

协作通信 及其在LTE-Advanced 中的应用

Cooperative communication
and its application
in LTE-Advanced systems

郑侃 彭岳星 龙航 刘光毅 编著

● 本书受国家自然科学基金项目“无线通信协同预编码技术研究”及国家重大专项“IMT-Advanced中继技术研发”的支持。

● 紧扣前沿热点，反映协作通信研究领域的最新成果，探求协作通信在LTE-Advanced系统中的具体应用。

● 内容覆盖全面，全方位研究协作通信从链路到系统的关键技术设计。



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



协作通信 及其在LTE-Advanced 中的应用

Cooperative communication
and its application
in LTE-Advanced systems

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

协作通信及其在LTE-Advanced中的应用 / 郑侃等编
著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2010.12
(4G丛书)
ISBN 978-7-115-23936-5

I. ①协… II. ①郑… III. ①移动通信: 无线电通信
— 通信网 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第197656号

内 容 提 要

本书系统阐述了协作通信技术的基本原理、关键技术及其在 LTE-Advanced 系统中的应用与性能。本书共分 12 章: 第 1 章介绍了协作通信技术的研究和发展历程, 第 2 章介绍了实现协作通信的各种半双工协议, 第 3 章至第 9 章详细讲述了协作通信系统中的各种关键技术, 第 10 章讨论了协作通信技术在目前备受关注的 LTE-Advanced 系统中的应用, 第 11 章、第 12 章介绍了 LTE-Advanced 协作通信系统的仿真建模与性能评估, 以及 VoIP 业务性能等。

本书可供从事下一代移动通信系统研究和开发的工程技术人员参考, 也适合高等院校通信和电子信息类相关专业师生阅读。

4G 丛书

协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用

-
- ◆ 编 著 郑 侃 彭岳星 龙 航 刘光毅
责任编辑 杨 凌
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.25
字数: 393 千字 2010 年12月第 1 版
印数: 1~3 000 册 2010 年12月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-23936-5

定价: 55.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

前 言

“协作”或“协同”(Cooperate)这个词语来源于拉丁文“co-”和“operate”的组合，直译为“一起工作”(Working Together)。协作的概念最早来自对生物界现象的观察，此后被引入社会学、经济学和其他自然科学领域中。近年来，各种协作技术在无线通信系统中的应用与研究日益广泛。利用协作通信技术，能较大地提高系统的性能。

目前，美国、欧洲以及日本、韩国的很多著名通信研究机构投入了大量科研人员和资金以进行无线协作中继技术为核心的课题研究。与此同时，产业界也正致力于将无线协作中继技术应用在未来宽带无线系统中。IEEE 802.16 工作组在 2008 年成立了 IEEE 802.16m 工作子组，并在其工作组第 53 次会议中提出了在 IEEE 802.16m 标准中增加对于协作中继传输方式的支持。同时，协作中继技术也是 3GPP 中深入讨论的 LTE-Advanced 关键增强型技术之一。通过在 LTE-Advanced 系统中增加协作中继节点，可提高小区覆盖范围，扩大系统容量，提供热点覆盖。

本书作者根据目前的技术发展，参考了国内外最新的专著和文献资料，编写了此书，专门介绍协作通信技术原理及其在 LTE-Advanced 系统中的应用。本书的具体组织如下。

第 1 章介绍了协作通信技术的研究和发展历程；

第 2 章介绍了实现协作通信的各种半双工协议及其性能分析；

第 3~9 章详细地讲述了协作通信系统中的各种关键技术，包括信道估计技术、网络编码技术、分布式空时码的设计、自适应协作多天线技术、链路自适应技术、无线资源管理以及干扰协调技术等；

第 10 章讨论了协作通信技术在 LTE-Advanced 系统中的应用；

第 11、12 章介绍了 LTE-Advanced 协作通信系统的仿真建模与性能评估，以及在此系统中的 VoIP 技术及其性能。

在本书的编写过程中，北京邮电大学电信工程学院无线信号处理与网络实验室的马彰超、胡丽洁、张月莹、张翼、刘建华、吴木子、杨晓、旷靖华、王方向、曾华承等做了大量的工作，在此向他们表示衷心的感谢。

本书受国家自然科学基金项目“无线通信协同预编码技术研究”(编号：60802082)及国家重大专项“IMT-Advanced 中继技术研发”(编号：2009ZX03003-004-01)的支持。

由于作者学识有限，书中错误在所难免，希望读者不吝赐教。

目 录

第 1 章 协作通信技术的发展	1
1.1 协作通信技术研究的意义	1
1.1.1 未来通信系统的需求	1
1.1.2 协作通信技术的 研究意义	2
1.2 协作通信技术研究	2
1.2.1 协作通信的提出	2
1.2.2 相关技术的研究	3
1.3 协作通信在无线通信 系统中的应用	5
1.3.1 在 WiMAX 系统中的 应用	5
1.3.2 在 3G LTE-Advanced 系统 中的应用	7
1.4 本章小结	8
参考文献	8

第 2 章 协作通信协议及 性能分析	11
2.1 引言	11
2.2 基本半双工协作协议	12
2.2.1 放大转发协议	12
2.2.2 解码转发协议	14
2.2.3 编码协作协议	14
2.2.4 差错性能的分析	16
2.3 OFDM 系统中不同 协作协议的性能	24

