

基于合作形成的认知无线网络频谱共享策略

谭雪松, 林超, 郭伟

(电子科技大学 通信抗干扰国家重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 当具备不同利益的多个主网络竞争为单个次级网络提供频谱接入机会时, 它们可以通过基于重复博弈模型的频谱共享机制实现对授权通信频段的合作垄断, 从而最大化它们的整体数据传输效用。然而当某个主网络对未来传输效用不够重视时, 它会为了获得比垄断效用更高的传输效用而偏离当前的合作垄断, 从而降低了其他主网络的当前和未来数据传输效用。为此, 2 种新的频谱共享策略被提出以促使所有主网络形成更为灵活和可靠的频谱共享合作垄断。数值仿真表明, 相比现有的触发策略, 这 2 种新策略能够为所有主网络获得更优的整体数据传输效用。

关键词: 频谱共享; 认知无线网络; 重复竞争; 纳什均衡; 合作

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0058-11

Spectrum sharing schemes in cognitive radio networks based on collusion formation

TAN Xue-song, LIN Chao, GUO Wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communication,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: When multiple primary network (PN) with different interests competes to offer spectrum access opportunities for a single secondary network, a spectrum sharing scheme based on a repeated game model could be adopted to form a colluded monopoly for the licensed spectrum so as to maximize their total transmission utility. However, when a does not value its future transmission utility enough, it might choose to deviate from the present colluded monopoly to obtain a transmission utility larger than its monopoly utility, which then reduces the current and future transmission utilities of all other PN. Two new strategies were thereby proposed to produce a more flexible and credible spectrum sharing monopoly among all PN. Numerical simulation shows that, compared with the existing triggering strategy, the proposed strategies can effectively increase the overall transmission utility of all PN.

Key words: spectrum sharing; cognitive radio network; repeated competition; Nash equilibrium; collusion

1 引言

随着移动通信业务的大量普及以及各种无线应用模式的不断涌现, 现有的无线频谱资源已越来越无法满足移动通信产业发展需求。为有效解决无线频谱资源日益稀缺这一瓶颈, 认知无线电技术^[1]由于其灵活的通信能力和无线电磁环境的适应能

力, 已获得了无线通信业界和学术界的广泛关注。以认知无线电设备为基础, 认知无线网络能实时地感知和估计无线信道的当前状况, 并自适应地通过对有限频谱资源的共享和分配, 实现对无线网络传输参数的自主适变和优化, 从而有效提升有限频谱资源的利用率以及网络通信的性能。本文研究的核心即是如何实现认知无线通信系统整体传输效能

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2013-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001085, 61271168); 国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)基金资助项目(2009CB320405); 中央高校基本业务费基金资助项目(ZYGX2009J009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001085, 61271168); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320405); The Fund for Central University of China(ZYGX2009J009)

的最大化。

认知无线传输的一个关键问题是如何将授权网络（主网络）的空闲授权频谱共享给未授权网络（次级网络）以避免对有限频谱资源的浪费。在这一频谱共享过程中，主网络通常需要向次级网络收取一定的单位频谱价格。该价格的设定既需要弥补频谱共享可能带来的主网络自身通信服务质量（QoS）下降，也能够为主网络提供一定的频谱共享收益。因此，在满足一定的QoS要求条件下，主网络需要选择合适的单位频谱价格来最大化其总效用，而本文研究目标是通过为每个主网络设计适当的频谱定价机制，以提升其数据传输的效用。

本文将进一步考虑如图1所示的多个主网络为单个次级网络提供空闲频谱接入机会的应用场景。在此场景中，除了次级网络以外，所有主网络也都属于不同的服务提供者，因而也都具备各自不同的传输利益。为此，每个主网络所采用的分布式频谱共享策略可以被表述为基于单位频谱价格竞争的非合作博弈问题，而它在这一博弈中的目标是最大化本网络的传输效用。

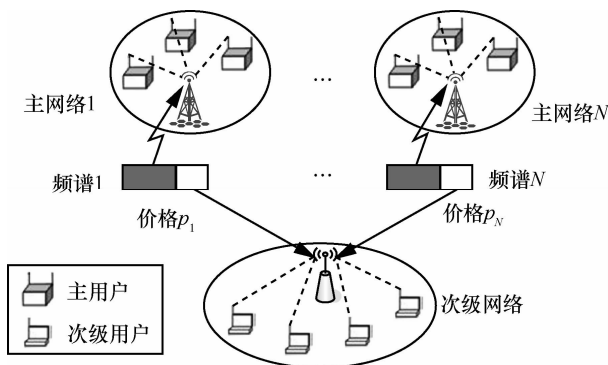


图1 本文所考虑的认知频谱共享应用场景

为有效解决无线网络资源共享和分配过程的多用户竞争问题，博弈论可以在这些用户之间分布式地实现通信效益的均衡最优解^[2,3]，从而为无线网络传输协议的行为提供理论建模的基础^[4]。例如，文献[5]提出了基于部分可观察马尔可夫决策模型的机会式频谱接入控制，而文献[6]则提出了能够限制参与者行为的基于拍卖竞争模型的频谱共享机制。特别地，现有针对认知无线网络动态频谱共享技术的研究就充分地利用了各种非合作博弈理论模型。例如，一种基于非合作博弈的自适应信道分配方案^[7]可有效地获取认知用户的自私和合作行为。在文献[8]中，频谱共享问题被表述为一个潜在

博弈，而该博弈的均衡解是通过分布式的顺序执行所获得的。文献[9]则通过频谱单位价格的非合作博弈来实现认知无线网络的所有合法频谱所有者之间的均衡竞争。以古诺博弈模型^[10]为基础，文献[11,12]将单个主用户与多个认知用户所进行的频谱共享场景建模为一个基于频谱带宽竞争的多寡头频谱竞争市场，并推导出在该市场中认知用户之间的纳什均衡最优传输能效。另一方面，文献[13]基于博川德博弈模型将多个主网络和单个次级网络之间的频谱共享描述为认知用户之间基于频谱价格的竞争。由于在所有这些基于博弈论模型的频谱共享模式中认知用户之间的非合作频谱共享竞争只会被执行一次，因此它们所能实现的最优频谱共享均衡解均为纳什均衡。

对于频谱共享竞争的所有参与方来说，纳什均衡解本身并非最优，并且在大多数情况下都低于所有参与方基于合作所能获得的最优解。针对频谱合作共享情况下的最优解，文献[13]发现，如果多个主网络为单个次级网络所进行的基于单位频谱价格的频谱共享竞争是重复进行的，那么主网络之间可以通过形成某种程度的合作以垄断与次级网络之间的频谱共享，从而获得优于纳什均衡的长期整体传输效用，即垄断传输效用。然而，垄断效用并不是单个主网络所能获得的最高传输效用。在每一轮竞争中，由于每个主网络是自私的，因此它还可以通过偏离与其他主网络的合作垄断来获得高于垄断效用的实际传输效用。而这一偏离合作的代价是造成其他未偏离合作的主网络在该轮竞争中获得劣于垄断效用的实际传输效用。如果未偏离合作的主网络发现了这一偏离，那么所有主网络在接下来的竞争中就无法再有效地形成合作垄断，从而无法长期地获得优于纳什均衡的垄断传输效用。为此，文献[13]设计了一种所谓触发策略的惩罚机制，即所有未偏离合作的主网络会对偏离合作的主网络进行惩罚，使得后者只能获得低于垄断效用的纳什均衡传输效用。因此这一策略可以促使每个主网络对当前和未来的传输效用进行平衡，在一定程度上避免对频谱共享合作垄断的偏离，从而使得所有主网络能够长期地获得垄断传输效用。

