

文章编号: 2095-4980(2024)05-0467-09

低轨卫星与 5G-R 融合网络架构设计

韩紫杰¹, 赵连奎², 高媛³, 苏昭阳¹, 段相龙¹, 周涛¹, 刘留^{*1}, 尹毅⁴

(1.北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2.中国铁路济南局集团公司 电务部技术科, 山东 济南 250031;
3.中国铁道科学研究院通信信号研究所, 北京 100081; 4.中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

摘要: 由于地面网络覆盖不均匀, 信号质量不够稳定, 无法实现铁路交通网络的全程、快速、实时监测, 阻碍了我国铁路交通网络的快速发展。同时, 低轨卫星通信与地面 5G 的融合成为热点, 二者的融合能够使卫星网络作为地面网络的有效补充。当前星地融合较少用于 5G-R 技术场景中。本文梳理了铁路卫星通信以及星地融合网络的研究现状与发展趋势; 分析了铁路通信系统中各业务的通信需求。在此基础上, 提出低轨卫星与 5G-R 融合网络架构。在弥补铁路通信网络覆盖盲区的同时, 提供大容量的信息回传, 有效保障铁路交通的安全运行, 实现铁路交通的信息化、智能化管理。

关键词: 铁路交通; 低轨卫星; 5G-R 技术; 融合网络架构

中图分类号: TN972+.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024002

Design of Low Earth Orbit satellite and 5G-R fusion network architecture

HAN Zijie¹, ZHAO Liankui², GAO Yuan³, SU Zhaoyang¹, DUAN Xianglong¹,
ZHOU Tao¹, LIU Liu^{*1}, YIN Yi⁴

(1.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Techonology Section of Signal and Communication Department, China Railway Jinan Group Co., Ltd, Jinan Shandong 250031, China; 3.China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3.China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: Due to uneven ground network coverage and unstable signal quality, it is impossible to achieve full, fast, and real-time monitoring of the railway transportation network, which hinders the rapid development of China's railway transportation network. At the same time, the integration of Low Earth Orbit(LEO) satellite communication and ground 5G has become a hot topic, and the fusion of the two can make satellite networks an effective supplement to ground networks. The current application of satellite ground fusion in 5G-Railway(5G-R) technology scenarios is relatively limited. This article first reviews the current research status and the development trends of railway satellite communication and satellite ground fusion networks, points out development trends, and then analyzes the communication needs of various businesses in railway communication systems. Based on this, a network architecture that integrates low orbit satellites with 5G-R networks is proposed, which not only fills the blind spots in railway communication network coverage, but also provides high-capacity information feedback. It can effectively ensure the safe operation of railway transportation and achieve information and intelligent management of railway transportation.

Keywords: railway transportation; Low Earth Orbit satellites; 5G-Railway; integrated network architecture

我国经济水平的快速增长, 对铁路交通行业的迅速发展起着推动作用。2022 年, 我国铁路集团竞相出台了规划文件, 对提升铁路的智能化水平提出了新要求^[1]。与此同时, 随着我国高速铁路的快速发展, 高速磁悬浮列车^[2]等许多铁路新技术也不断涌现, 对铁路通信技术提出了更高更智能化的要求。但我国偏远地区铁路通信仍存在通信制式单一、输电线路规模巨大、维护手段落后等问题。目前仍待解决的问题之一是如何在自然环境恶劣、

收稿日期: 2023-12-30; 修回日期: 2024-03-16

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划资助项目(N2023G060); 国家自然科学基金资助项目(62341102)

*通信作者: 刘留 email:liuliu@bjtu.edu.cn

覆盖面不足、通信基础设施不完善的条件下,处理复杂多样的列车通信业务,保证数据高可靠性、低时延传输,实现对铁路运行状态及环境的实时监测和判断^[3]。

我国铁路以地面通信网络建设为主,与地面通信网络相比,卫星通信作为主要的无线通信技术,具有许多优势,如覆盖面广、不受地域限制、建立便捷等,并在国内外铁路行业得到了广泛的研究和应用^[4]。与其他陆地手段相比,铁路卫星通信具有地理上不受限制、通信距离远和分配灵活等优势,能够有效弥补地面网络的不足^[5]。将低轨卫星网络用于铁路交通领域,在弥补铁路通信网络覆盖盲区的同时,能有效保障铁路交通的安全运行,提高铁路交通信息化管理水平^[6]。

为突破地形限制,将卫星网络与地面网络融合,构建全球无缝覆盖的星地融合网络,已成为当前学术界和产业界研究的热点^[7]。从铁路角度出发,当前铁路通信技术的重点在于铁路 5G(5G-R)专用移动通信系统的建设。5G-R 与 5G 技术,二者具有一致的工作原理,但在业务类型、组网方式和性能要求上有所区别。当前 5G-R 既是落实国家 5G 新基建战略部署的重要举措,也是确保铁路 5G 智能链接的保障^[8],因此,在低轨卫星与 5G 融合的基础上,针对组网方式展开低轨卫星与 5G-R 融合的研究具有重要意义。

因此,本文调研铁路系统各业务的通信需求,利用地面蜂窝网络低时延、大带宽的优势以及卫星网络广覆盖的特点,设计实现不受地理环境限制的远距离覆盖^[1]融合网络架构,在当前铁路 5G-R 网络发展及星地融合网络发展的基础上展开低轨卫星和 5G-R 网络融合架构的研究。

