

# 面向中继的 物理层传输技术

吕铁军 高 晖 著



科学出版社

# 面向中继的物理层传输技术

吕铁军 高 晖 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书旨在总结近几年中继系统的发展情况,重点对中继系统中的传输方案与编码技术展开研究与讨论。首先,针对多用户的协作通信方案进行了系统研究。基于现状,提出一些高传输效率的协作方案,并与其他新兴的无线传输技术结合,进一步推广到多中继以及认知中继网络中。然后,深入探讨了网络编码技术。以中继系统为研究对象,结合多输入多输出技术,研究了基于网络编码的传输和检测技术,提出了一些有效可行的传输方案以及基于网络编码的接收机设计方案,并结合协作传输技术,有效降低了信息流在无线中继网络中传输的时间开销,进而提高了网络吞吐量。

本书内容翔实,深入浅出。可供本科生,研究生以及更高学历致力于研究通信技术的从业人员使用。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

面向中继的物理层传输技术/吕铁军,高晖著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050367-1

I. ①面… II. ①吕… ②高… III. ①中继方式—无线电通信—研究 IV. ①TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 262135 号

---

责任编辑: 阙 瑞 余 丁 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

**科 学 出 版 社 出 版**

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**新科印刷有限公司 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 22

字数: 447 000

**定价: 118.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

随着社会的不断发展和科学的不断进步，人们在生活和生产中接触到的信息量也越来越大。毫不夸张的说，当今社会已经进入了一个信息时代。对信息进行采集、传输、处理等操作的信息技术，成为当今社会发展中最为重要的动力之一。通信技术是信息技术中的重要组成部分，受到了世界各国的高度重视和大力投入。无线移动通信技术的发展正将人类社会推进一个崭新的无线生活时代。这一项重要的技术成就，目前正吸引着学术界、产业界和标准化机构丰富而广泛的研究及开发。近年来，各种无线移动接入技术和丰富的移动多媒体业务，激励了无线移动通信在人类生活各个层面的应用。未来的无线移动通信，将继续迈向能够支持在任何时间、地点，实现任何人或物之间的泛在通信；同时，在网络覆盖范围内提供更高速率、更加可靠的数据传输业务。这些需求，都对现有的无线移动通信基础技术、网络构架等方面提出了巨大的挑战。因此，学术界、产业界和标准化机构对无线移动通信新技术的不断探索，是迈向未来泛在无线移动通信网络的必经之路。

基于中继协作的无线通信技术作为一种经济、高效、具有重要理论与实践意义的无线及移动通信解决方案，受到了学术界和产业界的广泛关注。目前，中继技术已经在增强长期演进系统，全球微波互联接入等系统中采用；中继技术的引入能够有效提高系统的覆盖能力，提升蜂窝系统小区边缘用户的服务质量。鉴于中继系统在未来无线移动通信系统中的重要地位，研究高效的中继协作传输的新方法，是进一步提升传统无线通信网络系统的重要手段。不仅如此，中继节点的引入，丰富了移动通信网络内的功能拓扑结构，将传统的点到点链路式无线通信模式，拓展到了更为多样的网络化无线通信模式，对崭新的通信协议和传输方法提出了新要求。

在这样的大背景下，对于中继系统的研究越来越受到研究者们的关注，相关的文章和材料也层出不穷。然而，却鲜有中继系统相关的系统性介绍。基于此，本书作者在大量的研究与长时间的技术积累后，出版了这样一本书，系统而深入的介绍了现今中继系统中的新技术，对其实验室的新成果进行了总结和介绍。为读者更好地了解中继系统的发展走向提供了很好的参考。

为了使读者更好的理解中继系统的新方案，本书首先介绍了一些新兴的物理层技术，然后对中继系统中的物理层新技术进行了深入详尽的研究与分析，即中继系统的传输方案与编码技术。作者针对中继系统提出了一些有效可行的传输方案以及基于网

