

华东交通大学教材（专著）基金资助项目
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）资助
江西省自然科学基金（20192ACB21003）项目资助

轨道交通车地间毫米波通信技术

丁青锋 邓玉前 连义翀 王丽姚 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·



Guidao Jiaotong Chedijian Haomibo Tongxin Jishu

轨道交通车地间毫米波通信技术

丁青锋 邓玉前 连义翀 王丽姚 著

责任编辑	梁志敏
封面设计	吴兵
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	13.25
字 数	210 千
版 次	2020年9月第1版
印 次	2020年9月第1次
书 号	ISBN 978-7-5643-7611-6
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

目 录

第 1 章	绪 论	001
1.1	研究背景及意义	001
1.2	相关技术研究现状	005
1.3	本书主要内容	014
第 2 章	高铁场下大规模 MIMO 系统及相关技术	017
2.1	毫米波大规模 MIMO 系统模型	017
2.2	传统预编码技术研究	020
2.3	信号传输技术与性能评估	025
2.4	LTE-R 网络规划及切换相关技术	031
2.5	本章小结	038
第 3 章	不同天线阵列下毫米波大规模 MIMO 混合预编码设计	040
3.1	毫米波混合预编码系统模型	040
3.2	不同排列方式大规模天线阵列设计	042
3.3	不同天线阵列混合预编码器设计	044
3.4	本章小结	053
第 4 章	车地间毫米波通信系统 离散混合预编码设计	054
4.1	系统模型	054
4.2	离散混合预编码设计	056
4.3	本章小结	065
第 5 章	车地间空间相关信道下大规模 MIMO 上行系统性能研究	066
5.1	系统模型	066
5.2	不同 ADC 接收机的系统性能分析	070
5.3	本章小结	089

第 6 章	低精度 ADCs/DACs 下大规模 MIMO 系统性能研究	090
6.1	低精度 ADCs/DACs 下全双工大规模 MIMO 系统模型	090
6.2	低精度 ADCs/DACs 架构下系统性能分析	095
6.3	低精度 ADCs/DACs 下毫米波 大规模 MIMO 混合预编码模型	112
6.4	系统频谱效率分析与混合预编码设计	114
6.5	本章小结	128
第 7 章	非理想硬件下大规模 MIMO 下行系统性能研究	130
7.1	系统模型	130
7.2	低精度 ADCs/DACs 架构下系统性能分析	133
7.3	本章小结	147
第 8 章	轨道交通车地通信基于位置信息的越区切换技术	148
8.1	基于位置信息的硬切换优化算法	148
8.2	基于位置信息的无缝切换优化算法研究	164
8.3	基于模糊逻辑的切换优化算法研究	177
8.4	本章小结	191
参考文献		192
主要符号说明		207

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

铁路作为人们出行的主要交通方式之一，具有便捷高效、速度快、运载量大等特点。而高速铁路凭借其安全、准点、快捷、受气候条件影响小和环境舒适的独有优势，使得高铁客运量在铁路客运总量中所占的比重逐年增长。在高铁为国家建设和人们出行发挥了巨大作用的背景下，高速行驶场景下的无线通信面临着巨大难题。铁路无线通信网络不仅要为高速场景下列车控制系统提供安全可靠的通信环境，同时还要满足乘客使用的视频、实时语音和在线游戏娱乐等要求高信息传输速率和低网络时延业务的需求。伴随智能手机的广泛使用，人们对网络的需求持续扩大。在高铁场景下，如何为快速移动的用户终端提供更高的传输速率、更稳定的通信服务，以及如何降低系统能耗，越来越受到人们的关注。

1.1.1 轨道交通无线通信演进过程

随着高铁的迅速发展，铁路通信技术逐渐以“数字化”“无线移动化”“宽带综合业务”为其发展目标。因此，将宽带无线网络（Broadband Wireless Network, BWN）应用于高速铁路会是发展的热点：一方面，高铁的列车控制系统需要 BWN 来保证列车运行信息（如视频监控信息等）的安全传输；另一方面，为高铁上的用户提供丰富的多媒体业务（如视频电话、在线游戏、视频会议等）也是一个热切的发展需求。随着智能手机和平板计算机等终端设备的普及，高铁旅客对列车车厢内无线宽带接入服务的需求也愈发迫切。

高铁移动通信的上述需求意味着高铁移动通信系统必须成为可以提供大容量、高可靠、高安全性语音、视频等数据传输的综合承载平台。如图 1.1 所示，现有的铁路通信系统 GSM-R（Global System for Mobile

