

移动物联网技术

张德干 康学净 张 婷 著

非
外
借



科学出版社

移动物联网技术

张德干 康学净 张 婷 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

移动物联网是移动应用环境下物与物之间连接而成的“互联网”，其关键技术涉及感知层、网络层、应用层的多个方面，本书阐述的相关技术是其中的一个子集，主要包括：认知无线网络中的资源分配、车载自组织网多跳成簇、车联网应用环境中的动态路由和智能数据传输、面向移动自组织网的路由协议、移动物联网中的信号处理等技术。

本书可供计算机、自动化、通信等专业高年级本科生、研究生、教师学习和参考，也适合从事移动计算、物联网、嵌入式系统等相关领域的科研和工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

移动物联网技术 / 张德干, 康学净, 张婷著. — 北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060519-1

I. ①移… II. ①张… ②康… ③张… III. ①互联网络—应用 ②智能技术—应用 IV. ①TP393.4②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 029896 号

责任编辑: 任 静 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 20 3/4

字数: 402 000

定价: 125.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

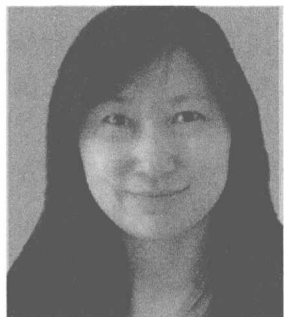
作者简介



张德干，男，湖北省黄冈市英山县人，博士，教授，博士生导师，天津市特聘教授。研究方向为物联网、移动计算、智能控制、无线通信等技术。主持国家 863 计划项目、国家自然科学基金项目、教育部新世纪优秀人才计划项目等 10 余个项目，在 *IEEE Transactions* 等有影响力的国内外期刊和会议上以第一作者发表论文 150 余篇(其中 60 余篇 SCI 索引)，出版学术专著多部，获得专利多项，获得科技奖励多项，是多个国际会议的大会主席。E-mail: zhangdegan@tsinghua.org.cn。



康学净，女，河北省石家庄市人，博士。研究方向为信号处理、物联网等技术。主持国家自然科学基金青年基金项目、中国共产党中央军事委员会科学技术委员会基金项目等多个项目，在相关研究领域的国内外期刊或学术会议上发表 SCI 和 EI 索引的论文近 20 篇。



张婷，女，河北省唐山市人，教授。研究方向为物联网、移动计算等技术。参与(或主持)国家 863 计划项目、国家自然科学基金项目、河北省自然科学基金项目等多个项目，在有影响力的国内外期刊和会议上发表论文 30 余篇。

前 言

移动物联网(mobile Internet of things)是物联网、移动计算等技术融合发展的高层级网络,该技术目前正处在不断的演进过程中,已成为国内外的热点研究课题。移动物联网更有助于实现任何时刻、任何地点、任何人、任何物体之间的互联,提供普适服务,其服务范围深入到社会的各个方面,应用领域十分广泛,能够极大地提高人们的工作效率和生活质量。

移动物联网的关键技术涉及感知层、网络层、应用层的多个方面,本书阐述的相关技术是其中的一个子集,主要包括:认知无线网络中的资源分配、车载自组织网多跳成簇、车联网应用环境中的动态路由和智能数据传输、面向移动自组织网的路由协议、移动物联网中的信号处理等技术。

本书共10章,其中第2~4章由张德干撰写,第5章和第6章由张婷撰写,第7~9章由康学净撰写,第1章和第10章由三人共同撰写。全书由张德干策划和统稿。

本书得到了国家自然科学基金项目(No.61170173, No.61571328)、天津市自然科学基金项目(No.10JCYBJC00500)、天津市自然科学基金重点项目(No.13JCZDJC34600, No.18JCZDJC96800)、天津市重大科技专项(No.15ZXDSGX00050, No.16ZXFWGX00010)、天津市科技支撑重点项目(No.17YFZCGX00360)、天津理工大学计算机科学与工程学院、天津市智能计算及软件新技术重点实验室和计算机视觉与系统省部共建教育部重点实验室相关基金项目、天津市“物联网智能信息处理”科技创新团队基金项目(No.TD12-5016)、天津市“131”创新型人才团队基金项目(No.TD2015-23)、天津市“软件工程与移动计算”科技创新团队基金项目(No. TD13-5025)、天津市重点领域科技创新团队基金项目的资助。

