

# 基于价格的认知网络频谱共享博弈论模型

黄德文,周井泉

(南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210003)

**摘要:**随着各种无线移动终端和各种无线电新应用业务得到飞速发展,人们对无线频谱的使用更加频繁,对无线频谱资源的需求日益增加,从而使无线频谱成为一种稀缺资源。频谱的稀缺会成为制约无线通信行业发展的瓶颈。为了更加有效地利用频谱资源,文中利用经典的经济学中的古诺博弈模型来分析认知网络中的频谱分配问题,考虑主要(授权)用户频谱供给量对频谱价格的影响,对原有价格函数进行改进,体现主要用户对频谱价格的影响,构建新的频谱分配模型,并提出新的效用函数,来更好地分析认知无线网络中频谱分配问题,证明纳什均衡的存在性,有效提高频谱利用率。仿真结果表明,该算法更加贴近实际网络,更好地反应了主要用户的竞价意愿,达到了一定的实际应用能力。

**关键词:**认知无线电;博弈论;频谱共享;纳什均衡

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2013)08-0066-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.017

## Cognitive Network Spectrum Sharing Game Theory Model Based on Price

HUANG De-wen, ZHOU Jing-quan

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications,  
Nanjing 210003, China)

**Abstract:** As the wireless mobile terminal and new radio application business has been rapid development, people use the radio spectrum more frequently and the wireless spectrum resource demand is increasing, so that the wireless spectrum becomes a scarce resource, which will become the bottleneck of the development of wireless communication. In order to use spectrum resources more efficiently, use the classical economics of Cournot game model to analyze the spectrum allocation in cognitive radio networks, considering the influence of main (authorized) user spectrum supply to the price of spectrum's, the original price function was improved, reflecting main users' influence to the price of spectrum. Constructed a new spectrum allocation model, proposing a new utility function, to better analyse cognitive radio spectrum allocation, and demonstrate the existence of the Nash Equilibrium, effectively improving the spectrum utilization rate. The simulation results show that, this algorithm is more close to the actual network, better reflecting the main users of the bidding intention, have some practical application ability.

**Key words:** cognitive radio; game theory; spectrum allocation; Nash Equilibrium (NE)

## 0 引言

频谱是无线通信中的稀缺资源。传统的频谱分配方式是静态的分配频谱,频谱长期处于一种利用率很低的状态。近年来随着无线通信业务的飞速发展,导致了无线频谱变得非常紧张。为了提高对稀缺无线频谱资源的利用率,在下一代网络中,提出了动态频谱共享机制。在认知网络中,认知用户(非授权用户)可以在主要用户(授权用户)许可的情况下,通过对频谱使

用情况进行感知,在不对主要用户造成干扰的情况下,动态地使用主要用户没有使用的空闲频谱,从而最大限度地提高频谱利用率<sup>[1]</sup>。

利用博弈理论分析认知无线电中的动态频谱分配,如文献[2]提出的能够限制参与者行为的拍卖竞价模型,文献[3]提出的多个主系统间频谱价格博弈伯川德模型,以及动态博弈的斯坦克尔伯格博弈模型等,这些大都是构建特殊的博弈模型来解决频谱分配。

收稿日期:2012-11-05

修回日期:2013-02-24

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2009AA01Z202)

作者简介:黄德文(1986-),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为认知无线电;周井泉,教授,博士研究生,研究方向为通信网络流量分配、路由选择、认知无线电。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1727.057.html>

文中在静态古诺博弈模型<sup>[4]</sup>基础上,考虑了区域内主要用户频谱提供量和认知用户频谱需求量的差异以及信道容量状况,引入了基站对频谱进行分配,改进了效用函数。

## 1 无线频谱共享的系统模型

### 1.1 频谱共享系统及基站频谱分配方法

在一个很小的区域内,有  $N$  个主要用户和  $M$  个认知用户来进行博弈,它们是随即分布的。其中基站是一个非营利的机构,如图 1,该区域中,频谱带对每个用户都是可用的。主要用户决定要出租的带宽大小,认知用户决定要购买的带宽大小。基站收集这些信息,经过处理分析后再将这些供需信息反馈给认知用户。这就是一个个体间的非合作的博弈系统,竞争产生于各个个体之间<sup>[5]</sup>。

