



高速铁路宽带无线通信系统越区切换技术

刘云毅¹, 赵军辉^{1,2}, 王传云²

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 我国现有的铁路移动通信系统已不能满足铁路信息化建设的要求, 需要开展下一代高速铁路通信系统关键技术研究。越区切换是高速铁路宽带无线通信系统的关键技术, 对保障列车的行车安全和通信可靠性具有重要意义。针对目前高速铁路通信系统中越区切换技术的研究现状和成果进行总结, 分析存在的问题, 并进一步探讨未来越区切换技术的发展方向。

关键词: 高速铁路; 越区切换; 无线通信

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017278

Handover technology in high-speed railway broadband wireless communication system

LIU Yunyi¹, ZHAO Junhui^{1,2}, WANG Chuanyun²

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

Abstract: The existing railway mobile communication system can't meet the requirements of railway information construction. Therefore, the key technology research of next generation of high-speed railway (HSR) communication system needs to be carried out. Handover is a key technology of HSR broadband wireless communication system, which has great significance to ensure the train safety and communication reliability. The research results of the handover in HSR communication system were summarized and the existing problems were investigated. Furthermore, the development directions of handover in the future were explored.

Key words: high-speed railway, handover, wireless communication

1 引言

近年来, 中国高速铁路(以下简称高铁)迅

猛发展, 高铁以其经济辐射效应极大地带动了沿线城市和地区的经济发展, 形成了我国独具特色的“高铁经济”。伴随着“一带一路”“高铁走

收稿日期: 2017-08-01; 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61661021, No.61471031); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(No.2017D14); 国家科技重大专项基金资助项目(No.2016ZX03001014-006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61661021, No.61471031), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No.2017D14), National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (No.2016ZX03001014-006)



出去”和“中国制造 2025”等国家战略的提出,高铁建设已经成为我国中长期发展的战略需要。截止到 2016 年底,我国高铁营业里程超过 2.2 万千米,稳居世界第一,占世界高铁总里程的 60%以上。2017 年 6 月 26 日,“复兴号”中国标准动车组在京沪高铁双向首发,标志着我国高铁正式进入自主知识产权时代,达到世界领先水平。根据我国《中长期铁路网规划》(2016—2030 年),预计到 2030 年,我国高速铁路网基本实现内外互联互通、区际多路畅通、省会高铁连通、地市快速通达、县域基本覆盖。图 1 为 2013—2016 年高速列车与普通列车全国日均客运发送量对比。高速列车的客运发送量及其所占比重逐年增大,在 2016 年占比达到 52.1%。随着郑徐高铁、宝兰高铁、西成高铁等新一批高铁线路开通运营,这一比重在 2017 年会继续扩大。

高速铁路的快速发展对移动通信系统也提出了极高的要求,高速铁路宽带无线通信系统需要保障高速列车在运行过程中调度信息的可靠传输以及为旅客提供更为优质的宽带通信业务。随着智能设备的普及以及互联网的高速发展,旅客在长途旅行中对各种无线服务有了更高的需求。由于列车高速运行引起的多普勒频移和信道快速时变、严重的车厢穿透损耗、大量设备同时切换引起的“信令风暴”以及用户终端处理能力有限等

问题,使得现有的高速铁路旅客无线接入系统远远不能满足旅客对服务质量 (quality of service, QoS) 的需求^[1]。此外,有限的系统容量也无法满足视频监控、多媒体应用等各种宽带服务的需求。因此,在设计高速铁路宽带无线通信系统时,如何提高 QoS 和系统容量是一个非常迫切的问题。

国际铁路联盟 (International Union of Railways, UIC) 确定将铁路宽带移动通信系统 (long term evolution for railway, LTE-R) 作为下一代铁路通信系统^[2]。LTE-R 可在 20 Mbit/s 带宽的条件下为高速列车提供 100 Mbit/s 的数据传输速率,其端到端呼叫建立时延小于 350 ms,话权抢占时延小于 200 ms,是当前铁路通信系统的研究热点^[3]。考虑智能轨道基础设施、智能移动管理、智能轨道交通服务等未来高速铁路发展需求,一些学者提出 5G-R (fifth generation for railway) 的概念,利用大规模 MIMO (multiple input multiple output)、毫米波 (mmWave)、波束成形、频谱融合等技术为未来的高铁通信系统提供超高传输容量、超高可靠性、超低时延等高质量服务^[4]。

