

通信技术与应用丛书

协同通信技术

Cooperative Communications Technology

蔡跃明 杨炜伟 杨文东 吴丹 管新荣 编著



- ▶ 内容包含基本概念、基本原理、关键技术、典型应用和未来的发展趋势。
- ▶ 通过对共性基础问题的深度剖析，便于读者自学，夯实理论基础。
- ▶ 通过对典型案例和未来应用进行分析，厘清协同通信技术在提高系统性能中的效能。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



通信技术与应用丛书

协同通信技术

蔡跃明 杨炜伟 杨文东 吴 丹 管新荣 编著



机械工业出版社

本书详细介绍了协同通信的基本概念、基本原理、基本技术、关键算法、典型应用以及发展趋势等。全书共9章,内容包括协同通信概述、协同中继选择、协同通信系统的信道估计、协同无线网络中分布式空时频编码、协同MAC及协同ARQ技术、协同无线网络中物理层网络编码、协同通信中的无线资源管理、协作多点传输技术和协同无线网络中的物理层安全。

本书可作为通信工程、信息工程和其他相关专业高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为信息与通信工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

协同通信技术 / 蔡跃明等编著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12

(通信技术与应用丛书)

ISBN 978-7-111-58292-2

I. ①协… II. ①蔡… III. ①协同通信 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第253782号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 李馨馨 责任编辑: 李馨馨 王 荣

责任校对: 佟瑞鑫 责任印制: 孙 炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2018年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·332千字

0001—3000册

标准书号: ISBN 978-7-111-58292-2

定价: 55.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



前言

Preface

随着人们对无线通信带宽、覆盖率和传输容量需求的进一步提高，人们迫切需要更有效地提高传输速率和覆盖范围的新技术，协同通信应运而生。与传统移动通信中基站与用户的直接通信方式不同，协同通信的核心思想是利用无线网络中多个节点（如中继、用户终端等）之间的相互合作，把无线信道、无线网络、物理层传输技术等综合在一起进行设计和优化，进而提高系统性能。

协同通信融合了分集技术与中继传输技术的优势，在不增加天线数目的情况下，可获得多天线与多跳传输的性能增益。也正因为蕴含有如此巨大的潜力，它与 MIMO、OFDM、认知无线电、D2D、干扰管理、物理层安全等技术结合，能产生出可观的性能增益，得到了人们的广泛关注。

尽管协同通信已在 4G 中得到大量研究并成功应用，但在下一代移动通信中多种系统共存、更高节点密度和更加复杂多样信道的环境下，其在改善无线传输可靠性和提升能效等方面仍具有很大的潜力，如 2015 年 9 月 3GPP Release 13 提出要采用协同通信来进一步提升未来 5G 系统的性能等。因此，人们对协同通信的研究热情持续不减。

本书力求做到深入浅出、详略得当。在对协同通信的基本概念和基本原理的介绍中，本书着眼于共性基础问题的剖析，以利于读者打好理论基础；在对协同通信的基本技术和关键算法的介绍中，本书着眼于当前乃至未来的典型应用，以利于读者掌握发展趋势。本书共分 9 章。本书第 1 章介绍了协同通信的基本原理、典型的协同方案、性能指标、特点及应用场景。第 2 章介绍了传统协同无线网络和认知协同无线网络两种场景的中继选择问题，主要包括基于链路质量、基于位置信息、基于能量/功率约束和基于模糊综合评判的中继选择算法及性能分析。第 3 章以协同 OFDM 系统为例，介绍了协同通信系统的信道估计，包括基于叠加导频的频域信道估计和基于频域导频的时域信道估计。第 4 章以结构简单的 Alamouti 空时分组码为主线，介绍了分布式空时/空时频编码技术在协同无线网络中的应用。第 5 章介绍了协同 MAC 及协同 ARQ 技术，包括基于分布式节点选择的协同 ALOHA 协议和具有任意最大重传次数的协同 ARQ 协议。第 6 章以双向中继信道中物理层网络编码为例，介绍了各种典型物理层网络编码方案及其性能结果。第 7 章介绍了协同通信中的无线资源管理，主要包括三节点模型、多中继网络、协同 OFDM 系统、双向中继通信等不同典型场景中的无线资源管理机制。第 8 章介绍了协作多点传输技术，着重介绍了目前主流的实现方式，即协作调度/波束赋形技术和联合处理技术。第 9 章介绍了协同无线网络中的