2.3.1 OFDM 系统下的 AF 协议	24
2.3.2 OFDM 系统下的 DF 协议	25
2.3.3 仿真结果及分析	25
2.4 其他半双工协作协议	28
2.4.1 基于硬信息转发的分布式 Turbo 码协作协议	28
2.4.2 基于软信息转发的译码 放大转发协议	30
2.4.3 基于软信息转发的分布式 Turbo 码协作协议	32
2.5 全双工协作协议	34
2.6 本章小结	35
参考文献	36

第 3 章 协作通信系统的信道 估计与同步	38
3.1 引言	38
3.2 不同协作协议下的信道估计	39
3.2.1 AF 策略下的信道估计	39
3.2.2 DF 策略下的信道估计	40
3.3 OFDM 系统的信道估计	40
3.3.1 导频密度要求	41
3.3.2 导频结构	41
3.3.3 OFDM 信道估计技术	42
3.4 LTE-Advanced 协作中继 系统下行参考信号设计	47

3.4.1 接入链路 (Access link)	
参考信号的设计	47
3.4.2 回程链路 (Backhaul link)	
参考信号的设计	48
3.5 同步技术	53
3.5.1 系统模型	53
3.5.2 时间与频率同步	54
3.6 本章小结	56
参考文献	57

第 4 章 无线协作物理层

网络编码	59
4.1 引言	59
4.2 原理简介	59
4.2.1 网络编码的思想	59
4.2.2 物理层网络编码	60
4.3 物理层网络编码基本实现方式	61
4.3.1 异或运算	61
4.3.2 置信传播算法	61
4.3.3 电磁波形调制网络编码	62
4.3.4 模拟网络编码	62
4.3.5 信道编码和网络编码联合设计	63
4.4 无线协作物理层网络编码技术	63
4.4.1 协作中继系统中的模拟网络编码方案	63
4.4.2 协作中继系统中的联合网络信道编码技术	65
4.5 物理层网络编码与其他关键技术的结合	70
4.5.1 物理层网络编码与 HARQ 技术的结合	70
4.5.2 物理层网络编码与重叠编码技术的结合	71
4.5.3 物理层网络编码与 MIMO 技术的结合	72
4.6 本章小结	73
参考文献	73

第 5 章 分布式空时码设计

5.1 引言	75
5.2 DSTBC 的基本原理及性能	75
5.2.1 空时块码	75
5.2.2 分布式空时块码	76
5.3 DSTTC 的基本原理及性能	86
5.3.1 空时格码	86
5.3.2 分布式空时格码	87
5.4 RCDD 的基本原理及性能	88
5.4.1 循环延迟分集	88
5.4.2 中继循环延迟分集	88
5.5 异步分布式空时码	89
5.6 分集/复用折中的 DSTC	93
5.6.1 空时编码	93
5.6.2 分布式空时编码	93
5.7 本章小结	94
参考文献	94

第 6 章 自适应协作多天线技术

6.1 引言	98
6.2 协同系统预编码技术简介	99
6.2.1 第 1 类预编码技术 (单中继节点)	99
6.2.2 第 2 类预编码技术 (多中继节点)	100
6.2.3 第 3 类预编码技术 (时域预编码)	103
6.3 分布式空域预编码技术	104
6.3.1 多中继系统的信号模型	104
6.3.2 多中继系统的多流广播模式	105
6.3.3 多中继系统中的多流单播模式	110
6.4 协同系统中的时域预编码技术	114
6.4.1 单中继系统的信号模型	114
6.4.2 源节点预编码方案	115
6.4.3 中继节点传输方案	118

6.4.4 目标节点接收机方案	119
6.5 本章小结	123
参考文献	123
第7章 链路自适应技术	127
7.1 引言	127
7.2 自适应调制编码技术	128
7.2.1 基本原理	128
7.2.2 在协同中继系统中的应用	131
7.3 混合自动重传请求技术	137
7.3.1 基本原理	137
7.3.2 在协同中继系统中的应用	142
7.4 本章小结	145
参考文献	145
第8章 协作中继系统中的无线资源管理	147
8.1 引言	147
8.2 协作系统无线资源管理概述	147
8.3 接入控制	149
8.3.1 接入策略的选取	149
8.3.2 性能对比分析	151
8.4 切换	153
8.4.1 传统蜂窝系统中的切换	153
8.4.2 中继蜂窝系统的切换	156
8.5 无线资源划分	160
8.5.1 复用资源划分	160
8.5.2 正交资源划分	161
8.5.3 性能对比分析	163
8.6 多用户调度	164
8.6.1 调度原理介绍	164
8.6.2 协作系统中的多用户调度	166
8.6.3 性能对比分析	171
8.7 本章小结	172
参考文献	173

第9章 协作无线系统中的干扰协调技术	175
9.1 引言	175
9.2 各类对抗干扰的技术	175
9.3 传统蜂窝通信系统中的干扰协调技术	177
9.3.1 静态/半静态干扰协调	177
9.3.2 蜂窝动态干扰协调	180
9.4 协作无线通信系统中的干扰协调技术	180
9.4.1 协作无线通信系统中的干扰情况	180
9.4.2 静态/半静态干扰协调算法	182
9.4.3 动态干扰协调算法	183
9.5 LTE-Advanced 异构网络中的干扰协调技术	188
9.5.1 异构网络模型及其干扰环境	188
9.5.2 LTE-Advanced 系统中的干扰协调方案	189
9.6 本章小结	193
参考文献	194

