



信息科学与工程系列专著

协同无线通信导论

Introduction for cooperative wireless communication

张忠培 魏宁 史治平 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金

信息科学与工程系列专著

协同无线通信导论

张忠培 魏 宁 史治平 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书第一部分从用户终端协作角度讨论了协作无线通信的基本概念、设计方法、信号检测及协作通信对系统设计的影响;对于用户终端的协作,介绍了协作分集的基本概念、协作分集方法、编码协作模式,以及自适应前向放大协作分集、自适应协作的空时编码设计、协作分集策略及公平性等。

本书第二部分从多点协作的传输信号设计、信道信息反馈、容量分析等多个角度讨论了协作多点传输技术进展,介绍了多点协作传输的基本概念、网络结构及干扰分析、预编码技术、波束成形及干扰协调技术,以及协作簇选择和小区扇区化大小对协作性能的影响。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

协同无线通信导论/张忠培,魏宁,史治平编著. —北京:电子工业出版社,2010. 12

(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978 - 7 - 121 - 12233 - 0

I. ① 协… II. ① 张… ② 魏… ③ 史… III. ① 协同通信:无线电通信 IV. ① E962

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 217090 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:12 字数:307 千字

印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:39.00 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 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888

前 言

协作无线传输技术与中继传输、增强多人多出多天线技术成为未来移动通信发展提高频谱效率和降低通信成本的有效措施之一,是 3GPP 的长期演进(LTE)技术的重要标准化方向。本书的出版会对协作无线传输技术的标准化推动和产业化推动起到极积作用。

从市场需求分析,很多运营商的调查分析结果指出,LTE(WiMAX)/IMT Advanced 时代真正与 3G 有所区别的承载能力不是体现在峰值速率而是体现在无线移动宽带能力,有些运营商甚至将其量化目标定为“Seamless 1 Mb/s”,很容易分析出,按照 LTE Advanced 规划的目标,小区边缘即使有 20 MHz 带宽下行也只能勉强满足要求。

从实现角度分析,小区边缘是切换敏感区域也是消耗大量终端和系统功率的区域,因此需要探讨在小区边缘性能和成本付出之间的折中。具体地说,提高小区边缘性能不能以消耗大量的基站和终端功率为代价;不能以牺牲非小区边缘性能(如小区总吞吐量和小区平均吞吐量)为代价;不能以牺牲切换质量为代价。

从 OFDMA 技术标准 802.16e 实践看,还没有实现真正意义上的同频组网,孤立小区频谱效率较高而组网效率较低。同频组网除了上面提到的小区边缘速率问题外,小区平均吞吐量也明显降低。同频组网是目前 OFDMA 标准 WiMAX 和 LTE 共同面对的最主要问题之一。

针对上面所述同频组网和小区边缘问题有几种技术被提出。

(1) 同频组网技术:上行链路频率软复用和干扰协调+下行链路终端辅助测量调度规避干扰。目前在 LTE 标准化已经可以实现逻辑意义上的同频组网,以上设想还需要实践检验。

(2) 多址技术改进:如 OFDMA 中引入扩频,小区边缘采用扩频增益大于 1(实际为 MC-CDMA),而小区内部扩频增益等于 1 为纯粹的 OFDMA。多址技术改进实现同频组网是建立在具备根据用户所处位置以及干扰来改变扩频因子的自适应机制之上的。

(3) 协作多点传输:协作多点传输(CoMP, Coordinated Multiple Point)正是围绕 IMT Advanced 的目标而提出的通过基站内不同射频接入点(RRU)协作、基站和其所属中继协作和基站间协作等多种多点协作方式,减小小区边缘干扰、提高小区边缘频谱效率、增加有效覆盖的技术措施。

单站点多天线技术或非 CoMP 类技术可以增加数据传输速率,但是并不能显著提高小区边缘的性能,而且多天线技术很多工作模式如复用、波束成形(Beamforming)普适性并不是很好;而通过多点协作,可以构成虚拟 MIMO(VMIMO),可增加小区边缘性能,对终端要求也不很高。

正是在以上技术需求的牵引下,工业和信息化部组织的《国家重大专项三》在 2009 年实现了协作多点传输技术研发的立项(2009ZX03003-003)。在此之前,2007 年的国家重点基础发展研究计划 973 项目:多域协同宽带无线通信基础研究,已展开了协同通信的基础

理论研究。本书的作者有幸参与了这些项目的研究,因此,从研究者的角度总结了协同无线通信发展的进展情况,以及在无线通信系统应用中会面临的问题,以期对协作无线通信的发展起到抛砖引玉的作用。