1 低轨卫星与 5G-R 融合网络现状及发展趋势

1.1 5G-R 发展现状

铁路移动通信专用网络(Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R)的成功应用,为我国铁路技术创新和高质量发展提供了最重要的基础通信支撑,为我国占领世界铁路技术高地、持续保持领先地位提供了巨大助力^[9]。但随着通信技术和铁路行业的不断创新, GSM-R 已无法满足铁路业务发展与技术创新提出的新需求。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出:为解决目前 GSM-R 存在承载能力不足、频段干扰严重、生命周期正走向终结等问题,将在智能铁路中实施新一代铁路通信专网工程^[10]。国际铁路联盟(International Union of Railways, UIC)以 5G 为系统核心,在全球范围内推动面向未来铁路移动通信系统的升级。围绕加快推进 5G 技术铁路应用、发展我国铁路 5G 专网制定了相关实施路线和建设原则^[11]。随着铁路 5G 技术研究的推进,一系列关于 5G-R 应用的相关研究取得进展。面对不断发展的铁路通信系统及大量的智能化铁路业务需求,结合低轨卫星优势对地面 5G-R 网络进行有效补充具有重要意义。

1.2 卫星通信在铁路场景中的应用现状

20 世纪 80 年代初期,中国铁道部开始探讨卫星通信在铁路的应用,并于 1988 年 5 月组织北方交通大学、铁道科学研究院通信信号研究设计院共同完成了《卫星通信在铁路上发展的研究》,为铁路卫星通信发展提供了决策依据。同期,参与中国广播卫星公司 1987 年建立并运营的国内第一个甚小孔径终端(Very Small Aperture Terminal, VSAT)卫星数据通信网。铁道部分别在北京、乌鲁木齐、兰州和柳州设立了卫星小数据站,为铁道部电子中心和 3 个铁路局电子中心提供卫星数据通信业务。1990 年分别在广州和海口设立了卫星小电话站,利用 VSAT 卫星电话系统提供两地的卫星电话业务。1993 年底,铁道部购买亚洲卫星 2 号 Ku 频段 1/4 转发器作为空间段,并于 1995 年开始建设联结铁道部和各铁路局及铁路分局间的 VSAT 卫星通信网。该卫星网经过固定地球站和可搬移地球站与铁路地面通信网相连接,提供话音、数据、会议电视等通信服务。1997 年开始建设联结全国各铁路局及铁路分局主要车站的 VSAT 卫星数据通信网,通过地球站和铁路地面数据通信网相连接,为铁路运输管理信息系统、铁路调度信息系统和客票发售系统提供卫星数据通信服务。

日本较早利用卫星网络作为自然灾害情况下的应急通信网络;欧洲、法国等也不断通过相关技术研究使列车上的乘客通过卫星接入到互联网中^[12];俄罗斯、非洲、欧亚等地区已经部署铁路卫星通信系统并投入商用;Hughes 公司成功实现了基于铁路交通的微小卫星通信地球站的安装应用,主要在印度和俄罗斯进行部署;在俄罗斯的铁路卫星项目中,通过 VSAT 实现的宽带连接已部署在从莫斯科到纳兹兰的长达 1 900 km 的铁路上^[13]。

当前国内外关于卫星通信在铁路行业应用的相关研究仅针对卫星网络的通信,主要用于应急通信、北斗导航、定位等场景,且卫星多作为简单转发的角色,没有充分利用地面与卫星网络结合的优势。

1.3 星地融合网络架构发展现状

随着卫星与 5G 技术的成熟发展,两者的融合使用逐渐成为业界关注的重点^[14-17]。国际电信联盟(International

Telecommunication Union, ITU)、第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)、SaT5G(Satellite and Terrestrial Network for 5G)等标准化组织组建了专业团队对星地融合相关问题进行深入研究, 业界部分研究机构也投入到此项研究工作中^[18]。

1) ITU 提出卫星与 5G 融合的 4 类应用场景, 包括小区回传、中继到站、动中通和混合多播, 并提出支持这些应用场景必须考虑的关键因素, 包括多播支持、智能路由支持、动态缓存管理及自适应流支持、延时、一致的服务质量、3GPP 非陆地网络架构示意图网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)/软件定义网络(Software Defined Network, SDN)兼容、商业模式的灵活性等^[19]。

2) 3GPP 也对卫星与地面 5G 的融合开展了一系列探讨, 提出 5G 融合非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)架构^[20-22], 基于建设模型对相关的卫星接入网络协议进行分析、评估。后续 3GPP 将继续对 5G 通信进行深入研究, 加强对 5G 市场现有及新增服务需求的分析, 讨论卫星终端的建立、配置和维护等标准, 并重点分析卫星网络与地面网络的无缝切换技术。3GPP 根据卫星承担的不同功能, 提出了从新空口(New Radio, NR)网络架构到 NTN 网络架构的 3 种映射方式^[22]: a) 卫星仅对 NR 信号进行透明转发; b) 卫星搭载 5G 基站分布单元(The next generation Node B-Distributed Unit, gNB-DU); c) 卫星搭载完整 5G 基站(The next generation Node B, gNB)。

3) SaT5G 将 5G 星地融合网络的应用领域聚焦于通过卫星回传以及 5G 的 eMBB(Enhanced Mobile Broadband)场景, 并提出了 SaT5G 星地融合网络架构及面向 eMBB 场景用例。该融合网络由地面终端、传输网、5G 核心网以及服务提供商等部分构成, 其中卫星网络具有切片感知能力, 可作为地面基站与运营商核心网之间回传的传输网络, 并能为多个运营商提供服务。值得注意的是, 在上述网络架构中, 单个 5G 核心网能够管理多个用例, 同时在单个用例中也可以调用不同卫星网络运营商的多颗卫星。这两种功能的结合使端到端网络实现了高度的自由度和最优的资源分配, 为客户提供了最佳的服务体验。