Communications for Railway) 体系^[1]主要基于第二代全球移动通信系统 GSM (Global System for Mobile Communications), 仅能提供语音业务和低速业务, 不能满足未来铁路通信发展需求, 无论是对铁路的覆盖范围还是覆盖质量也均无法满足列车上用户的需求。而基于第四代通信系统——长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 系统具有高速率、低延时、分组传输等特点, 因此, 将是最有希望应用于未来铁路通信的系统之一。多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术, 作为 LTE 的关键技术之一, 其在发送端和接收端都使用多个天线, 并结合有效的无线传输技术和信号处理技术, 从而高效利用无线信道的多径条件而建立并行传输通道, 实现在发射功率和宽带都不增加的情况下数据传输速率和通信质量都加倍提高的目标。此外, 下一代铁路通信 LTE-R 网络以及基于 5G 的铁路通信网络, 在提升网络频谱效率、能量效率, 增加网络密集程度, 减少系统传输延迟, 增强用户体验等方面均做出了很大的改进, 并且都将对移动性的支持放到了很高的程度。LTE/LTE-R 网络可以支持 350 km/h 的移动性, 而未来的 5G 网络将对移动性的支持提升到高达 500 km/h^[2], 这对基于蜂窝网络构建的高铁移动通信系统而言是非常有利的。

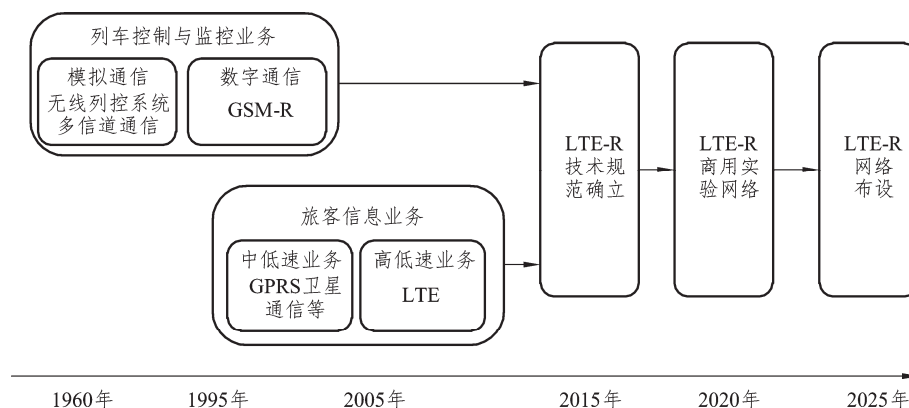


图 1.1 轨道交通无线通信系统演进

为了满足高移动性下铁路及旅客不断增长的无线需求, 并最终形成统一的语音、数据承载平台, 必须研究与之对应的高铁移动宽带接入技术。但在高移动性下, 无线信道经历快时变衰落, 接收端信号存在明显

的多普勒频移与扩展,强视距特性使多天线技术的优势很难发挥^[3]。而且随着列车的运行速度增长而不断降低的系统性能也制约着高铁移动通信系统提供稳定连续的数据速率,对网络可靠性保障提出了挑战。铁路高数据速率和旅客的无线宽带接入服务需求需要高铁移动通信系统实现成倍的数据速率提升,但现有的蜂窝网络所使用的微波频段已逐步耗尽,且逐渐达到频谱效率理论极限^[4],这需要从其他角度进行考虑,以提供更高的数据速率传输。

因此,有必要对高移动性环境下如何通过利用不断出现的新型多天线、毫米波、波束成形及越区切换等技术来实现铁路及旅客大容量、可靠性、安全性传输问题进行深入的研究和探讨。

1.1.2 轨道交通毫米波通信

在高速铁路无线通信系统中,除了无线接入速率有待提高,轨旁基站的能耗也不可忽视。高速铁路无线通信系统中,各基站小区呈链状分布在铁路沿线。以西环铁路为例,线路总长为 345 km,轨旁基站建有 307 个铁塔站,通信基站的电力容量为 919.8 kW^[5]。由于线路长,所需通信基站众多,其基站能耗巨大。在链路通信过程中,铁轨旁的基站全天候地向周围列车发送全向的波束,使行驶到该波束范围内的列车与基站建立通信连接。然而,当铁轨旁的基站在空间中发射无线信号向周围全方向辐射时,只有很小一部分信号被通过的列车收到成为有用信号^[6],而空间中的大部分信号并没有被相应的列车接收到。因此,系统的利用率低下,并且浪费了大量发射能量,造成基站不必要的电力浪费。

5G 移动通信无论是在频谱效率和能量效率方面都有较大提升。2019 年 6 月 6 日,工业和信息化部发放 5G 商用牌照,标志我国正式进入 5G 时代。同时,考虑到 5G 的铁路应用场景,高速铁路的无线通信也将会发生翻天覆地的变化^[7]。由表 1.1 可以看出,5G 的时延特性、移动性、能效等指标非常适合高速铁路的应用^[8]。由于毫米波拥有大量可用的频谱资源,故其已经成为 5G 关键技术之一。毫米波波长较短,能够在很小的设备上安装大规模天线阵列,而使用波束成形技术能够很好地弥补毫米波在传播过程中面临巨大的路径损耗的不足,使得毫米波在 5G 移动通信的应用成为可能^[9]。同时,由于铁路控制中心对列车位置已