本书内容丰富全面,论述系统深入,但又简明扼要。从用户协作的基本方法、空时信号设计、协同用户选择到基于基站的多点协作传输,再到协作传输对网络结构的影响、协作传输对信号状态信息的反馈及预编码设计,期望能包含协作传输对系统影响的方方面面,使参考本书的研究人员能尽快明确协作传输所涉及的主要问题和需要研究的一些方向。

本书在编写过程中,参阅了大量的提案与文献,对所有引用文献的作者致以诚挚的谢意。

本书第1~6章由魏宁编写,第7章由刘威鑫编写,第8~11章由史治平编写,第12~14章由张忠培编写。多位研究生对本书进行了校对、排版、性能仿真等工作,在此一并致谢。

鉴于时间仓促,作者水平有限,加上协作无线通信在标准化的应用争议较多,还存在许多理论上和技术上有待于解决的问题,因此,本书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 协同无线通信基本概念	(1)
1.1.1 未来无线通信的需求	(1)
1.1.2 无线通信标准的演进	(1)
1.1.3 协同通信概念的提出	(3)
1.2 协同通信基本方案	(4)
1.3 协同通信的研究现状和主要研究方向	(6)
1.3.1 协同分集容量研究	(6)
1.3.2 协同分集中的编码技术	(7)
1.3.3 协同分集中资源分配研究	(8)
1.4 协同通信在无线通信中的应用简介	(9)
本章小结	(12)
第2章 协同分集技术	(13)
2.1 系统模型	(13)
2.2 协同模式分类	(14)
2.2.1 按协同接入方式分类	(14)
2.2.2 按中继的操作方式分类	(15)
2.3 放大前传协同模式研究	(16)
2.3.1 AF 协同模式实现	(16)
2.3.2 AF 协同模式性能分析 ^[24]	(17)
2.3.3 AF 协同模式数值结果及分析	(19)
2.4 解码前传协同模式研究	(20)
2.4.1 DF 协同模式实现	(21)
2.4.2 DF 协同模式性能分析	(23)
2.4.3 DF 协同模式数值结果及分析	(24)
2.5 AF,DF 及自适应协同模式比较及转换方式研究及仿真	(26)
本章小结	(27)
第3章 编码协同模式	(28)
3.1 编码协同原理及实现方式	(28)
3.1.1 普通编码协同	(28)
3.1.2 空时编码协同	(29)
3.2 编码协同性能仿真及分析	(30)
3.3 各种协同方式性能比较	(32)

第 4 章 基于网络编码的 AF 协同分集方法	(33)
4.1 引言	(33)
4.2 系统模型	(33)
4.3 普通 AF 协同分集及性能分析	(35)
4.4 基于网络编码的 AF 协同分集方法	(35)
4.4.1 AF-NC 数据传输方法	(35)
4.4.2 最大似然检测	(37)
4.4.3 近似最大似然检测	(38)
4.5 AF-NC 性能分析及仿真	(39)
4.5.1 性能分析	(39)
4.5.2 数值与仿真结果	(43)
4.6 M -PSK 调制方式下的 AF-NC	(44)
本章小结	(46)
第 5 章 基于 Alamouti 编码的自适应空时协同分集方法研究	(47)
5.1 引言	(47)
5.2 有校验 DF 协同分集技术	(48)
5.2.1 有校验 DF 协同分集	(49)
5.2.2 数值与仿真结果	(51)
5.3 基于 Alamouti 编码的空时协同分集技术	(52)
5.3.1 ASTCD 方法	(53)
5.3.2 性能分析	(54)
5.3.3 数值与仿真结果	(55)
5.4 基于 Alamouti 空时编码的自适应空时协同分集技术	(56)
5.4.1 AD-ASTCD 方法	(56)
5.4.2 性能分析	(57)
5.4.3 数值与仿真结果	(58)
5.4.4 基于 Turbo 编码的 AD-ASTCD 及性能分析	(59)
5.5 自适应空时 Turbo 编码协同分集技术	(60)
5.5.1 自适应空时 Turbo 编码协同分集方案	(60)
5.5.2 性能分析	(62)
5.5.3 数值与仿真结果	(63)
本章小结	(64)
第 6 章 基于信号空间分集的有校验 DF 协同分集方法研究	(65)
6.1 引言	(65)
6.2 系统模型	(65)
6.3 基于信号空间分集的 DF 协同方法	(66)
6.3.1 SSD-DF 信号发射方法	(66)
6.3.2 信号接收方法	(68)
6.4 仿真结果及分析	(70)