触发策略针对偏离合作主网络的惩罚并非总是有效的。尤其是，当主网络并不重视其与其他主网络长期合作所能获得的传输效用时，即便是触发策略本身也仍然无法确保所有主网络之间能形成

有效的合作垄断，而在彼此未能合作未形成时，每个主网络均只能获得劣于垄断效用的纳什均衡传输效用。为了解决这一问题，本文引入 2 个新的策略来促使主网络之间形成某种程度的合作。第一个策略是已有触发策略的修改版本。该策略能够在所有主网络对未来的传输效用不够重视时依然能够形成更加灵活的合作，使它们能获得虽然比垄断效用低但高于纳什均衡的传输效用。而另一个策略叫做两期策略。与只考虑对偏离合作者进行惩罚的触发策略相比较，两期策略是由惩罚和奖励 2 个阶段组成，其理论基础是文献[14]所提出的最严厉可信惩罚机制。在惩罚阶段，该策略将对偏离合作的主网络施加一个比触发策略更严厉的惩罚，使得后者只能获得低于纳什均衡的传输效用。然而，由于该惩罚过于严厉，并且会造成执行该惩罚的主网络的长期传输收益同时受到损害，所以偏离合作的主网络可能会怀疑该惩罚的真实性。而与惩罚阶段相配合的奖励阶段就是为了让该惩罚更为可信而对每个愿意回到合作垄断的主网络进行奖励。基于这一惩罚和奖励的联合机制，即使是在现有触发策略失效的情况，所有主网络仍然有可能形成某种程度的合作以获得高于纳什均衡的垄断传输效用。数值仿真表明，在包括贴现率、频谱替代率和信道质量等无线通信系统参数给定的情况下，与现有触发策略相比，上述触发策略的修改版本和两期策略均能够更有效地提升所有主网络的整体数据传输效用。

2 频谱共享模型

2.1 系统模型

本文主要考虑如图 1 所示的存在 N 个主网络和单个认知网络的无线通信系统。在该系统中，每个主网络均愿意将其未使用的空闲授权频谱以一定的价格共享给次级网络，而每个主网络或次级网络的基站则负责在该网络范围内进行集中式的频谱分配。所有主网络和次级网络的用户都会在它分配的频谱上采用自适应调制进行数据传输。由于自适应调制可以根据无线信道质量动态地调整传输速率，所以主用户或者次级用户的频谱传输有效速率 k 可根据文献[15]所给出的公式来获得

$$k = \text{lb}(1 + K\gamma)$$

其中， $K = 1.5 / \ln(0.2 / \text{BER}^{\text{tar}})$ ， γ 为接收端的 SNR， BER^{tar} 为目标误比特率。

2.2 主网络的单位频谱价格

在图 1 所示的通信系统中，假设主网络 $i (1 \leq i \leq N)$ ，所设定的单位频谱价格与次级网络对其频谱需求量存在如下的线性

$$p_i = \alpha k_i^s - \beta(b_i + v \sum_{j \neq i} b_j) \quad (1)$$

其中， b_i 代表次级网络对主网络 i 的频谱需求量， k_i^s 代表次级网络使用主网络 i 频谱所能获得的频谱传输效率， α 和 β 分别表示传输效率收益系数和带宽成本系数，以及 $v \in (-1, 1)$ 为频谱替换系数。特别地， $v = 0$ 表示次级网络无法在不同主网络的授权频谱之间进行频谱切换； v 趋近于 1 意味着次级网络可以更为自由地在不同主网络的授权频谱之间进行切换； v 趋近于 -1 则意味着不同主网络授权频谱存在更强的互补性（例如，在全双工通信中，当次级网络从主网络 i 获得了授权频段以作为下行数据信道，那么还需要在其他的主网络那里获得更多的授权频段以作为上行数据信道）。

因此，当参数 v 趋近于 1 时，由于次级网络的跨网频谱切换相对更为容易，因此主网络之间的频谱共享竞争就越会越发激烈。此时，主网络 i 需要通过降低 p_i 来获得与次级网络进行频谱共享的机会。根据式(1)，次级网络对主网络 i 的频谱需求^[11]为

$$D_i(p) = \frac{(\alpha k_i^s - p_i)(v(N-2)+1) - v \sum_{j \neq i} (\alpha k_j^s - p_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \quad (2)$$

其中， $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 为所有主网络的单位频谱价格的集合。

对于主网络 i 来说，它从与次级网络所进行的频谱共享中可以获得的收益为 $p_i D_i(p)$ 。同时，主用户 i 在提供 M_i 个主用户通信连接时所获得的传输收益为 $c_1 M_i$ ，其中， c_1 为传输收益常数。另一方面，主网络 i 为次级网络进行频谱共享的传输成本可以被表示为 $c_2 \{M_i B_i^{\text{req}} - k_i^p [W_i - D_i(p)]\}$ ，其中， c_2 为传输成本系数， B_i^{req} 为主网络 i 提供单个主用户通信连接所需要的带宽， W_i 为主网络 i 的全部带宽， k_i^p 为主网络 i 的无线频谱传输效率。

因此，主网络 i 的整体传输效用可以表示为

$$U_i(p) = p_i D_i(p) + c_1 M_i - c_2 (M_i B_i^{\text{req}} - k_i^p (W_i - D_i(p))) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)，则主网络 i 的传输效用变为

$$\begin{aligned}
& U_i(p) \\
&= \frac{(p_i - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i)(v(N-2)+1)(\alpha k_j^s - p_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \\
& \frac{v(p_i - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - p_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} + c_1 M_i + c_2 k_i^p W_i - \\
& c_2 M_i B_i^{\text{req}} \quad (4)
\end{aligned}$$

特别地，当 $N=2$ 和 $p = \{p_i, p_j\}$ 时，主网络 i 效用为

$$\begin{aligned}
U_i(p) &= \frac{(p_i - c_2 k_i^p)[(k_i^s - v k_j^s) - p_i + v p_j]}{(1-v^2)\beta} + \\
& c_1 M_i + c_2 k_i^p W_i - c_2 M_i B_i^{\text{req}} \quad (5)
\end{aligned}$$

文献[13]证明在 N 个主网络之间的非合作频谱共享博弈中存在一个唯一的纳什均衡解，该解可以通过令 $\frac{\partial U_i(p)}{\partial p_i} = 0 (\forall 1 \leq i \leq N)$ 联立得到。当且仅当 N 个主网络之间的非合作博弈只进行一次时，上述纳什均衡解即给出了所有主网络应设定的最优单位频谱价格。