知，可以使用波束成形技术对高速列车进行定向波束覆盖，来降低基站发射信号所需的功耗^[6]。

表 1.1 5G 关键性能指标（与 4G 对比）

指标名称	流量密度	连接密度	时延	移动性	能效	用户体验速率	频谱效率	峰值速率
4G	0.1(Mb/s)m ²	1×10 ⁵ /km ²	10	350 km/h	1 倍	10 Mb/s	1 倍	1 Gb/s
5G	10(Mb/s)m ²	1×10 ⁶ /km ²	1	500 km/h	100 倍	100 Mb/s	10 倍	20 Gb/s

因此，考虑到现有高速铁路通信接入速率的有限性和基站高能耗等问题，以 5G 技术发展为契机，对高速铁路通信系统中的频谱效率和能量效率进行研究，利用毫米波及波束成形技术提出高铁场景的解决方案，可以满足高铁无线通信不断增长的业务需求提供理论和技术支撑。

1.1.3 轨道交通列车通信越区切换

由于人们对网络要求日渐严格，未来无线网络不仅要具有低延时、高移动性、高传输速率的特点，同时还需要满足节能环保、稳定等多种要求^[10-12]，针对这些要求 3GPP（第三代合作伙伴计划）组织提出了 LTE 网络。LTE 系统网络架构呈扁平化，满足低通信延时的要求。而高铁通信场景具有沿线地形复杂、用户群体移动速度快等特点，公共通信网络显然不适用于这样的场景。为了适用高铁通信场景的特殊性，国际铁路联盟以公共通信网络为基础进行改进，提出了 LTE-R 系统。LTE-R 系统的基站分布在铁路沿线，各基站小区呈链状排布在铁路沿线。在无线网络中，基站的覆盖范围是有限的，这使得列车在行驶过程中，不断穿越不同基站信号覆盖区域，如图 1.2 所示。为了保障良好的通信质量，移动终端需要不停地断开与当前服务基站的通信连接，然后与下一个基站建立连接，这种提供通信服务的基站发生改变的过程称为越区切换^[13,14]，简称切换。

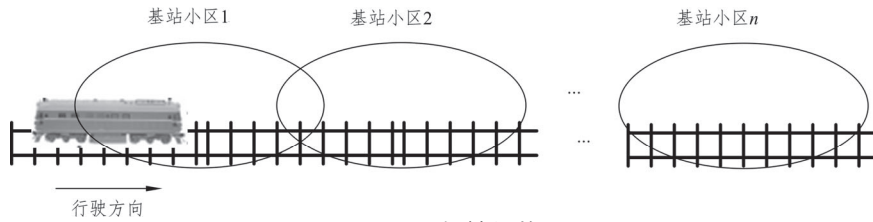


图 1.2 频繁切换

当列车速度不断加快时，列车穿越基站小区用时更短，切换的发生就更加频繁。通信链路从一个基站转移至另一个基站需要一定时间，而高铁场景下列车穿越小区的时间缩短，为了保持与基站的通信链路，就要求在更短的时间内完成切换操作^[15]。切换作为高速场景无线通信系统的重要环节，其目的是使移动终端设备与能提供良好的通信质量的基站建立连接^[16]，因此耗时短、成功率高的切换算法对提高用户通信质量有很大的帮助。

移动终端低速移动时，传统切换算法可以满足用户的通信需求，而高铁场景相对于低速运动场景面临更多的挑战，对切换算法也有了更高的要求。一方面，列车运行速度越快，多普勒效应对信号影响越大，同时由于信道快时变特性^[17]，移动终端可能在相邻基站之间进行多次切换操作，这不仅会导致出现切换失败概率高、频谱利用率低等问题^[18]，而且会导致通信中断增多。另一方面，随着智能手机的普及，用户对通信需求越来越高，传统切换算法存在切换成功率低、乒乓切换率高和通信中断率高等不足，无法满足用户高峰值率、宽频带和低延时的通信需求。此外，我国铁路沿线经历山区、丘陵、高原、平原、隧道和高架桥等复杂地形，导致高速铁路网络建设面临覆盖难度大的问题^[19-21]，也对高铁场景下切换算法提出了更高的要求。

