



基于合约制的认知网络协作频谱共享模型

师光强,刘颖,穆晓敏

(郑州大学信息工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:为了提高认知无线网络中主用户的能效和谱效,提出了一种基于合约制的协作频谱共享新模型。在该模型中,当主用户信道质量差时,次用户为其提供中继服务;作为回报,在主用户信道质量好时,次用户可以在一定的干扰约束下以 underlay 的模式和主用户共享频谱。在此框架下引入经济学中的合约理论,将主次用户间的协作问题建模为合约设计问题,并建立了主次用户评价合约收益的效用函数,将提高主用户的能效和谱效问题转变为设计合约使主用户获得最大效用的优化问题,并利用差分进化算法对该问题求解。最后,在不同的环境下,将主用户协作与不协作获得的效用进行对比,结果表明,主用户在没有额外投入频谱资源的条件下,不仅节省了发送功率,而且有效地提高了数据传输速率,进而提高了能效和谱效。

关键词:协作频谱共享;合约理论;优化问题;差分进化算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016143

A contract-based cooperative spectrum sharing model in cognitive radio network

SHI Guangqiang, LIU Ying, MU Xiaomin

School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: A contract-based cooperative spectrum sharing model in cognitive radio network was proposed. In this model, secondary user offers relay service for primary user when primary user's channel is poor. In return, when primary user's channel is good, secondary user can use spectrum with the underlay mode under the condition that the interference is limited. Contract theory in economics was introduced to this framework, the problem of collaboration between the primary and secondary users was modeled as a contract design problem, and the effectiveness function of evaluate primary and secondary users on contract revenue was set up. And the differential evolution algorithm was used to solve the problem. Finally, in different circumstances, primary user collaboration and un-collaboration were contrasted. The results showed that the main users under the condition of no additional input spectrum, not only save the sending power, but also effectively improve the data transfer rate, and improve the energy efficiency and spectrum efficiency.

Key words: cooperative spectrum sharing, contract theory, optimization problem, differential evolution algorithm

收稿日期:2015-07-27;修回日期:2016-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61271421);浙江省教育厅科学基金资助项目(No.112102210507)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271421), Education Department Foundation of Zhejiang Province (No. 112102210507)



1 引言

随着无线网络和服务的爆炸式增长,频谱资源稀缺成为了亟待解决的问题。研究表明,频谱的固定分配制度导致资源利用率低下,较低的频谱资源利用率和有限的可用频谱间的矛盾催生了认知无线电这一新的通信技术。动态的频谱共享机制是认知无线电中的关键技术,由于允许非授权用户 SU (secondary user, 次用户) 通过各种动态接入方式 (underlay (共存)、inter-wave、overlay (覆盖)、协作) 与授权用户 PU (primary user, 主用户) 共享频谱资源,因此动态的频谱共享可以有效提高频谱利用率^[1,2]。在基于认知的协作通信中,主用户释放空闲频谱换取次用户的中继服务,交易的资源是频谱和功率,双方均获得收益是成功交易的前提,收益可以通过构建各自的效用函数来评估,参考文献[3]将这种交易建模为具有激励机制的市场驱动模型。

在基于资源交易的协作频谱共享模型中,SU 为 PU 提供中继服务并获得 PU 释放的频谱资源,PU 在获得链路可靠通信的同时也节省了发射功率^[4,5]。因此可知基于资源交易的协作通信机制,PU 的谱效和能效得到有效提升。协作频谱共享可分为 underlay 和 overlay 两种方式^[6,7]。已有的协作频谱共享研究大多集中在主次用户以 overlay 的方式共享频谱^[8-10],次用户为主用户提供中继服务并获得一定时隙的频谱资源。在其所获得的时隙内,主用户不能使用频带。在共存的共享方式下,只要次用户对主用户的干扰低于主用户可容忍的干扰限制,次用户就可与主用户同时共享授权频带^[11,12]。考虑到主用户的信道质量具有时间维度上的随机性,当其信道质量差时,次用户为其提供中继服务;当其信道良好时,在不采用中继转发的情况下亦可满

足其传输需求。在一定干扰约束下,可以令 SU 以 underlay 的模式共享频谱,以此取代对次用户提供中继服务的专有时隙奖励,可节省更多的频谱资源。

本文提出了一种新的协作频谱共享模型,在该模型中,次用户在主用户信道质量差时为其提供中继服务,作为酬劳,在主用户信道良好时,次用户可以以 underlay 的方式与其共享频谱资源,并利用合约理论将其建模为合约设计问题。通过定义评价合约收益的效用函数,得到了主用户效用最大化的优化问题,并利用差分进化算法求解。最后,仿真结果表明,主用户的能效和谱效均得到了提升。