另一方面，如果 N 个主网络间的非合作博弈是重复进行的，那么每个主网络可以根据之前所观测到的其他主网络的出价结果来调整它在后续博弈中的单位频谱价格。根据这个思路，文献[13]提出了一个所谓的触发策略，通过在所有主网络之间形成合作来达到垄断频谱共享的目的，从而最终获得一个高于纳什均衡的整体传输收益。

3 现有触发策略及其限制条件

本节将严格推导出每个主网络在纳什均衡和合作垄断时的传输收益，并根据该收益给出了触发策略能在主用户网络之间形成合作的限制条件。

为了方便推导，将图1所示的主网络数量限制为2，即 $N=2$ 和 $p = \{p_i, p_j\}$ ，而在 $N=2$ 情况下所获得的结论和频谱共享策略可以很自然地推广到 $N>2$ 的情况。在此限制条件下，式(5)可以重写为

$$U_i(p) = \frac{(p_i - C_i)(A_i - p_i + v p_j)}{(1-v^2)\beta} - C_{fi}$$

其中， $C_{fi} = c_2 M_i B_i^{\text{req}} - c_1 M_i - c_2 k_i^p W_i$ ， $C_i = c_2 k_i^p$ 和 $A_i = \alpha(k_i^s - v k_j^s)$ 。由于 C_{fi} 对于主网络 i 来说是固定的，因此后续推导过程将忽略 C_{fi} 。由此，主网络 i 的效用可以简化成

$$\pi_i(p) = \frac{(p_i - C_i)(A_i - p_i + v p_j)}{(1-v^2)\beta} \quad (6)$$

通过求解 $\frac{\partial U_i(p)}{\partial p_i} = 0$ 和 $\frac{\partial U_j(p)}{\partial p_j} = 0$ 可得，主网络

i 在纳什均衡时的价格为 $p_i^n = \frac{2A_i + 2C_i + vA_j + vC_j}{4-v^2}$ 。

根据式(6)，主网络 i 在纳什均衡时的传输收益应为

$$\pi_i^n = \frac{[2A_i + (v^2 - 2)C_i + vA_j + vC_j]^2}{(1-v^2)(4-v^2)^2 \beta} \quad (7)$$

另一方面，为了最大化它们的整体传输收益，主网络 i 和 j 可通过合作来垄断与次级网络的频谱共享。在此情况下，它们的单位频谱价格应该满足 $\frac{\partial[\pi_i(p) + \pi_j(p)]}{\partial p_i} = 0$ 和 $\frac{\partial[\pi_i(p) + \pi_j(p)]}{\partial p_j} = 0$ 。通过求

解这2个等式可得，主网络 i 在垄断频谱共享时的价格应为 $p_i^m = \frac{A_i + vA_j + (1-v^2)C_i}{2(1-v^2)}$ 。此时主网络 i

的传输收益应为

$$\pi_i^m = \frac{[A_i + (v^2 - 1)C_i + vA_j](A_i - C_i + vC_j)}{4(1-v^2)^2 \beta} \quad (8)$$

很显然，式(7)和式(8)是不同的。由于 $\pi_i^m > \pi_i^n$ ，因此每个主网络在纳什均衡时的传输收益不是最优的。当主网络之间的非合作博弈只进行一次而且每个主网络 i 只需要考虑当前的传输收益时，它会选择偏离最优价格 p_i^m 来达到比 π_i^n 更高的传输收益。

当主网络之间的非合作博弈是重复进行的，它们需要同时考虑当前和未来传输收益。在此情况下，它们就有可能通过合作来获得最优的垄断频谱价格。下面就是在重复竞争中促使2个主网络形成合作的一个现有策略。在这个策略中，主网络之间的每一次竞争被看作一个阶段，而每个阶段的持续时间从主网络开始选择它们的价格到它们的价格被观测到。

算法1 (触发策略^[13]): 在阶段1，主网络 i 采用垄断价格 p_i^m 。如果2个主网络在阶段 t 的价格分别为 p_i^m 和 p_j^m ，那么每个主网络在阶段 $t+1$ 会保持价格不变；否则，主网络 i 从阶段 $t+1$ 开始就改为纳什均衡价格 p_i^n ，并将一直保持该价格不变。

也就是说，一旦主网络 j 偏离垄断价格 p_j^m ，那么主网络 i 将对偏离者进行永久性的惩罚，而惩

罚价格为纳什均衡价格 p_i^n 。这个惩罚措施将促使每个主网络考虑其未来所能获得的传输收益。为了计算主网络未来的传输收益在当前决策时的价值, 本文引入经济学中的贴现率 $\delta \in [0, 1]$, 即主网络在阶段 $t+1$ 获得的传输收益 π 在阶段 t 的价值为 $\delta\pi$ 。因此 δ 的值越大, 主网络的未来传输收益就越有价值。下面给出算法 1 能促使 2 个主网络合作的 δ 值范围。

根据式(8), 如果主网络 j 在第 t 阶段采用垄断价格 p_j^m , 那么主网络 i 在这个阶段为最大化自身的传输收益所采用的价格应满足

$$\max_{p_i} \{\pi_i(\{p_i, p_j^m\}) = \frac{(p_i - C_i)(A_i - p_i + \nu p_j^m)}{(1 - \nu^2)\beta}\}$$

对 $\pi_i(\{p_i, p_j^m\})$ 求 p_i 的偏导可得主网络 i 的最优价格为 $p_i^d = \frac{(2 - \nu^2)A_i + 2(1 - \nu^2)C_i + \nu A_j + (\nu - \nu^3)C_j}{4(1 - \nu^2)}$ 。

给定价格 p_i^d , 主网络 i 在第 t 阶段的最高收益为

$$\pi_i^d = \frac{[(2 - \nu^2)A_i - 2(1 - \nu^2)C_i + \nu A_j + (\nu - \nu^3)C_j]^2}{16(1 - \nu^2)^3\beta} \quad (9)$$

为了在阶段 t 形成合作, 主网络 i 应该满足

$$\frac{1}{1 - \delta_i} \cdot \pi_i^m \geq \pi_i^d + \frac{\delta_i}{1 - \delta_i} \cdot \pi_i^n \quad (10)$$

将式(7)~式(9)代入式(10)可得, 主网络 i 为形成合作而需要的贴现率 δ_i 取值范围。当 2 个主网络 i 和 j 具备类似的配置并且物理位置较为接近时, 可以合理地假设它们具备相同的无线信道质量, 即 $k_i^p = k_j^p = k^p$, $k_i^s = k_j^s = k^s$, $M_i = M_j = M$ 和 $B_i^{req} = B_j^{req} = B^{req}$, $\beta = 1$ 。这就意味着 $A_i = A_j = A$ 和 $C_i = C_j = C$ 。在此条件下, 得到 $\delta_i \geq \frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2}$ 。换句话说, 当 $\delta_i < \frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2}$ 时, 由于主网络 i 对未来的传输收益不够重视, 即使无限重复竞争也不能促使它保持合作以获得最优的垄断传输收益 π_i^m 。在此情况下, 主网络 i 根据算法 1 只能得到纳什均衡的非最优传输收益 π_i^n 。为了弥补这一缺点, 第 4 节将提出 2 个新的合作形成策略。

