

► 21世纪通信网络技术丛书

CAMBRIDGE

TD
SCDMA

移动通信前沿技术系列

协作通信及网络

Cooperative Communications
and Networking

〔美〕 K.J.Ray Liu 〔埃及〕 Ahmed K.Sadek 〔中〕 Weifeng Su

〔阿根廷〕 Andres Kwasinski 著

任品毅 廖学文 高贞贞 徐静 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——移动通信前沿技术系列

协作通信及网络

Cooperative Communications and Networking

[美]K.J.Ray Liu [埃及]Ahmed K.Sadek 著
[中]Weifeng Su [阿根廷]Andres Kwasinski 译
任品毅 廖学文 高贞贞 徐 静

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

协作通信是一个崭新的研究领域,其思想在通信领域具有非常广阔的应用前景。本书系统地介绍了协作通信网络的基本原理、通信机制、关键算法、实际应用以及未来发展趋势等。本书从传统的 MIMO 系统入手,介绍空间、时间、频率分集的概念,引出协作通信的基本原理,并对协作通信系统从物理层到网络层依次进行探讨。全书内容分为三部分,第一部分回顾传统的 MIMO 系统,介绍空间、时间、频率分集的概念。第二部分主要考虑协作通信物理层的关键问题,并对其提出了行之有效的解决方案,比如针对协作通信的分布式特点,提出分布式空时(频)码;针对协作通信的频谱效率问题,提出了新颖和有效的协作方案。第三部分介绍协作通信对物理层之上的 MAC 层、网络层及应用层产生的影响,内容涉及如何协作路由,如何通过协作使网络覆盖范围增大,如何延长网络寿命等。

本书可供从事下一代宽带移动通信研究的专业技术人员、管理人员,特别是从事协作通信理论研究和算法设计的人员作为专业书籍使用。也可以供学习协作通信理论的大专院校相关专业的师生阅读参考。

Cooperative Communications and Networking, First Edition (978-0-521-89513-2) by K. J. Ray Liu, Ahmed K. Sadek, Weifeng Su and Andres Kwasinski first published by Cambridge University Press 2009.

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Publishing House of Electronics Industry 2010

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中国大陆(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2010-0512

图书在版编目(CIP)数据

协作通信及网络/(美)刘瑞等著;任品毅等译:—北京:电子工业出版社,2010.8

(21世纪通信网络技术丛书·移动通信前沿技术系列)

书名原文: Cooperative Communications and Networking

ISBN 978-7-121-11464-9

I. ①协… II. ①刘… ②任… III. ①移动通信—通信网 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 146203 号

策划编辑:王春宁

责任编辑:王春宁

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:31.75 字数:800 千字

印 次:2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如:软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD—SCDMA;cdma2000;移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX,WiFi,ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如:无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内由有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员,供他们阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信出版分社

译者序

为了满足人们对无线多媒体通信业务不断增长的需要,下一代无线通信系统需要提供更 高的传输速率和更可靠的传输性能。另一方面,未来无线通信网络将是一个支持多种无线通信系统的异构通信网络,利用增设基站的方法来提高无线网络覆盖率将会大大提高无线通信的成本。在频谱资源日趋紧张的背景下,多天线系统由于能够显著提升系统的传输性能和频谱效率,已经受到了广泛的关注。然而,移动终端的体积、功率限制大大制约了多天线系统的实际应用。

协作通信系统作为一种多天线技术的扩展,已经成为近年来通信领域研究的热点,它将成为未来移动通信系统提高频谱利用率的关键技术之一。协作通信系统的核心思想是利用无线网络中的多个节点之间相互协作,实现传输路径共享,从而提高整个无线网络的吞吐量。4G 通信系统势必是一个异构通信网络,它需要支持多种网络的融合。4G 系统要求支持 802.11、802.16 和 IMT-2000 等无线系统的多种终端接入并能够在不同接入网间无缝漫游。同时,4G 系统的传输速率和带宽也远高于现存通信系统。解决这些问题的最直接方法就是在无线网络中架设更多、更密集的基站,但成本太高。那么,考虑除了引入诸如多天线技术这样更有效的通信信号处理技术以外,还可以对无线网络的构建进行一定的改进:利用无线网络中的节点相互协作传输数据或者加入专门的中继节点。利用无线网络中的中继节点的协作传输,可以在提高系统频谱利用率的同时,有效地降低增加基站所带来的大量成本。

