

## 认知网络中基于网络辅助的速率控制方法

杨春刚, 盛敏, 董延杰, 李建东, 李红艳, 刘勤

(西安电子科技大学 综合业务数字网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 面向多速率业务的认知网络, 为了克服其动态性并实现速率控制的自主性, 在改进 IEEE 1900.4 系统架构的基础上提出了速率控制框架。探讨不同层面不同尺度的速率控制方案。重点研究终端侧短期实时速率控制的问题。首先, 基于非合作博弈提出分布式自主速率选择方法; 进而, 基于合作博弈提出基于网络辅助的中心式速率分配方法。仿真结果表明, 后者较前者获得近 60% 的效能和一定的公平性改善, 同时也验证了定价函数设计能够有效改进公平性。

**关键词:** 认知网络; 速率控制; 博弈; IEEE 1900.4

中图分类号: TN916

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)05-0126-10

## Network-assisted optimal rate control methods in cognitive networks

YANG Chun-gang, SHENG Min, DONG Yan-jie, LI Jian-dong, LI Hong-yan, LIU Qin

(State Key Lab of Integrated Service Network, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Orienting the multi-rate cognitive networks, overcoming the typical characteristics of dynamics to implement the autonomy and rationality of rate control, first the rate control framework based on the presented improved IEEE 1900.4 architecture was proposed. Meanwhile, different scaled rate control schemes on different levels were investigated. Then, the real-time rate control problem on the terminal we concentrate on. Most importantly, both the distributed rate selection of TRM towards RNRM and the centralized rate allocation of RNRM to TRM were investigated. Simulation results show that the latter can achieve 60% utility and certain fairness improvements, in addition, the rationality and fairness guaranteed by the newly-built pricing function is verified.

**Key words:** cognitive networks; rate control; game theory; IEEE 1900.4

### 1 引言

面对复杂多变的网络环境和日益繁多的网络业务需求, 传统的网络技术难以满足人们日益增长的多样化业务需求。另外, 网络业务分布不均和高

带宽多媒体业务造成频谱资源稀缺。认知无线电技术被认为是解决复杂干扰环境下资源紧缺的重要途径之一。近年来, 基于 Mitola 博士、Haykin 教授、FCC 和 IEEE SCC41 等对认知无线电的定义和研究, Thomas 博士率先提出了认知网络的概念<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2012-07-24; 修回日期: 2012-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231008, 61201139, 60972048); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8012); 陕西省科技研究与发展计划基金资助项目(2011KJXX-40); 中央高校基本业务费基金资助项目(K5051201033); 综合业务数字网国家重点实验室基金资助项目(ISN02080001); 111 基地专项基金资助项目(B08038); 长江学者创新团队基金资助项目; 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03003005-005)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61231008, 61201139, 60972048); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320404); The Natural Science Program of Shaanxi Province(2012JQ8012); The Science and Technology Research and Development Program of Shaanxi Province(2011KJXX-40); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(K5051201033); The Program of State Key Lab of Integrated Service Network(ISN02080001); 111 Project(B08038); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University; The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2012ZX03003005-005)

认知网络可以监控无线频谱、用户、网络等环境变化,预测未来网络的状态;然后根据构建策略库,采取智能策略完成网络重构,实现动态自适应网络更新和多用户、多设备、多网络之间的资源协作。认知网络的认知功能发生在网络的节点和整个网络2个层面。使得认知网络具有自感知、自学习、自优化、自修复和自配置的能力,实现真正意义上的认知网络可测、可控、可管、可靠和可信<sup>[2]</sup>。

认知网络发展的重要趋势是异构性和灵活性。自主灵活的速率控制框架和方案设计可满足当前多样化的速率业务需求,同时有助于改善高动态复杂干扰环境下的认知网络的灵活性,克服动态性。同时,传统网络功率辐射是面向全速率业务需求的,它不能根据特定时空业务量变化实现能量自适应地调节。有效的速率控制可实现业务负载平衡进而实现高效节能。

速率控制,无论是对于有线网络还是无线网络都研究甚广<sup>[3~5]</sup>。面向多域环境的认知网络中多层面的动态性、灵活性和顽健性等要求,有很多研究是基于博弈论探讨认知网络和系统的资源博弈模型与算法设计,例如,文献[6]总结博弈论在认知无线网中的发展,文献[7]提供几种具有特殊性质的模型,广泛地用于功率等资源管控的建模中。

目前,也有部分研究关注基于博弈论的速率控制模型。例如,文献[1]探索速率控制中的“影子价格 (shadow prices)”设计,分析公平性和稳定性。还有面向移动终端的基于非合作博弈的速率控制研究<sup>[8]</sup>,认知网络的联合速率和功率控制<sup>[9]</sup>,采用微观经济学中的 Negative Externalities 的概念,对效用函数的设计引入 Pigovian Tax<sup>[10]</sup>等。面向多媒体业务的多用户速率博弈,针对认知无线网络设计联合速率和功率控制的效用函数,采用定价的方式作为衡量认知用户引入干扰和改进资源管控技术效率、公平性的途径<sup>[11]</sup>。

然而,上述研究归结为非合作速率博弈模型,且不能扩展到具有端到端效能要求和保障自主性的认知网络场景。而且当前大部分针对认知网络的资源管理和分配大部分是针对固定的速率业务。不能满足动态环境下多速率的资源需求,最重要的是当前研究一般是在节点层面的认知考虑,不能拓展至网络层面。更进一步地,当前针对认知网络中的

速率控制研究尚未形成较好的速率控制框架,除了文献[8]有 Zeus 作为交互信息的载体之外,速率博弈中很难保证决策信息的实时性。同时,当前研究不能从终端到网络等多层面综合探讨速率控制方案,不能反映认知网络的认知功能发生在网络的节点和整个网络2个层面的具体认知特点。另外,基于博弈的分析模型效用函数设计不能反映实体(用户或网元)之间的速率竞争与合作关系。不能刻画其速率控制过程中的相互制约关系。

