

智能超表面技术在智能高铁通信场景的应用探讨

Applications of Reconfigurable Intelligent Surface in Smart High-Speed Railway Communications

赵亚军 /ZHAO Yajun^{1,2}, 章嘉懿 /ZHANG Jiayi³, 艾渤 /AI Bo³

1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518057;
 2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
 3. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 中国 北京 100044)
- (1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China;
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
3. State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)



摘要: 作为最具发展潜力的 5G-Adv 和 6G 关键技术之一, 智能超表面 (RIS) 技术具有低成本、低复杂度和易于部署等特点, 为智能高铁通信的发展提供了新契机。介绍了 RIS 辅助的智能高铁通信的典型应用, 包括抑制多普勒频移效应、解决频繁切换问题、克服高穿透损耗问题和支持高精度列车定位。深入讨论了 RIS 辅助的智能高铁通信中的关键技术, 包括信道测量与建模、信道估计与反馈、波束赋形、网络架构与部署。认为智能高铁新基建与 RIS 构建的电磁新基建的结合, 将会给智能高铁带来广阔的前景。

关键词: 智能高铁; 智能超表面; 多普勒频移; 穿透损耗; 列车定位; 信道估计; 波束赋形

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) is one of the most promising technologies for 5G-Adv and 6G. It has the characteristics of low cost, low complexity, and easy deployment, which provides a new opportunity to develop intelligent high-speed railway communications. The typical applications of RIS-assisted smart high-speed railway communications are introduced in detail, including suppressing the Doppler shift effect, solving frequent handoff problems, overcoming high penetration loss problems, and supporting high-precision train positioning. The key technologies of RIS-assisted smart high-speed railway communications are discussed in-depth, including channel measurement and modeling, channel estimation and feedback, beamforming, network architecture, and network deployment. It is believed that the combination of the new intelligent high-speed railway infrastructure and the new electromagnetic infrastructure built by RIS will bring broad industrial prospects to the intelligent high-speed railway in the future.

Keywords: smart high-speed railway; reconfigurable intelligent surface; Doppler frequency shift; penetration loss; train positioning; channel estimation; beamforming

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104008
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210726.1647.002.html>

网络出版日期: 2021-07-26
收稿日期: 2021-06-25

近 10 年来, 随着高铁的迅速发展、移动通信技术以及人工智能 (AI) 技术的进步与融合, 高铁已开始从信息化向智能化演进。5G 网络天然支持万物互联, 因此它的规模商用

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1807600)

将会加快高铁智能化的发展。5G 技术可以使智能高铁通信更加“高速”和“智能”。但智能高铁通信的工程实现仍极具挑战。

作为一个全新的技术, 智能超表面 (RIS) 技术一经出现就引起了业界的广泛关注。近两年, RIS 在学术

研究及产业推进上发展迅速, 被普遍认为是未来移动通信网络的关键候选技术之一^[1-2]。

RIS 通常由大量精心设计的电磁单元排列组成, 通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号, 动态控制这些电磁单元的电磁性质, 进而以可编

程的方式对空间电磁波进行智能调控,并形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场。作为超材料的二维实现,RIS天然具有低成本、低复杂度,以及易部署的突出特性,可以更好地应对智能高铁通信场景所带来的挑战。

RIS技术在经典场景下的无线通信应用研究非常多,但在高铁通信应用的系统探讨还很少^[1],也仅有少量文献涉及该场景中的单点技术问题。例如,文献[3]提供了采用RIS降低多普勒效应的思路。

1 智能高铁移动通信需求与挑战

智能高铁移动通信技术的主要研究内容包括宽带移动通信、车载无线通信、智能调度通信、车-地/车-车通信技术,用于支持智能高铁移动通信场景下的列控及运行相关业务、列车综合服务业务、铁路物联网业务以及旅客车载移动宽带接入业务等四大类典型业务^[5]。

相对于经典的通信场景,智能高铁无线通信由于其无线传播环境及业务特点,目前面临诸多严峻挑战,主要包括:(1)高铁的超高速移动所带来的严重的多普勒频移与频繁的小区切换问题;(2)高铁车厢的高穿透损耗使得车厢内的信号覆盖改善较为困难;(3)需要充分利用更多的频段(包括6 GHz以下频段、毫米波频段),以更好地满足未来智能高无线铁通信需求,因此要求无线网络具备支持多频段的能力;(4)智能高铁无线通信网络可以采用专网覆盖或公网覆盖,因此面临与铁路沿线的周边网络之间复杂的异系统共存问题;(5)其他一些问题,例如高速移动带来的信道估计与反馈、列车高精度定位与环境感知问题,以及智能高铁通信中的多业务类型的共存等。

为解决上述问题,传统高铁无线通信系统主要采用优化收发端算法、优化收发机的网络部署等方法。例如,采用分布式大规模天线技术、发射端多普勒估计与预补偿技术及切换流程优化技术等。这些传统方法系统复杂度高、网络部署及优化难度大,而且实现成本高。