本书由张晓丹研究员和宁红云教授审阅。本书在撰写过程中,多位教授和专家学者提出了宝贵意见,同时得到了韩静、赵德新等同事以及博士和硕士研究生刘思、刘晓欢、崔玉亚、周舫、李文斌、马震、牛红莉、高瑾馨、陈晨、汪翔、宋孝东、明学超、朱亚男、赵晨鹏、郑可、潘兆华等的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书属研究型专著,可供高校研究生、高年级本科生,以及相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

书中不足之处在所难免,真诚欢迎各位读者批评指正。

作 者

2018年7月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	认知无线网络中的资源分配技术简介	4
1.3	车载自组网技术简介	6
1.4	面向移动自组织网的路由技术简介	10
1.5	面向车联网的智能数据传输技术简介	12
1.6	移动物联网应用中的信号处理技术简介	14
1.6.1	离散分数傅里叶变换简介	14
1.6.2	余弦类离散分数变换定义	18
1.6.3	离散分数傅里叶变换的研究进展	22
1.6.4	其他离散分数变换的研究进展	25
1.6.5	分数变换在图像加密领域的研究现状	27
第 2 章	认知无线网络中的资源分配方法	30
2.1	概述	30
2.1.1	凸优化理论	30
2.1.2	博弈论与演化博弈	33
2.2	认知无线网络中抑制干扰的功率资源分配方法	34
2.2.1	系统模型与问题转化	34
2.2.2	能效优化的功率分配方法	38
2.2.3	能效次优的功率分配方法	43
2.2.4	实验仿真与结果分析	45
2.3	基于演化博弈的能效优化的子载波分配方法	51
2.3.1	系统模型设计	51
2.3.2	子载波分配新方法	53
2.3.3	实验仿真与结果分析	60
2.4	本章小结	66
第 3 章	车载自组网中的若干关键技术	67
3.1	概述	67
3.2	面向 VANET 的可靠的自适应路由方法	79
3.2.1	Q 学习算法	79

3.2.2	模型建立	79
3.2.3	链路维持时间模型	81
3.2.4	链路可靠性计算	84
3.2.5	RSAR 传输算法	85
3.2.6	实验测试与对比分析	89
3.3	面向 VANET 的多跳反应式成簇方法	94
3.3.1	系统模型	95
3.3.2	优先权车辆跟随策略	96
3.3.3	PMC 算法	99
3.3.4	实验测试与对比	104
3.4	本章小结	109
第 4 章	面向车联网的路由协议	110
4.1	动态自适应路由协议	110
4.1.1	基本网络模型	110
4.1.2	连通概率	113
4.1.3	贪婪转发策略	114
4.1.4	路由协议设计	116
4.1.5	实验测试与分析	122
4.2	基于演化图论的可靠的车联网路由协议	129
4.2.1	车联网路由可靠性的判定策略	129
4.2.2	面向 VANET 的演化图模型	131
4.2.3	基于演化图的车联网路由协议的设计	134
4.2.4	实验测试与性能评估	137
4.3	本章小结	145
第 5 章	移动自组织网中的路由技术	146
5.1	概述	146
5.2	基于遗传-细菌觅食优化策略的动态源路由协议	152
5.2.1	简介	152
5.2.2	协议设计	154
5.2.3	BFO 算法原理	159
5.2.4	GA-BFODSR 路由协议设计描述	161
5.2.5	协议测试与分析	162
5.3	基于量子遗传算法的最优链路状态路由协议	167
5.3.1	简介	167