网络编码的接收机设计方案，并进一步将网络编码技术与协作传输技术结合，提高了网络吞吐量，更具有实际意义。

本书的出版得到了国家自然科学基金(基金编号为 61271188 及 61671072)的资助，在此表示感谢。

本书是基于作者的有限学识对中继系统物理层技术的讨论过程，难免有欠周全之处。虽然经过多次修改校对，可能难免还会出现差错，恳请指正。

作 者

2016 年 5 月于北京

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                            | 1  |
| 1.1 引言                              | 1  |
| 1.2 研究现状                            | 5  |
| 1.3 本书结构                            | 12 |
| 1.4 小结                              | 12 |
| 参考文献                                | 12 |
| 第 2 章 中继系统物理层基本技术介绍                 | 20 |
| 2.1 分集技术                            | 20 |
| 2.1.1 分集的基本概念                       | 20 |
| 2.1.2 常用的分集技术                       | 20 |
| 2.1.3 常用的中继协作通信技术                   | 25 |
| 2.2 MIMO 基础概述                       | 28 |
| 2.2.1 MIMO 系统中的空间分集                 | 28 |
| 2.2.2 MIMO 系统中的空间复用                 | 31 |
| 2.2.3 MIMO 及 MIMO 双向中继信道中的分集-复用折中回顾 | 34 |
| 2.3 网络编码技术                          | 36 |
| 2.3.1 网络编码的基本概念                     | 36 |
| 2.3.2 常用的网络编码方法                     | 38 |
| 2.4 认知无线电技术                         | 39 |
| 2.4.1 基于干扰温度的传输方案                   | 39 |
| 2.4.2 认知环境下的协作通信方案                  | 40 |
| 2.5 干扰对齐技术                          | 40 |
| 2.5.1 干扰对齐基本概念                      | 40 |
| 2.5.2 不同维度上的干扰对齐                    | 43 |
| 2.5.3 干扰对齐在具体场景中的应用                 | 46 |
| 2.6 物理层安全简介                         | 51 |
| 2.7 UWB 基础介绍                        | 52 |
| 2.7.1 UWB 信道                        | 53 |
| 2.7.2 UWB 常用接收机设计                   | 53 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 参考文献                                   | 55  |
| 第 3 章 分集-复用折中性能的研究                     | 59  |
| 3.1 经典协作通信方案                           | 59  |
| 3.2 轮询调度和轮询中继的多用户协作通信方案                | 59  |
| 3.2.1 基于轮询调度和轮询中继的多用户协作通信方案介绍          | 61  |
| 3.2.2 所提方案与经典方案实现要求对比                  | 64  |
| 3.2.3 所提方案性能分析                         | 66  |
| 3.2.4 仿真与讨论                            | 80  |
| 3.2.5 R3SSP 方案在译码转发系统中的应用              | 86  |
| 3.3 多用户协作通信系统中的联合协作分集与多用户分集方案          | 87  |
| 3.3.1 现有联合多用户分集与协作分集方案                 | 88  |
| 3.3.2 基于贪婪调度和轮询中继的联合多用户分集与协作分集通信方案     | 90  |
| 3.4 基于轮询调度的联合协作分集与多用户分集通信方案 US-LCRP 方案 | 102 |
| 3.4.1 基于轮询调度获得多用户分集的可行性探讨              | 103 |
| 3.4.2 RRFS 方案                          | 103 |
| 3.4.3 分集阶数分析                           | 106 |
| 3.4.4 仿真与讨论                            | 108 |
| 3.5 基于多天线的多用户协作通信系统中的协作方案研究            | 111 |
| 3.5.1 VBLAST 系统介绍                      | 111 |
| 3.5.2 基于空间复用和线性检测的多用户协作通信方案            | 113 |
| 3.5.3 利用中继共享改进的多天线多用户协作通信方案            | 115 |
| 参考文献                                   | 123 |
| 第 4 章 中继天线选择技术及用户调度                    | 125 |
| 4.1 多天线双向中继系统中的中继天线选择技术                | 125 |
| 4.1.1 点到点多天线系统中的天线选择                   | 125 |
| 4.1.2 针对单流物理层网络编码的中继天线选择方法             | 128 |
| 4.1.3 多流物理层网络编码中的天线选择算法                | 136 |
| 4.2 MIMO-Y 信道中的中继天线选择及用户选择技术           | 154 |
| 4.2.1 基本 MIMO-Y 信道模型及传输方法介绍            | 155 |
| 4.2.2 MIMO-Y 信道中的中继天线选择                | 160 |
| 4.2.3 MIMO-Y 信道中的用户选择                  | 165 |
| 4.3 基于相位旋转辅助的多天线中继选择技术                 | 170 |
| 4.3.1 系统描述                             | 170 |
| 4.3.2 基于天线选择的传输方案                      | 172 |
| 4.3.3 基于任意中继的传输                        | 173 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 4.3.4 | 相位旋转辅助的 Max-Min 中继选择方案   | 175 |
| 4.3.5 | 分集阶数以及误符号率分析             | 181 |
| 4.3.6 | 基于 PR 的时间拓展方案            | 187 |
| 4.3.7 | 仿真与讨论                    | 189 |
|       | 参考文献                     | 193 |
| 第 5 章 | 双向中继系统中的 PNC 专属接收机       | 196 |
| 5.1   | 系统模型及已有方法回顾              | 197 |
| 5.1.1 | 系统模型                     | 197 |
| 5.1.2 | 基于虚拟 MIMO 的现有设计方案回顾      | 198 |
| 5.1.3 | 基于适度检测的现有方案回顾            | 198 |
| 5.1.4 | 现有方案总结                   | 200 |
| 5.2   | 一种针对 MPSK 调制的 PNC 专属接收机  | 200 |
| 5.2.1 | 基于内积运算的接收机               | 200 |
| 5.2.2 | 基于外积运算的接收机               | 203 |
| 5.3   | 基于天线选择的广播方案              | 204 |
| 5.4   | 仿真与讨论                    | 205 |
|       | 参考文献                     | 208 |
| 第 6 章 | 双向中继系统中基于网络编码技术的异步检测算法   | 210 |
| 6.1   | 系统模型                     | 210 |
| 6.2   | 现有的异步检测算法                | 211 |
| 6.2.1 | 利用符号间干扰的碰撞解决方案 CRESM     | 211 |
| 6.2.2 | 基于置信度传播理论的 ML 检测算法       | 212 |
| 6.3   | 基于正交投影的检测算法              | 212 |
| 6.3.1 | 所提检测算法介绍                 | 212 |
| 6.3.2 | 复杂度分析                    | 214 |
| 6.4   | 仿真与讨论                    | 215 |
|       | 参考文献                     | 218 |
| 第 7 章 | 基于 MIMO 的物理层网络编码传输技术     | 219 |
| 7.1   | 获取分集增益的 MIMO 物理层网络编码传输方案 | 219 |
| 7.1.1 | 系统模型及已有方法回顾              | 221 |
| 7.1.2 | 类似最大比合并的中继物理层网络编码检测器     | 223 |
| 7.1.3 | 中继物理层网络编码检测              | 225 |
| 7.1.4 | 仿真与讨论                    | 225 |
| 7.2   | 获取复用增益的 MIMO 物理层网络编码方案   | 228 |



