



Communication
Network Technology

现代通信网络技术丛书

认知与协作 无线通信网络

- ◇ 讲述协作通信的基础原理和最新研究成果
- ◇ 将协作通信与绿色通信、认知无线电相结合
- ◇ 将协作通信中的高层技术和跨层处理相结合

谢显中 雷维嘉
马 彬 高 川 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代通信网络技术丛书

Modern Communication Network Technology Series

认知与协作 无线通信网络

谢显中 雷维嘉 马彬 高川 编著

人民邮电出版社

北京

前 言

在通信网络中协作无处不在。在通信设备中包含一些使用多个实体协作工作的技术，例如，信号、函数、算法、进程、处理机、构建模块和整个单元等实体彼此互动，以完成通信功能。在通信网络中，通信的双方都需要遵守共同的通信规则，即网络协议，因此，网络协议本身就被看成协作的一种形式。从这两个方面看出，一些通信协作相互之间不需要预先建立任何协作结构就能发生影响，这种协作被称为隐性协作，主要注重于对给定资源的公平分配而不获取其他的收益。

与之对应，显性协作的主要特征是协作需要通过建立特定的结构来实现。换句话说，需要设计各方都允许和支持的协作行为，且相应的节点直接与其他节点彼此互动。目前有很多显性协作事例，如中继技术、以中继为基础的协作分集和虚拟 MIMO 等。本书主要考虑这种显性协作问题，即在无线通信网络中采用的不同协作策略，探究协作技术应用到无线通信网络的巨大潜力。

本书所关注的协作通信技术被 LTE-Advanced 和 IEEE 802.16m 等 IMT-Advanced (4G) 用来解决扩大覆盖范围 (如用辅助中继)、消除覆盖盲点 (如用辅助中继)、降低小区间干扰 (如用协作中继、协作多点传输 CoMP)、提高上行链路容量 (如用协作分集、虚拟 MIMO)、改善系统性能等长期困扰无线移动通信网络的问题。此外，协作通信技术还可以与其他技术较好地结合，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；与认知或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。因此，协作无线通信网络的研究具有重要意义，现在和将来较长一段时间都会是研究的热点。

目前国内外已出版了一些协作通信网络的著作，本书在吸取这些著作优点的基础上，力图全面和系统地反映协作无线通信的主要方面和最新研究成果，从概念上规范和区分了不同的协作无线通信方式与技术，将协作通信与绿色通信、认知无线电相结合，对协作通信中的高层技术和跨层处理给予高度重视。主要内容包括：发展背景、基本概念、信息论基础、协作分集、中继方案、空时协作、功率约束与能量有效性、协作路由技术、基于认知无线电的协作通信、基于网络编码的协作传输等。

全书共分 10 章，是作者及其所在的研究所最近几年承担相关项目研究工作的阶段总结，其中，第 1 章、第 2 章、第 5 章、第 8 章和第 9 章由谢显中教授完成，第 3 章、第 4 章和第 6 章由雷维嘉教授执笔，第 7 章和第 10

章分别由马彬副教授和高川副教授完成。

本书得以顺利出版得到不少专家的帮助，在此，感谢北京理工大学的李祥明教授和加拿大国家通信研究中心的 Bo Rong 博士等的合作交流，同时感谢国家自然科学基金项目（60872037）对本书出版的资助。

鉴于时间仓促、作者水平有限，加之协作无线通信技术的发展日新月异，书中难免有疏漏甚至不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年11月

目 录

第 1 章 认知与协作无线通信导论	1
1.1 协作通信的背景	1
1.2 协作通信的概念	1
1.3 协作无线通信的意义	4
1.4 协作无线通信网络的主要方案	5
1.5 协作无线通信的优缺点	6
1.6 协作无线通信的典型应用	7
1.6.1 无线城域网 (802.16 系列) 中的应用	7
1.6.2 蜂窝移动通信网络 (3G/B3G/4G) 中的应用	9
1.6.3 无线局域网 (802.11x) 中的应用	11
1.6.4 车载通信网中的应用	12
1.6.5 无线传感器网络中的应用	13
参考文献	13
第 2 章 协作无线通信信道的容量分析	17
2.1 概 述	17
2.2 协作中继信道	18
2.3 协作广播信道	23
2.4 协作多址信道	27
2.5 协作蜂窝系统的信道容量	28
2.6 容量增益、速率中断增益和分集复用折中	32
2.7 本章小结	35
参考文献	36
第 3 章 协作分集技术	39
3.1 协作分集的系统模型	40
3.1.1 中继信道	40
3.1.2 协作分集的模式	40
3.2 固定转发协作协议	42
3.2.1 固定放大-转发方式	43

