

移动性增强技术在铁路5G专网中 应用场景研究

陈庭德, 王海龙, 陈 煜

(南京泰通科技股份有限公司, 南京 210039)

摘要: 超高可靠低时延通信是 5G 移动通信系统的三大特性之一, 移动性增强是实现超高可靠低时延特性的一个关键技术。铁路 5G 专网同样也有高可靠性低时延的要求, 列车在高速运行过程中, 用户设备需要不断在相邻小区间进行业务切换, 主要探讨移动性增强技术中的条件切换、双激活协议栈和快速切换失败恢复等 3 项功能在铁路 5G 专网中的应用场景。根据这 3 项功能的工作机制和铁路 5G 专网覆盖模型的特点, 认为双激活协议栈和快速切换失败恢复对减少业务中断时延, 保障列车运行安全具有很好的应用价值。

关键词: 移动性增强; 铁路 5G 专网; 条件切换; 双激活协议栈; 快速切换失败恢复

中图分类号: U285.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0042-05

Research on Application Scenarios of Mobility Enhancement Technology in 5G-R Network

Chen Tingde, Wang Hailong, Chen Yu

(Nanjing Ticom Technology Co., Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract: Ultra-Reliable and Low-latency Communication (URLLC) is one of the three major characteristics of 5G mobile communication systems, and mobility enhancement is a key technology to achieve ultra-high reliability and low-latency characteristics. The 5G for Railways (5G-R) network also has those requirements, to provide reliable connectivity and enhanced performance for safe and efficient railways. During the high-speed operation of trains, the user equipment (UE) needs to continuously handover between adjacent cells. This paper mainly discusses the application scenarios of three functions of the mobility enhancement technology, conditional handover, dual active protocol stack and fast handover failure recovery, in the 5G-R network. According to the working mechanism of these three functions and the characteristics of the 5G-R network coverage model, this paper believes that the dual active protocol stack and fast handover failure recovery have good application value in reducing service interruption delay and ensuring train operation safety.

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-12-05

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (P2020G004)

第一作者: 陈庭德 (1981—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 5G 无线接入网, 邮箱: wellade@163.com。

Keywords: mobility enhancement; 5G-R network; conditional handover; dual active protocol stack; fast handover failure recovery

1 概述

高铁为人们的出行带来了便捷。目前,国内高速铁路专网移动通信系统更新换代势在必行,5G专网在铁路领域的应用已得到学术界和行业专家的极大关注。GSM-R已经无法满足高铁通信技术发展的需求,5G-R更有可能成为铁路通信系统的新标准。中国国家铁路集团有限公司(简称国铁集团)发布了《国铁集团关于加快推进5G技术铁路应用发展的实施意见》和《铁路5G技术应用科技攻关三年行动计划》,提出了铁路5G专用移动通信(5G-R)系统的发展规划和行动部署,开展了5G-R关键技术、技术装备和标准体系等相关研究,从而推进5G-R系统的标准化工作。加快推进5G技术应用,是推动新时代铁路高质量发展、实现交通强国铁路先行的重要步骤。移动性增强作为超高可靠低时延特性的关键技术之一,在铁路5G专网中有着广泛的应用场景和较高的研究价值。

2 移动性增强在3GPP 5G技术标准中的演进

国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)定义了5G的3大特性,即增强型移动宽带(Enhanced Mobile Broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC)和大规模机器类型通信(Massive Machine Type Communication, mMTC)。第三代合作伙伴项目(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)是国际5G标准化组织之一。R15版本是3GPP发布的第一个5G标准,该版本冻结于2018年9月。R15版本实现了对组网模式、信道编码和增强型移动宽带等功能的支持。2020年7月冻结的R16版本对R15版本进行了扩展,并对R15版本部分特性进行了增强,主要表现在自组织网络、大规模机器类型通信、超高可靠低时延通信和移动性增强等

方面。R17版本于2022年6月冻结,该标准进一步拓展了5G的应用场景,主要表现在覆盖增强、进一步增强的超高可靠低时延通信、轻量级5G和非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)等方面。移动性增强技术在R16版本中第一次被提出,在后续版本中进行了进一步迭代和优化。