相比之下, SaT5G 项目侧重于利用卫星作为 5G 网络的回传场景, 而 NTN 的研究侧重于卫星链路和地面链路的物理层空口融合^[19]。

目前形成标准的星地融合 5G 网络还处于初步融合阶段, 卫星主要工作在透明转发模式, 无法对用户数据做星上处理, 因此存在通信时延高、带宽受限等缺点。为进一步提高星地融合 5G 网络的系统性能, 学术界已经提出了部分核心网功能甚至特定业务系统上星的构想, 为进一步深入研究星地融合网络架构提供了思路。

2 低轨卫星与 5G-R 融合网络架构

2.1 铁路通信业务需求

铁路通信业务需求如表 1 所示^[23], 根据目前铁路通信业务的性能、安全等级, 从吞吐量、传输时延、分组丢失率、可靠性、安全性等多方面讨论铁路通信业务需求。主要分析如下^[1]:

1) 列车安全预警、应急通信、列车安全视频监控等与行车相关的业务。这些业务关系到行车安全、人员生命财产安全以及应对各类突发状况的能力, 需满足高优先级、低时延及低分组丢失率的要求, 传输类型包括监控视频、语音等信息。

2) 铁路运行控制中心根据列车当前所处环境和终端相关设备的状态信息以及车地、车车的位置数据信息, 对列车控制室发出的即时调度指令。其优先级、实时性、可靠性等要求高, 主要传输控制信令, 属于多包小数据传输, 仅能容忍少量冗余数据的丢失, 以防做出错误的决策判断。

3) 与监测相关的业务。对网络带宽要求较高, 主要完成 5G-R 网络中的运营维护业务, 如列车各部件的状态检测、智能识别监控与故障诊断等铁路维护工作, 根据特定的标准检测其是否达到预先确定的维护目标。该工作有助于保持远程站点对列车的维护进程, 实现列车在其生命周期内的良好运营。

表 1 铁路通信业务需求

Table1 Railway communication business requirements

application services	throughput	transmission delay/ms	packet loss rate	priority	real-time	reliability	security level
train safety warning	low	50	10 ⁻⁶	1	high	high	high
emergency communication	relatively high	100	10 ⁻⁶	1	very high	very high	high
train safety video monitoring	high	150	10 ⁻³	3	high	high	ordinary
voice communication	relatively high	100	10 ⁻³	3	relatively high	high	high
train control system	relatively high	less than 10	10 ⁻⁵	1	very high	very high	high
autonomous driving	high	less than 6	10 ⁻⁹	1	very high	very high	high
status monitoring and remote fault diagnosis	relatively high	50	10 ⁻⁶	1	very high	relatively high	high

2.2 总体网络架构

低轨卫星与 5G-R 网络的融合旨在形成一张无缝衔接的通信网络，其融合网络架构如图 1 所示，主要包括终端、卫星网络和地面网络 3 部分。

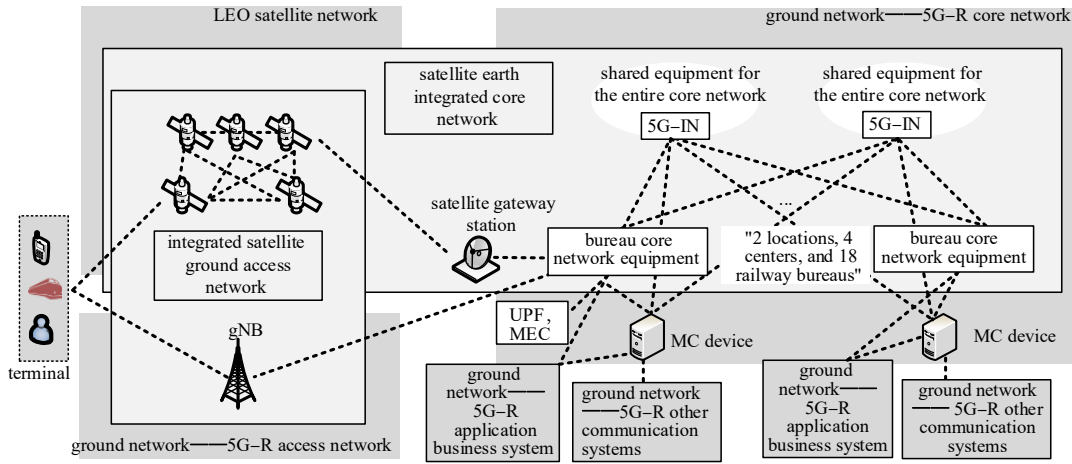


Fig.1 LEO satellite and 5G-R fusion network architecture

图 1 低轨卫星与 5G-R 融合网络架构

终端主要包括手持设备、车载终端以及监测终端，为列车司机、铁路沿线维护管理人员等用户提供业务接入与应用等功能。卫星网络包括高效互联的多颗卫星与星上移动通信网络，其中，星上移动通信网络包括星上基站 (Satellite-generation Node B, Sat-gNB) 功能、星上核心网部分功能及星上边缘计算 (Satellite-Multi-access Edge Computing, Sat-MEC) 功能。星上基站功能将全部基站功能部署在卫星上；星上核心网则根据功能及业务需求，将核心网部分功能部署下沉，如星上用户面功能 (Satellite-User Plane Function, Sat-UPF) 等；星上边缘计算功能则是针对控制面消息处理时延较大的情况，引入计算存储节点，完成融合网络中数据信息的收集、处理、压缩存储和转发。数据信息主要包括网络设备状态信息、终端接入检测信息、传输数据信息、相关通信质量信息以及各传感器感知信息。同时利用 MEC 技术将各网络中的计算平台从核心网转移到接入网边缘，提高数据的计算处理效率。