本章小结	(73)
第7章 协同分集策略的公平性研究	(74)
7.1 引言	(74)
7.2 公平性问题	(75)
7.2.1 系统模型	(75)
7.2.2 策略设计	(76)
7.2.3 算法描述	(77)
7.3 仿真	(78)
7.3.1 信道功率相同	(78)
7.3.2 信道功率不同	(80)
本章小结	(83)
第8章 协作多点传输的基本概念	(84)
8.1 协作多点传输(CoMP)的提出	(84)
8.2 CoMP 主要研究内容	(86)
8.3 协作多点传输的传输机制和应用场景	(87)
8.4 协作多点传输基本分类	(88)
8.5 协作多点传输技术发展面临的主要问题	(89)
8.6 CoMP 可行性	(90)
8.7 协作多点传输技术优点	(91)
8.8 CoMP 接收信号处理	(92)
8.8.1 CoMP 信号处理的分类	(92)
8.8.2 非 CoMP 传输基准	(93)
8.8.3 相干 CoMP 传输	(94)
8.8.4 非相干传输 (Type-1)	(96)
8.8.5 非相干传输 (Type-2)	(97)
本章小结	(98)
第9章 CoMP 的网络结构及干扰分析	(99)
9.1 概述	(99)
9.2 分布式无线接入网的网络架构	(100)
9.3 分布式无线接入网的关键技术与面临的挑战	(101)
9.4 性能评估	(103)
9.4.1 下行传输系统模型	(103)
9.4.2 上行传输系统模型	(104)
9.5 CoMP 网络的干扰分析	(105)
9.5.1 网络演进	(105)
9.5.2 干扰分析	(107)
本章小结	(110)
第10章 CoMP 系统的预编码设计	(111)
10.1 空间复用的预编码技术原理	(111)

10.2	非码本的预编码	(112)
10.2.1	非码本的预编码方式	(112)
10.2.2	BD 预编码技术	(113)
10.3	基于码本的预编码方式	(115)
10.3.1	基于码本的预编码概述	(115)
10.3.2	基于码本信道反馈的 CoMP 方案	(116)
10.3.3	基于有限反馈酉矩阵预编码 MU-MIMO 系统	(117)
10.3.4	基于有限反馈非酉矩阵预编码 MU-MIMO 系统	(118)
10.4	CoMP 系统有限反馈下容量分析	(120)
10.4.1	CoMP 干扰和容量分析	(120)
10.4.2	基于有限反馈信道下的容量分析	(121)
10.5	基于 BD 的 CoMP 系统性能仿真	(124)
10.5.1	CoMP 系统下行传输方案和系统级仿真结果	(124)
10.5.2	CoMP 系统上行传输方案和系统级仿真结果	(129)
	本章小结	(133)
第 11 章	CoMP 协作波束成形	(134)
11.1	CoMP 协作波束成形算法的假设条件	(134)
11.2	CoMP 反馈和调度	(134)
11.3	迭代调度	(137)
11.4	性能结果	(138)
11.4.1	在 3GPP SCM 信道下的结果	(138)
11.4.2	CoMP 评估: 失真和负载模型	(139)
11.4.3	ITU 场景中的仿真结果	(140)
11.5	支持 CoMP 与 MU-MIMO 的空间相关性反馈方法	(141)
11.6	“增强反馈”的期望特征与约束	(142)
11.7	空间相关性反馈的好处	(143)
11.8	在一定反馈失真下的性能损失	(144)
	本章小结	(144)
第 12 章	CoMP 系统的干扰协调方法	(145)
12.1	各种协调模式的比较	(145)
12.2	候选技术方案	(146)
12.3	有限协同下的干扰管理方法	(146)
12.3.1	冲突避免波束成形	(147)
12.3.2	PMI 协调	(149)
	本章小结	(151)
第 13 章	CoMP 的协作簇选择	(152)
13.1	协作簇选择的基本概念	(152)
13.2	基于簇的网络 MIMO 系统模型	(154)
13.2.1	基于簇的网络 MIMO 结构	(154)

13.2.2 协作策略	(154)
13.3 接收信号模型	(155)
13.4 簇间协作的参数选择	(156)
13.4.1 多基站 BD 的簇间协作	(156)
13.4.2 簇间协作距离	(157)
13.4.3 簇大小的选择	(159)
13.5 度量和数字结果	(160)
本章小结	(161)
第 14 章 扇区化对 CoMP 性能的影响	(162)
14.1 系统模型	(162)
14.2 传输策略	(163)
14.3 蜂窝系统仿真方法	(164)
14.4 数值结果	(166)
本章小结	(169)
参考文献	(170)