2 越区切换

越区切换是高速铁路无线通信系统中的关键技术,在铁路通信中占有极其重要的地位。在列车高速通过小区重叠区时,性能良好的越区切换

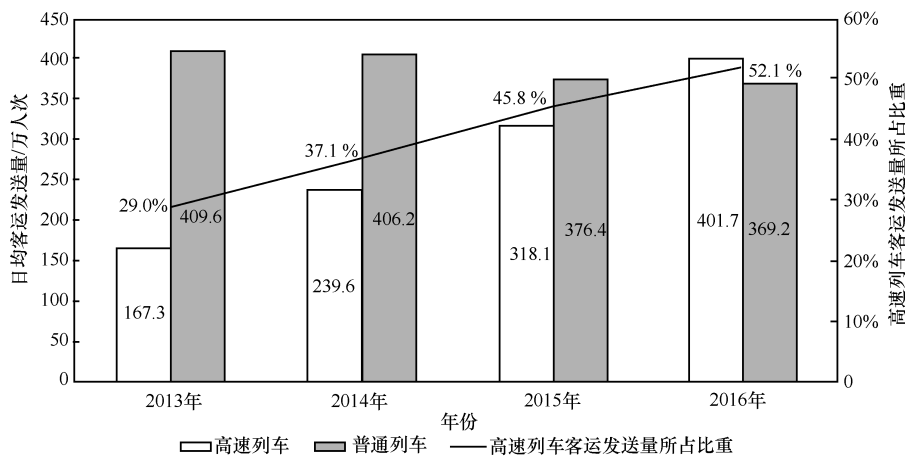


图 1 2013—2016 年全国铁路日均客发送量

方案能够保障列车控制信息和旅客通信业务的可靠性、实时性和连续性^[5]。越区切换是指当移动终端从一个服务基站的覆盖范围移动到相邻基站覆盖范围时,改变原有的通信链路,切换到其他基站上从而保持通信连续的过程。如果切换失败,将会导致通信中断现象,严重影响用户体验,对列车安全造成不利影响。高速列车特殊的运行环境以及较强的移动性,对切换方案的性能提出了更高的要求,然而现有切换方案在高铁场景中面临严峻挑战。

(1) 切换失败率高

由于多普勒频移、信道快速时变、复杂地形环境以及车厢穿透损耗(CRH3 列车的车厢穿透损耗高达 24 dB^[6])等不利因素的影响,使得列车中用户设备的接收信号质量较差,降低切换成功概率,甚至引发“乒乓切换”效应,严重影响高铁乘客的用户体验。

(2) 切换频繁

2017 年 9 月 21 日,“复兴号”动车组在京沪高铁正式开始以 350 km/h 的速度运营。随着列车速度的提高,切换将愈发频繁。假设小区半径为 3 km,重叠区长度为 1.2 km,那么平均每 48 s 列车就需要切换,在重叠区驻留的时间仅为 12 s,所以要优化切换方案及流程,设计符合高速铁路环境的快速切换方案。

(3) 群切换

当列车进入新小区时,列车中的移动终端将同时执行切换。“复兴号”动车组满载时约有 1 110 名乘客,假设 10% 的乘客移动终端处于活动状态,应同时处理 110 个用户设备的切换请求,在基站控制面中产生大量的信令交互,从而引起“信令风暴”,带来巨大的系统开销。

(4) QoS 保证

高速列车上各种移动业务的 QoS 由于频繁切换而降低。例如,视频电话的分组时延应小于 50 ms,而切换时间通常需要 100 ms。如果通信在切换期

间中断,则无法满足视频电话的 QoS 要求。

3 切换方案优化设计

3.1 基于参数优化的切换方案设计

越区切换一般分为 3 个阶段:切换测量、切换判决以及切换执行。切换测量由基站和移动台相互协作完成,基站向移动台发送测量控制信令,移动台周期性上报测量结果,基站根据接收到的测量报告,当满足特定的条件时,切换就会被触发。针对切换过程中涉及的各种参数进行优化,提升切换性能,是一大研究方向。

(1) 基于地理位置信息的切换方案优化设计

高铁通信基站一般沿铁路呈带状分布,而高速列车沿铁轨固定行驶的特点,为切换优化提供了便利,一些学者考虑借助地理位置信息来优化切换方案。在参考文献[7]中,当列车进入目标基站的覆盖区域时,根据列车的速度自适应地决定切换触发条件。如果列车高速移动,用户设备可以提前触发切换。在参考文献[8]中使用全球定位系统(global positioning system, GPS)设备提供的方向和速度信息加快对候选基站的选择,并自适应地缩短触发时延定时器。参考文献[9]提出了一种 LTE-Advanced 网络的快速切换方案,当列车接近预定义的切换位置时,网络可以直接发起切换。参考文献[10]将基站的覆盖区划分为若干区域,当列车快速通过一个区域时,网络可以提前为用户设备进行切换。参考文献[11]在此基础上做出改进,根据列车行驶线路生成相邻小区列表,根据列车速度和小区间距预先对切换地理位置进行设定,在列车跨越预先设定的切换点时,源基站根据列车测量报告发送预切换信息到目标基站,实现资源预留。参考文献[12]根据列车所处位置、行驶速度以及方向确定目标小区,并根据实验数据统计出切换参考点坐标,得出此位置的时间门限值,当列车到达参考点的时间低于门限时,对目标小区进行信道分配和激活,实现快速切换。