2 基于合约的协作频谱共享模型

2.1 协作频谱共享网络

协作频谱共享的网络模型如图 1 所示。该模型包含 1 个主用户和 1 个次用户通信链路,每条通信链路有一对收发天线,分别记 PU 和 SU 发射—接收天线对为 (PT, PR) 和 (ST, SR)。PU 拥有频带的使用权,PT 和 PR 之间的信道质量服从瑞利分布。当主用户信道质量低于一定阈值时,次用户为主用户链路提供中继服务,保证主用户链路的可靠通信;作为中继转发的奖励,当主用户信道质量高于阈值时,主用户允许次用户以 underlay 的方式接入信道,条件是满足一定的干扰约束。PU 和 SU 之间的协作频谱共享分为协作和频谱共享两个阶段,如图 1 所示。

协作中继阶段 1,主用户发射端以功率 P_0 发送数据至对应的接收端和次用户发射端。协作中继阶段 2,次用户发射端将阶段 1 收到主用户数据进行解码转发给主用户接收端。频谱共享阶段,SU 在一定的干扰约束下以 underlay 的方式与 PU 共享信道。

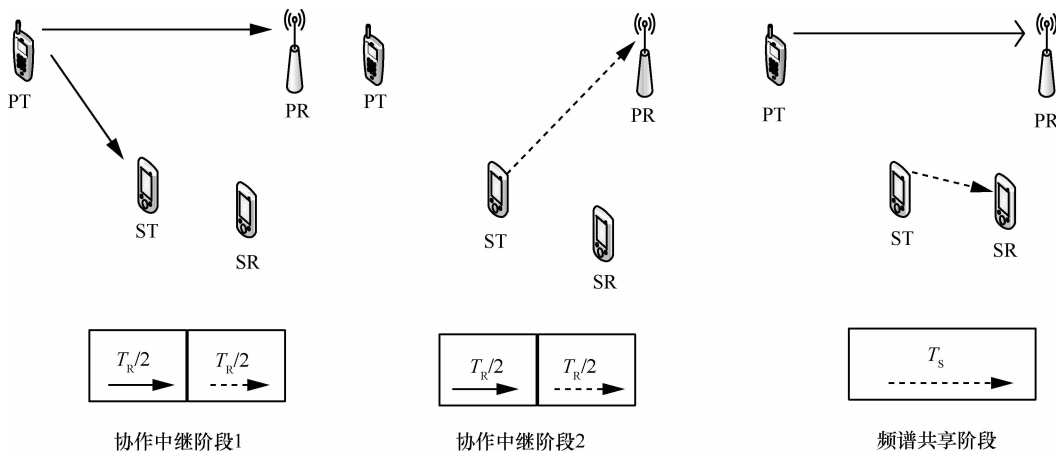


图 1 协作频谱共享系统模型

在上述协作频谱共享过程中,假设参与协作的 SU 对协作中继阶段 1 收到的数据可以成功解码,因此在研究中继转发时仅需考虑 SU 发射端到 PU 接收端的中继链路。

2.2 合约理论的引入

在上述协作频谱共享的机制中,PU 和 SU 存在资源的交换。影响交易双方收益的要素有中继功率、中继服务的信道增益阈值和次用户在频谱共享阶段对主用户的干扰约束。加大中继功率,PU 的数据传输速率增加,但 SU 的能耗也增加,会影响其自身的收益;降低中继服务的信道增益阈值,则意味提供中继服务的概率增加,频谱共享的概率降低,即 SU 提供中继服务的时长增加,而频谱接入时间减少,SU 的能耗增加并且数据传输量减少;增大频谱共享阶段的干扰约束,则 PU 在频谱共享阶段受到更多的干扰,传输速率下降,SU 则可以以更大的传输速度发送自身的数据。因此,主次用户之间存在矛盾。协作双方若要在资源交换中达到各自的效用最大化,取决于是否存在有效的激励机制吸引双方积极和主动的协作。为分析该协作机制的协作收益,引入经济学中的合约理论,将 PU 和 SU 希望从资源交换中获得各自效用最大化的问题转换为 PU 最优合约的设计问题。上述过程中 SU 是被动地选择最优合约,因此最优合约设计问题就成为 PU 如何设计合约让自己获得最大效用的问题。