|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 7.2.1 系统模型及传输方案设计 .....                    | 228        |
| 7.2.2 传输方案设计 .....                         | 229        |
| 7.2.3 仿真与讨论 .....                          | 230        |
| 参考文献 .....                                 | 232        |
| <b>第 8 章 基于符号的物理层网络编码传输技术 .....</b>        | <b>234</b> |
| 8.1 系统模型 .....                             | 235        |
| 8.2 SIMO 系统中分集增益与阵列增益基础 .....              | 235        |
| 8.3 单天线 SPNC 方案分集性能分析 .....                | 237        |
| 8.4 多天线 SPNC 分集技术 .....                    | 240        |
| 8.4.1 PA 辅助下的 AS-SPNC 技术 .....             | 241        |
| 8.4.2 PA 辅助下的 SC-SPNC 技术 .....             | 244        |
| 8.5 基于 MQAM 的 SPNC 技术 .....                | 252        |
| 8.6 仿真与讨论 .....                            | 254        |
| 参考文献 .....                                 | 258        |
| <b>第 9 章 基于机会网络编码的协作传输方案 .....</b>         | <b>260</b> |
| 9.1 系统模型 .....                             | 260        |
| 9.2 经典的中继协作传输方案 .....                      | 261        |
| 9.2.1 基于最优中继选择的协作方案 .....                  | 261        |
| 9.2.2 基于网络编码技术的协作方案 .....                  | 261        |
| 9.3 基于机会网络编码的协作传输方案 .....                  | 263        |
| 9.3.1 所提协作方案介绍 .....                       | 264        |
| 9.3.2 所提方案性能分析 .....                       | 268        |
| 9.4 仿真与讨论 .....                            | 276        |
| 参考文献 .....                                 | 279        |
| <b>第 10 章 基于动态网络编码的协作通信方案 .....</b>        | <b>280</b> |
| 10.1 经典协作通信方案 .....                        | 280        |
| 10.1.1 基于 bit-xor 的协作通信方案 .....            | 280        |
| 10.1.2 基于线性网络编码的协作通信方案 .....               | 280        |
| 10.2 基于动态 bit-xor 的协作通信方案 .....            | 281        |
| 10.2.1 所提方案介绍 .....                        | 281        |
| 10.2.2 所提方案的性能分析 .....                     | 282        |
| 10.2.3 仿真与讨论 .....                         | 284        |
| 10.3 基于动态 bit-xor 和机会中继的多用户多中继协作通信方案 ..... | 285        |
| 10.3.1 所提方案介绍 .....                        | 285        |

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 10.3.2 | 所提方案的性能分析                      | 287 |
| 10.3.3 | 仿真与讨论                          | 289 |
| 10.4   | 基于线性网络编码的多用户协作通信方案             | 291 |
| 10.4.1 | 系统模型                           | 291 |
| 10.4.2 | 所提方案介绍                         | 291 |
| 10.4.3 | 所提方案的性能分析                      | 293 |
| 10.4.4 | 仿真与讨论                          | 296 |
|        | 参考文献                           | 299 |
| 第 11 章 | 双向中继系统中的传输策略                   | 300 |
| 11.1   | 双向中继系统中的传输策略                   | 301 |
| 11.1.1 | 模拟网络编码策略                       | 301 |
| 11.1.2 | 时分广播策略                         | 302 |
| 11.1.3 | 自适应中继/直传传输策略                   | 303 |
| 11.1.4 | 机会式用户选择策略                      | 304 |
| 11.2   | 自适应模式选择传输策略                    | 304 |
| 11.2.1 | 系统模型                           | 305 |
| 11.2.2 | 方案介绍                           | 305 |
| 11.2.3 | AMS 传输策略的中断性能分析                | 307 |
| 11.2.4 | 仿真与讨论                          | 311 |
| 11.3   | 多用户多中继系统中的 AMS 传输策略            | 315 |
| 11.3.1 | 系统模型                           | 315 |
| 11.3.2 | 联合用户中继调度——AMS 传输策略             | 316 |
| 11.3.3 | 联合策略中断性能分析                     | 317 |
| 11.3.4 | 仿真与讨论                          | 321 |
| 11.4   | 基于 Alamouti 编码的双向中继系统中的全双工传输策略 | 323 |
| 11.4.1 | 全双工双向中继系统模型                    | 324 |
| 11.4.2 | 基于分布式 Alamouti 编码的传输策略         | 325 |
| 11.4.3 | 仿真与讨论                          | 336 |
|        | 参考文献                           | 339 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

