



国防科技图书出版基金

无线网络中的博弈论

Game Theory for Wireless Networks

何世彪 吴乐华 胡中豫 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

无线网络中的博弈论

Game Theory for Wireless Networks

何世彪 吴乐华 胡中豫 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

无线网络中的博弈论/何世彪,吴乐华,胡中豫编著.
—北京:国防工业出版社,2016.4
ISBN 978-7-118-10199-7

I. ①无… II. ①何… ②吴… ③胡… III. ①博弈
论-应用-无线电通信-通信网-研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 064375 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14¼ 字数 260 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

博弈的形式和方法在人类活动中早已存在,但博弈论作为系统理论的呈现较晚,19 世纪学术界开始研究经济学中的博弈行为,最著名的有关于产量决策的古诺(Gournot)博弈和关于价格决策的贝特兰德(Bertrand)博弈。现代博弈论起源于 20 世纪初,标志性成果是冯·诺伊曼(von Neumann)和摩根斯坦恩(Morgenstern)合著的《博弈论与经济行为》一书。50 年代,纳什(Nash)研究了非合作博弈形式,并提出了纳什均衡的概念,为非合作博弈的一般理论奠定了基础。60 年代现代博弈论成熟,不完全信息的扩展使得博弈理论变得更具有广泛的适应性,基本概念也得到系统阐述与澄清,博弈论成了完整而系统的理论。70 年代以后,博弈论得到进一步发展和丰富,除在经济领域获得巨大成功的应用之外,对相关的学科也产生了强有力的影响;同时,计算机技术的飞速发展使得复杂博弈模型求解变得可能,人们开始使用博弈论的思想与方法分析和解决工程领域问题。

在需求牵引和技术推动下,许多新的通信技术与新型无线网络得到迅猛发展,网络的形态各异、结构复杂、功能多样,使得使用传统的分析方法和理论工具分析无线网络的相关问题变得越来越吃力,因此需要有新的理论、方法和工具分析无线通信领域的相关问题。博弈理论正成为许多新理论、新方法中的最有代表性和最有发展前景的一种理论方法。近年来的研究表明,无线网络的几乎所有问题,都可利用博弈论的方法进行建模和分析,最典型的如功率控制、干扰避免、接入控制、频谱共享、路由、拥塞控制、资源分配、网络攻防及信息安全问题、跨层设计和优化、信任管理等。

本书在阅读大量文献的基础上,结合作者的探索实践,从工程应用角度对博弈论的基本概念、基本形式、基本定义、基本定理、基本博弈模型及相关性质进行了全面的梳理和介绍。结合无线网络中的博弈应用,对博弈的主要模型和建模方法进行了系统的归纳。对于博弈论在无线网络中的典型应用,如功率控制、资源分配、干扰避免、主动防御、跨层优化等问题的博弈建模、算法实现及性能评价进行了全面分析和讨论。对博弈论在无线网络中其他前瞻性问题进行了初步阐述。

本书的主要特点:

(1) 系统性。系统地介绍博弈论的基本概念、基本定理、基本定义、相关博弈性质、常见博弈形式和博弈建模基本方法。

(2) 针对性。无论是从博弈的概念阐述还是其应用都基于无线网络的需求,而不像一般的博弈论书籍主要针对经济学的应用,书中所举的例子基本上是针对

无线网络中的具体问题进行博弈建模的。

(3) 新颖性。汇集了最新的研究成果,将近年来涌现的大量研究成果进行归纳和总结,整理出博弈论典型应用模式,而这些应用又具有方法论的意义。

(4) 理论性。涉及无线网络及其发展的总体趋势、基本理念以及一些技术问题的深层思考,如智能通信的问题、与环境的最优匹配问题、通信中的合作问题、局部最优与全局最优问题等。

(5) 创新性。书中包含了作者多年的研究心得和学术成果,如认知无线电的频谱分配、功率控制,以及无线 ad hoc 网络的信道分配等。书中引入的算法都经过理论证明或仿真验证,证明其是有效的、正确的。

本书由何世彪教授统一编写,胡中豫教授用多年的研究成果为本书提供了有力支撑,吴乐华教授对本书的材料组织、格式调整及书稿的文字做了大量的工作,研究生苏志广、胡智伦、郑鹏宇、戴昊峰的部分研究成果为本书提供了素材。感谢于全院士及曾孝平教授对本书提出的指导性意见,感谢本书参考文献作者,他们的研究成果为作者提供了有益的启迪,许多关键性成果直接成为本书的支撑。

