



国之重器出版工程

网络强国建设

网络基础与关键技术研究丛书

Theories and Technologies of Multiple-relay  
Wireless Cooperative Transmission

多中继无线协作  
传输理论与技术

包建荣 姜斌 刘超 唐向宏 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



## 图书在版编目(CIP)数据

多中继无线协作传输理论与技术 / 包建荣等著. --  
北京: 人民邮电出版社, 2019. 10  
(网络基础与关键技术研究丛书)  
国之重器出版工程  
ISBN 978-7-115-51696-1

I. ①多… II. ①包… III. ①无线电通信—信号传输—研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第152913号

## 内 容 提 要

本书系统论述了多中继无线协作传输理论与技术,基本覆盖了多中继无线协作传输理论的多中继优化选择和资源分配的内容。内容主要包括:协作通信技术概述、增强选择的混合译码放大转发及优化功率分配、协作通信下的最优中继选择、协作多中继选择的删除改进及功率优化分配、双向协作系统的中继选择和功率分配优化、改进的链路自适应再生(LAR)转发协作机制、低复杂度最大比合并量化转发、高效QC-LDPC预编码Raptor编码协作、多中继LDPC译码软信息转发协作、多中继极化选择译码转发协作等内容。该书能较好地涵盖最新发展的多中继协作传输理论与技术的诸多内容,有助于推动5G等新一代无线协作通信技术的发展。

本书适合作为普通高等院校电子信息类专业高年级本科生、研究生的教材,也可作为从事多中继无线协作传输及其信号处理等各领域工作的科技工作者的参考书。

---

◆ 著 包建荣 姜 斌 刘 超 唐向宏

责任编辑 李慧恬

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 710×1000 1/16

印张: 17

2019年10月第1版

字数: 314千字

2019年10月河北第1次印刷

---

定价: 109.00元

读者服务热线: (010)81055493 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



## 前言

本书较全面地阐述了目前多中继无线协作传输理论与技术的研究现状,系统介绍了采用现代数学模型来解决多中继无线协作传输中的信号分析与处理问题,以期获得接近最大似然的最优中继选择与功率分配等性能。其中,侧重于典型多中继传输及信息处理方法和常见的多中继信息合并等现代信号传输方法,并对其开展了较深入的探讨。同时,也结合部分算法,给出其在多中继无线协作传输处理中的典型应用。最后,还针对多中继无线协作传输方法中的问题,总结了这些技术在 5G 中的可能应用。

与类似侧重多中继转发、网络协同、编码协作等通信具体环节的多中继无线协作处理类书籍不同的是,本书综合了一些分散于各学术著作与论文上的模型化中继信号处理内容,结合了作者的研究成果,较完整地综合归纳总结及系统化描述了中继信号处理系统,争取做到学术思想新颖、内容范围适当合理、结构体系较为完善、文字写作简明精炼。具体特色如下:本书强调多中继无线协作传输模型方法中物理概念和原理结论的理解与掌握,简化烦琐的数学推导,注重使用明确、直观的物理概念,并增加了较多实例,力求让讲述内容理论联系实际,使其更适合于通信领域科技工作者参考。内容涉及经典协作通信模型、多中继转发等经典内容及协同迭代信息论最新发展的软信息转发等研究趋势的论述。另外,也注重理论联系实际,每部分内容都增加了对无线应用的探讨,方便读者进一步开展计算机仿真实验等工作,进而加深对本书内容的理解。





本书是作者对自己多年来从事空间及无线通信物理层多中继无线协作传输研究成果的总结和阐述,较深入地阐明了多中继协作转发数学模型及方法在多中继无线协作传输问题中的建模方法和算法设计思路。本书主要借鉴了多中继信号处理等现代中继信号合并与选择等软信息处理机制,结合信息论原理,较好地分析了多中继物理层传输过程中遇到的信号检测与接收合并等问题,开展了较详细的理论分析和推导证明,并通过计算机仿真结果来验证其模型的性能,并给予适当的评价。这些模型方法和手段可为从事现代多中继协作无线通信信号处理研究和物理层算法系统开发的科研工作者和工程技术人员提供一定的理论支撑,也可供无线通信相关领域专业的教师、学生参考,有助于激发或开拓多中继无线协作传输的研究思路。