5.3.2	算法设计	168
5.3.3	传统 QGA 改进算法的描述	170
5.3.4	QG-OLSR 协议描述	176
5.3.5	协议测试与分析	177
5.4	本章小结	184
第 6 章	面向车联网的智能信息传输方法	185
6.1	概述	185
6.2	面向智能车联网的缺失数据估计方法	186
6.2.1	车联网数据集与性能度量	186
6.2.2	缺失数据估计新方法	188
6.2.3	实验与对比分析	191
6.3	面向车联网应用环境的消息智能分发方法	195
6.3.1	简介	195
6.3.2	车联网消息传播的原理	195
6.3.3	面向车联网的消息智能分发方法设计	197
6.3.4	消息分发方法中的定时器参数的自适应选择策略	203
6.3.5	实验验证与对比分析	204
6.4	车联网中的智能数据传输方法	208
6.4.1	简介	208
6.4.2	系统模型	208
6.4.3	智能数据传输新方法的设计	210
6.4.4	性能评估	217
6.5	本章小结	220
第 7 章	多参数离散分数变换的理论框架	222
7.1	概述	222
7.2	离散分数变换统一框架研究的必要性及可行性分析	222
7.2.1	必要性分析	222
7.2.2	可行性分析	225
7.3	多参数离散分数变换的理论框架	226
7.3.1	多参数离散分数变换算子的定义	227
7.3.2	高维多参数离散分数变换算子	229
7.4	理论框架的性质及特点	230
7.4.1	理论框架的性质	230
7.4.2	理论框架的特点说明	234

7.5	几种特殊的多参数离散分数变换	235
7.5.1	多参数离散分数傅里叶变换	235
7.5.2	余弦类多参数离散分数变换	238
7.5.3	其他多参数离散分数变换	241
7.5.4	数值仿真	242
7.6	多参数离散分数变换域特征提取	246
7.6.1	算法描述	246
7.6.2	数值仿真	247
7.7	保实多参数离散分数变换框架	250
7.8	本章小结	251
第 8 章	多参数离散分数变换域图像加密	252
8.1	概述	252
8.2	多参数离散分数变换域的双随机相位编码	253
8.2.1	算法描述	253
8.2.2	数值仿真	254
8.2.3	性能分析	256
8.3	基于混沌理论的 N 维置乱算子	261
8.3.1	混沌理论	262
8.3.2	几种常见的混沌系统	263
8.3.3	基于混沌系统的 N 维置乱算子定义	265
8.4	基于 N 维置乱算子和保实多参数离散分数变换的彩图加密	266
8.4.1	算法描述	267
8.4.2	数值仿真	272
8.4.3	性能分析	273
8.5	本章小结	278
第 9 章	随机离散分数傅里叶变换	280
9.1	概述	280
9.2	多通道随机离散分数傅里叶变换的定义	281
9.3	多通道随机离散分数傅里叶变换的性质特点	285
9.3.1	性质特点	285
9.3.2	计算复杂度分析	286
9.3.3	光学实现	286
9.4	多通道随机离散分数傅里叶变换的数值仿真及性能分析	287
9.4.1	数值仿真	287

9.4.2	性能分析	289
9.4.3	与其他方法的比较	289
9.5	基于随机离散分数变换的双图加密算法	290
9.5.1	算法提出	290
9.5.2	仿真实验及性能分析	293
9.6	本章小结	295
第 10 章	总结与展望	296
10.1	总结	296
10.1.1	关于认知无线电网络的资源分配方法	296
10.1.2	关于 VANET 中的关键技术	297
10.1.3	关于车联网的路由方法	297
10.1.4	关于移动自组织的网络协议	298
10.1.5	关于车联网的智能数据传输方法	298
10.1.6	针对移动物联网的信号处理技术	299
10.2	展望	300
10.2.1	认知无线网络中的资源分配方法的未来工作展望	300
10.2.2	VANET 中关键技术的未来工作展望	301
10.2.3	车联网中路由协议的未来工作展望	301
10.2.4	移动自组织网络中路由协议的未来工作展望	302
10.2.5	移动物联网中信号处理技术的未来工作展望	302
参考文献		304

