文章编号：1003-1421(2026)11-0172-10
引用格式：王开锋，刘国梁，张弘毅. 卫星互联网在铁路中的应用研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：172-181.
WANG Kaifeng，LIU Guoliang，ZHANG Hongyi. Application of Satellite Internet in Railway[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：172-181.

卫星互联网在铁路中的应用研究

王开锋[1]，刘国梁[2]，张弘毅[1]

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所，北京 100081；2.中国铁路12306技术中心，北京 100081)

摘 要：卫星互联网是使用低轨卫星提供宽带互联网接入的新型通信网络，卫星互联网在铁路行业的应用符合国家战略需求以及铁路行业应用和未来技术发展需要。卫星互联网具备移动通信、宽带接入、物联网和星基导航增强等服务能力，在铁路勘察设计、建设施工、运输生产、防灾减灾、应急救援等领域具有广泛的应用前景，特别是在偏远地区或地面通信设施薄弱区域，卫星通信可为铁路提供关键的信息传输保障。随着低轨卫星组网的完善，卫星通信有望在铁路行业逐步工程化应用，可以采用车载综合无线传输平台增加卫星终端、卫星互联网与5G-R融合组网以及建设铁路低轨卫星通信专网等多种部署方案，实现卫星互联网与铁路专用移动通信融合互补，扩充铁路通信网络覆盖范围和应用范围，推动铁路通信技术革新。

关键词：低轨卫星；卫星互联网；铁路应用；部署方案；5G-R
中图分类号：U285.24 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250703002

Application of Satellite Internet in Railway

WANG Kaifeng[1]，LIU Guoliang[2]，ZHANG Hongyi[1]

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. China Railway 12306 Technology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Satellite internet is a new type of communication network that uses low-Earth-orbit (LEO) satellites to provide broadband internet access. Its application in the railway industry aligns with national strategic demands, as well as the application needs of the railway industry and the requirements of future technological development. Satellite internet possesses service capabilities such as mobile communication, broadband access, the internet of things, and satellite-based navigation augmentation. It holds broad application prospects in railway-related fields, including survey and design, construction, transportation and production, disaster prevention and mitigation, and emergency rescue. Particularly in remote regions or regions with underdeveloped ground communication infrastructure, satellite communication can provide critical information transmission support for railways. With the improvement of LEO satellite network deployment, satellite communication is expected to be gradually applied in engineering practices within the railway industry. Multiple deployment schemes can be adopted to achieve this goal, such as integrating satellite terminals into on-board comprehensive wireless transmission platforms, building converged networks of satellite

收稿日期：2025-07-03
通信作者：刘国梁(1976—)，男，山西朔州人，中国铁路12306技术中心正高级工程师。
基金项目：中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2025YJ277，2023YJ104)

internet and 5G-R, and constructing specific railway LEO satellite communication networks. Therefore, the integration and complementarity between satellite internet and railway-specific mobile communication will be achieved, the coverage and application scope of railway communication networks will be expanded, and technological innovation in railway communication will be advanced.
Keywords: Low Earth Orbit Satellite; Satellite Internet; Railway Application; Deployment Scheme; 5G-R

0　引言

铁路是国家关键基础设施和国民经济的大动脉，在我国经济社会发展中发挥着至关重要的作用。我国铁路仍处于快速发展时期，科技创新是推进铁路高质量发展、支撑交通强国战略的重要动力。近年来，我国在智能铁路关键技术研究和建设方面取得了突破进展，陆续发布了中国智能高速铁路(以下简称“智能高铁”)技术体系架构1.0和2.0[1]，铁路通信系统是智能高铁的重要组成部分之一，是各子系统全面感知和泛在互联的重要手段，智能高铁的建设对铁路通信系统的可靠性、可用性及承载能力提出了新要求[2]。根据2016年发布的“中长期铁路网规划”，在未来一段时期内中西部地区、“一带一路”沿线国家是铁路建设的重点方向之一[3]，而这些区域往往存在自然条件复杂、通信基础设施薄弱等问题，对铁路通信系统的可靠性和可用性也提出了新的挑战。

卫星互联网是近年来出现的一种新型通信方式，使用低轨宽带卫星组成星座，实现全球范围内的无线信号覆盖，直接面向终端用户提供宽带通信服务[4]。2020年，我国将卫星互联网列为“新基建”范畴，未来的通信网络将由地面通信为主向天地一体化融合通信演进[5]。卫星通信可以在不依赖地面网络的情况下独立成网，这对于地面通信基础设施匮乏或自然灾害高发的区域具有重要应用价值。

卫星互联网可以为铁路数字化、信息化和智能化提供技术支撑，在铁路行业特别是偏远地区铁路和海外铁路具有广阔的应用前景[6-7]。推进卫星互联网在铁路中的研究和应用，既符合国家新基建的发展战略，也可以支撑铁路建设管理、铁路运输安全保障和铁路运营服务等领域的技术创新，提升铁路的运输效率和运输安全[8]。

1　国内外发展现状

低轨卫星位于地球表面上空150~2 000 km的卫星轨道。近年来，随着卫星技术研究不断深入，低轨卫星以其全球组网和通信能力的独特优势，逐步受到通信领域的关注和青睐。相比中高轨卫星，低轨卫星具备成本低、通信时延低、速率高、容量大等特性，可以通过星座组网实现全球无缝覆盖[9]。