地面网络为完整的 5G-R 网络，由终端设备、接入网、核心网、MEC、应用业务系统、其他通信系统、铁路宽带集群通信 (Mission Critical, MC) 设备等重要部分组成。其中 5G-R 核心网负责提供业务的控制与连接，可分为全路公用核心网以及局集团公司核心网，负责为用户提供网络连接，对用户进行管理，实现业务承载，并提供到应用系统的接口；UPF 为 5G-R 网络中的用户面功能下沉；MEC 负责数据的存储和处理等，二者通常部署在网络边缘，如车站或站场，用于降低网络时延和提升数据的处理效率，在融合网络架构中部署在卫星上；5G-R 的应用业务系统主要为列控设备、车车通信设备、超视距通信设备等，这些通信设备不需要通过 MC 系统，即可实现与 5G-R 核心网的互通，并将其业务承载在 5G-R 网络；其他通信系统主要指 5G-R 系统外的通信系统，包括 GSM-R 系统、有限调度通信系统、多媒体调度通信系统、铁路 IP 多媒体子系统 (Internet Protocol Multimedia Subsystem, IMS) 电话网、铁路程控交换网等，这些系统通过 MC 系统与 5G-R 核心设备实现互联互通；5G-R 除了提供通用的数据承载业务，基于 MC 系统还能够提供关键语音业务、关键视频业务和关键数据业务等铁路特色业务；运营与支撑系统提供网络设备的管理、接口监测、用户、终端、SIM 卡等管理功能。

信关站是卫星接入地面网络进行数据交换的通信节点，在地面部署信关站接入地面网，并通过光纤电路接入总网络运营中心，进而接入互联网和铁路通信专网。

在整体逻辑功能上，本文所设计的低轨卫星与 5G-R 融合网络仍由承载网、接入网与核心网构成^[24]，可实现卫星网络与现有地面 5G-R 网络的兼容。图 2 为承载网、接入网、核心网融合网络架构的具体设计，这 3 个架构层层递进，最终实现低轨卫星与 5G-R 融合网络的资源共享。

2.2.1 承载网融合架构设计

承载网的作用是把网元数据传送至另一个网元上，在传统的地面网络中，数据的回传由地面承载网实现。通过承载网融合，卫星承载网可以快速建立临时回传链路，为基站提供降级回传服务，并快速拓展 5G 网络覆盖范围。传统 5G 星地承载网融合网络中，卫星的作用侧重于对地面网络将用户数据回传至核心网的补充，从而接

入到互联网中。在 5G-R 网络中，大量的监测数据、列车运行数据需回传至各铁路局以及总调度指挥中心，此时卫星的重要作用则在于利用其广覆盖的优势，实时回传大量监测数据，同时将数据快速同步给各铁路局及总调度指挥中心^[25]，保障列车及运行环境安全。如图 2 承载网融合部分(1)所示，终端接入附近基站后，卫星快速将远距离实时信息回传至各铁路局，使各铁路局共同、实时掌握监测数据；各铁路局进一步将数据传至中心共用设备，高效安全执行调度、环境监测等铁路业务。

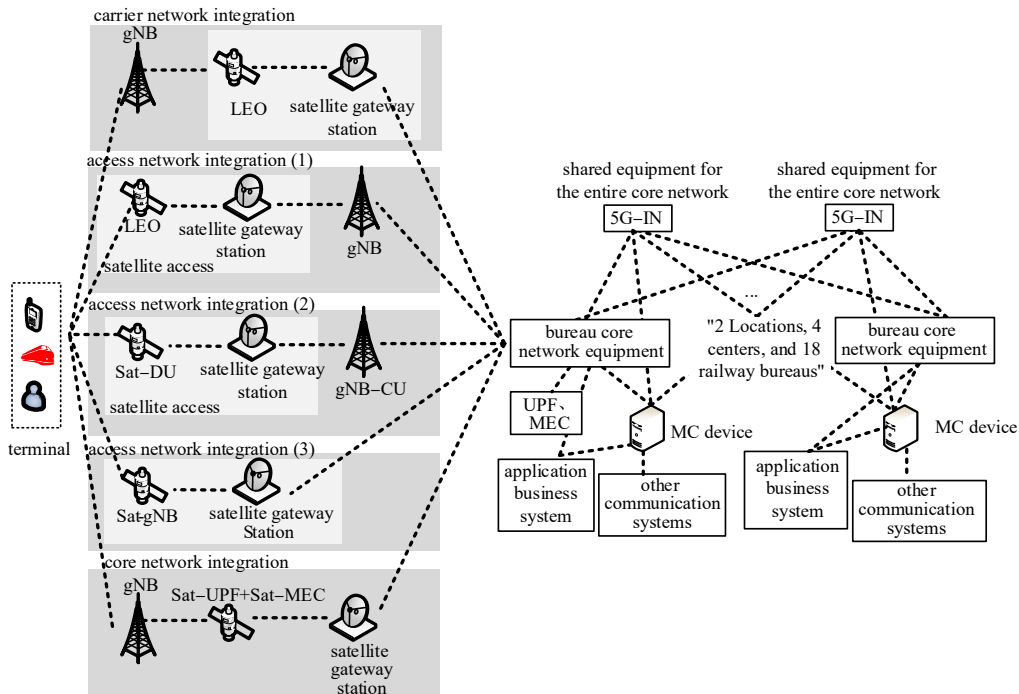


Fig.2 Design of network architecture for the integration of LEO satellites with 5G-R carrier network, access network, and core network
图 2 低轨卫星与 5G-R 承载网、接入网、核心网融合网络架构设计