3 铁路5G专网基站覆盖模型

5G公网一般采用蜂窝网格覆盖模型,一个基站为了覆盖一个网格,需将辐射角配置为120°。铁路5G专网部署在铁路沿线,一般采用线性覆盖模型,如图1所示。基站天线架设方式有:单天线覆盖、双信源双天线覆盖和单信源双天线覆盖。为了保障小区信号质量,提升覆盖距离,降低能耗,铁路5G专网的基站天线辐射角一般配置为90°。铁路5G专网基站天线一般采用双信源双天线覆盖方式,如图1所示,基站1会形成两个覆盖区域:覆盖区域1-L和覆盖区域1-R。为了减少列车在行驶过程中的切换次数,铁路5G专网使用小区合并技术,将覆盖区域1-L和覆盖区域1-R合并成一个小小区。两个相邻基站的覆盖区域会有重叠区域,同时将两个相邻基站的小区配置成Xn邻区关系,这样,在列车行驶在该区域时,可以进行Xn邻区切换。

4 移动性增强技术

为提升时延敏感类业务的用户体验,减少切换的中断时延,提高切换流程的可靠性与鲁棒性,3GPP在R16版本中引入了多个移动性增强技术,包括条件切换(Conditional Handover, CHO)、双激活协议栈(Dual Active Protocol Stack, DAPS)和快速切换失败恢复(Fast Handover Failure Recovery, FHFR)等。

4.1 条件切换

条件切换是指用户设备(User Equipment,

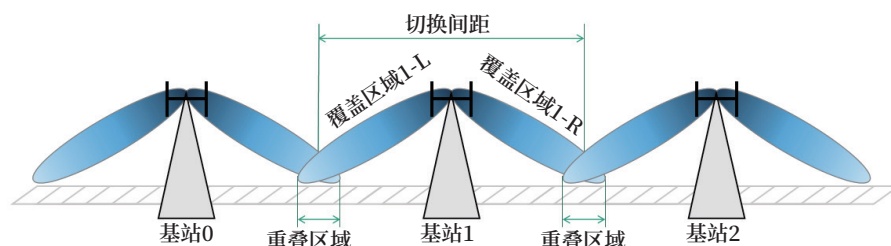


图1 铁路5G专网基站覆盖模型
Fig.1 Base station coverage model of 5G-R network

UE) 在切换时同时满足一个或多个切换执行条件。用户设备根据条件切换配置开始评估这些执行条件，一旦用户设备选定一个条件开始执行切换，则结束执行条件的评估。条件切换配置包括候选目标基站的候选小区的条件切换配置和源基站的执行条件。一个执行条件可以由一个或两个触发条件组成，触发条件包括 A3 事件、A5 事件、参考信号类型和信号质量等。如果一个候选目标基站满足切换执行条件时，用户设备直接决定切换，而无需等待源基站下发切换命令。当条件切换执行时，用户设备开始在目标基站小区进行同步，建立无线资源控制 (Radio Resource Control, RRC) 连接。同时用户设备从源基站小区分离，不再监控源基站小区。在与目标基站小区 RRC 连接建立完成后，用户设备释放条件切换配置。

4.2 双激活协议栈

双激活协议栈功能是指在切换过程中，用户设备在收到切换的 RRC 消息之后，会继续保持与源基站小区的连接，直到在目标基站小区完成随机接入才会释放与源基站小区的连接。在双激活协议栈切换过程中，用户设备在释放与源基站小区连接之前，一直从源基站小区接收下行用户数据。同样的，在完成与目标基站小区随机接入过程之前，一直向源基站小区发送上行用户数据。

双激活协议栈功能需要用户设备侧协议栈支持。在收到切换命令之后，用户设备侧协议栈为目标基站小区创建一个媒介接入控制 (Medium Access Control, MAC) 实体。对于配置了双激活协议栈功能的每一个数据无线承载 (Data Radio Bearer,