另外,虽然业界有很多关于AI用于增强传统无线通信系统的研究,但这些研究主要探讨的是发射端与接收端的智能化,无线信道依然需要被动适应自然传播环境。智能高铁无线通信挑战的根源在于其复杂的无线信道环境,若能人为控制无线传播环境,就能从根本上消除高铁通信特有的复杂信道环境。在实现无线系统收、发端智能化基础上,进一步实现无线信道的智能可控,能构建真正涵盖发射端、无线信道和接收端的端到端智能无线系统。

综上所述,传统高铁无线通信解决方案只能被动地适应高铁的信道特性。RIS的出现让人们可以对无线传播环境进行调控,构建智能可控的无线传播环境,从而可以对收发端和无线传播信道进行联合优化,为进一步提升系统性能、降低复杂度与成本提供可能。

2 RIS使能智能高铁无线通信的典型应用

目前,智能高铁无线通信仍面临诸多挑战,但同时也存在着显著的规律性。例如,无线信道体现为沿铁路线呈规律性变化;列车上的用户终端(UE)组整体迁移,具备显著共性,包括UE组整体移动的群切换、业务连接及容量需求的整体迁移等。基于这些特征,可以针对性地对基于RIS的智能高铁无线通信算法与网络部署进行设计。

2.1 抑制多普勒效应

在高铁场景中,列车速度远高于一般终端的速度,因此它的多普勒频移与扩展更加严重。另一个严重的问题是,列车通过基站时会发生多普勒频移从 $+f_{max}$ 到 $-f_{max}$ 的正负跳变,该突发的多普勒频移正负跳变会导致接收端难以进行准确的频移补偿。严重的多普勒效应是高铁信道传播的典型特性之一。

RIS对无线信号传播幅度与相位的动态调控为解决高铁场景严重的多普勒频移问题提供了机会。实时可调的RIS可以有效降低由多普勒效应引起的接收信号强度的快速波动^[6-7]。高铁无线通信场景确定的运行方向和规则的运行轨迹会产生规则的、可预测的多普勒频移曲线,从而使得收发端易于跟踪,同时易于补偿多普勒效应^[2]。多普勒频移的影响主要在于,不同多径信号分量达到接收机的多普勒频移有所差异且动态变化。高铁沿线无线通信信道的主散射体较为规则且相对确定,因此可以在一些关键主散射体表面部署RIS,并基于测量及预测调控不同多径的多普勒频移对齐,从而减少多普勒频移的影响。

有两种特殊场景需要专门进行优化:高铁临近RIS,但车体处于RIS的单侧;列车经过RIS,车体前后车厢分别位于车厢的两侧。

(1)对于高铁临近RIS的场景,相对于该RIS,不同部位的车厢有不同的角度,因而有不同的多普勒频移。可以将RIS反射表面进行分块,不同子块的天线阵元对入射其上的信号分别独立地进行波束赋形,以对齐不同列车部位的车厢,并针对性地调控以补偿不同的多普勒频移量。

(2)对于列车经过RIS的场景,若RIS同时服务两侧车厢,会存在上述的多普勒频移正负跳变效应。为减

少该效应的影响,一种可选的方案是采用列车行进方向的 RIS 来服务列车前段的车厢,而列车正在经过的 RIS 仅服务单侧车厢,从而避免多普勒频率跳变问题。RIS 简单、易部署,且成本较低,可以在铁路沿线进行更为密集的部署,因此为上述方案提供了可能性。

2.2 解决频繁切换问题

高铁 350 km/h 以上的移动速度会引起频繁的小区切换,这可能造成网络的吞吐量下降、业务中断概率提升等问题,从而影响用户的高铁通信体验。

目前,有两个方案可以解决频繁切换问题:(1)采用射频拉远模块(RRU)或分布式天线,扩展小区的覆盖范围,从而降低切换频率;(2)优化小区切换流程,尽可能减少因频繁切换引起的性能变化。第 1 类方案为主要的解决方案,但它需要部署更多的 RRU 或分布式天线。而 RRU 或分布式天线的价格较高、体积重量较大、功耗较高,并且需要较多的宽带回传链路等,因此该方案在站址选择、回传链路部署、供电等方面均面临很大的挑战。

基于自身的技术特性,RIS 有 3 种方式替代或改进传统解决方案:

(1)使用低成本的反射型 RIS 完全替换传统的分布式天线节点,并延伸覆盖线路长度,从而降低小区的切换频次。反射模式的 RIS 进一步分为无源反射 RIS 和有源反射 RIS 两个子类。对于无源反射 RIS,可以通过 RIS 波束赋形增益增强信号,扩展覆盖范围。无源反射 RIS 具有成本低、功耗小、简单、易部署的优点。仅依靠波束赋形增益,并不能放大信号幅度,因此覆盖扩展范围有限。有源反射 RIS 可以放大反射信号,因此可以进一步扩