因此，研究在高速移动、通信环境恶劣、地形复杂的通信环境中具有优越性能的切换算法，成为高速铁路无线通信网络需要解决的重要问题。

1.2 相关技术研究现状

1.2.1 轨道交通毫米波技术研究现状

为了提升高速铁路无线通信系统的接入速率和容量，除了利用大规

模 MIMO 技术的增益优势之外, 另一个简单、直接的方式就是在无线通信系统中拓展频谱资源, 使用更高频段的毫米波。随着 5G 移动通信的到来, 毫米波逐渐进入研究者的视野。

1. 毫米波技术及其特点

毫米波由于可以提供更为广阔的频谱资源与更大数量级的带宽, 且可实现无线通信的速率大幅度提升, 使得毫米波无线通信成为当今的研究热点^[22-24]。早期毫米波无线通信技术的应用主要集中于卫星和雷达军用系统上^[25]。在民用频谱资源越来越紧缺的情况下, 毫米波段拥有巨大的频谱资源, 所以使用毫米波频段成为大规模 MIMO 通信系统的首要选择之一^[26]。

毫米波是指频率范围为 30 ~ 300 GHz 的电磁波^[27]。毫米波的带宽可达 270 GHz, 超过从直流到微波全部带宽的 10 倍, 拥有极宽的带宽。用于发射毫米波的设备所需的天线尺寸很小, 易于在较小的空间内集成大规模天线阵^[28]。在相同天线尺寸下, 毫米波的波束要窄于微波的波束, 且与激光相比, 毫米波的传播受气候的影响要小得多, 可以认为具有全天候特性, 且由于其频段高、干扰较少, 所以传播稳定可靠^[29]。然而, 由于毫米波频率较高、波长较短, 以及传播环境的吸收和散射, 无线信号通过大气传播时会产生信号衰减损耗, 且易受天气、温度、湿度等环境因素的影响^[30]。同时, 由于波长较短, 使得毫米波在传输过程中的传播距离较短。

为了能够更好地将毫米波应用于室外的无线通信, 可以利用大规模 MIMO 技术和波束成形技术来改进毫米波通信系统的缺点。毫米波大规模 MIMO 系统在使用波束成形技术进行无线通信时, 拥有较大的带宽、较高的传输速率以及较大的频谱效率等优点。

2. 高铁场景下毫米波技术关键问题及研究现状

在现代无线通信系统中, 由于毫米波频段带宽较大, 拥有较高的频谱资源, 且大部分频段都未实际应用, 使得在高频频段的开发利用毫米波对当今无线通信性能的提升具有重要意义^[31]。然而, 从毫米波的实际应用场景考虑, 其主要的瓶颈在于如何克服信号损耗、阴影衰落、硬件设备功率消耗等问题^[32]。为了克服毫米波无线通信过程中的路径损耗问题, 一种较为有效的方法是将大规模 MIMO 技术与波束成形技术结合^[33],

利用大规模天线阵列产生高增益的定向波束来提高无线通信的性能，用波束成形所带来的巨大增益抵消其在传输过程中的损耗。在毫米波无线通信系统中，为了进一步地降低硬件成本和系统的复杂度，采用混合波束成形结构可以达到良好的性能^[32-34]。

为了提高铁路无线通信的系统容量和传输速率，使用毫米波进行高速铁路的无线通信已经成为研究的趋势，其与大规模 MIMO 技术和波束成形技术的结合也有一定的研究成果^[35-37]。在高铁场景下，列车车身可视为配置移动中继基站，毫米波无线通信的研究可以根据车身中继基站的通信对象分为两种链路结构：第一跳链路结构为轨旁基站与车载天线阵列的通信，第二跳链路结构为车载接入点天线与列车内用户之间的通信^[38]。

当今对毫米波通信的研究，根据两种链路结构可以分为两种类型。一种是在第一跳链路和第二跳链路分别使用微波频段、毫米波频段，利用多个频段进行系统的组网，对高速铁路无线通信进行组网^[39]。然而，该类型的通信方案在第一跳链路只使用了微波进行车载通信，使得整个高速无线通信的性能被大大降低，限制了整个通信系统的通信容量。第二种类型是将毫米波用于第一跳链路结构中，且利用波束成形技术来提高系统增益^[40,41]。在高铁环境下，通过研究毫米波信道的时间和空间特性，可以针对高铁环境的角域信道跟踪和混合波束成形，在到达角时间内跟踪空间波束增益，使得空间波束增益可以进一步得到提升^[40]。此外，利用毫米波频段可以进行混合空间调制波束成形，其方法为在数字领域利用空间调制技术激活天线阵列，在模拟领域选择最佳波束，该方案几乎可以实现传统 MIMO 难以实现的多天线增益^[41]。在高铁环境下，较为突出的毫米波传输的相关技术以及方案如表 1.2 所示。

