

文章编号: 2095-4980(2022)08-0754-08

高速磁悬浮列车车地无线通信技术的探讨

周梓博¹, 于行健², 蒋海林^{*1}, 赵红礼¹, 彭良勇²

(1. 北京交通大学 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心, 北京 100044; 2. 中国铁路设计集团有限公司 电化电信院, 天津 300308)

摘要: 高速磁悬浮列车因其高速便捷将是未来非常有竞争力的地面交通工具, 但是高速磁悬浮车地通信面临多普勒频移大、越区切换频繁、传输实时性要求高以及需承载多种业务等技术问题。本文研究了无线局域网(WLAN)、38 GHz 毫米波和地铁长期演进通信系统(LTE-M)/5G 等常见民用通信和铁路地铁通信技术在高速磁悬浮系统中的适应性, 并对这些通信技术在高速磁悬浮系统车地通信环境中的应用进行了详细分析, 提出了改进和应用这些通信技术的方向和技术路线。

关键词: 第四代移动通信技术(4G); 第五代移动通信技术(5G); 车地通信; 多普勒效应; 网络切片; 高速磁悬浮系统

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022047

Research on high-speed maglev train-ground wireless communication technology

ZHOU Zibo¹, YU Xingjian², JIANG Hailin^{*1}, ZHAO Hongli¹, PENG Liangyong²

(1. National Engineering Research Center of Rail Transportation Operation and Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Electrical and Telecommunication, China Railway Design Group Co., Ltd, Tianjin 300308, China)

Abstract: High-speed maglev trains will be very competitive ground transportation tools in the future because of their high speed and convenience. However, high-speed maglev train-ground communication faces the Doppler effect caused by high-speed motion, frequent handovers, high real-time transmission requirements, and the requirements of carrying multiple services. In this paper, the adaptability of common civil communication and railway subway communication technologies such as Wireless Local Area Network(WLAN), 38 GHz millimeter wave and Long Term Evolution-Metro(LTE-M)/5G in high-speed maglev system is studied, and the analysis on the application of these communication technologies in the train-ground communication environment of high-speed maglev system is carried out. The direction and technical route of how to improve and apply these communication technologies are put forward.

Keywords: the 4th generation mobile network(4G); the 5th generation mobile network(5G); train-ground communication; Doppler effect; network slice; high-speed maglev system

时速 600 km 高速磁浮是当前可实现的速度最快的地面交通工具, 按“门到门”实际旅行时间计算, 是中短运程范围内最快捷的交通模式。2021 年发布的《国家综合立体交通网建设规划》明确了发展时速 600 km 高速磁浮的任务和作为构建综合立体交通网络的重要举措^[1]。除国家相关部门正在组织相关工作外, 安徽、海南、成渝等地区都发布了高速磁浮建设规划设想, 有些省区已进入论证阶段。

与高速铁路相比, 高速磁悬浮列车控制与通信技术有了新的特点。一方面, 高速列车的基本结构、运行组织、牵引控制、在途监测、在途语音通信数据等与传统轮轨高速铁路有很大的变革, 传统的通信系统结构难以适应高速磁悬浮通信的发展需要; 另一方面, 通信技术正在快速多元化发展, 面对城市轨道交通的地铁长期演进

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61973026)

*通信作者: 蒋海林 email:lhjiang@bjtu.edu.cn

通信系统(LTE-M)已广泛应用, 5G 技术在运营商中已经大规模商用。

高速磁悬浮系统的车地通信面临着两个关键技术问题。首先高速磁悬浮系统列车的速度超过 600 km/h, 远远超过一般民用通信系统的设计指标, 在速度超过 600 km/h 情况下如何实现低时延高可靠车地通信是首先需要解决的问题。其次, 现在的民用通信系统采用蜂窝状的网络架构, 当移动台从一个小区移动到另一个小区时, 在连接状态下将发生小区间的越区切换, 由于高速磁浮列车移动速度极快, 越区切换的频率很高, 切换的过程可能会导致通信中断或通信延迟增大, 这对高速磁浮车地通信系统的性能造成了很大的影响。

本文首先介绍高速磁悬浮系统车地通信的业务要求, 针对高速磁悬浮车地通信的特点和要求, 分别分析了几种无线接入方式的适用性, 对不同无线通信技术的特点进行研究和分析, 最后给出结论和展望。

1 高速磁悬浮系统车地通信的业务要求

高速磁悬浮系统车地通信系统有两种类型的业务, 分别是列车运行控制相关的业务和乘客上网相关的业务。不同的业务对通信的可靠性和实时性的要求不同。

列车运行控制相关的车地通信业务是生产业务, 这些业务包括: 1) 基于通信的列车运行控制系统业务, 完成对车辆安全行驶的控制功能; 2) 列车运行状态监测系统业务, 用于保障车辆运行期间关键设备系统的安全运转; 3) 用户调度电话系统业务。