第10章 LTE-Advanced 中的协同中继技术	196
10.1 LTE-Advanced 系统简介	196
10.1.1 LTE-Advanced 系统的要求	196
10.1.2 LTE-Advanced 系统的关键技术	197
10.1.3 LTE-Advanced 系统的标准化进程	201
10.2 LTE-Advanced 系统中的Relay 分类	202
10.2.1 LTE-Advanced 系统中Relay 的应用场景	202
10.2.2 LTE-Advanced 系统中Relay 的分类	203

10.3 基于 Relay 的 LTE-Advanced 系统的基本帧结构方式	206
10.3.1 RN 的双工方式	206
10.3.2 回程链路的设计	209
10.4 本章小结	212
参考文献	213
第 11 章 LTE-Advanced 协作通信系统建模及性能评估	214
11.1 引言	214
11.2 系统模型及仿真假设	214
11.2.1 系统参数假设	214
11.2.2 中继站节点设计	217
11.2.3 中继系统资源分配	220
11.3 基本性能评估	221
11.3.1 不同的中继站数量对性能的影响	222
11.3.2 不同的中继站发射功率对性能的影响	227
11.3.3 回传链路采用 SDMA 增强技术带来的系统性能增益	228
11.4 本章小结	229

参考文献	229
------------	-----

第 12 章 VoIP 在 LTE-Advanced 协作通信系统中的应用	231
12.1 引言	231
12.2 LTE-Advanced 系统中的 VoIP 调度方案	231
12.2.1 系统概述	231
12.2.2 VoIP 调度方案	233
12.3 VoIP 系统性能评估	236
12.3.1 主要仿真参数	236
12.3.2 VoIP 业务模型设计	237
12.3.3 VoIP 性能评价标准	238
12.3.4 动态调度方案下的 VoIP 性能及分析	239
12.3.5 半持续调度方案下的 VoIP 性能及分析	241
12.3.6 两种调度方案的性能比较	243
12.4 本章小结	244
参考文献	244
缩略语	246

第 1 章

协作通信技术的发展

协作通信是指，在多用户通信环境中，各邻近节点之间按照一定方式共享彼此的天线进行协作发送，从而产生一种类似多天线发送的虚拟环境，获得空间分集增益，提高系统的传输性能的通信方式。作为一种新型无线传输技术，协作通信技术融合了分集技术与中继传输技术的优势，在不增加天线数量的基础上，可在传统通信网络中获得多天线与多跳传输的性能增益。作为未来无线通信提高频谱效率的关键技术之一，近几年来无论是在研究领域还是工程界，协作通信都受到了广泛的关注。

1.1 协作通信技术研究的意义

1.1.1 未来通信系统的需求

移动通信在近几十年来得到了迅猛发展，世界范围内的无线用户已经将近 40 亿，超过了互联网的 15 亿用户。市场的不断扩大，需求的不断提高，促使无线通信系统在近几十年中得到了迅猛的发展。从初期基于模拟信号处理技术的第一代移动通信系统，到如今已取得巨大商业成功的基于数字信号处理技术的第二代移动通信系统仅仅经历了不到半个世纪的时间，并且第三代移动通信系统（3G）已经在欧盟和日韩市场上取得了很大的成功。但是，尽管目前正在部署中的 3G 高速数据传输系统宣称在下行和上行链路上分别能提供高达 14.4Mbit/s 和 5.7Mbit/s 的高速率数据业务，事实上这些峰值指标只能在信道环境非常理想的情况下才可能达到。所以，3G 系统虽然能够提供基础业务，例如话音、数据通信和低速率无线互联网接入等，却没有能力满足更多交互式多媒体新业务的需求，因为这些业务要求的数据速率通常高达几十甚至上百 Mbit/s，例如多方视频会议、视频点播等。

为了更好地满足这些日益增长的需求，迫切需要能提供更高数据速率和更高频谱效率的宽带无线通信系统。欧盟在第六框架计划中资助了一系列针对宽带移动通信系统的研究项目，例如 Wireless World Initiative New Radio（WINNER）项目等。同时，各个国际标准化组织也已经开始进行宽带移动通信系统标准的讨论和制定工作。例如，3GPP 组织于 2004 年 12 月正式开始了第三代移动通信（3G）长期演进（LTE, Long Term Evolution）系统的标准化工作，并已初步完成空中接口部分^[1]。IEEE 802.16 工作组也正在进行 WiMAX 演进系统 IEEE 802.16m 标准的讨论^[2]。这些演进系统要实现的频谱效率相对于现有的系统将会有质的飞跃，具体目标如下：在下行链路中，3G LTE 和 IEEE 802.16m 系统的频谱效率将分别达到

5.0bit/(s·Hz) 和 8.0bit/(s·Hz); 两者在上行链路中的最大频谱效率将分别为 2.5bit/(s·Hz) 和 2.8bit/(s·Hz)。国际电联 (ITU, International Telecommunication Union) 对未来移动通信系统 (IMT-Advanced) 提出了更为长远的目标与展望: 系统可用的最大带宽将为 100MHz; 在固定和低速移动的热点覆盖场景下能提供高达 1Gbit/s 的传输速率, 在高速移动的广域覆盖场景下能提供不低于 100Mbit/s 的传输速率; 相应的频谱效率应能达到 5~20bit/(s·Hz)。

