

# 认知无线电中基于博弈论的联合功率和速率控制算法

关宏博<sup>1,2</sup> 张广春<sup>1</sup>

(沈阳军区联勤部药品仪器检验所 沈阳 110026)<sup>1</sup> (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)<sup>2</sup>

**摘要** 研究了认知无线电(CR)中共享频谱状态下的联合功率和速率控制问题。功率控制技术是认知无线电的关键技术之一,而下一代的网络也对速率的多样化传输提出了要求。将系统中次级用户(SU)间的关系假定为非合作的竞争性关系,同时考虑到次级用户对主用户的干扰容限,提出了基于博弈论的联合功率控制算法(NPRG),并证明了该算法的纳什均衡的存在性、唯一性。仿真结果证明了算法具有较快的收敛性,且能收敛到较低的功率和较高的速率。

**关键词** 认知无线电, 博弈论, 功率控制, 速率控制

**中图分类号** TN99 **文献标识码** A

## Game-theoretic Approach to Joint Rate and Power Control for Cognitive Radto

GUAN Hong-bo<sup>1,2</sup> ZHANG Guang-chun<sup>1</sup>

(Institute for Drug Control & Instrument, Shenyang Military Region Joint Logistics Department, Shenyang 110026, China)<sup>1</sup>

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)<sup>2</sup>

**Abstract** We studied joint power and rate control for cognitive radios in the underlay type. Power control is one of the key technology in cognitive radio, and the next generation wireless systems also will be required to support with different transmission rates. In this paper we assumed the problem between second users as a non-cooperative game, and one power control algorithm was proposed, subject to the tolerable interference limits. And it is proved that the Nash equilibrium of the algorithm is the existence, uniqueness, the simulation results show that the method has a faster convergence, and can converge to the lower power and higher rates.

**Keywords** Cognitive radio, Game theoretic, Power control, Rate control

随着无线通信技术的发展,频谱资源变得原来越稀缺。大多数国家采用行政命令的方式来分配和管理频段使频谱的利用效率较低。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)光谱策略小组 2002 年的报告中指出,在已授权频段中光谱的利用率为 15%~85%<sup>[1]</sup>。为了提高频谱利用率,人们提出了认知无线电技术(CR)<sup>[2]</sup>。CR 的基本认知周期如图 1 所示。

认知无线电技术最早由 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出,是一种采用基于模式的推理达到特定模式要求的无线电技术<sup>[3]</sup>。其能够依靠人工智能的支持,感知周围的无线通信环境,能根据一定的学习和决策算法,实时自适应地改变系统工作参数,动态地检测和有效地利用空闲频谱<sup>[4]</sup>,允许在时间和空间上对频谱进行复用。

按照主用户(PU)和次级用户(SU)间的信号关系,频谱的利用方式通常有 3 种:选择性接入、共享型接入和混合型接入<sup>[5]</sup>。选择性接入是指认知用户通过频谱探测技术,得知主用户工作状态,感知到频率空穴,接入频谱;共享型接入是指无需频谱检测,在次级用户的功率不超过主用户干扰容限的前提下,以合适的传输参数接入频谱;混合型接入方式综合了前两种,在频率空穴时加大发射功率等相关参数,在主用户工

作时,相应降低发射功率,继续通信。

本文中,主要考虑共享型频谱的接入情况。在共享型接入方式中对认知用户的功率控制非常重要,既要满足认知用户通信要求的服务质量(QoS),还要满足主用户对干扰容限的要求,另外同样具有延长用户待机时间,减少电磁辐射等作用。

本文结合速率控制研究了 CR 中基于博弈论的功率控制问题。文中将次级用户间的竞争问题考虑为非合作博弈,提出了一种合适的效用函数,并且引入了代价函数,证明了该函数纳什均衡的存在性和唯一性。

