

高速铁路 车地间多跳协作 通信技术

丁青锋 奚韬 高鑫鹏 吴泽祥 著



西南交通大学出版社

国家自然科学基金（61961018）项目资助

江西省杰出青年人才计划项目（20192BCB23013）项目资助

江西省自然科学基金（20192ACB21003）项目资助

高速铁路 车地间多跳协作 通信技术

丁青锋 奚韬 高鑫鹏 吴泽祥 © 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

高速铁路车地间多跳协作通信技术 / 丁青锋等著
· 一成都: 西南交通大学出版社, 2021.10
ISBN 978-7-5643-8322-0

I. ①高… II. ①丁… III. ①高速铁路-铁路通信-
通信技术 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 205492 号

Gaosu Tielu Chedijian Duotiao Xiezuo Tongxin Jishu

高速铁路车地间多跳协作通信技术

丁青锋 奚韬 高鑫鹏 吴泽祥 著

责任编辑	穆 丰
封面设计	GT 工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	13.75
字 数	215 千
版 次	2021 年 10 月第 1 版
印 次	2021 年 10 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8322-0
定 价	88.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书针对 5G/B5G 应用到我国轨道交通领域中的实际情况，尤其是在高铁运行维护和用户服务等方面存在的问题和挑战，重点从高铁信道的时变、非平稳特性出发，对基站-车载中继-车厢内用户的多跳协作无线传输系统进行整体论述。首先，针对列车高速移动对信号传输带来的影响，在基站端引入空间调制技术，提出一种基于截断速率的天线选择算法优化系统性能并降低收发机的时间复杂度；在此基础上，针对高铁受强空时相关性的影响，设计一种基站-车载中继端的分布式空间调制系统，提出基于安全容量和误码率的联合最优天线选择和功率分配算法，并对高铁场景下性能的均衡进行研究。然后，为了提高车载中继-车厢内用户毫米波信道下的波束成形增益，研究在车载中继接收端与发送端利用不同量化位数移相器时的混合预编码来提升全双工中继系统的性能。进一步考虑存在多用户的场景下，推导具有理想和非理想信道状态信息的频谱效率闭式表达式，并提出一种局部最优功率分配方案以提高活跃用户的信道容量。接着，针对传统中继高成本和高能耗的问题，考虑利用智能反射表面替代，研究其辅助空间调制进行传输，并提出基于深度神经网络的天线选择算法实时地优化补偿多普勒频移带来的损失。最后，考虑存在随机阻塞的情况下，利用智能反射表面重构传输链路保证通信稳定性，并提出一种分布式交替优化方案获取基站主动混合预编码，为系统提供均衡的频谱效率与能量效率。本书适合空间调制、中继和波束赋形相关研究方向并对高铁场景较为感兴趣的读者，并可以为读者提供理论指导和相关技术在高铁场景下应用的思路与结论。

作 者

2021 年 9 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 相关技术研究现状	5
1.3 本书主要内容	19
第 2 章 高铁多跳协作与空间调制相关技术	22
2.1 高铁传统 MIMO 协作多天线技术	22
2.2 高铁空间调制技术	31
2.3 智能反射表面协作通信技术	34
2.4 系统性能评估	35
2.5 本章小结	38
第 3 章 轨旁基站端低复杂度的空间调制自适应链路设计	40
3.1 高铁空间调制系统	40
3.2 基于截断速率的天线选择算法	45
3.3 基于信道列范数的复杂度降低方法	47
3.4 仿真结果和分析	51
3.5 本章小结	56
第 4 章 基站-车载中继分布式空间调制安全传输方案设计	57
4.1 高铁分布式安全空间调制系统	57

