



基于移动用户画像的高铁5G专网优化方案研究

胥铭¹, 史媛媛¹, 黎丹², 李爱华¹, 魏彬¹, 张翀¹, 李晖晖³, 郭红峰³, 覃世慧³

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100032;

3. 中国移动通信集团广东有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 持续推进高铁5G专网建设对于高铁用户出行体验提升十分重要, 目前已成为运营商5G网络规划建设所关注的重点场景。首先综合分析了高铁5G专网建设面临的场景特异性问题, 然后进一步针对现阶段高铁5G专网存在的公网用户频繁入侵、网络缺乏对用户属性的全面感知能力等问题, 首次打通无线网与核心网, 围绕网络数据分析网元, 提出了一种基于移动用户画像的高铁5G专网优化方案。试点验证结果表明, 该方案对用户身份属性的识别准确率可超过90%, 有望减少超过70%的专网入侵用户, 大幅提升专网资源利用率。所提出的方案为网络智能化技术的应用落地提供了重要参考, 有助于推动未来智慧内生网络建设, 实现更加精准的网络用户感知和智能调度, 支撑更加丰富的业务场景。

关键词: 5G; 高速铁路; 专网; 用户画像; 智能调度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2026012

Solutions for 5G high-speed railway dedicated network optimization based on mobile user profiling

Xu Ming¹, Shi Yuanyuan¹, Li Dan², Li Aihua¹, Wei Bin¹, Zhang Chong¹,
Li Huihui³, Guo Hongfeng³, Qin Shihui³

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100032, China

3. China Mobile Group Guangdong Co., Ltd., Guangzhou 510623, China

Abstract: Promoting the construction of 5G high-speed railway (HSR) dedicated networks plays an important role in improving the travel experience of HSR users, which has become a key focus of 5G strategy of operators. Firstly, the scenario-specific issues faced by the construction of 5G HSR dedicated networks were comprehensively analyzed, and then a new optimization solution was proposed to address the problems including frequent non-HSR user intrusion and the lack of comprehensive user attribute perception capabilities in the current HSR dedicated networks. By coordinating the wireless network and the core network, and leveraging the network data analytic function, the pro-

posed method achieves, for the first time, performance optimization for the 5G HSR dedicated network based on intelligent mobile user profiling. The testing results indicate that the method can achieve an accuracy of over 90% for user attribute identification, and is expected to further reduce over 70% of the non-HSR user intrusion. Overall, the proposed solution provides an important reference schema for the application and implementation of network intelligent technology, and helps to promote the construction of AI-native networks, thus achieving more precise network user perception and intelligent scheduling, and supporting more diverse business scenarios.

Key words: 5G, high-speed railway, dedicated network, user profiling, intelligent scheduling

0 引言

自2019年以来,我国5G网络基础设施已日趋完善,未来网络建设目标将转向重点场景的“补齐、补优、补强”^[1-2]。2023年年底,以工业和信息化部为首的11部门联合印发《关于开展“信号升格”专项行动的通知》^[3],提出移动网络质量提升与用户体验优化的总体要求,其中,高铁被列为“信号升格”行动的重点场景之一。

高铁凭借极具竞争力的价格和乘坐便捷性,已逐渐成为我国国民日常出行中最受欢迎的交通工具之一。然而,不断扩大的铁路建设规模和旅客发送量也为高铁网络容量及用户感知优化提出了更高要求^[4-6]。尤其是随着5G网络覆盖的不断完善,用户业务使用习惯已发生根本性改变,传统的铁路2G/3G/4G网络覆盖已难以满足高铁用户对高速率、低时延网络服务体验的迫切需求。此外,由于高铁单车承载能力强,车内环境舒适,行程较长,乘客中旅游探亲和商务出行人员占比高,高铁用户相对全网用户而言,数字娱乐和移动办公需求更加强烈。统计分析显示,高铁用户月均上网流量(dataflow of usage, DOU)比全网用户高出约1倍,每用户平均收入(average revenue per user, ARPU)高出约50%,且业务负荷以视频通话、视频直播等大带宽业务为主,对时延、卡顿等业务指标十分敏感^[7]。可见,高铁乘客特征与运营商价值客户高度契合。打造优质可靠的高铁5G专网,持续推进高铁5G网络覆盖,最大限度提升高铁用户业务体验,对于运营