第1章 引言

1.1 协同无线通信基本概念

1.1.1 未来无线通信的需求

近年来,随着无线移动通信用户数的增加和人们物质生活水平的提高,以提供话音业务为主的传统 GSM 和 CDMA 技术已逐渐难以满足用户需求。能够提供无线 Internet 业务和多媒体业务的第三代移动通信系统(3rd Generation, 3G)的商用化进程正在我国紧锣密鼓地展开。无线通信行业的大发展带动了我国整个通信产业链的发展,信息与通信产业在我国国民生产总值中所占的比重也在不断地提高,逐渐成为国民经济发展的支柱型产业。

未来移动通信系统的峰值传输速率将提高一至两个量级以上,而可用于移动通信的频率资源却是极为有限的,必须加倍珍惜,精心设计。为在有限的频段上为用户提供更高的传输速率及更可靠的传输,需要采用全新的技术,使整个系统的频谱利用率较现有技术提高一个量级以上^[3]。

在这样的背景下,多天线技术在无线通信中的应用显得越来越重要。回顾无线通信的发展历史,从移动通信系统的蜂窝化和无线通信中应用天线分集开始,对空间资源的利用一直是提高无线系统频谱利用率的有效手段。在过去的 50 年里,人们对多天线技术的认识与将其用于提高频谱利用率的应用在不断深入和发展。从早期利用多天线空间分集和天线极化分集改善无线链路传输性能,到基于自适应信号处理方法开辟自适应天线阵列处理理论,以及智能天线(Smart Antenna, SA)、空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)技术被用于蜂窝通信,再到今天——国内外众多研究学者广泛关注在发送端和接收端同时使用多个天线阵元的多人多出通信结构,从而实现了多个数据流在相同时间和相同频带的传输和接收^[3~12],提高了频谱利用率或传输可靠性。

1.1.2 无线通信标准的演进

文献[1]给出了各种无线通信标准的演进过程,以及各种标准对传输数据速率与移动性的要求。从图 1-1 中可以看出,目前的演进目标是在 2010 年达到峰值速率为 1 Gbps,频谱效率为 5~10 bps/Hz,实现无缝覆盖和高频谱效率的无线传输。

IMT Advanced 是未来各种移动通信标准的演进目标,现在移动无线技术的演进路径主要有 3 条:

- (1) WCDMA 和 TD-SCDMA,二者均从 HSPA 演进至 HSPA+,到 LTE/LTE Advanced;
- (2) CDMA2000 沿着 1xEV-DORev. 0、1xEV-DORev. A、1xEV-DORev. B,到 UMB/UMB Advanced 或 LTE/LTE Advanced;

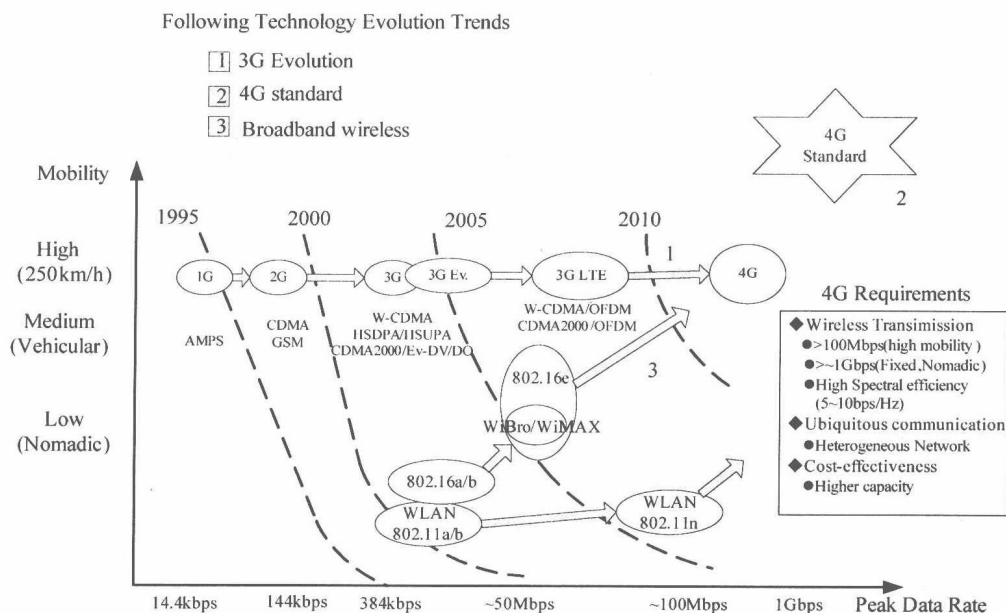


图 1-1 各种标准在 IMT ADVANCED 中的演进过程

(3) 802. 16e 演进到 802. 16m。

IMT Advanced 的最终目标将是实现大容量、高数据速率、每比特传输低代价、大范围增强覆盖、高频谱效率、更低的传输延迟、灵活的频谱利用和应用方案、支持增强型网络负载（如全移动视频）和有效支持不等小区负载等。