本文主要工作为:在改进 IEEE 1900.4 的架构上提出多层速率控制框架,同时基于认知信息环,实现终端和网元的多级信息认知实现方案;针对底层速率控制问题,设计效用函数来刻画认知网络中主次用户之间的速率竞争关系;同时,分别基于非合作博弈和合作博弈提出速率控制方法,仿真结果表明合作方案可实现社会最优和用户的公平性。

## 2 IEEE 1900.4 系统架构及其改进

面向未来异构网络融合场景,IEEE SCC41 工作组提出了面向终端到网络的联合优化架构,即 IEEE 1900.4<sup>[12]</sup>。自该标准发布以来,引起学术界广泛关注和研究<sup>[13,14]</sup>。例如,文献[13]考察异构认知网络中的混合资源分配问题,文献[14]研究存在异构主要用户情况下认知资源管控的问题。

传统 IEEE 1900.4 系统架构包括终端侧3个实体:TMC (terminal measurement collector)、TRC (terminal reconfiguration controller)和 TRM (terminal reconfiguration manager),以及网络侧实体:RMC (network measurement collector)、RRC (network reconfiguration controller)、NRM (network reconfiguration manager)和 OSM (operator spectrum manager)<sup>[12]</sup>。其中,TRC 负责收集用户端的环境信息,RMC 负责收集网络环境信息,这些信息都会交由 NRM 进行处理,NRM 根据这些用户环境信息和网络环境信息生成策略,并将对应的决策作用于 RAN 或者终端。网络中存在的各种终端设备、各种接入网和核心网本身的所有环境信息都必须由 NRM 进行处理分析,并且需要根据这些收集到的环境信息进行网络行为的实时决策,在产生新的决策后,需要将这些决策信息分发给网络中不同的实体。

由此可见 NRM 所处理的信息非常繁重,势必加重核心网信令和存储负荷。同时,终端用户需要

直接与 NRM 进行信息交互，这种跨越用户终端与核心网之间的信息交互必然耗费大量时间，因此增加网络中信令传输的时延开销，而且这种直接由终端与核心网进行信息交互也不符合实际网络架构。因此，本文提出了改进的 IEEE 1900.4 系统架构(如图 1 所示)，其基本原理是在无线接入网侧添加实体 RNRM 负责管理 RAN 侧与终端和信息网的环境信息交互。保证终端(TRM)到接入网(RNRM)的实时感知信息(分秒级)、接入网(RNRM)到核心网(NRM)统计信息(小时级)和核心网(NRM)到运维商(OSM)的信息交互(数天级)。

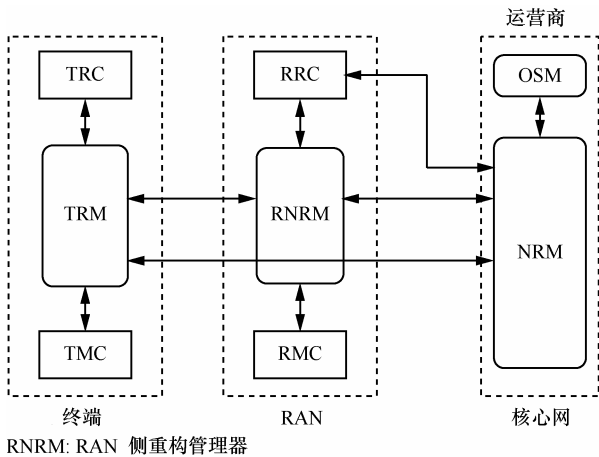


图 1 改进 IEEE 1900.4 的架构

### 2.1 多层速率控制框架

在改进 IEEE 1900.4 系统架构的基础上，提出了速率控制用例框架。探讨不同层面不同尺度的速率控制方案。

如图 2 所示，在 TRM 于 RNRM 之间形成底层(low level)速率控制环；TRM 在 RNRM 反馈的统计信息支持下，结合 TRM 实时感知信息实现自主速率选择，或 RNRM 依据融合 TRM 上报的环境信息实现集中速率分配。同样，在 RNRM→NRM、NRM→OSM 之间形成中层(medium level)和高层(high level)的速率控制环。

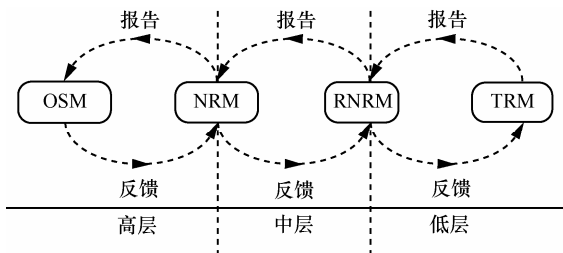


图 2 多层速率控制框架

### 2.2 网络辅助的实现方案

认知网络的认知功能发生在网络的节点和整个网络 2 个层面，认知网络根据条件变化和发生的事件按照推理和先验知识进行自适应，具有思考、学习和记忆能力是认知网络的特征。在提出的框架基础上，实现有效的速率控制，信息的高效交互和管理是十分必要的。如图 3 所示，提出的环形信息流架构的设计思想使网络具备学习能力，通过对网络过去状态的学习，指导网络中的设备进行重新配置，以适应网络的变化。例如，TRM→RNRM 速率控制环，包含 TRM 的速率选择和 RNRM 的速率分配。TRM 在 RNRM 反馈统计信息的支持下，结合 TRM 实时感知信息实现自主速率选择，或者 RNRM 依据融合 TRM 上报的环境信息实现集中式的 TRM 速率分配。

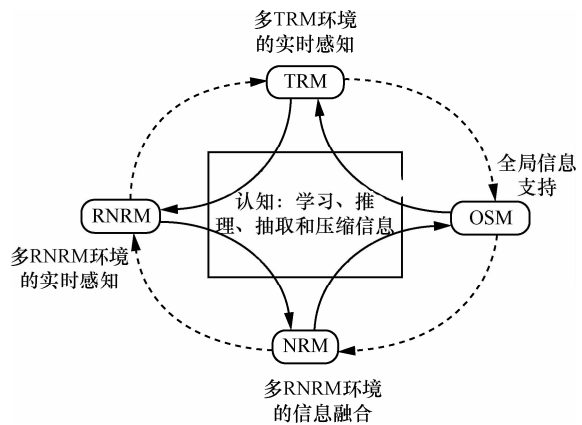


图 3 环形信息流的架构

限于篇幅，本文考察多层速率控制框架中的底层的 TRM 到 RNRM 之间的速率控制问题，包括 TRM 基于感知信息的非合作的速率选择问题和 RNRM 基于全局信息的速率分配问题。然而，本文数学模型和分析方法可直接扩展到其他 2 层。