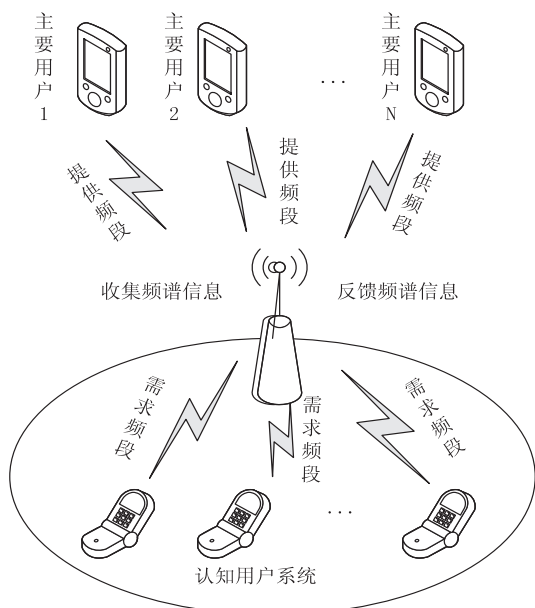


图1 认知网络频谱共享模型

主要用户  $p_i$  有一个投标带宽  $b_i \in (0, \bar{b}_i]$ , 其中  $b_i$  代表主要用户想出租的最大带宽,  $\bar{b}_i$  代表总的带宽量。认知用户  $S_j$  是由发射端和接收端组成, 有一个竞标带宽  $B_j \in (0, \bar{B}_j]$ ,  $B_j$  代表认知用户的带宽要求,  $\bar{B}_j$  代表总竞标带宽量。由于认知用户能够使用频分多址的方式完全利用带宽, 它可以在任何功率水平下进行通讯而不干扰其他用户。

假设每单位带宽在时域和频域的频谱价格以及分配方法每个用户都是知道的。开始时, 基站以广播的形式发送一个初始价格  $p$ , 来收集主要用户的供给量  $\{b_i\}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 和认知用户需求量  $\{B_j\}$  ( $j = 1, \dots, M$ )。

### 1.2 无线系统传输模型

在基于自适应调整和编码的无线传输系统中, 传

输速率可以根据信道的质量而做动态调整。对于 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), 具有单输入单输出的高斯信道的比特错误率 BER 可以通过如下公式近似地表示为<sup>[6]</sup>:

$$\text{BER} \approx 0.2 \exp \left( \frac{-1.5\gamma}{2^k - 1} \right) \quad (1)$$

其中  $\gamma$  是接收端的信噪比 SNR,  $k$  为该调整方式下的频谱效率(利用率), 且  $k$  非负。在保证传输质量的前提下, 若采用 QAM 调制方式, 认知用户  $i$  的频谱效率可以表示为:

$$k_i = \log_2(1 + K\gamma_i) \quad (2)$$

其中  $K = \frac{1.5}{\ln(0.2/\text{BER}_i^{\text{tar}})}$ , 表示用户  $i$  的目标比特错误概率 (BER)。因此认知用户  $S_j$  的香浓容量为  $B_j k_j$ 。

## 2 频谱分配模型

### 2.1 古诺博弈模型

文中主要研究认知用户间的博弈, 古诺博弈更适用于认知用户之间的频谱分配过程<sup>[7]</sup>。主系统出租频谱的价格函数定义为:

$$p(B) = a + c \left( \sum_{j=1}^M B_j \right)^\tau \quad (3)$$

式(3)中  $a, c$  是非零的常数,  $\tau \geq 1$  确保  $p$  是凸函数;  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$  代表认知用户策略集。为了确保主要用户愿意出租自己的空闲频谱, 必须确保  $p$  是非零的正数。为了方便讨论, 假设主要用户向认知用户出售的频谱价格是一样的。