表 1.2 毫米波传输相关技术与方案

克服毫米波缺陷的相关技术	高速铁路毫米波通信方案	链路特征	相关文献
大规模 MIMO 技术 波束成形技术	多频段组网	第一跳、第二跳	[39]
	角域信道跟踪/混合空间调制	第一跳	[40]、[41]
	多流波束成形与波束选择	第一跳	[42]
	基于到达角的混合波束成形	第一跳	[43]
	长期发射机与短期接收机波束成形	第一跳	[44]

本书主要基于第二种思路展开，即第一跳链路中使用毫米波频段进行数据传输。如何将毫米波与波束成形技术互补结合，仍是目前研究的热点。

1.2.2 高铁场景下波束成形技术研究现状

用于定向传输信号的波束成形技术可有效结合毫米波与大规模 MIMO 技术，用来提高高速铁路无线通信系统的频谱效率和能量效率。波束成形利用大规模天线阵列对多天线阵元接收到的各路信号进行加权合成，并对预编码进行设计，形成所需的理想信号^[45]。在通信链路中，波束成形具有较高的增益特性，其原因在于可以调整发射端天线阵列的载波相位来实现接收端的信号相干结合。同样，在高速铁路通信系统中，考虑到列车位置已知，可在第一跳链路中利用轨旁基站定向发射波束至列车端，以此来提高高铁环境下的频谱增益。

1. 波束成形技术及其特点

波束成形技术可以对大规模 MIMO 系统中天线阵列的方向图进行控制，可将能量集中在列车方向，如图 1.3 所示。在第一跳链路中利用波束成形技术能够较好地服务于高铁场景下的无线通信，提高系统的频谱效率和传输速率。

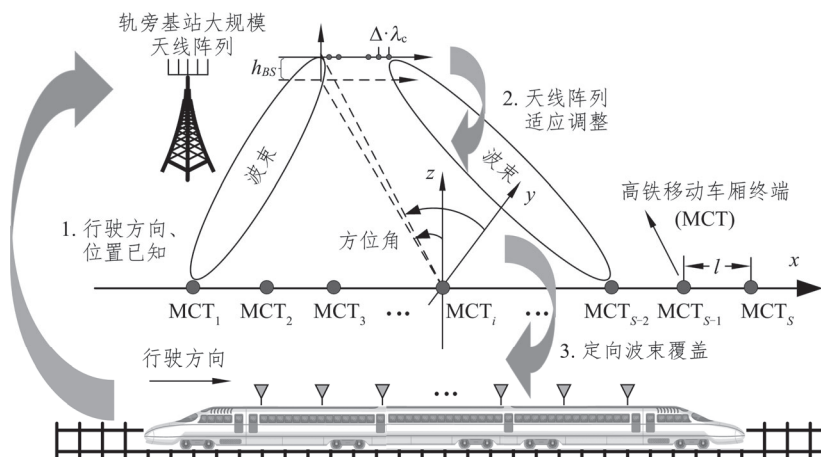


图 1.3 高速铁路定向波束成形

在高速列车波束成形技术中，高铁移动车厢终端配置有天线阵列。考虑轨旁基站对机车位置是可知且可预测的，利用波束成形技术，设计合理的预编码权重因子，不断调整天线阵列的天线阵元的相位角，可以根据列车位置在一个方向上生成高指向性波束，用于定向覆盖机车^[46]。而这些波束成形权重因子需要进行联合优化^[47,48]。一般来说列车会车次数并不高，车厢的个数有限，因而可以利用波束成形技术将毫米波能量集中于高速列车。该高指向性波束由于具有较高的能量辐射，可以有效地消除对同频小区的车载台造成的不必要干扰，并提升系统的能量效率。

2. 高铁场景波束成形技术关键问题及研究现状

高铁场景下的波束成形技术的应用，可以克服毫米波的路径损耗较大的缺点，在结合大规模 MIMO 技术获得阵列增益后，对系统传输信号的预编码进行设计，可以有效地提高系统的传输性能。从信号传输角度来讲，波束成形技术通常使用预编码技术来实现。传统的波束成形预编码方案有数字预编码和模拟预编码，两者结构如图 1.4 所示。

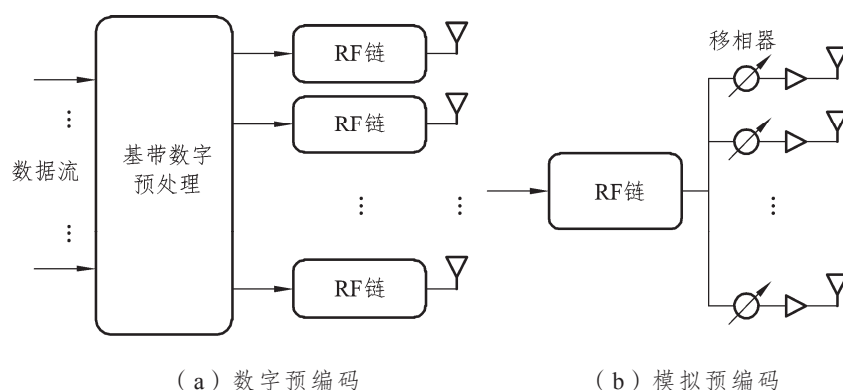


图 1.4 传统波束成形技术中两种预编码结构

已有较多文献关注于预编码技术在高铁场景中的研究^[46,49,50]。该技术主要包括数字预编码、模拟预编码、混合预编码三种。如图 1.4 (a) 在数字预编码中，每一个 RF 链都需要对应的天线与之链接，该结构不仅可以改变发射信号的幅度，同时也能根据需要改变发射信号的相角，具