### 3 TRM 非合作速率选择博弈分析

TRM 在 RNRM 反馈的统计信息支持下，结合 TRM 实时感知信息实现自主速率的选择；在网络容量  $C_s$  的约束下，兼顾多 TRM 之间的速率竞争和合作关系，构建 TRM 非合作速率选择博弈模型。效用函数是该模型的关键部分，它刻画多个 TRM 之间的速率竞争和合作关系，描述 TRM 对于当前速率选择的感受质量；在设计效用函数的时候，同时引入定价函数，反映  $TRM_i$  的速率选择  $\rho_i$  对其收益和系统造成的影响<sup>[1,10]</sup>。

不失一般性，定义  $TRM_i$  在速率选择为  $\rho_i$  时的感受质量为  $\log(1+\rho_i)$ ，该函数的特性是：开始时， $TRM_i$  的感受质量随着  $\rho_i$  的增长而提升很快，但是到达某一点(如纳什均衡速率点)感受质量将提升缓慢，此时再高的速率选择只是不必要的能量浪费，同时对于其他 TRM 的速率选择也会造成干扰。引入定价函数刻画这种对于收益和系统造成的影响。即  $TRM_i$  的传输速率为  $\rho_i$  大于剩余系统速率

$$C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j, \text{ 即 } \frac{\rho_i}{C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j} > 1, \text{ 此时, 应对 } TRM_i$$

的效用采取惩罚, 此处  $\rho_j$  表示除  $TRM_i$  外所有其他 TRM 的速率选择。综上, 定义  $TRM_i$  的效用函数为

$$u_i = \alpha_i \log(1+\rho_i) - \beta_i \left( \frac{\rho_i}{C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j} - 1 \right) \quad (1)$$

其中,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  是权重因子。整理得到

$$u_i = \alpha_i \log(1+\rho_i) + \beta_i \left( 1 - \frac{\rho_i}{\theta_i(\rho_{-i})} \right) \quad (2)$$

其中, 定义  $\theta_i(\rho_{-i})$  为速率干扰量, 即  $\theta_i(\rho_{-i}) = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j$ , TRM 在非合作速率选择博弈中, 采用预测式可表示为

$$\theta_i^{(t+1)} = (1-\nu^{(t)})\theta_i^{(t)} + \nu^{(t)}u_i^{(t)} \quad (3)$$

预测  $\theta_i(\rho_{-i})$  信息, 其中,  $\theta_i^{(t+1)}$ ,  $\theta_i^{(t)}$ ,  $u_i^{(t)}$  和  $\nu^{(t)}$  依次为下一时刻速率干扰量, 当前速率干扰量, 当前获得效用和迭代步长因子。其收敛性证明可参阅文献[15]。

**定义 1** TRM 非合作速率选择博弈(NCRG, non-cooperative rate game)为  $NCRG = \langle N, S, U \rangle$ , 其中,  $N$  表示局中人集合, 定义为  $N = \{i = 1, \dots, N\}$ , 表示  $N$  个 TRM 速率博弈参与者构成的集合;  $S$  表示  $N$  个可行速率策略集合  $S_i$  构成的笛卡尔积空间;  $U$  表示效用空间, 描述的是所有  $TRM_i$  的效用偏好构成, 其中,  $TRM_i$  的效用函数表述为式(2)。

**定义 2** TRM 非合作速率选择博弈的纳什均衡解  $(\rho_i^*, \rho_{-i}^*)$  满足如下条件:

$$u_i(\rho_i^*, \rho_{-i}^*) \geq u_i(\rho_i, \rho_{-i}^*), \quad \forall \rho_i \in R_i \quad (4)$$

直观上, 纳什均衡速率解是满足任何  $TRM_i$  不可能通过单方面改变自身的速率而获得性能改善。

一般  $\rho_i^* = B(\rho_{-i}^*)$ , 其中,  $B(\rho_{-i}^*)$  为  $TRM_i$  的最佳响应函数。

**引理 1** TRM 非合作速率选择博弈的最佳响应函数为

$$\begin{aligned} B(\rho_{-i}^*) &= \arg \max_{\rho_i \in S_i} u_i(\rho_i, \rho_{-i}^*) \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}^*) - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

**证明** TRM 非合作速率选择博弈的效用函数是凸函数, 且可行速率策略集合  $S_i$  是紧致凸集合。因此, 按照优化理论中最优性原理可知,  $B(\rho_{-i}^*) = \arg \max_{\rho_i \in S_i} u_i(\rho_i, \rho_{-i}^*)$  得证。对于效用函数式(2)对  $\rho_i$  求解一阶导数, 可得

$$\frac{\partial u_i}{\partial \rho_i} = \frac{\alpha_i}{1+\rho_i} - \frac{\beta_i}{\theta_i(\rho_{-i})} \quad (6)$$

进一步令其为 0, 可得

$$\frac{\alpha_i}{1+\rho_i} - \frac{\beta_i}{\theta_i(\rho_{-i})} = 0 \quad (7)$$

因此, 最佳响应函数  $B(\rho_{-i}^*)$  为

$$B(\rho_{-i}^*) = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}^*) - 1 \quad (8)$$

其中,  $\theta_i(\rho_{-i}^*) = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^*$ , 可见  $TRM_i$  的最佳响应函数是与其他 TRM ( $j=1, j \neq i$ ) 相关的量。

