

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 ·

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 B5G/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]。

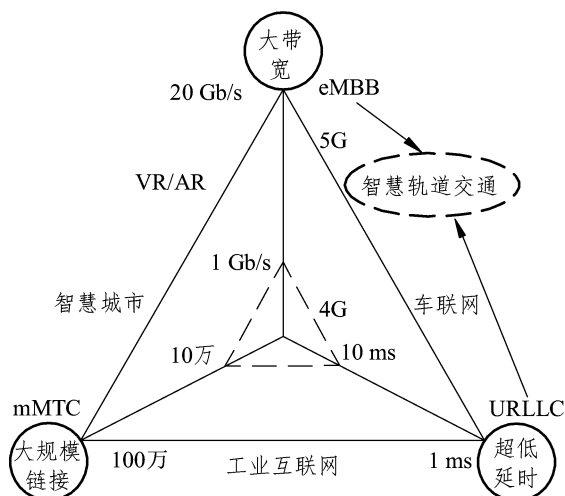


图 1.1 5G 三大典型场景及智慧轨道交通需求

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。

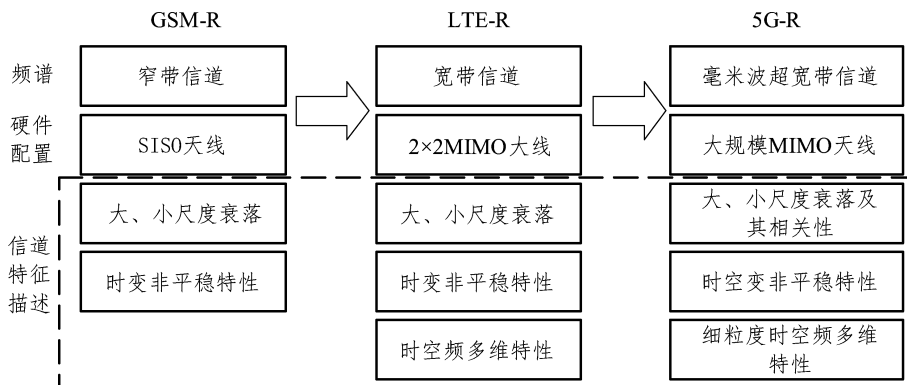


图 1.2 高铁无线通信系统演进图

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。由于高速铁路列车相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。

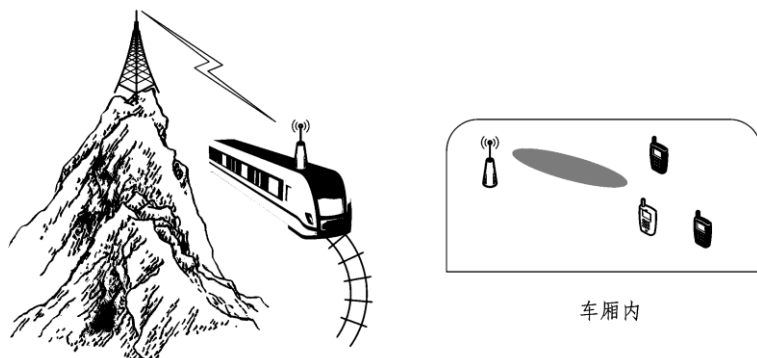


图 1.3 高速铁路场景下的协作通信系统

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将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工作者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]通过扩展时域汤普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者发送干扰信号，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时间隙完成，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

束，其核心是通过预编码技术在传输过程中实现信号束的定向聚焦^[73]。通过采用预编码技术对数据流的载波相位进行调控，使得接收端的信号能够相干地结合从而能够提供更高的性能增益。同样，对于高速移动毫米波中继通信系统，可以在各个节点中利用预编码技术补偿毫米波传输损耗，以此来提高复杂环境下的频谱增益。针对高速移动毫米波中继系统，预编码技术不仅能够应用在基站的发送端以增强传输能力，而且能够同时应用于中继节点的接收端与发送端以获得更强的波束增益^[74]。