1.1　国内外低轨卫星星座

星链(Starlink)在卫星互联网商业应用上走在了前列[10]，其目标是建设一个全球覆盖、大容量、低时延的天基通信系统，在全球范围内提供高速互联网服务，计划用超过4万颗卫星来取代地面上的传统通信设施，从而在全球范围内提供价格低廉、高速且稳定的卫星宽带服务。英国一网(OneWeb)、美国亚马逊(Amazon)、加拿大电信卫星(Telesat)公司也提出了类似的低轨卫星星座计划。

卫星互联网作为新型信息基础设施也得到了我国政府鼓励和支持，出台了一系列政策促进卫星互联网的研究、建设及应用[11]，我国目前有多个低轨卫星星座正处于组网建设或规划设计阶段。中国星网建设的“GW星座”已于2024年底启动组网工作，计划发射约1.3万颗卫星，在全球范围内提供宽带、窄带结合的语音、数据及物联网通信服务；上海垣信建设的“千帆星座”，计划发射3代累计超过1.5万颗卫星，2024年8月完成了首组卫星的发射。此外，“天启星座”“吉利星座”和“鸿鹄三号”等低轨卫星星座也在建设或规划之中。可以预见，这些低轨卫星星座的组网建设，将促进我国卫星技术的创新与应用拓展，为公众及行业用户提供广泛、高速、稳定及安全的卫星通信服务。

1.2　低轨卫星通信的关键技术原理分析

低轨卫星通信需要解决巨型星座卫星协同、大带宽低时延通信、全球覆盖等问题，关键技术的研究集中在星座组网与管控、星上处理、星间链路、相控阵天线等方面。

(1) 星座组网与管控。主流低轨卫星星座的卫星数量均在1万颗以上，拓扑结构具有复杂异构、高动态的特征，如何高效组网和管控是一项重要的

挑战[12]。巨型星座网络架构通常采用分层分域的方式，同时考虑卫星位置的快速变化和星间链路的高动态性，设计动态卫星路由协议和转发策略，降低星上计算压力，提高管控效率。

（2）星上处理技术。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project，3GPP)非地面网络(Non-Terrestrial Network，NTN)标准中定义了透明转发和星上再生2种实现架构[13]。透明转发只对射频信号进行放大、变频等操作，对高层协议透明，无星上路由能力；星上再生需要完成调制解调、路由交换等一系列数据处理操作。星上再生架构具有减少对地面信关站依赖、降低传输延迟、抗干扰能力强、网络资源利用效率高等优势，国内外主流低轨卫星星座已经规模化应用或规划使用此架构。在此趋势下，卫星正朝着重量和体积更大、通信能力更强、轨道更低等方面演进。

（3）星间链路。星间通信是实现低轨卫星全球无缝覆盖与低时延传输的关键，主要采用微波通信和激光通信2种方案[14]：星间微波通信具有技术成熟、成本可控等优势，但传输速率相对较低；星间激光通信具有带宽大、抗干扰能力强、功耗低等优势，是卫星通信未来发展方向，而捕获、跟踪和瞄准技术是其中的核心技术与实现难题。

（4）相控阵天线。低轨卫星的用户终端和卫星载荷通常使用电子扫描相控阵天线，以解决低轨卫星高速移动、多用户并发的通信难题。多波束与波束赋形、波束快速切换与跟踪、轻量化与低功耗设计、抗干扰是相控阵天线技术研究的热点[15]。此外，相控阵天线也是干扰协调和干扰规避实现的关键，其技术成熟度直接关系到通信稳定性与频谱利用效率。

1.3　卫星通信在铁路的应用

国外铁路发达国家一直致力于卫星通信在铁路中的应用研究，主要集中在铁路基础设施监测、列车控制和旅客服务等方向[16-17]。2013年，欧洲航天局的卫星通信(SATCOM)项目研究了将卫星通信引入铁路的框架规范，评估满足铁路需求的卫星通信解决方案，以独立承载铁路通信业务或作为现有地面网络的补充；欧洲航天局2020年资助的面向铁路控制通信的卫星空中接口(SAIRCC)项目，针对欧洲列车控制系统评估了使用卫星通信替代既有铁路全球移动通信系统(Global System for Mobile communications-Railway，GSM-R)的可行性；2021年，意大利铁路公司在卫星与5G融合的诊断集成网络(DINoS5G)项目中研制了集成卫星通信和5G地面通信基础设施的通信解决方案，用于意大利铁路基础设施的诊断、维护和管理；2022年，英国的铁路数字化卫星(SODOR)项目使用卫星与4G/5G混合组网，通过在列车上安装卫星通信终端，填补地面网络覆盖的空白并提升网络服务能力，为列车监控和乘客提供宽带通信服务；2023年，英国Ovinto公司使用卫星通信和地面网络实现了货物列车实时监测；2023年起，美国Brightline、瑞典Icomera、英国ScotRail等公司开始使用Starlink卫星在列车上为旅客提供上网服务。

我国在20世纪80—90年代曾开展过卫星通信在铁路上的应用研究，但并未得到大规模的应用。目前，卫星通信技术在我国铁路的应用研究主要集中在应急通信领域，铁路应急通信系统普遍配置了卫星电话，部分铁路局集团公司还采用宽带卫星设备传送视频及数据。

2　低轨卫星在铁路的应用分析

2.1　服务能力

低轨卫星互联网可以在全球范围内提供移动通信、宽带接入、物联网、导航增强等服务，具备“随时、随地、随遇接入”的泛在通信能力，可以为铁路提供超视距、高性能、大容量、高可靠的信息传输保障服务。