4.2	系统性能分析.....	62
4.3	联合优化天线选择和功率分配方案.....	64
4.4	仿真结果和分析.....	66
4.5	本章小结.....	73
第 5 章	理想 CSI 下半双工中继系统的传输性能研究.....	74
5.1	大规模 MIMO 中继系统模型.....	74
5.2	大规模 MIMO 中继系统性能分析.....	77
5.3	毫米波车载中继混合预编码系统结构.....	97
5.4	频谱效率优先的离散车载中继混合预编码设计及性能分析.....	99
5.5	本章小结.....	107
第 6 章	非理想 CSI 下全双工双跳车载中继系统的传输性能研究 ...	109
6.1	全双工中继混合预编码系统结构.....	109
6.2	能效均衡的离散混合预编码设计.....	112
6.3	仿真与分析.....	119
6.4	非理想 CSI 下全双工双向中继网络模型.....	126
6.5	非理想 CSI 下全双工双向中继网络性能分析.....	128
6.6	本章小结.....	136
第 7 章	智能反射表面辅助高铁空间调制系统.....	138
7.1	轨旁 IRS 辅助的高铁空间调制自适应传输方案.....	138
7.2	系统性能分析.....	147
7.3	仿真结果和分析.....	151
7.4	多用户场景下 IRS 辅助系统模型.....	157
7.5	IRS 多用户系统性能分析与优化.....	159
7.6	IRS 多用户系统仿真结果与分析.....	168

7.7 本章小结	174
第 8 章 链路阻塞下智能表面辅助系统的混合预编码设计	175
8.1 阻塞信道下智能表面辅助系统结构	175
8.2 阻塞状态下多级混合预编码设计	178
8.3 数值分析结果	186
8.4 本章小结	194
参考文献	195

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景及意义

21 世纪以来，随着信息技术的迅速进步和互联网的快速发展，无论是需求快速增长的移动互联网，还是新兴的车联网和智慧城市，全球各地的人们对无线通信的需求在逐步地增长，而 5 年前的 4G 技术无论在场景、规模还是数据传输速率方面都已然无法满足人们的需求^[1]。2020 年以来，5G 的标准化工作基本完成，全球运营商都在积极部署 5G 基站，这也意味着一个具有超低延时、更高传输速率和更大规模连接的网络正逐渐融入人们的生活^[2]。同时，国内外诸多团队都开始了关于 5G/6G 的研究，其中一个关键的内容就是关于如何将现有技术覆盖到更多的场景，例如智能家居、智慧交通等^[3]。

如图 1.1 所示，智慧轨道交通是 5G 愿景中的重要组成部分，尤其是在高铁场景中。高速列控系统和车载用户终端在进行无线通信时，不仅需要较高的速率，也对时延和稳定性提出了较高的要求^[4]。同时，由于数据业务需求量的剧增，节能减排观念的深入以及对下一代高铁通信系统的传输需求，都迫使研究者们开发更为高效的铁路通信系统。所以，研究如何利用 5G 给高速铁路无线通信系统提供重要的助力是十分迫切的^[5]。

1.1.1 高铁无线通信技术的发展

伴随着无线通信技术的飞速发展和迭代，传统的铁路通信业务也正在经历过渡转型，铁路无线通信系统从传统提供普通语音调度的铁路专用无线通信系统（Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R）逐渐转变为集数据、语音和视频图像业务于一体的宽带多媒体系统（Long

Term Evolution-Railway, LTE-R), 期望通过高速率、大带宽且具有服务质量保证的专用无线通信系统来提高工作效率、加快铁路信息化建设^[6]。