4 2 个新的合作形成策略

4.1 触发策略的改进

如第 3 节所述, 当 δ_i 太小时主网络 i 更倾向于

偏离合作。然而, 它还是可以同主网络 j 在形成某种程度的合作以获得比 π_i^m 低但比 π_i^n 高的长期传输收益。本文的第一个主要贡献即是通过改进算法 1 所述的触发策略来实现这一目标。

算法 2 (触发策略的改进版): 在阶段 1, 主网络 i 采用合作价格 $p_i^*(\geq 0)$ 。如果 2 个主网络在阶段 t 的价格分别为 p_i^* 和 p_j^* , 那么每个主网络在阶段 $t+1$ 会保持价格不变; 否则, 主网络 i 从阶段 $t+1$ 开始就改为纳什均衡价格 p_i^n , 并将保持该价格不变。

显然, 算法 1 可以看成算法 2 的特殊情况, 即 $p_i^* = p_i^m$ 和 $p_j^* = p_j^m$ 。也就是说, 算法 2 将现有触发策略所形成的主网络 i 和 j 之间的合作垄断进行了拓展, 使得主网络 i 的合作价格 p_i^* 可以不同于其垄断价格 p_i^m 。同时, 即使 δ_i 太小, 例如 $\delta_i < \frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2}$, 主网络之间还是能形成某种程度的合作。下面将推导出促使主网络形成合作的 δ_i 范围。

令 π_i^* 为主网络 i 和 j 分别采用价格 p_i^* 和 p_j^* 时, 主网络 i 所获得的传输收益。根据式(6), π_i^* 为

$$\pi_i^* = \frac{(p_i^* - C_i)(A_i - p_i^* + \nu p_j^*)}{(1 - \nu^2)\beta} \quad (11)$$

在第 t 阶段, 如果主网络 j 采用价格 p_j^* , 那么主网络 i 为最大化其传输利润所采用的价格应满足

$$\max_{p_i} \{\pi_i(\{p_i, p_j^*\}) = \frac{(p_i - C_i)(A_i - p_i + \nu p_j^*)}{(1 - \nu^2)\beta}\}$$

通过对 $\pi_i(\{p_i, p_j^*\})$ 求 p_i 的偏导可得, 主网络 i 为最大化其传输收益所采用的价格应为 $p_i^{d*} = \frac{A_i + C_i + \nu p_j^*}{2}$ 。给定价格 p_i^{d*} , 主网络 i 对应的传输收益为

$$\pi_i^{d*} = \pi_i(\{p_i^{d*}, p_j^*\}) = \frac{(A_i - C_i + \nu p_j^*)^2}{4\beta(1 - \nu^2)} \quad (12)$$

为了能在阶段 t 形成合作, 主网络 i 应更愿意与主网络进行合作垄断获得 π_i^* 而不是首先偏离合作得到最大利润 π_i^{d*} 然后在接下来的阶段获得纳什均衡收益 π_i^n 。因此, 主网络 i 应该满足下式

$$\frac{1}{1 - \delta_i} \cdot \pi_i^* \geq \pi_i^{d*} + \frac{\delta_i}{1 - \delta_i} \cdot \pi_i^n \quad (13)$$

将式(7)、式(11)和式(12)代入式(13), 得到

$$(p_i^* - C_i)(A_i - p_i^* + \nu p_j^*) \geq \frac{(1 - \delta_i)(A_i - C_i + \nu p_j^*)^2}{4} + \frac{\delta_i [2A_i + (\nu^2 - 2)C_i + \nu A_j + \nu C_j]^2}{(4 - \nu^2)^2}$$

根据这一不等式，并考虑主网络 i 和 j 之间的对称性，就可以获得促使主网络 i 和 j 形成合作 p_i^* 和 p_j^* 的范围。特别地，如果 $A - C + \nu C \geq 0$ 和 $\delta_i = \delta_j = \delta$ ，那么 p_i^* 和 p_j^* 的范围均为

$$\left[\frac{A + C}{2 - \nu}, \frac{\delta \nu (3\nu C - \nu A + 4A - 4C) + (A + C)(2 - \nu)^2}{[(2 - \nu)^2 - \delta \nu^2](2 - \nu)} \right]$$

否则，它们的范围均为

$$\left[\frac{\delta \nu (3\nu C - \nu A + 4A - 4C) + (A + C)(2 - \nu)^2}{[(2 - \nu)^2 - \delta \nu^2](2 - \nu)}, \frac{A + C}{2 - \nu} \right]$$

令 π^* 的最大值为 π^h 。当 $\delta = \frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2}$ ，如果 $A - C + \nu C \geq 0$ ，那么 $p_i^* \in [p_i^n, p_i^m]$ ，否则为 $[p_i^m, p_i^n]$ 。这此情况下，有 $\pi_i^h = \pi_i^m$ 。另一方面，当 $\delta = 0$ ， p_i^* 只有一个唯一解为 p_i^n ，此时 $\pi_i^h = \pi_i^n$ 。因此，在取值范围 $\left[0, \frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2} \right]$ 时，如果 δ 越接近 $\frac{4 - 4\nu + \nu^2}{8 - 8\nu + \nu^2}$ ，那么 π_i^h 会越接近 π_i^m ；否则， π_i^h 越接近 π_i^n 。总之，当 $\delta > 0$ 时，主网络 i 和 j 可以根据算法 2 形成某种程度的合作以获得比纳什均衡更高的传输收益。

4.2 两期策略

第 4.1 节中已经表明当 δ_i 太小时，虽然算法 1 不能使得 2 个主网络形成合作，但算法 2 却能在 2 个主网络之间形成某种程度的合作。在这 2 个算法中偏离合作的主网络均会受到纳什均衡价格的惩罚。然而这个惩罚并不是最严厉的。例如，当 $\nu \neq 0$ 时，如果主网络 j 采用价格 $p_j < \frac{C_i - A_i}{\nu}$ 对偏离合作的主网络 i 进行惩罚，那么后者只能获得传输收益 $\pi_i(p) < -\frac{(p_i - C_i)}{1 - \nu^2} \leq 0$ 。此时，主网络 i 将不得不停止频谱共享，以获得最低的传输效用 0。

如文献[14]所述，当贴现率一定时，为在博弈参与者之间形成合作的最有效方法是向偏离合作者施加一个最严厉的可信惩罚。其中，所谓的可信惩罚是使每个主网络都相信任何偏离合作的行为

均会受到该惩罚；而最严厉的惩罚则是指使偏离合作者获得尽可能低的未来传输收益的惩罚。基于该思路，提出了如下的合作形成算法。

算法 3 (两期策略)：在阶段 1，主网络 i 采用垄断价格 p_i^m 。如果 2 个主网络在阶段 t 的价格分别为 p_i^m 和 p_j^m ，那么主网络 i 在阶段 $t+1$ 内会保持价格不变；如果 2 个主网络在阶段 t 的价格分别为 x_i 和 x_j ，那么主网络 i 在阶段 $t+1$ 会改为垄断价格 p_i^m ；否则，它在阶段 $t+1$ 会采用惩罚价格 x_i ，使得主网络 j 仅获得低于纳什均衡的传输收益。