列车运行控制相关通信业务对通信的可靠性和实时性的要求很高, 通常车地无线通信系统要求由物理上完全隔离的两个系统组成, 两个系统同时工作, 在一个系统发生故障时, 另一个系统应正常工作, 不影响系统运行, 从而提高系统的可靠性。某些高速磁悬浮系统由地面对车辆进行牵引控制, 要求车地通信的时延低于 5 ms, 这个指标远远低于普通民用通信系统几十毫秒到 100 ms 左右的时延。列车运行控制相关通信业务的吞吐量较小, 一般在 100 kbps 左右^[2]。

乘客上网业务包括语音、上网浏览和实时视频类的业务, 这些业务应当满足一定的服务质量(Quality of Service, QoS)要求, 如道路交通场景下要求端到端时延不超过 30 ms^[3]等, 乘客上网类业务对通信可靠性的要求要低一些。单用户的乘客上网业务吞吐量要求在几 Mbps 到几十 Mbps 之间, 整列车的用户吞吐量要求取决于乘客同时上网的用户数量^[2]。

2 现有民用通信系统的无线接入技术分析

不管是针对列车运行控制相关业务还是乘客上网业务, 高速磁悬浮列车的车地通信都需要解决几个关键技术问题。

1) 多普勒频移问题

高速磁悬浮列车的运行速度在 600 km/h 以上, 现有的民用无线通信系统很少能支持如此高速度下的可靠通信, 因此需要对高速运动下的车地通信性能进行分析。

移动台的高速运动会产生较大的多普勒频移, 对于正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)系统, 为保证子载波的载干比(Carrier Interference Ratio, CIR)大于 20 dB, 要求子载波的频偏小于子载波间隔的 7%^[4], 当采用频偏纠正算法以后, 对子载波的频偏的要求要更低一些, 但频偏纠正算法取决于具体实现, 不同实现算法性能相差较大, 所以本文仍从无频偏纠正的角度讨论多普勒频移问题。以此为依据, 设定多普勒频移最大允许低于子载波间隔的 7%。

2) 低传输时延的要求

在有的高速磁悬浮列车的运行控制系统设计中, 要求地面对列车进行牵引运行控制, 而地面对列车的牵引运行控制对时延极为敏感, 通常要求车地的端到端传输时延小于 5 ms, 相比之下, 城市轨道交通和高速铁路的车地传输时延一般要求在 150 ms 或 100 ms 以下, 高速磁悬浮系统对车地通信的实时性提出了更高的要求。

3) 快速切换能力

民用的移动通信系统采用蜂窝网络结构, 移动台在移动过程中需要在不同的蜂窝小区间进行越区切换。现有的切换技术多为硬切换技术, 切换的过程中会发生通信中断, 导致数据丢失或数据传输时延增大, 所以需要分析切换过程中的性能下降对磁浮列车车地通信的影响。

4) 多种业务共存时的优先级处理能力

高速磁悬浮系统车地通信系统需要承载多种业务, 不同业务的可靠性、实时性和吞吐量性能要求都不相同。如何在一个网络中同时满足不同业务的需求, 也是在选择无线通信接入方式时必须考虑的问题。

现在移动无线通信技术发展迅速，包括无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)、38 GHz 毫米波通信技术、长期演进(Long Term Evolution, LTE)技术和5G技术等。此外，漏泄电缆和漏泄波导等多种非接触耦合技术也在铁路和地铁行业中得到了广泛应用。由于高速磁悬浮列车车地通信的要求，传统接入方案不一定适用于高速飞行列车，目前还没有公开的针对高速磁悬浮列车的无线接入方案。本文首先根据高速磁悬浮列车运行场景的特点分析现有无线接入技术方案的适用性，然后讨论为满足高速磁悬浮要求无线通信系统需要进行的改进，从而为高速飞行列车车地网络接入的设计提供借鉴和参考。

2.1 无线局域网(WLAN)

在城市轨道交通系统中，车地无线局域网 WLAN 系统可实现移动列车与地面之间的实时双向数据传输，并已广泛应用。基于 WLAN 的车地无线通信系统主要包括控制中心、无线接入点(Access Point, AP)和车载无线单元。一般情况下，轨旁 AP 的间隔设置为 200 m 左右，采用定向天线、漏泄电缆或漏泄波导进行无线覆盖，车载无线单元采用天线与 AP 连接实现车地通信。