虽然基于地理位置信息的切换方案可以精确地控制切换时间,但是会导致额外的信令开销。首先,列车必须在其测量报告中上报位置、速度等信息。其次,一些方案要求运营商预先规划切换地点,增加网络规划的开销及成本。而如何让列车知道规划的切换位置是一个需要解决的问题,一般有两种方案:一种是让运营商在列车离开车站之前将切换位置等信息发送给列车;另一种是在列车运行过程中,基站通过测量控制信息向列车发送切换位置信息。这两种方案都会导致额外的信令开销。此外,基于地理位置信息的切换方案在 GPS 信号接收不良情况下会影响切换性能。例如,当列车离开隧道时,列车上的 GPS 设备可能需要时间来搜索卫星信号,在搜索时间内, GPS 设备不能正常工作,无法及时切换。

(2) 基于判决算法的切换方案优化设计

基于参考信号接收功率(reference signal received power, RSRP)是常用的判决算法,RSRP 是指移动终端接收来自基站的信号功率,能够反映接收信号的强度,得到了广泛的应用。接收到某基站的 RSRP 可以表示为:

$$Pr(m, x) [\text{dBm}] = P_t [\text{dBm}] - PL(m, d_m) [\text{dB}] - \varepsilon(0, \sigma_m) [\text{dB}], m = a, b \quad (1)$$

其中, P_t 为基站的信号发射功率, PL 为路径损耗, ε 为阴影衰落, a 、 b 分别表示源基站和目标基站。基于 RSRP 判决算法的切换触发概率为:

$$\begin{aligned} & P[Pr(b, x) - Pr(a, x) \geq \tau_p] \\ &= P[\varepsilon(0, \sigma_a) \geq \tau_p + PL(b, d_b) - PL(a, d_a) + \varepsilon_0 | \varepsilon(0, \sigma_b) = \varepsilon_0] \cdot \\ & P[\varepsilon(0, \sigma_b) = \varepsilon_0] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} Q\left(\frac{\tau_p + PL(b, d_b) - PL(a, d_a) + \varepsilon_0}{\sigma_a}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_0^2}{2\sigma_b^2}\right) d\varepsilon_0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, τ_p 为 RSRP 迟滞容限^[13]。但是, RSRP 需要确保移动终端使用最高的功率连接到小区,仅考虑 RSRP 而不考虑干扰、信噪比等,会导致

信道资源的不合理利用。

近年来,一些学者通过综合考虑多种因素,提出联合判决算法,保证良好的切换性能。基于 RSRP 和参考信号接收质量(reference signal received quality, RSRQ)的联合判决算法中,RSRQ 类似于链路信噪比,RSRQ 判决算法能够在信号接收强度不够高的情况下,选择信号接收质量最好的基站执行切换。但是 RSRQ 受系统负载和测量策略影响较为严重,不能提供服务质量下降时的顽健检测,仅考虑 RSRQ 并不能获得最好的切换性能。因此,RSRQ 通常只作为辅助判决标准。基于 RSRP 和 RSRQ 联合判决算法的切换触发概率为:

$$\begin{aligned} P(x)_{\text{handover}} &= P[Pr(b, x) - Pr(a, x) \geq \tau_p] + \\ & P[Pr(b, x) - Pr(a, x) < \tau_p] \cdot \\ & P[SIR(b, x) - SIR(a, x) \geq \tau_q] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, SIR 为接收到某基站的 RSRQ, τ_q 为 RSRQ 迟滞容限^[14]。通过设置统一的信噪比门限值,当低于该门限值时认为发生切换中断。图 2 为两种判决算法的切换成功概率对比,可以看出,基于 RSRP 和 RSRQ 的联合判决算法拥有更好的性能。