在算法 3 中，主网络之间会形成垄断和惩罚合作。前者要求所有主网络均统一采用垄断价格与认知网络进行频谱共享，而后者则要求所有主网络均采用惩罚价格来对偏离合作者进行惩罚。与算法 1 和算法 2 不同，算法 3 一方面采用了更为严厉的惩罚价格来对偏离合作的主网络进行惩罚，另一方面也对偏离合作的主网络回到合作状态进行奖励。在实际的频谱共享过程中，偏离合作垄断的主网络可能不会相信算法 3 所设计的惩罚价格会被真正的执行，而未偏离合作垄断的主网络有必要通过上述奖励来确保上述惩罚价格具备相当的可行性。因此，将算法 3 中的惩罚和奖励措施结合在一起就构成了所谓的最严厉可信惩罚^[12]。下面将推导出算法 3 中 x_i 和 x_j 的取值范围。

令 π_i^x 为主网络 i 和 j 分别采用价格 x_i 和 x_j 时主网络 i 的传输收益。根据式(6)可得

$$\pi_i^x = \frac{(x_i - C_i)(A_i - x_i + \nu x_j)}{(1 - \nu^2)\beta} \quad (14)$$

令 T_i^x 为主网络 i 和 j 采用价格 x_i 和 x_j 之后主网络 i 采用垄断价格 p_i^m 所获得的长期传输收益，即

$$T_i^x = \pi_i^x + \frac{\delta_i}{1 - \delta_i} \cdot \pi_i^m = \frac{(x_i - C_i)(A_i - x_i + \nu x_j)}{(1 - \nu^2)\beta} + \frac{\delta_i}{1 - \delta_i} \cdot \frac{[A_i + (\nu^2 - 1)C_i + \nu A_j](A_i - C_i + \nu C_j)}{4\beta(1 - \nu^2)^2} \quad (15)$$

当主网络 j 在第 t 阶段采用价格 x_j 时，主网络 i 为了最大化自身传输收益而设置的价格应满足：

$$\max_{p_i} \left\{ \pi_i(\{p_i, x_j\}) = \frac{(p_i - C_i)(A_i - p_i + \nu x_j)}{(1 - \nu^2)\beta} \right\}$$

通过对 $\pi_i(\{p_i, x_j\})$ 求 p_i 的偏导可得，主网络 i 为

最大化其利润所采用的价格应为 $p_i^{dp} = \frac{A_i + C_i + vx_j}{2}$ 。

给定价格 p_i^{dp} ，主网络 i 所获传输收益应为

$$\pi_i^{dp} = \frac{(A_i - C_i + vx_i)^2}{4(1-v^2)} \quad (16)$$

假定 2 个主网络 i 和 j 在阶段 $t-1$ 已采用价格 p_i^m 和 p_j^m 形成合作。为了在阶段 t 继续保持合作，主网络 i 应更倾向于在接下来阶段继续得到垄断传输收益 π_i^d ，而不是首先偏离垄断合作得到最大收益 π_i^d 再接受惩罚所获得的传输收益 T_i^x 。因此主网络 i 应满足

$$\frac{1}{1-\delta_i} \cdot \pi_i^m \geq \pi_i^d + \delta_i T_i^x \quad (17)$$

另一方面，在主网络 i 已偏离了与主网络 j 的合作垄断时，主网络 i 应更倾向于直接获得利润 T_i^x 以尽快重建之前的合作垄断，而不是先获得偏离合作时的传输收益 π_i^{dp} 再接受惩罚所获得的传输收益 T_i^x 。这意味着

$$T_i^x \geq \pi_i^{dp} + \delta_i T_i^x \quad (18)$$

将式(8)、式(9)和式(15)代入式(17)，并考虑主网络 i 和 j 之间的对称性，就可以得到 2 个不等式。同时将式(15)和式(16)代入式(18)，并考虑主网络 i 和 j 之间的对称性，就可以得到另外 2 个不等式。将上述 4 个不等式进行联立求解就可以得到算法 3 中 x_i 和 x_j 的取值范围。

5 多个主网络情况的扩展

第 3 和第 4 节均只考虑了 2 个主网络对单个次级网络所进行的频谱共享博弈。然而，在实际的应用场景中，可能会存在多个主网络对单个次级网络所进行的频谱共享竞争。因此，本节会将第 3 和第 4 节中所有结论的适用范围从仅有 2 个主网络推广到任意 N 个主网络。

5.1 N 个主网络的纳什均衡解

当图 1 所示的应用场景中有 N 个主网络时，这些网络所进行的非合作博弈问题可以被表述为

$$\pi_i^* = \frac{(p_i^* - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i^*)(v(N-2)+1) - v(p_i^* - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - p_j^*)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \quad (19)$$

而主网络 i 偏离合作的价格 p_i^{d*} 需要满足

$$\max_{p_i} U_i(p_i, p_{-i})$$

其中， $p_{-i} = \{p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_N\}$ 表示除主网络 i 以外的其他主网络的单位频谱价格。只需将所有 $\frac{\partial U_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = 0, \forall i \in [1, N]$ 进行联立求解，就可以

得到每个主网络 i 的纳什均衡价格 p_i^n 。

5.2 N 个主网络的合作形成机制

当图 1 所示的应用场景中有 N 个主网络时，这些网络所进行的垄断频谱共享问题可以被表述为

$$\max_{p_i} \left\{ \sum_{i=1}^N \pi_i(p) \right\}$$

通过对 $\frac{\partial \left[\sum_{i=1}^N \pi_i(p) \right]}{\partial p_i} = 0$ ，可以得到每个主网络

i 的合作垄断价格 p_i^m 。

在此情况下，为了最大化所有 N 个主网络的整体传输收益，必须建立一个惩罚机制来防止有主网络的偏离合作，因此将算法一推广到任意 N 个主网络可得到如下的表述。

算法 1' 在阶段 1，主网络 $i(1 \leq i \leq N)$ ，采用垄断价格 p_i^m 。如果 N 个主网络在阶段 t 的价格分别为 $p_1^m, p_2^m, \dots, p_N^m$ ，那么每个主网络在阶段 $t+1$ 会保持价格不变；否则，主网络 i 从阶段 $t+1$ 开始会改为纳什均衡价格 p_i^n ，并保持该价格不变。

5.3 N 个主网络的改进版触发策略

算法 2' 在阶段 1，主网络 $i(1 \leq i \leq N)$ ，采用合作价格 p_i^* (≥ 0)。如果 N 个主网络在阶段 t 的价格分别为 $p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*$ ，那么每个主网络在阶段 $t+1$ 会继续保持价格不变；否则，主网络 i 从阶段 $t+1$ 开始就改为纳什均衡价格 p_i^n ，并保持该价格不变。

下面将推导出 p_i^* 的取值范围。当主网络 $i(1 \leq i \leq N)$ ，采用合作价格 p_i^* 时，它的传输收益可以表示为

$$\max_{p_i} \{\pi_i(\{p_i, p_{-i}^*\}) = \frac{(p_i - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i)(v(N-2)+1) - v(p_i - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - p_j^*)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)}\}$$