1) 多普勒频移问题

目前的 WLAN 主流设备在物理层采用 OFDM 调制方式，在目前的 WLAN 标准中^[5]，OFDM 系统的子载波间隔为 312.5 kHz。移动台的最大多普勒频移为：

$$f_D = \frac{vf_c}{c} \tag{1}$$

式中： v 为运行速度； f_c 为载波频率； c 为光速。对于 600 km/h 的高速磁悬浮列车，如果采用 2.4 GHz 的 WLAN 车地通信技术，最大多普勒频移为 4 kHz。归一化多普勒频移 ϵ 为：

$$\epsilon = \frac{f_D}{f_s} \approx 0.01 \tag{2}$$

式中 f_s 表示 WLAN 系统的子载波间隔，为 312.5 kHz。

计算得到的归一化多普勒频移远小于 7%，因此对采用 OFDM 技术的 WLAN 系统，600 km 时速的列车产生的多普勒频移对基于 WLAN 的车地通信系统的性能影响很小。

2) 传输时延

由于 WLAN 的数据传输和处理过程仅仅在物理层和媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层进行收发和处理，因此端到端的传输时延比较小^[5]。根据文献[6]，当干扰很小，且业务量足够小的时候，WLAN 的端到端传输时延小于 5 ms，能满足磁悬浮高速列车车地通信的要求。

3) 快速切换能力

WLAN 规范没有定义标准的切换流程，但是定义了一些切换的信令格式，根据这些信令，典型的 WLAN 切换过程如图 1 所示。另外，WLAN 的标准中，没有定义无线 AP 间的数据存储和转发机制，通常在实施的时候，移动台会由于切换导致数据传输中断，并丢失数据。而由于功率的限制，无线 AP 的覆盖范围通常在 200 m 左右，当列车从当前 AP 覆盖范围移动到下一个 AP 覆盖范围时会发生切换，WLAN 系统的越区切换会发生数据传输中断，中断时间从几十毫秒到 150 ms 左右。以小区覆盖范围 200 m，切换中断时间 100 ms 计算，列车在每个小区的驻留时间为 719 ms，则因为切换导致的丢包率高达 14%，高速磁悬浮列车无法接受如此频繁的通信中断。

4) 综合业务承载能力

在 WLAN 的规范^[5]中定义了不同 QoS 的业务，可以

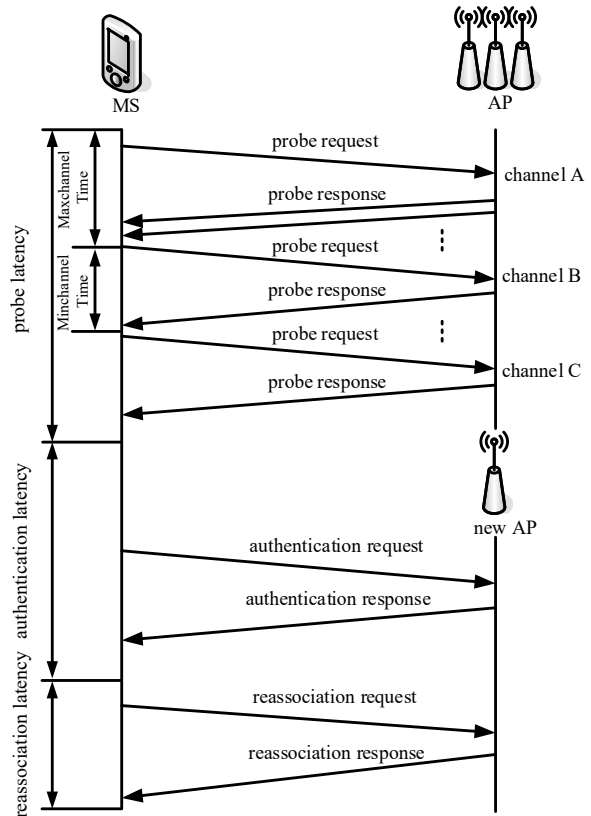


Fig.1 WLAN handover process
图 1 WLAN 切换过程

对业务进行一定程度的优先级区分。但由于 WLAN 在 MAC 层采用载波侦听/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA)随机接入的方式,不同优先级等级的业务仍需要竞争信道,无法保证列车运行控制等安全业务的绝对优先级。

5) 讨论

磁悬浮高速列车的多普勒频移对 WLAN 车地无线传输的性能影响很小,同时 WLAN 系统在一定条件下能满足车地无线通信实时性的要求。但是要将 WLAN 技术用于高速磁悬浮列车系统的车地无线传输,一方面需要提高 WLAN 技术的设备的发射功率,增加 AP 的覆盖范围,才能减小频繁切换带来的影响。由于工业科学和医疗(Industrial Scientific Medical, ISM)频段的 WLAN 设备发射功率受到限制,要提高发射功率可能需要通过采用专用频率来实现。另一方面, WLAN 系统还需要改进越区切换算法才能保证通信的可靠性,如采用 Mesh 网结构,终端在切换过程中同时与两个或两个以上 AP 保持关联,切换完成后才断掉与原 AP 的连接^[7]。同时,如果需要同时承载列车运行控制相关业务和乘客上网业务,需要重新设计 MAC 层的媒体接入算法,才能确保安全业务的绝对优先级。