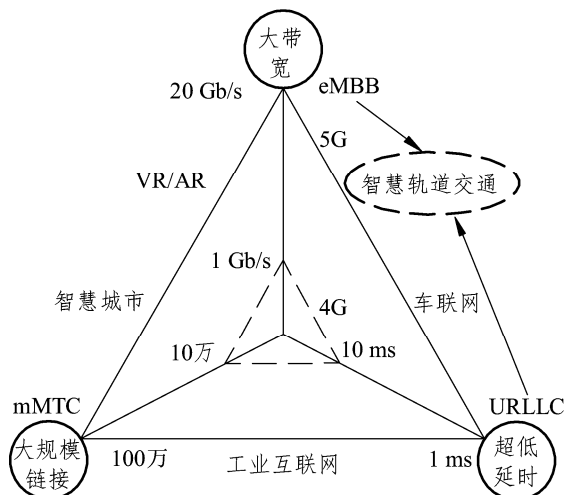


图 1.1 5G 三大典型场景及智慧轨道交通需求

如图 1.2 所示, 高铁无线通信由 GSM-R 向下一代宽带移动通信系统 LTE-R 的演进已经被深入研究, 而 5G 网络致力于增强的移动宽带通信服务和广域的机器类通信服务, 可以预见, 未来面向“智慧铁路”的 5G 铁路移动通信系统 (5th Generation for Railway, 5G-R) 将全面提高铁路运输效率和乘客服务质量, 进而进一步提升高铁的吸引力和竞争力^[7]。在全球无线通信标准化组织 3GPP 第 17 次立项会议上, 确定了多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 增强为新的立项内容, 并且将高铁增强作为其中最重要的组成部分, 这也意味着, 将新型的无线通信技术应用到高铁场景下是十分迫切的需求^[8]。作为 5G 的核心关键技术之一, 大规模 MIMO 技术能够很好地应付更高的通信要求, 但是在高铁场景下, 大规模 MIMO 技术存在严重的信道间干扰, 面临着需要天线射频链路严格同步和接收端信号检测复杂等几个方面的问题^[9]。另外, 在高速列车移动过程中进行车地间通信将面临非常严重的多普勒频移和车厢的穿透损耗问题, 所以研究如何通过先进的技术来避免或者解决车厢穿透损耗和多普勒频移所带来的影响具有十分重要的意义。

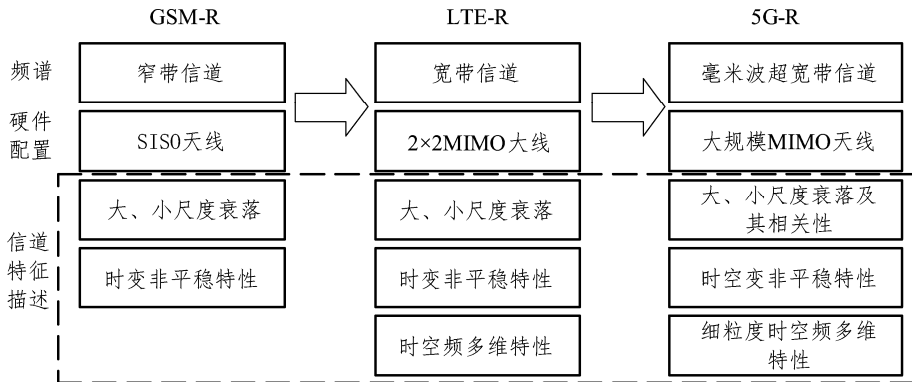


图 1.2 高铁无线通信系统演进图

1.1.2 多跳协作通信技术的发展

列车组在高速移动的过程中进行车地间多用户通信时，具有车体穿透通信、切换频繁、网络线型覆盖、多普勒频移较严重等特点，而对于无线通信系统而言，最大的阻碍就是车体穿透损耗高^[10,11]。表 1.1 中列举了几种常见列车静止时车体的穿透损耗对比^[12-14]，其中 CRH 列车均为高速列车。由于高速铁路列车比普通列车速度更快，在运行途中衰减更大，为确保车厢内的正常通信，需根据最高的 24 dB 来计算。因此，车载中继的应用对高铁无线通信信息传输的可靠性起着至关重要的作用。另外，由于铁路线路较长，沿线的轨旁基站较多，在通信过程中，会产生巨大能耗。

在实际的无线通信过程中，往往会受到许多环境因素的干扰，其中多径传播引起的信号衰落会严重影响系统通信性能。无线信号在传播过程中受到障碍物等环境因素的影响，经过折射、反射、直射等多条路径到达接收机的现象称为多径效应，通常可以通过分集传输的方式来解决。MIMO 技术正是通过在发送机和接收机上安装多根天线组成多天线虚拟阵列，从而充分利用空间资源，以获得空间分集增益^[15,16]。但由于终端设备体积有限，通常无法部署多根天线，于是 Fitzek 提出一种借助多用户之间进行合作通信的方式，以近似达到 MIMO 的效果^[17]。这种技术称之为协作分集技术，这种通信方式称之为协作通信。与传统的单用户空间分集技术不同，协作通信是建立在经典的中继信道模型基础上的，利用多用户间的分布式

