract: A distributed strategy based on Stackelberg game was proposed to allocate cooperative power for cooperative networks. A Stackelberg game model was built at first, and the source node decided the price according to the cooperative power. Considering the relay's available resources, channel state, location and the price determined by source node, the relay node allocated the cooperative power to construct a user utility function. Then, the utility function was demonstrated to satisfy the conditions of concave function to ensure the existence of equilibrium. Subsequently, each node maximized its utility by finding the Stackelberg Equilibrium (SE) of optimum power and price. Finally, the simulation results proved the existence of equilibrium point, and the node's price, cooperative power and each node's utility were analyzed when the source node was in a different position. In the experiments, the cooperative power and price of the closer user respectively were 1.29 times and 1.37 times of the farther user. The experimental results show that the proposed strategy is effective, and it can be used in cooperative network and some other distributed networks.

Key words: cooperative network; wireless resource allocation; pricing; power allocation; Stackelberg game

0 引言

近年来,协作通信技术^[1-2]得到广泛研究并被纳入改进的长期演进(Long-Term Evolution Advanced, LTE-A)系统,采用协作传输可以提升系统容量,改善传输质量;并且,由于无需架设多天线,比多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)更容易实现^[3-4]。但要大规模实施,仍有很多问题需要解决,例如:如何激励用户参与协作,以什么标准选择协作伙伴,怎样有效地分配功率、带宽以及时隙^[5-6]。

在协作网络中,参与博弈的局中人为用户节点,源节点作为买方,中继节点为卖方。每个用户的行为具有自私性,希望占有尽量多的资源最大化自己的利益,Stackelberg 博弈模型很适合解决这样的主从分配问题^[7]。最近有许多文献利用 Stackelberg 博弈模型来研究协作网络中的资源分配问题^[8-12]:文献[8]建立了多用户协作通信网络的分布式博弈论模型,提出了在信道状态信息(Channel State Information,

CSI)未知的情况下,找到最优中继和功率分配的方案;文献[9]提出基于 Stackelberg 博弈的中继负载均衡(Load Balancing, LB)方案,用以改善小区边缘用户的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR);文献[10]应用 Stackelberg 两层博弈模型建立了源节点与中继节点的交互过程,研究了中继功率分配和定价问题;文献[11]研究放大转发(Amplify-and-Forward, AF)协作传输机制下,中继节点卖出资源(例如功率和带宽),源节点通过从中继节点购买功率和带宽进行协作通信,进而最大化自己的效用;文献[12]在认知无线电场中引入 Stackelberg 博弈机制,主用户和认知用户之间仅需要少量交互信息即可进行功率分配。

本文在协作通信网络中,采用 Stackelberg 博弈模型模拟用户之间的协商过程,卖方(中继节点)作为 leader,买方(源节点)作为 follower,提出了多源单中继情况下,进行中继节点的传输功率分配,寻找源节点能接受的最优价格,最大化每个用户效用的功率分配方案。

收稿日期:2014-03-17;修回日期:2014-04-23。 基金项目:四川省教育厅基金资助项目(13ZB0159)。

作者简介:卫萌菡(1982-),女,四川成都人,讲师,硕士,主要研究方向:无线资源管理;秦爽(1983-),男,四川成都人,讲师,博士,主要研究方向:室内定位;孙三山(1983-),男,四川达州人,实验师,博士研究生,主要研究方向:网络通信。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型

假设网络包括 $k(k = \{1, 2, \dots, K\})$ 个源节点和1个中继节点,每个节点都有与之对应的目的节点,如图1所示,中继节点在传输自己的业务的同时进行转发。本策略选用 AF 协作协议进行分析^[2]。