感谢国防科技图书出版基金的资助,感谢国防科技图书出版基金的评委和国防工业出版社的同仁对本书出版的支持。本书受重庆市科委“应急通信重庆市重点实验室能力提升项目”(编号 cstc2014pt - sy40003)资助。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏、不当之处,恳请广大读者不吝指正。

作者

目 录

第 1 章 博弈论基础	1
1.1 博弈论的发展概况	1
1.2 博弈论的基本概念和术语	3
1.2.1 博弈及博弈论的定义	3
1.2.2 博弈的组成要素	5
1.2.3 策略式博弈和扩展式博弈	7
1.2.4 博弈的分类	8
1.3 纳什均衡	9
1.3.1 动态系统理论	9
1.3.2 纳什均衡定义	14
参考文献	23
第 2 章 博弈模型	24
2.1 古诺博弈和贝特兰德博弈	24
2.1.1 古诺博弈	24
2.1.2 贝特兰德博弈	26
2.2 重复博弈	27
2.2.1 重复博弈的基本概念	27
2.2.2 稳定状态	31
2.2.3 大众定理	34
2.3 马尔可夫博弈	36
2.3.1 马尔可夫链	36
2.3.2 各态历经马尔可夫链	36
2.3.3 吸收马尔可夫链	39
2.4 位势博弈	41
2.4.1 位势博弈的定义	41
2.4.2 位势博弈的识别技术	46
2.4.3 通用精确位势博弈的形式	48
2.4.4 位势博弈的特殊性质	52

2.4.5 位势博弈的稳定状态	57
2.5 超模博弈	58
2.6 演化博弈	59
参考文献	60
第3章 无线网络中博弈论应用议题	62
3.1 ad hoc 网络博弈建模	62
3.1.1 ad hoc 网络应用博弈论的好处及挑战	62
3.1.2 ad hoc 网络中不同层的博弈论应用	63
3.1.3 激励机制	72
3.2 无线传感网络中主动防御机制博弈分析	78
3.2.1 无线传感器网络中攻防的博弈模型	78
3.2.2 基于演化博弈的主动防御	79
3.3 基于博弈论的跨层优化设计	82
3.3.1 跨 TCP 和 MAC 层优化的博弈建模	82
3.3.2 跨 TCP 层和物理层优化的博弈建模	84
3.3.3 跨应用层和 MAC 层优化的博弈建模	85
3.3.4 跨 MAC 层和物理层优化的博弈建模	86
3.3.5 跨网络层和 MAC 层优化的博弈建模	87
3.3.6 跨 TCP 层和网络层优化的博弈建模	88
3.3.7 跨网络层和物理层优化的博弈建模	88
3.4 无线网络中博弈论其他应用议题	89
3.4.1 分布式决策的信息作用	89
3.4.2 认知无线电及学习	90
3.4.3 突现行为	90
3.4.4 机制设计	90
参考文献	91
第4章 无线网络中基于博弈论的功率控制	96
4.1 蜂窝网络中的功率控制	96
4.1.1 效用函数的选择	96
4.1.2 基于效用函数的功率控制	99
4.1.3 纳什均衡的存在性及非合作均衡性质	100
4.1.4 执法博弈	101
4.1.5 重复博弈	102

4.1.6	不同功率控制方案的比较	103
4.2	无线 ad hoc 网络中的功率控制	105
4.2.1	系统模型	105
4.2.2	最大化吞吐量的非合作控制博弈	106
4.3	认知无线电中的功率控制	110
4.3.1	认知无线电各要素与博弈论各部分之间的映射	110
4.3.2	基于博弈论的认知无线网络功率控制算法	111
4.4	基于代价函数的功率控制	120
4.4.1	代价函数的建立	121
4.4.2	基于代价的联合功率控制算法	128
	参考文献	131
第 5 章	基于博弈论的无线网络资源分配	133
5.1	认知无线电中频谱分配博弈	133
5.1.1	博弈的基本问题	133
5.1.2	频谱共享的博弈算法	135
5.1.3	基于定价拍卖的频谱共享模型	139
5.2	基于代价的 ad hoc 网络带宽分配方法	147
5.2.1	定价模型	147
5.2.2	最优解	150
5.2.3	迭代算法	151
5.2.4	有线 Point-to-Point 网络中基于定价带宽分配的例子	153
5.2.5	收敛分析	155
5.2.6	数值结果	158
5.3	基于博弈论的多无线电多信道无线网络中的信道分配	159
5.3.1	单冲突域非合作的信道分配	159
5.3.2	多冲突域多无线电多信道无线网络中的信道分配	171
	参考文献	182
第 6 章	基于博弈论的干扰避免	183
6.1	无线系统中的干扰避免	183
6.1.1	基本模型	183
6.1.2	多用户的干扰避免	187
6.1.3	贪婪干扰避免算法的不动点性质	191
6.2	基于博弈论的干扰避免算法	201

