

## 高速铁路移动通信系统关键技术的演进与发展

方旭明\* 崔亚平 闫莉 宋昊  
(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)

**摘要:** 高速铁路自诞生起即伴随着车地移动通信的承载需求,其中一部分业务承载需求来源于高速列车的列车控制与列车调度,这是高速列车必不可少的重要组成部分,另一部分业务来源于车上的旅客,这些是满足旅客服务质量需求的重要标志之一。特别是在移动互联网时代,上网需求已成为人们生活的重要组成部分。该文总结了世界各国高速铁路移动通信发展的重要历程,特别是支持旅客信息接入的车地移动通信技术发展现状,从移动通信技术发展的趋势讨论高速铁路移动通信技术发展的趋势,包括与公众移动通信技术发展的关系,展望未来高速铁路移动通信的一些关键技术,并提出了一些具体建议,从而给该领域相关的研究人员提供一些参考。

**关键词:** 高速铁路; 移动通信; 旅客信息; 技术演进

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2015)01-0226-10

**DOI:** 10.11999/JEIT141156

## The Evolution and Development of Key Technologies of Mobile Communication Systems for High-speed Railway

Fang Xu-ming Cui Ya-ping Yan Li Song Hao

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Since the birth of the high-speed railway, it is growing with the mobile communication demand of train to wayside. One part of traffic load demand is from the train control and train dispatching, which is an important part of the high-speed railway. And another part of the traffic load is from the passengers, which is one of the important Key Performance Indexes (KFI) that can satisfy the requirement of passenger service quality. Especially in the era of mobile Internet, the Internet demand becomes an important part of people's daily life. This paper summarizes the important processes of the development of mobile communications for high-speed railway over the world, especially the present mobile communication technologies to support the passengers' information access from train to Internet. Based on the development trend of mobile communication technology, the development trend of its counterpart in high-speed railway is discussed, including its relationship with the development of public mobile communication technology. Some future key technologies, including some detailed suggestions, of mobile communications for high-speed railway are prospected, which may provide some references for the relevant researchers in this field.

**Key words:** High-speed railway; Mobile communications; Passenger's information; Technology evolution

### 1 引言

#### 1.1 国外高速铁路移动通信技术现状

国外先进的高速轮轨交通系统,很多都正在或将要发展高速列车无线通信系统,在提供列车控制列车调度业务承载以外,还向旅客提供必要的通信和互联网接入服务。除 GSM-R(Global System for Mobile communications for Railway)之外,比较有

代表性的高速铁路移动通信系统分别有德国 ICE (Inter City Express)和德律风根、法国 TGV(Train a Grande Vitesse)和 Thalys 以及日本新干线(Shinkansen)上所采用的相应技术。

安德鲁(Andrew)公司为德国 ICE 城际快车提供了一种独特的无线接入解决方案,其中的核心技术就是车载直放站。车载直放站可以放大从附近网络接收到的信号,降低信号由于列车金属外壳造成的衰减,提高无线接入的质量。德国德律风根专用无线通信系统使用私有协议技术,目前没有太多关于该技术的细节。法国 TGV 卫星接入方案采用了一种基于双向卫星系统的无线接入技术:车载接入

2014-09-02收到, 2014-11-26改回

国家973计划项目(2012CB316100), 国家自然科学基金(61471303, 61032002)和中国铁路总公司科技研究开发计划(2013X016-A)资助课题

\*通信作者: 方旭明 xmfang@swjtu.edu.cn

由卫星和覆盖了隧道及车站的地面 WiFi 中继器共同实现，当卫星不能覆盖到列车时，WiFi 网络将接管无线接入，使上传和下载数据不至中断。日本新干线早期的 WiFi 泄漏电缆方案和最近的 WiMax (Worldwide interoperability for Microwave access) 泄漏电缆方案在无线接入中广泛应用了同轴泄漏电缆技术，把同轴泄漏电缆安装在轨道沿线上，WiFi 系统为列车旅客信息系统(Passenger Information System, PIS)提供传输通道，WiMax 系统则为旅客互联网接入提供传输通道<sup>[1,2]</sup>。

主流的 GSM-R 由欧洲国家发起，最初部署于德国、意大利、荷兰、挪威、瑞典等国，现主要部署于欧洲各国以及亚洲的中国和印度。

### 1.2 中国高速铁路移动通信技术现状

大陆 GSM-R 建设初期最具代表性的是青藏线(高原)、大秦线(重载)、胶济线，之后又建立武广、郑西、京沪、沪宁、沪杭、哈大等客运专线，北同蒲线、云岗支线、迁曹线等重载线路。大陆铁路 LTE-R(Long Term Evolution for Railway)系统主要应用于朔黄重载铁路，即用于承载列车机车同步操控数据等列车控制业务传输。

台湾台北到高雄的高速铁路选择 WiMax 系统建立旅客车地蜂窝无线通信网络，但考虑到该标准越来越非主流，产业链正在消失，台湾有关部门目前正在考虑用 LTE 系统取代 WiMax 系统。现在看来，或许选择基于 WiMax 系统的高速铁路移动通信方案是一次有益的尝试，也可能是一次可吸取的教训——非主流技术具有较大的建设风险。

表 1 是各国或地区高速铁路移动通信系统详细对比情况。

## 2 GSM-R 技术的近期演进路线

### 2.1 GSM-R 技术的成熟度及历史使命

毋庸置疑，GSM-R 有其不可否认的、划时代的意义和作用，通过将成熟的、长期商用的、且标准化的 GSM 技术引入铁路系统，提高了铁路运营管理效率，并节省了建设、运营成本<sup>[3]</sup>。其对漫游的支持(如切换功能)可以对列车在整个运行过程中进行

自动控制，使铁路系统使用统一的语音、数据传输平台成为可能。

但 GSM-R 毕竟是基于上世纪八九十年代的技术，时至今日，无线通信已取得革命性的进展和突破，GSM-R 的各种缺点及瓶颈不可避免地暴露出来，其窄带特性只能满足现有低数据速率的列车控制列车调度业务需求，所分配的 4 MHz 带宽更使这一情况恶化<sup>[4]</sup>。且 GSM-R 无法承载高速铁路未来智能化调度、视频监控和运营管理等高数据速率业务以及旅客宽带接入服务的需求。所面临的来自运营商公网干扰等问题也阻碍了 GSM-R 的应用。值得一提的是，与之相符的 GSM/GPRS 技术目前已渐渐淡出公众移动通信市场。