（1）卫星移动通信。在全球范围内为用户提供话音和窄带数据传输服务，可以用于铁路调度通信、多司机通信等行车相关语音通信，以及行车调度命令信息传送、列车无线车次号校核信息传送等数据传输速率要求不高的场景。

卫星移动通信服务如图1所示。不同终端之间使用低轨卫星实现话音和窄带数据互通：终端A1与A2通过同一颗低轨卫星实现直接通信连接，完成信息交互；终端A1和搭载在列车上的终端B1通过不同低轨卫星来建立通信链路，不同卫星覆盖范围的终端利用星间链路进行信息传递；终端

B1通过低轨卫星将数据传递至信关站，再转发给固定侧终端C1，从而实现跨星且经地面信关站的通信。

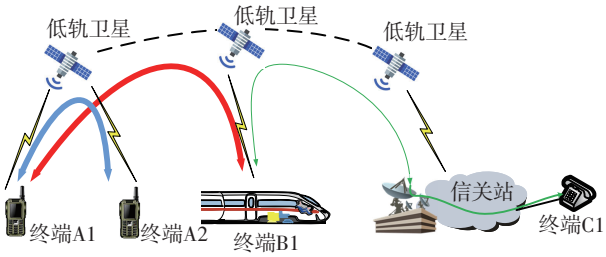


图1　卫星移动通信服务

Fig.1　Satellite mobile communication service

（2）卫星宽带接入。为用户提供宽带接入与数据传输服务，可以支撑调度视频通信、列车超视距传送、车载信息无线传输及货车状态监控等数据传输速率要求较高的场景。

卫星宽带接入服务如图2所示，卫星宽带接入有透明转发和星上路由交换两种模式。使用透明转发模式时，宽带卫星终端向低轨卫星发送信息，卫星将信息透明转发至信关站，再与地面网络进行连接交互，以此实现卫星终端与地面网络的通信；使用星上路由交换模式时，低轨卫星之间能够进行路由交换，通过星间链路将信息在卫星之间转发，实现不同卫星覆盖范围终端之间的信息交互。

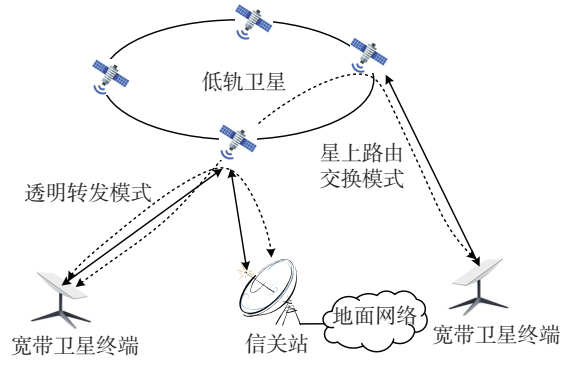


图2　卫星宽带接入服务

Fig.2　Satellite broadband access service

（3）卫星物联网。提供窄带物联网数据传输服务，与地面运营商物联网互补，实现“永远在线”的物联服务，用户使用低成本、小型化、低功耗的卫星物联网终端，通过卫星互联网回传采集信息。可以用于铁路基础设施健康管理、自然灾害与异物侵限监测、地质灾害监测等信息的传输。

（4）星基导航增强。适用于地基连续运行参考站无法部署或地面部署成本过高的地区，与铁路北斗导航应用结合，提供安全可靠的高精度导航增强服务。

2.2　典型应用场景

卫星互联网在铁路中的应用重点围绕地面通信设施缺乏或者薄弱地区，满足铁路勘察设计、建设施工、运输生产、防灾减灾、安全监测和应急救援等领域的基础通信和数据传输需求，卫星互联网在铁路中的应用体系架构如图3所示。

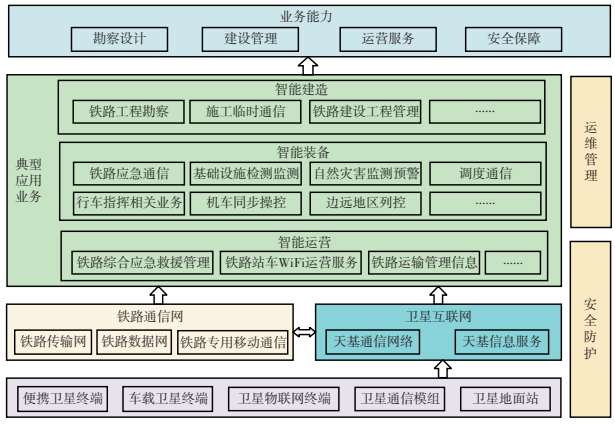


图3　卫星互联网在铁路中的应用体系架构

Fig.3　Application architecture of satellite internet in railway

卫星互联网与铁路通信网络融合，共同构成铁路通信基础设施网络，在智能建造、智能装备和智能运营等方面开展典型应用，支撑铁路勘察设计、建设管理、运营服务、安全保障等方面的业务能力。同时，将卫星的运维管理和安全防护融入铁路既有的运维、安全体系，实现全流程一体化管控。

（1）在智能建造方面，重点解决铁路勘察、铁路施工阶段大量数据与信息实时传输的问题。在铁路建设阶段，铁路专用通信网络尚未建设，部分偏远地区公网覆盖不全、信号不稳定、带宽不足，存在“网络孤岛”问题，无法为野外勘察、施工作业、施工人员生产生活提供完备的通信保障。利用卫星互联网，可以实现建造过程全要素、全生命周期的信息交互和精细化管控。