商品品牌价值塑造和利润来源扩张具有十分重要的作用。

然而,高铁场景的特殊性为5G专网建设带来了诸多挑战。以往研究主要从组网方式、站址规划、设备/天线选型、无线参数优化等角度探索提升高铁5G信号覆盖。对于如何通过无线网和核心网的跨域协同,实现更精准的高铁用户身份感知和端到端的保障策略生成,目前尚缺乏有效的解决方案。为此,本文基于以网络数据分析功能(network data analytic function, NWDAF)为核心的网络运行智能架构,提出了一种高铁5G专网智能优化方案(如图1所示),通过构建移动性用户画像模型,增强网络对用户身份的感知能力,同时通过深入分析高铁场景下的用户行为模式,构建了结合多维信息的保障策略下发机制。基于现网试点环境的验证结果表明,本文所提出的高铁专网优化方案可有效抑制公网用户入侵,提升专网资源利用率。

1 高铁5G专网建设挑战

高铁网络覆盖提升一直是移动通信领域关注的热点问题。相对于日常通信场景,高铁具有移动速度快、车体封闭、客流密集等特点,对专网建设和优化提出了更高的要求。进入5G时代,通信频段更高,频率资源更加受限,使得高铁5G专网建设面临更加艰巨的技术挑战。

1.1 细分场景复杂多样

高铁线路各区段的人口分布、建筑密集程度和地形情况各异,通信环境十分复杂,网络建设

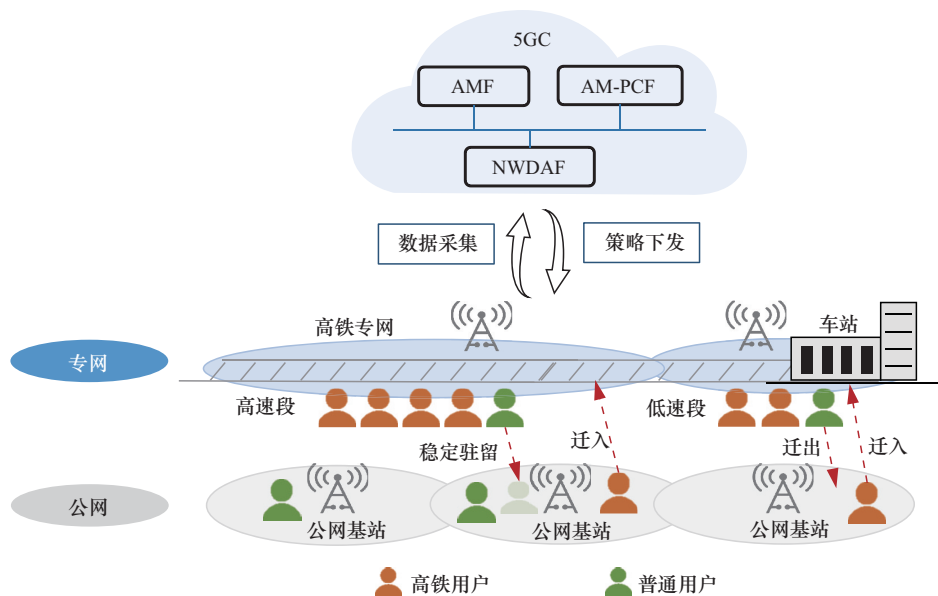


图1 高铁5G专网智能优化方案

需要更加因地制宜。具体来看，对于非隧道城区路段，人口密集，车速相对较低；而在非隧道乡村路段，人口稀疏，车速较快，二者对网络容量的需求并不相同，网络规划也会存在差异。对于隧道路段，还需考虑采用远端射频单元（remote radio unit, RRU）延伸和部署泄漏电缆等方式，提升信号覆盖的连续性，并综合考虑网络建设成本和施工难度等因素，制定恰当的建设方案^[8]。此外，轨道形态（如平直、弧形和分岔）在基站的选址规划中也是一个需要考虑的因素，以实现轨道两侧信号质量的均衡，降低多小区信号的干扰。