为此，国际铁联(International Union of Railways, 或 Union Internationale des Chemins de fer, UIC)根据 GSM-R 技术的生命周期，开始考虑和部署 GSM-R 未来 5~10 年的演进战略。GSM-R 厂商也可能在 2025 年左右停止对 GSM-R 设备的升级与维护，届时设备供应链将中断。此外，根据通信设备 15 年大修周期，现有在用的 GSM-R 设备到 2024 年前后将面临演进或换代问题。

### 2.2 GSM-R 技术近期演进关键技术

除列车控制列车调度业务外，高速铁路未来业务将以智能化调度、视频监控和运营管理等高数据速率业务以及旅客宽带接入服务为主<sup>[5]</sup>，若信息安全问题得以有效解决，高速铁路移动通信系统终将接纳旅客宽带业务，结束列车控制列车调度业务与旅客宽带接入业务物理上独立传输的局面。以中国高速铁路 CRH3 型动车为例，保守估计，在 16 节编组时，整列车旅客定员数为 1114 人，若每位旅客吞吐率为 600 kpbs(上下行 1:5)，移动用户渗透率 70%，LTE 终端渗透率 80%，激活比例 70%，使用业务比例 10%，则整列车旅客总吞吐率为 $(600 \times 70\% \times 10\%) \times (1114 \times 70\% \times 80\%) = 26.2$  Mbps，这就意味着仅从上述旅客宽带接入业务需求上就可以看出现有的高速铁路移动通信技术已无法支撑高速铁路移动通信

表 1 各国或地区高速铁路移动通信系统主要性能对比

	国家或地区			
	德国	法国	日本	中国台湾
高速列车	ICE	TGV/Thalys	新干线 N700	台北-高雄
最高运行速度(km/h)	280	320	300	300
无线接入系统	GSM-R	双向卫星/GPRS/UMTS/WiFi	同轴泄漏电缆/WiFi	WiMax(802.16m)实验系统
平均传输速率 (Mbps)	下行/上行 0.05/0.05	下行/上行 2/0.512	下行/上行 2/1	下行+上行 10~30

注：GPRS: General Packet Radio Service, UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

信业务发展的需要。因此, 必须要进行技术演进。面对铁路业务和技术发展的趋势, 科技部、铁路总公司(原铁道部)、华为和中兴等政府部门和企业均立项支持开展了 GSM-R 演进问题的前期研究工作, 目前业界已达成共识, 认为铁路下一代无线通信的演进将选择 LTE。为此, 我们需要按照近期 2025 年、远期 2035 年的规划, 来规划铁路下一代无线通信。

一般认为, GSM-R 技术近期演进路线分为两个阶段进行。初期 GSM-R 与 LTE-R 系统并存, 前者负责列车控制等安全相关业务传输, 后者负责视频监控等非安全业务及旅客宽带接入服务等数据传输。后期将更多的业务由 LTE-R 网络承载, 并最终全部切换至 LTE-R 网络。

在 GSM-R 演进至 LTE-R 过程中, 我们认为有以下关键技术问题需要深入研究:

(1) 高速铁路无线传播信道建模。对无线信道进行准确认知是通信系统设计的基础<sup>[6]</sup>, 高速铁路运行线路经过城市、郊区、农村、山区等地域, 其间经过高架桥、开阔平原、U 型槽、隧道等地形地貌<sup>[7]</sup>, 并且高速铁路无线传播信道具有明显的多普勒频移与扩展以及快时变特性<sup>[8]</sup>。国内外学者在研究适合高速移动的信道建模方法和建立各种地形地貌的信道模型方面做了很多的工作和尝试<sup>[9-12]</sup>, 如文献[13]分析了 900 MHz 频段电波在山区长直隧道、隧道群和弯曲隧道中的场强测试数据, 并参考经验公式, 得出 900 MHz 频段电波在不同类型隧道中传播特性参数。但研究的频段主要是目前 2G 和 3G 系统使用的频段, 地形地貌主要限于高架桥和 U 型槽, 移动台主要是车内的测试设备, 结果具有一定的局限性, 因此, 需要针对 LTE 频段、各种地形地貌和更具典型性的移动终端设备或车载中继设备进行研究。

(2) 信道估计与建模、多普勒频移估计与补偿。无线信道的传播特性通常由大尺度衰落、阴影衰落、多径时延扩展及多普勒频移扩展等多个参数刻画。这些参数主要与周围的传播环境及移动台的移动速度有关。高速列车行驶里程长, 行驶过程中会经历城市、郊区、隧道、森林等多种环境, 在不同的环境下其无线信道的传播特性表现不同。高速铁路无线传播信道的快速变化和频移往往使得信道参数的估计与真实值之间相差甚远。对 LTE MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 系统而言, 良好的信道、多普勒频移估计是获得空间分集和复用分集的重要前提。对快时变信道, 主要使用基扩展模型(Basis Expansion Model, BEM)进行建模<sup>[13]</sup>, 并主要使用非盲估计(基于导频)<sup>[14]</sup>的方法进行信道估计。因此, 需要针对高速铁路特殊环境, 研究相关

信道估计问题, 特别是研究移动性先验信息在信道估计中的可利用性。

(3) 信道状态信息(Channel State Information, CSI)反馈技术。通常, MIMO 系统中, 容量提升、预编码、天线选择、用户选择以及功率控制等均依赖于终端反馈的 CSI。在高铁场景中, 信道的快时变特性使得信道反馈误差和延迟所造成的影响更为严重。现有有限反馈机制主要基于预编码矩阵和随机波束赋形等<sup>[15,16]</sup>。因此, 需要研究高速铁路场景中的 CSI 反馈或有限反馈机制<sup>[17]</sup>, 降低反馈比特、消除或减小反馈延迟带来的影响。

(4) 移动性管理。移动性管理包括空闲状态下的位置更新和连接状态下的切换<sup>[18]</sup>。高速铁路场景中, 研究主要集中在切换方面, 有关研究问题和建议参见 3.1 节。