2.2.2 接入网融合架构设计

接入网融合架构可以很好地用于地面网络基站建设困难的偏远地区，5G-R 终端可以直接通过低轨卫星接入到网络中。不同于 5G 网络卫星的作用在于补充覆盖范围，5G-R 网络中，卫星的作用不仅是实现偏远、危险地区的广域覆盖，更重要的在于根据铁路业务需求及基站位置部署情况，通过卫星接入降低时延，增大容量。当前 3GPP 等组织与机构的研究主要针对星地接入网的融合架构设计。随着星上计算与存储能力的不断增强，卫星不再局限于中继回传的作用，可以承担基站的部分或全部功能，进而形成不同的网络架构。本文根据卫星星上载荷能力，将卫星分为 3 种类型^[26]，并对 3 种类型的接入网融合架构进行设计。

1) 基于透明转发的接入网融合架构

第一类接入网融合架构如图 2 接入网融合部分(1)所示，卫星在用户与地面接入网之间起到一个透明转发的功能。终端通过卫星转发接入到地面基站，对于包括物理层的 5G NR 协议是完全透明的，不影响 5G-R 网络架构和传输协议及体制。卫星可以通过馈电链路和多个地面站相连接，同时也可以根据能力和部署需要配置星间链路。

2) 卫星具有部分 gNB 功能的接入网融合架构

第二类接入网融合架构如图 2 接入网融合部分(2)所示，星上载荷实现 gNB-DU 功能，地面关口站实现 gNB-CU(Centralized Unit)功能。终端首先接入到卫星，由卫星 gNB-DU 实现部分功能，之后接入地面基站，实现 gNB-CU 功能，卫星之间可以根据能力和部署需要配置星间链路。在该架构下，gNB-CU 多数情况下部署在路局，Sat-DU 可以实现快速的远距离接入。

3) 卫星具有全部 gNB 功能的接入网融合架构

第三类接入网融合架构如图 2 接入网融合部分(3)所示，星上实现 gNB 全栈功能，终端可以直接接入卫星，由卫星实现基站功能。为进一步提升星地链路的性能，降低控制面的信令传输时延，卫星充当 5G-R 接入网基站，使原本在地面蜂窝基站上的操作都可以放在卫星上执行。这种模式下，卫星之间可以通过星间链路进行星间信息交互，此时卫星不仅实现了广覆盖，还能够实现铁路业务快速、实时、远距离接入各铁路局及中心，满足铁路系统的智能化需求。

2.2.3 核心网融合架构设计

随着卫星网络的发展以及铁路业务需求的丰富,为尽可能缩短用户面时延,提出卫星核心网的概念。根据铁路业务功能需求,进一步考虑星上处理能力。卫星节点不仅支持常见的无线接入功能单元 gNB,还部署了部分核心网功能。考虑到卫星的体积、算力和存储资源有限,核心网网元可以考虑仅部分部署在卫星上。网络架构如图 2 核心网融合部分所示,终端首先接入基站,其次接入到卫星网络中,卫星可以通过其上部署的部分核心网的功能为用户提供服务。基于这种网元部署模式,卫星可以形成单独的服务网络,也可以充当接入网络节点连接到其他卫星或地面核心网络,满足用户无处不在的随机接入请求,并可避免数据不断回传至地面核心网带来的传输时延。由于铁路场景中核心网部署在各铁路局及中心城市,用户面的下沉及边缘计算不仅缩短了时延,更满足了铁路多样化的业务需求。

这种部署方式,可以满足以下 3 种用户需求^[27]: a) 高安全等级的特殊用户为了避免业务落地过程中遭到窃听; b) 在某些场景中,落地交换可能具有过大的时延,如同一颗卫星下 2 个应急用户的信息交换,将 UPF 调度在该卫星上可明显降低时延; c) 当地面与卫星之间的互联因不可控因素而导致不可用时,将 UPF 部署在卫星上可提供基本的服务能力,提升系统的可靠性。

3 融合网络架构应用场景

3.1 星地融合网络的数据回传场景

星地融合数据回传是承载网融合在铁路交通场景的具体应用,主要体现在如应急通信、偏远地区调度业务的数据回传以及列控、运营维护数据回传等场景中,旨在建立卫星回传网络,提供大容量、广覆盖的数据回传服务,弥补地面网络的不足。

在铁路应急通信场景中,因遇到突发性、严重的自然灾害、人为因素导致其他所有通信手段无法使用时,可以利用卫星通信覆盖区域广和快速部署的优势将信息发送到应急指挥中心^[28]。同时各铁路局也能够及时下达指令,处理相关问题。

对于大量的运维和监测数据,如铁路正式投运后,需要长期开展路基沉降监测、路基冻胀监测、边坡滑坡监测等,这些数据量非常大但对时延和可靠性要求并不高,因此,这部分数据可以实时在地面网络无法完全覆盖的情况下通过卫星回传至中心,进行数据分析,同时还可起到备份作用。

调度通信数据对铁路交通的高效运行起着重要作用。铁路运输调度管理系统需要铁路沿线有良好的网络支撑,指控中心利用卫星工作平台进行列车跟踪工作^[29],保障列车能够根据系统要求实时地将位置、列车运行状态参数回传到运营指挥中心,确保运营指挥调度中心能准确掌握所有列车的实时状态^[4]。调度通信的控制层数据可通过卫星网络回传,首先通过地面信关站接入到地面 5G-R 网络中,其次通过 MC 设备接入多媒体调度通信系统、宽带集群通信系统等,完成终端注册与注销、终端漫游感知、位置管理、语音视频组呼叫流程建立、数据业务等调度业务。

图 3 为星地融合网络数据回传场景的网络架构,终端通过接入网无缝接入至卫星网络或地面网络。在上述应用场景中,业务数据通过低轨卫星回传接入到地面站,进而接入到地面 5G-R 核心网中,并根据业务的不同经核心网转发至不同的通信系统网络中。