DRB)，为目标基站小区创建一个无线链路控制 (Radio Link Control, RLC) 实体，并且与专业业务信道 (Dedicated Traffic Channel, DTCH) 逻辑信道进行绑定。对于配置了双激活协议栈功能的每一个 DRB，重配分组数据汇聚协议 (Packet Data Convergence Protocol, PDCP) 实体，包括源基站小区和目标基站小区各自的安全配置和鲁棒性头部压缩 (Robust Header Compression, ROHC) 功能，并且分别与配置的源基站小区和目标基站小区的 RLC 实体进行绑定。

4.3 快速切换失败恢复

不支持快速切换失败恢复功能的无线链路失败重建过程如下：

- 1) 用户设备检测到与源基站服务小区的物理层失去同步，启动 T310 定时器；
- 2) 当 T310 定时器超时，即认为无线链路失败，此时用户设备发起 RRC 重建过程。

支持快速切换失败恢复功能的无线链路失败重建过程如下。

- 1) 用户设备检测到与源基站服务小区的物理层失去同步，启动 T310 定时器；
- 2) 在 T310 定时器运行期间，用户设备检测到切换事件的触发时间 (Time To Trigger, TTT) 满足时长，则启动 T312 定时器；
- 3) 用户设备开始上报测量报告，准备发起切换流程；
- 4) 但直到 T312 定时器超时，因为某些原因，用户设备未收到源基站下发的切换命令，此时，T310 定时器还未超时，为了尽快恢复业务，用户设

备即可以认为无线链路失败,从而发起 RRC 重建过程。

为了减少业务的中断时间,T312 定时器的配置时长要比 T310 定时器的配置时长小得多。

5 移动性增强技术在铁路5G专网中的应用

执行条件切换时,为提高切换成功率,需要有多多个拥有邻区关系的候选目标基站小区。因此,条件切换适用于 5G 公网中蜂窝网格覆盖模型的切换场景。而铁路 5G 专网采用的是线性覆盖模型,在重叠区域,一个小区一般只有一个邻区,故不推荐在铁路 5G 专网切换场景中使用条件切换。

双激活协议栈功能主要是要在用户设备执行切换时,为源基站小区和目标基站小区分别创建各自的协议栈实体,这样可以让用户设备同时保持与源基站小区和目标基站小区的连接,从而将业务中断时延降低到 0 ms。该功能同时适用于 5G 公网中蜂窝网格覆盖模型和铁路 5G 专网中线性覆盖模型。当列车行驶在重叠区域进行切换时,业务不需要中断,从而有效保障了列车的运行安全。

快速切换失败恢复功能是在用户设备与源基站小区物理层失去同步,启动时长较长的 T310 定时器,在该定时器还未超时,满足切换条件,用户设备同时开启时长较短的 T312 定时器。一旦 T312 定时器超时,用户设备随即在源基站小区进行 RRC 连接重建,减少业务中断时延。T310 定时器时长一般配置为 1 000 ms,TTT 一般配置为 40 ms,T312 定时器时长一般配置为 200 ms,重新接入时长大约为 60 ms。为保障切换成功率,列车在重叠区域以最高速行驶时需有 3 次切换机会。国内高铁的运行速度最快可以达到 350 km/h,铁路 5G 专网的基站覆盖半径大约是 2~3 km。以高铁时速 350 km、基站覆盖半径 3 km 为例,重叠区域长度如公式(1)所示。

重叠区域长度=(TTT 时长+T312 时长+重新接入时长) $\times 3 \times$ 列车速度 (1)

由公式(1)可知,重叠区域长度约为 90 m,

推荐配置为 150 m。切换间距、重叠区域行驶时长、高铁切换时间间隔如公式(2)~(4)所示。

切换间距=基站覆盖半径 $\times 2$ -重叠区域长度 (2)

重叠区域行驶时长=重叠区域长度/列车速度 (3)

高铁切换时间间隔=切换间距/列车速度 (4)