高铁用户移动性行为示例如图2所示。从用户行为的角度来看，高铁用户跟随列车既会经历持续地高速移动，也会经历加/减速（列车进/出站）或持续低速移动（如城区限速路段）等过

程，甚至在固定位置长时停留（如列车临时停靠或中途停站）。用户行为在网络侧的反映则更加复杂，一段时间内既可能持续地在高铁专网基站间快速切换，也可能从5G专网基站飘出到公网基站或4G基站，甚至持续地在公网基站间切换。用户行为模式的复杂性，为通过移动性分析进行身份判断，引入了巨大挑战。

1.2 多普勒频偏

多普勒频偏示意图如图3所示，当用户终端与基站之间发生相对运动时，会产生多普勒频偏，导致终端接收到的信号频率与基站发射的信号频率存在差异。接收端频率如下：

$$f_d = \frac{f_0}{c} \times v \times \cos \theta \quad (1)$$

其中， f_0 为载波频率， c 为光速， v 为终端移动速度， θ 为基站信号传播方向与终端移动方向的夹

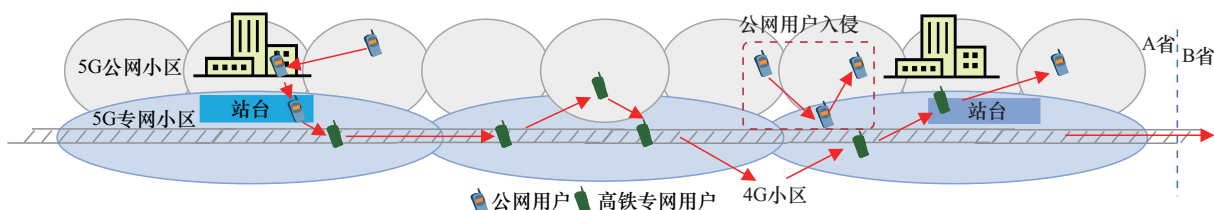


图2 高铁用户移动性行为示例

角。多普勒频偏过大将严重降低接收端的信号解调能力，增大子载波间干扰，降低信噪比，同时引起符号间相位偏差，影响信道估计，导致高速移动时终端脱网概率增大，降低用户体验^[9-10]。当前，高铁的平均运营时速在 300 km 左右，最高时速可超过 400 km，未来还存在进一步提速的可能；并且，由式（1）可知，在速度相同的情况下，系统工作频率越高，频偏越明显。不同车速对应的各载波频段最大多普勒频偏^[9]见表 1。由表 1 可知，相对于 4G 时代，多普勒频偏对高铁 5G 专网的影响将更加突出。

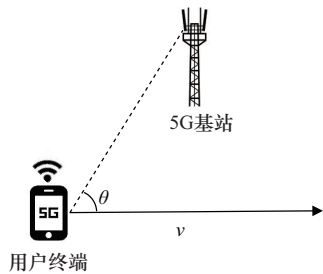


图3 多普勒频偏示意图

表 1 不同车速对应的各载波频段最大多普勒频偏

列车速度/ (km·h ⁻¹)	1.9 GHz 频偏/Hz		2.3 GHz 频偏/Hz		2.6 GHz 频偏/Hz	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
150	528	264	639	319	722	361
200	704	352	852	426	963	481
250	880	440	1 065	532	1 204	602
300	1 056	528	1 278	639	1 444	722
350	1 231	616	1 491	745	1 685	843

多普勒频偏是影响高铁 5G 专网性能的关键因素，它主要依赖各设备厂商部署的频偏补偿功能进行抑制。首先，基站利用上行导频信号对频偏值进行估计，然后，利用符号间和符号内频偏补偿技术对接收到的信号进行频率校正，从而提升译码准确率，降低多普勒频偏对通信质量的影响^[10]。值得注意的是，目前现网基站还支持利用多普勒频偏，反向求解列车速度，从而为用户的高/低速属性判断提供参考，实现动态的公/专网