**引理 2** TRM 非合作速率选择博弈的纳什均衡解  $(\rho_i^*, \rho_{-i}^*)$  满足个体最优性。

**证明** 在式(6)的基础上, 进一步求解相对于  $\rho_i$  的二阶导数, 可得

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 \rho_i} = -\frac{\alpha_i}{(1+\rho_i)^2} \leq 0 \quad (9)$$

至此, 可以证明获得的纳什均衡解  $(\rho_i^*, \rho_{-i}^*)$  是个体最优的。

接下来考察该博弈模型纳什均衡解的存在性和唯一性。类似文献[16,17]中考察功率控制问题所提出的 Type-II-标准干扰函数, 在经典 Yates 标准干扰函数的基础上, 本文定义速率控制 Type-II-标准干扰函数。

**定义 3**  $TRM_i$  的最佳响应  $B_i(\rho_{-i})$  若满足如下 2 条性质, 则称其为速率控制 Type-II-标准干扰函数。

Type-II 单调。如果  $\rho^1 \geq \rho^2$ ，此时  $B(\rho^1) \leq B(\rho^2)$ 。

Type-II 扩展性。对于所有的  $\omega > 1$ ，有  $B(\omega\rho) > \frac{1}{\omega}B(\rho)$ 。

**定理 1** TRM 的最佳响应  $B(\rho)$  满足 Type-II-标准干扰函数，必然存在速率纳什均衡解  $(\rho^*, \rho_{-i}^*)$ ；且保证采用任何初始值  $\rho^{(0)}$ ，经有限次迭代  $\rho^{(n)}$  必然会收敛到  $\rho^*$ 。

**证明** 其证明过程可参阅文献[17]。

**定理 2** 对于任意  $\forall i \in N$ ，若  $\frac{\alpha_i}{\beta_i} > \frac{1}{(\omega+1)\theta - \omega C_s}$ ，

TRM 的最佳响应  $B(\rho)$  满足 Type-II-标准干扰函数。因此，保证了纳什均衡解的存在性和唯一性。

**证明** 已知  $\theta = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j$ ，因此，对于任意  $\rho^1$

和  $\rho^2 \in R$ ，这里假设  $\rho^1 \geq \rho^2$ ，此时，

$$\begin{aligned} & B(\rho^2) - B(\rho^1) \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} \left( C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^2 \right) - 1 - \left\{ \frac{\alpha_i}{\beta_i} \left( C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^1 \right) - 1 \right\} \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} \left( \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^1 - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^2 \right) \geq 0 \end{aligned}$$

因此易知： $B(\rho^2) - B(\rho^1) \geq 0$ ，即  $B(\rho^1) \leq B(\rho^2)$ ，因此定义 3 的条件 Type-II 单调得证。下面证明定义 3 的条件 Type-II 扩展性。对于任意  $\omega > 1$ ，可得

$$\begin{aligned} & B(\omega\rho) - \frac{1}{\omega}B(\rho) \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} \left( C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \omega\rho_j \right) - 1 - \frac{1}{\omega} \left\{ \frac{\alpha_i}{\beta_i} \left( C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j \right) - 1 \right\} \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \sum_{j=1, j \neq i} \omega\rho_j - 1 - \frac{1}{\omega} \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s + \frac{1}{\omega} \frac{\alpha_i}{\beta_i} \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j + \frac{1}{\omega} \\ &= \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) - \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j \left( \omega - \frac{1}{\omega} \right) \\ &= \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s - 1 \right) - \frac{\alpha_i (\omega+1)}{\beta_i} \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j \\ &= \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s - 1 - \frac{\alpha_i (\omega+1)}{\beta_i} \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j \right) \\ &= \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} C_s - 1 - \frac{\alpha_i (\omega+1)}{\beta_i} (C_s - \theta) \right) \\ &= \left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} ((\omega+1)\theta - \omega C_s) - 1 \right) \end{aligned}$$

因此，若要求

$$\left( 1 - \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} ((\omega+1)\theta - \omega C_s) - 1 \right) > 0 \quad (10)$$

即定义 3 的条件 Type-II 扩展性得证。由于  $\omega > 1$ ，因此，

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} ((\omega+1)\theta - \omega C_s) - 1 > 0 \quad (11)$$

即要求

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} > \frac{1}{(\omega+1)\theta - \omega C_s} > 0 \quad (12)$$

至此，TRM 的最佳响应  $B(\rho)$  满足 Type-II-标准干扰函数得证，即表明纳什均衡解的存在性和唯一性。

**定义 4** 帕累托最优性(Pareto optimality)，定义  $\rho^* = \rho_i, \rho_{-i}$  为帕累托最优解，满足：不存在对于任意可行的  $\rho^0$ ，对于  $\forall i \in N$ ，满足  $u_i(\rho^0) \geq u_i(\rho^*)$ ；且对于部分  $\forall j \in N$ ，满足  $u_j(\rho^0) > u_j(\rho^*)$ 。

**定理 3**  $TRM_i$  获得纳什速率均衡解  $(\rho_i^*, \rho_{-i}^*)$  满足帕累托有效性。

**证明** 由上述分析可知

$$\rho_i^* = B(\rho_{-i}^*) = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta(\rho_{-i}^*) - 1 = 0 \quad (13)$$

假设存在这样的  $\rho_i^0 = \delta\rho_i^*$ ，这里  $\delta > 1$  可满足定义 4 的约束，即存在帕累托改进解。此时

$$u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0) = \alpha_i \log(1 + \rho_i^0) + \beta_i \left( 1 - \frac{\rho_i^0}{\theta(\rho_{-i}^0)} \right)$$

相对于  $\delta$  求解  $u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)$  的一阶导数，得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)}{\partial \delta} &= \frac{\partial}{\partial \delta} \left\{ \alpha_i \log(1 + \rho_i^0) + \beta_i \left( 1 - \frac{\rho_i^0}{\theta(\rho_{-i}^0)} \right) \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial \delta} \left\{ \alpha_i \log(1 + \delta\rho_i^*) + \beta_i \left( 1 - \frac{\delta\rho_i^*}{\theta(\delta\rho_{-i}^*)} \right) \right\} \\ &= \frac{\alpha_i \rho_i^*}{1 + \delta\rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* \theta(\delta\rho_{-i}^*) - \delta_i \rho_i^* \theta'(\delta\rho_{-i}^*)}{\theta^2(\delta\rho_{-i}^*)} \end{aligned}$$