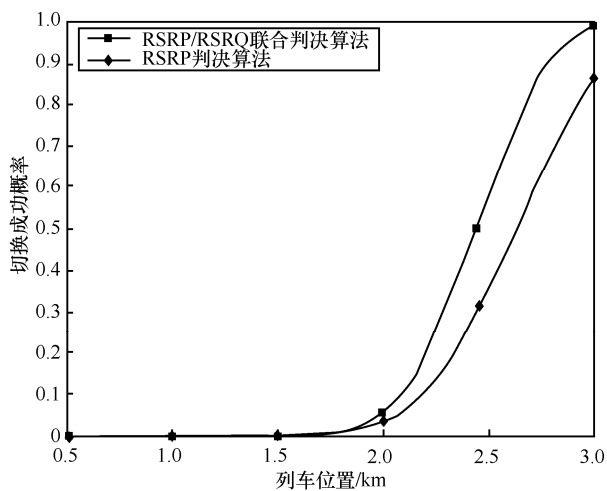


图2 切换成功概率性能对比

除此之外,也有学者综合考虑速度、距离、时间等其他因素,设计性能良好的联合判决方案,

弥补单一判决算法的缺陷^[15-17]。

(3) 基于双播机制的切换方案优化设计

高速铁路场景的切换面临的另一问题就是频繁切换、硬切换可能引发的通信中断。近几年, 基于双播 (bi-casting) 机制的切换优化方案也是越区切换领域的研究热点^[18,19]。在传统 LTE 切换中, 网络与移动台之间存在着数据传输。为了减少分组丢失率, 传统切换流程采用数据转发的机制。即在切换流程启动时, 服务基站通过 X2 接口将收到的数据副本转发给目标基站, 由目标基站将数据发送给移动台或服务网关。数据在基站之间的转发存在时延, 且服务基站和目标基站不能同时向移动台发送数据, 其通信中断时间包括切换处理时延和数据转发时延。

在双播机制中, 服务网关在切换开始后分别向源基站和目标基站发送数据副本。源基站处理收到的数据并发送给用户设备, 而目标基站则丢

弃收到的数据分组, 直到用户设备成功切换到目标基站。由于目标基站在切换开始后立即从服务网关接收数据, 所以通信中断时间约等于切换处理时延。因此, 双播机制的通信中断时间比数据转发机制短, 更适合一些实时通信服务。此外, 用于数据传输的基站和服务网关之间的 S1 接口具有比 X2 接口更高的吞吐量。基于双播机制的切换信令流程如图 3 所示, 源基站在接收到切换请求确认信息后, 便向移动管理实体进行双播请求, 随后建立服务网关到目标基站的双播数据通道, 在切换完成之后, 释放原有的服务网关到源基站的数据通道结束双播。如何减小双播带来的额外数据开销, 在双播机制的基础上进一步提高切换性能是研究人员需要考虑的重点。

3.2 基于网络优化的切换方案设计

随着实时视频监控、旅客移动互联网等各种业务需求出现, 未来高铁通信系统需要具备超高

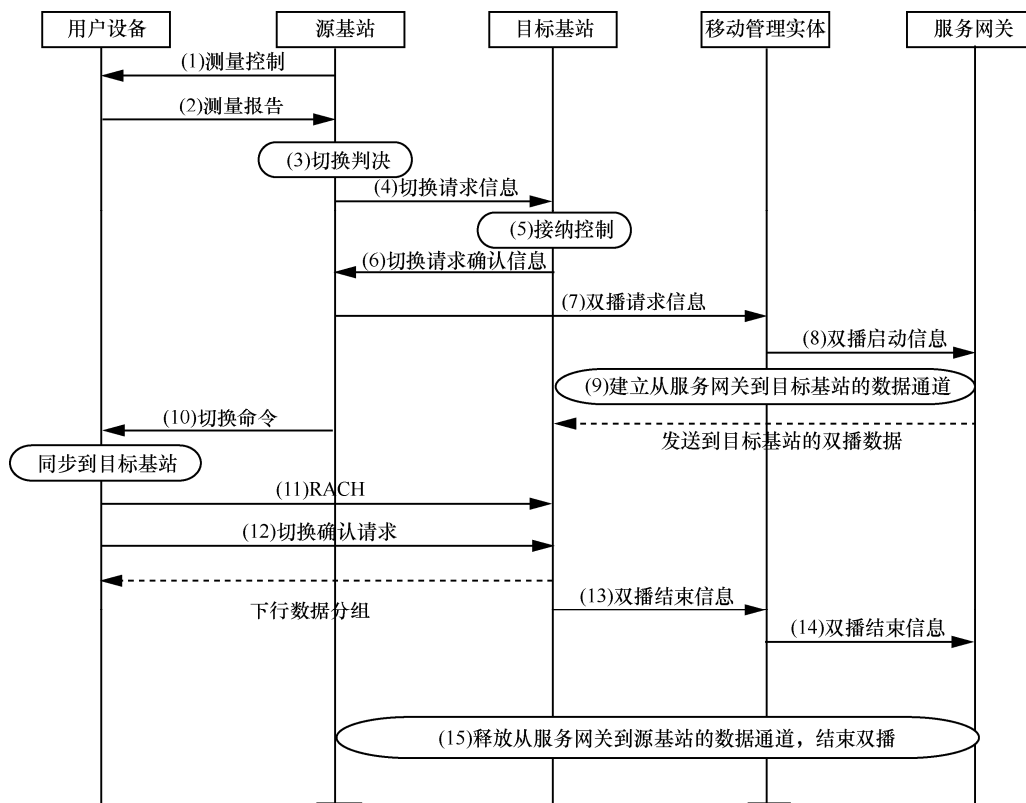


图 3 基于双播机制的切换方案信令流程



容量及超低时延等特点。目前, 5G 技术的测试与标准制定在如火如荼地展开, 未来的通信网络必定是一个多网融合、适应多种场景的超密集异构网络^[20]。同样, 对于高铁通信系统, 通过融合多种技术、优化网络架构提升切换性能, 提高用户体验将成为主流^[6]。

