

Cooperative Communications and Networking

Technologies and System Design

Y.-W. Peter Hong
Wan-Jen Huang
C.-C. Jay Kuo

协作通讯与网络 ——技术与系统设计

徐平平 田 锦 武贵路
徐志国 周洪成

译



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

协作通信与网络

——技术与系统设计

**Cooperative Communications and Networking
Technologies and System Design**

Y. -W. Peter Hong Wan-Jen Huang C. -C. Jay Kuo

徐平平 田 锦 武贵路 译
徐志国 周洪成

东南大学出版社
• 南京 •

Translation from English language edition:

Cooperative Communications and Networking.

Technologies and System Design

by Y.-W. Peter Hong Wan-Jen Huang and C.-C. Jay Kuo

Copyright © 2010 Springer US

Springer US is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

图字:10-2013-359 号

图书在版编目(CIP)数据

协作通信与网络:技术与系统设计/(美)洪乐文,黄苑珍,郭宗杰著;徐平平,田锦等译. —南京:东南大学出版社, 2014. 8

书名原文: Cooperative Communications and Networking: Technologies and System Design

ISBN 978-7-5641-5127-0

I. ①协… * I. ①洪… * ⑤黄… * ②郭… ④徐…
⑤田… III. ①移动网 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆(CIP)数据(2014)第 181665 号

协作通信与网络——技术与系统设计

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮 编 210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 22.75

字 数 446 千

版 次 2014 年 8 月第 1 版

印 次 2014 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-5127-0

定 价 70.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

过去几年里,在无线协作通信与网络领域已经有了相当多的研究活动。如今,这个领域已经发展到一个成熟的水平,因此非常有必要整理这些研究成果并以统一的方式介绍这些研究成果。这恰恰是本书的目的和优点:以连贯和一致的方式来阐述协作通信与网络目前的发展情况。本书作者的辛苦努力对研究生学习无线通信前沿成果非常有益,并将激励科研人员去发现新的研究方向,同时也激励设计者不断地掌握最新的研究成果。

《协作通信与网络——技术与系统设计》的作者们已发表过有关该领域的大量基础性研究成果。就这点优势而言,他们可以给出有关该领域的及时、综合的观点。考虑到一致性和独立性,作者们首先回顾了无线通信基本原理,特别重点讨论了分集技术、性能和设计中的权衡。在这些必要基础之上,作者首先分析了简单协作通信模型的例子,然后扩展到多中继、多信源的协作通信模型。本书最后介绍了协作通信如何与先进的无线传输技术相结合,还说明了物理层协作通信的优势是如何渗透到协议栈的更高层的。

本书不仅可以作为学生、工业生产技术人员初学协作通信的入门读物,也可以作为协作通信领域科研人员、网络设计人员的参考书。

Minnesota, USA, April 2, 2010

Georgios B. Giannakis

前 言

在过去几年里,协作和中继通信是通信领域中被广泛探索的主题之一。尽管很多基本概念源自 20 世纪 60 年代有关中继信道的早期研究,但直到 20 世纪末 21 世纪初,在 Sendonaris, Erkip, Aazhang, Laneman, Tse, Wornell 等人的努力下这些技术才得以推广。协作通信的核心思想是所有用户通过协作的方式将消息传送至信宿,不像在传统网络中那样,为独立传送消息而与其他用户抢占信道资源。然而,虽然在过去几年里协作通信已经有所发展,但是协作通信已经发展为一种设计理念,而不是一种特定的信息传输技术。随着传统传输技术逐渐达到其工作极限,这种理念已经彻底改变了无线网络的设计方式,其允许我们增加网络覆盖范围、吞吐量和传输可靠性。最近几年,协作和中继技术已经逐渐发展为下一代无线通信标准,比如 IEEE 802.16 (WiMAX) 或 LTE,并且该技术已运用到许多现代无线通信应用中,比如认知无线电和保密通信。随着协作通信应用范围的扩大,对工程师和科研人员来说,对这种设计理念有根本性的理解是很有必要的。鉴于此,我们为完成本书而做了大量工作。我们希望读者可以通过本书系统地学习协作通信。