将协作的思想引入通信领域相比之前的点对点通信带来了一个崭新的研究领域,其思想在通信领域中具有非常广阔的应用前景。与此同时,协作传输技术不仅能够应用于蜂窝移动通信系统,而且无线 ad-hoc 网络、无线局域网以及无线传感器网络等多种场合也会有它的用武之地,本书介绍的层间协作的思想更是对之前分层处理思想的突破。总之,利用协作技术,能够切实地利用空间资源来提高通信系统的性能:包括提升系统容量、增大数据传输速率、有效对抗衰落以及降低系统的服务中断概率,提高系统的服务质量和可靠性。

这本协作通信技术的理论著作采用全面深入的描述和严谨的推导,介绍了协作技术在通信及组网中的应用,既包含了理论原理和方案设计,也包含了相应方案的仿真结果。本书覆盖了如下关键技术:与协作通信相关的信息理论基础、协作通信容量、协作信道编码和协作空时编码、协作网络编码、MIMO 协作分集复用自适应、协作多天线、协作中继分集复用自适应、多用户协作、协作资源分配、协作功率分配、协作中继选择、MAC 层协作、层间协作等基本理论和关键理论等多种与协作通信相关的最新技术。全书逻辑连贯,层次分明,很容易阅读和理解。并且因为本书作者 K. J. Ray Liu 教授为国外在该领域的资深专家,在国外权威期刊上已发表了上百篇协作通信领域的学术论文,在协作通信方面做出了重大创新,使得该书显得高屋建瓴,鞭辟入里,能够引起读者的进一步思考。

本书可供从事下一代宽带移动通信研究的专业技术人员、管理人员,特别是从事协作通信理论研究和算法设计人员作为专业书籍使用。本书也可以供学习协作通信理论的大专院校相关专业师生阅读参考,以及作为协作通信理论的教材和学习参考书使用。

为了帮助老师课堂讲述或培训使用，本书提供了每一章的英文演示胶片，可通过如下网址：www.cambridge.org/9780521895132 免费下载获得。教师需要习题答案可向出版社索取。

本书由任品毅、廖学文、高贞贞、徐静四人共同翻译，全书由任品毅整理，其中任品毅翻译了第1章、第2章、第10章以及第12章，廖学文翻译了第11章、第13章至第18章以及序言，高贞贞翻译了第3章至第6章，徐静翻译了第7章至第9章。在翻译过程中，得到了冯振杰、魏莉、陈睿等同学的热心帮助，在此表示衷心的感谢。最后，还要感谢本书的编辑王春宁博士，没有他的大力协助，本书不可能按时出版。由于本书内容的新颖性和译者不可避免存在的主观片面性，书中不妥和错误之处在所难免，殷切地希望广大读者及同行专家批评指正。

译者

2010年春于西安交通大学

序 言

无线通信技术在近二十年来获得迅猛的进步。每一次无线设备的更替可以带来在通信可靠性, 数据速率, 设备尺寸, 电池续航时间和网络连接方面的显著提升。另外, 采用 Internet 协议的业务逐渐均匀化, 使得网络越来越有去中心化的趋势。近年来, ad-hoc 和传感器网络伴随着大量的应用而出现, 这些网络中的源节点可以通过其他节点的帮助来转发信息到目的节点。

这启发了在通信和网络系统中设计节点之间的协作技术的想法, 观察协作技术是否能够被用来提高系统的性能。显然在本书中我们要回答如何通过协作通信及网络提高性能。由此问题出发, 提出了一种新的通信方式, 它产生了远远超过它在 ad-hoc 和传感器网络中的原始应用。

首先, 协作通信在无线网络中为何是可能的? 注意到无线信道天然带有广播特性。即使是方向性的传输也是某种程度的广播, 只是更少的接收者被限制在某一个区域内。这意味着许多节点或者是用户能够“听”到和接收到一个源节点传输的信息, 在需要的情况下能够帮助其进行信息的中继传输。这种广播特性, 很长时间内被视做一种能量的浪费, 同时还对其他用户造成干扰, 而现在看来, 它可以看做辅助传输时一种潜在的资源。例如, 众所周知, 无线信道是非常突发性的, 当一个信道进入一种严重的衰落状态时, 很可能这种衰落要持续一段时间。因此, 在深衰落的作用下, 当一个源节点无法建立起到目的节点的直接链路时, 即使采用类似 ARQ 这样的重传协议也不见得会带来多大的好处。如果一个第三方节点接收到这个源节点发来的信息, 并能够通过一条独立于源到目的节点的链路进行辅助传输时, 这时能够成功传输的概率将会更大, 因此整体的性能可以获得提升。