(1) 基于波束成形的切换方案优化设计

目前, 高速铁路场景中多天线和智能天线技术的研究和应用获得了一定进展^[21,22]。利用分布式天线是解决高铁通信系统中切换频繁问题的一种有效手段。在铁路沿线部署分布式天线单元, 不同的天线单元使用相同的工作频率等参数设置, 并通过光纤与基带单元连接。同一基带单元控制下的天线单元组成一个覆盖范围较大的逻辑小区。当高速列车在这个逻辑小区中运行时都不会发生切换, 从而减少切换次数, 降低通信中断的风险^[23]。

波束成形技术通过智能调整阵列天线各个阵元的幅度及相位, 形成定向波束, 将目标信号集中在基站与用户之间的方向, 实现能量的汇聚, 同时降低因能量扩散而对周围用户造成的干扰, 可以将其应用到高速铁路场景来集中信号能量, 提高传输可靠性^[24]。在参考文献[13]中, 波束成形技术还被用于解决高速铁路场景中因切换触发滞后而导致的切换失败问题。在高速列车驶入相邻基站的重叠区后, 基站天线由全向覆盖模式调整为波束成形模式, 改善接收信号功率。在不同的区域中, 动态调整基站的波束成形增益, 促进高速列车在短暂的切换窗口中能及时触发切换, 提高切换成功概率。图 4 为高速铁路场景中基于波束成形的切换方案和 LTE 切换方案的切换成功概率对比^[13]。其中, 横轴表示列车所在位置, 源基站和目标基站分别位于 0 km 和 4.8 km 处, 基站覆盖范围为 3 km。在 2.4 km 处由于应用波束成形技术, 波束成形切换方案的成功概率有明显的提高, 在 3 km 处的成功概率可达到 97.99%, 相比 LTE 切换方案, 其成功概率提高 7.8%。

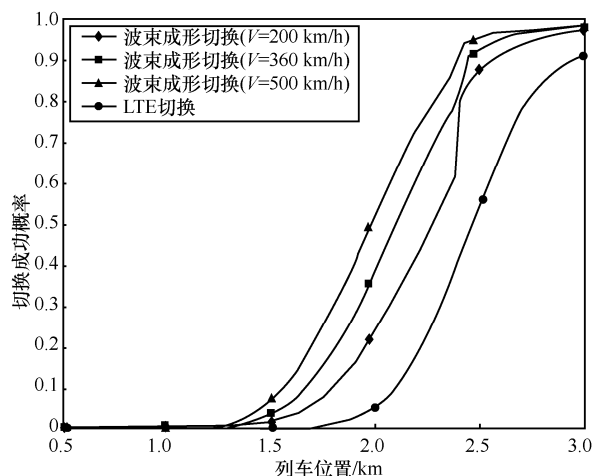


图 4 切换成功概率对比

(2) 基于车载中继的切换方案优化设计

中继目前作为一种较为成熟的技术, 是目前无线移动通信领域的研究热点, 其在高铁通信系统中也有较大的应用价值。

参考文献[18]在通过高速列车顶部安装车载中继站 (train mobile station, TRS), 用户终端通过各个车厢部署的 AP (access point, 接入点) 连接到 TRS。利用 TRS 的群移动性, 由 TRS 代替列车中的用户设备进行基站选择和越区切换, 有效避免巨大的信令开销引起的“信令风暴”^[25]。TRS 拥有比普通用户终端更为强大的计算能力, 能够对多普勒频移进行矫正, 改善信号接收质量, 节省用户终端的能量。同时, TRS 可以通过光纤与列车外部的收发天线进行连接, 从而可以有效避免车厢穿透损耗。

由于软切换需要无线网络控制器 (radio network controller, RNC) 的支持, 为了设计扁平化的网络结构以及降低端到端时延, LTE 系统采用“先断后连”的硬切换方式, 在高铁高速运行中, 容易产生较大的中断概率^[26]。为了改进硬切换带来的不利影响, 参考文献[27]提出一种基于移动中继的双天线辅助切换方案, 如图 5 所示。双天线分别安装在车首和车尾, 当列车进入重叠区并满足切换触发条件后, 先是由车首天线执行切换, 车尾天线继续保持与服务基站连接, 切换成