第1章 绪论

1.1 概述

移动物联网 (mobile Internet of things) 是在物联网、移动计算等技术融合的基础上发展起来的, 其相关理论与技术已成为学术界研究的热点。物联网是“物与物相连的互连网络”, 移动物联网典型的示例应用有移动机器人等携带的无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)、车联网等组成的移动自组织网络 (mobile ad hoc network, MANET) 等。移动物联网技术是主要研究移动应用环境中物与物之间互联的相关技术, 如车联网 (Internet of vehicles, IOV)、移动机器人网络、手机等各种移动终端上的网络等。移动物联网技术作为热点技术正被国内外广泛重视, 其发展速度十分迅猛; 其应用也将极大地提高人们的工作效率和生活质量, 对未来世界产生深远的影响。

(1) 面向移动物联网应用的认知无线网络 (cognitive radio network, CRN) 是一种由认知用户构成的无线通信网络, 相比于传统无线通信网络, 认知无线网络的频谱效率更高, 该网络也被作为下一代无线通信网络的关键技术之一。频谱共享认知无线网络是一种干扰可控的认知无线网络, 由主用户和次用户组成, 其中次用户可以对主用户产生干扰, 但不能超过主用户所允许的阈值。干扰温度限可以保证次用户对每个主用户的干扰不超过该阈值。因此, 其在该类模型的资源分配中起着关键性的作用, 次用户可以通过能量检测法等方式来得到干扰温度限, 进而不需要感知主用户情况就可以接入主用户网络。作为潜在的 CRN 调制技术, 正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术在网络遇到异步传输时, 因为其不完美的时间和频率同步, 数据传输速率相应地受到影响; 同时异步传输会引起子载波间干扰, 某一条子载波会影响到相邻的子载波。滤波器组多载波 (filter bank multi-carrier, FBMC) 调制技术作为一种替代调制方法, 相比于 OFDM, 在异步通信时不会过多地降低数据传输速率, 具有对载波频偏不敏感和高频效、高能效的优势, 并且不需要循环前缀, 在结合偏移正交幅度调制 (offset quadrature amplitude modulation, OQAM) 和多相网络后, 大大降低了实现的复杂度。近些年, 随着无线通信技术的大规模发展, 网络用户量急剧扩大, 各种无线服务迅猛增长, 由电池供电的移动设备的能耗也随之增长。然而由于电池技术的缓慢发展以及电池尺寸的限制, 从硬件角度优化移动设备的能耗非常困难, 提高能效对于实现下一代

无线通信的接入具有重要意义。合理的能效资源分配已经成为未来扩大无线网络传输范围、提高网络吞吐量、提高链路可靠性的前沿技术。在绿色通信的大环境下,研究出一种高效、准确的分配算法就显得非常重要了。

(2)移动物联网中的移动自组织网络融合了无线通信、传感、嵌入式、低功耗、功率控制、信息安全等多种技术,并根据 MANET 的分布式特点在不断完善之中。自 20 世纪以来,MANET 被广泛应用于各个领域,如传感器网络、军用战略部署、地理位置信息感知、应急服务等。美国麻省理工学院在一份预测未来科技的文章中指出,和 MANET 相关的新兴科技将成为 20 世纪最有影响力的科技之一,也是改变全球的十大技术之一。

MANET 的思想起源于 1968 年美国的 ALOHA 网络,它的目的是将处于四个岛屿的七个校园连接起来使其能够互相通信。ALOHA 网络采用了固定的高级以及分布式信道管理,采用单跳协议且不支持路由功能。1973 年,美国国防部高级研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)将分组交换技术和 ALOHA 网络技术相结合,集合军事环境背景,开发了分组无线网络(packet radio network, PRNET)。PRNET 是分布式网络结构,采用 ALOHA 和 CSMA(carrier sense multiple access)两种访问协议,动态支持共享信道,采用多跳路由协议和存储转发机制。但 PRNET 的网络扩展性较差、处理能力低、数据安全性低且能耗较大。1983 年,DARPA 针对 PRNET 的缺点研发了抗毁无线网络(survivable radio network, SURAN),提高了网络安全性,降低了物理成本,且支持的复杂网络中最多容纳数万量级的节点。