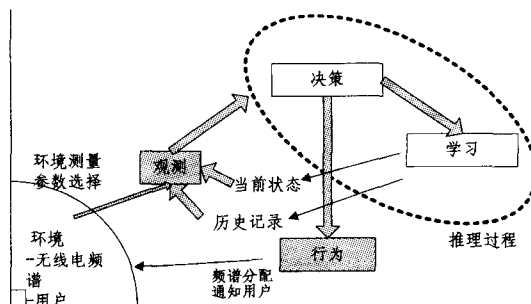


图 1 CR 的基本认知周期

关宏博(1985-),男,硕士生,助理工程师,主要研究方向为 IP 通信、无线电通信、医疗仪器检修, E-mail: neughb@126.com; 张广春(1963-),男,硕士生,高级工程师,主要研究方向为无线电通信、医疗仪器检修。

## 1 研究背景

传统的蜂窝无线通信系统的功率控制问题的研究较多<sup>[6,7]</sup>,其研究核心主要集中在满足用户各自目标信干比(SIR)的前提下最小化总的上行发射功率,这类算法主要为集中式功率控制。同时,无线网络中分布式的功率控制也取得了许多成果。文献[8]中考虑了一个非合作的上行功率控制博弈,但是其得到的纳什均衡点并不是有效的。所以,价格机制被引入到了博弈中从而得到了纳什均衡的帕累托最优。文献[9]提出了一个类似的非合作博弈框架,分析了纳什均衡的存在性并提供了两种动态更新算法以达到纳什均衡。文献[10,11]中考虑了CDMA网络中基于博弈论的联合功率和速率控制算法,文献[12]也考虑了类似的问题,但是没有引入价格机制。

认知无线电中的功率控制问题近年来也得到了研究。文献[13]中的非合作工作控制算法以吞吐效率为效用函数,引入了此用户对授权用户的干扰和次级用户间的干扰两种价格因子。文献[14]研究了联合功率控制和频谱检测算法,达到了最大化系统吞吐量的效果。文献[15]考虑了基于博弈论的联合功率和速率控制算法,但是其价格因子相对简单,没有考虑对主用户的保护和公平性等。

本文的主要贡献是考虑了基于博弈论的联合功率和速率问题,提出了一种新的算法。该算法考虑到了次级用户的QoS要求,同时避免了对主用户的干扰,并使认知用户具有较低的发射功率和较高的传输速率。

## 2 博弈论模型与效益函数

### 2.1 博弈论

博弈论又称对策论或者竞争论,是研究具有对抗或竞争现象的数学理论方法<sup>[16]</sup>。目前,博弈论广泛运用于经济、社会以及通信系统中,为这些充满竞争性、不确定性的环境系统提供整套的决策信息。

博弈论由3个基本要素构成:

(1)决策者(player),他是博弈活动的参与者,在整个博弈过程中,他总是理性选择使自己利益最大化的策略。(2)策略集合(action),即博弈参与者可以选择的策略组合。(3)效用(utility),定义或者量化博弈参与者的利益,是博弈论的核心。因此一个基本的策略博弈可以考虑为:

$$G = \{n, a, u_i(a)\}$$

式中,博弈决策者的集合为: $N = \{1, 2, 3 \dots i\}$ ;策略集合可以表示为: $A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times \dots \times A_i$ ;对每个参与者A来说, $A = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots, a_{im}\}$ 是其对应的策略空间;效用函数定义为 $u_i(a_i, \vec{a}_{-i})$ ,其中 $\vec{a}_{-i}$ 是指除i外别的决策者的策略组合。用户在给定的策略集合中选择合适的策略以达到自身的效益最大化。

### 2.2 系统模型

本文考虑的系统为一个共享频谱型的无线电认知网络环境。系统模型如图2所示。主用户用 $u_i$ 表示,与之通信的基站用 $BS_p$ 表示,他们所占用的授权频谱为 $W$ ;一个未授权的认知网络在这个主网络的通信范围内,网络内有 $N$ 个未授权用户,他们用CDMA的通信方式与对应的基站通信,该基站表示为 $BS_s$ 。在此系统内,假设共 $N$ 个次级用户,其发射功率必须限制在主用户的干扰容限下,且每个次级用户要受到