功后,车尾天线将工作频率同步到目标基站完成切换。若切换失败,车尾天线在进入重叠区后可再次执行切换。通过两部天线的协作通信,达到软切换的效果,大大地降低切换失败率。在此基础上,参考文献[18]通过引入双播机制进一步使信令开销减小 50%左右。

(3) 基于控制面/用户面分离的切换方案优化设计

未来 5G-R 通信系统在提高网络传输容量时,应考虑将控制面与传统用户面信息解耦设计,合理利用 GSM-R 系统中的现有带宽,均衡不同频段的差异,对系统频段弹性设计。为此,必须研究基于控制面/用户面(C/U 面)分离的高铁无线网络架构,通过控制面与用户面的分离架构,将拥有较宽连续频谱的高频频段与 GSM-R 低频频段融合,为高铁通信系统提供高容量、高可靠性的通信服务^[19]。由于控制面信息以及列车控制、列车调度等用户面信息对传输可靠性要求较高,可以由宏基站通过拥有良好传输特性的低频段来承载;对传输容量需求较高的旅客业务,可以由虚拟基站通过高频段承载。虚拟基站专门为移动用

户提供数据业务服务,而网络接入、系统信息广播等控制信息由宏基站提供,也就是将控制面与用户面放置在拥有不同特性的频段上传输,均衡不同频段的差异。由于在宏基站和虚拟基站中使用的频带不同,宏基站和虚拟基站之间不会存在同信道干扰^[28]。基于 C/U 面分离的高铁通信网络架构如图 6 所示。

基于 C/U 面分离的高铁无线网络架构已于 2016 年 6 月写入无线世界研究论坛(Wireless World Research Forum, WWRF)和未来移动通信论坛联合发布的 5G 高速移动白皮书《2016 Whitepaper V2.0H-5G Enabler: High Mobility Support》。然而,在基于 C/U 面分离的高铁通信系统中,其切换问题更加严重,原因如下^[29]。