1.1.2 协作通信技术的研究意义

现实的无线频谱分配方式以及恶劣的无线传输环境, 对实现无线通信系统的高速率传输的需求提出了巨大的挑战。为了提高未来宽带无线通信系统的频谱效率并改善链路的可靠性, 近年来涌现出各种新技术, 例如先进的信道编码技术和调制技术、基于多天线又称为多入多出 (MIMO) 的空时处理技术等。先进的编码和调制技术是逼近单个系统已有信道容量的有效手段之一, 而多天线技术的引入则可进一步显著提高单个系统具有的信道容量, 因而更具有发展潜力。然而, 由于受移动便携式终端体积和其他实现因素的制约, 使得在终端上难以配置较多的天线单元, 从而在相当大程度上制约了 MIMO 技术的广泛应用。

另一方面, 采用协同通信机制的新型无线通信技术, 即“协作通信”, 提供了利用空间资源的一种新手段。在协作通信系统中, 多个参与通信的实体之间通过协作的方式共享有限资源以提高无线资源的利用率。多个单天线终端采用协同机制建立通信后, 可相互使用对方的天线发射各自的信号, 从而形成“虚拟天线阵列”, 如此构成的等效 MIMO 系统同样具有较高的系统容量和频谱效率。

协作通信的出现为在保证较小的布网开销的条件下, 极大地提升系统性能提供了可能。将协作通信技术与其他先进技术进行结合, 能够大大提升系统性能, 是一种极具潜力的技术。其具体特点如下。

(1) 扩大覆盖范围。通过协作节点之间的协作传输, 使得单个节点数据传输的有效半径大大增加。

(2) 消除覆盖盲点。通过多个节点间协作传输, 使得处于通信盲点的两个节点之间形成视距传输, 改善通信链路质量。

(3) 提高系统性能。利用协作通信的传输方式, 通过合并接收或空时联合发射, 可以获得复用增益或者分集增益。

先进的协作通信技术作为未来移动通信系统的关键技术之一已经在各大研究机构、设备商和运营商之间展开深入的研究和热烈的讨论。IMT-Advanced 系统中的协作通信技术不仅可以改善小区边缘用户的通信质量、扩大小区覆盖范围, 还可降低网络运营成本和投资风险, 有利于 3G 网络向 4G 网络的平滑过渡。

1.2 协作通信技术研究

1.2.1 协作通信的提出

“协同” (Cooperate) 这个词语来源于拉丁文 “co-” 和 “opetate” 的组合, 直译为 “一起工作” (Working Together)。协同的概念最早来自对生物界现象的观察, 例如关于吸血蝙蝠行

为的研究等,用以描述通过给予、共享或者容许以获得好处的行为,此后被引入社会学、经济学和其他自然科学领域中。近年来在无线通信领域内,随着网络拓扑结构的发展由完全集中式逐渐转变为分布式与集中式相结合,各种协同技术在无线通信系统中的应用与研究也日益广泛。

对协作中继系统的研究最早可以追溯到40年前。首先, van der Meulen 于1968年提出三终端中继信道并初步推导了该信道容量的上下界。随后, Cover 对 van der Meulen 的研究进行了拓展,从信息论的角度证明了离散无记忆、加性白高斯噪声(AWGN)中继信道的容量大于源节点与目的节点间信道的容量,为协作通信研究提供了指导方向^[3]。

随后多年的研究中,协作通信技术在信息论方面取得了较大突破,而在技术应用方面却面临了较大的挑战。到了20世纪80年代,有关协作通信技术的研究逐渐减少,直到21世纪初,协作通信技术再次引起了研究者的广泛关注。Laneman 提出并分析了协作中继系统的4种常用协议,包括放大转发(AF)、解码转发(DF)、选择性中继和增量中继(IR)等^[4]。Hunter 在此基础上进一步提出了编码协作(CC)协议,其本质上是解码转发(DF)的一种特例,并可与分布式空时编码(DSTC)结合起来使用^[5],进一步提高了协作分集系统的性能。同时,Sendonaris 系统地提出并定义了“用户协作分集”的概念,给出了两用户互为协作中继节点的系统模型及其性能分析^[6]。

在早期的研究中,对于协作通信研究的另一个重点为协作中继节点的双工方式。研究主要关注半双工和全双工协作传输方式。所谓半双工协作中继系统,是指该系统的中继节点在相互正交的某种资源(时间或频率等)上分别接收和发送信号。全双工协作中继系统可以实现中继节点在同一频率上同时发送和接收信号,此时发送信号会对接收信号造成干扰。由于中继已知发送信号,所以理论上消除这个干扰是可行的。然而实际上由于发送信号比接收信号功率强约100~150dB,进行干扰消除时产生的误差可能对接收信号产生更大的干扰。由于精确进行干扰消除的难度较大,所以在实际系统中多采用半双工的中继节点。

虽然早期协作通信在信息论方面的相关研究大都基于全双工中继系统。然而由于半双工方式更容易实现,近年来涌现出的研究一般均考虑半双工协作传输方式。Host Madsen 对于半双工条件系的协作通信链路进行了分析,计算出其遍历容量性能界,其假设源节点和中继节点可发送相干信号,从而达到了波束赋形的效果。为了考虑更加实际的应用环境,Valenti 和 Zhao 假设源和中继在正交(时域和频域)信道上发送信号,给出了各种中继协议下的信道容量和中断概率。

1.2.2 相关技术的研究

在协作通信技术的基础理论研究的基础上,近年来涌现出大量针对协作通信技术更深层次的研究,包括多个节点间的协作通信传输方式和协作通信与其他技术的结合等。具体的研究主要集中在以下几个范畴。