(5) 干扰抑制和抗干扰技术。高速铁路移动通信系统既面临信道快时变所导致的子载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)<sup>[19]</sup>, 又面临与运营商所部署网络的网间干扰<sup>[20]</sup>。对于 ICI, 现有研究主要集中在编码自消除、均衡与迭代判决反馈消除、快时变信道估计等方面。对网间干扰问题, 现有研究极少, 有必要开展相关研究。

(6) 多天线和智能天线技术。为了满足铁路高数据速率业务和旅客宽带接入服务需求, 高速铁路移动通信系统需要像公众移动通信系统一样使用多天线和智能天线技术。目前, 在高速铁路场景中, 对多天线和智能天线技术的研究和应用获得了一定进展<sup>[21-25]</sup>, 但仍需深入研究高速铁路环境下克服信道估计误差、CSI 反馈延迟、提升多天线和智能天线性能的方法。

(7) 端到端 QoS(Quality of Service)保证机制。高速铁路移动通信系统所承载的列车控制列车调度业务与铁路运输安全息息相关。在 GSM-R 系统中, 使用电路交换进行承载, 列车控制业务独占信道, 可以保证永久在线<sup>[26]</sup>。但典型 LTE 系统仅支持分组域, 无法像 GSM-R 系统一样为列车控制列车调度业务提供电路域交换方式。因此, 需要研究 LTE 系统在用于保障安全相关业务时的端到端 QoS 保证机制。在此之前, 需要对铁路业务在分组交换传输方式下的需求进行重新定义<sup>[27]</sup>。

### 3 高速铁路移动通信技术未来演进路线

基于前瞻性基础研究的需求, 我们在开展 LTE-R 关键技术研究甚至实施产业化建设的同时, 必须开始布局 LTE-R 之后未来高速铁路移动通信关键技术的研究, 或基于 5G 技术的高速铁路移动通信关键技术的研究。我们认为, 除基于公众移动

通信的共性技术外，由于高速铁路系统本身的特殊性，有以下一些特殊问题和潜在技术需要研究：

### 3.1 基于 5G 的铁路移动通信关键技术

**3.1.1 基于 5G 的高速铁路无线信道建模** 高速铁路运行环境通常散射环境简单，多径数量较少，LOS 特性明显。图 1(其中原点对应基站；整个过程被分为 5 个区域，分别为 RA(Remote Area), TA(Toward Area), CA(Close Area), CEA(Closer Area) 及 AA(Arrival Area))和文献[28-31]表明，高速铁路环境信道的多径数量与列车的位置有关，在距离基站较近的 AA 区与较远的 RA 区，多径数量较少，其他如 TA, CA 与 CEA 区域的多径数量相对较多。不过，相比公网，该场景仍然属于多径数量较少的场景。显著的 LOS 特性意味着更小的多径时延扩展或者更宽的相干带宽，也就意味着更优的通信环境。尽管快速移动会导致更大的多普勒频移，显著的 LOS 特性还可以缓解多普勒扩展问题，更易于多普勒频移的跟踪与补偿。然而，信道的 LOS 特性对于一些技术的实现也存在负面影响，如 MIMO 技术，其依靠丰富的多径环境，需要利用信道非相干来实现空间资源的复用。而 LOS 场景无法满足上述要求，因此，需要依靠其他技术来克服信道的非相干性，获得良好的 MIMO 增益。随着 5G 移动通信系统向毫米波频段的扩展，高速铁路环境的信道多径数量将更加稀少，LOS 特性将更加明显，因此，面对这样的新问题，就需要深入分析和研究与该频段相适应的新的信道特性，特别是大规模 MIMO 情况下的天线阵设计问题、波束赋形问题等，针对这些特性，研究高速铁路环境下的自适应技术。

### 3.1.2 基于分布式网络和云的架构 目前网络中基

站的实际资源使用效率很低，存在“潮汐效应”，即资源的使用情况与基站的位置及时间段有关。在高速铁路场景中，“潮汐效应”更加明显。为了保障运输安全，列车间存在发车时间间隔，同一路线上同一时刻运行的列车数很少，线路上大部分的基站都处于空闲状态，导致大量的资源浪费。

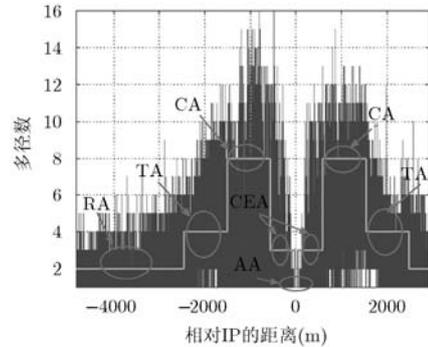


图 1 高速铁路场景下的多径数量<sup>[28]</sup>

云无线接入网络架构的提出很好地解决了这一问题，具体见图2<sup>[32]</sup>。其主要思想是将基站间共有的、可以通用的基带处理资源集中到一个基带处理池中，对这些资源实行集中控制。这样，用户的基带处理不再由某些固定的资源来完成，而是基带处理池根据当前的资源使用情况灵活地为用户分配处理资源，提高了资源的使用灵活性及效率。

尽管在网络拓扑上，云架构与传统的分布式网络有很多相似之处，都是通过光纤拉远等技术实现一个基带处理单元同时控制多个射频拉远单元。不过，与传统分布式网络不同，在云架构中射频拉远