(1) 宏基站间切换频率更高

假设一个宏基站包含 3 个虚拟基站,高速列车穿过一个宏小区就要执行 1 次宏基站间切换和 3 次虚拟基站间的切换。高速列车执行的切换越多,中断的可能性越大。

(2) 切换失败概率较高

列车首先执行“宏基站—宏基站”切换,使用

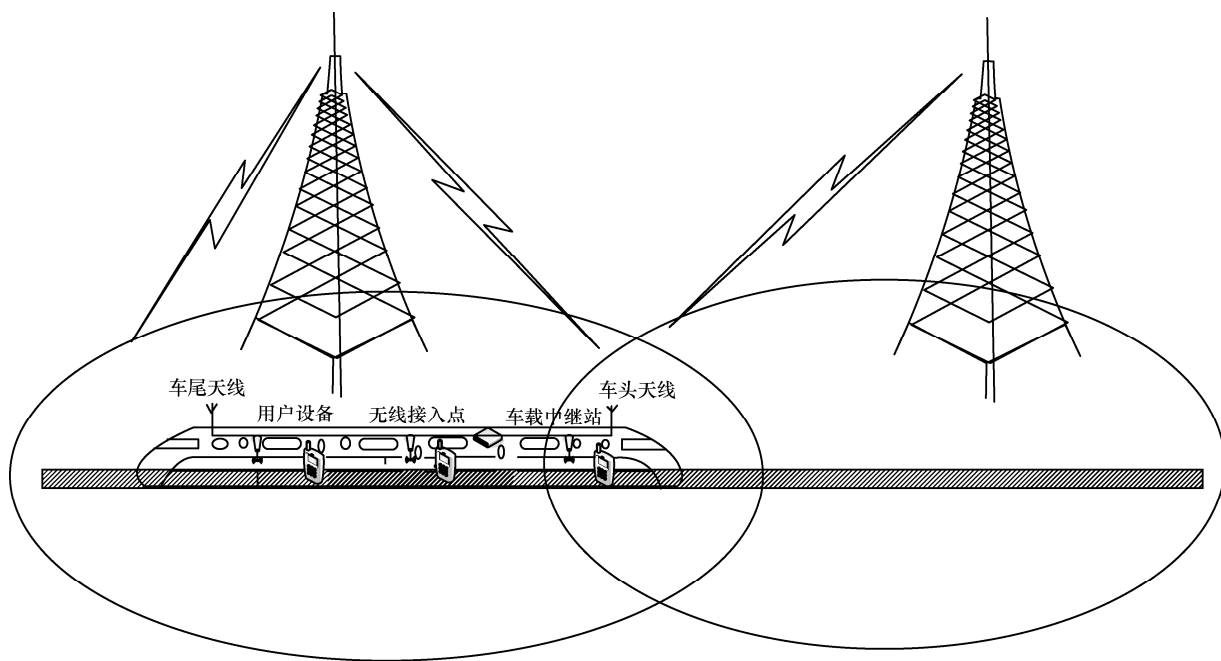


图 5 基于移动中继双天线切换方案系统模型

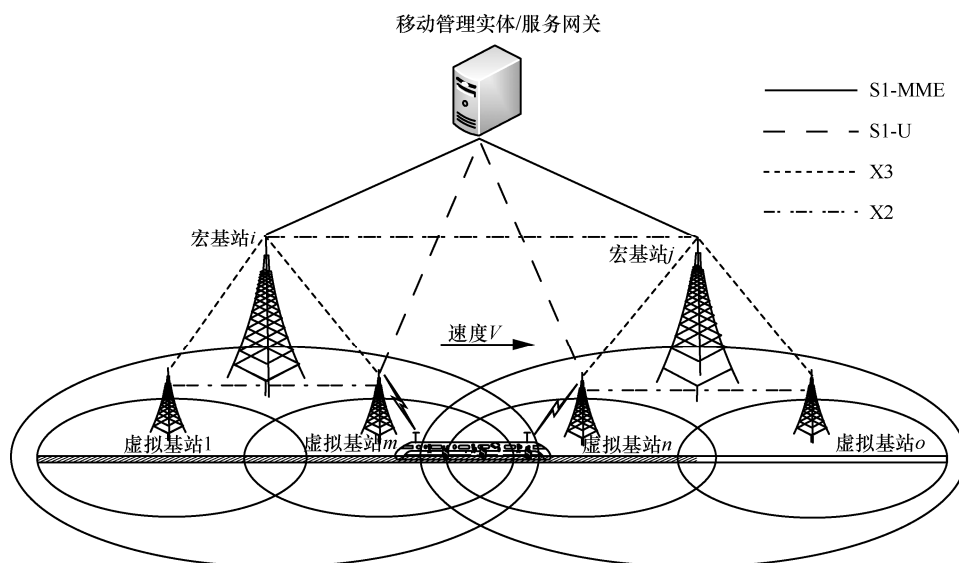


图6 基于 C/U 面分离的高铁通信网络架构

户设备连接到目标宏基站,然后在目标宏基站的控制下执行“虚拟基站—虚拟基站”切换,建立用户设备与目标虚拟基站之间的连接。当且仅当两种切换都顺利完成时,宏基站间切换才算成功。

(3) 切换重叠区较短

“虚拟基站—虚拟基站”切换作为宏基站间切换的第二步,必须在“宏基站—宏基站”切换完成之后才能执行。因此,切换必须在虚拟基站间重叠区域内全部完成。

(4) 切换触发滞后

当且仅当目标宏基站和目标虚拟基站的信号质量分别超过服务宏基站和服务虚拟基站一定阈值时,宏基站间的切换才会被触发。因此,这会造成一定的切换触发滞后。

4 结束语

为了保障高速列车在移动过程中调度信息的实时传输以及为旅客提供优质的宽带通信业务,高速铁路宽带通信系统对越区切换性能提出了极高的要求。本文从参数优化和网络优化两个方面总结了国内外的研究成果,并进一步探讨了未来越区切换技术的发展方向。基于控制面/用户面分

离的高铁通信网络架构是目前的研究热点,结合波束成形、车载中继、双播等技术对切换方案进行优化,设计适应高铁场景的快速切换或无缝切换方案,对未来高铁宽带通信系统的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] ZHANG J Y, TAN Z H, ZHONG Z D, et al. A multi-mode multi-band and multi-system-based access architecture for high-speed railways[C]//IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Sept 6-9, 2010, Ottawa, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [2] SUN R, TAO C, LIU L, et al. Channel measurement and characterization for HSR U-shape groove scenarios at 2.35 GHz[C]//IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013-Fall), Sept 2-5, 2013, Las Vegas, NV, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [3] AI B, CHENG X, KÜRNER T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2143-2158.
- [4] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway services-oriented mobile communications network[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78-85.
- [5] HE R, AI B, WANG G, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49-58.
- [6] FAN P, ZHAO J, CHIH-LIN I. 5G high mobility wireless communications: challenges and solutions[J]. China Commu-