展覆盖范围。有源反射 RIS 对成本、复杂度、部署等方面有更高要求。相对于传统的分布式天线方案,两种反射模式的 RIS 在各方面的要求均有大幅度降低。

(2)将传统分布式天线与 RIS 结合。考虑到 RIS 覆盖扩展范围受限,那么可以在一定程度上降低分布式天线的部署密度,并且采用 RIS 来增强覆盖。

(3)采用透射型 RIS 来改进传统大规模多输入多输出(Massive MIMO)天线,即采用无源透射型 RIS 来替换传统有源相控阵天线,从而减少天线的体积、重量,并且降低功耗以及成本。另外,采用无源透射型 RIS 替换传统有源相控阵天线,有利于制作一些异形天线,从而更好地满足高铁沿线不同自然条件下的部署需求。例如,对于半圆柱曲面形态,波束覆盖角度可以更好地对准处于不同角度的列车。

另外,高铁通信的业务需求会随着高铁运动进行整体迁移。也就是说,只有高铁经过的小区才需要进行业务连接;在本次列车经过后至下一趟列车到达前,该小区不需要支持高铁通信。那么,铁路沿线的相邻基站(NB_k 与 NB_{k+1})可以接力共享两者之间的 RIS,从而尽可能地降低覆盖成本。传统的相邻两个基站在共享拉远 RRU 或分布式天线时,由于需要低时延地切换大带宽的业务数据及控制信令,因此实现复杂度较高;而共享 RIS 仅需要在基站间切换低带宽控制信令,其

时延要求可以适度降低,从而使 RIS 在动态性与共享切换的实时性之间取得平衡。

2.3 克服高穿透损耗

高铁穿透损耗包括两种情况:列车金属车厢穿透损耗和列车窗玻璃穿透损耗。本节中,我们首先对两类穿透损耗进行分析,然后讨论不同的解决方案。

2.3.1 穿透损耗分析

(1) 金属车厢

高铁的金属车厢会带来严重的穿透损耗,这使车厢内的信号覆盖面临严峻挑战。文献[8]给出了几种典型车型的穿透损耗参考值,其中 CRH3 车型的损耗值更高,为 24~26 dB(见表 1)。另外,对于同一车型,不同信号入射角也会对应不同的穿透损耗。当无线信号垂直入射车厢时,相应的穿透损耗最小;相反,无线信号的入射角越小,穿透损耗越大。因此,当基站离铁道越近,覆盖区域边缘信号进入车厢的入射角就会越小,穿透损耗会越大。因此,合理地控制入射角,能够更好地满足高速轨道覆盖目标。

(2) 玻璃窗

列车车窗玻璃的穿透损耗比金属车厢低,但由于防冲撞等特殊的需求,一般常采用特殊材料的双层玻璃。因此,列车车窗玻璃穿透损耗不可忽略,尤其是毫米波,穿透损耗明显。文献[9]给出了几种典型玻璃在 28 GHz 频段的穿透损耗值,例如透明玻璃(3.6~3.9 dB)、

▼表 1 高铁常用列车车型及信号的穿透损耗情况(频点:1.8 GHz)

车型	列车材质	损耗参考值/dB
普通列车	铁质	12~15
CRH1(龙巴迪列车)	不锈钢	20~24
CRH2(部分动车)	中空铝合金车体	14~16
CRH3(京津城际)	铝合金车体	24~26
CRH5(阿尔斯通)	中空铝合金车体	22~24

有色玻璃 (24.5~40 dB)。另外, 玻璃车窗的面积相对较小, 信号入射能量受限。与金属车厢类似, 车窗玻璃的穿透损耗同样受到信号入射角度的影响。文献 [10] 提供的测量结果显示, 穿透损耗随着信号入射角度的增大而增大。但是, 该文献中的测量结果也表明, 不同极化方向信号随入射角度的变化呈现较大差异。其中, 垂直极化信号的透射系数随着入射角度增大而线性降低; 而水平极化信号在不同入射角时, 透射系数基本保持稳定。这种现象给了我们新的启示: 既然不同极化方向的信号在不同入射角度下有着不同的穿透损耗变化, 那么我们可以利用这一现象来减少穿透损耗的影响。例如, 可以考虑采用对入射角不敏感的水平极化方向的信号来穿透车窗玻璃。

2.3.2 RIS 克服穿透损耗

实现高铁车厢无线移动网络内部覆盖主要有两种模式: 铁路沿线节点的信号直接穿透列车金属和车窗玻璃进入车厢, 但这样存在严重的穿透损耗; 在列车上部署移动节点, 例如车载中继或客户前置设备 (CPE), 这就需要在车厢顶部进行开孔部署以接收天线, 从而把信号引入车厢内部。针对上述两种模式, RIS 有不同的解决方案, 下面我们将分别探讨。

(1) 车窗玻璃布置透明形态 RIS

列车车窗尺寸受限, 铁路沿线通信节点的波束 (尤其是毫米波频段) 容易被金属车厢阻挡。另外, 信号经过车窗玻璃时也会有较大的穿透损耗。在不改变高铁车厢布局的前提下, 在每个车窗布置透明形态的 RIS, 能够实现对车厢外信号的有效增强及覆盖。若 RIS 动态可调, 则可以对其进行实时调控以跟踪覆盖车厢内不同角度的用户, 从而解决波束阻挡问题, 并获