有较好的灵活性。但当该结构应用于大规模天线阵列时，其硬件成本及系统复杂度大大增加，不利于实际的应用^[50]。模拟预编码只需要应用单个 RF 链，如图 1.4 (b) 所示，与之对应的是使用大量的移相器来对发射信号的相位进行调整，进而形成定向波束。该结构与数字预编码相比使用的 RF 链大大减少，具有良好的经济性，然而其只能改变信号的相位，灵活性较差^[46]。

与两者相比较为折中的方案为使用混合波束成形，即结合使用 RF 链和移相器，利用混合预编码技术在系统性能与灵活性之间实现了折中^[45]，其结构如图 1.5 所示，可分为全连接结构和部分连接结构。该结构在设计最优的混合预编码后，可达到近乎与数字波束成形相近的性能，同时又可以降低系统的硬件成本和复杂度^[51]。

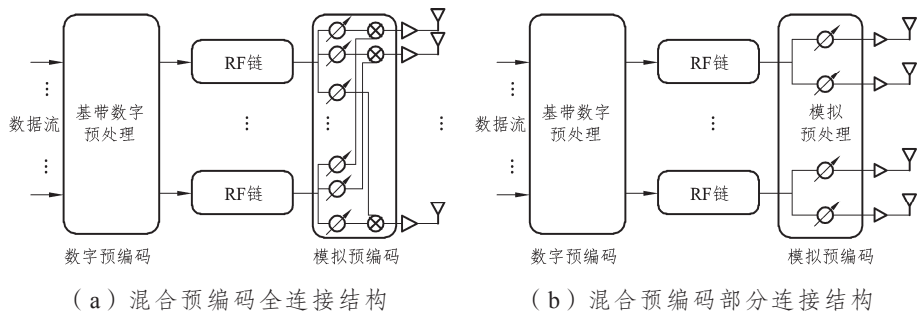


图 1.5 混合波束成形系统中两种混合预编码结构

对于应用于不同场景的混合预编码方案，目前具有代表性的混合预编码方案如表 1.3 所示。在混合预编码结构中，需要进行最优化的混合预编码矩阵的设计，以期达到最优的系统频谱效率。在毫米波大规模 MIMO 系统中的混合预编码矩阵设计时，需要联合优化数字预编码矩阵和模拟预编码矩阵^[60]。模拟预编码受幅值的限制，其相位角可调。而混合预编码矩阵受发射功率的限制，其联合优化问题的求解限制条件表现出非凸特性，这增加了混合预编码设计的难度与复杂度^[61,62]。针对求解最佳混合预编码时遇到的非凸约束条件和 CSI 的特点，在全连接混合预编码结构中，分别应用于单用户和多用户的空间稀疏波束匹配追踪^[52]和无监督聚类学习^[54]等技术方案被提出；同时，在部分连接混合预编码结构中，分别应用于单用户和多用户的连续干扰消除^[56]和等增益传输与

破零波束成形^[58]等技术方案也被提出。这些方案都在一定程度上提升了系统性能。

表 1.3 现有部分代表性混合波束成形方案总结

系统架构	场景	技术方案	信道估计	文献
全连接 混合预编码 结构	单用户	空间稀疏正交 匹配追踪	完美 CSI	[52]
	单用户	分层多分辨率 码本设计	自适应 CSI	[53]
	多用户	无监督聚类学习	完美 CSI	[54]
	多用户	阵列响应矢量选择	完美 CSI	[55]
部分连接 混合预编码 结构	单用户	连续干扰消除	完美/非完美 CSI	[56]
	单用户	干扰对齐和分式规划	完美 CSI	[57]
	多用户	等增益传输与 ZF 算法	完美 CSI	[58]
	多用户	双极化面阵天线	发射端 CSI	[59]

注：CSI 为信道状态信息。

在上述关于混合预编码技术方案的文献中，无论是利用分层多分辨率码本设计思路为目的的混合预编码技术，还是基于等增益传输与迫零（Zero Force, ZF）算法的多用户场景下的混合预编码方案，大多数都未进行系统能量效率的分析和优化，如何利用这种情况下的预编码技术来提升系统的传输性能并降低系统的能耗也是高铁场景下需要解决的问题。