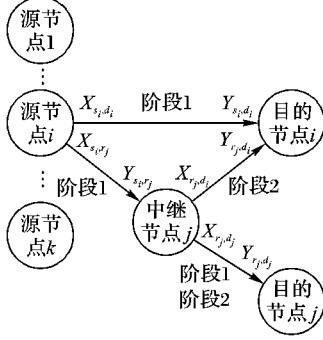


图1 系统模型

在第一个时段,源节点和中继节点广播它们自己的信号。 P_s 是源节点的发射功率,为固定值; P_r 是中继节点的最大发射功率; G_{s_i, d_i} 和 G_{s_i, r_j} 分别是源节点 i 到目的节点和中继节点的信道增益; X_{s_i, d_i} 和 X_{s_i, r_j} 分别是源节点到目的节点 i 和中继节点 j 发送的信息; X_{r_j, d_i} 和 X_{r_j, d_j} 分别是从中继节点 j 发送到目的节点 i 和目的节点 j 的信息; Y_{s_i, d_i} 和 Y_{r_j, d_i} 分别为目的节点 i 接收到的从源节点 i 和中继节点 j 发来的信息; n_{s_i, d_i} , n_{r_j, d_j} 和 n_{s_i, r_j} 为附加高斯白噪声,不失一般性,假设其值都为 σ^2 。

$$Y_{s_i, d_i} = \sqrt{P_s G_{s_i, d_i}} X_{s_i, d_i} + n_{s_i, d_i} \quad (1)$$

$$Y_{s_i, r_j} = \sqrt{P_s G_{s_i, r_j}} X_{s_i, d_i} + n_{s_i, r_j} \quad (2)$$

$$Y_{r_j, d_j} = \sqrt{P_r G_{r_j, d_j}} X_{r_j, d_j} + n_{r_j, d_j} \quad (3)$$

$$\text{目的节点 } i \text{ 和 } j \text{ 的接收信噪比为:} \quad (4)$$

$$\gamma_{s_i, d_i} = P_s G_{s_i, d_i} / \sigma^2 \quad (4)$$

$$\gamma_{r_j, d_j} = P_r G_{r_j, d_j} / \sigma^2 \quad (5)$$

$$\text{中继节点 } j \text{ 的接收信噪比为:} \quad (6)$$

$$\gamma_{s_i, r_j} = P_s G_{s_i, r_j} / \sigma^2 \quad (6)$$

$$\text{源节点 } i \text{ 到目的节点 } i \text{ 的直接传输速率定义为:} \quad (7)$$

$$R_{s_i, d_i} = W \times \ln(1 + \gamma_{s_i, d_i}) \quad (7)$$

$$\text{中继节点 } j \text{ 到目的节点 } j \text{ 的传输速率为:} \quad (8)$$

$$R_{r_j, d_j} = W \times \ln(1 + \gamma_{r_j, d_j}) \quad (8)$$

其中 W 为传输带宽。

在第二时段,中继节点不仅传输自己的信息,同时还分出带宽和功率,转发与之协作的源节点的信息,式(9)~(11)为接收信噪比。

$$\gamma_{r_j, d_j} = P_r G_{r_j, d_j} / \sigma^2 \quad (9)$$

$$\gamma_{r_j, d_i} = P_r G_{r_j, d_i} / \sigma^2 = (P_r - P_{r_j, d_j}) G_{r_j, d_i} / \sigma^2 \quad (10)$$

$$\gamma_{s_i, r_j, d_i} = \gamma_{s_i, r_j} \cdot \gamma_{r_j, d_i} / (1 + \gamma_{s_i, r_j} + \gamma_{r_j, d_i}) \quad (11)$$

其中: γ_{r_j, d_j} 和 γ_{r_j, d_i} 分别为目的节点 i 和 j 的接收信噪比, γ_{s_i, r_j, d_i} 为协作信噪比, P_{r_j, d_j} 为中继节点用以传输自己信息的功率。

$$R_{r_j, d_j} = \xi_i W \times \ln(1 + \gamma_{r_j, d_j}) \quad (12)$$

采用最大比合并 (Maximal Ratio Combining, MRC), 协作传输速率为:

$$R_{s_i, r_j, d_i} = \xi_i W \times \ln(1 + \gamma_{s_i, d_i} + \gamma_{s_i, r_j, d_i}) \quad (13)$$