如图 1.4 所示，对于车地通信，基站通过预编码技术将定向波束传输至中继节点。得益于列车运动方向与速度的可预测性，中继节点的发送与接收能够同时应用预编码技术实现对基站波束的接收对准与对列车的发送波束覆盖^[76]。对于车内通信，由于车内用户位置基本固定并且通信环境稳定，车载节点同样可以应用预编码技术实现更准确的信息传递。这样多层次地利用预编码技术不仅能够提升传输增益，而且能够减少用户波束间干扰，提升系统频谱效率。

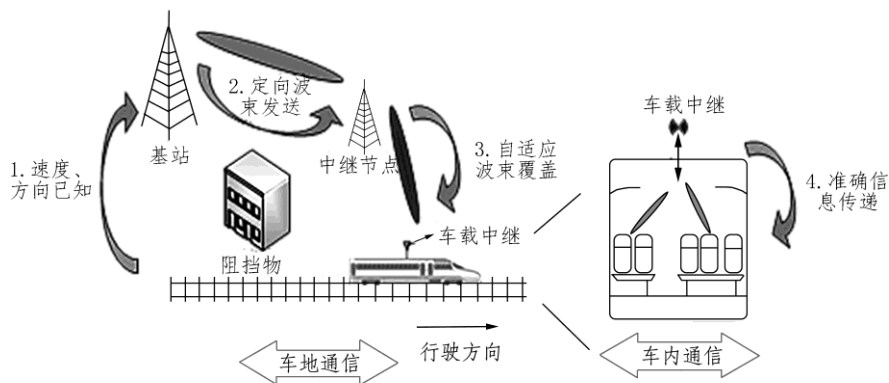


图 1.4 高速移动中继系统网络架构

随着接入用户的增加，发射机需要同时发送多个数据流进行通信。通过利用预编码技术对每个信号波束实现分类聚合，能够大大减少信号间的干扰^[77]。随着应用场景和方法的不断深入，预编码技术由简单的单纯模拟和数字预编码逐渐转变为模数混合预编码。早期的模拟预编码技术主要依靠利用低成本移相器实现相位调控，这种结构虽然具有更低的能耗，但由于在移相器的相位分辨率与恒定的幅度调制上具有一定的局限性，单独控

制移相器无法实现准确的波束对准，因此无法实现较高的通信性能^[78]。

数字预编码技术相比于模拟预编码具有更高的自由度，由于其能够通过每个天线链路实现独立的控制，因此有着模拟预编码无法达到的自由度^[79]。但是，数字预编码需要利用成本和能耗均较高的射频链路来实现，并且其部署具有较高的复杂度，随着天线规模的逐渐增大，利用全数字预编码的结构实现波束成形是不切实际的。为了实现性能增益与系统复杂度的均衡，联合全数字预编码与模拟预编码的混合预编码结构被提出^[80]。其通过利用高维的模拟预编码在相位层面进行调控，而利用低维的数字预编码提升其增益。这样的混合结构仅需少量的射频链路进行连接，既能够有效提升系统性能又能减少能耗。因此，在高频段毫米波通信网络中，混合预编码技术具有广阔的应用前景。

3. 高速移动下中继预编码技术关键问题及研究现状

高速移动场景下通过应用预编码技术能够克服毫米波传输带来的路径损耗，在结合配备大规模天线的中继协作技术提升传输增益后，可以有效提高蜂窝小区范围内的通信链路质量。由于预编码的设计高度依赖信道状态信息的获取，而 sub-6 GHz 以下的信道模型并不适合高速移动场景，因此为了在高速移动毫米波频段下获取更加契合的信道模型，文献[81]提出了基于几何随机的毫米波信道模型，并通过利用光线追踪模拟器测得符合空间一致移动性的精确几何信息。基于上述模型，文献[82]提出了多传输状态下的基于随机阻塞的自适应混合预编码抗阻塞方案，保证了通信链路的稳定连接。另外，文献[83]基于实际测得的原始数据在信号强度、功率延迟曲线、均方根扩展等方面验证信道的非平稳性，并通过推广自由空间路径损耗模型，验证了高速移动环境下固定的预编码方案仍然具有一定的优秀性能。