（2）在智能装备方面，重点解决应急通信、铁路全方位态势感知、列车运行控制等业务的通信需求。铁路专用移动通信网络通常只覆盖铁路沿线一定范围及枢纽地区，利用卫星互联网可以在空间上

扩充网络覆盖范围，提升移动装备和基础设施的感知、决策能力。同时，还可以作为铁路专用移动通信网络的备份通信手段，提升铁路通信网络承载能力和服务水平。

（3）在智能运营方面，主要服务于铁路客货运输，为旅客提供全过程的智能出行服务，为铁路货运提供追踪管理服务。如旅客互联网服务，货车、机车、集装箱在途监测服务等，提升铁路安全生产水平和运输效率。

卫星互联网作为地面通信的重要补充，可以成为未来铁路通信系统的重要组成部分，特别是对于偏远地区铁路，卫星通信在无需额外部署地面基础设施的情况下，将通信服务范围扩展到传统手段难以覆盖的地区，极大拓宽了铁路通信的覆盖范围和服务能力，低轨卫星在铁路行业的典型应用如表1所示，可以结合铁路应用业务的技术要求和应用场景，逐步推广应用。

表1　低轨卫星在铁路行业的典型应用

Tab.1　Typical applications of low earth orbit satellites in railway industry

铁路应用业务	应用优先级	可靠性要求
铁路工程勘察	高	低
铁路建设工程管理	中	低
施工临时通信	中	低
铁路应急通信	高	高
基础设施检测监测	中	中
自然灾害监测预警	中	高
调度通信	低	高
行车指挥相关业务	低	高
机车同步操控	低	高
边远地区列控	低	高

铁路典型应用场景的选择需要综合考虑铁路应用需求和业务特点。铁路工程勘察和突发事件应急期间，地面通信网络可能存在覆盖空白或损毁情况，卫星通信的应用需求尤为迫切；在地面网络覆盖薄弱的施工区域、偏远检测监测点，卫星通信也可以作为地面网络的补充；而列控、机车同步操控、行车指挥和调度通信等与铁路行车密切相关的业务对通信可靠性要求比较高，待低轨卫星组网完善后，也可以作为此类行车业务的备份通信手段或主要通信承载方式。

2.3　铁路应用关键技术

2.3.1　铁路卫星通信终端

在铁路使用的各类卫星移动终端和手持终端需要与铁路的作业特点和工作环境相适应，特别是安装在列车上的车载终端，需要开展定制化研究。首先，卫星天线需要安装在列车上，应尽可能小型化并在外形设计上符合空气动力学，以节约安装空间并符合车辆限界相关规定，卫星天线需要支持列车350 km/h运行速度下使用，且抗风能力不小于450 km/h。其次，列车运行环境较为复杂，如复杂地形环境下的多径干扰、弓网离线放电噪声等可能会影响卫星通信的服务质量，需要有针对性地研究抗干扰技术。此外，还需研究卫星信号快速捕获方法，列车运行过程中可能频繁通过隧道、地堑、公跨铁桥梁等，卫星信号被频繁遮蔽，卫星终端应能够快速捕获视野内卫星信号，卫星遮蔽恢复后具备快速恢复通信服务能力。

2.3.2　与铁路专用移动通信网融合

将卫星互联网与铁路专用移动通信网络融合，形成天地一体化的铁路通信网络，可以扩展网络覆盖范围，提高网络可靠性和数据承载能力[18]。铁路应用业务众多，不同业务对网络服务质量、安全性、可靠性的要求差异较大，同时，卫星通信与GSM-R，5G-R等铁路专用移动通信相比在网络架构和性能指标上也有较大差异。天地一体化的铁路通信网络如图4所示，需要设计一种天地融合的网络架构，在地面段实现网络互联互通、安全隔离和一体化管控，在用户段实现多种通信制式综合接入，协调网络服务能力和用户需求，发挥不同网络的技术优势，支持多样化的铁路业务需求和应用场景。

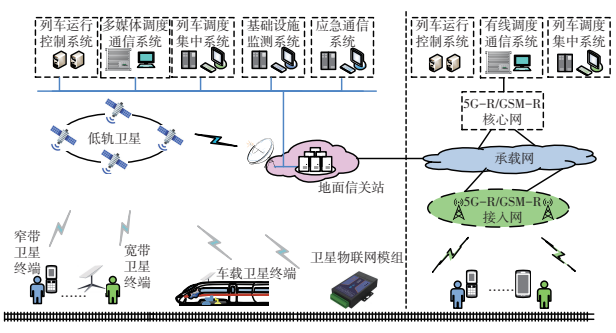


图4　天地一体化的铁路通信网络

Fig.4　Space-ground integrated railway communication network

5G-R是在5G基础上增加铁路特定功能构建的系统，其协议符合3GPP规范。因此，卫星通信与5G-R的融合可以沿用NTN技术。在3GPP R17版本中首次对NTN进行了标准化，R18/R19版本在架构模式、频段覆盖和关键技术等方面进行了持续优化和演进，针对卫星场景对5G NR空口进行了增强[19]。