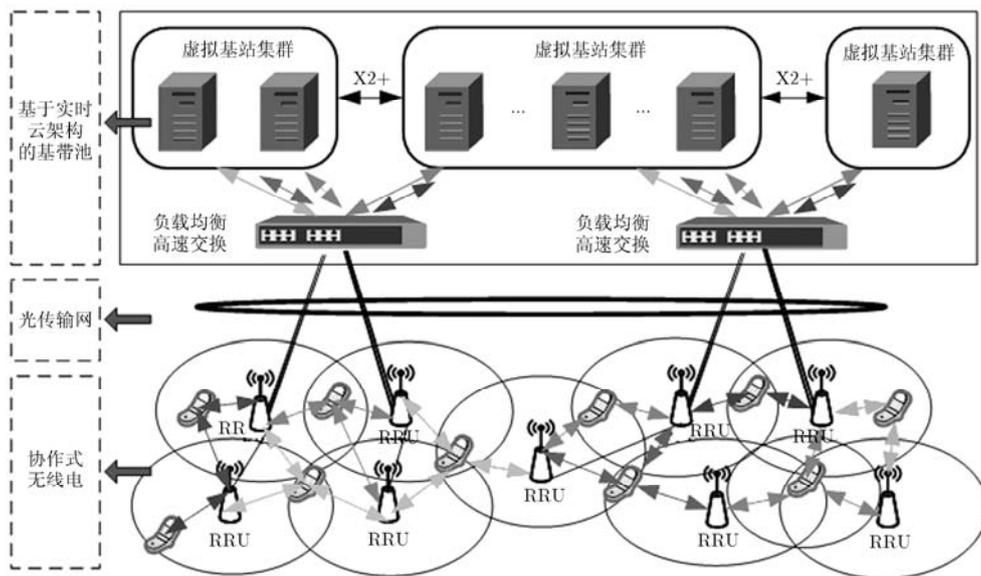


图 2 云无线接入网络架构

单元与基带处理单元之间并不存在固定的连接关系。每个射频拉远单元不再属于任何一个基带处理单元实体,其发送或接收信号的处理都是在一个虚拟的基带处理单元中完成,而这个虚拟基带处理单元的处理能力是由实时虚拟技术分配基带处理池中的部分处理器构成的。因此,对比传统的分布式网络,应用了实时虚拟技术的云架构,特别是高速铁路带状分布的拓扑结构,完全可以实现真正的物理资源使用全局最优化。

**3.1.3 用户面/控制面分离技术** 扩大容量最直接、有效的方法是开发拥有更宽连续频谱的高频频段来延展高速铁路无线通信系统的带宽。然而高频频段的路径损耗大、覆盖范围小,对高速铁路场景,还意味着更加频繁的越区切换。为了在扩大系统容量的同时,兼顾移动性,学者们提出了一种基于控制面/用户面分离的异构高速铁路无线通信网络架构,如图 3 所示<sup>[33-35]</sup>。通常,在服务基站与接入用户间存在两个平面的连接,即控制面与用户面。其中,控制面承载着用户与接入网络间的控制信令(如随机接入过程信令、切换信令等),用户面则负责业务数据的传输。若控制面的移动性得到保证,即控制面的覆盖范围足够满足用户的移动性,不需要频繁的切换甚至重新接入,那么用户整体的移动性能便得到了保障。基于此,在该架构中,用户的控制面被保留在传输性能较优、信号覆盖范围较大的低频频段。考虑到建设成本,这一频段可以使用 GSM-R 或 LTE-R 的遗留频段。相应地,真正的数据承载者用户面则被搬移到具有更宽频谱的高频频段来扩大系统容量。

在传统的网络架构中,中断概率通常由传输可靠性指标来衡量<sup>[36]</sup>。然而,在该架构中,其控制面与用户面被分离到了不同的网络节点。并且,控制面对整体传输可靠性影响高于用户面,因而在该架

构中,控制面被保留在了低频频段。因此,传统的中断概率已不适用于该架构,需要提出新的指标,如非可靠性因子(UnReliability Factor, URF):

$$\text{URF} = \begin{cases} P(\text{SER}_U > \text{th}_U), & \text{SER}_C \leq \text{th}_C \\ 1, & \text{SER}_C > \text{th}_C \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\text{SER}_U$  和  $\text{th}_U$  分别表示用户面误符号率及基于误符号率的中断门限;  $\text{SER}_C$  和  $\text{th}_C$  表示控制面的误符号率及基于误符号率的中断门限。URF 表示当控制面的误符号率高于某个门限值时整个通信是中断的,即  $\text{URF}=1$ 。反之,整个系统的传输性能则取决于用户面的中断概率。当控制面的误符号率较高时,即使用户面的数据被可靠传输也无法被正确解码,那么通信将中断。显然,该指标区分了控制面与用户面,并突出了控制面对整体传输可靠性的影响,更加适合高速铁路业务的传输需求。

除上述的分离架构外,还可以通过其他方式实现高频频段的融合,如在完全不改变原有网络部署的前提下,增建大发射功率的高频基站,弥补路径损耗严重这一缺陷,为覆盖范围内的原有基站分流业务,增强系统容量,还可以实现无线回传,解决因网络不断走向密集化带来的有线回传布网困难问题。此外,高频频段与低频频段在传输特性上存在很大差异,有必要在向高频频段延展带宽的同时,充分挖掘高频频段的应有优势<sup>[37]</sup>,进一步提高系统性能。

**3.1.4 频谱融合的异构网技术** 提高系统容量的方法主要有 3 种:扩大系统带宽、增加频谱效率和增加网络密度<sup>[38]</sup>,其中最直接有效的方式就是增加系统带宽。但是无线频谱作为一种极其有限和宝贵的资源,其使用需要国家相关部门授权,所以很难获得更多的许可证频段,或者需要付出巨大的经济代价。所以,合理有效地利用非许可证频段是 5G 铁