认知用户的收益主要由两部分组成: 一部分是使用的主要用户空闲频谱传输数据所获得收益  $r_j * k_j * B_j$ ; 共享主要用户空闲频谱的成本花费  $p B_j$ 。所以认知用户  $j$  的效用函数可以表示为:

$$U_{S_j}(B) = r_j * k_j * B_j - p B_j \quad (4)$$

将式(2)和(3)代入式(4)可以得到:

$$U_{S_j}(B) = r_j * k_j * B_j - B_j * \left( a + c \left( \sum_{j=1}^M B_j \right)^\tau \right) \quad (5)$$

### 2.2 模型改进

在 2.1 节频谱价格函数中, 价格函数只是反应了认知用户的频谱需求量<sup>[8]</sup>, 并没有考虑主要用户的频谱供给量, 虽然是主要用户定价, 但并没有体现主要用户的任何信息, 为了反应主要用户的频谱供给量对频谱价格的影响, 能够更加准确地反应频谱价格, 文中在此基础上进行改进, 对价格函数的改进如下:

$$p(b, B) = a - c_1 * \left( \sum_{i=1}^N b_i \right)^\tau + c_2 * \left( \sum_{j=1}^M B_j \right)^\tau \quad (6)$$

(6) 式中  $c_1$  和  $c_2$  是非零的常数且  $0 \leq c_1 \leq 1, 0 \leq c_2 \leq 1$ , 根据网络环境的不同取不同的值, 分别代表主

要用户和认知用户对频谱价格的权重。 $\sum_{i=1}^N b_i$  和  $\sum_{j=1}^M B_j$  分别代表授权频段的供应和需求。为了保证主要用户的积极性,价格函数必须满足:

$$p(b, B) > 0 \quad (7)$$

容易证明价格函数  $p(b, B)$  是关于  $N$  的单调递减函数,关于  $M$  的单调递增函数。当主要用户的频谱供给量大于认知用户的需求量时,主要用户为了追求自己的效用最大化,必然降低频谱价格来吸引更多的认知用户;相反,为了保证自己的 QoS,必然要提高共享频谱价格。将(6)式带入(5)式得改进的效用函数为:

$$U_{S_j}(B) = r_j * k_j * B_j - B_j * (a - c_1 * (\sum_{i=1}^N b_i)^\tau + c_2 * (\sum_{j=1}^M B_j)^\tau) \quad (8)$$

### 3 效用函数纳什均衡分析及求解

#### 3.1 纳什均衡的定义和最佳响应函数

定义 1: 博弈论模型为:  $G = \{M, \{U_{S_j}(\bullet)\}\}$ , 策略集合  $B = (B_1, \dots, B_M)$ , 该模型存在纳什均衡的条件: 对于每一个用户  $k$ , 都有  $U_{S_k}(B_k, B_{-k}) \geq U_{S_k}(B_k', B_{-k})$ ,  $B_k' \in B$ 。

当达到纳什均衡后, 每个用户最终不会增加其效用而做出任何改变<sup>[9,10]</sup>, 因为任何一个用户  $k$  在给定其他用户策略集合  $B_{-k}$  的情况下其效用已经达到了最佳。由固定点理论可以得出满足纳什均衡存在条件是:

a. 认知用户集合是有限的。

b. 策略空间  $B_k$  是非空的, 凸的, 是欧几里德空间  $R^N$  的紧子集。

c. 每一个效用函数  $U_{S_j}(B)$  在其策略集中是连续的和拟凹的。

由以上很容易得出认知用户的集合是有限的, 策略空间  $(0, \bar{B}_j]$  是非空的, 有界的凸集, 在  $B$  上连续的。显然满足条件 a 和 b; 对效用函数二次求导, 令  $T_b =$

$$\sum_{i=1}^N b_i, T_B = \sum_{j=1}^M B_j, \text{ 则}$$

$$\frac{\partial U_{S_j}(B)}{\partial^2 B_j} = -2c_2\tau T_B^{\tau-1} - c_2\tau(\tau-1)T_B^{\tau-2} \quad (9)$$