物理层安全技术，针对不同的信道状态信息条件给出了相应的物理层安全传输方案及性能分析结果。

本书第1、2章和附录由蔡跃明编写，第4、6章由杨炜伟编写，第3、5章由杨文东编写，第7、8章由吴丹编写，第9章由管新荣编写，全书由蔡跃明统稿和审阅。本书不仅参考了近期的文献资料和专著，更融入了作者所在课题组多年从事协同通信的研究成果。在本书的编写过程中，张涛、王磊、龙彦汕和张薇等研究生做了许多工作，在此表示诚挚的感谢。

本书得到了国家自然科学基金项目（编号61501512、61471393、61671474）的支持。由于编者才疏学浅，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者



目录

Contents

前 言

第1章 协同通信概述 / 1

1.1 协同通信的基本原理 / 2

1.1.1 协同通信发展概述 / 2

1.1.2 协同分集原理 / 3

1.1.3 协同协议 / 4

1.1.4 协同通信信道的类型及特点 / 5

1.2 几种典型的协同方案 / 8

1.2.1 单中继网络协同方案 / 8

1.2.2 多中继网络协同方案 / 11

1.3 协同通信的主要性能及特点 / 13

1.3.1 性能指标 / 13

1.3.2 协同通信的典型增益 / 14

1.3.3 协同通信技术的特点 / 15

1.4 协同通信的应用场景 / 17

参考文献 / 20

第2章 协同中继选择 / 21

2.1 概述 / 22

2.1.1 中继选择算法的评价标准 / 23

2.1.2 中继选择算法的分类 / 23

2.2 传统协同通信网络的中继选择 / 25

2.2.1 基于链路质量的中继选择 / 25

2.2.2 基于位置信息的中继选择 / 29

2.2.3 基于能量/功率约束的中继选择 / 31

2.2.4 基于模糊综合评判的中继选择 / 34



2.3 认知无线网络的中继选择 / 37

2.3.1 基于平均信道增益功率控制的最佳中继选择 / 38

2.3.2 基于瞬时信道增益功率控制的最佳中继选择 / 41

2.3.3 基于 NACK/ACK 的最佳中继选择 / 43

参考文献 / 44

第3章 协同通信系统的信道估计 / 46

3.1 协同 OFDM 系统概述 / 47

3.1.1 系统模型 / 47

3.1.2 常用信道估计方法 / 48

3.2 基于叠加导频的频域信道估计 / 50

3.2.1 系统模型 / 51

3.2.2 基于叠加导频的信道估计 / 54

3.2.3 迭代信道估计和数据检测 / 55

3.2.4 平均误符号率分析 / 57

3.2.5 仿真结果 / 59

3.3 基于频域导频的时域信道估计 / 62

3.3.1 系统模型 / 63

3.3.2 时域信道估计 / 64

3.3.3 Cramér-Rao 界 / 69

3.3.4 仿真结果 / 71

3.4 研究展望 / 74

第3章附录 / 75

附录 A / 75

附录 B / 76

参考文献 / 77

第4章 协同无线网络中分布式空时频编码 / 79

4.1 Alamouti 空时分组码概述 / 80

4.2 分布式空时分组编码 / 82

4.3 DF 单中继协同 OFDM 系统中分布式空时频编码 / 83

4.3.1 DF 单中继协同 OFDM 系统模型 / 84



4.3.2 分布式空时频编码方案 / 85

4.3.3 中断概率分析 / 86

4.3.4 分组空时频块编码方案 / 94

4.3.5 仿真与讨论 / 96

4.4 AF 多中继协同 OFDM 中空时频编码 / 98

4.4.1 AF 多中继协同 OFDM 系统模型 / 98

4.4.2 分布式空时频编译码方案 / 99

4.4.3 仿真与讨论 / 101

参考文献 / 102

第5章 协同 MAC 及协同 ARQ 技术 / 104

5.1 概述 / 105

5.1.1 MAC 协议分类 / 106

5.1.2 ARQ 协议分类 / 109

5.2 基于分布式节点选择的协同 ALOHA 协议 / 112

5.2.1 系统模型及协议 / 112

5.2.2 理论分析 / 114

5.2.3 数值仿真 / 116

5.3 具有任意最大重传次数的协同 ARQ 协议 / 118

5.3.1 系统模型及信道模型 / 119

5.3.2 协同 ARQ 协议及其吞吐量分析 / 120

5.3.3 仿真分析 / 124