传输和信息共享来实现虚拟阵列^[18,19]。另外，当源节点与目的节点间由于障碍物的影响而无法正常通信时，通过引入协作中继可以消除通信链路的盲点，降低中断概率，提高系统性能并获得更高的增益。

表 1.1 常见列车静止时车体穿透损耗

车型	列车材质	运营速度 /(km/h)	最高速度 /(km/h)	列车长度 /m	平均车体穿 透损耗/dB
T 型	铁质	120	140	255	12
K 型	铁质	90	120	255	14
CRH1	不锈钢	200	250	213.5	24
CRH2	中空 铝合金	200	250	201.3	10
CRH3	铝合金	300	380	201.3	20
CRH5	中空 铝合金	200	250	205.2	24

1971 年，Meulen 首次提出了三节点（即源节点、中继节点和目的节点）通信的概念^[20]。随后 Covel 等人对中继信道进行了深入的研究，并给出了系统容量的上下限，奠定了协作通信技术的理论基础^[18]。接着 SendonaIRS 等人经过验证，表明协作中继传输可以有效提高系统容量，降低中断概率^[21,22]。具体来说，中继技术的主要优势可以体现在以下几个方面^[23-25]：

（1）利用分集技术提高空间复用增益，从而提升信道容量，并扩大信号覆盖范围。

（2）改善小区边缘或阴影衰落严重区域的用户通信质量，提升链路可靠性。

（3）中继节点的天线数、发射功率、体积等都远小于基站，利用中继进行信号覆盖可以减少基站的部署量，以降低成本。

（4）可以通过部署移动中继来应对通信设施受损、人员密度高等特殊情况。

另外，由于车体穿透损耗的原因，列车顶部往往需要安装移动中继，构成基站、中继、用户三节点通信，增强信号强度的同时，还能获得额外的分集增益。如图 1.3 所示，车厢内的用户通常无法与基站直接进行高质量通信，而是通过中继接收源节点发送过来的信号，经过放大、解码等操

作后，再转发给目的节点。

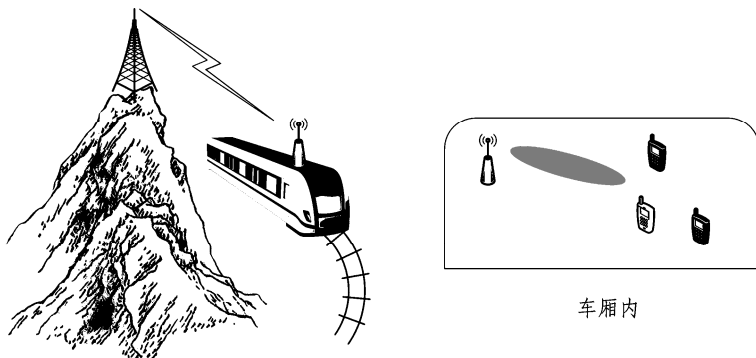


图 1.3 高速铁路场景下的协作通信系统

多中继协作通信还能利用物理层特性提高信息传输的安全性。高速铁路场景中由于承载着列车状态、调度信息，以及大量用户的私密信息，信息安全需求较高^[26]。而高铁的高速移动特性，使得传统的密钥加密信息传输实现起来非常困难。现有的物理层安全技术主要是通过 MIMO 和中继技术来实现的^[27]。物理层安全技术主要是利用编码、多天线以及中继生成的额外自由度来提高窃听者的信息模糊度，从而防止其进行信息窃听^[28]。此外，协作通信技术也可以与其他技术相结合，充分发挥各自的优势，如波束成形、空间调制（Spatial Modulation, SM）等，从而解决强空时相关性和用户间干扰的问题。