当  $\tau \geq 1$  时, 有  $\frac{\partial U_{S_j}(B)}{\partial^2 B_j} < 0$ , 故满足条件 c, 纳什均衡是存在的。

#### 3.2 纳什均衡的求解

文中利用反应函数法求解纳什均衡<sup>[11]</sup>, 认知用户根据其他用户的选择策略, 综合地选择自己的最佳策略。 $B_{-j} = \{B_j \mid j = 1, \dots, M, j \neq i\}$  表示除了认知用户  $j$

外其他所有策略集合 ( $B = B_{-j} \cup \{B_j\}$ ), 认知用户  $j$  的最佳反应函数为:

$$BR_j(B_{-j}) = \arg \max_{B_j} (B_j \cup \{B_{-j}\}) \quad (10)$$

若  $B^* = \{B_1^*, \dots, B_M^*\}$  表示认知用户博弈的纳什均衡时的解, 那么第  $j$  个认知用户的纳什均衡解为

$$B_j^* = BR_j(B_{-j}^*) \quad (11)$$

为了求出纳什均衡解, 令  $\frac{\partial U_{S_j}}{\partial B_j} = 0$ , 求解该方程组

就可以得到认知用户  $j$  的最佳响应解。

$$\frac{\partial U_{S_j}(B)}{\partial B_j} = r_j k_j - p(B(b, B)) - c_2 \tau B_j T_B^{\tau-1} \quad (12)$$

对于用户  $j$  很容易获得当给定用户  $k$  的策略  $k \neq j$ ,  $B_{-k} = \{B_k \mid k = 1, \dots, M, k \neq j\}$  后, 认知用户  $S_j$  的最佳响应函数为:

$$B_j^* = \min \left\{ \frac{r_j k_j - a + c_1 * T_b^\tau - c_2 * T_B^\tau}{c_2 \tau T_B^{\tau-1}}, \bar{B}_j \right\} \quad (13)$$

同样的方法利用式(13), 可以求得每个用户的最佳响应, 根据式(11)就可以得到纳什均衡解的集合。

静态博弈是所有认知用户都同时进行策略选择<sup>[12]</sup>, 在每次进行策略选择的时候每个认知用户选择的策略是可被其他认知用户得知的。然后根据式(13)可以求得每个认知用户分配频谱的最佳响应函数, 这些函数的交点就是纳什均衡的点。

### 4 仿真结果与分析

通过 MATLAB 对前面研究的内容进行仿真验证。假设认知无线电场中, 存在  $M = 2$  个认知用户,  $\gamma_i \in [5, 20]$ ,  $\bar{B}_j \in [50, 30]$ ,  $\text{BER}_j^{\text{tar}} = 10^{-4}$ 。每单位传输速率认知用户的收益  $r_j = 10$ 。定价函数中的常数因子  $a = 0$ ,  $c_1 = 0.5$ ,  $c_2 = 1$ ,  $\tau$  根据实际测量环境的不同而不同, 这里取  $\tau = 1$ 。物理层的参数范围是由衰减模型得到。其他参数对于每个不同用户有不同的固定值。设初始的值为: 对所有的认知用户  $j$  有  $B_j(1) = 0$ 。

从图 2 可以看出, 频谱价格  $p$  是认知用户数量  $M$  的递增函数, 是主要用户数量  $N$  的递减函数, 这就说明了随着认知用户请求频谱量的增多, 主要用户为了保证自己的频谱质量必须提高频谱价格; 相反, 若出售频谱的主要用户增多, 则为了吸引更多的认知用户购买自己的频谱, 追求效用的最大化, 主要用户必须降低频谱价格。

图 3 中, 两个认知用户的频谱关系的交点就是纳什均衡点, 当主要用户出售频谱的意愿增大时, 频谱价格降低, 认知用户共享到的频谱会变多, 这更贴近实际的网络情况。