其中系数 ξ_i 为由传输资源复用 (例如: 时分, 频分或正交码) 带来的带宽损失。本文假设中继节点和源节点共享频段, 因此 $\xi_i = 0.5$ 。

1.2 问题描述

引入协作之后,网络里的用户既是终端又是中继。处于网络边缘的用户,距离目的端更远的用户,或者信道状况比较差的用户,寻找中继进行转发的愿望更迫切;同样的,信道状态好的用户成为中继用户的概率更大。这里就出现了三个问题:1) 如何激励用户参与到协作传输中;2) 如果多个源节点都需要进行协作传输,中继选择与哪个源节点协作,以什么标准选择;3) 怎样分配协作资源 (例如功率、带宽和时隙)。

首先,如果源节点到目的节点的信道状况好,则采用直接传输;如果不好,则希望信道好的中继节点与之进行协作传输,这势必需要建立合理的激励制度和定价体系。信道状况越好的节点其价格可能越高,源节点选择这样的节点作为中继,带来的收益可能无法抵消付出的代价,因此,源节点可能会选择信道状况略差,但价格更低的节点作为中继。

协作网络属于分布式网络,用户无法得到其他所有用户的完整 CSI,也不存在中央控制节点,Stackelberg 模型非常适合用于解决有主从关系的博弈问题,能够通过构建效用函数找到最优的方案。

进行协作时,源节点和中继节点的效用函数定义如式(14)、(15)所示:

$$U_{r_j} = \lambda_{r_j} R_{r_j, d_j} + \pi_{s_i} P_{r_j, d_i} \quad (14)$$

$$U_{s_i} = \lambda_{s_i} R_{s_i, r_j, d_i} - \pi_{s_i} P_{r_j, d_i} \quad (15)$$

其中: U_{r_j} 为协作时中继节点的效用, U_{s_i} 为源节点的效用, λ_{s_i} 和 λ_{r_j} 是反映用户优先级及业务类型的权重值, P_{r_j, d_i} 是中继节点卖出的功率, π_{s_i} 是卖出功率的单价。

2 博弈过程分析

本文将讨价还价的过程用 Stackelberg 博弈模型建模。源节点是买方,它用合理的价格从中继节点购买最优功率以最大化自己的效用 U_{s_i} , 它希望用尽可能少的代价换取更多的收益;中继节点是卖方,在保证自己传输质量的前提下,提供协作传输的功率、频段和时隙。源节点的位置和信道状况会影响它所能承受的价格,以及对协作功率的需求;同时,中继节点的位置越好,可能的要价越高,可分配的协作功率越多。

将式(5)、(8)、(9)、(12)代入式(14),可得:

$$U_{r_j} = 0.5 \lambda_{r_j} W \times \ln[1 + (P_{r_j, d_j} G_{r_j, d_j} / \sigma^2)] + \pi_{s_i} P_{r_j, d_i} = 0.5 \lambda_{r_j} W \times \ln[1 + ((P_r - P_{r_j, d_j}) G_{r_j, d_i} / \sigma^2)] + \pi_{s_i} P_{r_j, d_i} \quad (16)$$

将式(4)、(11)、(13)代入式(15),可得:

$$U_{s_i} = 0.5 \lambda_{s_i} W \times \ln\left(1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i, d_i} + \frac{\sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i, r_j} \cdot \sigma^{-2} P_{r_j, d_i} G_{r_j, d_i}}{1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i, r_j} + \sigma^{-2} P_{r_j, d_i} G_{r_j, d_i}}\right) - \pi_{s_i} P_{r_j, d_i} \quad (17)$$

2.1 中继节点效用最优优化问题

对中继节点来说,最优化为 $\max_{P_{rj,d_i} > 0} U_{rj}, \pi_{s_i}$ 是固定值。关于 U_{rj} 求导可得:

$$\frac{\partial U_{rj}}{\partial P_{rj,d_i}} = -\frac{\lambda_{rj} W}{2 \ln 2} \frac{\sigma^{-2} G_{rj,d_j}}{1 + \sigma^{-2} (P_r - P_{rj,d_i}) G_{rj,d_j}} + \pi_{s_i} \quad (18)$$