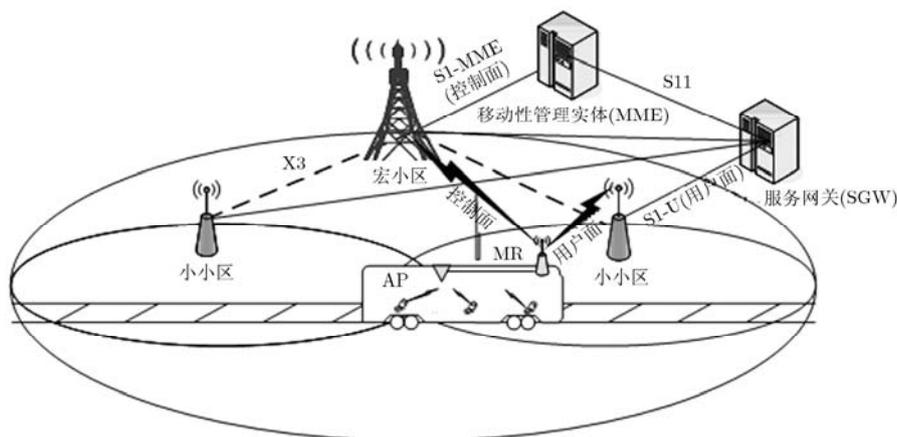


图 3 基于控制面/用户面分离的异构高速铁路无线网络

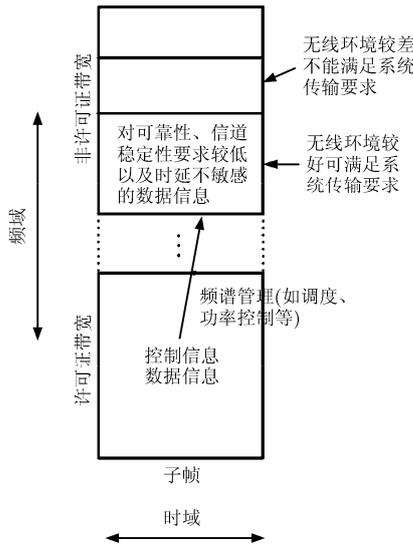


图 4 异构网频谱融合原理图

路移动通信系统增加系统带宽和提高系统容量的重要方法。然而，非许可证频段一般在频谱上与许可证频段相距较远，传输特性相差较大，所以需要针对非许可证频段设计与许可证频段不同的无线传输技术，即频谱融合技术。为了使频谱融合技术在高铁场景中具有可实现性，需要解决非许可证频段不稳定、非许可证与许可证频段传输特性相差较大和干扰协调 3 个主要问题。频谱融合的主要原理如图 4 所示，系统根据非许可证频段上信道质量检测结果，对该频段进行自适应调制与编码、频率选择性调度、功率控制等链路自适应技术，并通过许可证带宽传输相应的控制指令。而由于非许可证频段的不稳定性，该带宽只能用来传输对可靠性和信道稳定性要求较低以及对延迟不敏感的数据业务。

作为该技术在实际应用中遇到的最大挑战，干扰协调方案可以分为两部分进行。首先在接收端进行非许可证频段信道质量检测，筛选出可以满足系统最低传输需求的可用信道。若以信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)作为信道质量的度量，该过程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{SINR}_{ij} > \Gamma &\Rightarrow \text{信道 } j \text{ 对于用户 } i \text{ 为可用信道} \\ \text{SINR}_{ij} \leq \Gamma &\Rightarrow \text{信道 } j \text{ 对于用户 } i \text{ 为不可用信道} \end{aligned} \right\} (2)$$

其中， $\text{SINR}_{ij}$  表示下行中  $\text{UE}_i$  检测得到的非许可证频段信道  $j$  的 SINR，或上行中 eNB 检测来自  $\text{UE}_i$  的关于非许可证频段信道  $j$  的 SINR；可用信道判决门限  $\Gamma$  表示可满足系统基本可靠性需求传输的最低 SINR 值。该过程为初步的干扰协调，进一步的干扰协调需要通过系统在非许可证频段信道上进行的资源调度以及功率控制来实现。

**3.1.5 多天线和分布式天线技术** 现有多天线技术主要有 MIMO、波束赋形及分布式天线等。MIMO 技术通过利用信道非相干性实现空间复用，继而提高系统容量。然而，高铁无线信道基本为 LOS 信道，不利于 MIMO 技术的实现<sup>[39]</sup>，因此需要采取一些技术方案来人为制造无线信道间的非相干性。一种可行的方案是：增加车载台的天线阵列组数，然后对信号进行合并，通过调整多组多天线阵列间的权重，改变多个阵列矩阵间的相干性，从而在 LOS 高速铁路环境下得到容量的提升<sup>[22]</sup>。

波束赋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<sup>[40,41]</sup>，该技术尤其适用于具有 LOS 特性的信道，可以将其应用到 LOS 高速铁路场景来集中信号能量，增强接收信噪比，提高传输可靠性。在文献[42]中，波束赋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。

高速铁路场景中面临的巨大挑战之一就是频繁的越区切换。为了降低切换次数，可以采用分布式天线技术，在铁路沿线布置大量天线单元，天线单元之间通过光纤连接并与中央控制器连接，同一个中央控制器控制下的天线单元组成一个逻辑小区<sup>[43]</sup>。当列车在这个覆盖范围较大的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。

**3.1.6 多普勒效应和快速切换技术** 高速铁路场景中，高速列车的运动速度要远高于一般移动台速度，故它的多普勒频移与扩展现象更加严重。多普勒频移  $f_d$  可以看作一种非人为的频率调制，其中  $f_d = v \cos \theta / \lambda = vf \cos \theta / c = f_{\max} \cos \theta$ ， $f_{\max}$  为最大多普勒频移， $f$  为载频， $c$  为光速， $v$  为移动台运动速度， $\theta$  为入射角， $\lambda$  为电磁波波长。多普勒扩展表示多普勒效应造成的频移范围，接收端接收到有用信号的多普勒扩展范围为  $f_c - f_{\max}$  到  $f_c + f_{\max}$ 。高速铁路场景中，另一个严重的问题是列车通过基站时最大多普勒频移从  $+f_{\max}$  到  $-f_{\max}$  的正负跳变，如图 5 所示。突然的多普勒频移正负跳变会造成接收端无法进行准确的频移补偿或者锁相环需要较长时间去进行频移估计而带来严重的延迟。

高速铁路场景中，切换问题是其面临的另一个挑战，主要是因为高速引起的频繁切换、群切换以及硬切换将会导致数据传输中断<sup>[44]</sup>。为了解决上述问题，高速铁路移动通信系统应该采用切换过程中通信中断时长较短、甚至是没有中断时长的快速切

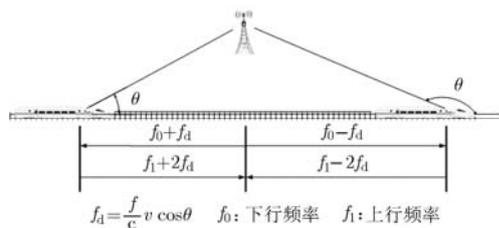


图 5 高速铁路多普勒频移跳变原理图

换或者无缝切换技术,同时该类技术还能有效解决群切换问题。现有研究中具有代表性的是一种基于双播的切换方案<sup>[45,46]</sup>。

**3.1.7 其他移动通信技术** 近年来,也有学者提出利用高速铁路接触网电力线承载的高速铁路移动通信技术。利用电力传输线进行电力载波通信的技术在国内外已有较好的应用,借助此概念和泄漏电缆传输技术的启发,有学者也提出利用高速铁路接触网的电力线作为一种新的无线通信传输方式。其原理是利用微波的“趋肤效应”,借助接触网作为天线,就如同泄漏电缆一样,将基站信号覆盖整个铁路沿线。由基站产生的宽带信号通过耦合器馈入到电力电缆,根据需要动态地配置发射功率,使得在覆盖距离较远的条件下,产生的干扰也能完全被吸收器吸收。该方案可在列车车顶安装接收天线,同时保持接收天线与电力电缆一定的非接触无线传输距离。该技术具有明显的成本优势,但关键技术尚未得到完全验证。