2.2 38 GHz 毫米波无线电系统

38 GHz 毫米波无线通信技术已应用于上海磁浮列车系统^[7]。该无线电传输系统在磁浮车辆与地面系统之间建立一种可靠的、双通道的数据传输途径。这个传输途径可以传送操作控制数据、牵引控制数据、诊断数据及旅客信息数据,同时为车辆与中心的操作人员提供语音服务。无线电传输系统沿轨道及在列车的两端架设天线,用来传输无线信号。它包括中央无线电控制单元、分区无线电控制单元、光纤网、地面无线电基站和车载无线电系统 5 个部分。

上海磁浮列车系统 38 GHz 无线电通信系统的特点还包括:通过列车位置信息来快速完成小区切换,极大降低了切换时延、设备冗余和通道冗余,大大提高了数据传输的完整性和故障恢复能力。磁浮列车系统高速飞行列车运行速度超过 600 km/h,远高于上海磁浮列车 430 km/h 的运营速度,对于安全类相关信息(如列车定位数据)实时性要求也更高。

1) 多普勒频移问题

磁浮列车高速移动产生的多普勒效应会使接收终端产生频率偏移和展宽,从而引起传输性能下降。对于毫米波通信系统,磁浮列车车地通信可采用具有恒包络特性、相位连续以及对多普勒频移和频率容差不敏感连续相位频移键控(Continuous Phase Frequency Shift Keying, CPFSK)调制。CPFSK 信号由于其相位的连续性,不仅具有实现容易、适用频带宽、抗干扰能力强、解调无需相干载波等优点,而且避免了一般频移键控信号频率转换点相位不连续导致的功率谱很大的旁瓣分量,带限滤波后会引入包络起伏的缺点。

根据最大多普勒频移计算公式 $f_D = \frac{v f_c}{c}$,将 $v=600$ km/h, $f_c=38$ GHz 分别代入,可以得到 38 GHz 频率毫米波的最大多普勒频移分别为 $f_D=21$ kHz。如果采用 2 阶 CPFSK 调制,调制指数设为 1/2,信息传输速率为 R_B ,则 CPFSK 调制信号占用的带宽为 $1.5R_B$ 。参考上海磁悬浮系统,上下行的传输速率设为 4 Mbps,信道编码的码率设为 1/2,则 CPFSK 已调信号占用的带宽为 12 MHz。对应的 38 GHz 毫米波的 $f_D T_b$ 为 0.002,多普勒频移相对 CPFSK 信号的带宽很小,几乎可以忽略不计。

图 2 为采用 1/3 码率的 Turbo 码,信道为 K 因子为 10 的莱斯信道, $f_D T_b=0.06$ 时,采用 CPFSK 调制的误码率性能^[8]。可以看到,对于 2 阶的 CPFSK 调制,如果要求误比特率为 10^{-5} ,采用硬判决译码,要求 E_b/N_0 为 8.5 dB 左右,如果采用软判决译码, E_b/N_0 要求为 7.5 dB 左右,这在实际工程中很容易实现,因此对于 38 GHz 的毫米波通信,高速运动造成的多普勒频移影响很小。

2) 传输时延

上海磁浮 38 GHz 毫米波通信系统的通信协议没有公开,如果数据仅仅在空口进行收发处理,不涉及复杂的高层协议,其空口的传输时延可以做到 5 ms 以内。

3) 快速切换能力

38 GHz 毫米波通信系统的覆盖范围有限,因此列车运行

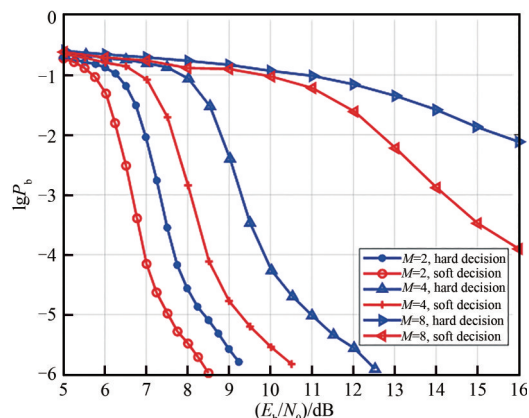


Fig.2 BER performance of CPFSK when $f_D T_b=0.06$

图 2 CPFSK 在 $f_D T_b=0.06$ 时的误比特率性能

时也需要在不同的毫米波基站间进行切换。上海磁浮系统没有公布不同基站间的切换策略, 如果仅仅是射频通道的切换, 其切换时延会很小, 估计在 5 ms 以内。但是, 切换过程中是否会造成数据中断或数据延时增大, 需要进一步研究和确认。