其中, p_{-i}^* 表示所有主网络价格 $p_j^*(j \neq i, 1 \leq j \leq N)$ 的集合。此时的主网络 i 的传输收益为

$$\pi_i^{d^*} = \pi_i(\{p_i^{d^*}, p_{-i}^*\}) = \frac{(p_i^{d^*} - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i^{d^*})(v(N-2)+1) - v(p_i^{d^*} - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - p_j^*)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \quad (20)$$

在每个阶段的出价中, 每个主网络 i 需要确保

$$\frac{1}{1-\delta_i} \cdot \pi_i^* \geq \pi_i^{d^*} + \frac{\delta_i}{1-\delta_i} \cdot \pi_i^n$$

将式(19)和式(20)代入该不等式可求得 p_i^* 的取值范围。

5.4 N 个主网络的两期策略

算法 3' 在阶段 1, 主网络 i 采用垄断价格 p_i^m 。如果 N 个主网络在阶段 t 的价格分别为 $p_1^m, p_2^m, \dots, p_N^m$, 那么主网络 i 在阶段 $t+1$ 会继续保持价格不变; 如果 N 个主网络在阶段 t 的价格分别为 x_1, x_2, \dots, x_N , 那么主网络 i 在阶段 $t+1$ 会改为垄断价格 p_i^m ; 否则, 它在阶段 $t+1$ 会改为价格 x_i 。

下面将推导出 x_i 的取值范围。当主网络 $i(1 \leq i \leq N)$, 采用惩罚价格 x_i 时, 它的传输收益可以表示为

$$\pi_i^x = \frac{(x_i - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - x_i)(v(N-2)+1)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} - \frac{v(x_i - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - x_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \quad (21)$$

T_i^x 可以表示为

$$T_i^x = \pi_i^x + \frac{\delta_i}{1-\delta_i} \cdot \pi_i^m \quad (22)$$

而主网络 i 偏离合作的价格 p_i^{dp} 需要满足

$$\max_{p_i} \left\{ \pi_i(\{p_i, x_j\}) = \frac{(p_i - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i)(v(N-2)+1) - v(p_i - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - x_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \right\}$$

其中, x_j 表示所有 $x_j(j \neq i, 1 \leq j \leq N)$ 的价格集合。此时主网络 i 的传输收益为

$$\pi_i^{dp} = \frac{(p_i^{dp} - c_2 k_i^p)(\alpha k_i^s - p_i^{dp})(v(N-2)+1)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} - \frac{v(p_i^{dp} - c_2 k_i^p) \sum_{i \neq j} (\alpha k_j^s - x_j)}{(1-v)\beta(v(N-1)+1)} \quad (23)$$

在每个阶段的出价中, 每个主网络 i 需要确保:

$$\frac{1}{1-\delta_i} \cdot \pi_i^m \geq \pi_i^d + \delta_i T_i^x$$

$$T_i^x \geq \pi_i^{dp} + \delta_i T_i^x$$

将式(21)~式(23)代入这 2 个不等式可求得 x_i 的取值范围。

6 算法仿真

本仿真所考虑的认知无线通信系统包括 1 个次级网络和 2 个主网络 i 和 j 。在仿真中, 主网络 i 和

j 具备相同的参数配置、无线信道质量和贴现率。因此, $\delta_i = \delta_j = \delta$ 。

同时, 进一步假设:

$$1) \alpha = 1, \beta = 1, p_i^* = p_j^* = p^*, x_i = x_j = x,$$

$k_i^p = k_j^p = k^p = 1, c_1 = c_2 = 0.5$, 以及次级网络数据传输过程中的误码率 BER 为 10^{-4} ;

2) 在使用主网络提供的授权频谱时, 次级网络传输数据的无线信道质量为 $\gamma_i = \gamma_j = \gamma = 20$ dB。

$$\text{因此, } A = (1-v) \text{lb} \left(1 + \frac{1.5\gamma}{\ln(0.2/BER_S^{\text{tar}})} \right) = 0.9266,$$

$C = c_2 k^p = 0.5$ 和 $A - C + vC > 0$ 。此时, 2 个主网络具有相同的纳什均衡价格 $p^n = \frac{A+C}{2-v} = 1.0161$ 和相同的纳什均衡传输收益 $\pi^n = 0.4163$ 。同样, 2 个主网络具有相同的垄断价格 $p^m = \frac{A+C-vC}{2-2v} = 1.4033$ 和相同的垄断传输收益为 $\pi^m = 0.5509$ 。根据算法 1 的触发策略, 当且仅当贴现率满足 $\delta \in [0.5506, 1]$, 2 个主网络会通过合作获得垄断传输收益 π^m 。

图 2 描述了主网络 i 根据 3 种不同算法在不同的贴现率 δ_i 下所获得的最大传输收益。可以看出, 当 $\delta_i \in [0.5516, 1]$ 时, 3 个算法都能使主网络得到垄断利润 π^m ; 当 $\delta_i \in [0.3063, 0.556)$ 时, 算法 3 所获得的传输收益高于算法 2 的传输收益, 而后者又高于算法 1 所获得的传输收益; 在 $\delta_i \in [0, 0.3063)$ 时, 算法 2 能获得的传输收益要高于算法 1 和算法 3 的纳什均衡传输收益 π^n 。此外, 当 δ_i 越高时, 算法 2 更容易促使主网络之间形成合作。特别地, 当 $\delta_i = 0$ 时, 由于 2 个主网络都不再考虑其未来的传输收益, 因此 3 种算法都只能得到纳什均衡传输收益 π^n 。上述仿真结果的产生原因是, 算法 3 设计的最严厉可信惩罚能够尽可能地降低偏离合作主网络所能获得的未来传输收益, 因此较小的贴现率也能确保主网络之间的进行合作。同时, 算法 2 所形成的合作并不完美, 因此主网络获得的传输收益低于垄断合作的收益但高于纳什均衡的传输收益。

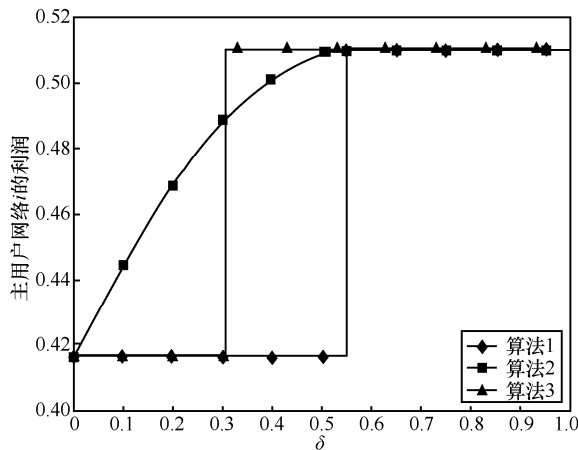
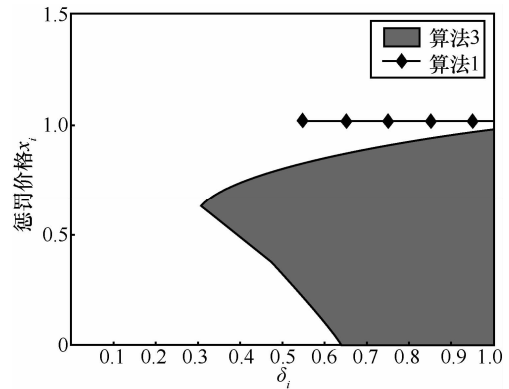