$N-1$ 个激活次级用户的干扰。次级用户 $i$ 与对应基站 $BS_s$ 的通信链路增益为 $h_i$ ,第 $i$ 个次级用户对主基站 $BS_p$ 的信道增益为 $g_i$ ,相应的次级用户 $i$ 的SINR<sup>[16]</sup>可表示如下:

$$\gamma_i(r_i, p_i) = \frac{W}{r_i} \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \delta^2}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, $p_i$ 和 $r_i$ 分别表示次级用户的发射功率和传输速率, $\delta^2$ 为系统的加性高斯白噪声。主用户 $U_p$ 接收到的干扰功率可以表示为 $\sum_i p_i g_i$ 。为了保护主用户网络中的用户正常通信,由次级用户产生的干扰功率必须小于某个门限。次级用户的功率限制可以表示为:

$$\sum_i p_i g_i \leq P_{th} \quad (2)$$

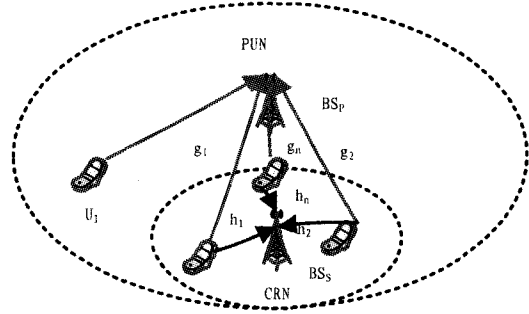


图2 系统模型示意图

### 2.3 博弈模型

在上面的模型中,每个次级用户都独立且以个人利益为中心去竞争系统的资源,且各个用户都是理性的,这种自私的竞争行为可以定义为一种非合作的博弈行为。

定义非合作功率和速率控制NPRG(non-cooperative power and rate control game)。认知无线网络中非合作功率和速率控制博弈为 $G = [N, \{P_i, R_i\}, \{u_i(\cdot)\}]$ ,其中 $P_i$ 表示认知用户的功率策略集合, $R_i$ 表示认知用户的传输速率, $u_i(\cdot)$ 表示用户的收益,在该博弈中它是功率和速率的函数,其中 $p_i \in P_i, r_i \in R_i$ 。对于次级用户 $i$ ,考虑功率策略区间 $R_i \in [r_{min}, r_{max}]$ ,功率策略区间 $p_i \in [p_{min}, p_{max}]$ 。我们假定功率和策略区间是凸的紧致的集合。

在这个模型中,每个用户都会试图去达到自身的效益最大化,因此可以得到系统的目标函数为:

$$\max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} u_i(p_i, r_i) \quad (3)$$

#### 2.3.1 效用函数

在认知无线电系统中,功率是一个非常重要的参数,因而考虑基于单位能量能够传输的数据量的效用函数就是一个较好的选择<sup>[16]</sup>。D. Goodman等人提出了非合作功控的基本模型NPG如下:

$$u_i = \frac{LRf(\gamma_i)}{Mp_i} = \frac{T_i}{p_i} \quad (4)$$

式中, $M$ 为每帧的总比特数, $L$ 为每帧中的有效信息比特数( $L < M$ ),传输速率为 $R$ ,用户 $i$ 发送功率为 $p_i$ , $T_i$ 为系统净吞吐量,信干比为 $\gamma_i$ , $f(\gamma_i)$ 称为效率函数,它与系统的调制方式有关,在AWGN信道下,对于非相干FSK,有:

$$f(\gamma_i) = (1 - e^{-0.5\gamma_i})^M \quad (5)$$

因此,效用函数可以重新表示为:

$$u_i = \frac{LR}{Mp_i} (1 - e^{-0.5\gamma_i})^M \quad (6)$$

由于该函数考虑的是各用户加大功率从而达到自身的效

益最优化,因此最终收敛到的功率值较大,不是帕累托最优。文献[16]引入了代价函数,建立了基于代价函数的非合作功控(NPGP),效用函数表示为:

$$u_i = \frac{LRf(\gamma_i)}{Mp_i} - cp_i \quad (7)$$

式中, $c$ 为代价因子, $cp_i$ 表示对用户过大功率的惩罚,研究表明 NPGP 可以使系统收敛到一个较低的功率下,但是还存在公平性较差等缺点,需要对代价做合适的改进。