那么如何进一步发展协作传输方案来提高性能呢? 近年在 MIMO 通信技术方面的进步是关键所在。在不久的将来要建立的 4G 无线网络中, 满秩传输的 MIMO 用户可以提供非常高的传输速率。更具体地说, 满秩 MIMO 用户必须配备多个收发天线。实际中, 大多数用户设备在较小的空间中无法配备多个天线, 或者传播环境不能满足 MIMO 传输的要求。为了克服这一 MIMO 应用的限制, 必须提出超越传统点对点通信的新技术。

一个无线网络系统通常可以被看做一些试图相互通信的节点的集合。但是, 从一个角度而言, 因为无线信道广播特性的存在, 我们可以将这些节点视为无线系统中一些分布式天线的集合。利用这一观点, 网络中的节点可以相互协作进行分布式传输和信息处理。一个协作节点对于源节点来说可看做一个中继节点。因为以上的原因, 协作通信可以在源与目的节点之间产生类似于 MIMO 信道的独立传输链路。

从本质上来说, 协作通信能够被看做一种广义的 MIMO 概念。它是利用无线信道广播特性而在节点间相互辅助的一种新的架构, 可以以一种分布式的方式来进行通信处理, 并能够获得在 MIMO 系统中所得的相同的优势。这样的一种观点能够带来不同的新通信技术以提高通信容量、速率和性能; 降低电池损耗和延长网络寿命; 提高吞吐量和多接入方案的稳定域; 扩展传输覆盖范围; 提供多媒体通信中源-信道编码的协作方式的折中。

本书如果作为教材使用, 其主要目的是介绍空间、时间、频率分集和 MIMO 技术, 这些构成协作通信的基础, 给出协作通信和网络的基本准则, 并且涵盖能够在协作通信中采用并

带来性能提升的多种基本技术。本书包括以下三个主要的部分：

- **第一部分：背景和 MIMO 系统**

在这一部分中，集中讨论如何建立起 MIMO 的基础概念，从而能够在协作通信和网络中运用这一概念。第 1 章给出后续章节中将要用到的无线通信中的基本概念。第 2 章介绍空时分集以及空时编码的发展，包括诸如循环码、正交码、酉编码和对角码。这一部分的最后一章，即第 3 章则研究在宽带无线通信中的最大可达空时频分集，以及宽带空频和空时频编码设计。

- **第二部分：协作通信**

这一部分考虑协作通信中大多数的物理层问题并阐述在协作框架下的不同和提升之处。第 4 章介绍了中继信道的概念以及不同的中继协议和方案，提出了一个体系化方案能够获得线性容量，由此而得到为何采用协作方式的基本原因。第 5 章研究基本单中继情况下的协作技术物理层问题，还包括在解码转发和放大转发协议下的符号错误概率分析、性能上界和最优功率控制方案。第 6 章分析多节点的场景。第 7 章给出分布式空时和空频编码方案，其类似于传统的空时和空频编码，但不同之处在于它能够适用于分布式的场景。第 8 章从何时协作与和谁协作的角度考虑最小化协作通信所不可避免的带宽损失问题。主要目的是设计一种中继选择方案并能够最大化协作通信的码率，而同时能够维持显著的性能提升。第 9 章提出不同的协作通信方案来降低收发机的复杂度。最后，第 10 章研究协作时的能量效率问题，同时考虑实际的传输、处理、接收能量损耗，说明在协作中发送功率的增益与接收和处理能量的损失的折中问题。

- **第三部分：协作网络**

这一部分给出协作通信物理层以上各层的影响，包括像 MAC 层、网络层和应用层。第 11 章考虑多接入情况下协作通信在容量和稳定域提高方面的效果。第 12 章研究语音内容的特殊属性如何能够通过有效的资源分配来进行调整，并进一步提高网络的性能。第 13 章讨论在协作方式可选时的协作路由方案。第 14 章提出信源-信道协作的概念，从而讨论信源编码、信道编码和多媒体内容之间的折中效应。第 15 章集中于研究信源编码分集和信道编码分集在协作分集情况下如何相互作用，系统行为可以通过渐进失真指数来进行度量和比较。第 16 章提出协作方式下覆盖范围可以进一步的扩展。第 17 章考虑 OFDM 宽带无线通信中协作的不同效果。最后，第 18 章讨论通过协作方式的调节，使得网络寿命最大化的问题。