用户调度和切换，如低速用户迁出专网、高速用户优先调度等^[11-12]。基于多普勒频偏的用户身份判断^[11]如图 4 所示。然而，该方式在列车降速运行（如城区路段限速）或站停时，容易出现对用户身份的误判，导致用户体验感知受损。图 5 展示了某高铁 5G 专网小区一天内用户数变化。图 5 中用户数“尖刺”展示了列车经过引起的负荷瞬时上升，而水平“底噪”则展示了无列车经过时的公网用户入侵情况。可见，该小区平日有 120 户左右的公网用户入侵专网，约占列车经过时用户承载的 40%。因此，仅依赖基站对用户的感知，目前仍不足以保证“专网专用”。

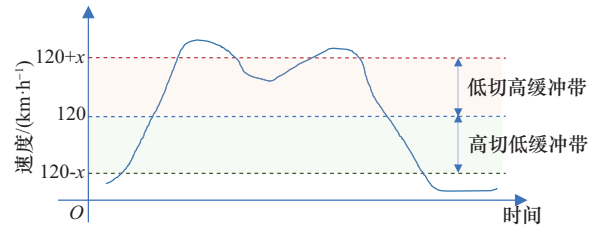


图4 基于多普勒频偏的用户身份判断

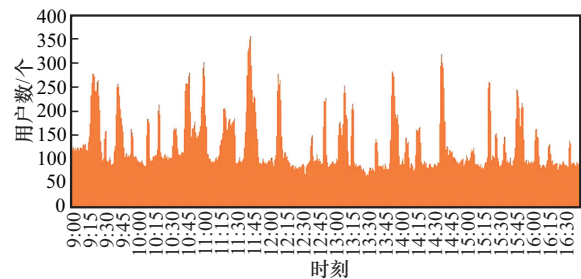


图5 某高铁 5G 专网小区一天内用户数变化

1.3 穿透损耗

高铁车厢为全封闭式结构，外壳大量使用高强度合金，车窗玻璃也采用了特殊材料，无可避免地为无线信号在车体内的传播带来了穿透损耗。并且，由于基站通常沿铁路线建设，信号进入车体的入射角度（即掠射角）偏小，与垂直入射相比，须穿透的车厢外壁更厚，穿透损耗更大^[13]。不同车厢材质对 2.6 GHz 频段信号带来的穿透损耗见表 2，由表 2 可见，新型高铁列车所广泛采用的铝合金材质对信号质量的影响将更突出^[13]。



表2 不同车厢材质对2.6 GHz 频段信号带来的穿透损耗

车型	列车材质	2.6 GHz 穿透损耗/dB
普通列车	铁质	13
CRH1	不锈钢	24
CRH2	中空铝合金	14
CRH3	铝合金	29
CRH5	中空铝合金	22
CR400AF	铝合金	33

针对穿透损耗问题,目前主要从无线网络规划的角度进行优化。通过设置恰当的站轨距、站轨高、方位角等,避免5G信号掠射角过小,以及其他障碍物对5G信号传播的遮挡,从而降低穿透损耗对信号质量的影响,提升车体内网络覆盖^[14]。

1.4 小区频繁切换

为提升高铁5G专网的承载能力,有必要采用带宽更大的高频载波进行组网。然而,高频载波传播损耗更大,覆盖能力相对低频组网而言更加受限。因此,高频段高铁5G专网站间距设置将进一步缩小。对于中国移动所建设的2.6 GHz高铁5G专网而言,最优的站间距在500 m左右^[15],这使得高铁5G专网基站数量大大提升,并且,若按350 km/h估算高铁运营速度,则约5 s发生一次小区切换。

频繁地小区切换将导致终端掉话率上升,网络性能劣化。因此,高铁5G专网建设须合理地规划小区间覆盖重叠区,并开启多小区合并功

能,从而缓解车速过快引起的小区频繁切换问题^[12]。对于城区路段,考虑区域内公网用户较多、容量需求大,同时列车车速较慢,可采用1拖6个RRU的小区合并方式;对于乡村路段,根据实际容量需求配置,最多可采用1拖12个RRU的小区合并方式^[12]。