（1）多普勒频移补偿。低轨卫星相对于终端高速运动，会产生较大的多普勒频偏，NTN采用预补偿和后补偿的协同策略修正多普勒频移。卫星侧基于星历信息和服务波束中心位置预补偿下行频偏，再根据上行参考信号校正残余频偏；终端侧基于卫星星历和自身全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System，GNSS)信息预补偿上行频偏，接收下行信号时再根据同步信号和解调参考信号进行后补偿。

（2）定时提前量(Timing Advance，TA)补偿。低轨卫星与终端的距离远大于地面基站，为了避免时隙间干扰，NTN采用TA分段补偿方案：公共TA基于卫星星历和服务波束中心位置确定；终端特定TA由终端根据自身相对于波束中心位置计算；基站和卫星网关还可以通过发送TA指令的方式动态调整终端TA。

（3）移动性管理。低轨卫星的高速运动可能导致NTN小区的覆盖状态频繁波动，且其边缘效应具有模糊性，传统基于信号强度或信号质量的切换算法不适用于低轨卫星网络。因此，NTN定义了基于事件触发的测量和基于位置触发的测量，以增强移动性管理能力。

2.3.3　卫星通信性能测试与评估

为掌握铁路环境下卫星网络的各种射频、通信、业务性能等指标，评估卫星通信的应用效果，需要从物理信号、网络服务质量、铁路应用业务3个层次开展卫星通信性能检测与评估。在物理层进行干扰检测和场强覆盖检测，主要测试不同卫星在不同区域的覆盖性能，铁路沿线电磁环境对卫星通信的影响等。网络服务质量检测针对接入性能、移动性能、信道保持性能等卫星通信网络所提供的服务性能进行检测，主要包括开机捕获并锁星时间、卫星链路通道开通时间、重新捕获时间、对星性能、卫星切换、卫星过顶时间等。铁路应用业务检测是在真实运营环境下动态测试卫星通信承载铁路应用业务的带宽、时延、抖动、丢包率等主要通信指标。

2.3.4　安全防护与运维管理

铁路通信网络是涉及国计民生的关键信息基础设施，对网络安全、信息安全具有较高要求。卫星通信具有开放无线信道、长距离传输和广域覆盖等特征，相比地面网络更容易受到干扰、窃取和欺骗等攻击，威胁其可用性、完整性和机密性。在空间段，卫星平台及载荷存在网络入侵和非法控制等安全威胁；在地面段，测控数据及信令易被窃听、篡改与伪造，对卫星本身及用户带来安全风险；在用户段，可能面临通信干扰以及拒绝服务攻击、数据窃取、篡改与伪造等安全威胁。

因此，需要研究安全策略管理、网络安全域隔离、高可信安全认证与接入控制等技术，提升网络安全能力，以应对引入卫星通信后给铁路通信网络带来的确定性安全风险和不确定性安全威胁，确保网络和所承载信息的安全可信。同时，还应研究网络路由、用户管理等运维策略，建立统一的铁路网络运维管控框架，管理和配置卫星通信资源。

2.4　工程应用可行性

铁路数字化、网络化、智能化离不开卫星互联网等先进技术支撑，特别是地面通信、电力、交通等基础设施薄弱、自然灾害频繁的边远地区，使用低轨卫星取代或作为地面通信的补充具有一定的技术经济性。

（1）建设维护。铁路通信具有用户数量多、地域分散、地形环境复杂、可靠性要求高等特点，建设成本随着铁路线路的延伸线性增长，而卫星传输的成本与距离无关，广域覆盖、远程通信是其天然的优势。

（2）应用资费。随着卫星制造和发射成本的大幅降低，特别是我国卫星互联网基础设施建设的大规模推进，未来在偏远山区、荒漠地区、边境地区和海外地区卫星通信的综合资费有望相当甚至低于地面宽带网络，以Starlink为例，其自2024年起已实现盈利，印证了低轨卫星的商业可行性。

（3）应用终端。蜂窝移动通信终端集成卫星通信以及手机直连卫星功能是未来的技术发展趋势，在公众移动通信领域已有应用先例，随着芯片、天

线等技术的发展和应用终端规模的扩大，未来应用终端的成本也将快速下降。

目前，我国低轨卫星互联网产业整体仍处于建设阶段，低轨卫星在铁路行业的应用同样处于关键的探索与验证阶段，主要聚焦于技术可行性探索、核心技术储备积累、应用方案体系化研究、关键性能试验验证等环节，随着低轨卫星组网的完善，低轨卫星有望在铁路行业逐步工程化部署应用。

3　低轨卫星的工程化部署方案

3.1　车载综合无线传输平台增加卫星终端

车载综合无线传输平台是应用于列车上的高度集成化的通信设备[20]，支持同时接入公众移动通信、5G-R及毫米波等其他通信网络，能根据业务类型将数据分发至不同业务系统，还具备数据安全隔离、访问控制及边界防护功能，提供以太网、串口等多种通信接口用于业务接入。

可以在车载综合无线传输平台中增加卫星互联网终端，使之具备低轨卫星通信能力，与地面网络融合互补，进一步增强车地数据传输的覆盖范围和灵活性，车载综合无线传输平台增加卫星终端方案如图5所示。

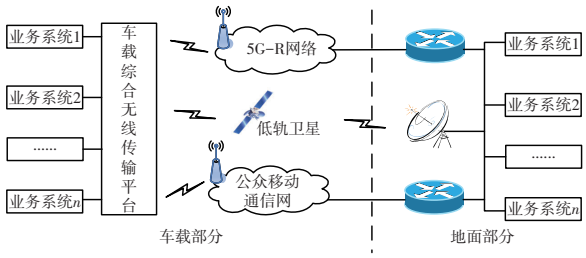


图5　车载综合无线传输平台增加卫星终端方案

Fig.5　Scheme for adding satellite terminals to integrated on-board wireless transmission platform