3.2.2	固定解码-转发方式	45
3.3	自适应协作协议	47
3.3.1	选择解码-转发方式	47
3.3.2	增量中继	48
3.4	编码协作分集	49
3.4.1	协作模型和协作机制	49
3.4.2	编码协作分集的成对误码率分析	52
3.4.3	基于速率兼容打孔卷积码的协作分集	55
3.4.4	基于低密度奇偶校验编码的协作分集	60
3.5	基于旋转星座的协作分集	64
3.5.1	协作机制	66
3.5.2	旋转星座的设计	67
3.5.3	信号的调制与接收	68
3.5.4	性能分析	71
3.5.5	性能仿真	77
3.6	本章小结	79
	参考文献	79

第 4 章 协作无线通信中的中继选择 82

4.1	协作中继节点的选择	82
4.1.1	选择解码-转发协作分集方式的误符号率	82
4.1.2	中继节点信道质量的评估准则	83
4.1.3	中继的选择和仿真结果	84
4.2	多中继节点时的功率分配	85
4.2.1	功率分配算法	85
4.2.2	仿真结果	86
4.3	通过协作传输扩大覆盖范围	87
4.3.1	中继机制	88
4.3.2	性能分析	89
4.3.3	仿真结果	92
4.4	分布式环境中移动中继动态选择和切换策略	93
4.4.1	单中继节点的选择策略	93
4.4.2	多中继节点的选择策略	95
4.4.3	分集增益及系统容量的计算	99
4.4.4	仿真实验结果	99
4.5	本章小结	103

参考文献	103
第 5 章 虚拟天线阵与空时协作	105
5.1 概述	105
5.2 虚拟天线阵简介	106
5.2.1 VAA 系统模型	106
5.2.2 VAA 系统的平均互相关性	107
5.2.3 VAA 系统中的功率衰减	109
5.2.4 VAA 系统模型的仿真	110
5.3 采用 DF 协议的 DSTC	111
5.3.1 系统模型	112
5.3.2 性能分析	113
5.3.3 数值例子	114
5.4 采用 AF 协议的 DSTC	115
5.4.1 系统模型	115
5.4.2 性能分析	116
5.5 对抗同步误差的 DSTC	118
5.5.1 系统模型	118
5.5.2 性能分析	119
5.5.3 数值例子	122
5.6 本章小结	124
参考文献	124
第 6 章 协作通信的能量效率和网络寿命	128
6.1 协作网络中的能量效率	128
6.1.1 系统模型	128
6.1.2 性能分析和最优功率分配策略	129
6.1.3 数值仿真结果	132
6.2 通过协作使网络寿命最大化	133
6.2.1 系统模型	134
6.2.2 协作网络寿命的最大化	136
6.2.3 仿真结果	141
6.3 本章小结	143
参考文献	144
第 7 章 基于协作的网络路由技术	146
7.1 协作路由技术概述	146

7.2	自组织网络中的公平协作路由	147
7.2.1	研究动机和问题	147
7.2.2	使用协作传输的联盟博弈	149
7.3	无线网络中最小功率协作路由	153
7.3.1	网络模型和发射节点	154
7.3.2	链路分析	155
7.3.3	基于协作的路由算法	157
7.3.4	性能分析	158
7.4	本章小结	161
	参考文献	161
第 8 章	协作通信中的跨层设计与优化	163
8.1	概述	163
8.2	无线网络的跨层设计	164
8.3	跨层设计与无线协作通信的结合	167
8.4	WiMAX 网络中的应用实例	170
8.4.1	系统结构	170
8.4.2	跨层机制	171
8.4.3	决策算法	173
8.4.4	仿真和结果分析	176
8.5	无线传感器网络中的应用实例	178
8.5.1	路由、MAC、物理层的联合优化	178
8.5.2	应用层与物理层联合设计	180
8.6	本章小结	183
	参考文献	183
第 9 章	基于认知无线电技术的协作通信	187
9.1	概述	187
9.2	认知无线电技术	188
9.2.1	认知无线电系统的发展背景	188
9.2.2	认知无线电系统的基本功能模块	189
9.2.3	认知无线电关键技术简介	191
9.3	协作空闲频谱感知	195
9.4	协作认知多址接入	198
9.4.1	系统模型	198
9.4.2	协作认知多址协议	201