4) 综合业务承载能力

38 GHz 毫米波专用通信系统没有公开的高层协议设计方案, 如果需要进行多业务承载, 需要为其设计专门的高层协议。

5) 讨论

磁悬浮高速列车的多普勒频移对 38 GHz 毫米波车地无线传输的性能影响很小, 同时毫米波车地通信系统能满足车地无线通信实时性的要求。但是要将毫米波通信用于高速磁悬浮列车系统的车地无线传输, 需要研究越区切换算法是否造成数据丢失或传输延迟增大。同时, 如果通信系统需要同时承载列车运行控制相关业务和乘客上网业务, 需要重新设计高层协议。

2.3 LTE 和 5G 无线通信系统

目前 LTE-M 系统已在城市轨道交通车地通信系统中广泛应用, 5G 无线通信系统也已经在运营商大规模商用。LTE 和 5G 通信系统基于 OFDM 技术, 规范所支持的移动台最大速度分别为 350 km/h 和 500 km/h。

1) 多普勒频移问题

对于载频为 2 GHz 的 LTE 系统, 在 600 km 时速时, 最大多普勒频移 f_D 为 1.1 kHz。根据奈奎斯特时域采样定理, 为了不失真地还原时域信号, 要求采样频率不小于信号带宽的 2 倍, 因此要求导频信号的时间间隔 T 满足以下要求:

$$\frac{1}{T} \geq 2f_D \quad (3)$$

计算可知导频信号的间隔应小于 0.455 ms。根据 3GPP TS36.211 物理层协议, LTE 系统下行和上行解调依靠小区参考信号(Cell Reference Signal, CRS)和 UE 特定数据解调参考信号(Demodulation Reference Signal, DMRS), 在 LTE 上行帧结构中每时隙, 即每 0.5 ms 配置一个参考信号(导频信号), 因此 2 GHz 频率时, LTE 无法满足 600 km 时速的车地通信的要求。

文献[9]中仿真了 5.9 GHz 时 LTE 系统在不进行重传的情况下, 移动台不同移动速度下的误块率(BLock Error Rate, BLER)性能曲线。如果以 LTE 规范定义的误块率指标 10^{-1} 计算, 可以看到, LTE 系统最高能支持 400 km 左右时速的车地通信。

目前 5G 已经商用化, 5G 新无线电(New Radio, NR)支持 15 kHz、30 kHz、60 kHz、120 kHz 和 240 kHz 的子载波间隔。在 5G 系统中, 可以根据运动速度的大小自适应调整参考信号(导频信号)的密度^[10], 当速度快的时候, 参考信号的密度增大, 速度小的时候, 参考信号的密度减小。在子载波间隔为 60 kHz 时, 通过采用自适应设置参考信号导频密度的方法, 可以支持 600 km 列车时速下的车地通信。

虽然在 2 GHz 频段 LTE 无法支持 600 km 时速的车地通信, 但可以采用一些技术手段克服或减小多普勒效应的影响。例如, 可以通过降频的方法减少多普勒频移, 文献[11]中的结果表明 450 MHz 频段的 LTE 可以满足 600 km 时速以上车地通信的需要。另外, 也可以采用特殊传输媒介进行车地传输, 例如采用漏泄电缆或漏泄波导进行车地通信, 可以一定程度上减少高速运行带来的多普勒频移。采用漏泄电缆或漏泄波导时, 列车在高速前进中, 安装在列车上的天线与漏缆/漏泄波导的电波直射径入射角总是约 90° , 多普勒频移约为 0, 因此多普勒频移可得到抑制。

2) 传输时延

LTE 无线系统传输中涉及的主要网元包括终端、基站以及核心网。

数据传输时延是指终端 IP 层与无线通信系统之间的数据包的传输时间。LTE 系统整个时延的构成, 分解为各个网元的处理时延、空口传输时延以及 S1 接口的传输时延。数据传输时延分解见图 4。