(3)针对车载自组织网(vehicle ad hoc network, VANET)中网络拓扑变化频繁问题,设计的路由方法中采用了贪婪机会转发(greedy opportunity forward, GOF)算法,GOF 算法在包的递交率和平均跳数等方面有效地提升了车联网的性能。使用演化图论对高速公路上的 VANET 通信图进行建模,扩展的演变图有助于捕捉车载网络拓扑结构的演进特征,并预先确定可靠的路线。建立基于高速公路车辆运动和速度数学分布的链路可靠性模型,并考虑链路可靠性度量,设计一个可靠的路由协议,利用扩展演化图模型的优点找到最可靠的路由,可以减少路由开销,节约网络资源。

随着科技的不断发展和人们生活水平的不断提高,汽车已经成为人们出行必备的代步工具。据不完全统计,从 2009 年起,我国汽车的销售数量每年超过 2000 万台,几乎呈现“泄洪式增长”趋势。道路上汽车数量的不断增加所带来的负面影响也是不容忽视的,例如,与从前相比,现在的交通越来越拥堵,交通事故越来越多,空气污染也越来越严重。导致上述负面情况的主要原因就在于现有的交通管理无法与当前巨大的车辆数目相匹配。据统计,世界上每年大约有 70 万人死于车祸,伤残者接近 3000 万人。不难想象,如果不能有效地进行交通管理,

那么这一数字将会持续上涨。就目前来说,有效的交通管理仍然是人们所面对的共同难题。智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)作为物联网信息化的重要产物,为应对这些问题而被提出,目的是实现交通的有效管理,实现驾驶人员的安全高效出行。

智能交通系统作为构建智慧化城市的重要载体,是近年来研究的热门话题。车联网作为智能交通系统的主要通信技术,具有网络拓扑变化频繁、通信链路不可靠以及车辆节点分布不均匀的特点,这些特点使得设计可靠性高、时延较低的路由算法成为一项具有挑战性的任务。有效的路由算法能够保证节点之间可靠的通信,更重要的是其决定了应用部署的灵活性。因此,研究可靠的路由算法对实现智能交通系统有着重要的意义。

(4)随着移动物联网应用的飞速发展,信息及信息系统涉及人们日常生活的方方面面,在国防建设、经济建设、公共安全、科技发展等各个领域发挥着越来越重要的基础支撑作用。在现实生活中,信息往往蕴含在各种类型的信号中,包括雷达、通信系统中经常处理的一维信号,图像处理中的二维信号,视频流处理中的三维信号,以及某些专业领域处理的高维信号等。根据所采集信号的不同特点对其进行相应的处理,准确提取信号所含有的信息并加以利用,才能更好地进行生产实践。因此,有效的信号处理方法对于促进科技的进步和社会的发展至关重要。

变换域分析法是移动物联网应用的信号处理领域最常用的方法之一,其中尤以傅里叶变换为核心的经典信号处理方法应用最为广泛,是分析和处理线性、高斯、平稳信号的强有力工具。自从1965年Cooley-Tukey提出了离散傅里叶变换的快速算法——快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)之后,傅里叶变换在科学研究与工程技术的几乎所有领域都发挥着非常重要的作用。然而,随着人们研究范围的不断扩展,研究对象的运动规律和环境背景日趋复杂,携带信息的信号不再是传统傅里叶分析理论体系下所研究的平稳高斯类信号,而是呈现出非常突出的非线性、非高斯、非平稳特性。这类信号的重要信息往往蕴含在其频率变化率特征中,采用傅里叶变换仅在频率域进行分析与处理,无法精确、有效地反映出此类信号的时频局部特性,因此,不能得到令人满意的结果。这已经成为制约信息系统性能提升的主要瓶颈之一,亟待寻求更加有效的非平稳信号处理方法。

众所周知,数学变换对解决移动物联网应用中的信号处理领域的问题具有非常重要的意义。为了分析和处理非平稳信号,一些学者先后提出短时傅里叶变换、小波变换、Gabor变换、Wigner-Ville分布等一系列时频分析工具。然而,这些信号处理方法都是在时域、频域两个维度上对信号进行分析与处理的,其核心思想本质上仍是傅里叶分析理论。为了更加精确、有效地提取非平稳信号的频率变化率,甚至