随着社会的迅速发展和科学的不断进步，人们在生活和生产中接触到的信息量也越来越大。毫不夸张的说，当今社会已经进入了一个信息爆炸的全新通信时代。对信息进行采集、传输、处理等操作的信息技术，成为当今社会发展中最为重要的动力之一，并改变着人们生活和生产的方式。通信技术是信息技术中的重要组成部分，受到了世界各国的高度重视和大力投入。近年来，信息通信技术的发展可以用日新月异来形容，它已经渗透到人们生活的各个方面，使得人们可以随时随地地获取互联网上的海量信息。

通信发展的终极目标可以总结为 5 个 W，即任何人（whoever）可以在任何时间（whenever）、任何地点（wherever）与任何想要联系的人（whomever）交换任何内容（whatever）的信息。而无线通信由于无需专用传输介质的便利性，必然是迈向通信终极目标的重要途径之一，因此成为通信技术发展的主流和方向，是当今通信领域发展最为迅速的热点之一。无线移动通信的发展正将人类社会推进到一个崭新的无线生活时代。这一项重要的技术成就，目前正吸引着学术界、产业界和标准化机构丰富而广泛的研究。近年来，各种无线接入技术和丰富的移动多媒体业务，激励了无线移动通信在人类生活各个层面的应用。互联网、电子商务、工业、医疗、环境、公共安全等诸多领域，都因为无线移动通信技术的推动而发生着深刻的变革。面对如此大规模的应用，无线移动通信网络也日趋专业化，出现了蜂窝网络<sup>[1]</sup>、无线局域网（wireless local area network, WLAN）<sup>[1-2]</sup>、无线传感器网络（wireless sensor network, WSN）<sup>[3]</sup>、认知无线网络（cognitive radio network, CRN）<sup>[4]</sup>等网络。这些不同体制的无线移动通信网络，基本筑建了泛在无线移动通信网络的雏形。未来的无线移动通信，将继续迈向能够支持在任何时间、地点，实现任何人或物之间的泛在通信；同时，在网络覆盖范围内提供更高速率、更加可靠的数据传输业务。这些需求，都对现有的无线移动通信基础技术、网络构架等方面提出了巨大的挑战。因而，学术界、产业界和标准化机构对无线通信新技术不断进行探索和创新，以提高系统的性能和资源利用率。

基于蜂窝网络的移动通信系统是应用最为广泛和最为重要的无线通信系统，在此前二十年得到了飞速的发展和普及。第一代移动通信系统出现于 20 世纪 80 年代，它基于频分复用（frequency division multiple access, FDMA）和模拟技术，以语音业

务为主,几乎无法提供数据业务。90年代则出现了第二代移动通信系统,以欧洲的全球移动通信系统(global system of mobile communication, GSM)和美国的1995年暂行标准(Interim Standard 1995, IS-95)系统为代表。第二代移动通信系统基于数字技术,可提供语音业务及低速数据业务,到目前为止在全球取得了极大成功,使得移动通信成为现代生活中至关重要和必不可少的组成部分。第二代移动通信系统的成功推动了人们对于移动通信的要求,催生出了第三代移动通信系统(3rd generation, 3G)。第三代移动通信系统均采用码分多址(code division multiple access, CDMA),主要有三个标准,即CDMA2000, WCDMA和我国自主知识产权的TD-SCDMA<sup>[5]</sup>。它们结合功率控制、多用户检测、先进信道编码等技术手段,能为人们提供较高速率的数据业务,已经成为当前网络建设和发展的重点。随着2013年底工信部发放第四代(4th generation, 4G)技术牌照,我国的无线通信产业正式进入4G时代,这必将为我国移动互联网的发展注入巨大能量。4G技术以其更高数据传输速率,更大传输带宽,高度的系统无缝连接相容性和更广泛的智能化迅速得到人们的认可并投入使用。第四代移动通信系统包括分时长期演进技术(time division long term evolution, TD-LTE)和频分双工长期演进技术(frequency division duplexing long term evolution, FDD-LTE)两种制式。它采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)、多重输入与输出(multiple-input multiple-output, MIMO)、软件无线电(software defined radio, SDR)和智能天线等技术(smart antenna, SA),是多功能集成的宽带移动通信系统。