为了提高车地通信网络的通信传输速率，文献[84]根据列车运行方向与速度的可预测性，设计了一种最佳的非均匀毫米波波束切换方案来确定用于高速铁路网络的预定义波束的边界，以实现通过自适应预编码的波束成形。为了进一步弥补因波束到达角度预测的不确定性所造成的性能损失，文献[85]通过利用基于跟踪的贝叶斯方法实现具有较高可信度的角度预测，并利用混合波束成形提升性能增益。随着高速移动下通信场景复杂度的不

断提升，保证通信链路稳定的要求也越来越高^[86]。其中，文献[87]通过利用预编码技术实现波束范围内信干噪比（Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR）的平稳接收，以实现位置公平的传输方案。值得注意的是，为了更好地利用波束成形所带来的空间分集增益，需要联合考虑系统的性能^[89]。

针对应用于不同场景的混合预编码方法，现有代表性的混合预编码方案如表 1.3 所示。为了适应毫米波频段中大规模天线阵列的利用，混合预编码结构的设计同时需要考虑模拟与数字网络所具有的约束。其中，模拟预编码受最大幅值的限制，并且其可调相位同时受到精度限制。而数字预编码同时受到总发射功率的限制，这种复杂耦合多变量的限制条件表现出强的非凸特性，这为混合预编码的直接优化带来了较大的困难。针对求解最佳混合预编码时遇到的高耦合特点，在点对点通信结构中，利用空间稀疏特性的正交匹配追踪^[74]和基于梯度投影的松弛半定规划^[75]等方案被提出；同时，针对有传统中继节点参与的多跳通信结构中，利用广义奇异值分解^[90]和迭代逐次逼近^[91]等方案也被采用；此外，针对联合 IRS 的通信系统中，通过运用例如基于样本平均^[92]、机器学习^[93]和基于到达角度估计^[94]等迭代算法同样实现了主被动的联合预编码设计。

表 1.3 现有代表性的混合预编码方案总结

系统架构	场景	技术方案	信道状态	文献
点对点通信	单用户	正交匹配追踪	完美 CSI	[74]
	单用户	松弛半定规划	完美 CSI	[89]
	单用户	自适应重叠子阵	非完美 CSI	[75]
传统中继	单用户	迭代逐次逼近	完美 CSI	[91]
	单用户	信道本征模补偿	非完美 CSI	[95]
	多用户	加权最小均方误差	完美 CSI	[96]
	多用户	广义奇异值分解	完美 CSI	[90]
智能反射表面	单用户	交替方向乘法法	完美 CSI	[97]
	多用户	到达角度估计	非完美 CSI	[94]
	多用户	机器学习	完美 CSI	[93]
	多用户	随机规划及样本平均	完美 CSI	[92]

在上述关于不同场景下预编码技术方案的文献中，无论是点对点通信结构，还是基于传统或虚中继的转发通信结构，其预编码设计方案往往仅优化片面的性能指标。而针对移动毫米波场景下复杂的信道环境，如何利用预编码技术来解决中继节点的联合优化、系统能量效率（Energy Efficiency, EE）与频谱效率的均衡、高效的波束功率分配等方面问题也是亟待解决的。