5.4 研究展望 / 125

第5章附录 / 126

参考文献 / 127

第6章 协同无线网络中物理层网络编码 / 128

6.1 概述 / 129

6.1.1 网络编码的基本原理 / 129

6.1.2 协同无线网络中物理层网络编码 / 131

6.2 双向中继信道中物理层网络编码 / 133

6.2.1 传统双向中继传输 / 133



6.2.2 数字网络编码 / 133

6.2.3 放大转发物理层网络编码 / 135

6.2.4 去噪转发物理层网络编码 / 141

参考文献 / 145

第7章 协同通信中的无线资源管理 / 146

7.1 三节点两跳中继网络中的功率分配 / 147

7.1.1 AF 中继模型中的功率分配 / 148

7.1.2 DF 中继模型中的功率分配 / 150

7.2 多中继网络中的协同资源优化分配 / 151

7.2.1 一种联合中继节点选择的拟凹博弈功率控制机制 / 152

7.2.2 一种联合中继节点选择的随机博弈功率控制机制 / 155

7.2.3 基于相关均衡的联合中继节点选择和功率控制机制 / 160

7.3 OFDM 中继系统中的协同资源管理 / 167

7.3.1 OFDM 中继系统模型 / 167

7.3.2 OFDM 中继系统中能效优先的协同资源管理方案 / 168

7.4 双向中继协同通信中的功率分配 / 173

7.4.1 TDBC-DF 双向中继系统模型 / 174

7.4.2 TDBC-DF 中继系统中的功率分配 / 174

参考文献 / 176

第8章 协作多点传输技术 / 177

8.1 CoMP 技术概述 / 178

8.1.1 CoMP 技术的基本原理 / 178

8.1.2 CoMP 的传输模式 / 179

8.1.3 CoMP 反馈机制 / 181

8.1.4 CoMP 技术的实现方式 / 182

8.1.5 CoMP 的组网场景 / 184

8.2 协作调度/波束赋形技术 / 186

8.2.1 协作资源调度方式 / 186

8.2.2 协作波束赋形算法 / 188

8.2.3 CoMP 中协作调度协作波束赋形的主要实现方式 / 191



8.3 联合处理技术 / 194

8.3.1 联合处理技术的基本原理 / 194

8.3.2 JT 传输技术 / 196

8.3.3 DCS 技术 / 198

参考文献 / 198

第9章 协同无线网络中的物理层安全 / 199

9.1 物理层安全简介 / 200

9.1.1 物理层安全提出 / 200

9.1.2 物理层安全性能评价指标 / 201

9.2 完全已知 CSI 条件下的物理层安全协同传输 / 204

9.2.1 引言 / 204

9.2.2 波束赋形 / 205

9.2.3 协同人工干扰 / 206

9.2.4 DF 协同波束赋形与人工干扰的联合设计 / 207

9.2.5 AF 协同波束赋形与人工干扰的联合设计 / 210

9.2.6 双向中继 AF 波束赋形与人工干扰的联合设计 / 213

9.2.7 仿真结果与讨论 / 216

9.2.8 小结 / 220

9.3 主信道 CSI 反馈时延条件下的物理层安全协同传输 / 220

9.3.1 引言 / 221

9.3.2 信道时延相关建模 / 222

9.3.3 基于自适应编码速率的物理层安全机会协作 / 223

9.3.4 仿真结果与讨论 / 229

9.3.5 小结 / 232

9.4 统计 CSI 条件下物理层安全协同 ARQ / 232

9.4.1 引言 / 233

9.4.2 协同 ARQ 系统模型 / 233

9.4.3 物理层安全性能分析 / 237

9.4.4 仿真结果与讨论 / 248

参考文献 / 250

附录 缩略词 / 253



随着人们对无线通信带宽、覆盖率和传输容量需求的进一步提高,传统的蜂窝网络不得不降低小区的覆盖面积,这将使得频谱资源更加稀缺、小区通信盲区增多等问题日益突出。为此,人们迫切需要能更有效地提高传输速率和覆盖范围的新技术,协同通信应运而生。协同通信的核心思想是利用无线网络中多个节点之间的相互合作,把无线信道、无线网络、物理层传输技术等综合在一起进行设计和优化,以便给整个系统带来协同的“涌现”增益,即经协同处理后的整体性能(功能)大于每个组成部分的性能(功能)之和。协同通信的英文名是 Cooperative Communications,其他中译名还有协作通信和合作通信等,在不少文献中也常有协同无线通信的称谓。