我们对这个主题的研究源自我们在 21 世纪初发表的有关异步随机协作传输方案。那时,我们提出并分析了所谓的随机大型矩阵(Opportunistic Large Arrays, OLA)系统,在该系统网络中,用户可以参与协作通信并以随机非对称的方式中继信源消息,而且用户可以随时可靠地获知这些消息。随后,我们又研究了协作通信在传感网中的应用,主要研究其能量效率和利用传感器依赖性来提高通信效率的能力。最近几年,我们研究了大量的多用户协作通信系统的设计方案,仔细研究了物理层和 MAC 层的问题,比如中继辅助多用户监听方案和协作 MAC 层协议。我们发现这个学科真的非常有意思,而且我们为大量的应用而着迷。现在,我们意识到随着越来越多的人研究这个学科,这

些技术将会变得越来越先进和多样。然而,我们希望通过本书将协作通信中各先进的主题联系在一起,可以使读者对该学科有一个更全面的认识。

本书旨在通过介绍协作通信和中继技术的基本概念,以使工程师或研究生对这个不断发展的领域有个清晰的理解,同时使他们掌握在这个领域进行深入研究的基础知识。虽然本书并没有完全介绍在协作通信领域的所有研究成果,但涵盖的基本概念足够读者基本理解协作通信系统以及常遇到的挑战。本书的内容归纳如下:

- 第1章,我们将简单地介绍各种协作通信与中继技术,在随后的章节再对其进行详细介绍。此外,我们还将简述该技术的发展历史,并给出一份介绍该技术在下一代无线通信标准中所扮演角色的报告。
- 第2章,我们将回顾基本的无线通信和 MIMO 技术,因为有的读者并不熟悉无线通信领域。这些知识对理解本书其他章节所介绍的技术非常有帮助。
- 第3章,我们通过讲解一个仅包含两个用户和一个公共信宿的基本协作实例来介绍基本协作通信与中继技术。
- 第4章,将协作与中继技术扩展到多中继系统中。该系统中,这些中继一起形成分布式天线阵列,可以使用天线阵列来开发空间分集和复用增益。
- 第5章,从信息理论的观点来描述协作与中继信道的基本极限。
- 第6章,将协作与中继技术应用于多用户系统,该系统中多协作实体可能同步发射,或者多个源节点接入一个公共的协作信道。
- 第7章,我们将介绍协作与中继技术是如何与其他先进的无线传输技术比如 OFDM 和 MIMO 相结合,并说明这样做给系统带来的额外好处。
- 第8章,我们将介绍如何利用协作的优势开发介质访问控制(Medium Access Control, MAC)层以及如何设计 MAC 策略来增强物理层的协作通信。
- 第9章,我们将阐述几个有关跨层和网络的问题,这些问题可能会在协作网络中遇到,包括路由、QoS 和安全考虑。

在此,我们向助理研究员 Shu-Hsien Wang 女士、Jui-Yang Chang 先生、同事 Shih-Chin Lin 博士表示诚挚的感谢,他们为本书的编辑和校对做了大量工作。没有他们的帮助,我们绝不可能完成书稿。此外,我们还要感谢 Yung-

Shun Wang 先生、Miao-Feng Jian 女士、Chao-Wei Huang 女士在生成数据和插图上所做的工作,同时还要感谢 Meng-His Chen 先生、Ta-Yuan Liu 先生、Yi-Hua Lin 女士在校验本书原稿上所给予的帮助。

Hsinchu, Taiwan

Y. -W. Peter Hong

Kaohsiung, Taiwan

Wan-Jen Huang

Los Angeles, California

C. -C. Jay Kuo

April, 2010

译者序

通信产业是目前最为活跃和前景广阔的产业。通信是信息的比特级、链路级传输和信息在网络内节点间的交换。基于有线信道的传输技术能够有效地克服信道畸变带来的非线性效应,实现高速率传输,基于无线信道的编码解码和调制解调技术已取得了重大进步,将 4G 商用技术奉献给业界,给通信行业带来勃勃生机。移动通信高速率(100 Mb/s 以上)传输仍然是移动通信的瓶颈。基于 MIMO 和 OFDM 原理的点对点直接链路传输技术还将继续得到研究和突破,新的思想仍在不断涌现。协作通信给正在奋进中的无线通信技术带来了新的思维模式。协作通信是在源节点和目的节点之间增加了中间节点进行接力传输。这种接力传输不同于传统中继传输(即主要是功率放大传输),而是吸收了网络编码和 MIMO 思想,主要采用在中间节点进行编码的方式来协作传输信息,使系统在目的节点的误码率性能更好。

东南大学和金陵科技学院的通信科学工作者们在推动时变多径信道的信道容量逼近工作中,选择了将《协作通信与网络——技术与系统设计》(Cooperative Communications and Networking—Technologies and System Design)这本书翻译成中文版奉献给广大通信工作者,给正在探索中的人们提供一个新的技术研究视野和技术路线。