本书主要服务于协作通信和网络的课程，即面向具有数字通信和无线网络的背景知识的读者。教师可以选择第 1、2、4、5、6 章，7.1 节、第 8、10、11、13、14 和 16 章来进行核心内容讲授，其他章节作为补充内容。

本书也可以用于涵盖 MIMO 基本概念和协作通信的无线通信课程，提纲可以包括第一部分和第二部分的一些章节。如果用本书讲授无线网络的课程，材料可以从第 4 章和第三部分的章节中选取。

本书的完成必须要感谢下面这些人的贡献：Amr El-Sherif, T. Kee Himsoon, Ahmed Ibrahim, Zoltan Safar, Karim Seddik 和 W. Pam Siriwoongpairat。我们还要感谢那些在本书的成书期间提供过技术帮助的人。

作者简介

K. J. Ray Liu 是马里兰大学帕克学院的杰出学者，电子与计算机工程系教授。Liu 教授获得了大量的荣誉及奖项，包括 IEEE Signal Processing Society, IEEE Vehicular Technology Society 的最佳论文奖； EURASIP, IEEE Signal Processing Society 杰出奖；美国国家科学基金青年学者奖。

Ahmed K. Sadek 是高通公司的资深系统工程师。他于 2007 年在马里兰大学的帕克学院获得博士学位。他的研究领域包括通信理论和组网技术、信息论和信号处理，现在集中研究认知无线电、频谱共享、协作通信以及接口管理。

Weifeng Su 是纽约州立大学电子工程系的助理教授。他于 1999 年在中国南开大学应用数学系获得博士学位，其后，又在 Delaware 大学获得电子工程博士学位。他的研究领域包括信号处理、无线通信和组网，他在 2005 年获得了马里兰大学的年度发明奖。

Andres Kwasinski 是得州仪器公司通信架构组的研究员。他在 2004 年获得马里兰大学帕克学院电子与计算机工程系的博士学位，并于当年担任了马里兰大学电子与计算机工程系的副研究员。他的研究范围包括多媒体无线通信、跨层设计、数字信号处理、语音和视频处理。

目 录

第一部分 背景和 MIMO 系统

第 1 章 引言	(3)
1.1 无线信道	(3)
1.1.1 加性高斯白噪声	(3)
1.1.2 大尺度传播效应	(4)
1.1.3 小尺度传播效应	(4)
1.1.4 功率时延谱	(5)
1.1.5 均匀散射环境模型	(11)
1.1.6 其他信道系数模型	(16)
1.2 通过信道容量描述性能	(17)
1.3 正交频分复用	(19)
1.4 无线信道的分集	(22)
1.4.1 时间分集	(24)
1.4.2 频率分集	(25)
1.4.3 MIMO 系统	(25)
1.5 协作分集	(31)
1.6 参考的文献说明	(32)
第 2 章 空时分集和编码	(33)
2.1 系统模型和性能准则	(33)
2.2 空时编码	(36)
2.2.1 循环酉编码	(36)
2.2.2 正交设计的 ST 码	(38)
2.2.3 对角代数 ST 码	(45)
2.3 本章小结和参考的文献说明	(46)
习题	(47)
第 3 章 空时频分集与空时频编码	(50)
3.1 空频分集和编码	(50)
3.1.1 MIMO-OFDM 系统模型	(50)
3.1.2 满分集空频码的映射设计方法	(54)
3.1.3 满速率满分集空频码的设计	(63)

3.2 空时频分集和编码	(77)
3.2.1 空时频编码的 MIMO-OFDM 系统模型	(77)
3.2.2 性能准则与最大可得分集	(78)
3.2.3 满分集空时频码设计方法	(81)
3.3 本章小结和参考的文献说明	(89)
习题	(90)