2 高铁5G专网优化方案

基于上述分析,可以发现,现阶段的高铁5G专网建设侧重于无线层面的优化,缺乏与核心网的跨域协同,因此,难以实现对用户和业务属性的全局感知和准确分析,导致公网用户频繁侵占专网资源、专网对高铁用户的稳定保障能力不足等问题。为此,本研究首次基于以NWDAF为中心的网络智能调度架构,提出一种基于智能用户画像的高铁专网保障方案。首先,本方案构建了基于神经网络的用户画像模型,利用用户基站切换轨迹数据,实现对高铁用户和公网用户的快速、精准识别;然后,设计了高铁专网智能调度流程,通过综合多维度信息(用户画像结果、签约信息、用户位置等),实现无线接入技术/频点选择优先级索引(radio access technology/frequency selection priority index, RFSP Index)下发,提升专网资源利用率。

2.1 高铁5G专网智能调度架构设计

基于用户画像的高铁5G专网智能调度架构如图6所示,为优化高铁5G专网的用户体验感

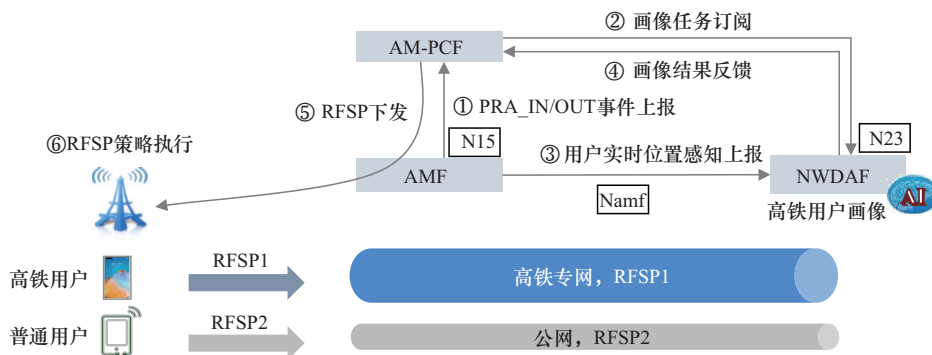


图6 基于用户画像的高铁5G专网智能调度架构

知，构建了以NWDAF为核心的专网智能调度架构。NWDAF是由第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）在Rel-15 TS 23.501中首次定义并引入的5G核心网网元，主要功能是面向网络提供指定的数据分析服务。经过不断演进，NWDAF已发展成为5G网络的人工智能（artificial intelligence, AI）+大数据引擎，具备网络数据采集/汇聚、集中式/分布式模型训练、智能分析服务开放、模型性能评估/监测等多维能力体系，可满足多样化5G业务场景对AI能力的需求^[16-17]。

在3GPP技术规范基础之上，本方案为NWDAF新定义用户画像分析服务。该分析服务的输入为用户位置和连接状态等信息，可通过向接入管理功能（access management function, AMF）订阅无线接入网络（radio access network, RAN）节点级别的用户设备（user equipment, UE）位置报告事件、UE位置趋势事件、连接状

态报告事件来获取。分析服务的输出为用户属性，包括如下4种情况。

（1）未知用户：在分析持续期内无法给出确切的高铁/非高铁判定的用户，如未获取到足够的用户移动性信息（用户在专网出现的时间过短）。

（2）高铁用户：基于所获取的移动性轨迹和连接状态信息，判定为需要高铁专网保障的用户，选频策略上倾向专网优先。

（3）公网用户：基于所获取的移动性轨迹和连接状态信息，判定为无需高铁专网保障的用户（即专网入侵用户），选频策略上倾向公网优先。

（4）普通用户：高铁/公网用户在脱离高铁专网后，被重置/恢复的身份状态，该状态下网络侧无须维护用户分析上下文，无选频优先级限制。

不同用户身份的切换关系如图7所示。其中，存在报告区域（presence reporting area, PRA）是3GPP所定义的特殊区域，UE进出该区域可触发存在情况上报事件（PRA_IN/PRA_OUT）。本方