由于两个认知用户的效用函数相同, 所以图 4 给

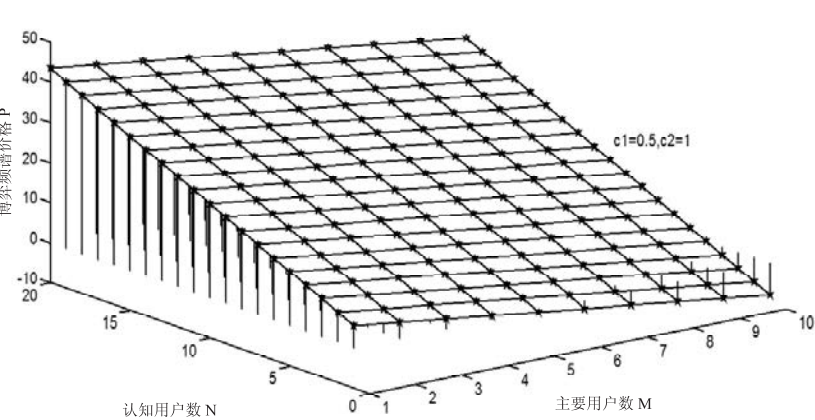


图 2 频谱价格函数与用户数量的关系

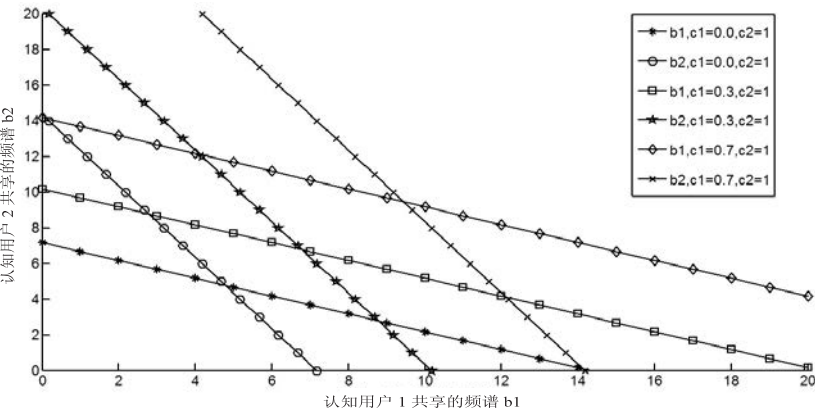


图 3 不同主要用户意愿因子  $c_1$  下的纳什均衡

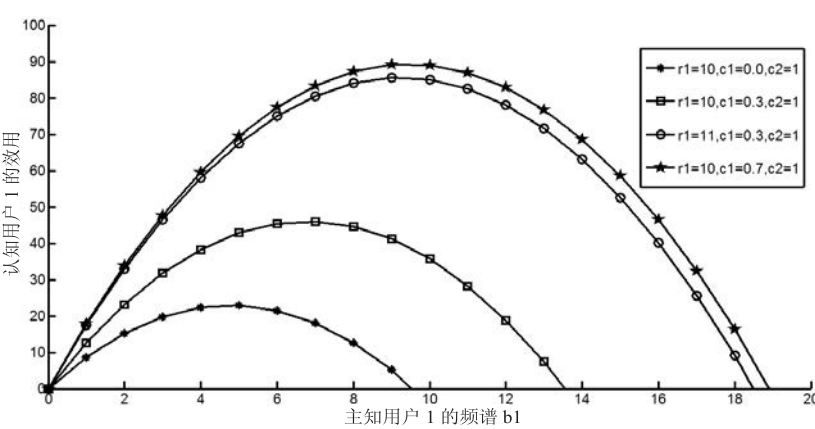


图 4 认知用户不同条件下的均衡效用

出了一个认知用户效用随着频谱尺寸的变化曲线,从图中可以看出认知用户的效用在均衡点处达到最大这与前面分析是一致的,对比图中几个曲线可以发现当主要用户出售频谱意愿参数  $c_1$  越大时,认知用户获得的效用就越大,当  $c_1 = 0$  时,就是经典的古诺模型。