第二部分 协作通信

第 4 章 中继信道及协议	(95)
4.1 协作通信	(95)
4.2 协作协议	(96)
4.2.1 固定协作策略	(97)
4.2.2 自适应协作策略	(105)
4.3 分级协作	(108)
4.3.1 网络模型	(108)
4.3.2 分级协作协议描述	(109)
4.3.3 协议分析	(113)
4.3.4 线性容量度量	(115)
4.4 本章小结和参考的文献说明	(116)
习题	(117)
第 5 章 单中继协作通信	(119)
5.1 系统模型	(119)
5.2 DF 协议的误符号率分析	(121)
5.2.1 闭式 SER 分析	(121)
5.2.2 SER 上界及渐进近似	(124)
5.2.3 最优功率分配	(127)
5.2.4 一些特殊场景	(130)
5.2.5 仿真举例	(131)
5.3 AF 协议的 SER 分析	(132)
5.3.1 利用 MGF 方法的 SER 分析	(133)
5.3.2 调和平均值的简单 MGF 表达	(134)
5.3.3 渐进紧的近似解	(136)
5.3.4 最优功率分配	(139)
5.3.5 仿真举例	(140)
5.4 DF 与 AF 协作增益的比较	(141)
5.5 中继通信中的调制变换	(145)
5.6 本章小结和参考的文献说明	(148)

习题	(149)
第 6 章 多节点协作通信	(151)
6.1 多节点译码转发协议	(151)
6.1.1 系统模型和协议描述	(151)
6.1.2 精确 SER 性能分析	(153)
6.1.3 SER 近似	(156)
6.1.4 最优功率分配	(162)
6.2 多节点放大转发协议	(168)
6.2.1 放大转发源信息	(168)
6.2.2 基于 MRC 的放大转发中继	(172)
6.2.3 中断分析和最优功率分配	(175)
6.3 本章小结和参考的文献说明	(182)
习题	(182)
第 7 章 分布式空时码和分布式空频码	(185)
7.1 分布式空时码 (DSTC)	(185)
7.1.1 译码转发协议下的分布式空时码 (DSTC)	(186)
7.1.2 放大转发协议下的分布式空时码	(190)
7.1.3 对抗同步误差的分布式空时码	(194)
7.2 分布式空频码 (DSFC)	(201)
7.2.1 译码转发协议下的分布式空频码	(201)
7.2.2 放大转发协议下的分布式空频码	(208)
7.2.3 码字设计和注释	(214)
7.3 本章小结和参考的文献说明	(215)
附录	(216)
习题	(217)
第 8 章 中继选择: 何时参与协作和与谁协作	(220)
8.1 动机及中继选择协议	(220)
8.1.1 传统的协作场景	(220)
8.1.2 中继选择准则	(221)
8.1.3 单中继的译码转发协议	(222)
8.2 性能分析	(223)
8.2.1 平均带宽效率分析	(223)
8.2.2 误符号率 (SER) 分析及其上界	(224)
8.3 多中继场景	(229)
8.3.1 带宽效率	(230)
8.3.2 SER 分析及其上界	(232)
8.4 最优功率分配	(234)
8.5 本章小结和参考的文献说明	(238)

习题	(239)
第 9 章 协作通信中的差分调制	(242)
9.1 差分调制	(242)
9.2 译码转发协作通信的差分调制方案 (DiffDF)	(243)
9.2.1 单中继 DiffDF	(243)
9.2.2 多中继 DiffDF	(265)
9.3 放大转发协作通信的差分调制方案 (DiffAF)	(276)
9.3.1 单中继 DiffAF	(277)
9.3.2 多中继 DiffAF	(284)
9.4 本章小结和参考的文献说明	(295)
习题	(297)
第 10 章 协作传感器网络中的能量效率	(299)
10.1 系统模型	(299)
10.2 性能分析与最优功率分配	(301)
10.2.1 直接传输	(301)
10.2.2 协作传输	(302)
10.3 多中继场景	(304)
10.4 实验结果	(306)
10.4.1 数值例子	(307)
10.5 本章小结和参考的文献说明	(311)
习题	(311)

第三部分 协作网络

第 11 章 协作认知多址接入	(315)
11.1 系统模型	(316)
11.2 协作认知多址接入 (CCMA) 协议	(318)
11.2.1 单帧 CCMA 协议	(318)
11.2.2 多帧 CCMA 协议	(319)
11.3 稳定性分析	(319)
11.3.1 CCMA-S 协议稳定性分析	(320)
11.3.2 CCMA-M 的稳定性分析	(328)
11.3.3 现有的协作协议稳定性分析	(332)
11.3.4 数值仿真	(335)
11.4 吞吐量区域	(337)
11.5 时延分析	(338)
11.5.1 CCMA-S 的时延性能	(338)