与传统的用户与基站之间的直接通信不同,协同通信是通过中继的辅助或其他用户的协作来完成的一种通信方式。实际上,它融合了分集技术与中继传输技术的优势,在不增加天线数目的情况下,可获得多天线与多跳传输的性能增益。也正因为蕴含有如此巨大的潜力,它与多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)、正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、认知无线电、设备到设备(Device-to-Device, D2D)、干扰管理、无线物理层安全等技术结合,能产生出可观的性能增益,得到了人们的广泛关注。例如,在移动通信终端节点只能配备一根天线的多用户场景中,用户终端间通过共享彼此的天线,可形成一个虚拟的多天线阵列,从而将单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统构建成一个虚拟的 MIMO 系统,进而获得 MIMO 系统的优势。由于协同方式多种多样,所以存在大量不同的系统构架,研究结果也呈现出多样性,称谓也有中继通信、中继协同通信、协同通信等多种。本章主要介绍协同通信的基本原理、典型方案、性能指标、特点及应用场景。

1.1 协同通信的基本原理

1.1.1 协同通信发展概述

协同通信的目的是使信道条件差的节点获得可接受的信道质量和足够的通信速率,其应用的典型场景是基于中继的无线通信,而这一场景的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代对三节点中继系统的研究。学者 Van der Meulen 在 1971 年最早提出了经典的中继信道模型^[1],并分析了中继信道容量的上界和下界。随后, Cover 和 Gamal 在 1979 年提出了一种由源节点、目的节点和中继节点构成的网络^[2],他们将中继信道分解为一个广播信道和一个多接入信道,得出了几种特殊情况下的中继信道容量界和一般情况下的信道容量界,奠定了中继通信的理论基础,由此拉开了协同通信研究的序幕。

20 世纪 80 年代,由于很难从信息论角度找到关于中继信道更有价值的结论,并且受



当时无线通信技术条件的限制,协同中继传输在应用中难以获得进一步突破,其研究热潮慢慢退却。进入 21 世纪后,Sendonaris 等人的研究重新唤起了人们研究协同中继系统的兴趣^[3]。Sendonaris 等人分析了移动上行链路用户之间的协同问题,第一次提出了协同分集的概念,其基本思想是系统中的每个终端都可以有一个或多个协同的终端节点(称之为协同节点)。这样每个节点既利用了自身的空间信道,也利用了协同节点的空间信道,从而能够获得空间分集增益。他们的研究表明,移动用户间的协同能够增强系统的抗衰落能力、提高系统吞吐量及扩大蜂窝小区的覆盖范围。Laneman 的研究给出了几种不同的协同协议的定义,并详细分析了它们的性能^[4]。Laneman 的研究成果是协同分集领域的里程碑,众多学者以 Laneman 的研究为基础对不同场景下的协同分集做了大量研究。另外,Kramer 等人从信息论的角度重新分析了不同协同方案的系统容量^[5],再次引起了人们研究协同中继系统的兴趣。由于协同通信技术不仅可以克服那些仅配置单天线的移动终端无法实现空间分集的限制,而且还可以有效提升系统容量、扩大覆盖范围,尤其是可在不明显改变现行蜂窝通信网络架构的前提下提升其网络性能。因此,各大研究机构、标准化组织都针对协同通信技术进行了专题研究,其中所得的一种增强传输方案已成为 4G 技术标准的一部分。进一步地,得益于下一代无线网络中存在着更高节点密度和多种无线系统共存等情况,人们挖掘协同通信潜力的热情不减,已有的研究表明,协同通信技术能在增强链路可靠性和提升能效方面发挥重要作用。

协同通信系统由源节点、中继节点和目的节点组成,其工作过程涉及许多因素,主要有:①“何时协同”,即协同的必要性和前提条件;②“和谁协同”,即中继节点的选择问题;③“如何协同”,即协同协议,不少文献也称之为协同策略;④“协同效果”,即协同方案的性能。下面从协同分集原理开始进行介绍。