得波束赋形增益; 对于简化的固定权值 RIS, 可以为其设计宽波束调控权值, 以解决波束阻挡问题, 但并不能获得波束赋形增益。当然, 也可以考虑在车厢内部同时部署 RIS, 辅助车窗透明 RIS 调控波束覆盖。这样, 可以克服上述固定权值透明 RIS 的弊端。需要注意的是, 透明形态的 RIS 设计须同时兼顾信号增强和可见光透明度的问题。

(2) 铁路沿线部署 RIS

在不增加基站密度的前提下, 在铁路沿线合理部署 RIS, 可以在一定程度上缓解列车穿透损耗问题。首先, 利用 RIS 简单、易部署的特点, 可以在铁路沿线更多地部署 RIS 以增强基站信号, 降低大尺度路损。其次, 可以利用超大规模 RIS 天线阵元提升波束赋形增益, 以更好地对齐车窗入射。另外, 有些窗玻璃穿透损耗对入射信号的极化方式比较敏感。基于此特性, RIS 可以调控入射信号的极化方向, 从而减少入射角对车窗玻璃穿透损耗的影响。如 2.3.1 节所述, 垂直极化信号透射系数随着入射角度增大而线性降低; 而水平极化信号在不同入射角时, 透射系数基本保持稳定。那么, 我们完全可以考虑利用铁路沿线部署的 RIS 调控信号极化方向, 把入射到车窗的信号调控为水平极化方向, 从而降低在大入射角下的车窗玻璃穿透损耗。

(3) 增强现有车顶天线

尽管采用车载中继或者 CPE 把信号引入 / 引出车厢是解决高铁通信的有效手段, 但是部署传统有源车顶天线仍然具有很大的挑战。作为亚波长无源二维超表面, RIS 便于设计成多样的形态, 用于增强现有的车顶天线, 并克服传统有源天线的弊端。例如, RIS 可以贴附于车顶表面, 安装便利, 且不会改变车厢表面的形态。另外,

RIS 这种贴附于车顶表面的形态, 有利于更大规模的部署, 以提供更高的天线增益。

(4) 车厢内壁部署 RIS

在车厢内壁进一步部署 RIS, 可更好地调控车内传播信道, 解决车座阻挡问题。例如, 在车厢内表面部署 RIS 或用其他合适的固定装饰来部署 RIS。这些 RIS 能够对透射进入车厢的有限强度的信号进行精细调控, 以对目标 UE, 从而充分利用进入车厢内部的信号能量。一般来说, 车厢内的终端移动速度较慢, 或者是几乎相对静止 (如物联网终端)。RIS-UE 之间为慢变信道, 更易于进行信道估计以及波束跟踪。

2.4 支持列车高精度定位

列车定位技术可以随时随地获得列车地理位置、实时速度等信息, 是实现行车调度与控制的智能化基础。5G 技术的最新进展, 尤其是亚米定位精度的特定要求, 使得基于无线网络的定位成为未来列车定位系统的一个重要技术选择^[11]。RIS 具有超大规模天线阵元、超大天线孔径的特点, 可以提供更高的空间分辨率, 因此天然具备高精度定位的能力。在采用高频毫米波频段的高铁通信场景中, RIS 可用于一定精度的 3D 图像识别。基于 RIS 实现车辆精准定位、车速精准测量, 甚至是 3D 成像, 可以对车况进行监测控制, 以确保安全, 并更好地支持智能驾驶与调度。

若想利用 RIS 超大规模天线阵元和超大天线孔径来获得高精度定位, 需要在铁路沿线部署一定密度且具备测量感知能力的 RIS, 即这些 RIS 面板上需要配备有足够密度且具有测量能力的有源天线阵子, 从而可以精确估计目标物体与 RIS 之间的信道状态信息。相对于仅具有无源天线阵子的

RIS, 配备有源天线阵子的 RIS 的复杂度与成本都会更高, 部署时需要综合权衡复杂度及成本与列车定位精度需求之间的关系。

相比于基于传统高铁通信网络的收发机进行无线感知与定位, 引入 RIS 进行电磁环境感知与定位主要有三大优点: RIS 更易于在铁路沿线大规模部署, 可以实现铁路沿线无盲区的环境感知和定位; 组成 RIS 的大量有源单元可以收集丰富的信息, 从而获得高精度、细粒度的高铁沿线的电磁环境感知结果; 所获得的大量数据信息可应用于数据驱动的人工智能技术, 进而挖掘更全面、更准确的高铁沿线的电磁环境信息。

3 RIS 使能智能高铁无线通信的关键技术

RIS 使能无线通信涉及 RIS 硬件结构与调控、基带算法、网络架构与组网等诸多方面的技术。本文中, 我们仅对其中需要特别优化的几项关键技术进行探讨。

3.1 高铁场景 RIS 信道测量与建模

在常规场景下, RIS 的研究工作大多建立在简单的数学模型基础上, 目前仅有初步的测量及简单的建模^[12], 尚未有准确可用的信道模型; 对智能高铁通信这种特殊场景, 更缺乏必要的测量和建模。RIS 的引入将会给智能高铁通信的信道测量及建模带来巨大的挑战。这些挑战这主要包括如下几方面:

(1) RIS 可能会用于智能高铁通信的典型频段与业务场景, 因此需要考虑智能高铁通信典型的频段、典型场景中的无线信道测量、信道特性与信道模型等。

(2) RIS 的引入会使得基站 (BS) 与 UE 之间的信道关系发生变化, 并

增加 BS-RIS-UE 级联路径及 RIS-RIS 之间的传播路径。在高铁网络中, RIS 部署在铁路沿线、列车车窗玻璃上、列车车顶及列车车厢内部等, 这几种部署方式会导致 RIS 的传播信道有较大差异。例如, 当 RIS 部署在铁路沿线时, NB-RIS 之间的信道慢变, RIS-UE 之间的信道快变; 当 RIS 部署在列车上时, NB-RIS 之间的信道快变, RIS-UE 之间的信道慢变。

(3) 在铁路沿线部署 RIS 的一些特殊场景也对 RIS 信道的测量及建模带来挑战。例如, 当 RIS 部署在隧道里、沿线桥梁上, 以及沿线场站时, 均需要进行对应场景的信道传播特性测量和信道建模研究。

准确测量与建模 RIS 使能的智能高铁无线通信信道是一个全新的挑战, 需要继续加大研究投入, 从而为基于 RIS 的智能高铁通信系统的设计、网络优化、性能评估奠定基础。

3.2 信道估计与反馈

在常规场景下, RIS 使能的无线网络的信道估计主要面临两方面的挑战: RIS 信道由 NB-RIS 之间及 RIS-UE 之间信道联合构成, 需要考虑两段联合信道的估计; RIS 一般拥有超大规模的天线阵子数量。对于智能高铁通信这种特殊场景, 可以利用其信道特性来消除上述挑战带来的影响, 降低 RIS 信道估计的复杂度与反馈开销。

智能高铁通信信道有 4 个特点:

(1) 沿铁路线信道随列车前行呈规律性变化;

(2) 信道的角度域稀疏, 尤其是高频毫米波频段;

(3) 信道变化具有鲜明的地理/位置相关性;

(4) 列车上终端整体迁移, UE 组的信道具备共性特征。

另外, 在常规的部署场景中, 一

般 NB-RIS 之间为慢变信道, 而 RIS-UE 之间为快变信道^[13]。对于智能高铁通信场景, RIS 可以部署在车窗玻璃上, 此时 NB-RIS 之间为快变信道, RIS-UE 之间为慢变信道。

智能高铁通信信道随高铁沿固定轨道运行, 传播特性呈规律性变化。因此, 在智能高铁通信场景下, 网络可能不需要完整、精确的信道状态信息 (CSI) 反馈, 采用有限空间量化精度的码本反馈即可满足反馈精度的需求。基于先验的列车运行轨迹、运行速度, 可以精确地实现前向预测估计, 从而获取信道并进行反馈。由于无线信道复杂多变, AI 用于无线通信的泛化性能受限。对于高铁通信这种具有规律性变化的场景, 可以率先利用 AI 来优化通信性能。例如, 对于信道量化的码本设计, 可以采用离散傅里叶变换 (DFT) 等传统方法进行量化, 也可以采用 AI 训练获得合适的码本集合。对于码本反馈, 可以利用变化规律性及运行速度, 反馈合适的码本集合及其变化规律。进一步地, 利用列车行驶的地理位置与信道状态的关系, 设计针对特定铁路沿线地理位置的码本集合, 从而可以采用有限的、码本个数精确的量化信道空间。为提升基于码本反馈的准确性, 可辅反馈一定的信道校准信息, 对码本进行调整、校准。例如, 基于地理位置的码本集合更新实现过程为: 基于基站 k 的地理位置, 预配置对应的码本集合 A_k ; 当列车经过该基站时, 基站把该码本集合 A_k 配置给列车上的 UE; 基于测量, UE 从 A_k 选择合适的码本并反馈给基站 K 。

另外, 网络可以利用速度估计、位置以及位置变化估计等信息, 来预测下一时间点的信道状态, 无须对信道进行实时估计反馈; 当列车上的 UE 集合进行整体迁移时, UE 组的信道在

信号离开角 (AoD) / 到达角 (AoA)、速度、多普勒频移等方面具备共性, 这些 UE 组共性信道参数仅需要反馈一次。

上述两个典型特性均可进一步减少反馈开销, 并解决反馈时延问题。

3.3 波束赋形

通过调控 RIS 每个单元的相位, 可以调整波束, 使其朝着特定方向发射信号, 从而降低所需信号的发送功率, 提高频谱效率, 扩大覆盖范围, 削弱干扰。在传统的多天线蜂窝网络中, 波束赋形设计主要是对多天线的收发机的预编码与解码矩阵进行设计, 实现信号定向传输。在 RIS 辅助的通信系统中, 智能高铁通信的高速时变信道环境使得系统的波束赋形设计变得更加复杂。幸运的是, 我们可以利用智能高铁通信的规律性位置与移动对波束进行设计, 以降低波束赋形的复杂度^[14]。