3GPP LTE Advanced Workshop 关于频谱效率目标描述如下：

峰值：Uplink：[15] bit/Hz/s Downlink：[30] bit/Hz/s
 平均：Uplink：[2] bit/Hz/s Downlink：[3. 2] bit/Hz/s
 小区边缘：Uplink：[0. 05] bit/Hz/s Downlink：[0. 1] bit/Hz/s

根据该描述，IMT Advanced 需要明显改进小区边缘速率，这对用户无缝感受质量（Seamless Quality of Experience, Seamless QoE）非常关键。

从市场需求角度分析：很多运营商的调查报告指出，LTE（WiMAX）/IMT Advanced 时代真正与 3G 有所区别的承载能力，不是体现在峰值速率上，而是体现在无线移动宽带能力上，有些运营商甚至将其目标量化为“Seamless 1 Mbps”。可以分析得出：若按照 LTE Advanced 规划的目标，小区边缘即使有 20 MHz 的下行传输带宽，也只能勉强满足要求。

从实现角度分析：小区边缘是切换的敏感区域，也是消耗大量终端和系统功率的区域，因此需要探讨在小区边缘性能和成本付出之间的折中，具体地：

- 提高小区边缘性能，但不以消耗大量的基站和终端功率为代价；
- 提高小区边缘性能，但不以牺牲非小区边缘性能（如小区总吞吐量和小 区平均吞吐量）为代价；
- 提高小区边缘性能，但不以牺牲切换质量为代价。

从 OFDMA 技术标准 802. 16e 的实践来看，目前还没有实现真正意义上的同频组网，同时孤立小区频谱效率较高而组网效率较低。同频组网除了有上面提到的小区边缘速率问题外，小区平均吞吐量也明显地降低。所以同频组网是目前 OFDMA 标准 WiMAX 和 LTE

所共同面对的最主要问题之一。

1.1.3 协同通信概念的提出

协同通信是指无线通信系统中,通过无线通信节点的部分资源共享实现系统容量或通信节点容量最大化的方法。常用方案有协同编码、协同调制、协同空时码、协作多点传输等方法。

作为一种分布式虚拟多天线传输技术,协同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实现,并获得多天线与多跳传输的性能增益。它可应用于蜂窝移动通信系统、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,具有研究价值与意义。可以说,协同通信技术将是继多载波调制技术、多天线技术之后,可能会对未来发展产生重大影响的一个研究热点。而且,协同通信技术非常灵活,可与现有多种技术相结合,突出各自优点。例如,与正交频分复用 (OFDM) 技术相结合,可以充分利用其抗频率选择性衰落的优点;与编码或者空时编码相结合,可以得到编码增益;与感知无线电技术相结合,能够提高频谱检测概率或者获得更多的频谱接入机会。本节主要讨论协同通信技术的发展历史与研究现状、协作方式及其关键技术。

协同通信技术的起源可以追溯到 Cover 和 El Gamal 在 1979 年关于中继信道的研究工作。中继信道模型是一个包括源节点、中继节点与目的节点的三点模型。这种模型可分解成为广播信道(源节点发送信号,中继节点与目的节点接收信号)和多址信道(源节点发送信号,中继节点将收到的信号处理后再进行转发,目的节点则接收来自源节点和中继节点的所有信号)。

研究表明,离散无记忆、加性高斯白噪声(AWGN)中继信道的容量大于源节点与目的节点间信道的容量。通过以下 3 种不同的随机编码方案可得到该信道容量的下界。

- (1) 简易方法:中继节点并不主动去帮助源节点,而是通过尽量减少干扰来帮助它;
- (2) 协同方法:中继节点先完全译出源节点发出的信息,然后重新发送;
- (3) 观察方法:中继节点对收到的源节点信息的量化形式进行编码后发送。

这些随机编码方法成为协同通信系统中各种中继节点信息处理方式产生的源泉。

协同通信技术源于中继信道,但在很多方面又区别于中继信道。首先,协同通信技术应用于衰落信道中,主要目的是对抗多径衰落,而中继信道分析的则是 AWGN 信道的容量;其次,中继信道中设置中继节点的唯一目的就是帮助源节点发送信息,而在协同通信中,整个系统的资源是固定的,各用户既可充当中继节点帮助源节点发送信息,又可作为源节点发送自己的信息。因此,协同通信技术与中继信道研究的侧重点有所不同。协同通信技术的基本思想是在多用户通信环境中,使用单副天线的各临近移动用户可按照一定方式共享彼此的天线协同发送,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,提高系统传输性能。这种传输方式融合了分集技术与中继传输的技术优势,形成了分布式的虚拟 MIMO 系统,克服了相干距离等限制,在不增加天线数目的基础上,在传统通信网络中可获得与多天线及多跳传输情况下相近的传输增益。所谓虚拟 MIMO 指的是:在协同通信系统中,多个中继节点本身可自然形成虚拟的天线阵列,节点间通过相互配合和信息互通,模拟传统 MIMO 技术的应用环境,从而实现联合空时编码的传输方案。与此同时,目的节点