6.2.1	干扰避免的模型	201
6.2.2	收敛性	203
6.3	非中心网络中基于博弈论的干扰避免	204
6.3.1	系统模型	204
6.3.2	位势博弈公式	205
6.3.3	精确位势博弈举例	207
6.3.4	收敛性质	208
	参考文献	208

Contents

Chapter 1	The Fundamentals of Game Theory	1
1.1	The Development of Game Theory	1
1.2	The Basic Notions and Terms of Game Theory	3
1.2.1	The Definition of Game and Game Theory	3
1.2.2	Basic Elements of Game	5
1.2.3	Strategic Form Games and Extensive Form Games	7
1.2.4	Classification of Game Theory	8
1.3	Nash Equilibrium	9
1.3.1	Dynamical System Theory	9
1.3.2	The Definition of Nash Equilibrium	14
	References	23
Chapter 2	Models of Game Theory	24
2.1	Gournot Game and Bertrand Game	24
2.1.1	Gournot Game	24
2.1.2	Bertrand Game	26
2.2	Repeated Game	27
2.2.1	Basic Concepts of Repeated Game	27
2.2.2	Steady States	31
2.2.3	The Folk Theorems	34
2.3	Markov Games	36
2.3.1	Markov Chains	36
2.3.2	Ergodic Markov Chains	36
2.3.3	Absorbing Markov Chains	39
2.4	Potential Game	41
2.4.1	The Definitions of Potential Games	41
2.4.2	Identification Techniques of Potential Game	46
2.4.3	Common Exact Potential Game Forms	48

2.4.4	Special Properties of Potential Games	52
2.4.5	Steady States of Potential Games	57
2.5	Supermodular Game	58
2.6	Evolutionary Game	59
	References	60

Chapter 3 Related Issues of Game Theory Application on

	Wireless Networks	62
3.1	Modeling ad hoc Networks as Games	62
3.1.1	Benefits and Challenges in Application of Game Theory to ad hoc Networks	62
3.1.2	Game Theory Application in Different Layers of ad hoc Networks	63
3.1.3	Incentive Mechanisms	72
3.2	Active Defense Game Analysis of Wireless Sensor Networks	78
3.2.1	Attack and Defense Game Models in Wireless Sensor Networks	78
3.2.2	Active Defense Based on Evolutionary Game	79
3.3	Cross Layer Design and Optimization Based on Game Theory	82
3.3.1	Game Modeling Optimization Cross TCP and MAC Layer ...	82
3.3.2	Game Modeling Optimization Cross TCP and Physical Layer	84
3.3.3	Game Modeling Optimization Cross Application and Physical Layer	85
3.3.4	Game Modeling Optimization Cross MAC and Physical Layer	86
3.3.5	Game Modeling Optimization Cross Network and MAC Layer	87
3.3.6	Game Modeling Optimization Cross TCP and Network Layer	88
3.3.7	Game Modeling Optimization Cross Network and Physical Layer	88
3.4	The Other Issues of Game Theory Application on Wireless Networks	89
3.4.1	The Role of Information on Distributed Decisions	89
3.4.2	Cognitive Radios and Learning	90

3.4.3	Emergent Behavior	90
3.4.4	Mechanism Design	90
References		91
Chapter 4	Power Control of Wireless Networks Based on Game Theory	96
4.1	Power Control in Cellular Communication Systems	96
4.1.1	Choices of Utility Functions	96
4.1.2	Power Control Based on Utility Function	99
4.1.3	Existence of Nash Equilibrium and Properties of Non-cooperative Equilibrium	100
4.1.4	Refereed Game	101
4.1.5	Repeated Game	102
4.1.6	Comparison among Different Power Control Schemes	103
4.2	Power Control in Wireless ad hoc Networks	105
4.2.1	System Model	105
4.2.2	Maximum Throughput Non-cooperative Power Control Game	106
4.3	Power Control in Cognitive Radio	110
4.3.1	Mapping the Cognition Cycle to a Game	110
4.3.2	Power Control Algorithms Based on Game Theory in Cognitive Radio Networks	111
4.4	Pricing-based Power Control	120
4.4.1	Establishing the Pricing Function	121
4.4.2	Joint Power Control Algorithm Based on Pricing Function	128
References		131
Chapter 5	Resources Allocation with Game Theory for Wireless Networks ...	133
5.1	Spectrum Allocation Game in Cognitive Radio Networks	133
5.1.1	Basic Problems of Game	133
5.1.2	Algorithm of Spectrum Sharing Game	135
5.1.3	Auction-based Spectrum Sharing Model	139
5.2	Pricing-based Approach of Bandwidth Allocation in ad hoc Networks	147
5.2.1	Pricing Model	147