对于铁路沿线 RIS, 其波束赋形设计包括远场场景和近场场景两种典型情况。远场场景是指列车远离 RIS/NB 的情况, 该场景具有路损高、穿透损耗高、角度变化相对较慢、多普勒频移整体偏移一个方向等突出特点。因此, 需要采用波束赋形来增强信号, 以减少路径损耗。采用窄波束方式, 利用列车特有的角度变化规律及移动速度, 可以使波束更好地对齐列车不同部位的车厢。近场场景是指列车靠近 RIS/NB 或列车经过 RIS/NB 的情况, 该场景具有路损低、穿透损耗相对低 (信号入射车窗及车厢的角度较小)、角度变化快、多普勒频移跳变等特点。不过, 近场场景对波束赋形增益需求较低, 因此可以考虑宽波束或者广播模式, 以解决角度快变跟踪问题。如 2.1 节所述, 近场场景有一种特殊情况, 即列车经过 RIS 时会存在多普勒频移

跳变问题, 此时波束赋形方向需要进行精巧设计。一个可能的设计是: 采用相邻的多个 RIS, 且每个 RIS 的波束仅对齐覆盖 RIS 单侧的车厢, 从而规避多普勒频移跳变问题。针对智能高铁通信中列车的多用户或多小区共享一个 RIS 的需求, 可以把 RIS 反射表面的天线阵元进行分块, 不同子块的天线阵元对不同 UE 或不同小区的入射信号进行不同权值的波束赋形^[15]。

为降低波束赋形的复杂度, 可以利用高铁通信信道的规律性, 对信道空间进行码本量化。根据地理位置和运动规律, 设计波束赋形的预编码矩阵集合、预编码矩阵切换规律及切换速度。进一步地, 为避免信道特性波动带来的空间量化偏差, 可以半静态估计信道差异, 修正 / 更新先验的预编码集合、切换规律及切换速度等参数集合。

另外, 恰当的智能高铁通信波束赋形设计也可以提升小区容量。假设 RIS 的部署密度足够高, 列车则可以同时被多个相邻的 RIS 波束覆盖。此时, 可以采用窄波束, 以尽可能减少每个 RIS 波束覆盖列车车厢的数量。因为不同 RIS 波束分别覆盖列车不同部位的车厢, 这样就等于通过窄波束实现更小的扇区划分, 提高了空间隔离度, 从而提升频率重用系数, 达到

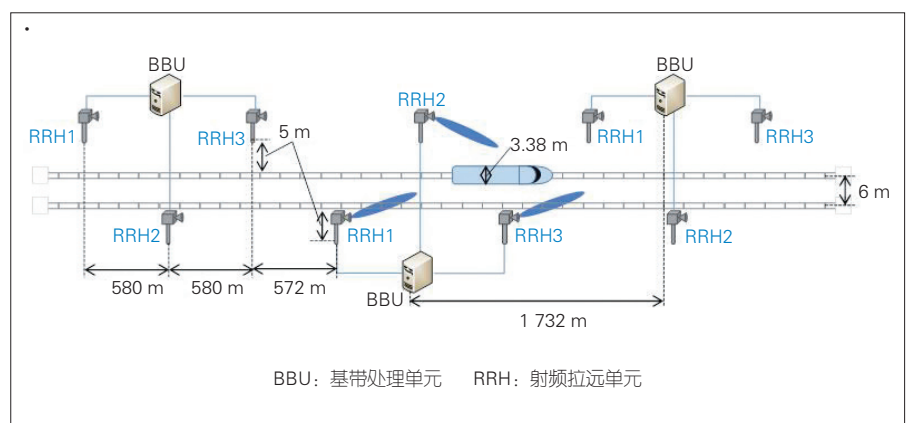
大幅提升小区容量的目的。

3.4 网络架构与部署

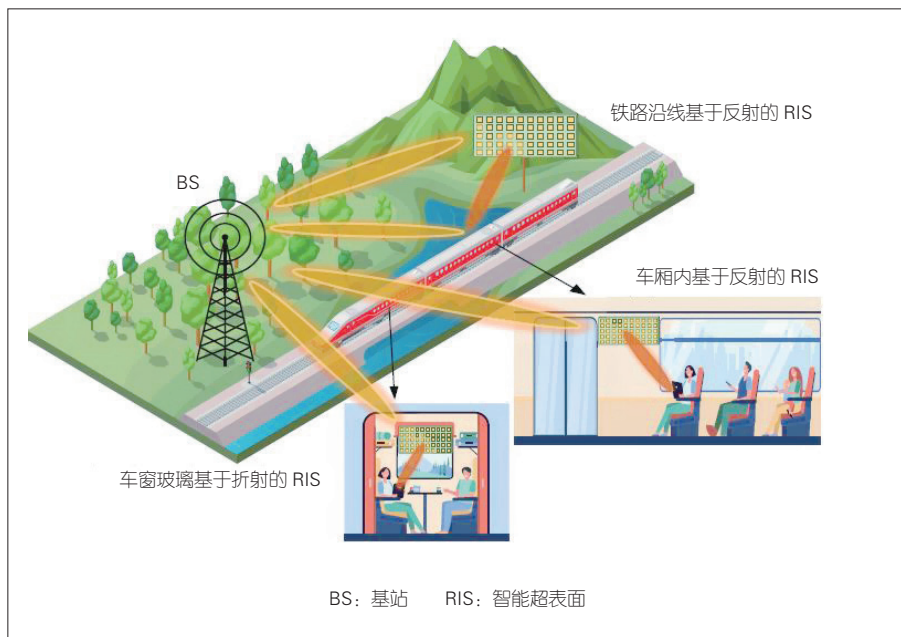
本节中, 我们将基于智能高铁通信需求的特点及 RIS 技术特性, 全面地讨论 RIS 网络架构设计和网络部署。

