

Jiyu Boyilun De Wuxian Wangluo Ziyuan Jingzheng

Yu Xiezuozuo Jizhi Yanjiu

基于博弈论的 无线网络资源竞争与协作机制研究

张国鹏 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基于博弈论的无线网络资源 竞争与协作机制研究

张国鹏 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书使用博弈理论对无线网络资源分配中所存在的用户终端协作与竞争问题进行分析,研究了能够激励用户参与网络协作的竞争机制,在优化网络系统性能的同时实现对资源的公平分配。

全书共九章,涉及无线通信子网的物理层、媒体接入层和跨层设计三个具体的研究方向,提供了使用博弈论数学模型研究冲突对抗条件下自私性节点最优决策过程的基本思路。

本书可以作为高等学校和研究机构通信和相关专业的研究生或科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于博弈论的无线网络资源竞争与协作机制研究 /

张国鹏著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2011.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1262 - 7

I. ①基… II. ①张… III. ①无线网—资源管理—研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 197717 号

书 名 基于博弈论的无线网络资源竞争与协作机制研究

著 者 张国鹏

责任编辑 王加俊 孟 茜

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail:** cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 **印张** 4.875 **字数** 125 千字

版次印次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

部署和维护传统的基于集中式控制的无线通信系统需要耗费大量的时间、物力和人力资源,而由独立、自治的用户终端通过彼此协作分布式地实现网络功能,则能够减小组网成本,增加网络部署的灵活性。然而,在这种分布式环境中,用户终端由于无法获取网络全局或者其他用户的信息而表现出自私性和理性,即为了优化自己的性能指标,非协作地竞争共享的网络资源,由此造成系统整体性能以及其他用户性能的急剧下降。因此,必须设计出有效的竞争与协作机制,激励自私用户参与网络协作,实现对资源公平、有效的共享。而博弈论则是分析博弈参与者竞争和协作机制的数学工具,是使用严谨的数学模型研究冲突对抗条件下最优决策问题的理论。

本书使用博弈理论对无线网络资源分配中所存在的用户终端协作与竞争问题进行分析与研究,设计能够激励用户参与网络协作的竞争机制,在优化网络系统性能的同时实现对资源的公平分配。

全书共分为三个研究内容。在无线通信网络的物理层,研究了协作通信过程中功率以及频谱带宽分配问题。在多址接入层,基于非协作博弈论研究了一种无线局域网多址接入协议,用于提高 IEEE 802.11 无线局域网分布式协调协议(DCF)的性能。在跨层设计方面,首先,应用协作博弈论提出一种正交频分多址(OFDMA)网络下行链路功率和子载波分配算法,在有效利用系统资源的同时满足用户间的服务质量(QoS)公平性;此后,基于非

协作博弈论提出一种多小区 OFDMA 子载波和功率分配方案。

本书的主要内容为作者在西安电子科技大学攻读博士学位期间的研究成果。本书的完成得到了西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室张海林教授和赵力强教授的悉心指导和支持,以及王伟博士和从犁博士在理论完善和实验上的帮助。本书的出版得到了中国矿业大学物联网研究中心刘鹏副教授的帮助。鉴于作者水平,难免有不妥之处,欢迎读者指正。

张国鹏

于中国矿业大学

2011. 8. 29

主要缩略语对照表

AWGN	Additive White Gaussian Noise	加性白高斯噪声
AC	Access Category	接入类型
AP	Access Point	接入点
BER	Bit Error Rate	误比特率
BS	Base Station	基站
BWA	Broadband Wireless Access	宽带无线接入
CAC	Call Admission Control	呼叫接入控制
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CRG	Cooperative Relay Game	协作中继博弈
CSMA/ CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	载波监听多路访问/ 碰撞避免
CSI	Channel State Information	信道状态信息
DCF	Distributed Coordinated Function	分布式协调功能
DIFS	Distributed Inter-Frame Space	分布式帧间距

EDCA	Enhanced DCF Access	增强型 DCF
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址
G-DCF	Game theoretic Distributed Coordinated Function	基于博弈论的分布式 协调功能
GPF	Generalized Proportional Fairness	广义比例公平性
LB	Load Balance	负载均衡
MAC	Medium Access Control	媒体接入控制
MANET	Mobile Ad Hoc Network	移动 Ad Hoc 网络
MIMO	Multi-Input Multi-Output	多输入多输出
MRC	Maximum Ratio Combining	极大比合并
NBS	Nash Bargaining Solution	纳什议价解
NE	Nash Equilibrium	纳什均衡
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址
PF	Proportional Fairness	比例公平性
PMP	Point to Multi-Point	点对多点
PSK	Phase Shift Keying	相移键控
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制