更高阶频率变化率信息,一些学者仍在寻求新的理论与技术,以对现有信号处理手段进行补充与完善。其中,分数傅里叶变换作为傅里叶变换的广义形式,可以同时反映信号的时频特征,因而受到众多科研人员的关注。自 20 世纪 80 年代 Namias 给出分数傅里叶变换的特征结构以来,关于它的研究成果逐年增多,内容涵盖信号处理、光学、雷达、通信、量子力学等众多科研领域。

随着对分数傅里叶变换研究的不断深入,衍生出的新型分数变换主要包括加权分数傅里叶变换、多参数分数傅里叶变换、随机分数傅里叶变换、随机分数变换等;拓展出的分数变换主要包括分数正弦/余弦变换、分数 Hartley 变换、分数阿达马变换、线性正则变换,以及这些变换的随机形式和多参数形式等。这些新型分数变换的提出不仅丰富和发展了分数域信号处理的理论体系,而且为工程实践提供了有利的分析工具,促使分数域信号处理方法被广泛应用于目标检测和参数估计、通信与信息安全、图像处理等各个领域。

然而,目前对以上各种分数变换理论及其应用的研究往往都是孤立和单一的,研究方法上存在一定的重复性。这些分数变换都是以分数傅里叶变换为核心而衍生拓展出来的,因此它们之间必然存在一定的内在联系。深入分析各种分数变换之间的共同点,总结凝练其共有的性质特征,建立分数变换的一般性理论框架,进而在此框架下构造更多特殊的数学变换,用于解决信号处理领域所遇到的问题,无论对于理论研究还是工程应用都将具有重要意义。

另外,以分数傅里叶变换为核心所衍生拓展的各种分数变换具有灵活的阶次信息,参数可以自由调整,能够扩大图像安全领域的密钥空间,提高安全性,受到了该领域研究人员的青睐。近年来,基于分数变换的图像加密和数字水印算法层出不穷,成为保护图像信息的强有力手段。分析当前分数域图像加密系统的优缺点,探索并提出更加高效的加密方法,对于图像的安全传输和存储具有非常重要的意义。

1.2 认知无线网络中的资源分配技术简介

功率分配作为资源分配问题中很重要的子问题,已被广泛研究。功率控制被用于保障小蜂窝网 (small cell network, SCN) 中的用户 (small cell user, SU) 的信干噪比。一种基于拉格朗日对偶分解的功率分配方法被提出,降低了跨层干扰。此外,信道分配也被用来抑制跨层干扰。SCN 中通过相关均衡博弈方法最小化对主基站的干扰来实现子信道分配。有学者在消除自干扰的基础上提出一种基于正交频分多址 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 的多用户双向放大转发 (amplify-and-forward, AF) 中继网络的联合资源分配方法,着重考虑了高信噪比区域的功率分配、子载波分配和总传输速率的优化以实现更高的系统吞吐量,但并

未涉及网络的能耗及不同链路总传输速率的平衡。有学者考虑数据的突发到达及跨层干扰敏感系统的资源管理,然而该学者仅考虑最大化 SCN 的吞吐量而忽略了延迟对系统性能的影响。之后有学者提出了一种基于马尔可夫决策过程的延迟敏感的资源分配算法,以最小化所有用户的平均等待时间,由于专注于所有用户的平均等待时间和,如何进行资源分配以及提供单个用户的显式延迟则被忽略。鉴于此,一种单蜂窝 OFDMA 网络中用户时延约束下最大化时间平均吞吐量的跨层调度算法被提出,然而因为缺少对跨层干扰的考虑,该方法并不能直接应用于频谱共享 SCN。Guo 等在研究如何实现频谱共享 SCN 中的资源管理的同时考虑了 SU 延迟以及跨层干扰约束,并提出双层 SCN 中的物理层和传输层动态联合速率控制方法,很好地解决了跨层干扰问题。