- cations, 2016, 13(Supplement2): 1-13.
- [7] AGUADO M, JACOB E, ASTORGA J, et al. The cross layer RMPA handover: a reliable mobility pattern aware handover strategy for broadband wireless communication in a high-speed railway domain[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1): 298.
 - [8] CHANG F M, WANG H L, HU S Y, et al. An efficient handover mechanism by adopting direction prediction and adaptive time-to-trigger in LTE networks[C]//International Conference on Computational Science and its Applications, June 24-27, 2013, Ho Chi Minh City, Vietnam. Berlin: Springer, 2013: 270-280.
 - [9] HUANG Q, ZHOU J, TAO C, et al. Mobile relay based fast handover scheme in high-speed mobile environment[C]//IEEE 76th Vehicular Technology Conference (VTC 2012-Fall), Sept 3-6, 2012, Québec City, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2012: 1-6.
 - [10] HUANG Y S, LEU F Y, LIU J C, et al. A handover scheme for LTE wireless networks under the assistance of GPS[C]//2013 8th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), Oct 28-30, 2013, Compiegne, France. New Jersey: IEEE Press, 2013: 399-403.
 - [11] 原燕斌. 高速铁路环境下 LTE 切换技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
YUAN Y B. A study of handover algorithms within LTE system under high-speed railway environment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
 - [12] 吴昊, 谷勇浩, 钟章队. 一种应用于高速铁路的 GSM-R 快速切换算法研究[J]. *铁道工程学报*, 2009(124): 92-96.
WU H, GU Y H, ZHONG Z D. Research on the fast algorithm for GSM-R switching for high-speed railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009(124): 92-96.
 - [13] CHENG M, FANG X M, LUO W T. Beamforming and positioning-assisted handover scheme for long-term evolution system in high-speed railway[J]. *IET Communications*, 2012, 6(15): 2335-2340.
 - [14] 贺臻桢. 基于 LTE-R 的高速移动宽带通信系统切换技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
HE Z Z. The research on handover technology under high-speed mobile communication system based on LTE-R[D]. Changsha: Central South University, 2013.
 - [15] LUO W, FANG X, CHENG M, et al. An optimized handover trigger scheme in LTE systems for high-speed railway[C]//Fifth International Workshop on Signal Design and its Applications in Communications (IWSDA), Oct 10-14, 2011, Guilin, China. New Jersey: IEEE Press, 2011: 193-196.
 - [16] YANG Y, YU P, LI W. Handover self-optimization mechanism based on velocity for cellular networks[C]//2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Aug 8-10, 2012, Kunming, China. New Jersey: IEEE Press, 2012: 606-610.
 - [17] BHATTACHARYA S, DE D. An enhanced handover strategy for GSM-R technology[C]//2012 Third International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCCT), Nov 23-25, 2012, Allahabad, India. New Jersey: IEEE Press, 2012: 227-232.
 - [18] TIAN L, LI J, HUANG Y, et al. Seamless dual-link handover scheme in broadband wireless communication systems for high-speed rail[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(4): 708-718.
 - [19] YAN L, FANG X, FANG Y. A novel network architecture for C/U-plane staggered handover in 5G decoupled heterogeneous railway wireless systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017(99): 1-13.
 - [20] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. *电信科学*, 2017, 33(12): 40-45.
NI S J, ZHAO J H. The potential key technologies in physical layer of 5G wireless communications network[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(12): 40-45.
 - [21] LUO W T, FANG X M, CHENG M, et al. Efficient multiple group multiple-antenna (MGMA) scheme for high-speed railway viaducts[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(6): 2558-2569.
 - [22] ZHAO J, WANG S, LIU X, et al. Geometry-based stochastic modeling for non-stationary high-speed train MIMO channels[C]//IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC 2016-Fall), Sept 18-21, 2016, Montréal, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-5.
 - [23] LANNOO B, COLLE D, PICKAVET M, et al. Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(2): 56-62.
 - [24] NI S, ZHAO J, GONG Y. Optimal pilot design in massive MIMO systems based on channel estimation[J]. *IET Communications*, 2016, 11(7): 975-984.
 - [25] ZHANG Y. Handoff performance in wireless mobile networks with unreliable fading channel[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(2): 188-200.
 - [26] LIN C C, SANDRASEGARAN K, RAMLI H A M, et al. Requirement of handover modeling in the downlink 3GPP long term evolution system[C]//IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), April 20-23, 2010, Perth, WA, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2010: 305-310.
 - [27] QIAN X Y, HAO W. Mobile relay assisted handover for LTE system in high-speed railway[C]//International Conference on Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), Dec 7-9, 2012, Shenyang, China. New Jersey: IEEE Press, 2012: 632-635.
 - [28] ISHII H, KISHIYAMA Y, TAKAHASHI H. A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and phantom cell concept[C]//2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012:



624-630.

- [29] SONG H, FANG X, YAN L. Handover scheme for 5G C/U plane split heterogeneous network in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4633-4646.

[作者简介]



刘云毅（1993-），男，北京交通大学电子信息工程学院硕士生，主要研究方向为LTE-R 越区切换。



赵军辉（1973-），男，博士，北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师，华东交通大学信息工程学院院长，主要研究方向为 5G 通信技术、车联网、轨道交通无线通信等。



王传云（1977-），男，华东交通大学信息工程学院副教授，主要研究方向为无线通信、无线传感网。