1.1.2 协同分集原理

分集的基本思想是发送端通过多个独立的传输信道发送信息,接收端将收到的承载相同信息但统计上相互独立的多个副本信号,加以恰当合并来对抗信道衰落。而在协同通信中,其最重要的“涌现”功能之一是协同分集,该分集是通过协同节点天线的帮忙来获得独立传输副本信号的。如图 1-1 所示,假设各个无线终端(后续往往称为节点)仅配置单天线,节点 T_s 需将自身的数据发给目的节点 T_D (如蜂窝网络中的上行传输),但由于直传链路中遇到了遮挡等原因,到达 T_D 的信号较弱。与此同时,在 T_s 附近存在有节点 T_1 、 T_2 、 T_3 和

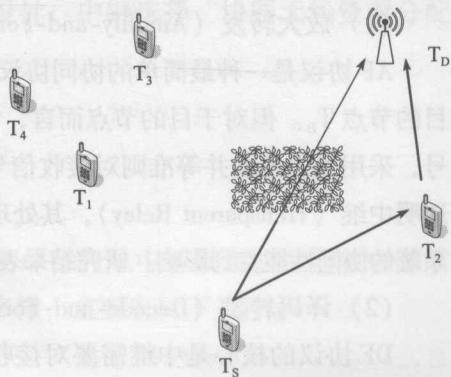


图 1-1 协同分集原理示意图



T_4 , 其中节点 T_2 离节点 T_s 和 T_D 都较近, 其直达径信号质量较好。显然, 直接通过 T_s 和 T_D 之间的传输信道, T_D 接收机无法正确接收信号。然而, 如果 T_1 通过搜寻邻近的节点, 选择 T_2 帮忙转发信息, T_2 将接收到 T_s 的信号再转发到目的节点 T_D , 则 T_D 可接收到 T_s 信号的两个副本, 恰当合并这两个信号后就可正确解出发送信号, 即获得了分集增益。可见, 这是通过协同节点 T_2 的天线来获得空间分集的一种方式^[3,4], 人们将其称之为协同分集 (Cooperative Diversity)。自然地, 协同分集效果的评估与传统分集的评估类似, 如可具体分析其中断概率、分集增益、误符号率等。

从图 1-1 的原理出发, 可以衍生出不同类型的协同传输方式。例如, 当 T_2 自身不发送数据时, T_2 仅起着中继节点作用, 称之为协同中继传输; 当两个无线终端相互协同, 每个无线终端都不仅发送自己的信息, 还要发送协同伙伴的信息, 此时的分集称之为用户协同分集 (User Cooperation Diversity), 是一种用户协同传输。而在多用户环境下, 单天线用户在传输自己数据信息的同时, 也能发送所收到和检测到的协同用户信息, 则可利用协同伙伴天线和自身天线构成多发射天线, 形成虚拟 MIMO 系统, 这为解决 MIMO 技术在那些终端难以配置多天线场景的应用难题提供了新途径。

从以上的讨论可见, 不同场景中协同节点的作用各不相同, 由此也带来了称谓的多种多样, 如中继、协同中继等, 为了保持历史的继承性和术语的简约性, 本书赋予传统中继新的内涵, 它不仅包括传统的转发, 还可包括各种处理功能。在不特别强调的情况下, 后续多将协同节点 (协同中继) 简称为中继。

1.1.3 协同协议

如图 1-1 所示, 中继 T_2 在转发 T_s 信号时涉及如何处理自己和协同伙伴的信息问题。因此, 要保证协同通信有效进行, 需要设计专门的协同协议 (规约), 以尽可能地利用有用信息, 消除干扰, 降低协同处理复杂度。协同协议指的是节点间以何种方式进行协作。针对中继不能同时接收和发送数据的半双工模式, 下面介绍几种典型的协同协议^[6]。

(1) 放大转发 (Amplify-and-Forward, AF) 协议

AF 协议是一种最简单的协同协议, 中继只是简单地将接收到的模拟信号直接放大转发到目的节点 T_D 。但对于目的节点而言, 它接收到多个 (单个中继时为 2 个) 经历独立衰落的信号, 采用最大比合并等准则对接收信号进行处理后, 就可恢复出发送信号。放大转发又称为透明中继 (Transparent Relay), 其处理简单, 但在转发信号时也将噪声转发, 当噪声较大时, 系统的协同性能受到影响。研究结果表明, 在经典的三节点模型中, 系统可获得二阶分集增益。