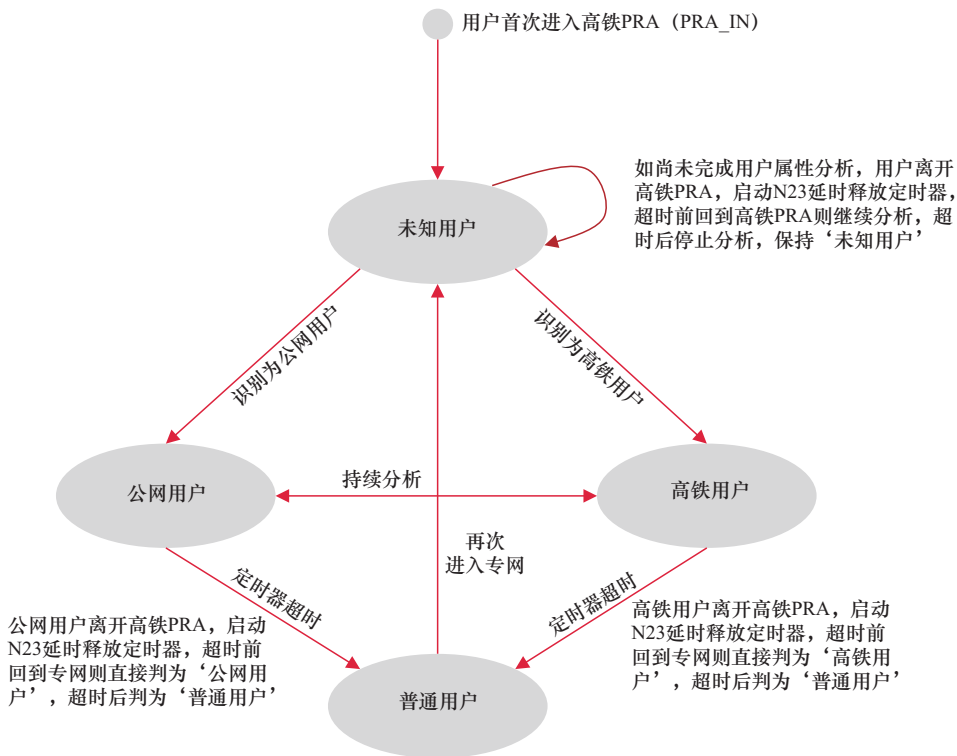


图7 不同用户身份的切换关系



案中，PRA 主要包括高铁专网跟踪区码 (track area code, TAC) 和站台区域的公网基站，实际部署时可根据保障效果灵活调整区域规划。N23 和 N15 分别为 NWDAF 和接入管理策略控制功能 (access management policy control function, AM-PCF) 之间、AM-PCF 和 AMF 之间的服务化接口。同时，为避免用户“乒乓”切换破坏分析持续性，造成额外算力消耗，本文引入基于定时器的 N23 延迟释放机制，使得 UE 离开高铁 PRA 后，仍可保持分析状态或前序分析结果。

在高铁 5G 专网智能调度架构中，AMF 是分析数据的提供者和智能保障流程的触发者。当用户首次进入 PRA 时，会触发 AMF 通过 N15 上报 PRA_IN 事件，从而启动用户画像分析流程。类似地，当用户离开 PRA 时，AMF 会通过 N15 上报 PRA_OUT 事件，从而启动用户画像分析去订阅流程。同时，AMF 负责根据 NWDAF 的数据订阅请求，上报 UE 的移动性、连接状态等信息，支撑 NWDAF 进行用户属性分析。AM-PCF 是 NWDAF 用户画像分析服务的消费者。AM-PCF 在接收到 AMF 上报的 PRA_IN 事件后，通过 N23 接口，向 NWDAF 发起用户画像分析订阅，获取用户属性分析结果，并综合用户签约和位置信

息，生成 RFSP 调度策略，通过 N15 反馈给 AMF，进而传达至基站和用户终端。NWDAF 是智能调度方案的 AI 能力中心，负责根据分析订阅请求，执行数据采集和用户属性分析，同时，还负责维护分析上下文，控制 N23 与 N15 的时延释放。