9.4.3 吞吐量分析	202
9.4.4 时延分析	202
9.5 认知中继	206
9.5.1 系统模型	206
9.5.2 认知中继的设计	207
9.5.3 数值结果	208
9.6 有偿交易认知协作	210
9.6.1 系统模型	210
9.6.2 以协作为基础的频谱交易	213
9.6.3 数值例子	215
9.7 本章小结	216
参考文献	217
第 10 章 基于网络编码的协作通信	221
10.1 网络编码的概念与原理	221
10.1.1 网络编码的基本概念	221
10.1.2 网络编码的特点	222
10.1.3 网络编码的基本工作原理	222
10.1.4 网络编码的主要技术问题	223
10.2 网络编码方法	224
10.2.1 确定性网络编码	224
10.2.2 随机网络编码	225
10.2.3 线性网络编码	226
10.3 网络编码在协作分集中的应用	231
10.3.1 基于网络编码的协作分集技术	231
10.3.2 网络编码在分布式天线系统中的应用	232
10.3.3 网络编码在多用户合作通信中的应用	234
10.3.4 基于网络编码的自适应编码协作通信方式	236
10.4 本章小结	246
参考文献	247

第 1 章

认知与协作无线通信导论

1.1 协作通信的背景

Cooperate (协作) 这个词来自拉丁字 co-和 operare (工作), 因此它意味着“一起工作”。协作是指一组实体为了达到一个共同或各自的目标一起工作的策略。在协作背后隐含的意思是每个协作个体通过统一行为的方式获得收益。协作也可看成通过给予、分享或允许做一些事情获取某些好处的行为。协作这个术语能够用来描绘所有做出贡献的参与者之间的关系, 人类和动物界都广泛地采用了协作。信息技术已把我们引向一个超链接世界, 在这个世界里每个实体 (节点, 以后不再区分节点和实体, 如人或机器) 都连接或者可能连接 (有线或无线) 到其他实体 (节点)。这样, 有无数本地的和全球的节点 (每个人或机器都会变成其中潜在的节点) 彼此互连, 形成一个复杂的网络, 在这种复杂的网络中, 协作将扮演重要的角色。

相对于有线通信网络, 在无线通信网络中, 衰落、多径和节点的移动导致通信环境较差, 这些严重地影响了通信质量和传输速率。另外, 无线网络的用户 (实体/节点) 非常多 (以我国为例, 目前无线通信用户大约为有线网络用户的 4 倍), 但其带宽十分有限, 无线网络的业务也很丰富, 这些都要求较高的传输速率和通信质量。因此, 目前无线通信技术面临着前所未有的巨大挑战。

传统的点到点无线通信技术已接近香农极限, 必须探索超越传统点到点通信技术的新技术和新方案。由于无线通信信道固有的开放性 (空域) 和广播特性 (信息传输), 传统的技术方案认为无线通信的这些特点是有害的, 而新的观念和技术突破却能将其变害为利, 因此可以充分借助这两个特点来解决目前技术中出现的问题。在这个过程中出现了两个新的技术创新, 一个是充分利用空域资源的多天线 (MIMO) 技术^[2-7], 另一个是充分利用通信节点间的协作行为 (广播特性使得节点间可以互相帮助) 的协作通信技术^[8-11]。虽然两个技术之间具有紧密的联系, 但本书所关注的是后者, 即在无线通信网络中采用的不同协作策略, 从无线网络构建的立场上来考虑协作, 探究协作技术应用到无线通信网络的巨大潜力, 以后对协作通信和协作无线通信不加区分。

1.2 协作通信的概念

考虑一个具有 A、B、C 3 个节点的简单无线通信网络 (更多节点的无线通信网络是相似

的), 节点 A 和/或节点 B 需要向节点 C 传输数据, 按照各方都允许和支持的协作行为来分析, 将有自私行为和协作行为两种情况。

自私行为(无帮助): 节点 A 视节点 B 为竞争对手(竞争资源或相互干扰), 相互间无帮助, 当节点 A 和/或节点 B 向节点 C 传输数据时, 只能通过竞争协议(如 CSMA/CD、ALOHA 等)或第三方(如基站或服务器等)的指挥调度才能成功, 并且通信过程中不会产生增益(如分集增益、复用增益、路损增益等)。

协作行为(包括无私帮助和相互帮助)。在无私帮助的协作行为中, 一个节点帮助另一个节点中继传输数据到节点 C(当然需要占用该节点的部分资源), 而担任中继任务的节点本身没有数据传输, 我们称这种协作为中继。

如图 1.1 (a) 所示, 节点 A 离节点 C 太远以至于无法直接与节点 C 通信(无直接通信链路), 而节点 B 离节点 C 较近, 这时可以通过节点 B 中继节点 A 的数据到节点 C, 实现节点 A 到节点 C 的数据传输, 这样, 通过节点间的协作不仅实现了远距离数据传输, 还获得了一定的路损增益^[12], 节约了功率。