本书第 2 章“无线通信和 MIMO 技术综述”,奠定了本书的理论技术基础,也是未来研究移动通信必备的信道基础知识。第 3 章“两用户协作传输方案”,阐述了解码转发(DF)、放大转发(AF)、编码协作(CC)和压缩转发(CF)四种典型方案,阐明了协作通信的几条基本路径和发展方向。第 4 章“多中继协作传输方案”,介绍了在多个中继节点场景下,利用正交协作、波束成形、空时编码等现代通信技术实际地实施协作通信传输。第 5 章“协作和中继网络的基本界限”,理论分析了特定信道的协作通信信道容量和极限。至此,第 2、3、4 章综

合在一起全面阐述了协作传输的物理层技术。

本书第6章“多源协作通信”，阐述了协作通信场景下的 TDMA/FDMA、CDMA、SDMA 和集中式与分布式协作伙伴选择多址信道接入方式。第7章“OFDM 和 MIMO 系统的协作中继”阐述了 OFDM 和 MIMO 两种特殊技术给协作通信带来的信道分配和编码领域的创新。第8章“协作网络的介质访问控制”，系统阐述了协作通信网络中的介质访问控制问题，说明了几种传统 MAC 技术如 CSMA/CA 在协作通信中的应用。第9章“协作网络中的网络和跨层问题”，展望未来的发展，在协作通信网络中，研究网络的 QoS 和跨层分析对系统的积极贡献。第6、7、8、9章整体对协作通信的介质访问层和网络层进行了全面分析，给出了高效的解决方案。

通读全书可以了解到，从无线信道的时变多径到多中继节点的协同工作有效地克服了移动通信信道衰落问题。多个源节点充分利用 OFDM、MIMO、SDMA 和跨层融合等技术于网络中，使得协作通信网络能在 MAC 和路由效率方面保证通信业务的 QoS 性能。

本书中文版面世的及时性有待提速，但其内容的技术性和有效性却是长期存在的，并将随着时间的推移更显其生命力。本书适用于各个层面的通信工作者，既可以用作提出新型通信理论的引导者，又可以作为最新的技术手册，提供解决工程问题的思路，激发工程技术人员的研究兴趣。本书的主要阅读群体是研究生或具有同等经历的通信科技工作者。本书作为通信工程专业本科生高年级的选修课教材，可以大幅度改变目前通信专业学生按照电子工程专业学习的模式，体现通信的专业特色。对于电子工程专业的学生和工程技术人员，如果有志于未来的移动通信工作，本书又不失为一个好的启蒙老师和领路人。无论哪位读者选择性地阅读本书都会收到事半功倍的有益效果。

祝愿所有阅读本书的专家、学者和爱好者都能有所收益。衷心欢迎各位读者对徐平平、田锦、武贵路、徐志国、周洪成几位译者提出宝贵意见。对于读者对译文中不甚准确的中文表述的理解，表示诚挚的感谢！译者的最大希望是，愿这部译著带给读者知识、能力和事业新的提升！

译者

2013年12月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 协作通信综述	1
1.2 协作和中继信道主要历程	4
1.3 协作通信和中继技术的标准化	5
1.4 本书概要	7
参考文献	8
第 2 章 无线通信和 MIMO 技术综述	13
2.1 无线信道的特点	13
2.1.1 路径损耗	13
2.1.2 阴影效应	15
2.1.3 多径衰落	15
2.2 采用空间分集技术	21
2.2.1 单输入多输出(SIMO)系统	21
2.2.2 多输入单输出(MISO)系统	28
2.2.3 多输入多输出(MIMO)系统	36
2.3 无线信道容量	39
2.3.1 AWGN 信道容量	40
2.3.2 平坦衰落信道容量	40
2.3.3 多天线容量	42
2.4 分集复用折中	48
参考文献	52