全书共分为 10 章,除第 1 章为协作通信技术概述外,其余几章分别针对现有较热门的研究点,介绍了对现有多中继无线协作传输理论与技术的典型分类建模与分析应用。全书章节安排如下:第 1 章概述了协作通信技术的概念;第 2 章描述了增强选择的 ISHDAF 协议及优化功率分配;第 3 章给出了协作通信最优中继选择策略;第 4 章探讨了多中继选择策略的删除改进算法及功率优化分配方案;第 5 章探讨了双向协作系统的中继选择和功率分配优化;第 6 章介绍了改进的 LAR 转发协议;第 7 章论述了低复杂度最大比合并量化转发;第 8 章介绍了 QC-LDPC 预编码的 Raptor 编码协作;第 9 章介绍了多中继 LDPC 译码软信息转发协作;第 10 章介绍了多中继极化选择译码转发协作。

全书编撰分工如下:唐向宏教授主要撰写了第 1 章,在总体上给出了多中继无线协作传输理论与技术的数学模型与基础;刘超副教授完成了第 3 章,系统介绍了协作通信最优中继选择策略,并协助校对了部分章节文字;姜斌高级实验师完成了第 5、6 章,系统描述了双向协作系统的中继选择和功率分配优化,并突出了改进的 LAR 转发协议涉及的重点,特别是中继信号分配与转发建模等热门研究点。全书其余部分主要由包建荣教授编撰整理和总结。此外,蒋静、何丹、陈磊、吴佳雯、孙启超、林昀轩、胡爱民、倪妍红等也协助参与了部分资料的整理与总结,且绘制了部分插图,在此表示衷心感谢。最后,全书由唐向宏教授审核,并主持内容讨论及最终定稿。

本书主要受杭州电子科技大学配套的省重点学科“电路与系统”的资助,特此感谢。此外,还受到浙江省自然科学基金项目(No.LY17F010019)、国家自





然科学基金项目 (No.U1809201)、浙江省 2016 年度高等教育教学改革项目 (No.jg20160237)、浙江省高等教育“十三五”第一批教学改革研究项目 (No.jg20180471) 等资助。

该书主要从多中继无线协作通信的数学模型出发,由浅入深,直观与严谨相结合,并提供了较详尽的参考文献。该书可作为从事下一代无线协作通信信号处理新技术的普通高等院校通信与电子学科高年级本科生、研究生的教材和相关科技工作者的参考书。

由于多中继无线协作传输理论与技术发展日新月异,作者水平有限,书中难免有不妥或需改进之处,还望各位专家和读者予以批评指正。

作者

于杭州临安青山湖·杭电信息工程学院

2019 年 6 月



# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 协作通信技术概述             | 001 |
| 1.1 无线协作通信研究意义             | 002 |
| 1.2 无线协作通信研究现状             | 004 |
| 1.3 无线协作通信的典型应用            | 007 |
| 1.3.1 蜂窝移动通信网络应用           | 007 |
| 1.3.2 无线局域网应用              | 008 |
| 1.3.3 无线传感器网络应用            | 008 |
| 1.4 无线通信分集技术               | 008 |
| 1.4.1 分集技术                 | 009 |
| 1.4.2 分集合并技术               | 010 |
| 1.4.3 3 种合并技术的性能对比         | 013 |
| 1.5 协作通信系统的基本模型            | 013 |
| 1.6 协作通信的多中继协作             | 015 |
| 1.6.1 固定中继协作               | 016 |
| 1.6.2 选择 DF 中继协作           | 019 |
| 1.6.3 增量中继协作               | 020 |
| 1.6.4 其他中继协作               | 021 |
| 1.6.5 各中继协作的比较             | 022 |
| 1.7 协作通信的中继选择              | 023 |
| 1.7.1 基于不同准则的中继选择          | 023 |
| 1.7.2 不同中继选择的比较            | 025 |
| 1.8 本章小结                   | 025 |
| 参考文献                       | 026 |
| 第 2 章 增强选择的混合译码放大转发及优化功率分配 | 031 |
| 2.1 混合译码转发模型及 ISHDAF 协作原理  | 034 |
| 2.1.1 混合译码转发系统模型           | 034 |
| 2.1.2 ISHDAF 协作原理          | 036 |
| 2.2 ISHDAF 协作分析及仿真         | 039 |