进一步求二阶导可得:

$$\frac{\partial^2 U_{rj}}{\partial P_{rj,d_i}^2} = -\frac{\lambda_{rj} W}{2 \ln 2} \frac{(\sigma^{-2} G_{rj,d_j})^2}{[1 + \sigma^{-2} (P_r - P_{rj,d_i}) G_{rj,d_j}]^2} \quad (19)$$

因为 $\frac{\partial^2 U_{rj}}{\partial P_{rj,d_i}^2} < 0$, 因此 U_{rj} 是关于 P_{rj,d_i} 的凹函数, 令 $\frac{\partial U_{rj}}{\partial P_{rj,d_i}} =$

0, 可得最优功率 P_{rj,d_i}^* 为:

$$P_{rj,d_i}^* = P_r - \frac{W}{2 \ln 2} + \frac{\sigma^2}{G_{rj,d_j}}, P_{rj,d_i}^* > 0 \quad (20)$$

将 P_{rj,d_i}^* 代入式(17), 可得:

$$U_{s_i} = 0.5 W \lambda_{s_i} \times \ln \left(1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,d_i} + \frac{\sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,r_j} \cdot \sigma^{-2} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,r_j} + \sigma^{-2} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}} \right) - \pi_{s_i} P_{rj,d_i}^* \quad (21)$$

2.2 源节点效用最优优化问题

对源节点来说,最优优化问题为: $\max_{\pi_{s_i} > 0} U_{s_i}$ 。对式(21)的 U_{s_i}

关于 π_{s_i} 求一阶导, 可得:

$$\frac{\partial U_{s_i}}{\partial \pi_{s_i}} = \frac{W \lambda_{s_i}}{2 \ln 2} \frac{1}{(1 + A + B)} \left(\frac{1}{C^2} \left(\frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} G_{rj,d_i}}{\sigma^2} C - \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{\sigma^6} \right) \frac{\partial P_{rj,d_i}^*}{\partial \pi_{s_i}} - \left(P_{rj,d_i}^* + \pi_{s_i} \frac{\partial P_{rj,d_i}^*}{\partial \pi_{s_i}} \right) \right) \quad (22)$$

其中: $A = \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,d_i}$, $B = \frac{\sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,r_j} \cdot \sigma^{-2} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,r_j} + \sigma^{-2} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}$,

$C = 1 + \sigma^{-2} P_{s_i} G_{s_i,r_j} + \sigma^{-2} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}$ 。

进一步求二阶导可得式(23):

$$\frac{\partial^2 U_{s_i}}{\partial \pi_{s_i}^2} = \frac{W \lambda_{s_i}}{2 \ln 2} \left[F + \frac{1}{(1 + A + B)} \left(\frac{1}{C^3} \left(\frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} G_{rj,d_i}}{\sigma^2} C - \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{\sigma^6} \right) L \right) \right] \quad (23)$$

其中:

$$F = - (1 + A + B)^{-2} \cdot$$

$$\frac{1}{C^2} \left[\left(\frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} G_{rj,d_i}}{\sigma^2} C - \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{\sigma^6} \right) \frac{\partial P_{rj,d_i}^*}{\partial \pi_{s_i}} \right]^2 < 0 \quad (24)$$

$$L = C \frac{\partial^2 P_{rj,d_i}^*}{\partial \pi_{s_i}^2} - \frac{2 G_{rj,d_i}}{\sigma^2} \left(\frac{\partial P_{rj,d_i}^*}{\partial \pi_{s_i}} \right)^2 \quad (25)$$

将式(19)和 C 代入式(25), 得到式(26)。

$$L = - \left(1 + \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j}}{\sigma^2} + \frac{P_{rj,d_i}^* G_{rj,d_i}}{\sigma^2} \right) \frac{W}{2 \pi^3 \ln 2} -$$

$$\frac{G_{rj,d_i}}{\sigma^2} \frac{W^2}{2 \pi^4 (\ln 2)^2} < 0 \quad (26)$$

因为 $L < 0$, $F < 0$, 因而 $\frac{\partial^2 U_{s_i}}{\partial \pi_{s_i}^2} < 0$, 因此 U_{s_i} 是关于 π_{s_i}