### 2.3.2 联合功率和速率控制

在下一代通信系统中,随着无线通信的进一步发展,人们对通信的要求不同,有实时的语音通信,也有非实时的电子邮件等业务,这就要求我们在考虑对用户功率控制的同时,还要做好功率的分配。

根据上面的分析,并结合优化目标,我们提出基于代价函数的联合功率和速率控制的非合作博弈功率控制函数如下:

$$u_i(p, r) = u_i(p, r) - \alpha_i(p, r) \quad (8)$$

式中, $\alpha_i(p, r)$ 为代价函数,本文考虑对主用户的保护,对次级用户的 QoS 满足以及在此基础上最大速率的要求,设定代价函数如下:

$$\alpha_i(p, r) = \alpha \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_j + \delta^2} + \beta \frac{g_i p_i}{p_h - \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} + \tau \frac{1}{r_i} \quad (9)$$

式中,第一部分是对次级用户功率过大的惩罚,即对 QoS 的保护;第二部分是对主用户的保护;第三部分是达到较大的收敛速率。

本系统中问题可以归纳为以下最优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} u_i &= \frac{r_i \ln(K\gamma_i)}{p_i} - \alpha(r, p) \\ s. t. & p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, r_i^{\min} \leq r_i \leq r_i^{\max} \\ & r_i^{\max} \leq r_i, \sum_{i=1}^N p_i g_i \leq p_h, \forall i \in N \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.4 纳什均衡和帕累托最优

### 2.4.1 纳什均衡的存在性

根据博弈论的相关知识,如果博弈模型满足下面两个条件,那么这个博弈模型肯定存在纳什均衡:

- (1)策略空间在欧几里得空间中是非空、闭的有界凸集。
- (2) $u(\cdot)$ 在策略空间上是二次凹的。

显然,条件(1)是满足的。对于策略空间  $R_i$ ,求对于  $r_i$  的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 r_i^2} = -\frac{1}{p_i r_i} - \frac{2}{r_i^3} < 0 \quad (11)$$

即在空间  $R_i$  上为二次凹的,因此在对应的策略空间上存在纳什均衡。

**结论 1** NPRGP-CR 中,在给定其他用户速率策略为  $r_{-i}$  的条件下,用户  $i$  的最佳回应函数为:

$$r_i(r_{-i}) = \min(r_i^0, r_i^{\max}), \forall i \in N$$

其中, $r_i^0$ 由下式给出:

$$\frac{\partial u_i(r_i, r_{-i})}{\partial r_i} = 0 \quad (12)$$

证明:由上式知  $r_i^0$  是目标函数  $u_i$  的无约束条件时的最大化因子;另外由于  $\frac{\partial^2 u_i}{\partial r_i^2} < 0$ ,目标函数在  $r_i < r_i^0$  上是递增的,故当上式计算的  $r_i^0$  值大于  $r_i^{\max}$  时,取  $r_i^0 = r_i^{\max}$ 。所以  $r_i(r_{-i})$  是用户  $i$  的最佳回应函数。

### 2.4.2 纳什均衡的唯一性

根据文献[7],如果一个功率控制算法  $f(p)$  满足以下 3

条性质,则算法收敛到唯一的一点:

- (1)正性,  $f(p) > 0$ ;
- (2)单调性,如果  $p' > p$ ,则  $f(p') > f(p)$ ;
- (3)扩展性,对全部  $\mu > 1, \mu f(p) > f(\mu p)$ 。