(1) 分布式空时编码设计

分布式空时编码(DSTC)的基本思想是在协同中继网络中,将多个中继节点(也可包括源节点)的天线等效为分布式“虚拟天线阵列”进行空时编码的设计。与传统集中式网络中的空时编码设计相比,DSTC的设计具有其特殊性,例如,中继节点转发的信号已经经历了信道的衰落和噪声的污染;分布式环境中存在的由于传播时延不同而造成的节点间异步等。

在参考文献[7]中, Nabar 通过分析 AF 协议下 DSTC 的成对差错概率 (PEP), 证明了传统空时编码设计中的秩准则和行列式准则在特定的中继节点功率控制原则下, 可以拓展应用于 DSTC 的设计中。与传统空时编码类似, DSTC 也可以分为分布式空时块码 (DSTBC) 和分布式空时栅格码 (DSTTC) 等类型。另一方面, DSTC 与其他技术有效结合的研究也受到广泛的关注。例如, 功率控制、接收机设计、分集与复用的折中等。

(2) 协同中继节点选择

当协同中继系统中存在多个可用的中继节点时, 如何通过选择协同中继节点来提高传输可靠性也是研究的热点问题之一。相对于分布式空时编码技术, 采用协同中继节点选择算法更能有效降低协同中继节点和目标节点的复杂度和成本。Bletsas 在参考文献[8]中提出了“机会中继” (OR, Opportunistic Relaying) 的概念, 并将传统 MIMO 系统中的天线选择技术应用到协同中继系统中, 提出了简单的分布式单中继节点选择算法。根据决策时所需信息的不同, 大多数协同中继节点选择算法可以分为两类, 一类是基于地理位置信息、网络拓扑结构信息或传播路径损耗信息的选择算法, 另外一类是基于瞬时信道状态信息等。前者无需实时的信道信息和信令的传输, 对信道估计的误差也不敏感, 并且选择的结果可在较长时间内保持不变, 但是需要通过其他手段获得某些先验信息, 例如位置、拓扑结构或路径损耗等^[9]; 而后者反之。因此, 前者仅适用于固定无线接入网络, 而后者主要应用于移动无线接入网络^[8]。

(3) 协作系统中的无线资源分配

协作通信系统中的无线资源分配的研究主要包括功率分配和跨层优化等方面。协作节点的功率分配问题涉及的研究范围较广。首先, 研究者们希望解决的问题种类较多, 包括如何在源节点与协同中继节点之间进行功率的分配、协同中继节点进行转发时的发射功率如何调整、参与协同通信的某一节点对传输自身信号与协同传输其他信号之间的功率分配等。同时, 在解决上述各类问题的过程中提出的各种功率分配算法, 又可根据最优化目标的不同, 大致分为几类, 包括基于信道容量和频谱效率的算法、基于中断概率和错误概率的算法、以及基于能量效率的算法等。对于协同中继系统中网络资源的联合优化问题的讨论尚处于初期阶段, 现有研究主要是结合协同中继网络中的中继转发、多跳传输等技术的多层联合优化。根据联合优化过程中选择的通信协议层的不同, 可将现有算法大致分为几类, 包括: 物理层中继节点转发与 MAC 层资源分配的联合优化算法^[10]、物理层中继转发与网络层多跳路由选择的联合优化算法^[11]、MAC 层资源划分与网络层多跳路由选择的联合优化算法^[12]等。

(4) 协作认知

协作认知 (Cognitive Cooperative) 最早由昆虫生物学家根据蜜蜂对于方圆几千米范围内的环境进行检测的方式而得到。在无线通信系统中, 利用协作认知技术, 可以利用认知用户间的相互协作有效消除阴影衰落的影响, 降低单个认知用户的检测要求。协作感知从多个分布式的认知用户收集感知数据, 并通过处于不同地理位置的多个认知用户间的彼此协作来削弱外界不利因素对单个认知用户所造成的负面影响, 最终提高认知无线电系统的检测性能。协作认知技术的研究主要集中在多用户的频谱感知方面, Ghasemi 提出了多用户协作认知的基本方案, 并对其性能进行了分析^[13]。Peng 引入了局部频谱感知可信度的概念, 在中心接入点中采用 D2S 证据理论, 实现不同感知结果的联合判决, 使系统性能明显优于硬判决方法^[14]。

(5) 网络编码

网络编码 (Network Coding) 是近年来通信领域的重大突破, 该技术融合了编码和中继

传输的概念。其基本思想是网络节点对其他节点发送来的信息不仅进行数据转发,还参与数据处理,这样可以大幅提高网络性能。网络编码的概念由 Ahlswede 在文献[15]中提出。随后,Medard 等提出了网络编码的代数框架^[16],并证明了存在满足多播容量的线性时不变编码。2003 年 Ho、Medard 等提出了随机网络编码,拓宽了网络编码的适用场景,使得网络编码不再局限于确定的网络拓扑和集中式的算法^[17]。Cai 利用分布式网络编码来纠正整个网络中的差错^[18],并论述了网络编码在安全方面的应用,为网络编码增加了新的应用领域。