第3章 两用户协作传输方案	55
3.1 解码转发中继方案	56
3.1.1 基本 DF 中继方案	56
3.1.2 选择 DF 中继方案	65
3.1.3 解调转发中继方案	68
3.2 放大转发中继方案	73
3.2.1 基本 AF 中继方案	74
3.2.2 增量 AF 中继方案	84
3.3 编码协作	86
3.3.1 基本编码协作方案	86
3.3.2 编码协作的用户复用	89
3.4 压缩转发中继方案	96
3.5 单中继系统中的信道估计	97
参考文献	102
第4章 多中继协作传输方案	105
4.1 正交协作	105
4.1.1 AF 中继的正交协作	106
4.1.2 DF 中继的正交协作	112
4.2 发射波束成形	113
4.2.1 AF 中继的发射波束成形	113
4.2.2 DF 中继的发射波束成形	119
4.3 选择中继	124
4.3.1 AF 中继的选择中继	124
4.3.2 DF 中继的选择中继	126
4.4 分布式空时编码(DSTC)	129
4.4.1 DF 中继的分布式空时编码	130
4.4.2 AF 中继的分布式空时编码	135
4.5 多中继系统中的信道估计	142
4.5.1 AF 多中继系统的训练设计	143

4.5.2 DF 多中继系统的训练设计	146
4.6 多中继协作通信的其他主题	151
4.6.1 多跳协作传输	152
4.6.2 异步协作传输	159
参考文献	162
第 5 章 协作和中继网络的基本界限	166
5.1 高斯中继信道	166
5.1.1 高斯中继信道的割集界限	166
5.1.2 解码转发和退化中继信道	169
5.1.3 压缩转发	173
5.2 单中继衰落信道	174
5.2.1 各态历经容量	174
5.2.2 分集复用折中	178
5.3 多中继网络	183
5.3.1 高斯多中继网络的上界	184
5.3.2 高斯多中继网络的下界和渐近容量结果	186
5.3.3 多中继衰落信道	189
参考文献	194
第 6 章 多源协作通信	195
6.1 时分/频分多址(TDMA/FDMA)	195
6.1.1 轮询调度	197
6.1.2 机会调度	201
6.2 码分多址(CDMA)	203
6.2.1 采用指定中继节点的上行链路 CDMA	204
6.2.2 采用共享中继节点的上行链路 CDMA	212
6.3 空分多址(SDMA)	219
6.4 伙伴选择策略	223
6.4.1 集中式伙伴选择策略	224

4 协作通信与网络

6.4.2 分散式伙伴选择策略	230
参考文献	232
第7章 OFDM 和 MIMO 系统的协作中继	234
7.1 OFDM 系统的简要回顾	234
7.2 成对协作 OFDM 系统的资源分配	236
7.2.1 成对协作 OFDM 系统的功率分配	237
7.2.2 成对协作 OFDM 系统的子载波匹配	241
7.3 多中继协作 OFDM 系统	244
7.3.1 OFDM 多中继系统的协作波束成形	245
7.3.2 OFDM 多中继系统的选择中继	250
7.4 分布式空频编码	253
7.4.1 解码转发空频编码	254
7.4.2 放大转发空频编码	262
7.5 MIMO 中继的协作	265
参考文献	274
第8章 协作网络的介质访问控制	277
8.1 时隙 ALOHA 的协作	277
8.1.1 稳定域的定义	280
8.1.2 协作对的稳定域	281
8.2 协作网络中的冲突解决机制	287
8.2.1 网络辅助分集多址接入	287
8.2.2 中继用户的 NDMA 的增强	289
8.3 CSMA/CA 协作	290
8.3.1 IEEE 802.11 MAC 协议的概述	291
8.3.2 基于 IEEE 802.11 协议的 CoopMAC	292
8.3.3 CoopMAC 分析	297
8.4 协作中继下的自动重发请求 (ARQ)	300
8.5 协作网络的吞吐量最优调度协议	302

8.5.1 非协作网络吞吐量最优控制策略的回顾	303
8.5.2 协作网络吞吐量最优控制策略	305
参考文献.....	311
第9章 协作网络中的网络和跨层问题.....	314
9.1 协作网络的服务质量	314
9.1.1 简单中继网络的服务质量	317
9.1.2 协作对的服务质量	322
9.2 协作网络路由	324
9.2.1 协作路由的一般公式	324
9.2.2 协作路由的启发式算法	329
9.3 协作网络安全问题	333
9.3.1 中继网络中的不端行为	333
9.3.2 单中继协作网络中的安全问题	334
9.3.3 多中继协作网络中的安全问题	337
参考文献.....	342
缩略词.....	344