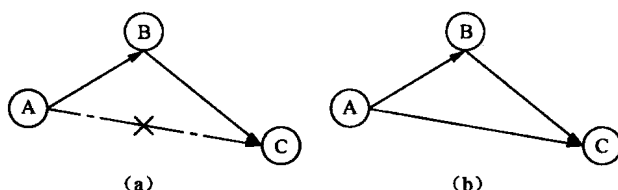


图 1.1 简单中继与协作中继

另外, 如图 1.1 (b) 所示, 即使节点 A 离节点 C 不太远(有直接通信链路), 但由于无线通信环境不好, 导致节点 A 与节点 C 的直接通信效果不满意, 这时可以通过节点 B 中继节点 A 的数据到节点 C, 节点 C 合并从节点 A 与节点 B 传输来的数据, 这样, 通过节点间的协作不仅改善了节点 A 到节点 C 的通信效果, 还获得了一定的分集增益。前者称为简单中继或辅助中继(有些文献也直接称为多跳, 本书后面不区分这些表达), 后者称为协作中继(有时为方便也简称为中继, 如后面介绍的中继信道则指这种协作中继信道)。

在相互帮助的协作行为中, 节点 A 不再视节点 B 为竞争对手, 而是相互帮助的伙伴, 当节点 A 和/或节点 B 需要向节点 C 传输数据时, 都互相伸出援助之手, 互相帮助对方中继传输数据到节点 C(需要节点的部分资源共享), 我们称这种协作为协同, 这时好像形成了一个虚拟的 MIMO 系统或虚拟天线阵(本书后面不区分这两种表达, 有些文献也称为分布式多天线)。

在协同方式下, 当中继传输的数据和直接传输到目的节点 C 的数据相同时(强调多个独立的衰落路径), 如图 1.2 (a) 所示, 产生分集增益; 当中继传输的数据和直接传输到目的节点 C 的数据不同时(强调多个独立的空间并行子信道), 如图 1.2 (b) 所示, 产生复用增益。前者我们称为协同分集或协作分集(本书后面不区分这两种表达), 后者称为协同复用或协作复用(本书后面不区分这两种表达)。

因此, 虚拟的 MIMO 系统或虚拟天线阵包括协作分集和协作复用两种情况, 目前关于前者研究较多, 本书后面也给予较多的篇幅讨论; 后者研究相对较少, 但在未来高速室内无线网络中大有可为。

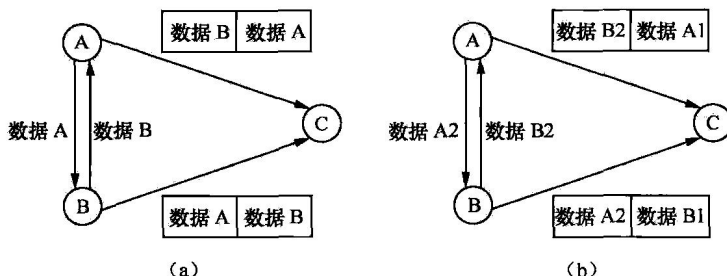


图 1.2 协作分集和协作复用

在 3 个节点的情况下（更多节点的无线通信网络是相似的），还会出现节点 A 同时向节点 B 和/或节点 C 传输数据，如蜂窝移动通信网络的基站（节点 A）采用全向天线对移动用户（节点 B 和节点 C）进行广播控制信息，或向某用户（节点 B 或节点 C）发送数据。节点 B 和节点 C 既可以选择自私行为（这就是目前蜂窝移动通信网络的方案），还可以采用协作行为。

一种协作行为是当节点 B 或节点 C 处在不好的环境中无法收到广播控制信息时，另一个节点可以无私帮助它，向其中继传输信息，如图 1.3 所示，这等同于前面的简单中继。另一种协作情况是，节点 A 向节点 B 传输数据，由于广播特性节点 C 也会收到该数据（若节点 B 和节点 C 不协作则产生对节点 C 的干扰），如图 1.4 所示，一方面，节点 C 向节点 B 中继收到的数据，从而节点 B 进行合并可以获得分集增益，这等同于前面的协作中继；另一方面，若节点 B 向节点 C 中继收到的数据，节点 C 可以通过适当的编码方案实现干扰抵消，这更多的是一个编码设计问题，我们仅在第 2 章中讨论。