1.3 协作通信在无线通信系统中的应用

由于协作通信技术具有诸多优点,各大研究机构、标准组织都针对协作通信技术启动了专题研究。目前,美国、欧洲以及日本、韩国的很多著名通信研究机构、高校和企业都投入了大量科研人员和资金,以进行以无线中继技术为核心的课题研究,例如,专门成立了世界无线研究论坛(WWRF, Wireless World Research Forum)、美国国家自然科学基金资助了 GENI 项目、欧洲专门制定了信息社会技术(IST, Information Society Technologies)计划并成立了(WWI, Wireless World Initiative)组织、日本开展了 u-Japan 计划、韩国则专门制定了详尽的“IT 839 战略”。在 IST 和 WWI 的指导下,欧洲各大学、通信研究机构及企业开展了一系列研究工作。其中,与无线中继技术相关的研究项目有 WINNER、Fireworks 等。同时,多个国际标准化组织成立了促进无线中继协同技术研究与应用的工作组。协作通信技术在 IEEE 802.16 系列标准和 3GPP LTE-Advanced 标准化过程中的讨论及进程将在以下章节进行简要说明。

1.3.1 在 WiMAX 系统中的应用

IEEE 802.16 系列标准又称为 IEEE Wireless MAN 标准,它对工作于不同频带的无线接入系统空中接口、一致性和共存问题进行了规范。由于它所规定的无线系统覆盖范围在 km 量级,因而 802.16 系列标准主要应用于城域网。IEEE 802.16 系列的空中接口标准的最早版本于 2001 年 12 月通过并于 2002 年 4 月发布,其仅考虑为固定方式下 10~66GHz 频段的宽带无线传输,是基于 OFDM 的点对多点无线传输的空中接口标准。在 2004 年,IEEE 完成了 802.16-2004 版本的无线传输标准更新,简称为 IEEE 802.16d,增加了 802.16 系统对于低频段的支持。随后在 802.16-2005 版本(简称为 IEEE 802.16e 标准)中,增加了对移动性的支持。

但是,随着用户对于高速无线通信的需求与期待日益殷切,需要能够提供更高传输速率、更广覆盖范围及移动性的新一代无线通信系统。为了满足用户的需求,IEEE 802.16 工作组考虑在 IEEE 802.16e 标准的基础上进行更新,一方面考虑支持更高速率和更广泛的覆盖范围且满足系统对于 802.16e 系统的后向兼容性,另一方面需要尽可能地降低对于现有网络部署修改的成本。为了在成本及效能间达到更好的平衡,IEEE 802.16 工作组于 2005 年 9 月成立了移动多跳中继(MMR)研究小组,研究在 IEEE 802.16 系统中采用协作通信技术的可行性和具体实施方案。通过研究,任务组确定了基于协作中继辅助方式的蜂窝结构扩展方向,并最终确立采用基于蜂窝点到多点(PMP)基础的树形架构作为其拓扑结构。IEEE 802.16j 工作小组根据 IEEE 802 执行委员会的核准,于 2006 年 3 月成立。在 2007 年 7 月召开的标准制订会议中,IEEE 802.16 标准组织将协作中继技术作为新一代无线通信空中接口标准的增强技术进行讨论。在 2009 年初,IEEE 802.16 工作组完成了对 IEEE 802.16j 的标准化工作。

IEEE 802.16j 标准的目标是要定义比 IEEE 802.16e 标准中定义的基站功能更简单、造价更低的协作中继节点 (RS)。通过在现有 WiMAX 系统中增加中继节点, 可以使运营商在较低的成本下扩大小区的覆盖范围, 并提升用户的满意度。因此, 低开销和灵活的放置是 802.16j 标准关注的重点。在 IEEE 802.16j 标准中引入协作中继技术, 是为了通过增加中继节点, 扩大系统覆盖范围, 提高系统容量。

随后, 为了进一步满足 ITU 在 2008 年提出的未来无线通信系统 IMT-Advanced 的需求, IEEE 802.16 工作组在 2008 年成立了 IEEE 802.16m 工作子组^[19], 研究向 IMT-Advanced 演进的关键技术的协议。在其工作组第 53 次会议中, 提出了在 IEEE 802.16m 标准中增加对于协作中继传输方式的支持, 并在随后的会议中对于协作中继技术的相关问题进行讨论和研究。与 IEEE 802.16j 标准相同, 在 IEEE 802.16m 标准中引入协作中继节点, 可以在尽可能降低成本的条件下, 提升系统中用户——特别是覆盖盲区用户的数据传输性能。在 IEEE 802.16m 标准中增加的协作中继节点具有如下优点。