3 协作频谱共享的合约问题

3.1 主用户效用函数

假设 PT 和 PR 之间的信道质量服从参数为 σ 的瑞利分布,当信道的增益低于 h^* 时,SU 需要为 PU 提供中继服务,此时 SU 可以与 PU 共享频谱,SU 提供中继服务的概率为 pr ,则 SU 与 PU 共享频谱概率为 $1-pr$,其中 pr 为:

$$pr = \int_0^{h^*} \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1)$$

在协作中继阶段 1,PU 发送数据至自身的接收端和次用户的发射端,PU 的数据传输速率的期望可以表达为:

$$R_1 = \int_0^{h^*} \lg \left(1 + \frac{P_0 x}{n_0} \right) \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx / pr \quad (2)$$

其中, P_0 为主用户的发射功率, n_0 为主用户接收端的噪声功率。

在协作中继阶段 2,次用户为主用户提供中继服务,此时 PU 的数据传输速率为:

$$R_2 = \lg \left(1 + \frac{P}{n_0} \right) \quad (3)$$

其中, P 为主用户接收端收到次用户转发信号的功率。

根据参考文献[9],PU 在协作阶段获得的期望数据传输速率为:

$$R_{1,2} = \frac{1}{2} (R_1 + R_2) \quad (4)$$

在频谱共享阶段,PU 在 SU 的干扰下发送数据,PU 的期望数据传输速率为 R_3 :

$$R_3 = \int_{h^*}^{\infty} \lg \left(1 + \frac{P_0 x}{n_0 + \alpha P} \right) \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx / (1 - pr) \quad (5)$$

其中, α 为在频谱共享阶段,主用户允许次用户对其产生的干扰功率与主用户接收端收到次用户转发信号功率的比值。

综上所述,主用户整体的平均数据传输速率的期望为:

$$R_E = R_{1,2} \cdot pr + R_3 (1 - pr) \quad (6)$$

定义主用户整体的数据传输速率期望为 PU 的效用函数 U_P ,即:

$$U_P = R_E \quad (7)$$

3.2 次用户效用函数

在协作频谱共享过程中,SU 消耗能量换取频谱资源发送自身的数据。次用户在频谱共享阶段以主用户允许的最大功率发送信息,则在整个过程中发送自身数据的传输速率期望 R_S 为:

$$R_S = (1 - pr) \lg \left(1 + \frac{\alpha h_2 P / h_1}{n_1 + P_0 h_3} \right) \quad (8)$$

其中, h_1 为次用户发射端到主用户接收端的信道增益, h_2 为次用户发射端到自身接收端的信道增益, h_3 为主用户发射端到次用户接收端的信道增益, n_1 是次用户接收端的噪声功率。

在整个过程中,SU 的消耗的总功率期望为:

$$\hat{P}_S = P / (2h_1) \cdot pr + (1 - pr) \alpha P / h_1 \quad (9)$$

其中, $P / (2h_1)$ 表示在协作阶段 SU 的平均功率, $\alpha P / h_1$ 表示次用户发送自身数据的传输功率。

定义次用户发送自身数据的传输速率期望 R_S 减去消耗的代价为次用户的效用函数 U_S 表达式为:

$$U_S = R_S - C \hat{P}_S \quad (10)$$

其中, C 表示次用户消耗单位能量的代价,通常由电池的能量转化效率决定。



3.3 优化问题

最优合约设计问题为 PU 设计合约令自身获得最大效用的问题,主用户在追求最大效用的同时,需考虑次用户的个人理性约束,即次用户存在激励与主用户协作。

个人理性约束是指次用户仅在自身获得非负效用的条件下与主用户进行协作频谱共享。即满足:

$$U_s = R_s - C\hat{P}_s \geq 0 \quad (11)$$

因此,优化问题可以写为:

$$\begin{aligned} & \max U_P(h^*, P) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} U_s(h^*, P, \alpha) \geq 0 \\ P \geq 0 \\ h^* \geq 0 \\ \alpha \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)是一个非凸问题,为了得到该问题的解,采用经典的差分进化算法进行求解,算法的具体步骤^[13]如下。

步骤 1 随机产生初始种群。

步骤 2 对初始种群进行评价,即计算初始种群中每个个体的目标函数值。

步骤 3 判断是否达到终止条件或进化代数达到最大。若是,则进化终止,将此时的最佳个体作为解输出。若否,则继续。

步骤 4 进行变异和交叉操作,对边界条件进行处理,得到临时种群。

步骤 5 对临时种群进行评价,计算每个个体的目标函数值。

步骤 6 进行选择操作,得到新种群。

步骤 7 进化代数 $k=k+1$,转步骤 3。

4 仿真结果及分析

为了验证本文提出协作频谱共享模型和建立的合约优化问题的有效性,基于 MATLAB 平台对上述研究做了数值仿真实验,其中采用差分进化算法求解式(12)。仿真的主要参数设置如下^[9,10]: $h_1=2, h_2=5, h_3=0.5, n_0=1, n_1=1, P_0=10, C=0.03$ 。