|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 2.2.1 | ISHDAF 协作的误码率分析 .....        | 039 |
| 2.2.2 | ISHDAF 协作的中断概率分析 .....       | 040 |
| 2.2.3 | ISHDAF 协作的频谱效率分析 .....       | 041 |
| 2.2.4 | ISHDAF 协作的数值仿真及分析 .....      | 042 |
| 2.3   | 协作网络下的单及多中继系统模型 .....        | 046 |
| 2.3.1 | 单中继系统模型与互信息量 .....           | 046 |
| 2.3.2 | 多中继系统模型及中继选择分析 .....         | 048 |
| 2.4   | 基于中断概率优化的中继功率分配 .....        | 050 |
| 2.4.1 | 中继系统的中断概率分析 .....            | 051 |
| 2.4.2 | 中继系统的功率分配优化 .....            | 053 |
| 2.4.3 | 中继系统的最优中继位置 .....            | 054 |
| 2.4.4 | 中继系统的中继分集增益 .....            | 055 |
| 2.4.5 | 中继系统的功率分配仿真及分析 .....         | 056 |
| 2.5   | ISHDAF 功率分配与误符号率优化 .....     | 060 |
| 2.5.1 | ISHDAF 协作系统分析 .....          | 060 |
| 2.5.2 | 误符号率优化的目标函数 .....            | 061 |
| 2.5.3 | 功率分配因子的改进遗传算法优化 .....        | 063 |
| 2.5.4 | ISHDAF 功率分配与符号率优化仿真 .....    | 065 |
| 2.6   | 本章小结 .....                   | 069 |
|       | 参考文献 .....                   | 070 |
| 第 3 章 | 协作通信下的最优中继选择 .....           | 073 |
| 3.1   | 最优中继选择的协作系统模型 .....          | 075 |
| 3.2   | 机会中继选择策略 .....               | 077 |
| 3.2.1 | AF 机会中继选择策略 .....            | 078 |
| 3.2.2 | DF 机会中继选择策略 .....            | 078 |
| 3.3   | 混合译码放大转发协作下的最优中继选择策略 .....   | 079 |
| 3.3.1 | 最优中继选择算法描述 .....             | 080 |
| 3.3.2 | 最优中继选择性能分析 .....             | 082 |
| 3.3.3 | 最优中继选择对比仿真 .....             | 083 |
| 3.4   | 基于门限决策的 SDF 中继选择策略性能分析 ..... | 086 |
| 3.4.1 | SDF 中继选择策略描述 .....           | 086 |
| 3.4.2 | SDF 中继选择策略理论分析 .....         | 089 |
| 3.4.3 | SDF 中继选择策略仿真及分析 .....        | 092 |