中国移动互联网发展大会发布的移动互联网蓝皮书《中国移动互联网发展报告(2014)》表明,截至2014年1月,我国移动互联网用户总数达8.38亿,在移动电话用户中的渗透率达67.8%,其中手机网民规模达5亿,占总网民的80%,保持着第一大上网终端地位,由此表明,我国互联网发展进入全民时代。随着4G技术投入应用,移动互联网产业已经出现了前所未有的飞跃。同时,移动互联网的爆炸式增长也对无线通信技术的各个方面提出了更高的要求,包括用户体验速率、连接数密度、端到端时延、流量密度、移动性和用户峰值速率等<sup>[6-10]</sup>。这就要求新一代,即第五代(5th generation, 5G)无线通信系统必须是具有海量通信能力的宽带移动通信系统。具体表现为:首先,支持的业务从单纯的语音业务发展到更丰富的多媒体业务,包括视频点播、视频会议等高速率的实时流媒体业务;其次,随着智能手机和平板电脑等便携设备的普及,选择无线方式接入互联网的用户数量将迅速增长。研究表明,从2010年到2015年,全球移动网络数据流量增加了26倍。我国IMT-2020(5G)标准推进组制定的《5G愿景与需求》白皮书表明,5G将为用户提供光纤般的接入速率,峰值可达几十Gbps。然而,随着对无线通信传输速率的要求越来越高,频谱资源的严重不足日益突出,已经成为遏制无线通信发展的瓶颈。

20世纪90年代末,MIMO<sup>[11]</sup>技术的出现,为研究者们找到了一条提高频谱效率

和传输可靠性的新途径。MIMO 技术使用由多个天线组成的天线阵列来进行信号的发射和接收,从而将空间维度引入到通信系统中,利用不同收发天线间的不同信道同时传输多流数据。MIMO 技术的引入,实现了空间复用以及提高频谱效率的目的<sup>[11-12]</sup>,还能够通过获取空间分集来改善传输质量<sup>[13-14]</sup>。理论研究证明,在理想情况下,MIMO 技术可以通过增加天线数成倍地提高数据传输速率,也可相应地提高系统的分集增益<sup>[15-16]</sup>。一方面多天线的应用会带来设备尺寸增大、成本增高的问题,同时多个天线配置会极大增加相应的信号处理算法复杂度,使得设备需要较强的处理能力,也增加了信号处理时的功率消耗。另一方面,MIMO 系统的性能和信道的空间相关性有关,在信道空间相关性较大时,其性能往往会受到较为严重的影响。因此,虽然 MIMO 技术在理论上展现了极大的优势,但在实际蜂窝系统实现中仍然遇到了一定的困难。

为了克服 MIMO 技术在实际应用中遇到的困难,研究者们提出了协作通信概念<sup>[17]</sup>。协作通信的主要思想是利用系统中各个通信节点位置不同的特点,由多个单天线的节点组成一个分布式的多天线阵列,从而使得单天线系统也可获得由多天线阵列带来的性能提升,即获得协作分集增益。它根据分布式多天线阵列带来的空间维度,利用各个节点之间的协作使得各节点都能够帮助其他节点进行传输,在不增加设备复杂度的同时形成了广义的 MIMO 系统,所以又称为虚拟 MIMO 系统。此外,由于组成分布式天线阵列的各个节点距离较远,一般情况下远大于传统 MIMO 阵列对于近似无空间相关性时天线相距约为二分之一载波波长距离的限制要求<sup>[18]</sup>,因而消除了空间相关性对 MIMO 系统性能的影响。协作通信技术通过信道条件较好的用户协助信道条件较差的用户传输,提高了后者的传输质量,改善了用户之间的公平性。

应用协作通信的思想,一种专门用于帮助用户传输的中继节点被引入实际蜂窝系统。这些中继节点利用无线信道的广播特性,接收用户传输的数据并向基站进行转发,从而改善了传输质量,提高了数据速率,改善了小区的覆盖性能。目前,中继技术已经在 LTE 系统、全球微波互联接入(worldwide interoperability for microwave Access, WiMAX)等系统中采用。中继技术的引入,极大改善了通信网络的覆盖能力,尤其体现在通信网络中不具备直传能力的节点可以在中继节点的协助下传输数据。这种基于中继协助的工作方式也给通信网络的运行机制带来了深刻的变革<sup>[1]</sup>。虽然从信息论角度出发,中继技术的引入在一定情况下能够提高点到点无线通信系统的容量,但在实际系统中,中继通常以半双工模式工作,这使得传统协作通信系统对无线网络容量的利用率相对较低。例如,在蜂窝网络中加入中继以后,原始基站无法直接服务的盲点区域可以借由中继进行覆盖,继而系统边缘用户的服务质量得以提高<sup>[21]</sup>。但是,基站经由中继两跳传信给用户,需要耗费更多的时隙资源,降低了系统对频谱的利用率。鉴于中继系统在未来无线移动通信系统中的重要地位,研究高效率的中继协作传输的新方法,是进一步提升传统无线通信网络系统的重要手段。