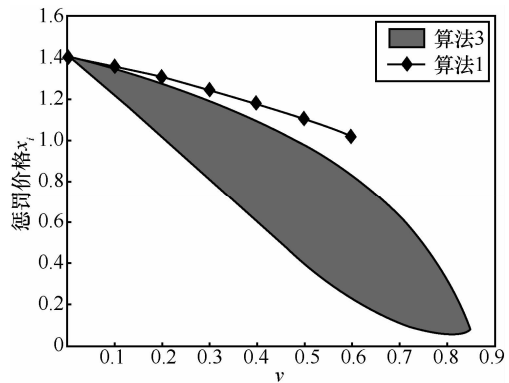
图 2 每个主网络在 3 种算法下所获得的最大传输收益

图 3 描述了惩罚价格 x_i 在不同的贴现率 δ_i 和频谱替代率 v 下的变化情况。可以看出, 当 $\delta_i \in [0.3063, 0.5506)$ 或者 $v \in [0.6, 0.8498)$ 时, 算法 3 能使得主网络获得高于算法 1 纳什均衡传输收益的垄断传输

收益 π^m 。这一效果是通过在算法 3 中设置低于纳什均衡价格 p^n 的惩罚价格 x_i 来实现的。另一方面, 当图 3(a)中 $\delta_i < 0.3063$ 或者图 3(b)中 $v > 0.8498$, 即使是算法 3 也不能获得垄断传输收益 π^m 。这表明, 即使是最严厉的可信惩罚也不能总是保证主网络之间能在对未来的传输收益不够重视时或者次级网络在不同主网络的授权频谱之间可以足够自由地进行切换等限制条件下形成合作垄断。



(a) 惩罚价格 x_i 与贴现率 δ_i 的关系



(b) 惩罚价格 x_i 与频谱替代率 v 之间的关系

图 3 在算法 1 和算法 3 中, 对主网络 i 的惩罚价格 x_i 的仿真

图 4 描述了在不同算法下主网络 i 的奖励和惩罚价格与频谱替代率 v 之间的关系, 其中, $x_i = x_j = x$

和 $p_i^{cp} = \frac{A_i + C_i + vx_i}{2}$ 只在 $0 < v < 0.8284$ 下存在。从图中可以看出:

$$p_i^n < p_i^d < p_i^m \text{ 和 } x_i < p_i^{cp} < p_i^n \leq p_i^{d*} \leq p_i^* < p_i^m$$

其中, $p_i^n \leq p_i^{d*} \leq p_i^* < p_i^m$ 的原因如下

$$p^n = \frac{A+C}{2-v} \leq p_i^* < \frac{A+C-vC}{2-2v} = p_i^m, \quad p_i^{d*} = \frac{A+C+vp^*}{2} \geq \frac{A+C+vp^n}{2} = p_i^n \text{ 和 } p_i^* - p_i^{d*} = \frac{2-v}{2}$$

$$\left(p^* - \frac{A+C}{2-v} \right) = \frac{2-v}{2} (p^* - p^n) \geq 0。$$

而 $p_i^n < p_i^d < p_i^m$ 的原因如下

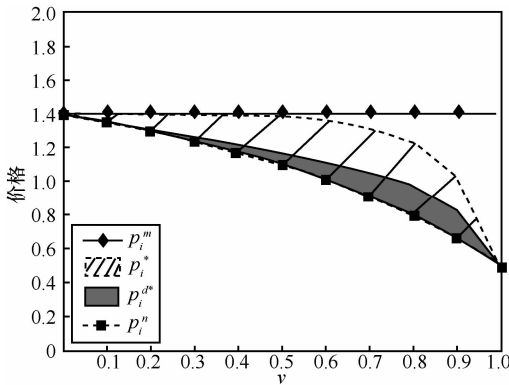
$$p^n = p_i^d - \frac{v^2(A-C+vC)}{4(1-v)(2-v)} < p_i^d \text{ 和}$$

$$p_i^d = p_i^m - \frac{v(A-C+vC)}{4-4v} < p_i^m。$$

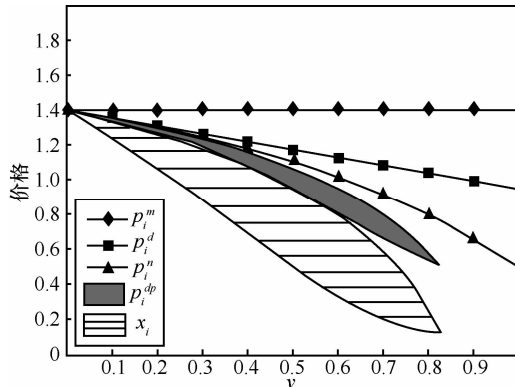
最后，因为 $x_i < p^n = \frac{A+C}{2-v}$ ，有

$$x_i < \frac{A+C+vx_i}{2} = \frac{A+C+vx_j}{2} =$$

$$p_i^{dp} < \frac{A+C+vp_j^n}{2} = \frac{A+C}{2-v} = p_i^n。$$



(a) $p_i^m, p_i^*, p_i^{dp}, p_i^d, p_i^n$ 和频谱替代率 v 之间的关系



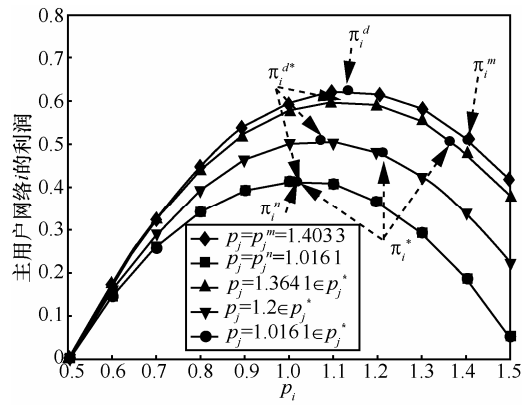
(b) $p_i^m, p_i^d, p_i^{dp}, p_i^n, x_i$ 和频谱替代率 v 之间的关系

图 4 当贴现率给定时，主网络 i 的各种价格与频谱替代率 v 之间的关系

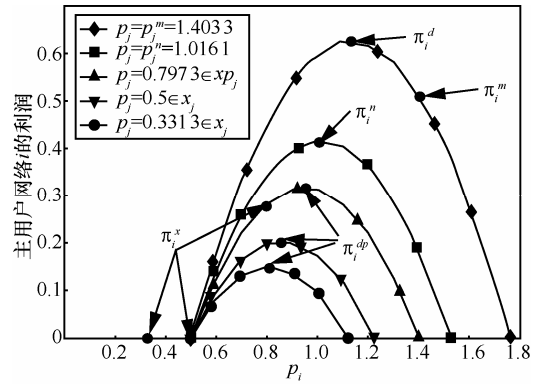
图 5 给出了在主网络 j 采用不同价格时，主网络 i 所获得的传输收益与其价格 p_i 之间的关系。当 p_i 从 0 开始增加时，主网络 i 的传输收益最初也会增高。然而当 p_i 到达某一点之后，由于次级网络频谱需求量的减少，主网络 i 所获得的传输收益也随之减少。从图中可以看出

$$\pi_i^x < \pi_i^{dp} < \pi_i^n < \pi_i^m < \pi_i^d \text{ 和 } \pi_i^n \leq \pi_i^* \leq \pi_i^{d*} < \pi_i^d。$$