1.2 相关技术研究现状

目前，国内外高铁通信的主流技术还是以 GSM-R 技术和 LTE-R 为代表，但随着近几年高铁的迅猛发展，未来铁路通信系统的研究也必然是学者研究的重要课题。文献[29]总结并概括了 GSM-R 和 LTE-R 高铁通信的技术、性能指标和所面临的挑战问题等，并展望了未来 5G 铁路通信的发展趋势。以北京交通大学艾渤团队为代表的学术研究人员们提供了对高速移动性无线通信的系统评价，总结了高速移动性无线通信系统中的主要挑战和机遇，然后对可以解决这些挑战的技术和可以进行辅助的独特技术进

行了全面的综述^[30]。文献[31]的研究内容涵盖了广泛的无线通信系统，包括对高速移动性信道的准确建模，利用其环境特性进行高铁无线收发器结构的设计并且总结了高速移动性通信的未来研究方向。传输速率、安全可靠和非平稳信道环境是高铁无线通信所面临的重要挑战，本节将从毫米波（Millimeter Wave, mmWave）、协作中继和空间调制技术三者的研究现状对应于提高频段、减少中断和提升平稳通信三个角度来进行阐述。

1.2.1 高铁毫米波技术研究现状

随着密集组网与接入用户的爆发增长，传统的低频段通信技术无论是在系统容量还是传输速率方面，都已经无法同时保证接入用户对通信条件的要求。在低时延、大容量、高速率通信需求的驱动下，为了满足无线网络中高密集接入用户的通信需求，能够提供较高可靠性的毫米波协作通信技术逐渐进入研究者的视野。

1. 毫米波技术及特点

毫米波传播过程通常同时依赖视距（Line of Sight, LoS）和非视距（Non Line of Sight, NLoS）传输，由于传输过程中所遭受的大尺度路径损耗和衰减，随着传输距离的增加，处在毫米波通信网络边缘的用户将遭受较大的中断风险。由表 1.2 可以观察到，当毫米波网络链路发生阻断时小区边缘速率将急剧降低，这导致了与中断发生距离越远的边缘用户越难以重新建立通信链路^[32]。因此，为了提升边缘用户的通信服务质量，可以考虑在信息速率较低的地区结合中继协作技术改善服务信号以保证通信链路的可靠性。

表 1.2 mmWave 与 LTE 小区吞吐量与边缘速率比较

结构	带宽	频率	中断发生距离	单元吞吐量 / (b/s)	小区边缘速率 (下行) / (Mb/s)	小区边缘速率 (上行) / (Mb/s)
mmWave	1 GHz	28 GHz	50 m	1450	17.62	17.49
mmWave	1 GHz	28 GHz	70 m	1289	0.54	0.09
LTE	20+20 MHz	2.5 GHz	—	53.8	1.80	1.94

在能量受限的条件下与提升传输速率的需求下，开发包括毫米波在内的高频段协作通信技术能够突破由硬件条件所带来的性能瓶颈。相较于 6 GHz 及以下低频段，毫米波的频段带宽可以达到其他无线频段带宽总和的数十倍^[33]，丰富的可开发带宽资源能够满足多速率、高灵活和巨容量的通信要求。此外，毫米波系统中传输天线的硬件尺寸设计因子更小，这使得能够在传输基站部署例如大规模天线阵列^[34]、低功耗智能反射表面（Intelligent Reflecting Surface, IRS）^[35]、人工噪声天线^[36]等高定向可操控天线阵列。其中，在利用相同传输天线尺寸时，毫米波的波束相比于低频电磁波的波束要窄得多，这导致了毫米波传输过程中容易受到天气、温度、湿度等环境因素的影响导致传输距离较短，但同样有助于在定向传输过程中最大限度地减少通信中的干扰。

在高速移动通信场景下，高频段的毫米波通信技术的应用使得其与常规低频段的通信技术面临着同样的挑战。其中以高速铁路为代表的高速移动场景具有环境多样化、移动速度快和接入用户密集等特点^[37, 38]。复杂多样的环境对通信系统的信道有着较大的影响，使得不同频段的通信技术有着较为突出的差异性。为了能更好地将毫米波通信技术应用于高速移动场景下，需要对不同环境下的信道特点进行性能分析并结合其他技术提高高速移动无线通信的性能。