不仅如此,中继节点的引入,还丰富了移动通信网络内的功能拓扑结构,将传统的点到点链路式无线通信模式,拓展到更为多样的网络化无线通信模式,对崭新的通

信协议和传输方法提出了新要求。然而,受困于传统的存储/转发中继传输协议和方法的限制,学术界以及工业界在如何利用中继扩大覆盖范围,并同时提升系统频率效率的关键问题上,一直没有获得重大突破。直到 21 世纪初,网络编码(network coding, NC)的出现才极大推动了这一领域的研究进展。NC 技术创造性地将编码和路由有机结合,通过在中间节点引入编码,获得网络容量的提升<sup>[20]</sup>。这一信息论上的成果,也激励了网络编码在无线通信中的应用,其中最具代表性的研究场景就是双向中继(two-way relay, TWR)通信系统<sup>[21]</sup>。为了提高半双工中继系统的信道频率利用率,学者们提出了适用于双向中继系统(two-way relay network, TWRN)的物理层网络编码(physical layer network coding, PNC)技术<sup>[22-23]</sup>。相比传统单向中继(one-way relay channel, OWR)协议,基于 PNC 的双向中继协议,能够有效降低信息流在网络中传输的时间开销,进而提升网络频谱利用率。不仅如此,基于 PNC 的双向中继系统改变了学术界对无线网络中干扰及信息流管理的认识,这些观点将有望在不同的传输系统中启发新的传输方法。

虽然双向中继技术可以大幅度提高无线网络的容量利用率,其潜力仍然有待开发。最有望直接推动双向中继达到更高频谱利用率、更高传输可靠性的关键技术之一就是基于 MIMO 技术的中继系统研究。MIMO 技术利用多天线带来的空间自由度实现空间分集增益或者空间复用增益,可以在不提高带宽和发射功率的前提下极大地提高通信的频谱效率和传输质量。并且,多天线中继还可以同时支持多组用户进行组内的双向中继通信,实现多向中继通信<sup>[24-25]</sup>。在第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)提出的长期演进技术升级版(long term evolution advanced, LTE-A)标准中,中继转发以及基于虚拟 MIMO 概念的协同多点技术(coordinated multiple point, CoMP)更是被明确列为推荐解决方案<sup>[26]</sup>,由此可见,融合 MIMO 和中继的 MIMO 中继技术将成为未来移动通信系统中最富有竞争力的技术之一。然而,要将 MIMO 中继技术的潜力充分发挥出来,首先需要解决的一个关键问题是如何处理 MIMO 中继场景中的干扰。在 MIMO 中继场景中,由于多组用户同时通信,中继节点在多址阶段进行信号接收时需要处理复杂的多用户干扰。传统的干扰处理方法要么将干扰视为噪声<sup>[27]</sup>,要么利用正交性来对频谱资源进行“切蛋糕”式的划分<sup>[28]</sup>,但是这些方法在多用户干扰受限的场景中都并非最优的解决方案。最近几年引起学术界广泛关注的干扰对齐(interference alignment, IA)技术为 MIMO 中继系统的干扰管理提供了新的思路。在 MIMO 场景的多用户通信中,基于传统空分复用的干扰处理方法大多是利用正交化操作对信道空间资源进行分配。而 IA 则是在发送端进行预编码操作,使每一个接收端的信号中来自其他发送端的干扰都占用相同的空间信道,有用信号则占用剩余的信道,从而压缩了干扰占用的空间资源,提高了传输效率和系统的自由度。总体来看,研究 IA 技术在 MIMO 中继系统中的应用具有重要的理论和实际意义。

毫无疑问,未来移动通信系统将会是多用户系统,因此系统中也存在着多用户分集。多用户分集是一种利用系统中的用户资源,在每个传输时刻通过选择“最合适”

的用户进行传输,以实现资源分配从而优化系统整体性能的用户调度方案<sup>[29]</sup>。具体来说,多用户分集的思想是根据各个用户间信道的独立性,选择最能提升系统整体性能的用户进行服务,从而提高系统的容量和可靠性。多用户分集在第二代、第三代移动通信系统<sup>[30-31]</sup>及其他通信系统中<sup>[32-36]</sup>都已经得到了广泛的应用,显著提高了系统的整体性能。然而在多用户分集中,用户之间存在对传输资源的竞争,这就有可能引发传输公平性的问题。也就是说,多用户分集和传输公平性是一对矛盾,在实际系统中需要慎重考虑这两方面因素,设计合理的用户调度方案来达到二者之间较好的性能折中<sup>[37]</sup>。