证明:可以很简单地证明  $r_i(r_{-i})$  满足这 3 个条件,又已知存在纳什均衡,所以可知存在唯一的纳什均衡点。

同理可以得到在给定其他用户功率  $p_i$  的前提下,用户  $i$  的最佳反应函数为:

$$p_i(p_{-i}) = \min(p_i^0, p_i^{\max}) \quad (13)$$

类似以上证得其存在唯一的纳什均衡点。

## 2.5 联合功率和速率控制算法

现在给出分布式的联合功率和速率算法,该算法收敛到博弈  $G$  的纳什均衡点  $(r_i(r_{-i}), p_i(p_{-i}))$ 。

### 算法 1

- 1)置初始时间  $t=0$ ,初始  $K=1$ ;
- 2)置初始功率  $p(0) = (p_1(0), p_2(0), \dots, p_N(0))$
- 3)计算  $r_i^0 = \operatorname{argmax}_{r_i \in R_i} u_i(p, r)$ ;
- 4)置传输速率:  $r_i(t_k) = \min(r_i^0, r_i^{\max})$ ;
- 5)给定功率的前提下,计算  $p_i^0 = \operatorname{argmax}_{p_i \in P_i} u_i(p, r)$
- 6)置传输功率:  $p_i(t_k) = \min(p_i^0, p_i^{\max})$
- 7)若  $|p_i(t_k) - p_i(t_{k-1})| < \epsilon$ ,则停止;
- 8)宣称得到纳什均衡;
- 9)否则,置  $k=k+1$ ,返回 2。

这里  $\epsilon$  是一个很小的数,例如  $10^{-6}$ 。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真场景

小区具体参数设定如下:主基站  $B_p$  的半径为 3000m,认知小区基站  $B_s$  的半径为 300m,共有 11 个认知用户,用户发射功率  $P \in [10^{-5}, 0.2]W$ ,发射速率  $R \in [0.96]k\text{bps}$ ,  $W = 3.84 \times 10^6 \text{ Hz}$ ,  $r_i^{\max} = 12.42$ ,  $K = 0.21886$ ,  $p_h = -70\text{dBm}$ ,次级用户接收端的高斯白噪声为  $10^{-15} \text{ W/Hz}$ ,次级用户距离次级基站的距离矢量  $D = [50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500]m$ 。

不考虑前向纠错码的情况下,主用户和次级用户的增益均用  $h_i = \varphi/d_i$  决定,  $d_i$  为用户至对应基站的距离。本文中,将得到的结果和文献[16]中的算法作对比。

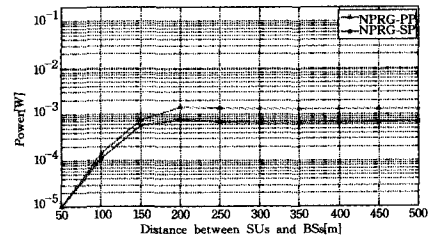


图 3 均衡点次级终端发射功率对比

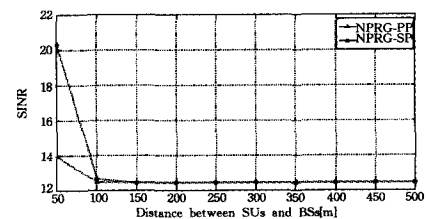


图 4 均衡点次级用户 SINR 对比

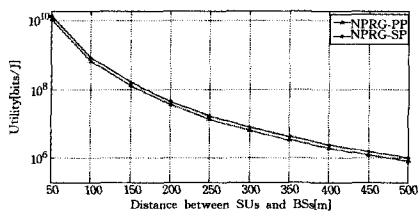


图5 均衡点效用函数对比

图3显示比较了达到均衡点时的两种算法收敛的功率效果,可见 NPRG-SP 算法明显优于 NPRG-PP 算法,也更适用于认知网络环境;另外,图4示出两种算法关于 SINR 的比较,可以看出在 150m 以内的用户相比,NPRG-SP 有着更好的 QoS 保证。图5中比较了均衡的效用函数,在所有的仿真距离中,NPRG-SP 的效用函数都大于 NPRG-PP 算法。

**结束语** 我们模拟了一个认知无线电环境,并且将其用户间的关系考虑为非合作的。提出了一个联合功率和速率的算法。通过数值仿真和对比,我们可以发现所提出的算法具有较高的效用值,且在收敛点具有较小的收敛功率和较高的传输速率,达到了保护授权用户的同时满足次级用户 QoS 的目的。