LTE 无线通信系统中, 为了保证数据的有效传输, 提供 MAC 和无线链路控制(Radio Link Control, RLC)层的重传机制。

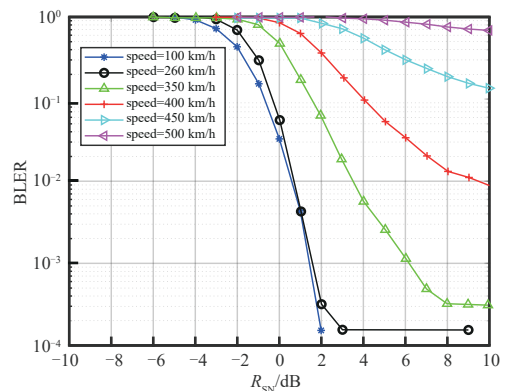


Fig.3 BLER of 5.9 GHz LTE at different speeds
图3 5.9 GHz LTE 系统在不同速率下的误块率

MAC 层通过混合请求重传 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ) 机制来实现, RLC 层通过请求重传 (Automatic Repeat Request, ARQ) 的机制来实现, 相应的数据重传也会引入时延。

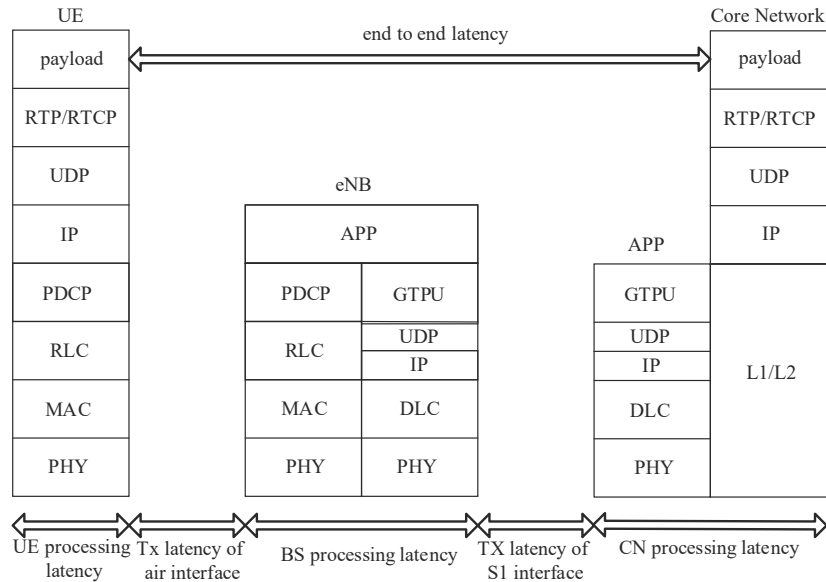


Fig.4 Decomposition of LTE transmission latency

图4 LTE传输时延分解

另外各个网元的处理也会导致一些时延, 加上空口与 S1 链路上的时延, 具体时延见表 1。

表1 分段的LTE传输时延

Table1 Segments of LTE transmission latency

latency segments	latency/ms
UE processing latency	<10
Tx latency of air interface	<5
BS processing latency	5~20
Tx latency of S1 interface	<10
CN processing latency	5~20

从以上分析可以看出, LTE 系统业务数据端到端的单向传输时延小于 100 ms。在城市轨道交通车地通信系统中, 实测 LTE-M 系统的车地平均传输时延为 11 ms 左右^[12], 在公路智能交通系统的 C-V2X 通信系统中, 采用多接入边缘计算 (Multi-access Edge Computing, MEC) 技术时端到端传输时延在 15~35 ms 之间^[13]。而在卡车的虚拟编组 5G 通信性能测试中, 在增强移动宽带 (enhanced Mobile Broadband, eMBB) 场景下环回时延小于 5 ms, 超可靠超低时延通信 (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) 场景下环回时延小于 2 ms^[14]。在此次测试中数据传输都没有经过核心网, 地面设备仅仅通过基带单元 (Base Band Unit, BBU) 以及无线频率和接入单元 (Radio frequency & Antenna Unit, RAU) 进行传输和处理, 因此大大减小了传输时延。

3) 快速切换能力

LTE 切换过程及切换中断时间分析如图 5 所示^[15-16]。切换中断时间包括接收切换命令中断时延、无线资源控制 (Radio Resource Control, RRC) 处理时延、去附着和同步时延、随机接入时延和切换完成阶段时延, 理论分析总的切换中断时延超过 49.5 ms。在城市轨道交通车地通信系统中, 经过一些优化, 实测 LTE-M 系统的平均切换时延为 31 ms 左右^[12]。5G 的切换过程与 LTE 系统区别不大, 切换时延也大致在 20 ms 到 50 ms 之间。因此, 目前的 LTE 系统和 5G 系统的切换时延均无法满足 5 ms 的端到端传输时延的要求。