1.2.3 高铁空间调制研究现状

在前面小节所述基于车载中继的高铁无线多跳协作技术中，大规模 MIMO 技术是作为系统取得空间分集增益的核心技术，但是在高铁移动场景下，大规模 MIMO 技术受多普勒频移和系统复杂度的限制十分严重。当前，基于 4G 的 LTE-R 技术主要以正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）技术为核心，已应用在部分高铁路段上。OFDM 技术和 MIMO 技术相结合在多普勒补偿和频谱效率方面能够有所提升，但是当频段越高时，其受系统计算复杂度的影响十分严重，所以会有较高的延时并且容易受到信道环境的限制^[98]。在同一时间，西南交通大学的研究者们对将空间调制技术和高铁通信场景结合起来也做了一系列深入的研究。理论研究分析表明，将空间调制作为一种多天线候选技术应用到高铁无线通信系统中，不仅是可行的，而且具有较高的频谱效率和良好的鲁棒性等优点。将空间调制（Spatial Modulation, SM）与大规模 MIMO 结合应用到高铁场景中，文献[99]仿真得出了高铁空时相关信道下 SM 系统的性能比传统 MIMO 的性能要更好的结果。同时，其提出更高的移动速度会增强时间相关性的影响，而削弱空间相关性的影响，为后续将空间调制应用到高铁场景中的研究打下了坚实的基础。但是，高铁通信的蜂窝小区局部近似线性分布，和普通蜂窝小区的二维分布有很大区别，采用普通小区的基站放置方式会带来很大的功率损耗。相比于集中式天线系统，基于光载无线通信技术（Radio-over-Fiber, RoF）的分布式天线系统更适用于铁路无线通信场景，尤其是将分布式技术和 SM 技术相结合的时候，更加能够发挥 SM 技术在高铁场景下的传输优势^[100]。

1. 空间调制研究现状

经过多年的研究，空间调制目前具有代表性的技术如表 1.4 所示。相比于 MIMO 技术，空间调制被认为是一种具有高频谱效率和高能量效率的并且具有很好前景的数字调制技术，其设计原则也很简单^[101]。2006 年，由 Mesleh 等人在文献[102]中定义了 SM 的概念，即信息比特由星座调制符号和隐藏的天线序号同时携带，能够有效增强频谱效率且具有规避载波间干扰（Inter-Carrier Interference, ICI）和不需要发射天线间同步等优势。而单纯利用天线索引这一资源作为信息载体的理念第一次是在文献[103]提出的，作者以两根发射天线为例，输入比特“0”和“1”分别对应激活第一根和第二根发射天线，并将此方案命名为空移键控（Space Shift Keying, SSK），这便是 SM 技术的特殊情形。空间调制技术本质上是一种利用空间域的映射技术，相同的方法可以用在单一维度（诸如频率域、时间域、编码域、角度域）以及多种维度的结合。

表 1.4 空间调制研究现状列表

类型	领域	代表性技术	主要贡献
单维 领域	空域	天线 GSM[104]	更好的频谱效率
		QSM[105]	更高的能量效率
		DSM[106]	更低的部署成本
	频域	光通信 OSM[107]	灵活控制照明和通信并存
		预编码 PIM-OFDM[108]	更好的系统性能和低成本
		子载波 OFDM-IM[109]	高铁场景下更高的可靠性
多维 领域	空-时 OFDM-IQ-IM[110]	更高的能量效率	
	空-频 STBC-SM[111]	在分集和复用间取得平衡	
	空-时-频 GSFIM[112]	更好的系统性能	
	OTFS[114]	解决高铁多普勒频移和时延问题	

空间调制技术的融合性很高，几乎能与各个领域的技术进行结合。并且，未来随着通信网络规模的扩大，在实际实现上需要调制尽可能得简单，

这也是空间调制技术的优势所在。同时，为了有效地利用多域资源的自由度，SM 可以考虑结合其他领域的新技术以进一步提升系统性能，比如物理层安全和自适应传输。

2. 空间调制与物理层安全研究现状

高铁移动无线通信系统需要为列控系统提供端到端的数据传输，由于涉及诸多敏感性信息，因此对系统安全性的要求更为苛刻。而基于信息论的物理层安全技术为保证高铁移动无线数据传输的安全性提供了一种新的思路^[115]。采用先进的物理层安全技术，根据信道状态信息去调整发射的信号，比如人工噪声（Artificial Noise, AN）技术和预编码技术，可以放大合法信道和窃听信道的区别，这样既不会对合法节点产生影响，又可以干扰到窃听器^[116]。同时，使用空间调制技术，在假设窃听信道信息已知的前提下，文献[117]研究了有限字符下 SM 的安全互信息并提出了一种人工噪声方案增强其安全性能，通过优化功率分配的方式使得系统的保密速率最大化。而在非完美信道状态信息的情况下，文献[118]分析了 AN 辅助 SM 系统的系统保密性能，并给出了对应的安全容量（Secrecy Capacity, SC）的闭式表达式。另外，全双工接收机也被引入到安全 SM 系统中，接收机接收保密信息的同时能够释放出干扰信号，将会给窃听器造成时变干扰^[119]。除此之外，协作分布式的人工噪声技术也吸引了部分学者的关注。同时安全 SM 系统常常通过其他方式进一步优化，比如通过天线选择算法优化天线选取或者调整传播过程等，将在下文中进行阐述。