随着移动通信的迅速普及和业务类型的多样化,特别是很多金融业务开始在智能终端进行,无线网络中的通信安全变的越来越重要。目前,GSM、3G 等蜂窝系统中的安全主要是基于传统的加密解密体系,在上层协议中保证系统的安全。相比传统的有线传输的安全问题,无线通信系统更容易受到安全攻击。无线通信信道的开放性造成无线信道非常容易受到窃听者的监听,无线网络的多样性和复杂性使得密钥分配问题凸显,终端计算能力的增强同样使得传统的安全体系变得容易破解。基于信息安全的物理层安全技术成为重要的解决方案之一。物理层安全技术是充分利用无线信道的随机性,通过适用于安全的信道编码、预编码等相关技术,从信息安全的角度,提高系统的安全性。由于中继的引入,信息的传输由多个节点接力完成,此时信息被窃取或篡改的风险性增加。未来泛在通信要求将有利于传输的通信节点尽可能地连接到中继网络中。信息理论的研究也已经表明合理利用不可靠中继节点以及潜在的不可靠中继节点能够提高网络整体的通信速率<sup>[38-39]</sup>。这一组网设计观点要求信宿节点要对中继的可靠以及不可靠行为具备认证和鉴别能力以保证信息传输的可靠性。近年来,物理层安全技术方面的研究受到了学术界的广泛关注<sup>[40]</sup>,该技术通过对物理层的信号设计解决上层的安全问题。由于不依赖网络层协议,物理层安全技术能够高效的保证通信的可靠性。然而,物理层安全技术在中继认证方面的潜力还尚待发掘。

## 1.2 研究现状

4G 及下一代移动通信系统要求提供高达 100Mbit/s 甚至更高的数据传输速率,以支持丰富的移动计算和多媒体业务。随着对无线通信传输速率的要求越来越高,频谱资源的严重不足日益突出,已经成为遏制无线通信发展的瓶颈。如何充分开发和利用有限的频谱资源,提高频谱利用率,是当前无线通信领域的研究热点之一。近年来,无线协作通信因其在提高频谱效率方面的巨大潜力和应用前景,已经受到学术界和产业界广泛的关注。从最初用户和中继节点的协作分集传输<sup>[41]</sup>,逐步发展成为具有用户或者基站间的协同传输方式等更加广义的网络协作传输<sup>[42]</sup>。无线协作通信充分利用了无线媒质的广播特性和无线网络中潜在的中继点,通过有效的传输协议和方法,提高无线通信的传信速率和可靠性。

对于协作通信的研究可追述到 20 世纪六七十年代, van der Meulen 从信息论的角



度探讨了全双工三节点中继信道容量的上下界<sup>[43]</sup>。此后, Cover 在 1979 年也发表了对离散无记忆高斯信道下全双工中继系统信道容量的研究结果<sup>[44]</sup>, 改进了 van der Meulen 提出的上下界。接着 El Gamal, Aref 等讨论了不同场景下中继信道的容量<sup>[45]</sup>。这些前期研究工作从信息论角度出发, 对有中继参与的协作通信系统进行了理论上的探索, 然而由于信息论分析较为抽象, 无法直接指导当时的实际通信系统设计及实现, 因而这些工作并未引起足够的重视。协作通信技术开始受到研究者们的大量关注并迅速成为研究热点, 是由 1998 年 Sendonaris, Erkip 和 Aazhang 等提出用户协作分集概念引起的<sup>[17]</sup>。这篇文献的核心思想是利用系统中多个用户之间相互协作来获取由用户位置不同而产生的空间分集, 从而提高系统的频谱效率和传输可靠性。在此基础上, 该论文还研究了用户协作分集在实际 CDMA 系统中的应用。2002~2004 年, Laneman 和 Tse 等也对半双工中继系统中的协作分集进行了研究, 进一步引发了学术界对于协作通信研究的热情。在文献[46]中, 他们研究了基于重复编码和分布式空时编码的中继方案, 并证明了这两种方案均可获得满协作分集; 此外还提出了两种经典的中继转发协议: 放大转发和译码转发。其中, 放大转发的复杂度较低, 中继无需译码只需要将接收到的信号放大后转发即可; 而译码转发则相对复杂一些, 中继译码后再进行调制和转发。这两种协议实用性和性能都很好, 非常适合在实际系统中应用, 因而一经发表就引起了研究者们极大的关注。受到这些研究的启发, 关于协作通信的研究进入活跃期, 相关研究成果层出不穷。一方面研究者们对协作通信的性能在不同场景下进行了分析, 如多中继高斯信道下的信道容量的研究<sup>[47-48]</sup>, 衰落信道下各协作方案的系统容量研究<sup>[37-39,49-51]</sup>, 可靠性研究<sup>[40-42,52-54]</sup>等; 另一方面研究者们也研究并提出了很多实际多中继系统中能获得满协作分集的协作方案, 如基于轮询中继的协作方案<sup>[46,55]</sup>、基于分布式空时编码的协作方案<sup>[17,43-49]</sup>, 和基于中继选择的协作方案等。在这些方案之中, 基于轮询中继的方案虽然易于实现, 但是频谱利用率较低。随着中继数目的增多, 虽然分集阶数也在不断增大, 但是传输所需的时隙也越来越多, 导致其频谱效率不断下降。而基于分布式空时编码的协作方案, 虽然提高了频谱利用率, 但是实现要求高, 一方面要求各中继的信号几乎同时到达目的节点; 另一方面对于中继数目不同的场景需要进行复杂的分布式空时编码设计和资源分配。为满足这些要求, 系统需要花费大量的反馈、信令和计算开销<sup>[56-61]</sup>。基于中继选择的方案又被称作机会中继, 它在一定程度上综合了上述两类方案的优点。这类方案只选择“最优”的中继帮助用户进行传输, 在保持了较高频谱效率的同时, 实现起来较基于分布式空时编码的协作方案也更加简单; 此外, 在中继节点发射总功率一定时, 相比其他方案, 机会中继还具有最优的中断性能<sup>[58]</sup>。文献[62]还提出了集中式中继选择和分布式中继选择两种可在实际系统中应用的选择方案。因为这些优点, 机会中继受到了很多研究者的青睐, 他们提出了很多不同的中继选择策略<sup>[56-61,63-65]</sup>, 并对这些策略的性能进行了分析和比较<sup>[60,66-67]</sup>。