### 3.2 高速铁路旅客无线网络接入系统

移动互联网技术的快速发展,也使旅客在车站和车上享受和家里以及商务办公环境下的宽带接入服务成为可能。车内旅客直接与路边蜂窝基站建立连接是最为简单的接入方式,对基站和用户终端软硬件升级配置要求较少。但是,普通旅客的终端设备处理能力及电量有限,由于较大的车体穿透损耗,群切换信令风暴等问题,导致终端掉话率较大<sup>[47]</sup>。随着公网和无线局域网技术的演进,列车旅客无线通信系统也要考虑前瞻性和先进性,需要重新建立高速铁路场景下车地间宽带数据接入无线数据传输链路。在列车内引入车载飞小区系统(Femto系统)、WiFi等车内接入系统为上述问题提供了很好的解决方案<sup>[48]</sup>。车内旅客首先接入该车内系统,然后通过特定的宽带车地无线通道将汇聚的旅客业务转发到路边的3G/4G/5G系统基站。

这种车内接入方案针对车站和车上需求提供了一体化无线信息应用平台,可以给旅客提供丰富的信息及娱乐应用,例如在车站的车站公告、列车时刻表、候车信息、检票通知、站内商业服务信息等;

在车上的点餐、电影音乐点播、电子书、新闻发布、广告发布(如旅游、酒店等)、列车时刻表、晚点信息、游戏等。该一体化系统也给客运管理部门提供了车上工作人员的管理平台,可以有效提供旅客咨询、意见反馈、点餐售货服务等功能。图 6 即为基于 WiFi 的列车旅客无线通信系统方案示意图。

该系统可具有如下技术和功能特点:

(1)通过无线车顶汇聚设备将移动、联通、电信等多家电信运营商网络的带宽聚合,提供一到多个外网连接出口,改善和弥补运营商不同网络性能之间的差异,成倍增加旅客上网带宽的能力,提高车地通信连接的鲁棒性,提升旅客乘坐舒适度。

(2)车内建设基于 802.11 的车厢无线局域网,俗称车厢 WiFi,一般车厢覆盖采用 802.11g/n/ac 标准,车厢之间的连接采用不同频率或信道的 802.11a/n/ac 标准。通过车内内置海量内容服务器吸引消化车内旅客免费 WiFi 宽带上网业务,通过与互联网内容提供商的协作,在没有地面信号覆盖或地面信号覆盖较差的区段提供离线的车内免费 WiFi 网络多媒体内容,如电影、小说、游戏、应用下载等,同时提供新型的广告和电子商务,为旅客改善服务体验,同时给客运管理部门带来新的经济收入机会。

(3)通过给车站和车上提供全程 WiFi 服务,提高高速铁路对飞机、长途汽车等交通方式的竞争能力。

(4)为了保持车内用户对标准公网的持续和兼容接入能力,也可以通过车厢局域网连接具有标准 3G/4G/5G 空口特征的 Femto 基站设备。

基于上述功能需求,尚有一系列技术标准和关键技术需要解决,包括基于下一代移动通信网络和无线局域网的车厢用户接入、车辆无线连接、大容量并发用户信令风暴、车辆连接设备与车厢接入设备之间的干扰协调等等。

## 4 结束语

高速铁路的快速发展,对车地间无线通信系统提出了更高的要求,目前的窄带 GSM-R 系统将渐渐淡出历史舞台,高速铁路移动通信系统即将走向 LTE-R。在设计 LTE-R 时,一方面,为了提高列车的操作安全,需考虑安装视频监控等设备,对行驶的列车进行实时监控。另一方面,也需要考虑旅客移动互联网业务需求。而这些业务需求从长期来看,很快又会对 LTE-R 系统构成挑战。庆幸的是,我们可以借鉴公网 5G 系统向高频频段延展带宽的思路,依此布局高速铁路移动通信系统长期演进路线。基于此,本文不仅分析了近期演进目标 LTE-R 中需要解决的关键技术问题,还展望了 LTE-R 之后基于