由于  $\theta(\delta\rho_{-i}^*) = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \delta\rho_j^*$ 。因此，

$$\frac{\partial \theta(\delta\rho_{-i}^*)}{\partial \delta} = - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^* \quad (14)$$

进而,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)}{\partial \delta} &= \frac{\alpha_i \rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* \theta(\delta \rho_{-i}^*) - \delta \rho_i^* \theta'(\delta \rho_{-i}^*)}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)} \\ &= \frac{\alpha_i \rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* \left( C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \delta \rho_j^* \right) + \delta \rho_i^* \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^*}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)} \\ &= \alpha_i \frac{\rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* C_s}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)} \end{aligned}$$

且由  $\rho_i^* = B(\rho_{-i}^*) = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta(\rho_{-i}^*) - 1 = 0$ , 可得

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{\theta(\rho_{-i}^*)}$$

因此,

$$\frac{\partial u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)}{\partial \delta} = \frac{\beta_i}{\theta(\rho_{-i}^*)} \cdot \frac{\rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* C_s}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)}$$

其中,  $\theta(\rho_{-i}^*) = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \rho_j^*$ ,  $\theta(\delta \rho_{-i}^*) = C_s - \sum_{j=1, j \neq i} \delta \rho_j^*$ ,

因为  $\delta > 1$ , 所以  $\theta(\delta \rho_{-i}^*) < \theta(\rho_{-i}^*)$ 。由此可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)}{\partial \delta} &= \frac{\beta_i}{\theta(\rho_{-i}^*)} \cdot \frac{\rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* C_s}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)} \\ &< \frac{\beta_i}{\theta(\delta \rho_{-i}^*)} \cdot \frac{\rho_i^*}{1 + \delta \rho_i^*} - \beta_i \frac{\rho_i^* C_s}{\theta^2(\delta \rho_{-i}^*)} \\ &< \frac{\beta_i \rho_i^*}{\theta(\delta \rho_{-i}^*)} \left( \frac{1}{1 + \delta \rho_i^*} - \frac{C_s}{\theta(\delta \rho_{-i}^*)} \right) \\ &< \frac{\beta_i \rho_i^*}{\theta(\delta \rho_{-i}^*)} \frac{\theta(\delta \rho_{-i}^*) - C_s}{(1 + \delta \rho_i^*) \theta(\delta \rho_{-i}^*)} \\ &\leq 0 \end{aligned}$$

因此, 随着  $\rho_i^0 = \delta \rho_i^*$  的增加,  $\frac{\partial u_i(\rho_i^0, \rho_{-i}^0)}{\partial \delta}$  逐渐减少,

因此, 不存在这样的帕累托改进解。TRM<sub>i</sub> 获得的纳什速率均衡解  $(\rho_i^*, \rho_{-i}^*)$  满足帕累托有效性得证。

#### 4 RNRM 合作速率分配博弈分析

目前的研究主要集中在非合作博弈论在功率控制问题上的应用。由于非合作博弈局势中各个局中人自私理性地选择使自己的策略最大化的效用函数, 没有考虑相互之间策略选择所带来的影响, 导致获得系统总效用不能达到最优; 同时, 用户之间的公平性也无法保证。在资源分配和管理中, 公平性和效率是 2 个重要的指标, 但是目前的功率算

法很难同时满足这 2 个指标。

**定义 5** 社会最优解。指兼顾效率和公平性的最优解。从经典纳什议价博弈出发, 满足社会最优的解定义为纳什议价解  $\rho_i^{\text{NBS}}$ , 它是建立在速率纳什均衡解  $\rho_i^{\text{NES}}$  基础上的解。且满足

$$\rho_i^{\text{NBS}} = \arg \max_{\rho_i} \prod_{i=1}^N (\rho_i - \rho_i^{\text{NES}}) \quad (15)$$

其中,  $\rho_i^{\text{NES}} = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) - 1$ 。该优化模型可进一步等效为

$$\rho_i^{\text{NBS}} = \arg \max_{\rho_i} \sum_{i=1}^N \log \left( \rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) \right) \quad (16)$$

约束条件为

$$\left[ \frac{\rho_i}{\theta_i(\rho_{-i})} - 1 \right] \leq 0, i \in N$$

其证明过程可以参阅文献[18], 这里不赘述。引入拉格朗日乘子  $\lambda_i$ , 得知

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^N \log \left( \rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) \right) - \sum_{i=1}^N \lambda_i \left( \frac{\rho_i}{\theta_i(\rho_{-i})} - 1 \right) \\ &= \sum_{i=1}^N \log \left( \rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) \right) - \lambda_i \left( \frac{\rho_i}{\theta_i(\rho_{-i})} - 1 \right) \end{aligned}$$

进而, 得到

$$L = \sum_{i=1}^N l_i$$

这里,

$$l_i = \log \left( \rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) \right) - \lambda_i \left( \frac{\rho_i}{\theta_i(\rho_{-i})} - 1 \right)$$

相对于  $\rho_i$  求解其一阶导数, 得

$$\frac{\partial l_i}{\partial \rho_i} = \frac{1}{\rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i})} - \frac{\lambda_i}{\theta_i(\rho_{-i})} \quad (17)$$

求其驻点, 令式(17)为 0, 得

$$\frac{1}{\rho_i + 1 - \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i})} - \frac{\lambda_i}{\theta_i(\rho_{-i})} = 0$$

因此,

$$\begin{aligned} \rho_i^{\text{NBS}} &= \frac{\theta_i(\rho_{-i})}{\lambda_i} + \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i(\rho_{-i}) - 1 \\ &= \frac{\theta_i(\rho_{-i})}{\lambda_i} + \rho_i^{\text{NES}} \end{aligned} \quad (18)$$