由 PU 的效用函数可以看出,随着次用户的发射端到主用户接收端的信道质量的变化,PU 获得的效用受到影响,图 2 具体分析了 h_1 对 U_P 的影响。由图 2 可以看出,PU 通过协作可以获得更高的效用,且随着 h_1 的增

大,主用户获得的效用增大。原因是在其他参数和合约不变的情况下,增大 h_1 ,SU 获得的效用不变,主用户在中继协作阶段 2 可以获得更大的数据传输速度,因而 PU 的效用增加。

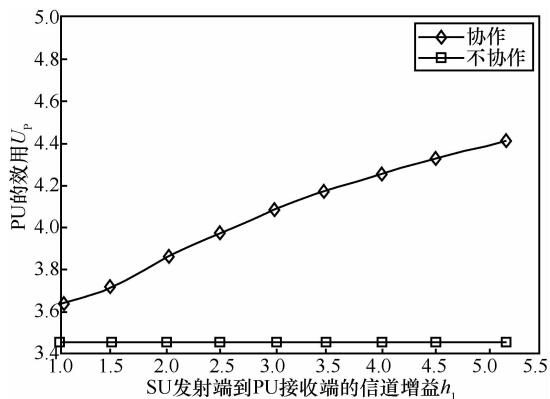


图 2 SU 发射端到 PU 接收端的信道增益对 PU 效用的影响

图 3 分析了次用户发射端到自身接收端的信道增益对 PU 获得效用的影响。由图 3 可以看出,随着 h_2 的增大,主用户获得的效用增大,这是因为在其他参数和合约不变的情况下,增大 h_2 的会导致 SU 获得的效用增加,因此主用户可以令次用户以更高的中继功率转发数据并且降低干扰约束,进而提高自身的效用。

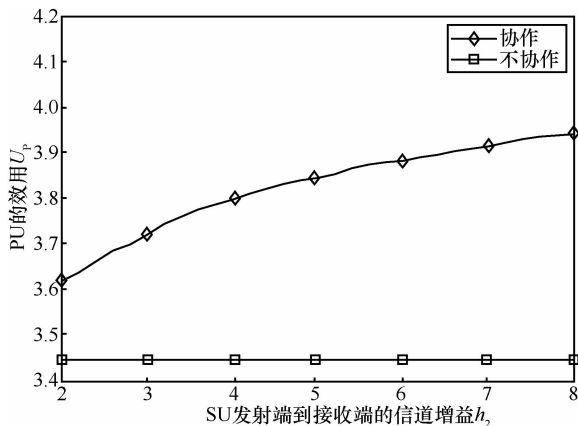


图 3 SU 发射端到自身接收端的信道增益对 PU 效用的影响

图 4 分析了主用户发射端到次用户接收端的信道增益对 PU 获得效用的影响。由图 4 可以看出,随着 h_3 的增大,主用户的效用减少,原因是在其他参数和合约不变的情况下,增大 h_3 ,PU 对 SU 的干扰增大,SU 的数据传输速度降低,从而导致 PU 降低中继功率或者提高次用户的干扰上限以获得 SU 的中继服务,进而效用降低。

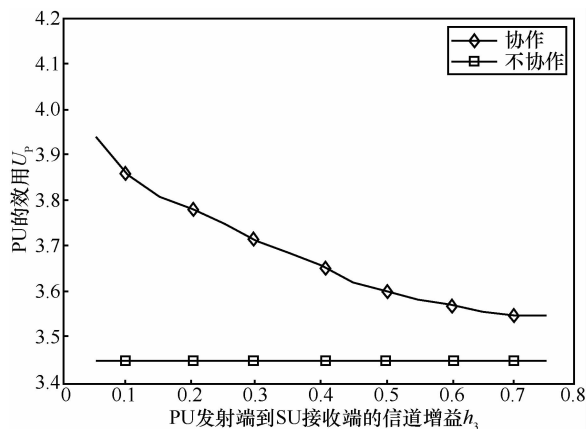


图4 PU发射端到SU接收端的信道增益对PU效用的影响

为了探讨次用户消耗单位能量的代价 C 对PU获得效用的影响,图5研究了次用户的单位能量代价由低到高变化时,PU获得的效用。由图5可以看出,当 C 较小时,PU可以获得较大的效用,随着次用户的消耗单位能量的代价 C 增大,PU的效用降低,其根本原因是,增大 C 意味着在SU能量消耗不变的情况下,需要付出更大的代价,因此次用户会使用更低的中继功率或者以更大的功率发送自身的数据,这必会引起PU的效用降低。