由以上可知,切换间距约为 5 850 m,高铁大约每分钟需要进行一次 Xn 邻区切换,并且需要在 1.5 s 之内完成切换。

在铁路 5G 专网的组网模型中,由公式(3)可知,高速列车在重叠区域的行驶时间大约为 1.5 s,列车上的用户设备在 T312 定时器超时后,有足够的时间在源基站小区进行重新接入。在 5G 公网中,用户设备大多都是中低速移动,用户设备在源基站小区重建 RRC 连接的时间将会更充裕。所以,该功能同时适用于 5G 公网覆盖模型和铁路 5G 专网覆盖模型,从而减少业务中断时间,提升系统可靠性。

6 结束语

本文对移动性增强技术中条件切换、双激活协议栈和快速切换失败恢复等 3 种功能的工作原理进行了介绍,分析了这 3 种功能的应用场景。结合铁路 5G 专网的组网模型特点,给出了这 3 种移动性增强技术在铁路 5G 专网中的应用建议。双激活协议栈功能和快速切换失败恢复功能可明显减少用户设备在切换过程中业务中断时延,例如列控信息端到端传输时延,大大提升业务体验,有效保障列车的运行安全。铁路 5G 通信系统标准正在制定当中,希望本文的建议能为铁路 5G 专网的发展带来一些有益的思考。

参考文献

- [1] 陈苏,赵晟.5G 在智能高铁中的应用[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(7):46-50.
Chen Su, Zhao Sheng. Application of 5G in Intelligent High-speed Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 46-50.

- [2] 何丽. 基于高铁环境下的 5G 网络建设与规划 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (11): 42-46.
He Li. 5G Network Construction & Planning Based on High-speed Railway Environment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11):42-46.
- [3] 姜永富. 铁路 5G-R 研发关键问题探讨 [J]. 中国铁路, 2022 (9): 8-11.
Jiang Yongfu. Discussion on Priorities of Railway 5G-R Research and Development[J]. China Railway, 2022(9): 8-11.
- [4] 王芳, 石波, 蔺伟. 铁路 5G-R 技术标准体系研究 [J]. 中国铁路, 2022 (9): 31-37.
Wang Fang, Shi Bo, Lin Wei. Railway 5G-R Technical Standard System[J]. China Railway, 2022(9): 31-37.
- [5] 李春铎, 郭强亮, 闫晓宇, 等. 基于 5G-R 的智能调度通信业务服务质量保障研究 [J]. 铁道通信信号, 2022, 58 (8): 17-21, 36.
Li Chunduo, Guo Qiangliang, Yan Xiaoyu, et al. Research on Service Quality Assurance of Intelligent Dispatching Communication Service

- Based on 5G-R[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(8): 17-21, 36.
- [6] 李路鹏. 5G 移动性增强技术分析 [J]. 移动通信, 2020, 44 (7): 55-59.
Li Lupeng. Analysis on 5G Mobility Enhancement Technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(7): 55-59.
- [7] 葛伟涛, 冯敬然, 周敏, 等. 铁路 5G-R 无线接入网组网方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (6): 59-63.
Ge Weitao, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Networking Scheme of Railway 5G-R Wireless Access Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 59-63.
- [8] 杨琪, 冯敬然, 周敏, 等. 城市轨道交通 5G 公网融合组网方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (7): 63-69.
Yang Qi, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Research on 5G Public-Private Network Convergence Scheme for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 63-69.

* * * * *

(上接 29 页)

- Yang Yatao, Zhang Songtao, Li Zichen, et al. Design and Implementation for High Speed Data Transfer Interface of PCI Express Based on Zynq Platform[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3): 522-528.
- [8] 刘光宇, 马盼, 刘肖婷, 等. 基于 UVM 的应答器传输模块验证方法研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (9): 7-10.
Liu Guangyu, Ma Pan, Liu Xiaoting, et al. Research on Verification Method of Balise Transmission

- Module Based on UVM[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 7-10.
- [9] 宋仕坤. 基于以太网 MAC IP 核的 IEEE1588 协议的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [10] 刘浩, 田泽, 刘承禹, 等. 基于 DMA 的双通道千兆以太网 MAC 设计与验证 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26 (5): 132-134.
Liu Hao, Tian Ze, Liu Chengyu, et al. Design and Verification of Dual- Channel Gigabit Ethernet MAC Based on DMA[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(5): 132-134.