$\theta_i(\rho_{-i})$  是可以预测的, 但是  $\lambda_i$  必须由 RNRM 分配。

同非合作速率选择博弈模型和分析类似, 可以得出相似的关于存在性、唯一性和帕累托最优性等结论。

### 5 分布式算法设计

在图 1 中改进 IEEE 1900.4 架构的基础上, 结合上述分析提出 TRM 的速率控制算法, 包括 TRM 基于感知信息的非合作速率选择方法和 RNRM 基于全局信息的速率分配方法。

#### 算法 1 TRM 分布式速率选择注水算法

**Step1** TRC 初始化( $t=0$ )。干扰预测步长

$v^{(0)} = \frac{1}{\ln(e)} = 1$ , 归一化网络容量  $C_s = 1$ ; RNRM 广

播每个  $TRM_i \in N$  的速率干扰信息为

$$\theta_i^{(0)} = \min\{\text{rand}(1, N) \frac{C_s}{N}, \frac{C_s}{N-1}\}$$

为了保证均衡解的存在性, 取  $\omega = 2$ , 这样

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_i}{\beta_i} &> \frac{1}{(\omega+1) \frac{C_s}{N} - \omega C_s} \\ &\geq \frac{1}{(\omega+1)\theta_i^{(t)} - \omega C_s} \\ &\geq \frac{1}{(\omega+1) \frac{C_s}{N-1} - \omega C_s} \end{aligned}$$

因此, 这里选择

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{1}{(\omega+1) \frac{C_s}{N} - \omega C_s}$$

若此处选择  $\alpha_i = 1$ , 则

$$\beta_i = \alpha_i \left( (\omega+1) \frac{C_s}{N} - \omega C_s \right)$$

每个 TRM 的初始传输速率为

$$\rho^{(0)} = \text{rand}(1, N) \frac{C_s}{N+1}$$

**Step2** 对于  $i=1:N$ , 重复以下步骤。

1) TMC 启动预测算法

$$u_i^{(t)} = \alpha_i \log(1+\rho_i^{(t)}) + \beta_i \left(1 - \frac{\rho_i^{(t)}}{\theta_i^{(t)}}\right)$$

$$\tilde{\theta}_i^{(t+1)} = (1-v^{(t)})\theta_i^{(t)} + v^{(t)}u_i^{(t)}$$

此处, 下一步速率干扰预测值为

$$\theta_i^{(t+1)} = \max\left\{\frac{\omega}{\omega+1}C_s, \min\{\tilde{\theta}_i^{(t+1)}, C_s\}\right\}$$

2) TRM 执行速率迭代式为

$$\rho_i^{(t+1)} = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \theta_i^{(t+1)} - 1$$

3) 收敛性判断

$$|\rho_i^{(t+1)} - \rho_i^{(t)}| \leq \varepsilon$$

$\varepsilon$  是很小的正实数。若收敛, 则算法结束; 否则, 跳转到 1)。

**Step3** 计算下一步迭代步长为

$$v^{(t)} = \frac{1}{\ln(e+t)}$$

令  $\rho_i^{(t+1)} = \rho_i^{(t)}$ ,  $t \rightarrow t+1$ , 返回至 Step2, 继续执行。

在算法 1 执行后, 即可以获得速率纳什均衡解  $\rho^{(\text{NES})}$ , 在此基础上启动算法 2 寻找速率纳什合作议解  $\rho^{(\text{NBS})}$ 。

#### 算法 2 RNRM 集中式 TRM 速率分配算法

该算法是建立在 TRM 的分布式速率选择的基础上, 处理如下预测和迭代中 RNRM 将利用完全信息外, 与算法 1 相同。由于 RNRM 可以获得全局效用信息  $\frac{1}{N} \sum_{i \in N} u_i^{(t)}$ , 因此, 采用如下预测方程:

$$\tilde{\theta}_i^{(t+1)} = (1-v^{(t)})\theta_i^{(t)} + v^{(t)} \frac{1}{N} \sum_{i \in N} u_i^{(t)}$$

预测将会更加准确。

进而, 每个 TRM 在上述精确预测信息的支持下实现速率迭代。

$$\rho_{i,\text{NBS}}^{(t+1)} = \frac{\theta_i^{(t+1)}}{\lambda_i} + \rho_{i,\text{NES}}^{(t+1)}$$

由上式可知, 集中式 TRM 速率分配算法 2 需要获得系统内的全局信息, 而分布式算法 1 则只求本地信息。

### 6 仿真参数设置和结果分析

将本文中的方法应用到第三代移动通信网络中, 结合 3GPP TS25.814 中关于拓扑的描述和 3GPP TSG-RAN1#48(R1-070674) 中关于业务特征的描述, 本文中的仿真场景参数设置如表 1 所示。

表 1	参数设置
参数	取值
系统带宽	5MHz
终端发射功率	21dBm
路径损耗	$L=128.1+37.6\lg R$ ，其中， $R$ 为距离，单位为 km
噪声功率	-120 dBm
业务模型	FTP、HTTP、视频、VoIP

为了保证终端之间传输速率有相同的变化区间，仿真假设系统内的终端均匀分布在以基站为中心，距离基站为 300m 的圆上，并且基站采用理想的调度算法和功率控制技术。

针对终端运行业务对于传输速率和速率干扰的偏好程度，TRM 分布式速率选择注水算法和 RNRM 集中式 TRM 速率分配算法都预先设定了参数  $\alpha_i, \beta_i, i \in N$ 。FTP 业务对于传输速率不敏感，故该类终端会选择较小的  $\alpha_i$  值；HTTP 业务对速率提升带来的终端体验提升十分明显，故该类终端会选择一个较大的  $\alpha_i$  值；VoIP 业务本身对于传输速率要求并不高，但是对于干扰比较敏感，因此选择较小的  $\alpha_i$  和较大的  $\beta_i$ ；视频业务对于速率和干扰都比较敏感，因此选择较大的  $\alpha_i$  和  $\beta_i$ 。