4) 综合业务承载能力

LTE 系统通过给不同的业务划分不同的优先级, 并在调度时根据业务优先级分配业务, 可以在保证列车运行控制等业务 QoS 的同时, 尽量满足乘客上网等业务的数据传输。在 5G 系统中引入了网络切片, 通过切片将一个物理网络分为多个虚拟网络, 满足不同的应用需求。每一个虚拟网络根据不同的服务需求, 比如时延、带宽、安全性和可靠性等来划分, 以灵活地应对不同的网络应用场景。因此, 现有的 4G 系统通过不同的业务等级, 5G 系统通过网络切片技术可实现多种业务的同时传输。

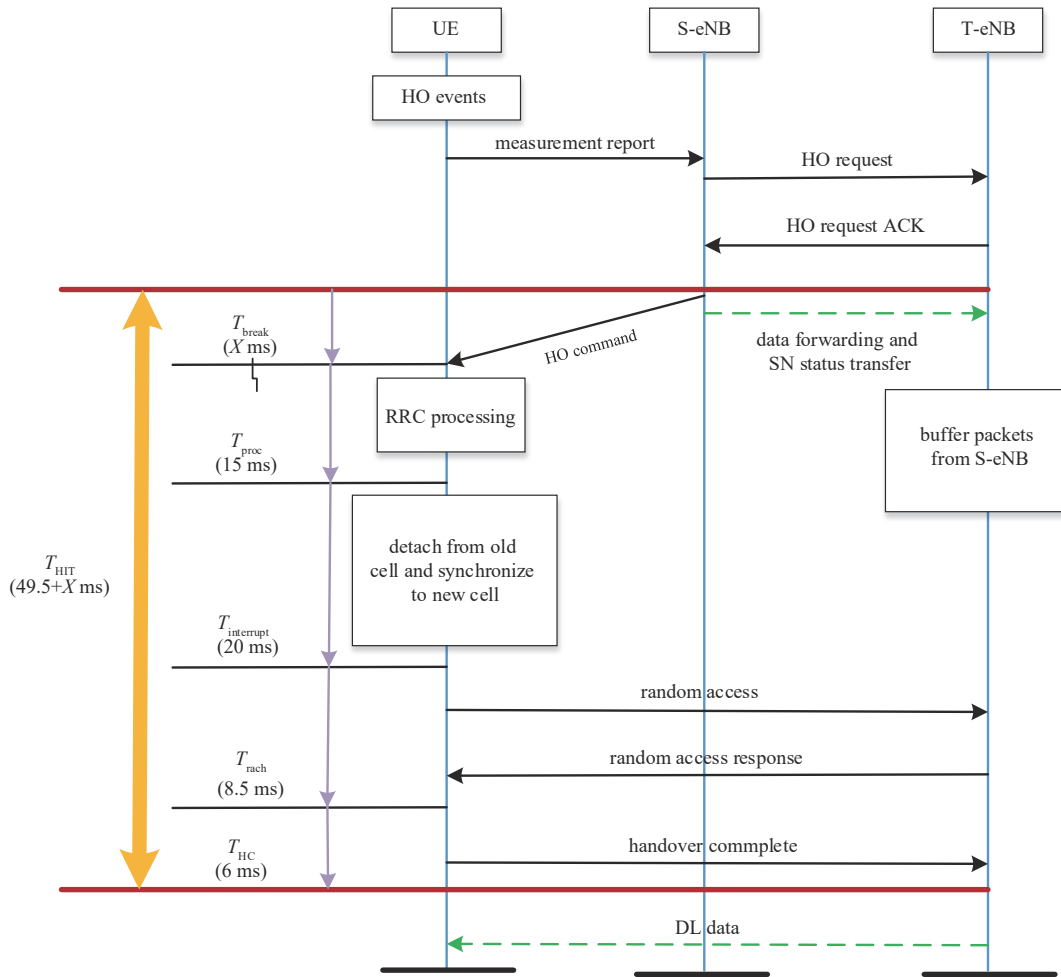


Fig.5 LTE handover process and analysis of handover latency
图 5 LTE 切换过程及切换时延分析

5) 讨论

现有的 4G 系统在 2 GHz 频段无法满足 600 km 时速的高速磁悬浮车地通信的需要，但可以通过降频或漏泄电缆/漏泄波导特殊传输媒介等手段减少多普勒效应的影响，5G 系统则可以通过自适应地配置参考信号，增加参考信号密度来适应高速情况下车地通信的要求。现有的 4G 和 5G 系统的传输时延正常情况下大于 10 ms，要满足牵引控制端到端传输时延小于 5 ms 的要求，需要对通信协议进行改进或重新配置，例如采用 MEC 网络架构，或端到端通信不经过核心网直接经过空口传输等手段等。