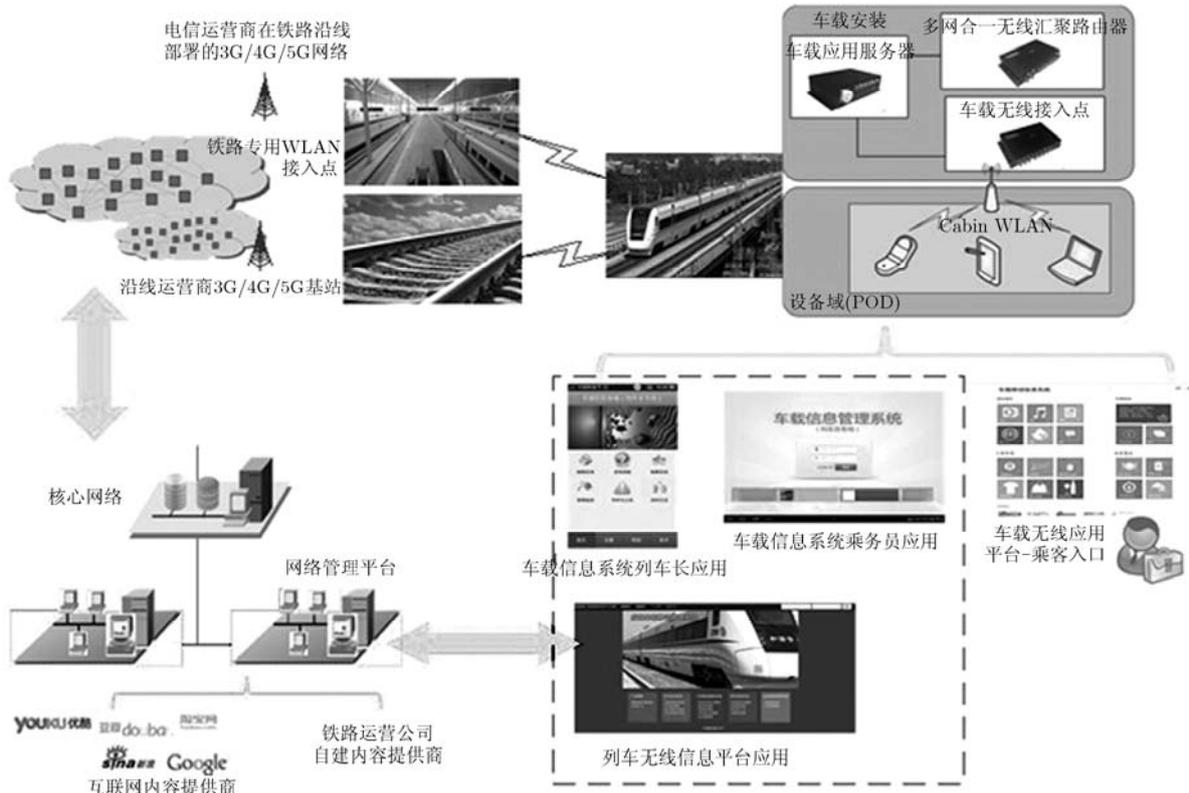


图 6 基于 WiFi 的列车旅客无线通信系统方案

5G 的高速铁路移动通信系统，分析了高速铁路运行环境的信道建模、高速铁路场景下基于频谱融合的用户面/控制面分离网络架构及频谱融合的异构网技术。为了提高高速铁路移动通信系统的传输可靠性，本文还分析了多天线和分布式天线技术、快速切换技术及车内无线接入系统。

以往的高速铁路移动通信系统大部分是将公网制式搬移到高速铁路场景，然后增加一些高速铁路特色业务。实际上，无论是通信环境、无线信道特性，或者是用户分布、运动规律，高速铁路场景与公网场景间都存在很大的不同。在高速铁路移动通信系统长期演进中，我们需要充分考虑这些差异性，在保证与公网兼容的情况下，有针对性地深入研究适用于高速铁路场景的无线网络架构及通信技术，实现高可靠、大容量高速铁路移动通信系统。基于上述分析和研究，我们对未来高速铁路移动通信关键技术的研究有以下建议(包括但不限于)：

(1)对于高速铁路移动通信环境的信道建模，结合未来移动通信潜在的毫米波频段，深入研究该频段下信道特征和模型，特别是大规模 MIMO 在 LOS 环境或稀疏经环境下克服信道相干性并提升 MIMO 增益的手段和方法。

(2)从架构和协议等多层面深入研究高速铁路异构多层网络中的关键技术问题，使系统容量达到若干数量级的提升，其中包括分布式多层网络架构

设计、用户面/控制面分离网络架构设计、非连续的许可证频段与微波/毫米波非许可证频段的融合方法、资源分配和调度、基于移动性预测的无缝切换控制与管理、层间和层内干扰协调控制等。

(3)深入开展基于大规模天线阵的道旁基站和车载移动台的研究，从 MIMO 角度使系统容量再提升若干数量级，其中包括自适应最佳天线数选择、最佳波束设计、基于移动性预测的波束跟踪和波束切换方案等。

总之，在引领世界高速铁路技术的同时，我们要从国家发展战略出发，及时布局未来 5~10 年高速铁路宽带移动通信的前瞻性技术研究，应对宽带移动通信系统传输性能、可靠性和安全性等方面的诸多挑战，尤其是结合高速移动场景的宽带移动通信的空口传输体制、高速移动下抗干扰与干扰协调、高速移动下高可靠信息传输技术，以及下一代高速铁路车载无线接入技术，确立和有效解决其中的科学问题与关键技术问题，推动高速铁路下一代移动通信系统的平滑演进，这无疑对于保持我国高速铁路成套技术的领先地位具有非常重要的意义。

参考文献

[1] 瞭望日本. 新干线“N700 系”提供无线 LAN 服务[OL]. <http://cn.j-cast.com/2008/07/04023014.html>, 2014.11.  
 [2] cnbeta. 台湾高铁年底测试 WiMax 连网[OL]. <http://www.cnbeta.com/articles/57403.htm>, 2014.11.