文献 [16] 指出, 智能高铁的通信需求可分成四大类场景: 铁路正线连续广域覆盖、铁路站场和枢纽等热点区域、铁路沿线地面基础设施监测、智能列车宽带应用。智能高铁通信需求具有鲜明的特征, 主要表现为容量和覆盖需求在地理空间上分布极不均衡, 具有鲜明的规律性, 即业务需求仅局限于铁路沿线; 随着列车高速运行整体迁徙, 体现为群切换、容量和覆盖需求整体迁徙; 沿铁路线性规律分布。

文献 [17] 给出了传统的基于 RRU 的铁路通信网络拓扑结构, 具体如图 1 所示。对于基于 RIS 的高铁通信的典型部署方式, 基于高铁的环境与信道特点, 并结合 RIS 的技术特性, 文献 [3] 提出了 3 种部署模式, 具体如图 2。本文中, 我们做了补充, 总结了 4 类典型的网络部署模式: 铁路沿线部署 RIS; 车厢顶部部署 RIS, 用于高铁移动中继或 CPE 的增强天线; 车窗玻璃部署透明增强 RIS; 车厢内壁部署 RIS。其中, 第 2 类是新增类型。



▲图 1 基于射频拉远单元的铁铁路通信网络拓扑结构^[17]



▲图2 RIS辅助的高铁通信场景

高铁通信业务需求具有随着高铁运动整体迁移的特点，即只有高铁经过的小区需要业务连接。在本次高铁经过后至下一趟列车到达前，该小区不需要支持高铁通信。一个很自然的想法是：如前文 2.2 节所述，铁路沿线的相邻基站可以接力共享两者之间的 RIS。采用共享 RIS 方案，仅需要基站之间切换低带宽控制信令，且 RIS 控制信令的时延要求可以适度降低，以在 RIS 控制的动态性与共享切换的实时性之间取得平衡。而传统高铁网络的相邻两个基站共享 RRU 或分布式天线时，需要低时延地切换大带宽的业务数据及控制信令，该过程的实现复杂度较高。

基站控制 RIS 的回传链路，不同部署方式有不同的设计约束，因此可选的实现方式也有差异。对于 RIS 部署在铁路沿线的模式，基站与 RIS 之间的回传链路可以采用有线或者无线通信方式。无线回传的连接方式部署灵活，但需要占用频谱资源传输 NB-RIS 之间的控制信令，因此会有一定

的频谱资源开销。不过，该回传链路控制信令的信息速率较低，频谱占用的开销并不高。对于 RIS 部署在列车车窗玻璃及车厢内部的两种模式，RIS 与基站之间的回传链路显然只能采用无线通信方式。部署在车顶用以增强移动中继或 CPE 天线的 RIS，其受控于移动中继或 CPE，因此其回传链路是与移动中继或 CPE 连接的，且一般采用有线方式连接。

上述的部署模式，均需要保证基站间、基站与 RIS 之间的空口同步关系，从而确保 RIS 幅度相位调控与信道/信号之间的同步关系。尤其是当多个 RIS 波束赋形同时服务一个 UE 时，类似于传统 CoMP 的联合传输，需要精准的时间同步及相位对齐。

隧道覆盖可以采用 RIS 以增强现有分布式天线系统 (DAS) 的传统天线形态。这种天线体积更小且方便部署在隧道壁侧，不会明显突起。考虑到 RIS 的低成本特性，隧道壁侧可以部署更多无源反射 RIS，并可以通过高密度 RIS 来实现隧道内信号覆盖的

调控增强。

4 未来研究趋势与挑战

RIS 使能未来智能高铁通信仍然面临诸多技术问题、部署问题和标准化问题。针对高铁通信特有应用场景中的 RIS 关键技术和方案，人们需要对以下几个方面展开深入研究和全面评估：