而对多用户系统中的多用户分集, Tse 等于 2001 年做了很好的总结和分析<sup>[29]</sup>。多



用户分集由多用户调度方案产生,不同于传统的轮询调度,其本质是充分利用系统中的用户资源,在大量用户中选择一个合适的用户进行服务。由于系统用户信道质量的独立性和随机性,系统中所有用户信道质量均较差的概率很小,因此通过多用户调度能够使系统每时每刻的性能得到很大程度的提升,从而提高系统的吞吐量和可靠性。从系统吞吐量和可靠性的角度出发进行考虑,“合适”的用户即是“最好”的用户。但是这种做法会使得各个用户无法获得公平的传输机会,对非对称网络,即各个用户的平均信道质量不同的情况,无论是对大数据量的传输(长时传输)还是小数据量的传输(短时传输),都会产生不公平性;即使是对对称网络,短时传输的公平性也完全无法保证。公平性和整体性是一对矛盾,因此实际系统中往往在瞬时最优和用户公平性指标间进行折中,通过权衡二者之间的比重兼顾两方面。最著名的折中调度方案就是CDMA中所应用的“比例公平调度”<sup>[68]</sup>,其对于瞬时信道质量通过一段时间观测窗内的服务情况进行加权,从而改善系统公平性,且已经被证明是帕累托最优<sup>[69]</sup>。此后,又有大量的文献对各种不同的多用户通信系统中的调度方案进行研究,来提升系统的整体性能。

虽然从信息论角度出发,中继的引入在一定情况下能够提升系统容量,但是在实际通信系统中,中继通常以半双工模式工作,这使得传统协作通信系统对无线网络容量的利用率相对较低<sup>[70]</sup>。近几年,PNC因为能有效地提高半双工中继网络的信道频谱利用率而受到越来越多的关注<sup>[71]</sup>,通常以最简单的三点双向中继通信单元为研究模型。基于PNC的双向中继通信包括多址和广播两个阶段:在多址阶段,PNC方案通过中继节点将空中叠加的多址信号进行检测并映射为网络编码符号;在广播阶段,源节点利用自信息对中继广播的网络编码符号进行检测、译码,进而获得来自另一源节点的有用信息<sup>[72]</sup>。相比基于传统单向中继的通信协议,PNC降低了多向信息流在网络中传输的开销,进而提高了网络的容量利用率。

基于PNC思想的高效双向中继通信系统采取的协议主要有两种:放大转发(amplify and forward, AF)和压缩转发(compress and forward, CF)。AF协议的设计较为简单,中继节点只需将接收到的多址信号放大后转发,源节点在获得该信号后首先进行自信息消除然后进行译码,如模拟网络编码(analog network coding, ANC)<sup>[22]</sup>就采用这样的协议。基于AF的双向中继通信系统具有算法简单、便于分析的优点,但是,中继的直接放大操作却将部分能量浪费并将噪声功率放大,增加了广播阶段的噪声,因而,采用AF的双向中继系统容量一般低于采用CF的系统。值得指出的是,基于二元域异或(XOR)操作的PNC是最早明确称为“物理层网络编码”的方案,同时也是具有CF信号处理特点的双向中继通信方法。在采用PNC的双向中继传输过程中,中继对空中叠加的多址信号进行部分译码,将接收信号进行处理并映射到一个与两个源节点的自信息都相关的网络编码符号,这种处理及映射过程体现了中继对多址信息的压缩。最初的PNC系统,为了易于获得基于XOR的PNC符号,仅考虑了加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)信道和低维调制的情况。但是,在实际系统中,