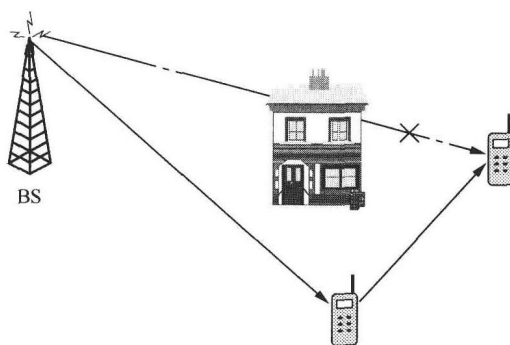


图 1.3 一个用户无私帮助另一个用户向其中继传输信息

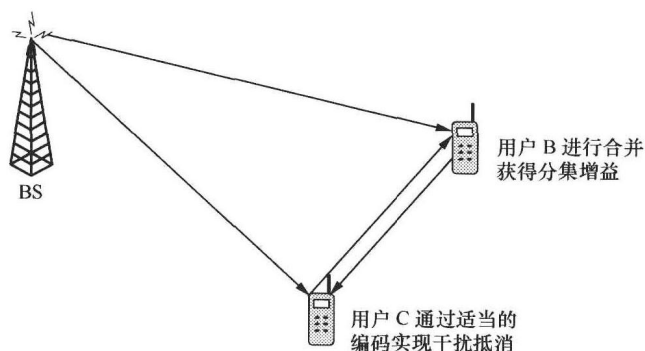


图 1.4 用户 B 和用户 C 协作获得分集增益或干扰抵消

综上所述，协同通信是指在无线通信网络中，通过无线通信节点的部分资源共享和一定方式协作，提供无线通信系统的性能增益（如分集增益、复用增益、路损增益等），并达到网络容量或节点容量最大化的方法。常用方案有辅助中继（无直接通信链路）、协作中继（有直接通信链路）、协作分集（多个独立的衰落路径）、协作复用（多个独立的空间并行子信道）

等，本书的协作通信的概念主要限于这 4 个方面，它们都以中继为基础。除辅助中继外，协作无线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，可在传统无线通信网络中实现，并获得多天线与多跳传输的性能增益。

对于实际的无线通信网络应用，常常会是上面 4 种基本方案的混合使用，或者 4 种基本方案的延伸，如协作多点传输 (CoMP)^{[13][14]}、基站控制下的多跳传输^{[15][16]}、基站控制下的 P2P 传输^{[1][17]}等，本书不单独研究这些延伸方案或技术，而是作为协作无线通信技术的应用。

在本书讨论中参与的节点数不限于 3 个，包括源节点 (Source Node)、目的节点 (Destination Node) 和多个中继节点 (Relay Node)，如图 1.5 所示，将形成多跳 (两跳以上) 的串行中继 (见图 1.5 (a))、并行中继 (见图 1.5 (b))、混合中继 (见图 1.5 (c)) 和混合协作 (见图 1.5 (d)) 等。对于后两种混合方式，可以借助空时 (Space-time) 码和分布式处理技术来形成分布式空时处理以改进系统性能，我们也采用文献[12]的术语称为空时中继或空时协作。

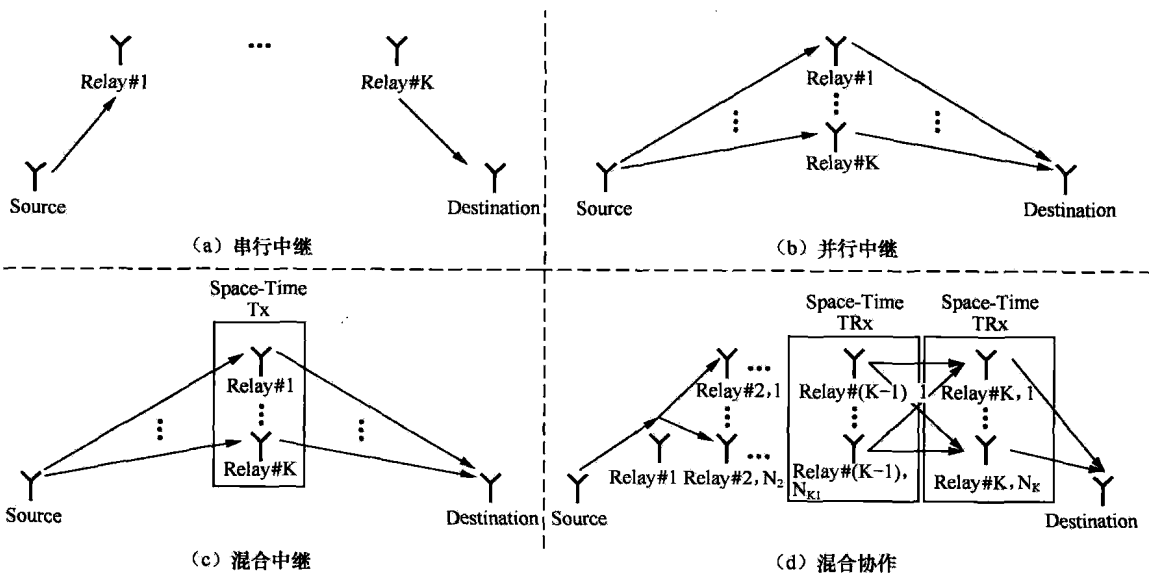


图 1.5 多个节点组成的串行中继、并行中继、混合中继和混合协作

1.3 协作无线通信的意义

以蜂窝移动通信为代表的无线通信网络近几十年在全世界得到了迅猛发展，从我国情况来看，无线通信行业的大发展带动了整个通信产业链的发展，信息与通信产业在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，并作为带动各地产业结构调整与升级的重要领域。