5 结束语

文中主要研究了认知网络中基于博弈论的动态频谱分配算法,重点讨论了古诺模型静态博弈论算法。考虑到实际环境中,授权用户对频谱的控制权,文中引入了授权用户加权价格,通过仿真也验证了已有的古

诺博弈算法是文中提出算法的一个特殊情况(授权用户没有加权影响频谱价格情况下),对已有算法进行了完善,使算法更加地贴近实际网络环境,更加有效地利用频谱,达到了一定的实际运用能力。

参考文献:

[1] 侯定丕. 博弈论导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2004.

[2] Huang J, Berry R, Honig M. Auction-based spectrum sharing[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(3): 405-408.

[3] Niyato D, Hossain E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2651-2660.

[4] 李广久. 博弈论基础教程[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[5] Niyato D, Hossain E, Han Z. Dynamics of multiple-seller and multiple-buyer spectrum trading in cognitive radio networks: A game theoretic modeling approach[J]. IEEE Trans. on Mobile Comput., 2009, 8(8): 1009-1022.

[6] Goldsmith A J, Chua S G. Variable rate variable power MQAM for fading channels[J]. IEEE Trans. on Commun., 1997, 45(10): 1218-1230.

[7] Niyato D, Hossain E. A game-theoretic approach to competitive spectrum sharing in cognitive radio networks[C]//Proc. of IEEE WCNC. [s. l.]: [s. n.], 2007: 16-20.

[8] Xing Yiping, Cordeiro C. Price Dynamics in Competitive Agile Spectrum Access Markets[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3): 613-621.

[9] Johari R, Tsitsiklis J. Efficiency loss in a network resource allocation game[J]. Math. Oper. Res., 2004, 29(3): 407-435.

[10] Sanghavi S, Hajek B. Optimal allocation of a divisible good to strategic buyers[C]//Proc. of IEEE Conf. on Decision Control. [s. l.]: [s. n.], 2004: 2748-2753.

[11] Sengupta S, Chandramouli R, Brahma S, et al. A game theoretic framework for distributed self-coexistence among IEEE



是监控数据,如果监控下的实时数据发生错误,将会发生巨大的损失,所以安全性是联网设备都面临的问题。Modbus 网关响应客户机的请求时,连接都是用 TCP/IP 的端口号来识别,一般工业以太网都是允许特定的主机进行访问,为了保证数据传输的安全性,将网络接口 MAC 地址绑定到交换机端口上,使交换机的每个端口一一对应,保证“非法”的网络接口不能传输数据。

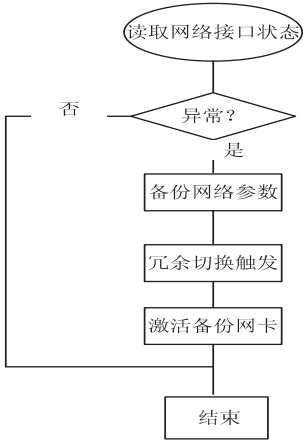


图 4 冗余切换流程图

3 性能测试

系统以水泥 OPC 监控系统为背景,OPC Server 和 OPC Client 部署在工程师站上,OPC Client 采集端负责采集 OPC Server 数据,而 OPC Client 接收端部署在 Window 2008 服务器上负责向 SQL2005 中写入数据,采集端和接收端中间部署 4572 网关,保证工程师数据的安全性,网关串口 (RS232) 连接在工程师站上,RJ45 通过二层交换机连接到 Window 2008 服务器主机网卡上。此系统在 OPC Client 采集端到 OPC Client 接收端数据通信加入网关,是以工业以太网 Modbus/TCP 协议。