|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 3.5 本章小结 .....                       | 095        |
| 参考文献 .....                           | 096        |
| <b>第4章 协作多中继选择的删除改进及功率优化分配 .....</b> | <b>099</b> |
| 4.1 单源多中继 AF 网络中的基本中继选择 .....        | 101        |
| 4.1.1 单源多中继 AF 协议模型 .....            | 101        |
| 4.1.2 单源多中继 AF 协议的基本中继选择策略 .....     | 103        |
| 4.2 多中继选择策略的删除改进及其次优功率分配策略 .....     | 105        |
| 4.2.1 系统模型 .....                     | 105        |
| 4.2.2 多中继选择策略的删除改进 .....             | 108        |
| 4.2.3 基于删除改进的次优功率分配 .....            | 109        |
| 4.3 实验仿真与结果分析 .....                  | 111        |
| 4.3.1 仿真实验 1 .....                   | 111        |
| 4.3.2 仿真实验 2 .....                   | 112        |
| 4.3.3 仿真实验 3 .....                   | 113        |
| 4.4 本章小结 .....                       | 114        |
| 参考文献 .....                           | 114        |
| <b>第5章 双向协作系统的中继选择和功率分配优化 .....</b>  | <b>117</b> |
| 5.1 多中继选择策略的删除改进及其次优功率分配策略 .....     | 119        |
| 5.2 现有中继选择算法和凸优化功率分配 .....           | 121        |
| 5.2.1 Max-Min 算法模型 .....             | 121        |
| 5.2.2 双向中继 .....                     | 122        |
| 5.2.3 凸优化功率分配 .....                  | 122        |
| 5.3 门限信噪比乘积算法及其最优功率分配 .....          | 124        |
| 5.3.1 双向中继选择策略的门限信噪比乘积算法 .....       | 124        |
| 5.3.2 最优功率分配 .....                   | 125        |
| 5.4 实验仿真与结果分析 .....                  | 127        |
| 5.4.1 仿真实验 1 .....                   | 127        |
| 5.4.2 仿真实验 2 .....                   | 128        |
| 5.4.3 仿真实验 3 .....                   | 129        |
| 5.4.4 仿真实验 4 .....                   | 130        |
| 5.5 本章小结 .....                       | 131        |
| 参考文献 .....                           | 131        |





|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第 6 章 改进的链路自适应再生 (LAR) 转发协作机制研究 .....  | 133 |
| 6.1 协作通信系统模型 .....                     | 135 |
| 6.1.1 两跳单中继系统模型 .....                  | 135 |
| 6.1.2 两跳多中继系统模型 .....                  | 135 |
| 6.2 最大比合并概述及分析 .....                   | 136 |
| 6.3 协作通信的中继传输协作 .....                  | 137 |
| 6.3.1 放大转发协作 .....                     | 138 |
| 6.3.2 译码转发协作 .....                     | 139 |
| 6.3.3 编码协作 .....                       | 140 |
| 6.3.4 压缩转发协作 .....                     | 141 |
| 6.3.5 各中继传输协作的对比 .....                 | 142 |
| 6.4 改进的 LAR 转发协作方案 .....               | 142 |
| 6.4.1 中继选择方案 .....                     | 145 |
| 6.4.2 改进的 LAR 中继系统的性能分析 .....          | 145 |
| 6.4.3 改进的 LAR 中继系统性能仿真及分析 .....        | 147 |
| 6.5 本章小结 .....                         | 149 |
| 参考文献 .....                             | 149 |
| 第 7 章 低复杂度最大比合并量化转发 .....              | 151 |
| 7.1 多中继协作转发系统模型 .....                  | 153 |
| 7.2 改进的低复杂度量化转发方案 .....                | 155 |
| 7.2.1 中继节点标量量化 .....                   | 157 |
| 7.2.2 目的节点联合译码 .....                   | 158 |
| 7.3 中继量化转发的优化功率分配 .....                | 160 |
| 7.4 改进的量化转发方案仿真及分析 .....               | 162 |
| 7.5 本章小结 .....                         | 168 |
| 参考文献 .....                             | 168 |
| 第 8 章 高效 QC-LDPC 预编码 Raptor 编码协作 ..... | 171 |
| 8.1 Raptor 编译码原理 .....                 | 173 |
| 8.1.1 Raptor 编码 .....                  | 174 |
| 8.1.2 Raptor 译码 .....                  | 175 |
| 8.2 LDPC 预编码 Raptor 编码协作原理 .....       | 177 |