QoS	Quality of Service	服务质量
SER	Symbol Error Rate	误符号率
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio	信干比
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SS	Subscribe Station	用户站
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TROP	Trasmission Opportunity	发射机会
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network	无线城域网

主要数学符号汇总

x	小写斜体字母表示标量
$\mathbf{x}$	小写粗斜体字母表示向量(矢量)
$\mathbf{X}$	大写粗斜体字母表示矩阵
$\mathcal{X}$	大写花体表示集合
$x_{m,n}$ 或 $[\mathbf{X}]_{m,n}$	矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 m 行、第 n 列元素
$\mathbf{I}_N$	N 维单位阵
$\mathbf{0}$	全零矩阵
$\mathbb{R}、\mathbb{Z}、\mathbb{C}$	实数域、整数域、复数域
$\mathbb{R}^{m \times n}、\mathbb{Z}^{m \times n}、\mathbb{C}^{m \times n}$	维度为 $m \times n$ 的实数空间、整数空间、复数空间
$\text{diag}(\cdot)$	对角矩阵
$\text{vec}(\mathbf{A})$	将矩阵 $\mathbf{A}$ 逐行展开成列矢量
$\det(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的行列式
$ \cdot $	绝对值或模
$(\cdot)$	数学期望(集平均)
$\exp(x)$	指数运算 e^x
$\ln(\cdot)$	自然对数
$\log_a(\cdot)$	以 a 为底的对数
$\max(\cdot)$	最大值
$\min(\cdot)$	最小值
$\arg \max(\cdot)$	目标函数取最大值对应的自变量值
$\arg \min(\cdot)$	目标函数取最小值对应的自变量值

目 录

1 绪论	1
1.1 无线网络中的协作问题	1
1.2 协作行为与博弈论	6
1.3 主要内容	8
1.4 结构安排	12
2 博弈论思想和基于博弈的数学建模方法	15
2.1 博弈论思想与经济学	15
2.2 非协作博弈论的分类和解的概念	17
2.3 协作博弈论	19
2.4 小结	21
3 协作通信网络中公平的资源共享算法	22
3.1 研究背景	22
3.2 系统模型	24
3.3 协作中继策略	26
3.4 博弈建模	27
3.5 博弈求解	28
3.6 仿真分析	29
3.7 小结	32

4 Ad Hoc 网络中基于斯坦克贝格博弈的多用户协作通信资源竞争算法	33
4.1 协作中继网络中资源分配机制的分类.....	33
4.2 基于 Ad Hoc 网络的协作中继系统模型.....	34
4.3 效用函数设置及博弈建模.....	37
4.4 博弈 CRG 纳什均衡的分布式求解算法及其稳定性分析	42
4.5 仿真验证与分析.....	46
4.6 研究展望.....	53
4.7 小结.....	54
5 基于非完全信息动态博弈的 IEEE 802.11 DCF 协议性能分析与改进	55
5.1 IEEE 802.11 DCF 简介与相关研究背景	55
5.2 WLAN 信道竞争的博弈建模及分析	57
5.3 协议实现.....	60
5.4 仿真实验.....	64
5.5 小结.....	69
6 基于队列调度和非完全协作博弈的 802.11 MAC 协议	70
6.1 IEEE 802.11 系列协议简介与公平性问题的研究背景	71
6.2 比例公平性的站点内队列调度机制 $S_{intra-node}$	74
6.3 基于非完全协作博弈的信道竞争机制 $S_{inter-node}$	76
6.4 仿真分析.....	79
6.5 小结.....	83

7 基于协作博弈论的 OFDMA 系统下行链路资源分配算法	84
7.1 OFDMA 资源分配的研究综述	85
7.2 OFDMA 网络资源分配的博弈建模	86
7.3 动态子载波分配	89
7.4 自适应的功率分配	92
7.5 用户接入控制	95
7.6 仿真结果	97
7.7 小结	101
8 基于非协作博弈论的能量有效性多小区 OFDMA 系统资源分配	102
8.1 多小区 OFDMA 系统资源分配的研究现状	103
8.2 系统模型	104
8.3 能量有效性的用户效用函数	106
8.4 博弈建模	108
8.5 博弈求解算法	111
8.6 博弈 NC-RAG 均衡解的非效率性和 Pareto 改进	114
8.7 仿真验证	116
8.8 结论	124
9 总结与展望	125
9.1 总结	125
9.2 进一步的研究工作	127
参考文献	130

1 绪 论

本章对本书的研究背景、研究目的、研究内容等进行概括性介绍与说明。首先,通过介绍无线网络各层协议中所存在的用户节点非协作竞争实例,论述了解决用户协作、公平共享网络资源的必要性。然后,对使用博弈论研究上述协作问题的适用性进行了分析,并概括了无线通信网络中协作机制所要解决的基本问题实质。最后,对本书的主要贡献作了说明,并给出了本书的结构安排。