的凹函数, 令式(22) 等于 0, 并化简整理可得式(27):

$$- \frac{2 P_{rj,d_i}^* \ln 2}{W} \pi_{s_i}^2 - \pi_{s_i} + \frac{W}{2(1 + A + B) \ln 2} \cdot \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} G_{rj,d_i}}{\sigma^4} \left(C - \frac{G_{rj,d_i} P_{rj,d_i}^*}{\sigma^2} \right) = 0 \quad (27)$$

对式(27) 进行求解, 得到 π_{s_i} 的正根为:

$$\pi_{s_i}^* = \left\{ 1 - \left[1 + 4 P_{rj,d_i}^* \frac{1}{(1 + A + B) C^2} \cdot \frac{P_{s_i} G_{s_i,r_j} G_{rj,d_i}}{\sigma^4} \left(C - \frac{G_{rj,d_i} P_{rj,d_i}^*}{\sigma^2} \right) \right]^{1/2} \right\} / \left(- \frac{4 P_{rj,d_i}^* \ln 2}{W} \right) \quad (28)$$

式(20)和(28)对应的 P_{rj,d_i}^* 和 $\pi_{s_i}^*$ 正是 Stackelberg 均衡解。当价格固定时, P_{rj,d_i}^* 是使得 U_{rj} 取得最大值的解, 即中继能分出的最大协作功率; 当协作功率一定时, $\pi_{s_i}^*$ 是使得 U_{s_i} 取得最大的价格。经过多次迭代将找到这一均衡解。

3 仿真结果与分析

假设源节点到目的节点的最大距离归一化为 1; 假设网络中有 4 个源节点 node1、node2、node3、node4, 各节点距离目的节点的距离分别为 1、0.8、0.6 和 0.58; 只有一个中继节点, 距离目的节点的距离为 0.6; 网络拓扑结构如图 2 所示。假定所有节点的最大传输功率为 10 dB, 附加高斯白噪声 $\sigma^2 = 10^{-8} W$, 传输带宽 $W = 1$ MHz, 传输信道选用莱斯信道。

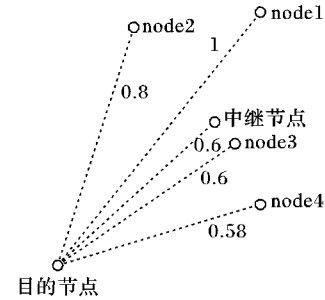


图2 网络拓扑结构

由图 3 可知, 随着中继最大传输功率的增加, 价格逐渐降低, 说明资源越丰富的时候价格越低, 这与市场规律相符, 其中, node3 和 node4 距离中继节点的距离更近, 协商得到的价格是 node1 和 node2 的 2~3 倍。由图 4 可知, 随着中继最大传输功率的增加, 协作功率增高, 说明当中继传输功率越高越愿意参与协作, 并且 node3 和 node4 愿意分出的协作功率更多, 当中继最大传输功率达到 10 dB 的时候, node3、node4 的协作功率近似等于 node2 的协作功率数值的 1.13 倍, node3、node4 协作功率近似等于 node1 分出协作功率的 1.29 倍。由此可见, 采用本文提出的策略, 离中继更近的源节点, 协商得到的价格更高, 可分到的协作功率更大, 更可能被中继节点选为协作伙伴。

图 5 和图 6 进一步说明了随着中继节点最大传输功率的增加, 网络中节点的效用变化。由图 5 观察可知, 源节点效用

将会随着功率门限的提升而增大,且 node3 和 node4 的效用始终更高,并且随着中继最大传输功率的增大,优势更加明显。图6所示为中继节点的效用,中继选用 node4 作为协作伙伴,获得的效用最高,其数值近似等于选用 node1 获得效用的 1.37 倍。因此,只要满足一定的条件,例如:信道状况和合适的功率限制,博弈双方均可协商得到协作功率和价格均衡解,但是不同位置的节点,用户的效用增益不同,当中继选择距离更近的源节点进行协作传输,双方获得的效用最高,采用本文提出的策略,不仅能获得均衡解,并且可以选择更合适的协作伙伴,从而使得网络总效用更高,且能更好地激励节点参与协作。