随着人们生活水平的提高，移动通信的用户数还在快速增加，移动通信的业务类型还在不断丰富，以提供话音业务为主的传统 GSM 和 CDMA 技术已不能满足这种需求。第三代移动通信网络 (3G) 在欧美和日韩市场取得了极大的成功，在我国的商用化进程也正紧锣密鼓地展开，目前部署的 3G HSPA 网络虽然在理论上可以提供高达 14Mbit/s (下行) / 5Mbit/s (上行) 的数据速率，但在实际环境中远没有这么高，目前仅仅能满足话音、一般数据业务和基

本 Internet 业务, 基本不能提供视频点播、多方视频会议等交互式多媒体业务。

为了更好地满足这些日益增长的需求, 迫切需要能够提供更高传输速率和更高频谱效率的宽带无线通信网络。按照 ITU 的要求^[18-20], 新一代移动通信网络 IMT-Advanced (习惯称为 4G) 的峰值传输速率将提高到 1Gbit/s 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提高到 10bit/s/Hz 以上。在这样的背景下, 多天线 (MIMO) 技术和协作通信技术在无线通信中的应用就显得越来越重要, 作为 IMT-Advanced (简称为 IMT-A) 的候选技术 3GPP LTE-Advanced (简称为 LTE-A) 和 IEEE 802.16m 都将这两种技术作为核心技术。

本书所关注的协作通信技术被 LTE-Advanced 和 802.16m 用来解决扩大覆盖范围 (如用辅助中继)、消除覆盖盲点 (如用辅助中继)、降低小区间干扰 (如用协作中继、协作多点传输)、提高上行链路容量 (如用协作分集、虚拟 MIMO)、改善网络性能等长期困扰蜂窝移动通信网络的问题。此外, 协作通信技术还可以与其他技术较好地结合, 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; 与认知或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。因此, 协作无线通信网络的研究具有重要的意义, 现在和将来较长一段时间都将是研究的热点。

1.4 协作无线通信网络的主要方案

根据第 1.2 节中的协作通信概念, 无论是辅助中继、协作中继、协作分集、协作复用, 它们都以中继为基础。虽然目前已有很多协作无线通信的方案 (也称为协议或方法), 但根据中继的处理方式, 可以分为两大类^{[12][21-22]}: 透明中继和再生中继。

在透明中继方式中, 中继对接收信号所携带的信息没有进行修改, 而只是进行简单的放大、相位旋转等简单处理后重传信号。包括放大前转发 (AF) 方案、线性处理转发 (LF) 方案、非线性处理转发 (nLF) 方案等。

放大前转 (AF): 作为一种简单而普遍的中继方法, 中继接收信号后在数字域进行放大, 然后重新发送。根据需要, 可以进行固定增益放大和可变增益放大, 在重新发送时可能需要移到另外一个频段。

线性处理转发 (LF): 这种中继方法包括了一些对放大后的模拟信号的简单线性处理, 比如相位旋转以便实现分布式波束成型。

非线性处理转发 (nLF): 该方法目前应用较少, 它是在重传接收到的信号前, 先进行某种非线性操作, 比如为了限制峰均比的加窗操作等。

在再生中继方式中, 中继则对接收信号的波形 (在模拟域或样值) 和信息 (在数字域或比特) 实施一些处理, 改变了接收信号的内容。包括译码转发 (DF) 方案、估计转发 (EF) 方案、压缩转发 (CF) 方案、消除转发 (PF) 方案、聚集转发 (GF) 方案等。

译码转发 (DF): 这是一种常用的中继方案, 中继检测到信号时, 首先进行信道码译码, 再重新进行信道编码, 然后重传。根据性能需要, 中继前后的信道编码可能相同也可能不同, 同时还可能涉及交织处理。目前, 有一些译码转发 (DF) 的改进协议, 比如, 在中继节点进

行校验，若译码有错则不转发，若没有错则重新进行编码转发。

估计转发 (EF): 中继利用一些检测算法恢复原始信号，并将它进行放大，下变频到基带，然后将这个被估计的信号重传。比如中继节点估计调制的信号，然后以相同或不同的调制方式重传。

压缩转发 (CF): 这种方法类似于估计转发协议，只不过向目的节点转发的是检测到的信息流的压缩版本。这就会涉及采样信号的信源编码 (压缩编码) 形式，当执行压缩的中继节点离目的节点较近时，可以达到容量和性能的优化。