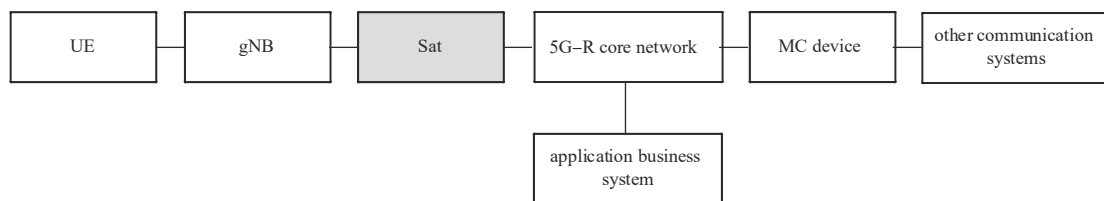


Fig.3 Network architecture for data backhaul scenarios in satellite ground fusion networks

图 3 星地融合网络的数据回传场景网络架构

3.2 星地融合 MEC 场景

MEC 服务器主要完成数据信息的收集、处理、压缩存储和转发。其中,数据信息主要包括网络设备状态信息、终端接入检测信息、传输数据信息、相关通信质量信息以及各传感器感知信息。边缘计算主要用于处理无线列车信号和监控、站内远程调车作业、战场自动化、货场货运等业务,具有低时延、数据不出场、安全性高的优点。在卫星星上部署边缘应用,使计算和存储资源都尽可能地靠近应用系统和数据源,从而提供合适的计算资源和就近服务能力,实现数据处理和存储,有效实现云端的数据共享,避免数据往返多次而导致的频谱资

源浪费。同时由于数据能够在边缘应用上完成计算，大大降低了时延(数据回传至核心网处理部分的时延)；通过消息数据的提前压缩处理，在一定程度上减小了控制面的消息处理时长，从而减小了系统时延，降低了传输的带宽负载，改善了用户体验，保证了业务数据的安全性。

图 4 为上述应用场景的网络架构图，在卫星上设置 MEC，用户通过基站接入到卫星，星载 MEC 能够提供的服务就不需要再通过回传链路向地面服务器获取，极大地缩短了传输时延。而星载 MEC 不能提供的服务，再路由回地面网络，接入相应的业务。

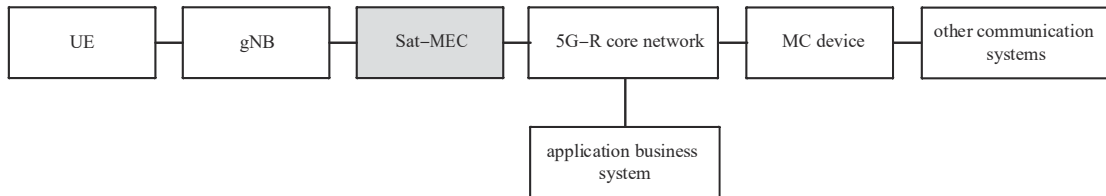


Fig.4 Network architecture of edge computing scenario for satellite ground integration
图 4 星地融合边缘计算场景网络架构

3.3 UPF 下沉场景

星载核心网与不同的网络技术相结合，可以满足更多的业务需求，进一步扩展卫星网络的适用场景，真正让卫星网络成为蜂窝地面网络的有效补充，实现全域覆盖^[27]。UPF 是 5G 核心网业务面网元，支持用户设备(User Equipment, UE)业务数据的路由和转发，根据应用需要，可下沉部署边缘 UPF。UPF 位于核心网边缘，靠近应用系统，降低了传输时延，优化了业务体验，节省了传输带宽。UPF 具体用于列车调度通信场景中，完成控制面信令和控制消息注册等业务后的用户面点对点通信数据转发。

行车调度通信包括行车调度命令信息的传送以及列车、车站、工作人员等用户之间的点对点通信。调度通信的具体流程通常可分为控制面和数据面两部分。控制面数据通常需要转发至核心网，完成注册流程、通道的连接建立。当需要进行点对点的数据传输时，通过边缘部署的 UPF 网元，可以直接进行点对点的语音、视频传输，大大降低了时延。

上述场景描述的调度点对点通信架构如图 5~6 所示，其中虚线表示控制面信息流接入到核心网完成注册等业务，实线表示用户面信息流实现 2 个 UE 的数据转发。用户通过基站接入核心网下沉到卫星的 UPF 网元中，由星载 UPF 完成注册在同一卫星覆盖下的多个 UE 之间的互通。这种方式可有效扩大本地转发方式下的覆盖范围，若要进一步扩大虚拟网络组范围，也可以利用星间链路，在 2 个星载 UPF 之间建立连接。

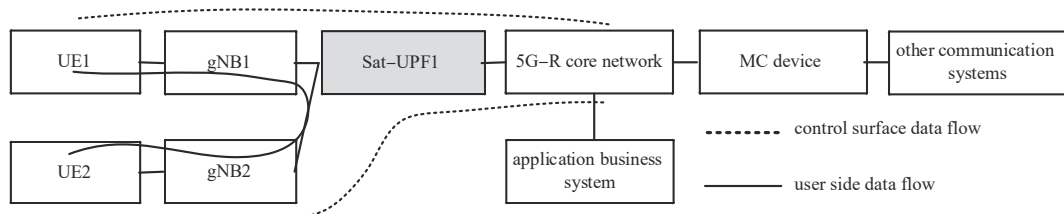


Fig.5 UPF sinking network architecture for both communication parties within the same satellite coverage range
图 5 通信双方在同一卫星覆盖该范围下的 UPF 下沉网络架构