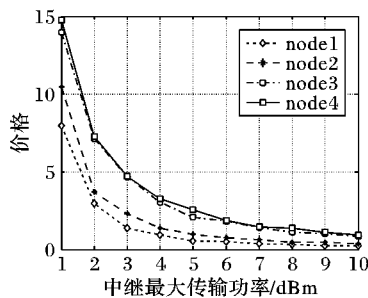


图3 源节点的出价

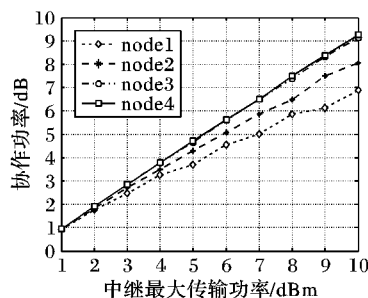


图4 源节点获得的协作功率

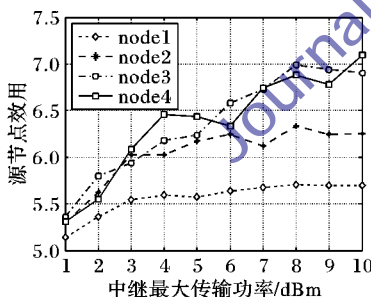


图5 源节点效用

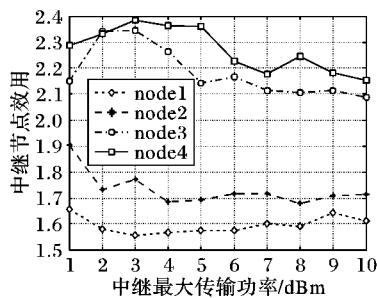


图6 中继节点效用

4 结语

本文基于 stackelberg 博弈理论,提出用以解决协作通信

网络中功率分配问题的方案,通过构建效用函数,从理论分析和实验仿真两方面验证了均衡点的存在,分析了源节点位置对协作价格、功率以及各节点效用的影响。此策略不仅适用于协作网络,其他分布式网络,例如多跳蜂窝网、Ad Hoc 网络等也同样适用。另外需要说明的是,该方案没有考虑各节点的价格和所分配功率对彼此策略的影响,更贴合实际情况的分配方案将是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] MARIC I, YATES R D. Cooperative multihop broadcast for wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1080-1088.
- [2] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [3] SU W, SADEK A K, LIU K J R. Cooperative communications in wireless networks: performance analysis and optimum power allocation [J]. Wireless Personal Communications, 2008, 44(2): 181-217.
- [4] YANG Y, HU H, XU J, et al. Relay technologies for WiMax and LTE-advanced mobile systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(10): 100-105.
- [5] IBRAHIM A, SADEK A K, SU W, et al. Cooperative communications with relay selection: when to cooperate and whom to cooperate with? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2814-2827.
- [6] NG T, YU W. Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 328-339.
- [7] JIANG Y, CHEN S, HU B. Stackelberg game-based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks [J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 61-68. (姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(1): 61-68.)
- [8] WANG B, HAN Z, LIU K J R. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using Stackelberg game [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7): 975-990.
- [9] LIU D, CHEN Y, VINEL A. Stackelberg game based cooperative user relay assisted load balancing in cellular networks [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 424-427.
- [10] CAO Q, ZHAO H V, JING Y. Power allocation and pricing in multiuser relay networks using Stackelberg and bargaining games [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 3177-3190.
- [11] AL-TOUS H, BARHUMI I. Resource allocation for AF cooperative communications using Stackelberg game [C]// ICSPCS 2012: Proceedings of the 6th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Piscataway: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] LUO R, YANG Z. Stackelberg game-based distributed power allocation algorithm in cognitive radios [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2964-2969. (罗荣华, 杨震. 认知无线电中基于 Stackelberg 博弈的分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2964-2969.)