特别地，当 $p_j = p^n = 1.0161 \in p^*$ 时，有 $\pi_i^* = \pi_i^{d*} = \pi_i^n$ 。当 $p_j \in p_j^*$ 越大，则 π_i^* 和 π_i^{d*} 也会相应增大；同时，当 $p_j \in x_j$ 越大，则 π_i^{dp} 也会相应增大。此外，当 $x_i = x_j$ 大于成本 $C(C=0.5)$ 时， x_j 越大则利润 π_i^x 越大；而当 $x_i = x_j < C=0.5$ 时， π_i^x 变为 0。这是因为主网络 j 对主网络 i 的惩罚太严厉而导致主网络 i 不再愿意共享它的频谱给次级网络。



(a) $p_m=1.4033, 1.3641$ 或 $1.2, p_n=1.1061$



(b) $p_m=1.4033, p_n=1.1061, 0.7973$ 或 0.5 或 0.3313

图 5 当主网络 j 采用不同的垄断价格 p_m 和纳什均衡价格 p_n 时，主网络 i 所获得的传输收益与它采用的频谱价格 p_i 之间的关系

图 6 给出了在算法 1 和算法 3 下 2 个主网络能形成合作的最小 δ_i 和 δ_j 值与主网络 j 的无线信道质量 γ_j 之间的关系。从图中可以看出，当 γ_j 增大时，算法 3 下的 δ_i 和 δ_j 首先减小然后增加。这是因为，当 $\gamma_j < 24.66$ dB 时， γ_j 越大会导致 $\pi_i^m - \pi_i^x$ 的增加速度大于 $\pi_i^{dp} - \pi_i^x$ ，从而导致 δ_i 变小；当 $\gamma_j > 24.66$ dB 时， γ_j 越大会导致 $\pi_i^d - \pi_i^m$ 的增加速度大于 $\pi_i^m - \pi_i^x$ ，从而导致 δ_i 变大。对于 δ_j 来说，当 $\gamma_j < 17.06$ dB 时，

γ_j 越大会导致 $\pi_j^m - \pi_j^x$ 的增加速度大于 $\pi_j^d - \pi_j^m$, 从而导致 δ_j 变小; 当 $\gamma_j > 17.06$ dB 时, γ_j 越大会导致 $\pi_j^{cp} - \pi_j^x$ 的增加速度大于 $\pi_j^m - \pi_j^x$, 从而导致 δ_j 变大。

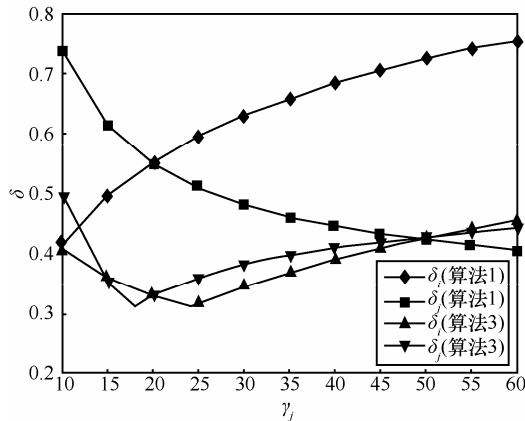


图 6 2 个主网络能形成合作的最小 δ_i 和 δ_j 值与主网络 j 的无线信道质量 γ_j 之间的关系

7 结束语

本文针对由多个主网络和单个次级网络所组成的无线通信系统的频谱共享机制进行了研究。通过为每个主网络设计 2 种新的频谱定价策略, 多个具备不同利益的主网络可以在向单个次级网络所进行的频谱共享过程中形成一定程度的合作垄断, 从而提升它们的长期整体传输效用。

其中第 1 种新策略是现有触发策略的改进版, 能使得主网络之间能形成更加灵活合作, 从而获得低于垄断传输收益, 但高于纳什均衡的传输收益。而第 2 种新策略对偏离合作的主网络采用比纳什均衡价格更严厉的惩罚, 同时提供奖励使偏离合作的主网络愿意回到合作垄断状态。针对这 2 种策略, 推导出了相应的合作价格范围, 并通过数值仿真验证了这 2 种策略相比现有触发策略的优越性。

参考文献:

[1] MITOLA J. Cognitive radio for flexible multimedia communications[A]. Proc MoMuC'99[C]. 1999.3-10.
 [2] LIN H, CHATTERJEE M, DAS S K, et al. ARC: an integrated admission and rate control framework for competitive wireless CDMA data networks using noncooperative games[J]. IEEE Trans Mobile Computing, 2005,4(3):243-258.

[3] KOSKIE S, GAJIC Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2005,13(5):1017-1026.
 [4] KONORSKI J. A game-theoretic study of CSMA/CA under a backoff-fattack[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2006,14(6): 1167-1178.
 [5] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad-hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3):589-600.
 [6] HUANG J, BERRY R, HONIG M. Auction-based spectrum sharing[J]. Mobil Networks and Applications, 2006, 11(3): 405-408.
 [7] NIE N, COMANICIU C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[A]. IEEE DySPAN'05[C]. 2005.269-278.
 [8] XING Y, MATHUR C N, HALEEM M A, et al. Real-time secondary spectrum sharing with QoS provisioning[A]. Proc IEEE CCNC'06[C]. 2006,1(1): 630-634.
 [9] XING Y, CHANDRAMOULI R, CORDEIRO C M. Price dynamics in a competitive agile secondary spectrum access market[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2007, 25(3): 613-621.
 [10] OSBORNE M J. An Introduction to Game Theory[M]. Oxford University Press, 2003.
 [11] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(7): 2651-2660.
 [12] TAN X J, LI L, GUO W. A game-theoretic approach for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks with incomplete information[J]. IEICE Trans Communications, 2012, 95(4):1117-1124
 [13] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of nash equilibrium, and collusion[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2008, 26(1): 192-202.
 [14] ABREU D. On the theory of infinitely repeated games with discounting[J]. Econometrica, 1988,56: 383-396.
 [15] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable rate variable power MQAM for fading channels[J]. IEEE Trans Commun, 1997,45(10): 1218-1230.

作者简介:



谭雪松 (1976-), 男, 四川成都人, 电子科技大学副教授, 主要研究方向为认知无线网络、交换理论、并行处理、光交换和存储等。

林超 (1987-), 男, 浙江温州人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络中的资源分配技术。

郭伟 (1964-), 男, 四川达州人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信网络技术和无线移动通信技术等。