5.2.2	Optimal Solution	150
5.2.3	Iterative Algorithm	151
5.2.4	Price-based Bandwidth Allocation in Wired Point-to-point Networks	153
5.2.5	Convergence Analysis	155
5.2.6	Numerical Results	158
5.3	Channel Allocation Based on Game Theory in Multi-radio Multi-channel Wireless Networks	159
5.3.1	Non-cooperative Channel Allocation in Single Collision Domain	159
5.3.2	Channel Allocation in Multi-radio Multi-channel Wireless Networks with Multiple Collision Domains	171
	References	182
Chapter 6	Interference Avoidance Based on Game Theory	183
6.1	Interference Avoidance in Wireless Systems	183
6.1.1	Basic Model	183
6.1.2	Interference Avoidance for Multiple Users	187
6.1.3	Fixed Point Properties for Greedy Interference Avoidance Algorithms	191
6.2	Algorithms of Interference Avoidance Based on Game Theory	201
6.2.1	Model of Interference Avoidance	201
6.2.2	Convergence	203
6.3	Interference Avoidance Based on Game Theory in Decentralized Networks	204
6.3.1	System Model	204
6.3.2	Formulation of Potential Game	205
6.3.3	Example of Exact Potential Game	207
6.3.4	Convergence Properties	208
	References	208

第1章 博弈论基础

在人类活动中,博弈自古就有,例如,某些对抗性游戏、战争及外交都是博弈过程。博弈是指参与博弈的各方,即参与者按照一定的规则选择策略(或采取行动),以便获得既定目标或收益的相互作用过程。博弈论是研究博弈过程的科学理论或工具集合。博弈论是一门古老而又年轻的学科,我国春秋时期的军事著作《孙子兵法》,在某种意义上就是一部博弈论的著作。近代博弈论的概念和相关的理论出现较晚,主要关注的是经济领域,研究经济活动决策过程和利益最大化的问题。博弈论也是应用数学的一个分支,主要研究最优决策的问题,通常称为“对策论”,它起源于20世纪初期,自80年代以来得到了进一步完善和广泛应用。在这段时间,博弈论除本身发展成为一个相对完善、内容丰富的理论体系,成功应用于经济领域外,还在政治学、生物学、计算机科学、军事、外交、国际关系、公共政策、犯罪学等领域得到广泛应用,并产生了重要影响。近年来,随着无线通信技术的高速发展及广泛应用,在无线网络中出现了一些用传统的分析方法很难解决的问题,于是人们开始将博弈论的理论和方法引用到无线网络中,分析、理解、解决诸如功率控制、资源分配、拥塞控制、路由、拓扑控制、信任管理、跨层优化及其他相关问题。10多年来,有关博弈论在无线网络中的应用取得了许多积极成果,尤其是认知无线电概念提出后,引入博弈论的理论和方法研究解决认知网络中的相关问题,已引起广泛注意和讨论。但是在无线网络中应用博弈论的理论和方法毕竟还处在初级阶段,许多技术人员对于博弈论的基本理论和方法还很陌生,本书就是将博弈论的基本概念、原理和方法,从技术人员的角度进行总结,将近些年来应用博弈论分析解决无线网络中问题的研究成果进行梳理,并结合自己的研究成果,系统阐述无线网络系统中的博弈论应用问题,讨论其发展的相关问题。

1.1 博弈论的发展概况

虽然对博弈的形式和方法研究自古就有,但是现代博弈论作为系统理论的呈现,公认是起源于20世纪初,最早是微观经济学的组成部分。1949年,冯·诺伊曼(von Neumann)和摩根斯坦恩(Morgenstern)合著的《博弈论与经济行为》一书为现代博弈论奠定了理论基础。下面简单回顾现代博弈论的发展过程^[1-3]。