第 1 章 绪 论

由于能够提供无束缚的连接和移动接入,在最近几年,无线通信受到广泛欢迎。然而,在世纪之交,人们为在无线信道上获得可靠和高数据率的通信而做出许多尝试,但由于存在多径衰落、阴影和路径损耗的影响,一直没有成功。这些影响导致信道质量随时间、频率和空间而变化,使得难以在无线环境中采用传统的有线通信技术。直到 20 年后,人们采用有效的发送分集和接收分集技术,利用信道的不同维度如时间、频率和空间进行分集,获得所谓的分集增益(diversity gain)。借助充分的信道信息,人们可以设计出基于时间、频率和空间的功率和比特分配策略,该策略将更多的资源分配给更可靠信道,避免在低劣信道上以与可靠信道同样的能量传输。即使不知道信道情况,也可以利用空时编码或空频编码增强传输的可靠性。特别是,多输入多输出(MIMO)^[17, 47, 53]系统理论的进步使得在现代无线收发器上嵌入多个天线以实现空间分集增益存在可能性。然而,由于无线设备的尺寸和成本在许多应用如传感网或蜂窝电话上受到限制,所以在单一终端上放置多根天线是不切实际的。在这种情况下,一个节点与网络中的其他节点协作,形成一个分布式天线系统成为一种可行性选择。该系统需要通过所谓的协作通信(co-operative communication)来完成。

1.1 协作通信综述

正如参考文献[36, 37, 41, 42]中所通俗阐明的,协作通信是允许系统中的用户通过中继彼此间的消息到达目的地来完成协作。这样做,用户可以有效地形成一个分布式天线阵列,达到集中式 MIMO 系统所获得的空间分集增益。一个成对协作通信系统,如图 1.1 所示,图中假设用户信号到达目的节点经历独立衰落信道。由于多径衰落,在目的节点的信噪比(SNR)随时间快速变化,当用户的信噪比下降到所需水

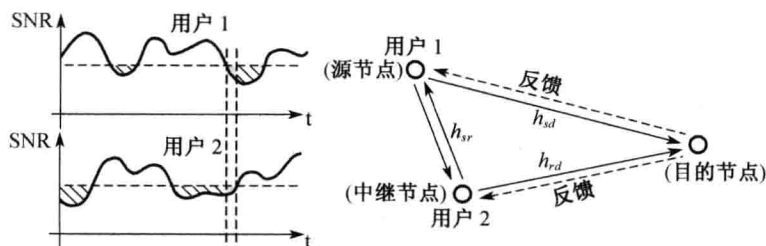


图 1.1 成对协作通信系统图解

平时引起通信中断(如图 1.1 中的阴影区所示)。然而,如果两个用户协作,中继发送彼此间的消息给目的节点,那么只有当两个用户同时经历不良信道时才会通信中断,这样就提高了传输可靠性。

根据不同的中继技术,如放大转发(AF)^[36]、解码转发(DF)^[36, 42]、选择中继(SR)^[36]、编码协作^[27]、压缩转发(CF)^[34]等,文献中提出了许多协作策略。当这些方案在如图 1.1 中的成对协作系统中采用时,我们可以认为,在每个瞬时时间,只有一个用户作为源节点,而其他用户成为中继节点转发源节点消息给目的节点。源节点和中继节点的角色在任何瞬时时间都可以互换。图 1.2 中给出了 DF、AF 和 SR 方案的图解。这些方案的共同点是,协作传输首先由源节点(例如用户 1)向中继节点和目的节点广播消息。如果 DF 方案被采用,中继节点将解码消息并再生成一个新的消息并在随后的时隙传给目的节点。在目的节点,来自源节点和中继节点的信号合并以提供更好的检测性能。作为 DF 方案的扩展,由中继节点生成的消息可以被重新编码以提供额外的错误保护,这种方案也可以称为编码协作。如果采用 AF 方案,则仅放大接收到的信号并直接转发到目的节点而不解码报文。另一方面,SR 方案是一种动态方案,如果中继路径足够可靠,它将选择中继节点重发源消息。这个方案可在 DF 和 AF 方案后应用以提高协作效率。在众多文献提出的协作方案中,DF、AF 和 SR 方案是最基本和最广泛采用的方案。更复杂的方案,如 CF 方案,通过利用在中继节点处和目的节点处接收到的消息之间的统计相关性也可以设计出,但需要较高的实现复杂度。这些方案将会在第 3 章中进行描述。