3. 自适应空间调制研究现状

由于 SM 的映射索引方式一般为二进制，这就意味着发射天线数只需要为 2 的整数次幂，如果任意配备自由的发射天线个数，将导致大量资源的浪费，所以需要在发射端根据反馈得到的 CSI 自适应地进行天线方案选取。基于最大化最小欧氏距离的算法（Euclidean Distance Antenna Selection, EDAS）虽然可以得到最优误码率（Bit Error Rate, BER），但是该算法需要遍历所有天线序号与调制符号的组合，对于天线数很多、调制阶数很高的 SM 系统，复杂度极高^[120]。为了降低天线选择算法的复杂度，基于奇异值

分解、基于星座图分解和基于最大化信道容量的容量最优天线选择算法 (Capacity Optimized Antenna Selection, COAS) 分别被提出。其中, 文献[121]通过只搜索最大的最小平方奇异值来避免全搜索, 从而降低基于欧式距离最优算法的复杂性。文献[122]通过对可分解正交振幅调制符号集合的信道进行 QR 分解, 可以减少计算汉明距离的次数, 从而降低算法的复杂度。而 COAS 算法根据信道容量公式, 遍历所有的天线信道组合, 性能接近于最优算法, 复杂度则有所降低, 常被用于得到空间调制系统的最优信道容量。文献[123]将天线选择算法与人工噪声技术结合, 以进一步优化系统安全性能, 其理论和仿真结果表明, 联合天线选择算法和人工噪声技术能够有效地增强 SM 系统的系统安全容量。文献[124]针对有限字符情况下的安全 SM 系统提出了两种新的天线选择方案, 分别是基于最大化保密速率 (Maximum Secrecy Rate, Max-SR) 和基于信漏噪比 (Signal-Leakage-to-Noise-Rate, SLNR) 的天线选择算法, 其中基于 SLNR 的天线选择方案以极低的复杂度实现了出色的保密速率性能。

如图 1.5 所示, 以电子科技大学为代表的学者们进一步将天线选择算法归入空间调制自适应链路的研究, 并深入了机器学习领域^[125]。在机器学习中, 可以通过监督学习分类器或神经网络代替复杂的理论分析, 利用深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN) 离线数据集实时训练分类器, 便可以得到最优解, 例如可以应用于求得空间调制的最优天线选取^[126]。

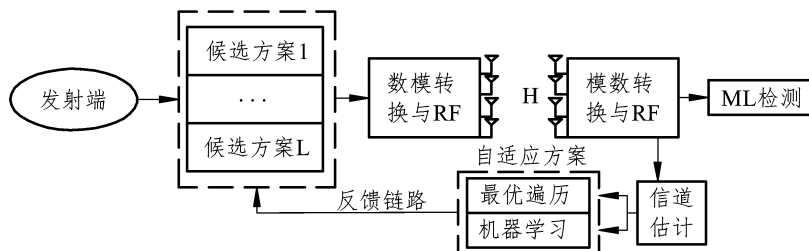


图 1.5 自适应空间调制系统框图

在文献[127]和文献[128]中, 提出了基于机器学习的空间复用系统天线选择算法, 以信道矩阵元的模量作为特征向量分别构建支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、K 近邻 (K-Nearest Neighbor, KNN) 和朴素贝叶