|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| 8.3    | LDPC 预编码 Raptor 编码协作分析 .....    | 179 |
| 8.3.1  | 误比特率分析 .....                    | 180 |
| 8.3.2  | 中断概率分析 .....                    | 182 |
| 8.4    | LDPC 预编码 Raptor 编码协作仿真及分析 ..... | 184 |
| 8.5    | 本章小结 .....                      | 188 |
|        | 参考文献 .....                      | 189 |
| 第 9 章  | 多中继 LDPC 译码软信息转发协作 .....        | 191 |
| 9.1    | 多中继 LDPC 译码软信息转发协作概述 .....      | 192 |
| 9.2    | 协作传输系统模型 .....                  | 195 |
| 9.3    | LDPC 编译码原理 .....                | 196 |
| 9.4    | LDPC 码的扩展原模图构造 .....            | 197 |
| 9.4.1  | QC-LDPC 码的扩展原模图构造 .....         | 198 |
| 9.4.2  | 循环偏移量的 QC-IACE 优化搜索 .....       | 201 |
| 9.4.3  | 所构造编码的性能仿真与分析 .....             | 204 |
| 9.4.4  | 所构造编码的复杂度分析 .....               | 206 |
| 9.5    | LDPC 译码软信息转发协作 .....            | 207 |
| 9.5.1  | 中继节点软信息测量 .....                 | 208 |
| 9.5.2  | 目的节点联合译码 .....                  | 210 |
| 9.5.3  | LDPC 译码软信息转发仿真与分析 .....         | 214 |
| 9.6    | 本章小结 .....                      | 216 |
|        | 参考文献 .....                      | 217 |
| 第 10 章 | 多中继极化选择译码转发协作 .....             | 219 |
| 10.1   | Polar 码及其选择译码转发协作概述 .....       | 220 |
| 10.2   | 缩短 Polar 码构造的删除图样选择 .....       | 223 |
| 10.2.1 | Polar 码及其删除改进结构 .....           | 223 |
| 10.2.2 | Polar 码的反馈代价删除 .....            | 225 |
| 10.2.3 | 信道极化效果及误块率上限分析 .....            | 227 |
| 10.2.4 | 实验仿真及分析 .....                   | 228 |
| 10.3   | 分段 CRC 辅助的删除 Polar 译码 .....     | 231 |
| 10.3.1 | Polar 码的 BP 译码 .....            | 231 |
| 10.3.2 | 分段 CRC 辅助的 Polar 码删除译码 .....    | 233 |
| 10.3.3 | 实验仿真及分析 .....                   | 236 |





|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 10.4 多中继协作传输系统模型.....    | 241 |
| 10.4.1 多中继协作系统模型.....    | 241 |
| 10.4.2 联合极化译码转发协作模型..... | 242 |
| 10.5 改进的极化选择译码转发协作.....  | 243 |
| 10.5.1 基于衰落信道的极化码构造..... | 243 |
| 10.5.2 预选及再选择极化译码转发..... | 245 |
| 10.5.3 极化选择译码转发协作分析..... | 247 |
| 10.5.4 实验仿真及分析.....      | 249 |
| 10.6 本章小结.....           | 253 |
| 参考文献.....                | 254 |





## 国之重器 出版工程

人民邮电出版社  
电子工业出版社  
北京航空航天大学出版社  
北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社  
西北工业大学出版社

## 联合荣誉出版

### 网络基础与关键技术研究丛书

- 数联网——大数据如何互联
- 光传送网（OTN）技术的原理与应用
- 窄带物联网（NB-IoT）标准与关键技术
- 网络功能虚拟化：NFV 架构、开发、测试与应用
- **多中继无线协作传输理论与技术**
- SDN/NFV 重构未来网络
- 面向 5G 的智能光承载网规划运维



扫描二维码  
阅读电子书

ISBN 978-7-115-51696-1



9 787115 516961 >

ISBN 978-7-115-51696-1

定价：109.00 元

分类建议：通信技术/移动通信

人民邮电出版社网址：[www.ptpress.com.cn](http://www.ptpress.com.cn)