在地面侧，可以将铁路传输网汇聚层通过专线就近连接至卫星信关站，实现双网互联互通，铁路传输网与卫星信关站互联如图6所示。

3.2　卫星互联网与5G-R融合组网

在自然灾害频发的区域，地面光纤网络极易受损，此时，卫星互联网可作为本地5G-R无线接入网与核心网之间的备份回传链路，当地面传输链路失效时快速切换至卫星传输通道，有效保障5G-R网络业务连续性，提高网络的容灾能力。在编组场

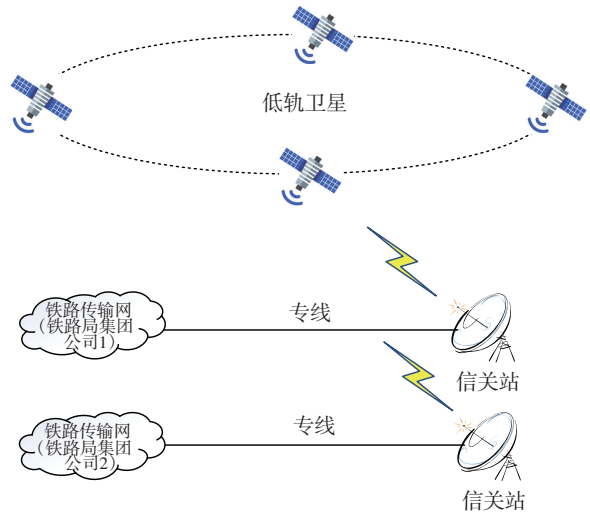
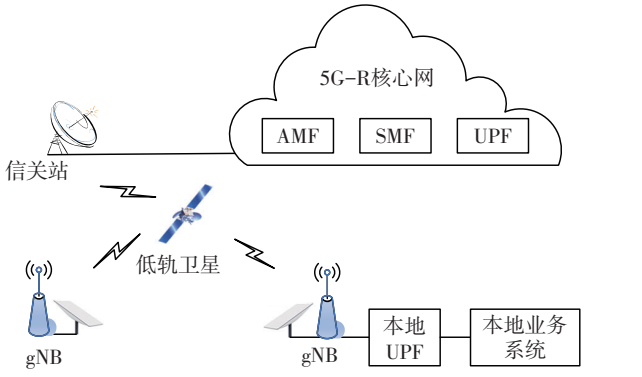


图6　铁路传输网与卫星信关站互联

Fig.6　Interconnection between railway transmission network and satellite gateway station

站、铁路口岸等有宽带数据通信需求但通信接入点比较分散的区域，可以在本地建设5G-R无线接入网，使用卫星互联网作为回传链路接入5G-R核心网，相比传统地面网络延伸覆盖方案，可以减少光纤等通信基础设施的建设与维护，能够有效降低地面网络延伸覆盖的成本。卫星互联网与5G-R融合组网方案如图7所示。



AMF：接入和移动管理功能(Access and Mobility Management Function)
SMF：会话管理功能(Session Management Function)
UPF：用户面功能(User Plane Function)
gNB：下一代基站(the next Generation Node B)

图7　卫星互联网与5G-R融合组网方案

Fig.7　Scheme for integrated networks of satellite internet and 5G-R

卫星互联网为5G下一代基站(the next Generation Node B，gNB)与5G-R核心网之间提供透明的数据传输通道，gNB通过标准的N1/N2、N3接口接入核心网。业务系统有大量流量需要在本地卸载的场景中，也可以将UPF下沉到无线接入网侧，以优化数

据传输路径、降低网络时延，此时，gNB通过N1/N2接口接入5G-R核心网，本地UPF通过N4接口接入5G-R核心网。

3.3　低轨卫星通信专网

低轨卫星星座通常支持终端到终端(Terminal to Terminal，T2T)通信模式[21]，卫星地面终端之间可以直接通过卫星上的交换设备进行通信，卫星起到了中继和交换的作用，无需经过地面信关站进行数据中转，利用T2T技术，可以依托既有低轨卫星星座建设铁路低轨卫星专网，并使用专用资源分配与隔离机制，与其他卫星互联网用户实现端到端的网络隔离，低轨卫星通信专网方案如图8所示。

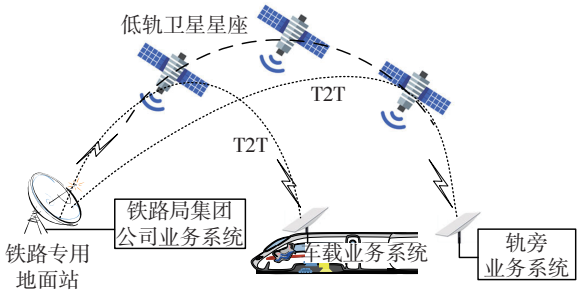


图8　低轨卫星通信专网方案

Fig.8　Scheme for specific low earth orbit satellite communication network

在铁路枢纽、站场等固定位置部署铁路专用的地面站，在列车上或铁路沿线作业区域部署卫星终端，实现点到点的双向通信。在低轨卫星星座中可以为铁路用户划分专用的网络切片，规划固定的波束、频带资源，铁路专网数据在专用资源通道内传输，实现铁路专网与其他卫星互联网用户的逻辑隔离或物理隔离，满足铁路通信可靠性、安全性的需求。