不仅接收来自源节点直接发送的信号,同时还接收来自中继节点转发的信号,并根据无线链路传输状况和信号质量,选取不同的合并方式进行处理,从而最大限度地利用有效信息,获得分集增益并有效地提高数据传输速率。

自 Sendonaris 等人从 1998 年提出协同通信的概念以来,各国相关的研究方兴未艾。国际上,许多相关课题已经或正在展开。例如,无线世界研究论坛(WWRF)已经成立了关于中继的分组委员会,专门开展对此项技术的研究,并发表了相关研究的白皮书。2004 年 1 月 1 日,欧盟在第六个框架程序中启动了 WINNER 项目,其目的是研究一个无处不在的无线系统,在性能、效率和覆盖灵活性上更加优于目前的系统,同时,该项目中也包含了基于中继的概念。很多知名国际期刊、会议也单独列出子方向对协同通信技术进行报道,如 IEEE 主办的 *Communication Magazine* 等杂志,ICC、WCNC、GlobeCom 等会议。2006 年,Springer 也出版了由众多学者合作的关于协同通信技术的专著。

世界已有多所大学的实验室开展了这方面的研究,例如,瑞士皇家科学院通信技术实验室无线通信课题组的研究项目 Cooperative MIMO Wireless Network、欧洲通信委员会组织的项目 IST-ROMANTIK 等。当然,还有更多大学的学者在协同通信技术方面做出了卓越贡献,如麻省理工大学的 J. N. Laneman 博士、美国 Polytechnic University 的 E. Erkip 副教授、英国伦敦大学 King 学院的 M. Dohler 副教授、美国德州大学多媒体通信实验室的 T. E. Hunter 博士和明尼苏达州大学的 M. O. Hasna 博士等。

在无线通信系统中,通信节点间的协同会涉及用户的电池消耗、通信资费、用户隐私等问题。从系统的角度,最被看好的协作通信方式是基于传输基站的协作多点传输(Coordinated Multiple Point, CoMP),它正是围绕 IMT Advanced 的目标而提出的,通过基站内不同射频接入点(RRU)协作、基站和其所属中继协作以及基站间协作等多种多点协作方式,减少小区边缘干扰,提高小区边缘频谱效率,增加有效覆盖。单站点多天技术或者非 CoMP 类技术可以增加数据传输速率,但是并不能显著提高小区边缘的性能,而且多天技术的很多工作模式,如复用、波束成形普适性并不是很好;而通过多点协作,可以构成虚拟 MIMO (VMIMO),可增加小区边缘性能,对终端要求也不是很高。这是协同通信在无线通信系统应用中的典型案例。

1.2 协同通信基本方案

协同通信在某些方面与中继相似,其主要的不同在于:在协同通信中,每个无线用户既是传输信息的信源,同时又为协同伙伴充当中继。换句话说,在协同协议设计中,必须让各用户既可以帮助其他用户传输数据,又能够传输自己的数据。虽然这一目标在近期似乎很难实现,但有理由相信,经过一段较长时间的努力,最终可以实现。

协同直接导致了码率分配和传输功率分配的问题。以功率为例,为了协同,每个用户需要用掉更多的功率或能量,因为他不仅要传输自己的信号,还需要传输其他用户的信号。但是,由于用户可以从协同中获得分集增益,从而在保持相同传输性能的同时,能够降低对传输功率的要求。所以协同的一个目的是在保持传输性能不变的情况下,降低整个网络的功率消耗。

另外,协同通信在传输速率上也面临与上述功率问题相类似的问题。在协同通信中,

各用户不仅需要传输自己的信息比特,而且需要传输其他用户的信息比特,那么各用户应该需要更多的带宽。但是,由协同分集带来的增益,可以提高各用户的频谱利用率,从而可以采用码率更高的信道编码,以此来抵消掉对更多带宽的要求。

从以上两个方面可以看出,协同通信的一个关键问题是,协同分集带来的增益是否能够抵消掉对功率和带宽的额外需求,同时获得系统的性能提升或节省传输资源。综观协同分集的研究历史,许多工作其实都是为了对这一问题进行分析、诠释与求解。