3 结论

本文首先总结了高速磁悬浮系统车地通信的业务和需求，分析了民用通信系统和铁路地铁通信系统常见的 WLAN 技术、38 GHz 毫米波技术和 LTE/5G 技术在高速磁悬浮系统车地通信系统中的适应性，并对这些通信技术在高速磁悬浮系统车地通信环境中的应用进行了讨论，未来的高速磁悬浮系统车地通信可以基于 WLAN 或 38GHz 毫米波技术，在此基础上进行通信协议的改进开发，也可以基于 4G/5G 技术，通过降频、采用漏泄电缆/漏泄波导、自适应改变参考信号密度等技术手段，并优化通信协议和切换算法的设计来实现。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. [2022-03-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm. (The Central People's Government of the People's Republic of China. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the "National Comprehensive Three-dimensional Transportation Network Planning Outline"[EB/OL]. [2022-03-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.)
- [2] 刘留, 裴陈成, 李铮, 等. 真空管道高速飞行列车车地宽带无线通信关键技术的思考[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 65-73. (LIU

- Liu, QIU Chencheng, LI Zheng, et al. Thoughts on key technologies of broadband wireless communication for high-speed vacuum pipeline flying train[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1):65–73.)
- [3] 3GPP TS 22.261 V18.5.0, Service requirements for the 5G system(Release 18)[S]. Valbonne:3GPP, 2021.
- [4] ZHAO Y, HAGGMAN S-G. Sensitivity to Doppler shift and carrier frequency errors in OFDM systems—the consequences and solutions[C]// Proceedings of Vehicular Technology Conference-VTC. Atlanta, GA, USA:IEEE, 1996:1564–1568.
- [5] Part 11:Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. IEEE, 2020.
- [6] SUI Kaixin, ZHOU Mengyu, LIU Dapeng, et al. Characterizing and improving WiFi latency in large-scale operational networks [C]// Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York, NY, USA:ACM, 2016:347–360.
- [7] HIERTZ G R, DENTENEER D, MAX S, et al. IEEE 802.11s: the WLAN mesh standard[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(1):104–111.
- [8] 张仿琪. 毫米波无线通信系统在高速磁浮交通中的应用[D]. 上海:复旦大学, 2011. (ZHANG Fangqi. Application of millimeter wave wireless communication system in high speed maglev traffic[D]. Shanghai, China:Fudan University, 2011.)
- [9] CURA Elmer, FONSEKA J P. Soft-decision differential phase detection of Turbo-coded M-ary CPFSK signals over ricean channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5):1722–1728.
- [10] German Ministry of Transportation and Digital Infrastructure(BMVI). Deliverable D3.2:radio technology performance report[R/OL]. The DREAM project. [2022–03–24]. https://convex-project.de/onewebmedia/D3.2_Radio_Performance.pdf.
- [11] 3GPP TS 28.211 V17.0.0, Physical channels and modulation(Release 17)[S]. Valbonne:3GPP, 2021.
- [12] 冯进. 低真空管道高速磁悬浮车地通信系统仿真测试平台的设计与开发[D]. 北京:北京交通大学, 2021. (FENG Jin. Design & development of simulation test platform for low-evacuated tube high-speed maglev vehicle-ground communication system[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021.)
- [13] ZHAO Hongli, JIANG Hailin. LTE-M system performance of integrated services based on field test results[C]// 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference(IMCEC). Xi'an, China:IEEE, 2016:2016–2021.
- [14] EMARA M, FILIPPOU M C, SABELLA D. MEC-assisted end-to-end latency evaluations for C-V2X communications[C]// 2018 European Conference on Networks and Communications(EuCNC). Ljubljana, Slovenia:IEEE, 2018:157–161.
- [15] MOTO K, MIKAMI M, SERIZAWA K, et al. Field experimental evaluation on 5G V2N low latency communication for application to truck platooning[C]// IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Honolulu, HI, USA:IEEE, 2019:1–5.
- [16] PARK Hyun-Seo, LEE Yuro, KIM Tae-Joong, et al. Handover mechanism in NR for ultra-reliable low-latency communications[J]. IEEE Network, 2018, 32(2):41–47.

作者简介：

周梓博(1999–)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为城市轨道交通和磁悬浮通信系统。email:21120285@bjtu.edu.cn.

蒋海林(1974–)，男，博士，副教授，主要研究方向为城市轨道交通和磁悬浮通信系统。email:lhjiang@bjtu.edu.cn.

彭良勇(1972–)，男，学士，教授级高级工程师，主要研究方向为铁路和高速磁浮系统的通信信息技术。

于行健(1988–)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为铁路和高速磁浮系统的通信信息技术。

赵红礼(1973–)，男，硕士，副教授，主要研究方向为城市轨道交通通信系统。