(1) 扩大 IEEE 802.16m 基站的覆盖范围, 如图 1-1 所示。

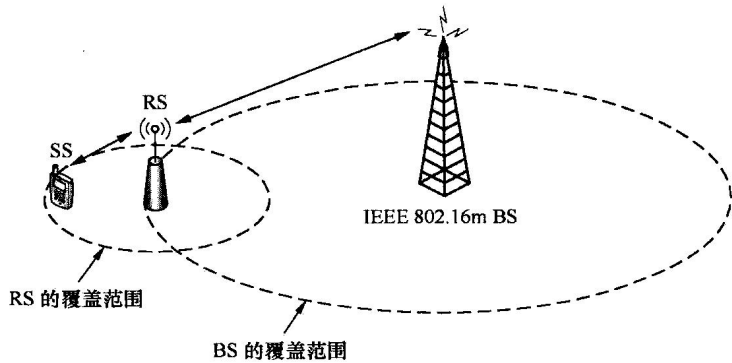


图 1-1 在 IEEE 802.16m 系统中增加 RS 以扩大小区覆盖

(2) 提高处于覆盖边缘或者覆盖盲区用户的数据传输速率, 如图 1-2 所示。

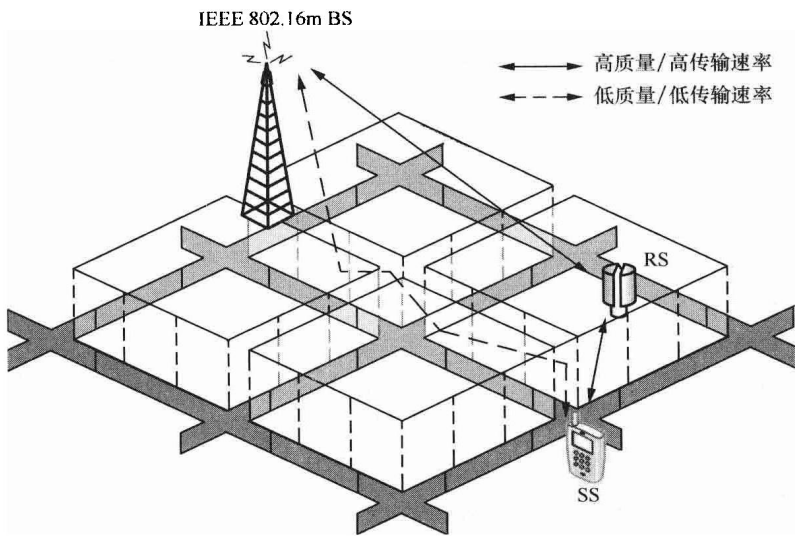


图 1-2 在 IEEE 802.16m 系统中增加 RS 以提升覆盖盲区用户传输速率

(3) 获得小区内的频率复用的可能，如图 1-3 所示。

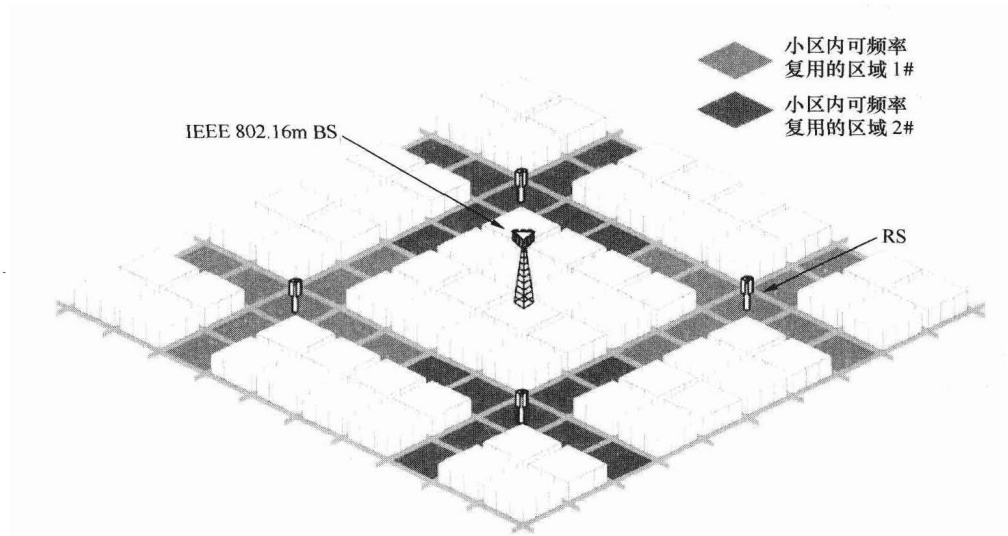


图 1-3 在 IEEE 802.16m 系统中增加 RS 以增加小区内资源复用的可能

在表 1-1 中列出了 IEEE 802.16j 中协作中继节点的功能，以及 IEEE 802.16m 中对于协作中继节点功能假设的总结。

表 1-1 IEEE 802.16j 和 IEEE 802.16m 中对于协作中继节点功能的定义

协作中继功能	IEEE 802.16j 中定义	IEEE 802.16n 中假设
跳数	≥ 2 跳	等于 2 跳/ ≥ 2 跳
节点间拓扑方式	树形	树形/Mesh 方式
用户间互为协同中继	不支持	不支持/作为选项
透明式/非透明式中继	全部支持	非透明式中继/全部支持
集中式/分布式调度	全部支持	分布式/全部支持
集中式/分布式控制	集中式	集中式/全部支持
固定中继/移动中继	全部支持	固定式/全部支持
集中式/分布式安全控制	全部支持	集中式/全部支持
中继间协作	支持	不支持/作为选项
用户检测到中继存在可能	不支持	不支持/作为选项

1.3.2 在 3G LTE-Advanced 系统中的应用

为了应对宽带接入技术的挑战，同时为了满足新型业务需求，3GPP 组织在 2004 年底启动了长期演进（LTE）技术的标准化工作。3GPP LTE 的标准化进程划分为两个节点：2004 年 12 月份到 2006 年 9 月为研究阶段（Study Item）；2006 年 9 月到 2007 年 6 月为工作阶段（Work Item），以完成 3GPP LTE 的标准化工作。在 3GPP LTE 的标准化进程中，产生了一场技术革命。与第 3 代移动通信系统相比，3GPP LTE 物理层（层 1）在传输技术、空中接口协议结构层（层 2）和网络结构等方面都发生了革命性的变化。3GPP LTE 系统的基础的系统设