### 6.1 收敛性验证

按照算法 1 的 Step1 进行仿真初始化，分别验

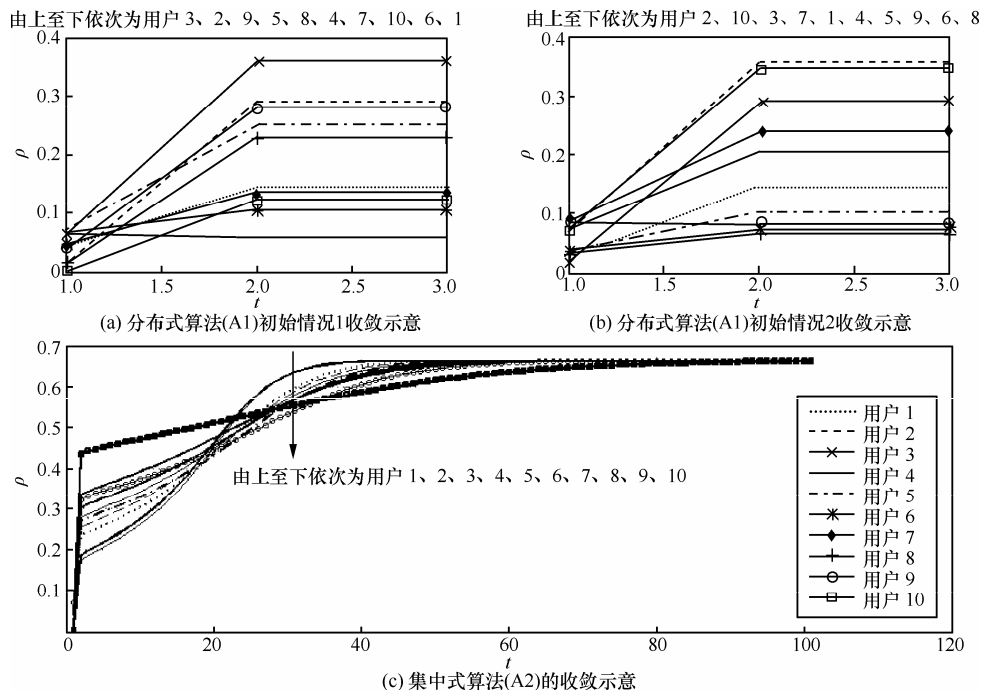


图 4 收敛性验证

证 TRM 分布式速率选择注水算法(A1)和 RNRM 集中式 TRM 速率分配算法(A2)的收敛性。

图 4(a)和图 4(b)是 TRM 分布式速率选择注水算法(A1)的收敛性验证图，对于该算法分别采用不同的初始速率数值，分别表示为图 4(a)和图 4(b)，可以看出经过 2~3 次迭代即可保证提出算法的均衡收敛。图 4(c)是对于提出的 RNRM 集中式 TRM 速率分配算法(A2)的收敛性曲线，由于采用的是全局信息的搜集，因此算法需经过 60~80 次的迭代方可收敛。

### 6.2 性能验证

采用系统效用作为效率的量度，给出合作和非合作的比较如图 5 所示。

从图 5 可以看出，RNRM 集中式 TRM 速率分配算法(A2)比 TRM 分布式速率选择注水算法(A1)获得近 60%的效能改善。由于 TRM 分布式速率选择注水算法(A1)是在每个终端上独立运行的，终端有限的运算能力导致其不能准确地感知到干扰信息。在不准确的干扰信息作用下，TRM 分布式速率选择注水算法(A1)使得终端效用值恶化。相反，RNRM 集中式 TRM 速率分配算法(A2)则使用全局效用信息来预测每个终端的干扰信息，进而保证了 RNRM 为终端分配合理的传输速率，从而使终端获得相对较高的效用值。从图 5 中还可以看出随着终端数量的上升，运行(A1)算法终端的平均效用有略微下降，而



运行(A2)算法的终端的效用值改变不大, 这从一定程度上说明本文中提出的算法具有良好的拓展性。

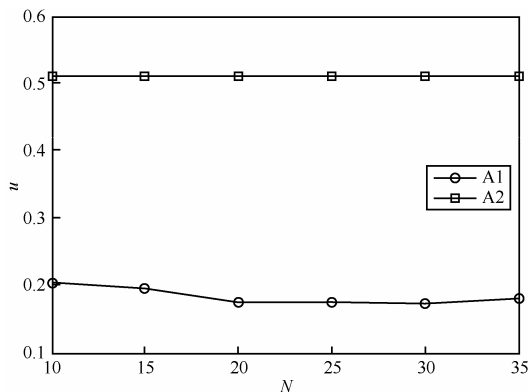


图 5 合作和非合作的效率比较

采用 Jain's 公平性指数统一量度提出算法的公平性, 即

$$J = \frac{\left(\sum_{i=1}^N u_i\right)^2}{N \sum_{i=1}^N u_i^2}$$

合作和非合作的比较如图 6 所示。

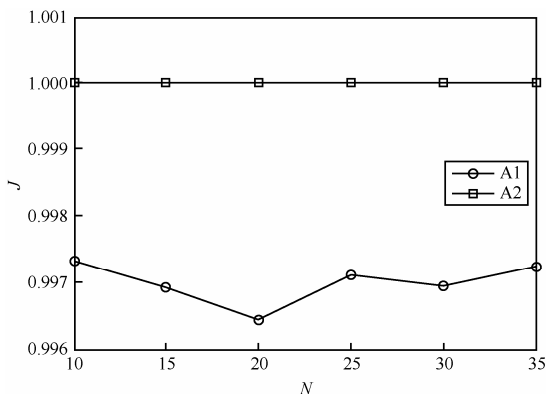


图 6 公平性比较

从图 6 中可以看出 RNRN 集中式 TRM 速率分配算法(A2)相对于 TRM 分布式速率选择注水算法(A1)获得一定的改善, 但是这个改善并不十分明显, 主要原因是本文考察的 TRM 非合作博弈模型已经引入定价函数设计, 因此保证了 TRM 速率选择的公平性。从算法设计中可以看到, 无论是 TRM 分布式速率选择算法(A1)还是 RNRN 集中式 TRM 速率分配算法(A2)对于终端干扰信息的预测都采用了相同的方法, 但是算法(A2)在预测干扰值时使用了全局效用信息, 这样使在使用同样的预测方法的基础上对于预测的准确性有一定的提升, 这为 RNRN