(2) 译码转发 (Decode-and-Forward, DF) 协议

DF 协议的核心是中继需要对接收信号进行采样、存储、编译码等数字处理, 然后再发送到目的节点。译码转发又称可再生中继 (Regenerative Relay), 它增加了中继的处理复杂



度,但可避免噪声传播。与 AF 协议类似,目的节点接收机可采用恰当处理准则,合并经历多条独立衰落链路的接收信号。研究表明,在经典的三节点模型中,当信噪比较高时,系统不仅可获得二阶分集增益,而且还具有更佳的误码性能。根据中继处的不同处理过程,DF 协议还可以进一步分为无校验 DF 协议、有校验 DF 协议和选择式转发协议。

放大转发和译码转发是当前最常见的两种协同转发方式,在此基础上,人们又推出了后续的协同协议。

(3) 协同编码 (Cooperative Coding, CC) 协议

CC 协议的思路是将协同通信和信道编码相结合,以提高系统的资源利用率。它避免了 AF 和 DF 协议下中继因总是重复发送信源信息而带来资源利用率低的不足。

在 CC 协议中,图 1-1 中的 T_2 和 T_s 互为协同伙伴(中继),它们互相帮忙发送对方的信息,即通过两条独立的衰落路径分别发送同一码字的不同部分。当用户(T_2 或 T_s)接收到协同伙伴的信息并能正确译码时,对解码信息进行重新编码并转发。在 T_D 接收端,来自不同信道的信息包含不同的编码冗余成分,这样通过恰当的处理,系统不仅可获得分集增益,同时还可获得额外的编码增益。

(4) 压缩转发 (Compress-and-Forward, CF) 协议

图 1-1 中,中继 T_2 和 T_D 的接收信号是同一源信号加上不同噪声后的不同信号,这两种信号存在相关性,中继可以利用这种相关性压缩接收信号。利用这种相关性来压缩接收信号的中继协议称为 CF 协议,有些文献也将称其为估计转发 (Estimate-and-Forward) 协议。

要注意的是当中继-源间的信道质量很差时,若中继节点接收到源节点发送的信号后,总是向目的节点发送信号,则不管是放大-转发策略、译码-转发策略还是编码协同策略,其系统的协同性能都会严重下降,这将得不偿失。为此,人们根据具体应用场景,进一步提出了根据信道质量的自适应协同协议、基于目的节点反馈的协同协议等,以获得简单且高效的协同协议。

从上述的讨论可以看出,共享天线的引入给协同通信系统带来了诸多有待回答的问题,如协同通信信道容量、协同协议、协同分集信号设计、中继选择、协同无线资源分配等。这些问题将在后续的章节中陆续介绍。

1.1.4 协同通信信道的类型及特点

1. 协同通信信道的类型

最基本的协同通信信道类型如图 1-1 所示的单源-单目的单中继信道,但随着中继节点功能及信道形成的不同,协同通信信道类型也多种多样,主要有以下几种。

(1) 单源-单目的多中继信道

图 1-2 给出了单源-单目的多中继信道示意图,其中依据中继信道的形式又可分为并



行中继（见图 1-2a）和串行中继（见图 1-2b）两种模式。

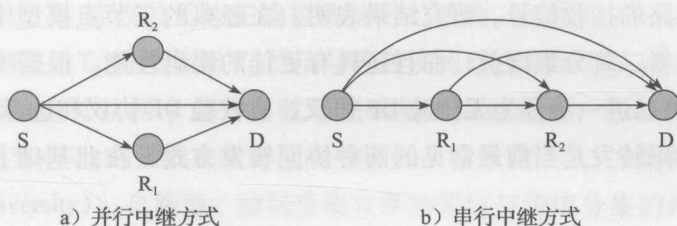


图 1-2 单源 - 单目的多中继信道示意图

(2) 协同多接入信道 (Multiple Access Channel)

图 1-3 给出了协同多接入信道示意图，其中第一种协同节点自身发送信息，也作为中继（见图 1-3a），即 S_1 和 S_2 都是源节点，但 S_1 除了发送源信息外，还作为中继 R_1 帮助 S_2 源节点转发信息， S_2 节点也类似；第二种协同节点仅仅作为中继（见图 1-3b），即中继节点 R 转发 S_1 、 S_2 的信息给目的节点 D ，本身不作为源节点或者目的节点发送或接收信息。