消除转发 (PF): 在该方案中，允许不同中继数据流之间存在干扰，但在中继节点处尽可能消除干扰。比如，中继节点在接收时进行多用户检测和/或在重传时进行预编码等。

聚集转发 (GF): 该方案是压缩转发协议的扩展，它不仅是基于采样值进行信源编码，同时还直接对信息本身进行信源编码，但需要将数据累积一段时间后才能进行。

另外，还有一些复合的协作方案，如基于空时码的空时协作、协作 ARQ、协作路由、基于认知无线电的协作、基于网络编码的协作等。

1.5 协作无线通信的优缺点

协作通信作为一种新的通信方式，既有许多优点，也存在一些缺点。其主要优点如下^{[12][23-25]}。

(1) 性能增益。包括分集增益、复用增益、路损增益等，这些增益可以转化为传输功率的降低、系统容量的提高和覆盖范围的扩大。

(2) 均衡的服务质量 (QoS)。在传统蜂窝无线通信网络中，处于小区边沿和阴影衰落区的用户会遇到容量或覆盖的问题，而中继可以平衡小区边沿和小区中心的差异，从而为所有用户提供一致的服务质量。

(3) 基础条件不足条件下的网络部署。中继的使用允许具有很少基础设施甚至没有基础设施的条件下保证通信，如在发生自然灾害导致基础设施被破坏的区域，尽管传统的无线通信系统已丧失功能，但可以迅速部署中继网络来进行通信。

(4) 节约成本。若采用固定中继 (设置专门的中继站)，与标准基站相比，则可以带来低成本的设备、低的传输功率、简单的天线配置等；若采用用户间协作的中继，则不需要进行网络规划和扩建，能够降低网络部署和运营成本。

但是，协作通信也存在一些缺点，如下。

(1) 调度复杂。虽然调度具有单个协同中继节点的链路较容易，但是随着网络中用户和中继节点的增多，这将很快变为一项极其复杂的工作。在这种情况下，中继不仅要对接入用户的数据做调度，还要对转发数据流做调度，所以中继需要更为复杂的调度算法和调度器。如果系统不能合理处理中接口和网络层方面的问题，那么由物理层协作带来的所有增益将很快被抵消。

(2) 增加开销。完整的协作中还包括切换、同步、安全性等，与没有中继的网络相比，在协作网络中这些处理更复杂，为这些功能所付出的开销会明显增大。

(3) 中继选择。确定最优的中继传输和协作对象是一项复杂的工作，而且维持这样的协作关系的复杂度比没有协作情况下的复杂度更大。在基于距离的中继选择策略中，动态的距

离估计相对比较困难,所以传统协作技术更适用于静态网络,而设计适用于移动环境的基于编码协作分集的中继选择策略,需要更进一步的深入研究。

(4) 干扰或噪声增强。如果节约的能量没有被用来降低中继节点的传输功率,而是增大容量或覆盖范围,那么,在没有相应附加措施的情况下,中继将肯定会产生额外的小区内或小区间的干扰,这种干扰会潜在地降低网络的性能。因此,需要在系统层面寻求一个最佳的折中点。

(5) 额外的中继链路。从系统吞吐量的角度来看,中继所进行的冗余传输可能会降低系统的有效吞吐量,因为它需要额外的频率信道或时隙来支持。

(6) 端到端延迟的增加。在相同条件下,端到端延迟随中继节点的数量增加而增加,且采用再生中继协议时更加突出,这对延迟敏感的业务(如话音和视频等)极为不利。

(7) 严格同步。协作的实现是以严格同步为前提的,而节点之间的同步需要传输一定量的同步信息和采用相应的同步算法,这反过来增加了信令开销和硬件费用。

(8) 更大的信道估计。中继的使用增加了无线信道的数量,若用相干解调等,则需要估计更多的信道系数,同时还需要更多的导频信息和反馈信息,因此使信道估计量增加并要求更多开销。

如何充分发扬优点和克服缺点就是协作无线通信面临的挑战,由此产生了一系列关键技术。包括协作无线通信信道的容量潜力,协作分集技术,协作中继的选择与覆盖增强,虚拟天线阵与空时协作,协作通信中的功率约束和能量效率,协作通信中的高层技术,协作通信中的跨层设计与优化,基于认知无线电的协作通信,基于网络编码的协作传输等,这些将在后面章节进行详细探讨。