1.1 无线网络中的协作问题

自从 1897 年马可尼(Guglielmo Marchese Marconi, 1874—1937)第一次向世人展示无线电通信以来,无线通信技术已经得到了长足的发展。迄今为止,人们已经开发设计了多种类型的无线通信系统,而其中基于点对多点(PMP: Point to Multipoint)拓扑结构的无线蜂窝移动通信系统得到了最为广泛的应用。在基于 PMP 体系结构的无线通信系统中,由唯一的基站(BS: Base Station)管理网络的全部资源,控制用户站(SS: Subscriber Station)的接入,向用户站提供语音和多媒体服务。

另一种应用较为广泛的网络体系结构就是无线移动 Ad Hoc 网络(MANET: Mobile Ad Hoc Network)。在 Ad Hoc 网络中,没有基础设施(infrastructure)和集中式管理机制,网络的系统功能需要由分布且独立的节点之间进行协作来完成。Ad Hoc 网络最初被设计用于军事、抢险救灾等场合,现在也已被广泛应用于商

业网络,如 IEEE 802. 11 无线局域网(WLAN: Wireless Local Area Network)的 Ad Hoc 模式^[1]和 IEEE 802. 16 无线城域网(WMAN: Wireless Metropolitan Area Network)的 Mesh 模式^[2]。

在传统的 PMP 网络中,基站是网络中唯一的资源管理和任务协调、调度设备,而用户站作为被管理设备没有任何的自主性。Ad Hoc 网络体系结构的出现,改变了人们基于传统 PMP 体系结构、集中式资源管理的通信系统设计和构建理念,开始将网络中的行为决策功能更多地放在用户端执行^[3]。这样做的好处是使网络的系统功能由多个用户站分布式实现,不仅可以有效减小基站的设计复杂度和计算负担,而且更易于网络随着应用环境的变化进一步扩展。在这一方面,最典型的应用就是为满足用户 Internet 宽带无线接入(BWA: Broadband Wireless Access)和“最后一英里通信”需求所提出的 802. 11 Mesh^[4]和 802. 16 Mesh^[2,5]体系结构。Mesh 即网状网结构,它实际上就是 PMP 网络体系结构和 Ad Hoc 网络体系结构的复合体,使得远端的用户站能通过中间用户站的数据存储转发,最终通过基站(或称为 Mesh 接入点)实现向 Internet 的无线接入。

随着系统配置、管理以及决策功能更多的由自治用户节点分布式地实现,网络中的用户站表现出越来越强的自治性,伴随而来的就是用户站之间的竞争与协作问题。由于用户站之间的对等性,此时,不仅仅是系统的性能,包括系统中其他用户的性能都更多地取决于个别用户站的网络行为决策。为了更明确地说明用户站的个体行为决策对系统整体性能以及其他用户站性能的影响,下面我们按照无线通信网络的体系结构,对各层协议栈所存在的协作问题进行实例化描述。

1. 1. 1 物理层的功率控制问题

在基于码分多址(CDMA: Code Division Multiple Access)的

无线移动蜂窝通信系统的上行链路,移动用户站的性能更多地取决于其发送信号的接收质量,即信号在接收端的接收信干比(SINR: Signal to Interference and Noise Ratio)^[6]。令 $\mathcal{J} = \{1, \dots, N\}$ 表示系统中的用户集合,则用户 $i (i \in \mathcal{J})$ 的接收信干比可表示为

$$\text{SINR}_i = \frac{p_i h_i^{\text{BS}}}{\sum_{j \neq i} p_j h_j^{\text{BS}} + \sigma^2}, i \in \mathcal{J} \quad (1-1)$$

式中, p_i 是用户站 i 的发送功率, h_i^{BS} 是用户站 i 到基站 BS 的信道衰落系数, σ^2 是信道的加性白高斯噪声。由式(1-1)可见,用户站 i 的信干比 SINR_i 随着其发送功率 p_i 的增加而增大。在商用网络中,不同的用户站隶属于不同的用户个体,因此每个用户站 $i (i \in \mathcal{J})$ 都希望最优化自己的性能,于是也就有了最大化其信干比 SINR_i 的动机。根据式(1-1),对于用户 i 来说,高信干比可以通过提高其信号发送功率 p_i 获得。可是,当系统中每个自治用户都提高其发送功率用以最大化各自的信干比时,对于任意一个用户 i 而言,式(1-1)中的 $\sum_{j \neq i} p_j h_j^{\text{BS}}$ 项就会无限制地增大,即每个用户都将面临更差的信道条件,从而迫使其进一步提高发送功率,最终演变成“公共地的悲剧”^[7-8]。