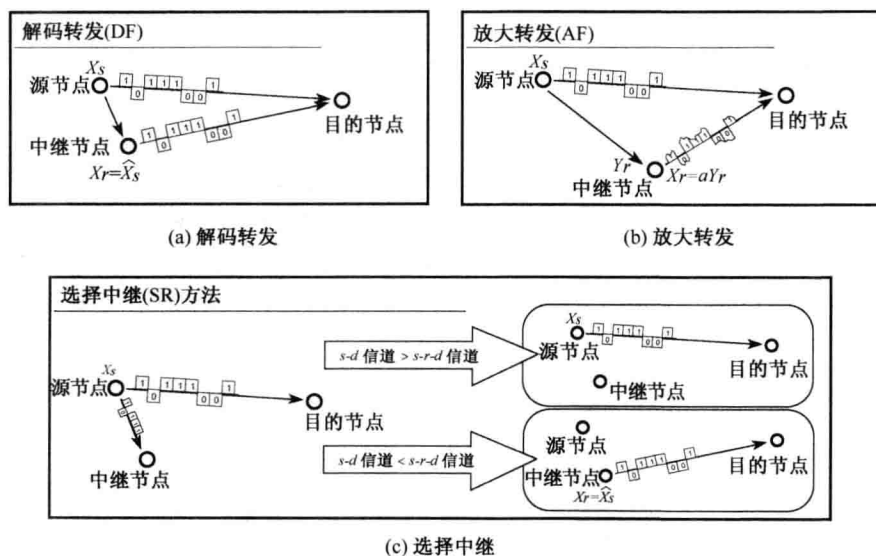


图 1.2 基本的协作通信方案示例,即解码转发、放大转发和选择中继

大多数协作策略包括两个传输阶段:协调阶段和协作传输阶段。协调在协作系统中尤其需要,因为与集中式 MIMO 系统中相反,天线分布在不同的终端。虽然额外的协调开销可能会降低带宽效率,但高信噪比带来的较大分集增益时常能补偿这个开销。特别是,协调可以通过用户间直接通信或使用来自目的地的反馈来实现。以通过协调获得的消息为基础,协作伙伴将计算和发送消息,以减少传输成本或增强在接收端的检测性能。

在每个瞬时时间,一个用户作为源节点而其余的用户作为中继节点,上述协作通信方案很容易扩展到一个大型网络,如图 1.3 所示。中继节点一起形成一个分布式天线阵列,能够实现类似集中式 MIMO 系统的空间分集和复用增益^[5, 57, 59]。这些技术包括分布式空时编码^[3, 29, 30, 43, 56]、分布式波束成形^[2, 31, 33]和天线选择策略^[7, 16, 58]。然而,协调成本会伴随协作用户数的增加而增加,因此必须设计一种高效的用戶间通信或反馈通信策略以使得协作更有价值。

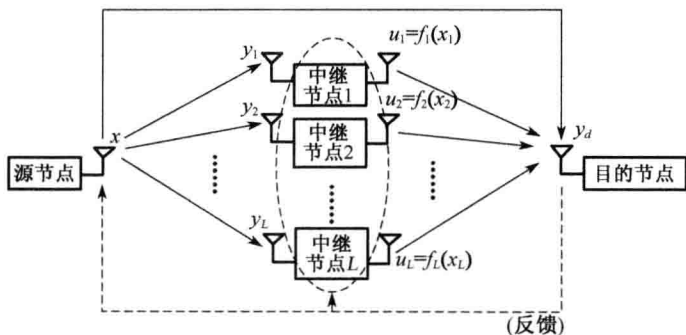


图 1.3 多中继协作通信系统图解

早期,大多数协作通信方面的文献考虑简单的场景,在系统中只有一个用户作为源节点,而其他所有用户作为对源节点的中继。当把这个方案应用到多个源节点的系统时,如图 1.4 所示,我们必须假设源节点可以通过正交信道接入中继节点,并且中继节点具有足够的能量和带宽资源提供给所有用户。如果不是这种情况,许多用户问题可能会出现在物理层和更高的网络层。从物理层的角度来看,这将导致多址干扰(MAI),最终会控制 BER 性能,因而引起分集增益减少。此外,由于中继有限的能量和带宽资源,必须制定高效的资源分配政策以确保所有用户的高性能增益。从介质访问控制(MAC)层的角度来看,必须制定调度计划或随机接入协议来帮助解决竞争协作信道的用户之间的竞争。事实上,即使当物理层不存在协作优势,如参考文献[23]中表明的那样,在 MAC 层的协作仍然有益。

为了在现代通信系统中全面实现中继和协作通信技术,许多高层次的问题仍有待解决。其中最明显的是源节点—中继节点、中继节点—目的节点和源节点—