1.2.3 非理想硬件损耗的研究现状

目前，对于铁路环境下的大规模 MIMO 系统的研究几乎都是建立在发射机和接收机为理想硬件的基础上进行的，这在实践中是不现实的。实际大规模 MIMO 系统性能容易受收发器硬件损耗的影响，如相位噪声、同相/正交相位不平衡、放大器非线性及量化误差等。尽管可以通过两侧

校准方法和补偿方案来减轻硬件损耗带来的影响，但由于估计误差、不正确的校准方法和不同类型的噪声，依然存在残余硬件损耗。因此，如何降低大规模 MIMO 硬件损耗成为一个亟待解决的问题。

非线性射频模块带来的硬件损耗在一定程度上抑制了大规模 MIMO 下行系统的频谱效率和能量效率性能^[63]。从信道估计角度出发，硬件损耗下的毫米波大规模 MIMO 系统可以利用贝叶斯算法将收发损伤的信道估计重新构造为稀疏恢复问题，进而提高信道估计算法的性能^[64]。从信号优化角度出发，可以利用不正确的高斯信号准确地为通信系统的总硬件损耗的影响建模，并将自适应方案用于某些特殊条件下最大高斯信号和一般高斯信号间的切换，从而以最少的计算/优化开销来提高系统性能^[65]。从安全通信角度出发，对于 Cell-Free 中大规模 MIMO 系统硬件损耗对物理层安全的影响，能够使用连续逼近和路径跟踪算法，进而获得最佳功率分配方案，从而使可达到的保密率最大化^[66]。对于硬件损耗下无线传输驱动的大规模 MIMO 系统，可以通过分数编程结合时间和功率分配从而达到最大化系统能效^[67]。同时，具有射频损伤的稀疏量化大规模 MIMO 系统信道估计和上行链路可达速率，存在 ADC（模拟数字转换器）精度和射频链损伤之间的可观补偿^[68]。

因此，对于硬件资源与通信性能的研究都需要以绿色通信和节能减排为最终目标，并致力于设计各种高效的新技术（如预编码、信道估计等）或者进行资源优化（如功率分配、天线选择等）^[69]，以此为铁路环境下的大规模 MIMO 系统的优化提供理论依据。

1.2.4 轨道交通列车通信越区切换算法研究现状

1. 国内外硬切换算法研究现状

铁路环境下的 LTE-R 通信系统为实现低延时以及降低网络信令开销，采用扁平化系统架构。扁平化的系统架构适合采用过程简单的硬切换算法。硬切换算法切换过程中，移动终端首先需要暂时断开与基站的连接后，才能建立与另一基站的通信^[70]。硬切换过程必然会造成通信暂时中断，而使用合适的切换触发条件，可减少无效切换次数，降低通信中断

次数，同时对提高硬切换成功率具有很大的作用。为提高切换性能，国内外学者对硬切换算法进行了大量的优化，可总结分类如下：

1) 基于速度的切换算法

传统切换算法的切换性能在低速场景下可以满足用户需求。而在移动终端快速移动的情况下，仍然使用与低速移动相同的切换参数，就会导致切换成功率降低和乒乓切换率增多的问题。针对这一问题，需要根据速度调整切换参数，并基于列车行驶方向和速度，设计与调整切换参数组合的切换算法，该算法与使用固定切换参数的传统算法相比，能有效防止乒乓发生切换和降低链路连接失败率^[71]。此外，将切换迟滞门限值与速度建立减函数关系，使用反函数、椭圆函数、一次减函数这三种具有代表性的减函数进行仿真，可以发现使用椭圆函数时，切换成功率得到有效提升，同时链路失效率能实现较低水平^[72]。这两种算法都对切换参数进行了调整，但是这种调整主要依赖速度，并未考虑终端接收信号和终端位置等其他影响因素。

2) 基于位置的切换算法

移动终端在位于源基站覆盖范围还未进入重叠带范围时，由于距离源基站较近，与源基站通信质量高于目标基站。若在移动终端还未进入重叠带，就触发切换至目标基站，容易再次触发切换，重新建立与源基站的通信链路。硬切换方式下，移动终端在相邻两基站发生多次切换，会多次产生中断影响通信服务质量。一种基于波束成形的切换算法是当移动终端达到重叠带时，源基站和目标基站调整波束成形增益值，以提高移动终端接收信号强度的方式，达到提高切换成功率的目的^[73]。为避免较小的切换参数导致乒乓切换次数增加，可以将相邻基站之间的距离划分区域，在移动终端未驶进重叠带时，使用较大的切换难度，以避免乒乓切换发生^[71]。