(1) 引入 RIS 后，智能高铁通信的信道测量与建模；

(2) RIS 使能的智能高铁通信网络的信道估计与波束赋形设计与优化；

(3) RIS 使能的智能高铁通信网络与铁路沿线的多网络共存；

(4) RIS 使能的智能高铁通信网络下多用户及多业务类型的共存优化；

(5) 适用于智能高铁通信网络不同场景需求的多种 RIS 形态设计；

(6) RIS 使能的智能高铁通信网络架构及部署研究及优化。

5 结束语

本文中，我们系统地探讨了 RIS 在智能高铁通信场景应用中的关键技术及面临的机遇与挑战。作为超材料的二维实现，RIS 具有低成本、低复杂度和易部署的特性。通过构建智能可控无线环境，RIS 将给未来 6G 带来一种全新的通信网络范式，满足未来移动通信需求。简化版本的 RIS 将可能 5G/5G-Adv 阶段，实现初步商业部署及标准化，尤其可以用于改善 5G 毫米波覆盖问题。

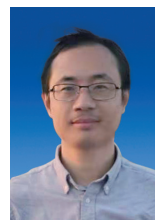
智能高铁作为一种重要的智能交通基础设施，是中国在技术及产业均全面领先的领域，属于“新基建”的范畴。RIS 则是由中国自主提出并引发全球跟进的技术，未来将成为中国在基础性原创技术及全产业链全面领先的潜在突破领域之一。智能高铁新基建与 RIS 构建的电磁新基建相结合，

未来将会获得更加广阔的技术和产业前景。

参考文献

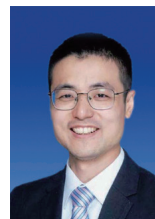
- [1] YUAN Y F, ZHAO Y J, ZONG B Q, et al. Potential key technologies for 6G mobile communications [J]. Science China-information sciences, 2020, 63(8): 183301. DOI: 10.1007/s11432-019-2789-y
- [2] RENZO M D, DEBBAH M, PHAN H D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come [EB/OL]. (2019-03-21)[2021-06-11]. <https://arxiv.org/abs/1903.08925v1>
- [3] LIU H, ZHANG J Y, WU Q Q, et al. RIS-aided next-generation high-speed train communications—challenges, solutions, and future directions [EB/OL]. (2021-03-17)[2021-06-11]. <https://arxiv.org/abs/2103.09484>
- [4] BASAR E. Reconfigurable intelligent surfaces for doppler effect and multipath fading mitigation [EB/OL]. (2021-05-13)[2021-06-10]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frmn.2021.672857/full>
- [5] 艾渤, 马国玉, 钟章队. 智能高铁中的 5G 技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 42-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007
- [6] LU C F, LIU J F, LIU Y H, et al. Intelligent construction technology of railway engineering in China [J]. Front engineering management, 2019, 6(4): 503-516. DOI: 10.1007/s42524-019-0073-9
- [7] BASAR E, RENZO M D, ROSNY D, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019(7): 116753-116773
- [8] 樊学宝, 何春霞. 高铁 LTE 网络覆盖研究 [J]. 移动通信, 2016, (1): 84-90
- [9] ZHAO H, MAYZUS R, SUN S, et al. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city [C]// 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest, Hungary: IEEE, 2013: 5163-5167
- [10] 刘蕾, 田磊, 陈旭彬, 等. 28GHz 下对毫米波透射特性的分析 [J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 513-519
- [11] TAKVUTIE J, LEVANEN T, KOIVISTO M, et al. Positioning of high-speed trains using 5G new radio synchronization signals [J]. 2018 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). Barcelona, Spain: IEEE, 2018
- [12] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(1): 421-439
- [13] HU C, DAI L L, HAN S F. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [EB/OL]. [2021-06-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9400843>
- [14] MATTHISESEN B, BJ E, CARVALHO D E, et al. Intelligent reflecting surface operation under predictable receiver mobility: a continuous time propagation model [J]. IEEE wireless communications letters, 2021,10(2): 216-220. DOI: 10.1109/LWC.2020.3024781
- [15] JIAN M, ZHAO Y. A modified off-grid SBL channel estimation and transmission strategy for RIS-assisted wireless communication systems [C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1848-1853. DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148537
- [16] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G Key technologies for smart railways [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893
- [17] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: 3GPP TR 38.913 [S]. 2018

作者简介



赵亚军, 中兴通讯股份有限公司无线研究院技术预研总工; 目前主要从事 5G 标准化技术和 6G 的研究; 主要研究方向包括智能超表面、频谱共享、太赫兹通信及灵活双工等; 已申请 4G/5G 相关发明专利 200 余项, 其中有 20 余项纳

入 4G/5G 标准。



章嘉懿, 北京交通大学教授; 研究方向为大规模 MIMO、智能无线通信; 获得 IEEE 通信学会亚太地区杰出青年奖和中国电子学会自然科学一等奖; 发表论文 100 余篇。



艾渤, 北京交通大学教授、博士生导师、电子信息工程学院副院长, 轨道交通控制与安全国家重点实验室常务副主任, 国家 6G 技术研发总体专家组专家, 中国移动集团轨道交通联盟 5G 产业推进委员会主任, IET Fellow, IEEE VTS 杰出讲师, 中共中央组织部“万人计划”领军人才, 科技部中青年创新领军人才; 获国家自然科学基金委杰出青年基金、优秀青年基金, 以及国家自然科学基金委-英国皇家学会牛顿高级学者基金资助; 发表论文 150 余篇, 获授权发明专利 32 项。