我们探讨了基于 FBMC (filter bank multiple carrier) 的多用户频谱共享的 CRN 中的资源分配问题,相关问题已经得到了很多研究成果。有学者指出 CRN 中的干扰抑制是一个至关重要的问题。Jiang 等提出用 CRN 中的干扰温度限来限制二级网络到使用相同频谱的优先级的一级网络的干扰。对无线认知网络中基于资源分配策略的干扰抑制也有所研究,一种在 CRN 中的以干扰温度限为自变量的基于功率分配和子信道选择的对偶分解方法被提出。考虑多蜂窝无线认知网络中活动的主用户的每个子信道上的干扰温度限,以最大化系统吞吐量为目标,一种功率和子信道联合分配方法被提出。然而由于 SU 的认知能力有限,干扰温度限无法直接应用于 SCN。为了解决这一问题,干扰温度限可通过宏基站回传来送到 SCN。然而,在上述所有工作中,并未把能效作为优化目标,而无线通信网络的一个重要指标就是能效。能效已经吸引了大量学术界和工业界的关注,并被认为是会对 CRN 产生重大影响。最近有很多研究工作着眼于能效资源分配。Li 等为最大化所有用户多业务的平均效用提出基于中继的 OFDMA 系统效用优化的动态资源分配算法,但该研究并没有专门考虑能效。Zarakovitis 和 Ni 提出了一种多用户 OFDMA 网络下行传输能效资源调度方法,并且研究了多用户下行 OFDMA 网络中总功率约束下的功率和子载波联合分配问题。但是他们提到的资源分配问题只是在下行链路情景下对能效进行了优化,并未考虑网络中的多用户干扰,然而这可能是一个抑制性能的因素,在移动用户数量增加时性能会变差。Singh 等只提出了 AF 网络增加能效的功率分配方案。然而,当以能效作为目标函数进行优化时,DF (data forward) 中继网络中最佳的联合功率和子载波分配方法与 AF 网络中的相应方法并不相同。因此, Singh 等在此基础上又考虑了多用户 DF 中继干扰网络的能效资源分配问题,提出了功率和子载波联合分配方案。

通过分析可以知道,资源分配算法大部分都是 NP 困难问题,最优算法需要非常高的计算复杂度,而低复杂度的资源分配算法往往降低了系统性能,因此需要综合考虑算法复杂度和系统性能,灵活运用凸优化理论和博弈论等方法深度挖掘针对

特定情景下更为合理的资源分配算法。

博弈论在资源分配中的应用越来越广泛，学术界也可以找到很多相关研究成果。势博弈已经被证明是多小区无线系统资源分配的一种有效方法，以试图最大限度地提高用户的信干噪比和能效。Denis 等着眼于下垫式 CRN，使用博弈论方法讨论了非合作次用户下行链路能效资源分配问题。SCN 中通过相关均衡博弈方法最小化用户对主基站的干扰来实现子信道分配。合作博弈理论提供了一个灵活的工具来探索自私节点如何相互讨价还价的同时互相帮助。Huang 等认为合作博弈并不适用于分布式无线网络，因为在该网络中需要决策者之间额外的信号量。为了同时获得用户公平性和网络效率，有学者建立了一个基于纳什议价的合作功率控制博弈模型，然而并未将物理层安全列为研究对象。Yang 和 Yaacoub 等分别给出了利用纳什议价解的无线网络中的分布式、快速并且公平的资源分配方法。Huang 等提出了一个基于演化博弈的 CRN 频谱分配算法，其中主用户将空闲频谱出租给次用户，而次用户的行为可以被建模为一个演化博弈问题。

1.3 车载自组网技术简介

智能交通系统作为物联网应用中的一个重要领域，近年来得到了国内外的广泛关注和研究。车载自组网作为智能交通系统的核心技术，是许多研究机构所研究的热门话题。当发生交通堵塞时能够提前通知驾驶人员进行路径选择，这不仅提高了出行效率，而且在一定程度上减少了对空气的污染；或者当发生交通事故时，通过即时发出求救信息来通知附近的医护人员对伤员进行救治，极大地减少了因交通事故造成的人员伤亡等。这里将车联网的一些相关应用归纳到表 1.1 中，可以看出车载自组网的研究对人们安全和高效的出行有着极其重要的意义。