计框架与 3G 系统有着明显的区别,包括新的多址技术、全新的空中接口设计和新的网络架构。在空中接口方面,OFDM 技术的采用,可大幅度地提高系统的通信能力,其最大支持 20MHz 的带宽,下行峰值速率超过 300Mbit/s,上行峰值速率超过 80Mbit/s。基于分组交换的系统设计在保证业务 QoS 的同时提高了系统资源的利用率。在正常的小区环境中,20MHz 系统的每个扇区可支持 500 个 VoIP 用户的容量。

为了进一步提升 3GPP LTE 系统的性能,以满足 ITU 对于 IMT-Advanced 系统的性能需求,3GPP 在 2008 年 3 月启动了向 IMT-Advanced 演进的关键技术与协议制订 LTE-Advanced^[20]。LTE-Advanced 是向 ITU 提交的 IMT-Advanced 候选技术,其以达到并超过 ITU 对 IMT-Advanced 的技术要求为目标,并且能够实现 LTE 的后向兼容性。对于 LTE-Advanced 系统的标准化进程,也可划分为两个阶段:研究阶段和工作阶段。2008 年至 2010 年初为 Study Item 阶段,在此阶段主要讨论可能被 LTE-Advanced 系统采用并标准化的相关关键技术。2010 年初至 2011 年为 Work Item 阶段,在这一阶段主要对于已经确定的关键技术进行详细地分析和讨论,确定其在 LTE-Advanced 系统中的方式。

到目前为止,3GPP 已经开始了关于 LTE-Advanced 系统中一系列新技术方向的讨论,主要包括载波聚合技术、高阶天线技术、多点协同传输技术和协作中继技术等。在讨论中,3GPP 已经将协作中继技术作为其关键的增强型技术之一进行深入讨论。3GPP LTE-Advanced 系统中增加协作中继节点的意义也可以归结为 3 点:提高小区覆盖范围、扩大系统容量和提供热点覆盖。在 3GPP 对于 LTE-Advanced 系统中的协作中继节点的标准进程中,对于其各项功能进行了详细的讨论,主要包括:协作中继节点的工作方式、功能定义和资源划分方法等。例如,基站与 Relay 站的通信采用相同的频段(In-band Relay)或者不同的频段(Out-of-band Relay);中继节点采用 TDD 或者 FDD 双工方式;中继节点是否具有层 1/层 2/层 3 的功能等。3GPP LTE-Advanced 标准化过程中对于协同中继技术的讨论和分析将在第 10 章中进行详细的说明。

1.4 本章小结

在本章中简要地回顾了协作通信技术的研究及发展历程,并对于协作通信技术的研究重点问题进行了讨论和分析。首先,对于未来无线通信系统的高速率、广覆盖的需求及其发展方向进行了总结和概括,并对协作通信技术的优点进行总结:其可以更有效地利用匮乏的无线资源,扩大覆盖范围,提高系统容量。其次,回顾了协作通信技术的提出和研究发展,并对于其研究热点问题进行简单分析和概括。目前对于协作通信技术的研究中关注的热点问题主要包括:分布式空时编码、协同中继节点选择、高效无线资源管理、协作感知和网络编码等。最后,简要地介绍了目前协作通信技术受到的各种关注,包括研究项目及标准化讨论中的协作通信技术,例如 WINNER 项目、IEEE 802.16 和 3GPP LTE-Advanced 等。

参考文献

- [1] 3GPP TR 25.814 v7.1.0. Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA) (Release 7). 2006.

- [2] 3GPP TR 25.913 v7.0.0. Requirements for evolved UTRA (E-UTRA) and evolved UTRAN (EUTRAN) (Release 7) , 2005.
- [3] T. Cover, A. E. Gamal. Capacity theorems for the relay channel. IEEE Transactions on Information Theory, 1979, IT-25(9):572-584.
- [4] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, G. W. Wornell. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12):3062-3080.
- [5] M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, et al. Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2):362-371.
- [6] A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang. User cooperation diversity. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11):1927-1948.
- [7] R. U. Nabar, H. Bolcskei, F. W. Kneubuhler. Fading relay channels: performance limits and space-time signal design. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1099-1109.
- [8] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, A. Lippman. A simple cooperative diversity method based on network path selection. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3):659-672.
- [9] 郭金淮, 赵雄伟, 徐晓建, 等. 基于 DF 的协作节点选择及功率分配策略研究. 计算机科学, 2007, (6): 64-67.
- [10] Wei Chen, Khaled B. Letaief, Zhigang Cao. Cooperative Interference Cancellation in Multi-hop Wireless Networks: A Cross Layer Approach. IEEE Global Telecommunications Conference, 2006 (GLOBECOM'06). Nov. 2006, 1-5.
- [11] I. I. Krikidis, J. J. Thompson, N. N. Goertz. A Cross-Layer Approach for Cooperative Networks. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2003(99).
- [12] Y. Yuan, Z. He, M. Chen. Virtual MIMO-based cross-layer design for wireless sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(5):856-864.
- [13] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks, the cooperation processing tradeoff. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 9 (7): 1049-1060.
- [14] Peng Q H, Zeng K, Wang J. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context. In IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006(9): 1-5.
- [15] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R. Network information flow. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46 (4): 1204-1216.
- [16] Koetter R, Medard M. An algebraic approach to network coding. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2003, 11 (5): 782-295.
- [17] Ho T, Medard M, Shi J. On randomized network coding [C]. In 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing, Oct. 2003.