4　面临的挑战及前景展望

4.1　主要问题与挑战

在铁路行业引入卫星互联网符合国家战略需求以及铁路行业应用和未来技术发展需要，具有很强的必要性，但也面临着一些问题和挑战。

（1）从需求方面看。铁路运输具有点多线长的特点，铁路卫星通信需要考虑铁路沿线、铁路车站和区间线路，兼顾大型客站、编组站、物流中心、动车组和机车车辆检修场所等各类应用需求。既要考虑列车高速运行时的卫星通信应用场景，也需要考虑客货运组织、基础设施养护维修业务应用场景，综合论证不同场景、不同业务的适应性。我国铁路无线通信以自建专网为主，包括400 MHz/450 MHz无线列调，GSM-R，5G-R等，基本可以满足铁路运输组织的需求，卫星通信在铁路的应用场景和技术经济性仍需进行深入的论证和探讨。

（2）从技术方面看。我国的卫星互联网尚处于建设阶段，卫星互联网的技术指标是否满足铁路应用需求尚需要研究。铁路线路穿越山区、隧道、城区等各种复杂地貌，这些地区的卫星信号覆盖可能受到遮挡，铁路接触网干扰、高速移动性也可能对卫星通信的性能带来影响，卫星互联网是否适用于铁路运营环境也需要进一步的测试和验证。卫星互联网铁路行业应用需要兼顾“先进性、适用性、经济性”，关注产业支撑和配套能力，确保卫星通信在铁路领域的持续发展和不断演进。

（3）从网络安全和运维方面看。卫星互联网作为通信基础设施，面向多个行业用户甚至公众用户，如何保证铁路应用与其他行业用户的隔离，保护铁路信息系统的安全性需要进一步研究。

4.2　前景展望

目前，我国低轨卫星互联网的技术体系、市场生态与商业化运营模式尚未完全成熟，但随着“新基建”持续推进、低轨卫星星座组网进程加速以及跨行业协同创新深化，低轨卫星互联网将逐步突破发展瓶颈，为其在铁路行业的应用创造有利的条件。

（1）卫星通信在铁路行业的应用可以优先应用在地面网络覆盖不足、通信基础设施运维成本较高、自然灾害风险高的区域，充分发挥卫星通信覆盖范围广、不受地面限制等优势，推进低轨卫星在应急通信、冗余保障等方面的应用，随着低轨卫星建设，最终形成地面网络、卫星通信融合互补的铁路通信网络体系。

（2）卫星通信与铁路专用通信的融合可以从业务场景适配、技术架构适配、协议与接口统一、网络管理协同等方面统筹考虑，针对不同场景及业务类型设计低轨卫星在铁路的工程化部署方案，使用“5G-R+卫星通信”双模终端、NTN等技术实现卫星、地面网络一体化。

（3）为保障铁路网络安全，需要将铁路网络安全体系与卫星实际通信环境相结合，提供与卫星网络环境相适应的安全策略、密码和安全技术，采用认证授权、数据加解密、防火墙与入侵检测、安全审计与监控等措施为各类地面站、星地及地面互联网链路、用户终端提供安全防护保障。

5　结束语

未来铁路通信网络建设应立足既有通信技术并紧跟前沿、前瞻性通信信息技术，以支撑大数据、云计算以及人工智能等关键技术在铁路的应用，为铁路建设与运营提供可靠、高效的通信保障。我国卫星互联网正处于快速发展阶段，卫星互联网具备覆盖面广、不受地域限制、建立便捷等优势，可以与铁路专用移动通信融合互补，扩充铁路通信网络覆盖范围和应用范围。未来应在网络体系架构、专用卫星通信终端、通信性能测试与评估、安全防护与运维管理等方向开展卫星互联网铁路应用关键共性问题研究，明确铁路对卫星互联网的通信和信息服务能力指标需求，推动铁路典型业务示范应用，验证卫星互联网服务能力与服务质量。

参考文献：

[1] 王同军，王万齐，李　平，等. 模数一体化平台赋能下的智能高铁2.0关键技术展望[J]. 中国铁路，2024(7)：1-6.
WANG Tongjun，WANG Wanqi，LI Ping，et al. Prospect of Key Technologies of Intelligent HSR 2.0 Empowered by Model-Data Integration Platform[J]. Chinese Railways，2024(7)：1-6.

[2] 张　祯，李　坚，陈晓辉，等. 智能铁路条件下5G-R采用TDD制式的可行性研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(5)：105-111，134.
ZHANG Zhen，LI Jian，CHEN Xiaohui，et al. Study on Feasibility of 5G-R Based on TDD for Intelligent Railways[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(5)：105-111，134.

[3] 高明明. 铁路网规划的发展历程与应用实践[J]. 铁道运输与经济，2025，47(4)：62-67.
GAO Mingming. Development History and Application Practice of Railway Network Planning[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(4)：62-67.

[4] 禹华钢，方子希. 低轨卫星互联网：发展、应用及新技术展望[J]. 无线电工程，2023，53(11)：2699-2707.
YU Huagang，FANG Zixi. LEO Satellite Internet：Development，Application and New Technology Prospects[J]. Radio Engineering，2023，53(11)：2699-2707.