下面我们对两类主要协同的协同方式做一个简单介绍。这两种方式是:放大前传(Amplify-and-Forward, AF)和解码前传(Decode-and-Forward, DF),也有文献将 DF 称为检测前传(Detect-and-Forward)。图 1-2 将这两种方式做了一个简单比较。

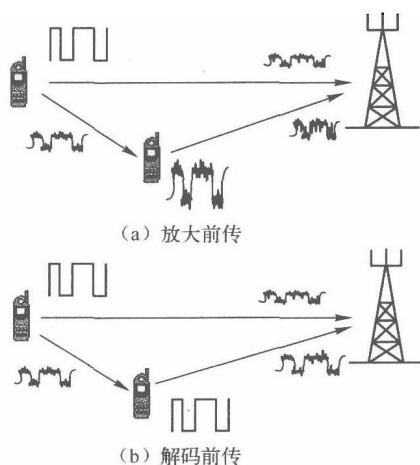


图 1-2 放大前传与解码前传示意图

放大前传是最简单的协同方式。每个用户接收到协同伙伴的信号(含信道噪声)后直接将该信号放大并发射出去。基站经合并从两个用户发射过来的信号后再做判决。虽然在放大前传时,噪声和信号一起被放大了,但是,基站仍然收到了经过两个相互独立信道衰落的信号版本,提高了接收的性能。

Laneman 等人首先提出了放大前传这种协同方式^[27]。他们计算了无编码放大前传的比特错误率,并且证明了:尽管噪声和信号一起被协同伙伴放大并传输,但与非协同方法相比,放大前传仍然具有较高的性能增益。文献[28,29]扩展了这一工作,他们推导出了在准静态瑞利(Rayleigh)衰落信道下放大前传协同方法的断线率,并得出了在两用户协同中,放大前传协同方法可以获得两阶分集结论。

解码前传是指协同用户试图检测并解码接收到的协同伙伴的数据,然后前传对该数据的估计结果。解码前传主要有两种类型,一种是在中继处不进行循环冗余校验(Cyclic Redundant Check, CRC),而直接前传有可能判决错误的估计数据,简称无校验 DF 协同;另一种是在中继处进行循环冗余校验,根据校验结果决定是否前传数据,简称有校验 DF 协同。

最早提出解码前传的是 Sendonaris、Erkip 和 Aazhode,他们将解码前传应用到 CDMA (Code Division Multiple Access) 系统中,并推导出了可以达到的传输速率范围和断线率。

在文献[28,29]中,Laneman、Wornell 和 Tse 研究了解码前传协议的断线率,他们将用户

间信道的断线(信噪比低于特定速率要求)定义为系统断线。换一种说法,如果用户没有成功检测协同伙伴的数据,就称为发生了断线。经过分析推导,他们得出了这种方法只能获得一阶分集结论,甚至很多时候比非协同方式性能更差,理由为用户可能传输错误估计的协同伙伴的数据。

在无校验解码 DF 协同中,当用户接收协同伙伴的数据发生错误时,会导致错误比特的前向传播,从而导致基站进行数据检测时出错。为了减少这种情况带来的损害,文献[33]提出了一种考虑用户间信道比特错误概率的最优合并方法,该方法根据用户间信道比特错误的概率大小来调整从中继用户处接收信号在合并中的权重,从而得到最优的检测结果。Laneman 和 Wornell 得出了类似的结果^[27]。但这样的检测方式要求信宿必须在某种程度上知道用户间信道的错误比特概率。

减少这种情况带来的损害的另一种方法是避免错误传播,Laneman、Wornell 和 Tse 在文献[28,29]中提出了一种混合解码重传方法(Hybrid Decode-and-Forward)。在该方法中,当用户间瞬时信噪比较高时,用户解码并传输协同伙伴的数据;而当用户间信道信噪比较低时,则回到非协同模式,传输自己的数据。文献[28,29]证明了这样的解码前传传输方法和放大前传一样可以获得两阶分集。除了检测信噪比以外,还有一种更为简单的方法,就是用户传输数据时加入循环冗余校验比特,这样协同伙伴在接收完数据后可以通过 CRC 校验来判断是否接收正确,从而决定是否前传数据^[28]。这种方式就是有校验解码 DF 协同。

1.3 协同通信的研究现状和主要研究方向

协同通信提出以后进行了很多的研究,主要集中于协同分集容量研究、协同分集性能分析、协同分集信号设计、协同通信中的功率分配、协同伙伴选择等几个方面。本节对协同通信中的几个主要研究热点及研究现状做简单介绍。