1.1.2 MAC 层的自私性信道侵占问题

以分组(packet)的形式在公共信道上发送信息的无线多用户通信系统中,由于用户站的分组按照某种统计模型产生,所以用户的信道接入基本上是随机的。当有一个或多个分组需发送时,用户接入信道,当多于一个的用户试图同时在信道上发送分组时,分组在时间上重叠,即发生冲突碰撞。因此,必须通过设计某种分组重传信道协议来解决上述冲突问题。时隙制 Aloha(Slotted Aloha)^[9]和载波监听多路访问/碰撞避免(CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance)^[10]都是这个领域的代

表性协议。

在时隙制 Aloha 协议中,某用户站的吞吐量由其在给定时隙的分组发送概率 τ 所决定,且用户的吞吐量随着其发送概率 τ 的增加而增大。当网络中每个用户站都希望最大化自己的吞吐量时,则每个用户在任意时隙都会采用其最大发送概率($\tau=1$)。这显然会造成网络中的碰撞现象加剧,严重恶化系统性能,使系统的吞吐量趋近于 0^[11-12]。

IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordinated Function)^[1]是当前应用最为广泛的 CSMA/CA 协议。DCF 对无线局域网中不同类型的数据业务提供一致的尽力而为(best effort)服务,而其增强版本 IEEE 802.11e EDCA (Enhanced DCF Access)^[13]则能对不同类型的业务流进行按优先级的服务质量(QoS: Quality of Service)区分服务。EDCA 中不同类型的用户业务具有不同的竞争窗参数 $[CW_{\min,i}, CW_{\max,i}]$,其中 $i(0 \leq i \leq 3)$ 表示用户业务流所属的优先级。较小的 $[CW_{\min}, CW_{\max}]$ 意味着用户站将获得更小的分组发送时延或者更大的数据速率。然而当网络中每个用户站都希望最小化自己的时延或最大化自己的数据速率而选取最小的竞争窗参数 $[CW_{\min}, CW_{\max}]$ 时,就会造成网络由于碰撞加剧而更为拥塞,反而使得所有用户的性能都被降低^[14-16]。

要解决上述 MAC 层的用户自私性问题,需要在用户之间达成有效、公平的信道资源竞争协议,使其不至于演变成“囚徒困境”(Prison Dilemma)问题(参见本书 1.2 节)^[17]。

1.1.3 网络层的协作中继转发问题

实现移动 Ad hoc 或 Mesh 网络中的多跳(multi hops)节点间数据通信服务,需要中间节点对数据源节点的数据分组进行中继转发,即数据分组的路由(routing)服务。由于移动节点的能量有限,且中继其他节点的数据分组需要能量开销,因此中间节点从节约能量、延长工作时间来考虑,就会拒绝其他节点的中继转发请

求,从而形成了如下所述的网络层不协作行为^[18-25]。

设移动 Ad Hoc 网络中共有 N 个节点,令 $i(i \in N)$ 表示网络中任意节点, N_{-i} 表示除去节点 i 以外的其他 $N-1$ 个节点,如图 1-1 所示。

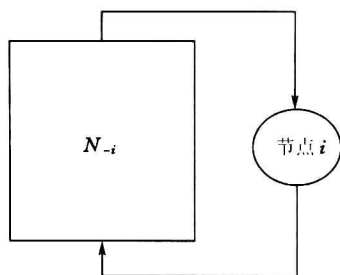


图 1-1 无线多跳 Ad Hoc 网络的中继协作模型

定义由数据源节点 i 产生的待发数据分组为节点 i 的分组,系统的时间单位为离散时隙 $t(t=1,2,\dots)$ 。假设在 t 时隙,中间节点集 N_{-i} 中继节点 i 的分组数为 $s_i(t)$, i 中继 N_{-i} 的分组数为 $f_i(t)$ 。令 $b > \bar{l}c > 0$, 其中 $\bar{l}$ 是所有由源节点 i 发起会话所经过中继节点数的平均值; b 为节点 i 的一个分组被成功发送后所获得的收益; c 为节点 i 中继任意节点 $j(j \in N_{-i})$ 的一个分组的开销,且 b 和 c 均为常数。则节点 i 在任意时隙 t 参与中继协作后的收益函数为

$$u_i(t) = bs_i(t) - cf_i(t) \quad (1-2)$$

式(1-2)表示在 t 时隙节点 i 从为其提供中继服务的 $\bar{l}$ 个节点中所获取的收益。其中, c 的取值与节点 i 中继一个分组所需的能量开销相关。

网络中每个节点都属于不同的用户所有,且都希望通过参与