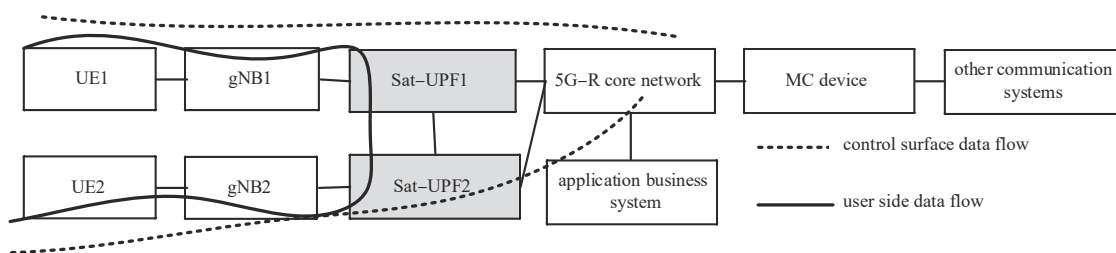


Fig.6 UPF sinking network architecture of communication parties in different satellite coverage areas
图 6 通信双方在不同卫星覆盖该范围下的 UPF 下沉网络架构

4 结论

本文在当前 5G-R 与铁路卫星通信发展的基础上, 结合低轨卫星与 5G 融合网络的思路, 提出了低轨卫星与 5G-R 融合网络架构, 并通过分析铁路场景的业务需求, 设计了具体铁路应用场景下的融合网络架构, 在弥补铁路通信网络覆盖盲区的同时, 能有效保障铁路交通的安全运行, 提高铁路交通信息化管理水平。

低轨卫星与 5G-R 网络的优势互补将推动铁路不断向智能化发展, 实现二者之间的互联互通具有十分重要的意义。现阶段星地融合网络大多基于架构层面的融合, 接下来的研究方向将重点实现 5G-R 网络与 LEO 网络在物理层解决方案、基于 3GPP 标准的协议和资源控制、通用地面无线接入体系结构和接口协议规范及服务系统方面的融合, 逐步从业务融合到现在的体制融合再到未来的系统融合。

参考文献:

- [1] 陈四清,李凯. 面向高速铁路车站场景的多频段信道特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(6):801-808. (CHEN Siqing,LI Kai. Multi-band channel characterization for high-speed train station scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(6):801-808.) doi:10.11805/TKYDA2022212.
- [2] 周梓博,于行健,蒋海林,等. 高速磁悬浮列车车地无线通信技术的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(8):754-761. (ZHOU Zibo,YU Xingjian,JIANG Hailin,et al. Research on high-speed maglev train-ground wireless communication technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(8):754-761.) doi:10.11805/TKYDA2022047.
- [3] 滕颖蕾,李鑫,王剑,等. 基于 SDN 的铁路系统空天地融合网络架构[J]. 物联网学报, 2020,4(3):30-41. (TENG Yinglei,LI Xin,WANG Jian,et al. SDN enabled space-terrestrial integrated network architecture of railway system[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020,4(3):30-41.)
- [4] VIZZARRI A,MAZZENGA F,GIULIANO R. Future technologies for train communication:the role of Leo HTS satellites in the adaptable communication system[J]. Sensors, 2022,23(1):68. doi:10.3390/s23010068.
- [5] YANG Dongmei,ZHOU Yunhui,HUANG Wentao,et al. 5G Mobile communication convergence protocol architecture and key technologies in satellite Internet of Things system[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 465-476. doi: 10.1016/j.aej.2020.09.019.
- [6] 唐帅,彭琦,赵欢,等. 低轨卫星互联网在铁路交通中的应用展望[J]. 卫星应用, 2021(11):50-53. (TANG Shuai,PENG Qi,ZHAO Huan,et al. Application prospect of low-orbit satellite internet in railway traffic[J]. Satellite Application, 2021(11):50-53.) doi:10.3969/j.issn.1674-9030.2021.11.013.
- [7] CHEN Shanzhi,SUN Shaohui,KANG Shaoli. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171. doi:10.23919/JCC.2020.12.011.
- [8] 杨琪,单馨漪,冯敬然,等. 智能高铁铁路枢纽场景 5G-R 信道与传播特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(8): 746-753. (YANG Qi,SHAN Xinyi,FENG Jingran,et al. Analysis of 5G-R channel and propagation characteristics for smart high-speed railway hub scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(8):746-753.) doi:10.11805/TKYDA2022071.
- [9] 刘子源. 5G 承载铁路业务需求分析及方案研究[J]. 中国铁路, 2022(9):12-17. (LIU Ziyuan. Demand analysis and scheme study of 5G carrying network for railway[J]. China Railway, 2022(9): 12-17.) doi:10.19549/j.issn.1001-683x.2022.07.06.001.
- [10] 曾成胜,单馨漪,何丹萍,等. 基于 5G-R 系统的高铁站台场景信道特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(8):769-774. (ZENG Chengsheng,SHAN Xinyi,HE Danping,et al. Channel characteristics of high-speed rail platform scenario based on 5G for railway system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(8):769-774.) doi: 10.11805/TKYDA2022048.
- [11] 王同军. 铁路 5G 关键技术分析和路线[J]. 中国铁路, 2020(11):1-9. (WANG Tongjun. Key railway 5G technology analysis and development route[J]. China Railway, 2020(11):1-9.) doi:10.19549/j.issn.1001-683x.2020.11.001.
- [12] 苏昭阳,刘留,张嘉驰,等. 面向智能高铁的低轨卫星通信发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2023,4(3):88-98. (SU Zhaoyang,LIU Liu,ZHANG Jiachi,et al. Review of the development of low earth orbit satellite communication for smart high-speed railway [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023,4(3):88-98.) doi:10.11959/j.issn.2096-8930.2023034.
- [13] 吕婷婷,李帅,程宇新,等. 铁路卫星通信的发展现状与技术挑战[J]. 卫星应用, 2015(7):19-22. (LYU Tingting,LI Shuai,CHENG Yuxin. Development status and technical challenges of railway satellite communication[J]. Satellite Application, 2015(7):19-22.)
- [14] 孙韶辉,戴翠琴,徐晖等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021,33(6):891-901. (SUN Shaohui,DAI Cuiqin,XU Hui,et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of

- Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.) doi:10.3979/j.issn.1673-825X.202107130244.
- [15] 王胡成,徐晖,孙韶辉. 星地融合5G网络架构增强技术研究[J]. 电子技术应用, 2022,48(6):1-4,9. (WANG Hucheng,XU Hui, SUN Shaohui. Research on architectural enhancements for integrating satellite into 5G networks[J]. Application of Electronic Technique, 2022,48(6):1-4,9.) doi:10.16157/j.issn.0258-7998.223015.
- [16] 解宁宇,汪进,王慧东,等. 低轨卫星与5G融合应用及关键技术[J]. 邮电设计技术, 2021(4):10-14. (XIE Ningyu,WANG Jin, WANG Huidong, et al. Application and key technology of Leo and 5G fusion[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(4):10-14.) doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2021.04.003.
- [17] 朱斌,何建炜,王光全,等. 星地融合网络架构及关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2022(7):56-60. (ZHU Bin,HE Jianwei, WANG Guangquan, et al. Research on architecture and key issues of integrated satellite-terrestrial systems[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(7):56-60.) doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.07.011.
- [18] 王悦,王权,张德鹏,等. 低轨卫星通信系统与5G通信融合的应用设想[J]. 卫星应用, 2019(1):54-59. (WANG Yue,WANG Quan, ZHANG Depeng, et al. Application assumption of the integration of low-orbit satellite communication system and 5G communication[J]. Satellite Application, 2019(1):54-59.) doi:10.3969/j.issn.1674-9030.2019.01.016.
- [19] 李灵瑄. 与5G融合的宽带低轨卫星移动通信下行时频同步研究与原型验证[D]. 南京:东南大学, 2021. (LI Lingxuan. Research and prototype verification of downlink time and frequency synchronization for broadband LEO satellite mobile communication integrated with 5G[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2021.)
- [20] LIN Xingqin, ROMMER S, EULER S, et al. 5G from space: an overview of 3GPP non-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021,5(4):147-153.) doi:10.1109/MCOMSTD.011.2100038.
- [21] Alliance for Telecommunications Industry Solutions. ATIS 3GPP specification: 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network;solutions for NR to support non-terrestrial networks(NTN)(Release 16):3GPP.38.821. V1600[R]. Washington:ATIS, 2019.
- [22] 3GPP. Study on New Radio(NR) to support non-terrestrial networks(release 15):3GPP.TR 38.811[R/OL]. (2018-06-19). <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>.
- [23] 高克俭. 高速铁路TD-LTE网络规划的研究[D]. 江苏:南京邮电大学, 2018. (GAO Kejian. TD-LTE network planning research of high-speed railway[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.)
- [24] 王柏岩,韩笑冬,刘治军,等. 低轨卫星接入网与5G系统融合网络架构及关键技术分析[C]// 第十六届卫星通信学术年会. 北京:中国空间技术研究院通信卫星事业部, 2020:5-12. (WANG Baiyan,HAN Xiaodong,LIU Zhijun, et al. Network architecture and key technology analysis for integration of LEO satellite access network with 5G system[C]// Proceedings of the 16th Annual Conference on Satellite Communication. Beijing, China:Communication Satellite Division, China Academy of Space Technology, 2020:5-12.) doi:10.26914/c.cnkihy.2020.007247.
- [25] 代晓景,柴雪松,暴学志,等. 基于5G传输的铁路基础设施监测方案研究[J]. 中国铁路, 2022(9):119-125. (DAI Xiaojing, CHAI Xuesong,BAO Xuezhi, et al. Research on railway infrastructure monitoring scheme based on 5G transmission[J]. China Railway, 2022(9):119-125.) doi:10.19549/j.issn.1001-683x.2022.03.27.001.
- [26] 杨立,窦建武. 未来卫星通信和5G-NR深度融合架构设计[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(5):60-66. (YANG Li,DOU Jianwu. Architecture design for tight integration between future satellite communication and 5G-NR system[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(5):60-66.) doi:10.12142/ZTETJ.202105012.
- [27] 陈婉珺,林琳,穆佳,等. 星地网络融合架构及组网场景分析[J]. 邮电设计技术, 2023(11):1-6. (CHEN Wanjun,LIN Lin,MU Jia, et al. Space-ground network convergence architecture and networking scenarios analysis[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(11):1-6.) doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.11.001.
- [28] 倪慧军. 卫星通信在铁路应急通信中的应用探讨[J]. 铁道通信信号, 2007,43(10):33-35. (NI Huijun. Discussion of satellite communication application on emergency communication[J]. Railway Signalling & Communication, 2007,43(10):33-35.) doi:10.3969/j.issn.1000-7458.2007.10.016.
- [29] 刘宇. 铁路通讯系统中卫星通信技术的应用[J]. 通讯世界, 2018(1):39-40. (LIU Yu. Application of satellite communication technology in railway communication system[J]. Telecom World, 2018(1):39-40.) doi:10.3969/j.issn.1006-4222.2018.01.024.