斯辅助分类器。上述机器学习辅助通信系统设计的贡献主要集中在传统 MIMO 系统上,而对于 SM-MIMO 系统,设计自适应链路的时候需要考虑 SM 同一时刻只激活一根天线的特性。于是,文献[129]将 K 均值聚类 (K -Means Clustering, KMC) 与 SSK 系统相结合,提出了一种不依靠 CSI 的盲检测分类器。为了降低 KMC-SSK 分类器的复杂度,文献[130]中提出了一种改进的 KMC,该分类器基于一种新的规则选择初始中心点。综上所述,这些依靠数据进行驱动的学习方法已经证明能够超越传统的分类器。据目前的研究显示,机器学习技术在 SM-MIMO 系统中,尤其是在天线选择、功率分配和链路自适应方案设计上的潜在好处尚未被研究。同时,如果将这些基于机器学习的方法用在高铁无线通信系统中,可以改进收发机设计和优化安全传输方案,从而构造动态实时安全可靠的高铁无线通信系统。

综上所述,高铁通信场景下基于 SM 技术的学术理论研究工作仍然处于起步阶段,在系统性能的闭式表达分析、多普勒频移问题方面成果不多,尤其是在高铁安全传输领域,无论是抗被动窃听方案还是抗主动干扰方案都少有深入的研究。所以,本书将从解决高铁无线通信受强空时相关性和高系统复杂度影响的角度出发,研究高铁场景下低复杂度的空间调制和分布式空间调制技术的应用。

1.2.4 智能表面技术研究现状

智能反射表面是一个可以在显著降低未来无线网络能耗的同时,实现前所未有的大规模 MIMO 增益的最新硬件技术^[131]。IRS 是由大量可重构无源元件组成的平面阵列,其中每个元件都能够独立于入射信号而引起一定的相移,从而共同改变信号的传播环境^[132]。实际上,无源反射表面在雷达和卫星通信中有各种应用,但很少在地面无线网络中使用。原因是传统反射表面仅具有固定的移相器,无法适应地面移动通信中随时间变化的环境^[133]。电磁超材料技术的发展使得反射表面的可重构性成为可能。电磁超材料的起源可追溯到 20 世纪 60 年代。1965 年,俄罗斯科学家 Veselago 首次提出了一种介电常数和磁导率同时为负的称为左手媒质的特殊材料,该材料可以在理论上产生负折射现象^[134]。之后, Pendry 于 1996 年构造出了等效的负介电常数^[135],并于 1999 年设计出了等效的负磁导率^[136],由此奠

定了这一项技术的发展基础。利用电磁超材料的特性，IRS 可以实现对移相器的实时控制，从而重新构造反射表面^[137,138]。

现阶段对于 IRS 的研究主要集中在发射端波束赋形矩阵和反射相移矩阵的设计上。文献[139]中研究了 IRS 辅助的多用户通信系统中的资源分配问题，提出了对偶波束成形算法对基站发射功率和 IRS 相移矩阵进行联合优化，结果表明该算法在总速率和能量效率上要优于常用的 MRT 和 ZF 传输方案。文献[140]在存在单用户以及单窃听者的场景中，利用交替优化算法和半定松弛算法寻求次优解，提高合法用户的通信速率。不同于文献[140]，[141]中考虑了多用户以及多窃听者的场景，并提出了一种基于交替优化和路径跟踪的算法，通过迭代得到保密速率的局部最优解。此外，在一些特殊场景下，作者还提出了基于 ZF 的启发式次优算法以降低算法复杂度。

另外，IRS 在一些场景中可以起到替代传统中继的作用。文献[142]中通过调整 IRS 相位获得最优接收信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR），推导出了单输入单输出系统的中断概率、可实现速率、误码率以及分集增益的闭式表达式。与解码转发中继相比，IRS 需要通过部署大量表面元素才能弥补由于只有源节点发射功率而导致的低通道增益^[143]。文献[144]中结合了 IRS 和非正交多址技术，相比于传统的空间频分多址技术可以更有效地确保小区边缘用户的通信质量。文献[145]从能量效率的角度出发，提出了梯度下降和分式规划两种算法最大化能量效率，相比于多天线放大转发中继可以提供高达 300% 的能量效率。类似于传统中继，多个 IRS 之间协作通信同样受到了研究者的广泛关注。文献[146]中将单 IRS 两跳信道推广到了多 IRS 多跳信道场景中，以抑制阻塞路径的影响，实现覆盖范围更广的通信环境。此外，在多个 IRS 协作通信时，通过选择性能最优的 IRS 实现低复杂度、低成本传输。文献[147]则是提出了一种基于位置信息的多个 IRS 协作辅助通信系统，为了避开复杂度较高的全局优化非凸问题，作者通过在基站和 IRS 处进行局部优化，使得每一个 IRS 都服务于与之相近的单用户。根据这一思想，作者推导出了 IRS 辅助的大规模 MIMO 系统可实现速率的表达式，并分析了用户位置的准确性对可实现速率的影响。