表 1.1 车载自组网中的相关应用

应用类别	具体内容	意义
道路交通安全	交通事故警告、潜在威胁提示等交通信息	有效避免和减少交通事故
交通状况查询	车辆速度、路面车况等交通信息	提高道路交通效率，辅助驾驶
信息服务	高速公路收费、乘客间通信、接入 Internet、多媒体服务	提供丰富的服务，实现舒适驾驶

路由算法作为 VANET 中节点通信的主要手段，其重要性不言而喻，一直是 VANET 研究的重点内容。VANET 作为一种特殊的移动自组织网络，其自身有许多不同于 MANET 的特点，这些特点使得传统的 MANET 中许多成熟的路由算法无法直接被应用在 VANET 中，例如，VANET 拓扑变化较快，节点间链路的可靠性较差；车辆节点的密度随时间的变换而变化，在白天车辆密度比较大，而在夜间车辆密度

又会变得很小等。这些特性使得传统针对 MANET 的路由算法在 VANET 中效率较低,甚至根本不能进行通信。但是,车辆节点有着充足的能量以及较高的计算能力使得在 MANET 中考虑的能量问题在这里不再需要考虑。车辆节点的移动轨迹可预测并且车辆配备了定位设备使得其为设计路由算法提供了新的思路,表 1.2 给出了 VANET 的主要特点及其对路由性能的影响。这些特性促使我们不断研究更加可靠、有效的路由算法,对实现智能交通系统有着极其重要的意义。

表 1.2 VANET 的特点和对路由的影响

特点	影响
高动态网络拓扑结构	网络拓扑频繁改变,使得路由路径极其不稳定,已有的路径容易变得无效
链路易断裂	相邻节点间链路频繁断裂,使得路由算法的可靠性得不到保证
节点按规则移动	节点按照固定路线行驶,使得设计的路由算法更具针对性
建筑物对信号的阻挡	建筑物遮挡使得通信信号减弱,相距很近的节点都难以保证可靠通信
网络规模	网络规模较大时会造成严重的广播风暴,较小时会出现网络分割问题
定位系统 GPS	车辆配备 GPS 设备,使得车辆进行路由时能够找到下一跳的地理位置
能量和空间不受限制	充足的能量以及较高的计算性能使得其可以执行较为复杂的路由算法

VANET 作为一种特殊的移动自组织网络,有着网络拓扑变化快、节点间链路不可靠的特征(表 1.2),这些特征使得传统的基于 MANET 的路由算法很难被直接应用在 VANET 中。因此,为了设计满足 VANET 需求的路由算法,近年来,许多国内外研究人员和研究机构针对 VANET 的特征设计提出了多种路由算法,我们将其归纳为以下几种。

(1) 基于拓扑的路由算法。该算法是传统 MANET 中一种比较典型的路由算法,其主要由按需路由(反应式)算法和表驱动(主动式)路由算法组成。为了满足 VANET 的需求,许多基于拓扑的改进路由算法被提出。有学者在传统的按需距离矢量(ad hoc on distance vector, AODV)的基础上提出了一种基于演化图论的可靠按需路由算法 EG-RAODV(extended graph-reliable AODV)。其通过分析车辆的运动特征,利用演化图论的方式模型化 VANET 中节点间的通信,有效地提高了节点间链路的可靠性,使得在高速网络环境中能够保证较好的路由效果。有学者通过改进传统的 AODV 算法,提出一种基于 Q 学习的 QLAODV 算法。QLAODV 算法针对传统 AODV 算法并不能很好地处理频繁的链路断裂造成的开销问题而提出。在传统的 AODV 路由算法中,当某一处链路断开时,其会启动路由修复机制,过多的控制数据包被发送在断裂处造成了较大的网络开销。在 VANET 中,频繁的链路断开是其所不能避免的,因此,QLAODV 在 AODV 的基础上,利用 Q 学习算法即时探测有效的路径来解决这一问题。最优链路状态路由(optimized link state routing, OLSR)是一种表驱动路由算法,其目的是实现快速建立路由,减少路由开销。其利用多点中继的策略控制洪泛的范围。VANET 中节点的快速移动使其并不能找到有效的中继节点,甚至