由于毫米波波长较短，大规模或超大规模的天线阵列被允许使用以增加分集增益。同时，当无线系统利用毫米波频段进行通信时，可以通过结合波束成形技术进一步固化随机信道特性，从而提升高速移动场景的通信性能。因此，对于高速移动的通信场景而言，开发毫米波频段通信技术具有较高的研究价值。此外，通过进一步研究扩展高速场景下的毫米波频段通信技术，以毫米波频段为载体结合多种传输技术，并结合高速移动场景时变的特点来支持未来通信系统所面临的大规模接入需求是需要深入研究的问题。

2. 高速移动毫米波技术关键问题及研究现状

与传统经典的静态蜂窝网络传输过程相同，代价高昂的穿透损耗和传播衰减依旧是实现理想的毫米波通信性能的主要障碍。毫米波频段蜂窝网

络的发展面临着阴影衰落的影响，从而导致通信链路中断、快速变化的信道条件和间歇性连接^[39]。为了弥补因毫米波传播特性所造成的较大路径损耗，通常在毫米波收发机端采用大规模阵列天线扩展空间增益，通过结合波束成形等技术实现更高的传输效率。其中一种有效的方法是利用大规模阵列天线产生具有高强度的定向波束进行传输^[40, 41]，通过波束成形所提升的传输增益抵消传输过程中的损耗。另外，为了满足密集型多用户的通信需求，通过依据每个用户的毫米波信道特性进行波束分配同样可以达到良好的性能^[42]。

在无线通信系统中，虽然能够在基站端通过扩展天线资源弥补毫米波传输过程中的大尺度损耗，但是高速移动环境仍然为毫米波信道信息的获取带来了较大的不可靠性。因此，为了解决由于高速移动场景下复杂通信环境所导致的低连接可靠性，现有研究进一步分析了毫米波通信的阻塞传输特性，并实现抗阻塞的资源分配与传输方案^[43]。其中，文献[44]为了保证毫米波传输条件下回程信息流的稳定，采用用户服务质量感知并结合中继选择的最优通信调度方案，保证在具有随机阻塞情况下的稳定通信吞吐量。针对传输过程中因随机阻塞产生的间歇性连接，文献[45]定义了不同等级的阻塞状态，并针对不同阻塞等级设计了具有鲁棒性的智能波束传输方案。进一步，文献[46]通过扩展时域汤姆森采样算法设计了波束切换方案，提高间歇性阻塞的毫米波通信链路可靠性。

为了在高速移动场景下更加深入地利用毫米波技术以实现高速、高效、稳定的通信过程，不仅要在硬件层面上提升传输增益，而且需要针对不同的传输情况研究更加智能的传输方案。因此，联合考虑毫米波传输的信道特性与传输技术将是接下来的研究重点。

1.2.2 高铁多跳协作技术研究现状

高速列车在行进的过程中想要与车厢内的用户进行通信，将会受到车厢穿透损耗的严重影响，从而导致通信中断。要想减少无线通信的中断可能，基于车载中继的多跳传输方案无疑是一种好的选择，可以将其看作全双工双向中继系统。而与传统中继系统不同的是，由基站端到车载中继端需要考虑为高铁信道，而由车载中继端到用户端可以考虑为毫米波信道，

并可以由此进行预编码优化。

1. 传统中继技术关键问题及研究现状

传统中继拥有多根天线，具备接收、发射以及处理信号的能力。与基站不同的是，中继处理完信号后，可根据实际需要选择不同的转发机制，以达到辅助通信的结果。如文献[47]中采用了放大转发机制，而文献[48]中则采用了解码转发机制。此外，在多中继协作通信中，通常会选择性能较优的某一个或某一组中继进行信息转发。文献[47]、[48]均提出了一种基于最大化安全容量的最优中继选择方案，研究了存在窃听者的全双工双向协作通信系统的保密性能。文献[49]中证明了最优中继选择方案可以有效增强系统的安全性能，同时进一步分析了窃听者的位置对系统安全性能的影响。而较低复杂度的次优中继选择算法可以获得不错的系统容量增益^[50]。文献[51]提出最优、次优联合中继选择方案，并通过未分配的中继向窃听器发送干扰信号，显著提高多跳多用户全双工中继网络的保密性能。