1.3 本书主要内容

本小节主要对本书所研究内容和章节的安排进行了简要阐述。

第 1 章：针对 5G/B5G 在我国高速铁路上的应用，介绍了高铁列控系统无线通信相关技术的发展，包括波束成形技术、车载中继技术、智能表面技术以及作为一种增强型 MIMO 技术的空间调制技术，并阐述了相关研究的背景及意义。同时，分析了高铁场景下传统 MIMO 技术存在的问题，并比较了空间调制技术在高铁场景下的优势以及智能表面技术的研究现状并以此为本书奠定研究基础。

第 2 章：主要对高铁场景下的多跳协作相关技术和空间调制技术的基本原理展开叙述。然后，从传统 MIMO 协作多天线技术出发，详细描述了本书所采用的车载中继技术、预编码技术、空间调制技术和智能表面技术与现存传统技术的优劣势所在。最后，针对高铁无线通信系统的传输性能，给出了系统性能和相关算法的评价指标。

第 3 章：考虑高铁场景下集中式轨旁基站到车载中继的无线通信，为降低轨旁基站发射机的复杂度，提出了一种基于截断速率的空间调制天线选择算法，在建立信道模型的基础上，分析了经过优化算法之后系统的保密速率、误码率以及算法复杂度。

第 4 章：针对高铁场景下车地间无线信道的强空时相关性给集中式基站系统性能带来的损失，提出一种协作分布式空间调制安全传输方案，并分析了该方案对于集中式基站的性能优势。然后提出了一种自适应联合天线选择与功率分配方案优化小区边缘处的保密性能。同时，分析了不同莱斯因子所带来的性能均衡问题。

第 5 章：考虑高速移动接收机获取完美信道状态时，研究基站-车载中继-用户的半双工中继系统。首先建立中继辅助的大规模 MIMO 下行传输系统模型，推导了莱斯衰落信道条件下可实现和速率的闭式表达式，提出了广义功率缩放定律和局部最优功率分配方案，并分析了可实现和速率与能量效率的权衡。然后以最大化频谱效率为目标，利用离散化正交匹配追踪实现量化的混合预编码器，为低精度移相器的使用提供指导。

第 6 章：在第 5 章的基础上，针对非完美高铁毫米波信道下的全双工

中继系统，首先提出了一种基于离散移相器的联合中继发送与接收的混合预编码设计方案，利用松弛化的交替方向乘子法实现能效均衡的中继混合预编码设计，并大大减少了优化过程复杂度。然后在解码转发协议和最优中继选择算法下，推导了非理想 CSI 情况下系统保密中断概率的闭式表达式，并分析了中继数目、信道估计误差、剩余自干扰等因素对系统安全性能的影响。

第 7 章：针对高铁双跳车载中继技术受限于中继放大转发所带来的高功耗、高成本和高时延问题，研究基于智能反射表面辅助的自适应空间调制高铁多跳协作传输方案。首先，研究了智能表面静态放置和动态放置两种形式，并由此建立利用车载中继的多跳协作系统和智能表面直达多用户两种场景下的系统模型。然后，通过研究联合优化智能表面相位调整和空间调制天线选择的算法，进一步分析该方案的保密速率和误码率。

第 8 章：为了确保当直视链路产生随机阻塞情况下的用户通信质量，研究了在随机阻塞毫米波信道下多级抗阻塞混合预编码方案，通过采用分布式交替优化方案并结合智能表面实现满足用户质量的多节点最优联合预编码，以获得覆盖范围内平稳的通信。