集中式 TRM 速率分配算法(A2)合理地分配终端的传输速率提供了一定的保证。

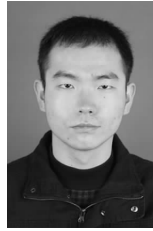
### 7 结束语

在改进 IEEE 1900.4 系统架构的基础上, 本文首先提出多层速率控制框架, 并探讨环形信息流的架构实现方案。分析 TRM 非合作速率选择博弈, 包含均衡速率解的存在性、唯一性和帕累托最优性等的证明。基于纳什合作博弈探讨 RNRN 合作速率分配博弈, 最后提出 TRM 分布式速率选择注水算法和 RNRN 集中式 TRM 速率分配算法, 并通过仿真得出结论: 后者比前者获得近 60%的效能改善和公平性改善, 同时也验证了定价函数设计的有效性和改进的公平性。

### 参考文献:

- [1] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive networks[A]. Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore, MD, USA, 2005. 1-8.
- [2] FORTUNA C, MOHORCIC M. Trends in the development of communication networks: cognitive networks[J]. Computer Networks, 2008, 53(9):1354-1376.
- [3] KELLY F, MAULLOO A, TAN D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability[J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3):237-252.
- [4] YI Y, CHIANG M. Stochastic network utility maximization[J]. European Transactions on Telecommunications, 2008, 1(1):1-20.
- [5] ALTMAN E, BAAR T. Multi-user rate-based flow control[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(7):940-949.
- [6] WANG B, WU Y, RAY LIU K J. Game theory for cognitive radio networks: a tutorial survey[J]. Computer Networks, 2010, 54(14):2537-2561.
- [7] NEEL J, REED J, GILLES R G. Convergence for cognitive radio networks[A]. Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference[C]. Atlanta, Georgia, USA, 2004. 2250-2255.
- [8] TSAMIS D, ALPCAN T, BAMBOS N. Game theoretic rate control for mobile devices[A]. 2009 International Conference on Game Theory for Networks[C]. Istanbul, Turkey, 2009. 646-652.
- [9] ZHOU P, YUAN W, LIU W, et al. Joint power and rate control in cognitive radio networks: a game-theoretic approach[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2008. 3296-3301.
- [10] LI H Y, GAI Y B. Optimal power control game algorithm for cognitive radio networks with multiple interference temperature limits[A]. IEEE 67th Vehicular Technology Conference[C]. Lalgary, Canada, 2008. 1554-1558.
- [11] CHEN Y, WANG B B, LIU K J RAY. Multiuser rate allocation games for multimedia communications[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2009, 11(6):1170-1181.
- [12] BULJORE S, HARADA H, FILN S. Architecture and enablers for optimized radio resource usage in heterogeneous wireless access networks: the IEEE 1900.4 working group[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1):122-129.
- [13] YANG C, LI J. Joint resource management framework under IEEE P1900.4: a network utility maximization approach[A]. MobiCom 2009[C]. Beijing, China, 2009. 1-3.

- [14] YANG C, LI J. Dynamic resource management mechanism design for heterogeneous networks under IEEE1900.4 framework: a network utility maximization perspective[A]. 2010 IEEE International WCNIS2010[C]. Beijing, China, 2010. 1-6.
- [15] BERTRAND A, MOONEN M. A New Convergence Theorem for Relaxed Fixed Point Iteration and Its Application to the Computation of Nash Equilibria[R]. Internal Report 08-158, ESAT-SISTA, K U Leuven (Leuven, Belgium), 2008.
- [16] YATES R D. A framework for uplink power in cellular radio systems control[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7):1341-1347.
- [17] SUNG C W. A generalized framework for distributed power control in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(7):2625-2635.
- [18] YANG C G, LI J D, TIAN Z. Optimal power control for cognitive radio networks with coupled interference constraints: a cooperative game-theoretic perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4):1696-1706.



**董延杰** (1989-), 男, 陕西西安人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为移动通信中的无线资源管理、无线网络的干扰管理。



**李建东** (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信 (未来移动通信和未来局域网)、大规模 ad hoc 网、软件无线电等。

**作者简介:**



**杨春刚** (1982-), 男, 黑龙江肇东人, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为认知无线网络、无线资源管理和博弈论等学科在无线网络中的应用等。



**李红艳** (1966-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为异构网络融合、无线移动自组织网络、无线传感器网络、深空通信网络等。



**盛敏** (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、QoS 保障技术、认知网络等。



**刘勤** (1976-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、移动通信、通信仿真、空时处理等。

(上接第 125 页)

- [13] LAURENT P A. Exact and approximate construction of digital phase modulations by superposition of amplitude modulated pulses[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, COM-34(2):150-160.
- [14] HUANG X, LI Y. MMSE-optimal approximation of continuous-phase modulated signal as superposition of linearly modulated pulses[J]. IEEE Trans on Commun, 2005, 53(7):1166-1177.
- [15] XIAO M, AULIN T. Serially concatenated continuous phase modulation with convolutional codes over rings[J]. IEEE Trans Commun, 2006, 54:1387-1396.
- [16] 吴湛击, 王文博. 现代纠错编码与调制理论及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.  
WU S J, WANG W B. Error Control Coding and Modulation Theory[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2008.
- [17] 殷柳国, 陆建华, 裴玉奎. 极短码长密度奇偶校验码的编码方法[P]. ZL200910077183.6, 2009.  
YIN L G, LU J H, PEI Y K. An Encoding Method of Low Density Parity Code (LDPC) with Extremely Short Length[P]. ZL200910077183.6, 2009.

**作者简介:**



**戴晓洁** (1988-), 女, 陕西商南人, 清华大学硕士生, 主要研究方向为深空通信编码与解调。



**詹亚锋** (1976-), 男, 湖北黄梅人, 博士, 清华大学副研究员, 主要研究方向为深空通信、高性能编码调制技术、卫星通信。