3) 基于预承载的切换算法

切换延时是衡量切换算法优越性的一个重要方面。硬切换过程中，移动终端需要暂时断开与基站的通信链路，延时长短与重新建立连接耗时有很大关联。若在切换之前，目标基站完成相关资源和参数配置，将有效缩短切换延时，提高通信服务质量。基于网络侧辅助切换的切

换算法被提出，由源基站提前将切换信息发送至目标基站，以加速切换进程^[74]。针对 LTE-R 系统切换延时高、切换成功率低的问题，利用列车速度提前触发的切换算法，通过设置切换预设承载点的方式，使目标基站提前完成切换有关准备，达到比传统切换算法更短的切换延时的目的^[75]。

2. 国内外无缝切换算法研究现状

硬切换信令流程简单，但是切换过程中移动终端与基站之间的通信连接需要“先断开，后连接”，因此硬切换算法存在通信中断的弊端。软切换过程中移动终端与基站的通信链路“先连接，后断开”，弥补硬切换存在中断的问题，在降低数据包丢失方面具有优越的表现。

鉴于软切换在降低中断方面的优越表现，国内外学者借鉴软切换的特点，提出适合 LTE-R 通信系统网络架构的无缝切换方案。无缝切换过程中，移动终端使用不同天线分别执行切换和通信任务。无缝切换与软切换相似，都需要占用较多网络资源，而 LTE-R 系统资源充足，为实现无缝切换提供了条件。当移动终端在穿越重叠带时，采用多点协同传输与双车载中继站协作的方式可提高接收信号增益，相关理论分析和仿真结果表明，这种增强接收信号的方式可有效保障通信稳定性并降低通信中断概率^[76]。为降低切换中断率，针对高速场景下相关硬切换和软切换进行仿真的结果表明，软切换算法以增加复杂度的代价，可以保持通信通畅稳定，同时能够有效减少切换次数^[70]。此外，可以利用卫星通信实现无缝切换的方案，相关结果研究表明该方案在吞吐量和服务质量方面都得到了巨大的提升^[77]。使用双天线并利用双播方式，能够减少数据包丢失率，降低转发延时，相关仿真结果表明，该方式在降低切换失败率，以及减少链路失效方面具有巨大的优越性^[78,79]。

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。

第一章，针对轨道交通无线通信技术的应用，介绍了高铁场景下的毫米波大规模 MIMO 混合波束成形和列车通信越区切换的研究背景及意义。同时分析了轨道交通毫米波技术、非理想硬件损耗和列车通信越区切换算法的研究现状。

第二章，主要对高铁场景下毫米波大规模 MIMO 通信及关键技术展开叙述，并详细介绍了五种传统预编码方案，同时仿真比较了五种传统预编码方案的不同特性。然后针对大规模 MIMO 上、下行链路信号传输特性，给出了基站端信号处理算法和系统性能评估指标。最后，对切换相关内容概念及切换流程和切换触发事件分类进行了详细介绍，此外着重介绍了基于 A3 事件切换触发。

第三章，主要针对轨旁基站的大规模天线阵列，研究了四种天线阵列对于点对点的毫米波大规模 MIMO 系统混合预编码的影响，分析不同天线阵列对混合预编码系统性能的影响，并仿真分析了不同排列方式的天线阵列的频谱效率及能量效率。

第四章，为降低轨旁基站大规模天线与移相器的硬件成本，提出一种基于离散移相器的混合预编码设计方案。以最优化频谱效率为目标，利用正交匹配追踪的思想将模拟预编码器进行量化，实现了低精度移相器应用的可能。

第五章，为降低空间相关信道和干扰机影响，研究了基于低/混合精度 ADC 的大规模 MIMO 上行系统性能。建立空间相关信道模型，基于得到的频谱效率近似结果，分析不同参数对系统性能的影响。构建系统功耗模型，进一步分析能量效率与频谱效率的折中方案。

第六章，为降低系统的硬件成本和能耗，研究了基于低精度 ADCs/DACs 的多用户全双工大规模 MIMO 系统和毫米波大规模 MIMO 混合预编码系统性能。基于得到的频谱效率近似结果，并分析不同参数对系统性能的影响。构建系统功耗模型，进一步分析能量效率和频谱效率之间的折中方案。

第七章，为降低系统硬件损耗和能耗，研究了理想 CSI 和非理想硬件下基于低精度 ADCs/DACs 的多用户大规模 MIMO 下行系统性能。基于此，推导出频谱效率的精确和近似表达式，并建立系统功耗模型，进

一步分析能量效率和频谱效率之间的折中方案。

第八章，研究轨道交通车地通信中的越区切换问题，提出基于位置信息动态调整切换迟滞门限值的优化算法、基于位置信息的无缝切换优化算法，以及基于模糊逻辑的切换优化算法，分别用于降低乒乓切换率、避免硬切换过程存在通信中断，以及提高通信质量。