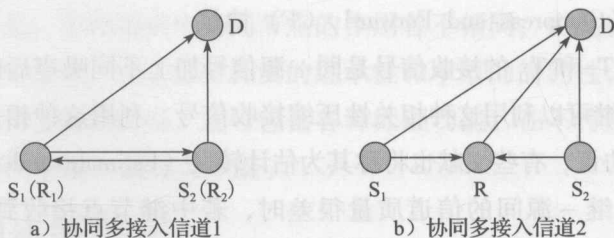


图 1-3 协同多接入信道示意图

(3) 协同广播信道 (Broadcast Channel)

协同广播信道如图 1-4 所示，与图 1-3 类似也分为两种情况：第一种协同节点（见图 1-4a）作为源节点自身既发送信息，也作为中继帮助别的节点转发信息，即 S_2 除自身发送源信息外，还作为中继节点 R_2 转发 S 的广播信息， S_1 节点也类似；第二种协同节点（见图 1-4b）仅仅作为中继转发源节点 S 的广播信息，中继节点 R 利用广播信道帮助 S 转发信息给 D_1 、 D_2 ，本身不作为源节点发送信息或者作为目的节点接收信息。

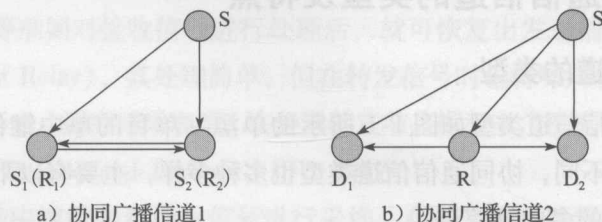


图 1-4 协同广播信道示意图



(4) 平行中继信道 (Parallel Relay Channel)

如图 1-5 所示, 平行中继信道在空间上平行形成 MIMO 信道, 可实现有效的干扰管理, 即源节点 S、中继节点 R 与目的节点 D 均包括多根天线, 在信号发送过程中, 不同天线处的信号所使用的信道之间相互正交, 不会相互干扰。

(5) 多源 - 多目的中继信道

如图 1-6 所示, 多源 - 多目的中继信道除了转发信息外, 还会将其他源的信号发给目的端, 形成干扰, 即中继节点 R 同时转发 S_1 、 S_2 的信息给 D_1 、 D_2 。这样, D_1 还会收到 R 所转发信号中来自 S_2 的部分, 这部分信号对于 D_1 而言是干扰, D_2 亦是如此。这种信道有时又称为协同干扰信道。

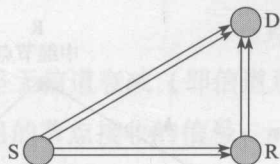


图 1-5 平行中继信道示意图

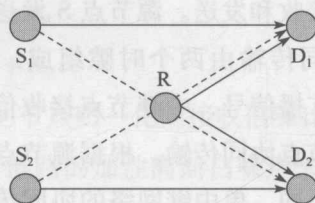


图 1-6 多源 - 多目的中继信道示意图

2. 协同通信信道的特点

总体上看, 协同通信信道和传统无线通信信道的最大区别在于发送和/或接收天线的高度不同。协同中继的天线高度较低, 所以会淹没在杂散的环境中。另一个重要区别是协同中继的发送端和接收端可能是移动的, 这将明显影响信道的时间自相关特性。此外, 协同中继减小了通信距离, 从而减小了路径衰落和阴影衰落。按照中继节点是否处理转发信号, 协同中继可分为透明中继 (即直接转发) 和再生中继, 它们的信道有不同的特征。

(1) 透明中继信道

首先, 除了较短的通信距离带来每个中继段较小的路径损耗和阴影效应之外, 端到端的时延扩展减小。其次, 发送端和接收端的移动性将影响信道的时间自相关函数。最后, 由于系统的所有中继端是相互耦合的, 故系统的衰落特性依赖于具体的系统拓扑, 并且带来了全新的、更加严格的性能分析方法。透明中继系统的主要性能损耗源于阴影效应和衰落导致的每个中继段的统计变化的累加。

(2) 再生中继信道

首先, 较短的通信距离可以带来更小的累积路径损耗、更少的阴影变化和更短的传播时延, 进而显著降低频率选择性衰落。其次, 发送端和接收端的移动性将明显影响信道的时间自相关函数。最后, 由于再生中继的系统特性, 每个中继段是独立的, 从而可以获得其幅度统计特性。可再生中继系统的主要性能损耗源于路径损耗和一定程度的阴影衰落。