另外，协作中继还能从物理层解决通信过程中的安全问题^[52,53]。文献[52]表明中继可以从物理层方面有效地提高大规模 MIMO 系统的安全性能。不同于文献[52]、[53]，在中继工作解码转发协议下，提出了一种优化框架，通过优化每一跳中的源传输功率、中继发射功率以及传输时间，以最大化保密中断容量。在经典的三节点中继网络中，文献[54]提出了一种包含单向、双向半双工，以及单向、双向全双工这四种中继模式的混合中继模型，通过选择中继模式和功率分配算法达到最大化端节点和速率的目的。

在大规模 MIMO 中继通信系统中，为了降低信号处理的复杂度以保证低延迟通信，中继通常会采用放大转发机制。文献[55]中研究了多用户大规模 MIMO 中继系统，在上行链路中考虑了最大比合并、迫零 (Zero Forcing, ZF) 接收机两种情况，在下行链路中考虑了最大比传输 (Maximum Ratio Transmission, MRT) 以及 ZF 预编码两种情况，并分别推导了四种传输方式下系统频谱效率 (Spectral Efficiency, SE) 的下界表达式。文献[56]中作者分析了多天线双向中继网络的中断概率和误码率，并研究了中继位置和功率分配之间的联合优化问题。增大中继的天线数还可以有效减少中继处量化造成的性能损失^[57]。

此外，传统中继节点工作模式分为半双工和全双工的工作模式。其中，半双工工作模式下发送和接收功能将在不同间隙完成，以避免因发送残余所导致的回环信号的干扰。但是，这种工作模式的传输效率较低，当需要传输大量信息流时容易因信令风暴导致链路阻塞，因此常常应用于速率要求不高的场景中^[58,59]。为了提升半双工中继的传输性能，文献[60]考虑半双工中继系统容量需求，通过选择子中继节点实现高斯传输网络的简化。此外，文献[61]还提出利用多中继编码协作的方式来弥补因半双工约束所导致的复用增益损耗。

为了契合超可靠和低延迟通信的需求，采用全双工中继协助转发已经成为研究的趋势^[62,63]。由于全双工工作模式能够同时接收和发送数据流，因此相比半双工具有更高的传输效率。然而，这种全双工工作模式在进行转发时会额外遭受残留回环信号的干扰，导致接收端接收到的信号频谱效率降低。因此，现有的研究通过采用多种方案来减少自干扰，例如功率分配^[64,65]，窃听补偿^[66,67]和联合抵消器的干扰消除^[68]。

为了进一步利用空间分集增益并减少因全向传输导致的回环信号干扰，中继转发节点同样可以部署大规模天线阵列实现接收和发送的波束控制^[69]。其中文献[70]指出通过增加发射机尺寸，能够允许利用波束成形技术对全双工自干扰实现部分消除并提升系统总和速率。此外，文献[71]在中继节点处应用基于零空间的波束成形技术，以根据信道对齐和空间投影方法共同缓解信号干扰。针对高速移动毫米波场景，为了更好地结合大规模天线技术以通过聚焦定向波束实现更高效的传输过程，在中继波束的优化设计过程中需要联合考虑节点中发送与接收的影响^[72]。然而，受制于难以完整获取高速移动毫米波环境下的接收与发送端信道状态信息（Channel State Information, CSI），并且实际硬件结构往往具有较高的复杂约束，联合波束优化与分配仍然具有一定的难度。

2. 中继预编码技术及其特点

用户聚焦信号簇实现定向传输信号的波束成形技术能够很好地契合高速移动毫米波与中继技术，用来提升通信系统的空间分集与天线增益。波束成形是通过利用大规模天线阵列所产生的阵列增益实现高度定向的波