测试是采用 Modbus/TCP 通信协议,在初始化随机指定一个激活通信网络接口,网络接口以 200 帧/s 速率通信 1h,通过 sniffer 抓包软件对通信数据进行分析,当一个网络接口出现故障,备份网络接口会自动切换。因为 Modbus/TCP 协议使用的是 TCP 协议,通过在 ping 命令查询网卡接口的状态,在不断测试中没有出现 ping 中断,说明冗余切换成功。假设故障检测周期为 50ms,通过测试主机以 50ms 和 100ms 的周期发送 TCP 测试包,此过程网关以 100ms 的周期自动冗余切换。TCP 数据包的丢包率低说明冗余切换算法具有

较高的性能<sup>[12]</sup>。

图 5 为 OPC 监控系统现场部署。

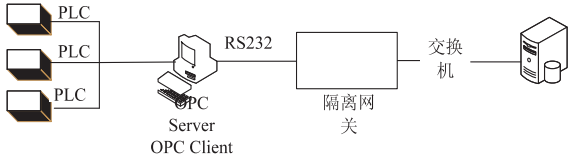


图 5 OPC 监控系统现场部署

系统在 Modbus/TCP 网关通过冗余切换算法保证了数据的安全可靠性,使得整个局域网内可以安全地访问实时采集的数据。

4 结束语

OPC 技术是一项工业标准,特别在工业实时控制上对数据的安全性要求比较高,Modbus/TCP 协议是工业过程控制一个通信标准协议。冗余切换算法可以提高 Modbus/TCP 协议网关的安全性和可靠性。

参考文献:

[1] OPC Foundation. OPC DA2. 05a Specification[ S/OL]. 2002. <http://www.opcfoundation.org>.

[2] Stallings W. SNMP 网络管理[ M]. 胡成松,汪 凯,译. 北京:中国电力出版社,2001.

[3] 白金东. OPC 技术在 Modbus/TCP 工业以太网控制系统中的实现与研究应用[ D]. 南京:南京工业大学,2005.

[4] 张文超,李 京. OPC 技术在工业以太网控制系统中的应用[ J]. 自动化仪表,2004,28(3):88-91.

[5] 龚 克. Modbus 协议及其 PC 机实现[ J]. 福建电脑,2004(7):21-22.

[6] Modbus-IDA. MODBUS Application Protocol Specification V1.1a[ S/OL]. 2004-06-04. [http://www.Modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1a.pdf](http://www.Modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1a.pdf).

[7] Modicon Modbus Protocol Reference Guide, Release1.0 [ M]. USA:MODICON,Inc.,1998.

[8] 邓心茹,丁建兴,杨 翼,等. Modbus/TCP 工业以太网的现状与发展[ J]. 工业控制计算机,2004(9):14-16.

[9] 刘利强,戴运桃,周卫东. 基于 VxWorks 的双端口网卡智能双冗余驱动[ J]. 电子技术应用,2006(7):64-66.

[10] 田 炜,刘利强,袁赣南. VxWorks 环境下双网卡冗余备份技术的实现[ J]. 自动化技术与应用,2003,22(7):32-34.

[11] Stevens W R. TCP/IP 详解卷 2:实现[ M]. 范建华,胥光辉,译. 北京:机械工业出版社,2000.

[12] 吴万涛. 基于工业以太网的 Modbus 网关研究与设计[ D]. 南京:河海大学,2008.

(上接第 69 页)

802.22 networks[ C]//Proc. of IEEE GLOBECOM. [ s. l. ]: [ s. n. ],2008:1-6.

[12] Kloeck C,Jaekel H,Jondral F K. Dynamic and local combined

pricing, allocation and billing system with cognitive radios [ C]//Proc. of IEEE DySPAN'05. [ s. l. ]: [ s. n. ],2005:73-81.

基于价格的认知网络频谱共享博弈论模型

作者：[黄德文](#)，[周井泉](#)，[HUANG De-wen](#)，[ZHOU Jing-quan](#)

作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院](#), 江苏 南京, 210003

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

Computer Technology and Development

ISTIC

年，卷(期)：

2013(8)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201308017.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308017.aspx)