- [3] Hofestadt H, GSM-R: global system for mobile radio communications for railways[C]. International Conference on Electric Railways in a United Europe, Amsterdam, 1995: 111-115.
- [4] Sniady A and Soler J. An overview of GSM-R technology and its shortcomings[C]. 2012 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Taipei, 2012: 626-629.
- [5] Jaime C S, Mariano M G, Alonso J I, *et al.* Long term evolution in high speed railway environments: feasibility and challenges[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2013, 18(2): 237-253.
- [6] Roche G D L, Andres A G, Ben A, *et al.* LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks: Channel Modelling and Propagation[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012: 56-58.
- [7] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道测量与建模综述[J]. *通信学报*, 2014, 35(1): 115-127.  
Liu L, Tao C, Chen H J, *et al.* Survey of wireless channel measurement and characterization for high-speed railway scenarios[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 115-127.
- [8] Hlawatsch F and Matz G. Wireless Communications over Rapidly Time-varying Channels[M]. Oxford: Access Online via Elsevier, 2011: 10-11.
- [9] 徐岩, 严星涛. 基于沙漠环境的铁路 GSM-R 系统传播模型研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(7): 70-73.  
Xu Y and Yan X T. Research on GSM-R system propagation model of railways in the desert environment[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(7): 70-73.
- [10] 熊磊, 钟章队, 艾渤, 等. 高速铁路移动通信系统 WINNER 信道性能分析[J]. *铁道学报*, 2012, 34(3): 44-49.  
Xiong L, Zhong Z D, Ai B, *et al.* Analysis on performance of WINNER channels of mobile communication system of high-speed railway[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(3): 44-49.
- [11] Ghazal A, Wang C X, Ai B, *et al.* A nonstationary wideband MIMO channel model for high-mobility intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, DOI: 10.1109/TITS. 2014. 2345956.
- [12] Guan K, Zhong Z D, Ai B, *et al.* Propagation measurements and analysis for train stations of high-speed railway at 930 MHz[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(8): 3499-3516.
- [13] Rabbi M F, Hou S W, and Ko C C. Basis Expansion Model (BEM) based channel estimation for OFDMA Uplink transmission[C]. 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, Guangzhou, 2008: 1101-1105.
- [14] Yang L H, Ren G L, Yang B K, *et al.* Fast time-varying channel estimation technique for LTE uplink in HST environment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(9): 4009-4019.
- [15] Love D J and Heath R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(8): 2967-2976.
- [16] Sharif M and Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(2): 506-522.
- [17] Love D J, Heath R W, Lau V K N, *et al.* An overview of limited feedback in wireless communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8): 1341-1365.
- [18] 沈嘉, 索士强, 全海洋, 等. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 388-408.  
Shen J, Suo S Q, Quan H Y, *et al.* 3GPP Long Term Evolution: Principle and System Design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008: 388-408.
- [19] 李丹, 柯峰. 高速移动环境下基于 OFDM 的 LTE 系统 ICI 消除技术综述[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2013, 25(3): 292-299.  
Li D and Ke F. ICI mitigation techniques for OFDM based LTE system over highly mobile environment: a survey[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2013, 25(3): 292-299.
- [20] Han B J, Liang Y M, Xie Z J, *et al.* An anti-interference approach in high-speed railway scenario based on dynamic spectrum adjustment[C]. 2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT), Jounieh, 2012: 1-6.
- [21] Alasali M and Beckman C. LTE MIMO performance measurements on trains[C]. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Gothenburg, 2013: 2327-2330.
- [22] 罗万团, 方旭明, 程梦, 等. 高速铁路移动通信系统多天线分集接收方案[J]. *通信学报*, 2014, 35(6): 73-81.  
Luo W T, Fang X M, Cheng M, *et al.* Multi-antenna diversity receiving scheme for mobile communication system in high-speed railway[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(6): 73-81.
- [23] 罗万团, 方旭明, 程梦, 等. 高速列车车载多天线系统传输方案及容量分析[J]. *通信学报*, 2013, 34(3): 90-98.  
Luo W T, Fang X M, Cheng M, *et al.* Transmission scheme and capacity analysis of onboard multi-antenna system in high-speed train[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(3): 90-98.
- [24] 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.
- [25] Cheng M and Fang X M. Location information-assisted opportunistic beamforming in LTE system for high-speed railway[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012(210): 1-7.

- [26] 王长林. 列车运行控制技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008: 21-22.
- [27] Sniady A and Soler J. LTE for railways: impact on performance of ETCS railway signaling[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2014, 9(6): 69-77.
- [28] Liu L, Tao C, Qiu J H, *et al.* Position-based modeling for wireless channel on high-speed railway under a viaduct at 2.35 GHz[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(4): 834-845.
- [29] He R S, Zhong Z D, and Ai B. Path loss measurements and analysis for high-speed railway viaduct scene[C]. Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Caen, 2010: 266-270.
- [30] 王惠生. 900 MHz 频段电波在山区隧道的覆盖特性和应用设计[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 94-98.  
Wang H S. Coverage characteristics and application design of 900 MHz frequency band in mountain tunnels[J]. *China Railway Science*, 2004, 25(4): 94-98.
- [31] Knorz S, Baldauf M A, Fugen T, *et al.* Channel analysis for an OFDM-MISO train communications system using different antennas[C]. 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall, Baltimore, 2007: 809-813.
- [32] China Mobile. C-RAN[OL]. <http://labs.chinamobile.com/cran/>, 2014.8.
- [33] Yan L and Fang X M. Reliability evaluation of 5G C/U-plane decoupled architecture for high-speed railway[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, 2014(127): 1-11.
- [34] Yan L and Fang X M. Decoupled wireless network architecture for high-speed railway[C]. 2013 International Workshop on High Mobility Wireless Communications (HMWC), Shanghai, 2013: 96-100.
- [35] Song H, Fang X M, and Yan L. Handover scheme for 5G C/U plane split heterogeneous network in high-speed railway[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, DOI: 10.1109/TVT.2014.2315231.
- [36] 孙立悦, 赵晓晖, 魏明. 基于中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 84-91.  
Sun L Y, Zhao X H, and Guo M. Outage probability based power allocation and relay selection algorithm in cooperative communication[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(10): 84-91.
- [37] Rappaport T S, Gutierrez F, Eshar B D, *et al.* Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1850-1859.
- [38] Ishii H, Kishiyama K, and Takahashi H. A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and Phantom Cell concept[C]. 2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Anaheim, 2012: 624-630.
- [39] Tse D and Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication[M]. Berkeley: Cambridge University Press, 2005: 295-309.
- [40] Godara L C. Applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: performance improvement, feasibility, and system considerations[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(7): 1031-1060.
- [41] Godara L C. Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(8): 1195-1245.
- [42] Cheng M, Fang X M, and 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Luo W T, Zhang R Q, and Fang X M. A CoMP soft handover scheme for LTE systems in high speed railway[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012(196): 1-9.
- [46] Xia Y Y, Fang X M, Luo W T, *et al.* Coordinated of multi-point and bi-casting joint soft handover scheme for high-speed rail[J]. *IET Communications*, 2014, 8(14): 2509-2515.
- [47] 陶成, 刘留, 邱佳慧, 等. 高速铁路宽带无线接入系统架构与关键技术[J]. 电信科学, 2010, 2010(6): 95-101.  
Tao C, Liu L, Qiu J H, *et al.* Architecture and key techniques of broadband wireless access system for high speed railway[J]. *Telecommunications Science*, 2010, 2010(6): 95-101.
- [48] Zhu X Q, Chen S Z, Hu H J, *et al.* TDD-based mobile communication solutions for high-speed railway scenarios[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(6): 22-29.
- 方旭明: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通移动通信系统、无线网络资源管理等。
- 崔亚平: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为高速铁路移动通信技术、多天线技术等。
- 闫莉: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为高速铁路移动通信技术、无线资源管理等。
- 宋昊: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为轨道交通移动通信系统、4G网络优化、5G关键技术研究等。