1.3.1 协同分集容量研究

最早对中继信道的容量的研究开始于 Cover 和 El Gamal,他们得到了退化中继信道的容量及普通中继信道容量的上下界^[21]。但是没有得到普通中继信道的确切容量。在无线通信中,由于节点一般不能同时收发信号,所以更多的研究集中于信道被划分为正交子信道的情况^[28,32]。文献[34]研究了多入多出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)中继信道的容量,得到了高斯信道和 Rayleigh 衰落信道条件下的各态历经容量上下界,并证明了在某些特定的信噪比条件下, Rayleigh 衰落信道条件下的容量上下界重合。文献[35]证明了具有正交组成部分的离散无记忆中继信道的容量等于最大流最小割上界(Max-Flow Min-Cut),并将结果扩展到了频分高斯信道。文献[36]研究了三节点无线中继信道在 Rayleigh 衰落环境下的容量,该文假设发射节点能够得到信道状态信息(Channel State Information, CSI),得出了断线率以及各态历经容量的上下界。文献[37]首先将中继信道容量的结果扩展到了发射端知道部分信道信息或发射端可以联合操作等情况下多天线 Rayleigh 准静态衰落信道,然后进一步将结果扩展到了多源或多目的节点的情况。文献[38]假设源到中继及目的节点的信道和中继节点到目的节点的信道为正交高斯信道,以优化信道容量为目标研

究了两信道之间的资源分配问题。文献[39]研究了两用户互为中继的广播信道的容量区域,证明了中继或用户间协同可以有效提高广播信道的容量。在文献[40]中,作者研究了中继信道在低信噪比区域的断线率容量,由于普通放大前传(Amplify Forward, AF)在这一区域的性能较差,作者提出了一种新的 Bursty Amplify-Forward 方法,并证明了该方法能够达到断线率容量。文献[41]得到了无直接链路情况下 AF MIMO 中继信道的各态历经互信息。

从上述文献中可以看出,中继和协同分集在各种应用场景下对通信容量的提升已经逐步得到证明。

1.3.2 协同分集中的编码技术

协同分集的目的是有效利用空域分集,因此空时编码技术在协同分集中的应用自然成为一个研究热点;同时,由于协同分集自身的冗余特性(二次或多次传输),如何更加有效地利用信道编码也是一个必须解决的问题;另外,协同分集技术与网络编码技术的结合作为一个新兴课题也得到了广泛的关注。

对空时编码在协同分集中的研究分为两类:一类直接由中继传输构成空时码,不考虑源到目的节点的链路^[42~47];另一类则在考虑了源与目的节点的直接链路的基础上进行研究^[48~60]。

文献[42]中,作者将线性弥散码(Linear Dispersion Code, LDC)引入多中继分集中,通过误对率(Pairwise Error Probability, PEP)分析得出了当各中继均只有单天线,信噪比趋于无穷大时,其分集度为中继个数 R ;接着在文献[43]中,将文献[42]的结果扩展到了源与接收节点均为多天线的情况。文献[44]研究了正交和准正交空时码在无线中继信道中的应用,证明了分布式空时码可以获得比选择中继 DF 更好的性能。文献[45]构造了一类能够获得满分集的具有更低复杂度的代数空时码。文献[46]研究了在与文献[43]类似的条件下非相干差分空时码的设计,并得出其最终可以获得的分集阶数为源与接收节点天线数的较小值与中继节点数的乘积的结论。文献[47]分析了两个中继节点 AF 分布式 Alamouti 空时码的误码率性能及分集度,分析了分布式中继空时码与传统空时码分集度的差异。

文献[48]考虑了源与目的节点的直接链路,并在此条件下得出了达到最优分集复用折中的基于 AF 的空时编码。文献[49]提出了一种新颖的格子编解码设计,并将其应用于 AF 和 DF 协同分集,在保持适中的复杂度的同时,获得了较大的性能提升。文献[50]分析了多中继情况下,AF 协同的渐近误对率性能,并通过编码增益的优化设计出了近似最优的预编码方法。文献[51]提出了一种协同差分空时编码方法,并研究了其分集增益,然后通过优化功率分配的方法使分集增益最大化,从而优化系统的性能。在文献[52]中,作者对事先并不知道参与协同的中继节点数的情况的空时码进行了设计与优化。文献[53]将三种传统空时码(见文献[54~56])的均衡方案扩展到了基于放大前传的协同空时编码情况,得到了分布式时间反转(Distributed Time-Reversal, D-TR)空时块码,分布式单载波(Distributed Single-Carrier, D-SC)空时块码,分布式正交频分复用(Distributed Orthogonal Frequency Division Multiplex, D-OFDM)空时块码,并研究比较了它们在频率选择性衰落信道中的性能。文献[57,58]研究了一类非正交放大前传协议(Generalized Non-orthogonal Amplify and For-