[5] 崔新雨，伍　杰，周一青，等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版)，2023，50(1)：1-11.
CUI Xinyu，WU Jie，ZHOU Yiqing，et al. Challenges of and Key Technologies for the Air-Space-Ground Integrated Network[J]. Journal of Xidian University (Natural Science)，2023，50(1)：1-11.

[6] 张嘉驰，刘　留，周　涛，等. 智能高速铁路中基于低轨卫星网络的通信关键技术研究[J]. 铁道学报，2024，46(8)：69-77.
ZHANG Jiachi，LIU Liu，ZHOU Tao，et al. Research on Key Communication Technologies of Intelligent HSR Based on LEO Satellite Networks[J]. Journal of the China Railway Society，2024，46(8)：69-77.

[7] 苏昭阳，尹　毅，段相龙，等. 面向智能铁路的低轨卫星互联网关键技术[J]. 中国铁路，2024(11)：111-117.
SU Zhaoyang，YIN Yi，DUAN Xianglong，et al. Key Technologies of LEO Satellite Internet for Intelligent Railways[J]. China Railway，2024(11)：111-117.

[8] 王开锋，开祥宝，李　明，等. 天地一体化信息网络在铁路领域的应用展望[J]. 天地一体化信息网络，2021，2(1)：93-98.
WANG Kaifeng，KAI Xiangbao，LI Ming，et al. Application Prospect of Space-Integrated-Ground Information Network in Railway[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2021，2(1)：93-98.

[9] 单　超，马少煊，谷　欣，等. 卫星互联网应用与挑战[J]. 天地一体化信息网络，2024，5(3)：96-101.
SHAN Chao，MA Shaoxuan，GU Xin，et al. Satellite Internet：Application and Development[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2024，5(3)：96-101.

[10] 李元龙，李志强. Starlink星座通信建模仿真分析[J]. 指挥控制与仿真，2023，45(4)：118-126.
LI Yuanlong，LI Zhiqiang. Modeling and Simulation Analysis of Starlink Constellation Communication[J]. Command Control

& Simulation，2023，45(4)：118-126.

[11] 侯　倩，王　健，王守信，等. 推动卫星互联网发展的践行与思考[J]. 中国航天，2023(3)：43-48.
HOU Qian，WANG Jian，WANG Shouxin，et al. Practice and Reflection on Promoting the Development of Satellite Internet[J]. Aerospace China，2023(3)：43-48.

[12] 廖新悦，张　然，黄正璇，等. 空间卫星网络组网与管控技术综述[J]. 天地一体化信息网络，2023，4(3)：48-58.
LIAO Xinyue，ZHANG Ran，HUANG Zhengxuan，et al. Review on Networking and Control Technologies of Space Satellite Network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2023，4(3)：48-58.

[13] RINALDI F，MAATTANEN H L，TORSNER J，et al. Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond：A Survey[J]. IEEE Access，2020，8：165178-165200.

[14] 王立民，安绍毅，覃智祥. 低轨通信星座星间链路特点研究[J]. 无线电工程，2023，53(9)：2196-2202.
WANG Limin，AN Shaoyi，QIN Zhixiang. Research on Characteristics of Inter Satellite Links in LEO Communication Constellations[J]. Radio Engineering，2023，53(9)：2196-2202.

[15] 孙　磊. 低轨星地移动通信中的相控阵技术[J]. 现代雷达，2023，45(9)：1-8.
SUN Lei. Phased Array Technology in the LEO Satellite-Mobile Communications[J]. Modern Radar，2023，45(9)：1-8.

[16] IACURTO C，CATUOGNO T，BRIZZI A，et al. Capacity Study for a 5G Satellite System to Support Railway FRMCS Critical Service Over Europe [C]// 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference：(VTC2022-Spring). Helsinki，Finland：IEEE，2022：19-22.

[17] ROKITANSKY C H，ESCHBACHER K，MARSCHALLINGER R，et al. Development of an Event-Driven Railway Terminal Traffic Generator for a FRMCS Service over the European Coverage[C]//Proceedings of the 39th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2022). Stresa，Italy：IEEE，2022.

[18] 韩紫杰，赵连奎，高　媛，等. 低轨卫星与5G-R融合网络架构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2024(5)：467-475，484.
HAN Zijie，ZHAO Liankui，GAO Yuan，et al. Design of Low Earth Orbit Satellite and 5G-R Fusion Network Architecture[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology，2024(5)：467-475，484.

[19] 孙　羿，梁梦薇，童建飞，等. Rel-19NR NTN传输增强技术方案与标准化进展[J]. 电信科学，2025，41(9)：177-186.
SUN Yi，LIANG Mengwei，TONG Jianfei，et al. Key Solutions and Standardization Progress for Transmission Enhancement in Rel-19 NR NTN[J]. Telecommunications Science，2025，41(9)：177-186.

[20] 蔺　伟，王　芳，高尚勇，等. 铁路5G-R系统关键技术创新[J]. 中国铁路，2024(7)：104-113.
LIN Wei，WANG Fang，GAO Shangyong，et al. Innovation in Key Technologies of 5G-R System[J]. Chinese Railways，2024(7)：104-113.

[21] 刘　为，王　琳，温文坤，等. 卫星移动通信地面终端单跳直通技术方案[J]. 中国电子科学研究院学报，2021，16(4)：374-385.
LIU Wei，WANG Lin，WEN Wenkun，et al. A Novel Method for One-Hop Direct Communication between GEO Ground Terminals[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology，2021，16(4)：374-385.

(责任编辑　汪沁萱)