1.6 协作无线通信的典型应用

1.6.1 无线城域网(802.16系列)中的应用

基于 IEEE 802.16 系列也称为 WiMAX,它主要用于城域覆盖,组建一个城市进行宽带无线接入的无线城域网(WMAN)。根据是否支持移动特性,IEEE 802.16 系列标准可分为固定宽带无线接入空中接口标准和移动宽带无线接入空中接口标准,其中的 IEEE 802.16、IEEE 802.16a 和 IEEE 802.16d(也称 IEEE 802.16-2004)属于固定无线接入空中接口标准,而 IEEE 802.16e(也称 IEEE 802.16-2005)属于移动宽带无线接入空中接口标准。IEEE 802.16e 是以 IEEE 802.16d 为基础,增加了一些支持移动性的相关技术,因此,可以将 IEEE 802.16e 看作是 IEEE 802.16d 的增补方案,后向兼容 IEEE 802.16d,它在 2~6GHz 的特许频段内支持低速的移动终端,填补了高速率移动性较差的无线局域网和高移动性速率较低的蜂窝通信网络之间的空白,为用户提供了对固定和移动业务的双重支持。2007 年 10 月,以 IEEE 802.16e 为核心技术的 WiMAX 以 OFDMA TDD WMAN 的身份加入 IMT-2000 家族,成为 3G 标准的一员,一方面标志着 IEEE 802.16 系列技术正在得到传统电信网络标准化组织的认可,另一方面也表明分组通信技术对传统电信网络正发挥着越来越重要的作用。

但是,随着用户对于高速无线通信的需求与期待日益增加,需要能够提供更高的传输速率、更广的覆盖范围和更高的移动性的新一代无线通信网络。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,考虑支持更高的传输速率和更广的覆盖范围,且满足对 IEEE 802.16e 网络的兼容性;另一方面,需要尽可能地降低对现有网络部署的修改成本。为了在成本和效能间达到平衡,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 IEEE802.16 网络中采用协作通信技术的可行性和具体实施方案。

通过 MMR 小组的研究,确定了基于协作中继辅助方式的蜂窝结构扩展方向,并最终采用基于蜂窝点到多点 (PMP) 基础的树形构架作为拓扑结构。在 MMR 小组基础上,2006 年 3 月正式组建了 IEEE 802.16j 子工作组,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研究,2009 年年初,该子工作组完成了 IEEE 802.16j 的标准化工作^[26]。

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。通过对现有 WiMAX 网络中增加中继节点,引入了分布式多跳 (Hop) 中继机制,同时保持了与 PMP 模式的 IEEE 802.16e 之间的兼容性,并可以使运营商在较低的成本下,扩大小区的覆盖范围,提升用户的满意度。因此,在 IEEE802.16j 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,低开销和灵活的放置是 IEEE 802.16j 标准关注的重点。

随后,为了进一步满足 ITU 提出的未来无线通信网络 IMT-Advanced (简称 IMT-A 或 4G) 的需求,IEEE 802.16 工作组于 2008 年成立了 IEEE 802.16m 子工作组^[27],研究向 4G 演进的关键技术和相应协议。因此,IEEE 802.16m 则是 IEEE 802.16 工作组启动的一项新的针对 IEEE 802.16 系列标准的补充标准,目标是对基于 OFDMA 技术的 IEEE 802.16 无线城域网标准进行补充,提供一个在付费频段上工作的高级空中接口,并成为由 ITU 主导的 IMT-A 评估过程中的一个标准方案。

在该工作组第 53 次会议中,提出了在 IEEE 802.16m 标准中对于协作中继传输方式的支持,在其后的会议中对协作中继技术的相关问题进行系列讨论研究,并在 2009 年 10 月形成了包括协作中继在内的 4G 候选标准提案 IEEE 802.16m。与 IEEE 802.16j 相似,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基础上,提升网络用户 (特别是覆盖盲区用户) 的数据传输性能。在 IEEE 802.16m 中协作中继节点主要具有如下功能和优点^[28]。

(1) 扩大 IEEE 802.16m 基站 (BS) 的覆盖范围或提高处于小区边缘用户 (SS) 的数据传输速率,如图 1.6 所示。

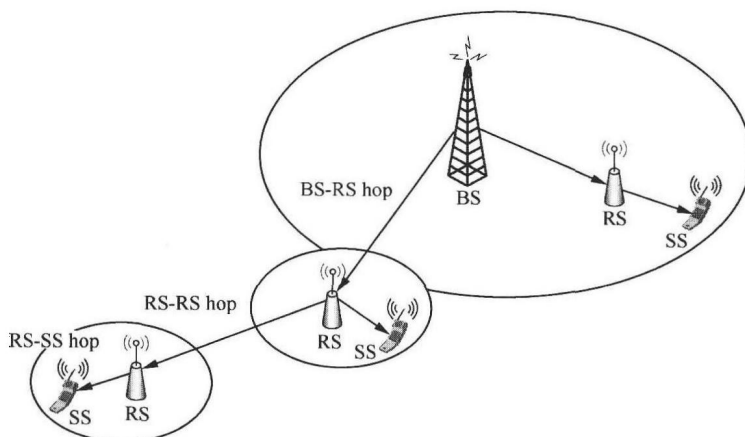


图 1.6 IEEE 802.16m 中协作中继的优点 (1)