### 参考文献

[1] Federal Communication Commission. Spectrum Policy Task Force; Report of the spectrum efficiency working group[R]. USA; Spectrum Efficiency Working Group Report

[2] Mitola J, Maguire G. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18

[3] Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio [D]. Stockholm; Royal Institute of Technology(KTH), 2000

[4] Jondral F K. Cognitive Radio: A Communications Engineering View [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 28-33

[5] Xi Zhang, Su Hang. Opportunistic Spectrum Sharing Schemes for CDMA-Based Uplink MAC in Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,

29(4): 715-730

[6] Yates R D, Huang C-Y. Integrated power control and base station assignment[J]. IEEE Trans. Technol., 1995, 12(3): 638-644

[7] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 1995, 13(7): 1341-1347

[8] Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks[J]. IEEE Trans. Commun., 2002, 50(2): 291-303

[9] Alpcan T, Basar T, Srikant R, et al. CDMA uplink power control as a noncooperative game[Z]. Wireless Netw., 2002; 659-670

[10] Zhao Wen-tao, Mil u. Distributed Rate and Power Control for CDMA Uplink [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 14(9): 14-23

[11] Hayajneh M, Abdallah C T. Distributed Joint Rate and Power Control Game-Theoretic Algorithms for Wireless Data[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(8): 511-513

[12] Musku M R, Chronopoulos A T. A Game-Theoretic Approach to Joint Rate and Power Control for Uplink CDMA Communications[J]. IEEE Transactions on communications, 2010, 58(4): 923-931

[13] Al-Daoud A, Alanyali M, Starobinski D. Secondary pricing of spectrum in cellular CDMA networks[C] // Proc. IEEE DySPAN. Nov. 2007; 535-542

[14] Bagayoko A, Fijalkow I. Power Control of Spectrum-Sharing in Fading Environment With Partial Channel State Information [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 5(59): 2244-2257

[15] Manosha K B S, Rajatheva N. Joint Power and Rate Control for Spectrum Underlay in Cognitive Radio Networks with a Novel Pricing Scheme[Z]. IEEE, 2010

[16] Zhou P, Yuan W, Liu W, et al. Joint power and rate control in cognitive radio networks; A game-theoretical approach[C] // Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference. Beijing, May 2008; 3296-3301

(上接第 388 页)

### 参考文献

[1] Jones A, Ohlund J. Windows 网络编程(第二版)[M]. 杨庆合, 译. 北京:清华大学出版社, 2002; 101-134

[2] 吴星, 黄爱萍. 用完成端口实现可扩展的服务器应用[J]. 计算机科学, 2002, 29(11): 144-145

[3] 张静华, 张玉明. IOCP 研究及在大规模网络通信系统中的应用[J]. 计算机与现代化, 2004(9): 41-43

[4] 王文武, 赵卫东, 王志成, 等. 高性能服务器底层网络通信模块的设计方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(3): 103-105

[5] Kim G-B. A Method of Generating Massive Virtual Clients and Model-based Performance T-test: Quality Software 2005. (QSIC 2005)[C] // Fif-th International Conference. 2005; 250-254

[6] Wang Hui-jiao, Yu Xiao-yong. Research and Implementation of

an Intelligent Traffic Monitoring System based on IOCP Mechanism; Computer Application and System Modeling (ICCASM) [C] // International Conference on. 2010; V12-656 - V12-659

[7] Zong Xiao-ping, Zhang Yan. Design and Implementation of the Remote Monitor Server Based on Video Image; Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS) [C] // 2010 3rd International Conference. 2010; 32-35

[8] 李凌. Winsock2 网络编程实用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003; 221-225

[9] 苏羽, 王媛媛. Visual C++ 网络游戏建模与实现[M]. 北京:北京科海电子出版社, 2003; 51-52

[10] 陈和平, 周静宁, 顾晋广, 等. IOCP 机制与网络代理服务器实现方法[J]. 计算机应用, 2003, 4(23): 109-110

[11] 侯捷. 池内春秋——Memory Pool 的设计哲学和无痛设计[J]. 程序员, 2002(9): 94-97