11.5.2	CCMA-Me 的时延性能	(339)
11.5.3	时延性能的例子	(340)
11.6	本章小结和参考的文献说明	(341)
习题		(342)
第 12 章	内容感知的协作多址接入	(344)
12.1	系统模型	(344)
12.1.1	语音源模型	(344)
12.1.2	网络模型	(346)
12.1.3	信道模型	(347)
12.2	具有竞争意识的协作多址协议	(347)
12.3	动态模型	(348)
12.3.1	状态转移概率	(350)
12.4	性能分析	(351)
12.4.1	网络吞吐量	(351)
12.4.2	多址接入延迟	(352)
12.4.3	丢包率	(354)
12.4.4	主观话音质量	(357)
12.5	竞争-协作访问的折中	(358)
12.6	本章小结和参考的文献说明	(360)
习题		(361)
第 13 章	分布式的协作路由	(362)
13.1	网络模型和发射节点	(363)
13.1.1	网络模型	(363)
13.1.2	直接的和协作的传输模式	(364)
13.2	链路分析	(364)
13.3	基于协作的路由算法	(366)
13.3.1	性能分析: 规则直线型网络	(368)
13.3.2	性能分析: 规则网格网络	(369)
13.4	仿真例子	(371)
13.5	本章小结和参考的文献说明	(375)
习题		(376)
第 14 章	联合信源-信道编码的协作	(378)
14.1	联合信源-信道编码的比特速率分配	(378)
14.2	采用用户协作的联合信源信道编码	(379)
14.3	源-信道-协作折中问题	(381)
14.4	信源编/解码	(382)
14.4.1	实际的信源编/解码	(383)
14.5	信道编/解码器	(385)

14.6 信源-信道-协作性能的分析	(386)
14.6.1 放大转发协作	(387)
14.6.2 解码转发协作	(393)
14.6.3 非协作情况	(394)
14.7 D-SNR 特性的验证	(397)
14.8 信源-信道-协作折中的效果	(398)
14.9 本章小结和参考的文献说明	(402)
习题	(403)
第 15 章 失真指数的渐近性能	(405)
15.1 信源-信道分集的系统设置	(405)
15.2 多跳信道	(408)
15.2.1 多跳放大转发协议	(409)
15.2.2 多跳译码转发协议	(415)
15.3 中继信道	(418)
15.3.1 放大转发协议	(419)
15.3.2 译码转发中继信道	(428)
15.4 讨论	(429)
15.5 本章小结和参考的文献说明	(431)
习题	(431)
第 16 章 基于协作的覆盖增强技术	(433)
16.1 系统模型	(433)
16.2 中继分配协议与分析	(435)
16.2.1 直接传输	(435)
16.2.2 协作传输的条件中断概率	(436)
16.2.3 最优中继位置	(437)
16.3 中继分配算法	(438)
16.3.1 最近邻节点分配协议	(439)
16.3.2 固定中继策略	(440)
16.3.3 下界: Genie-aided 算法	(442)
16.4 数值仿真结果	(443)
16.5 本章小结和参考的文献说明	(446)
习题	(446)
第 17 章 宽带协作通信	(448)
17.1 系统模型	(448)
17.2 协作协议及中继分配方案	(449)
17.3 性能分析	(451)
17.3.1 中断概率	(451)
17.4 性能下界	(454)

17.5	最佳中继位置	(455)
17.6	本章小结和参考的文献说明	(456)
	习题	(457)
第 18 章	通过协作方式的网络寿命最大化	(459)
18.1	概述	(459)
18.2	系统模型	(460)
18.2.1	非协作无线网络	(460)
18.2.2	协作解码转发协议	(461)
18.3	通过使用协作节点使寿命最大化	(463)
18.3.1	问题表述	(463)
18.3.2	两节点无线网络的解析解	(464)
18.3.3	多节点无线网络	(468)
18.4	配置中继以提升设备寿命	(470)
18.5	仿真举例	(473)
18.6	本章小结和参考的文献说明	(477)
	习题	(477)
参考文献		(479)

第一部分

背景和 MIMO 系统