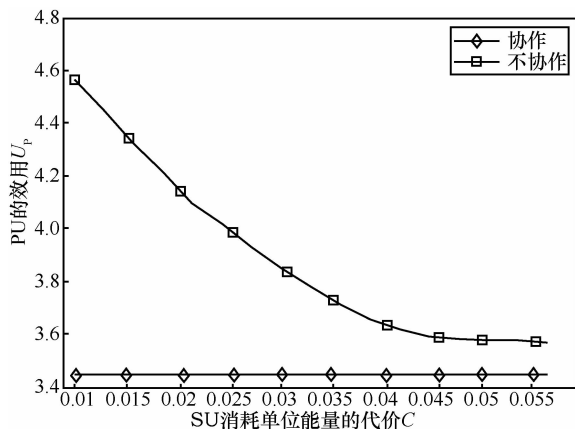


图5 SU消耗单位能量的代价 C 对PU效用的影响

由以上仿真结果可知,PU在没有额外投入频谱资源的条件下,与SU进行协作获得了更多的效用,即提高了平均传输速率,由于PU在协作中继阶段2无需发送信号,节省了功率,因此PU提高了能效和谱效。

5 结束语

本文提出了一种基于合约的认知无线电协作频谱共享模型。模型中主、次用户缔结合约,合约规定次用户在主用户

信道质量较差时为主用户提供中继服务,保证主用户的通信链路正常运行,作为奖励,当主用户信道质量好时,允许次用户以 underlay 的方式共享信道。引入合约理论建模分析并评价了合约带给双方的效用,建立了主用户获得最大效用的优化问题。数值仿真结果表明,通过建立该模型,主用户不仅节省了发送功率,而且有效地提高了传输速率,进而提高了能效和谱效。另外,当模型中存在多个次用户,主用户需要对参与协作的次用户个数以及对象进行选择。因此,主用户和多个次用户的协作频谱共享问题有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHAO Q. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [2] STIAKOIANNAKIS I, PALKOPOULOU E, KLONIDIS D, et al. Dynamic cooperative spectrum sharing and defragmentation for elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(3): 259-269.
- [3] NIYATO D. Dynamics of multiple-seller and multiple-buyer spectrum trading in cognitive radio networks: a game-theoretic modeling approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1009-1022.
- [4] Han Y, PANDHARIPANDE A, TING S H. Cooperative spectrum sharing via controlled amplify and forward relaying[C]// 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 15-18, 2008. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [5] ZHANG J, ZHANG Q. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks[C]// International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, May 18-21, 2009, New Orleans, Louisiana, USA. New Jersey: IEEE Press, 2009: 23-32.
- [6] 赵楠, 武明虎, 周先军, 等. 基于频谱合约的协作频谱共享方法[J]. 计算机应用, 2015, 35: 1805-1808.
ZHAO N, WU MH, ZHOU X J, et al. Collaborative spectrum sharing method based on spectrum contracts [J]. Computer Application, 2015, 35: 1805-1808.
- [7] 刘丹丹. 高能效频谱共享协作通信机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
LIU D D. Efficient spectrum sharing collaborative communication mechanism research [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [8] BOLTON P, DEWATRIPONT M. Contract theory [M]. Cambridge: MIT Press, 2005.



- [9] DUAN L, GAO L, HUANG J. Cooperative spectrum sharing: a contract-based approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(1): 177-187.
- [10] FENG X, SUN G, GAN X, et al. Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks: a distributed matching approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62 (8): 2651-2664.
- [11] 余阳. 认知无线网络协作频谱共享策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
YU Y. Cognitive radio network collaborative spectrum sharing strategy research [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [12] 王英伟. 感知无线电中基于协作的频谱共享技术研究[D]. 北京邮电大学, 2010.
WANG Y W. Sharing technology in cognitive radio spectrum based on the collaborative research [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [13] 周艳平, 顾幸生. 差分进化算法研究进展[J]. 化工自动化及仪表, 2007(3): 1-6.
ZHOU Y P, GU X S. Research progress of differential evolution algorithm[J]. Chemical Industry Automation and Instrumentation, 2007(3): 1-6.

[作者简介]



师光强(1990-), 男, 郑州大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为认知无线电频谱接入。



刘颖(1991-), 女, 郑州大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为认知无线电频谱接入。



穆晓敏(1955-), 女, 郑州大学信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为多天线无线通信系统、认知无线电、通信信号处理、图像信号处理等。