2.2 移动用户画像模型构建

为实现用户身份的准确判定，构建了基于神经网络的用户画像模型。图 8 展示了移动性用户画像模型构建流程。首先，采集了指定高铁路段和时段的现网信令数据，并对其进行预处理。信令数据预处理的主要步骤包括：(1) 从信令数据中提取出时间戳、用户标识、基站标识、事件类型等关键字段，信令关键字段说明见表 3；(2) 以用户标识为主键，将所提取的关键字段拼接，形成用户粒度的轨迹特征序列。同时，为了扩大训练样本数量，利用对网络用户的行为建模，额外生成了百万量级的仿真合成轨迹。

本文采用了一种利用长短轨迹特性差异进行数据标注的方法，构建模型的训练和测试数据集。具体地，考虑高铁长时运行过程中 (大于 30 min)，在某一时段内，速度必然会达到并维持在一个明显高于其他机动车的水平，此时基站切换频率将

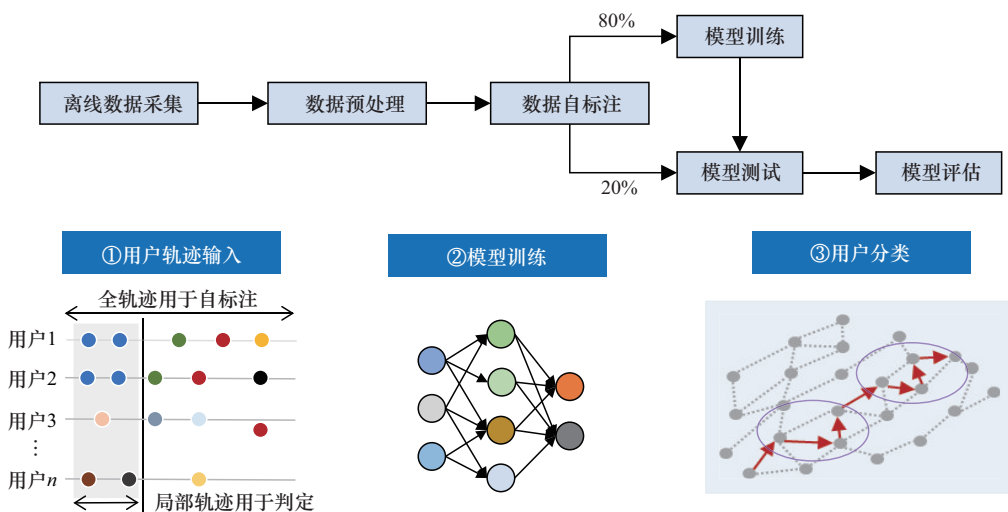


图 8 移动性用户画像模型构建流程

显著升高。图9展示了用户专网轨迹片段示例，即拼接后的某用户专网基站切换轨迹片段，包括高铁高速/加速行驶和并线公路行驶3种情形。可见，相对于并线高速公路行驶的车辆和处于加速阶段的高铁，高速段高铁具有更快、更稳定的基站切换频率，且能够较稳定地维持在专网内（专网基站编号连续性更好）。因此，对拼接后的用户完整基站切换轨迹，可利用特定规则划分标注为高铁用户和公网用户。其中，高铁用户需至少满足基于基站切换频率估算的平均移动速度大于给定阈值，或轨迹相似用户数大于给定阈值（即满足高铁用户在时空上的群体移动特征）；否则，认为是公网用户。对于轨迹长度过短的用户（如完整轨迹时长小于10 min），可作为无法标注的未知用户处理，训练时予以剔除。

表3 信令关键字段说明

字段名	说明	用途
时间戳	事件发生时间	时间信息
用户标识	SUPI	主键
基站标识	事件发生基站	副键，提供空间信息
事件类型	信令类型，如连接状态变更、基站切换等	不同事件对应不同的处理逻辑

训练阶段，随机选择80%的标注样本作为训练样本，余下的20%标注样本作为测试样本。由于在实际部署时，用户画像模型需要在未获取用户完整轨迹的情形下，尽可能快速、准确地判定用户身份，因此，对每一个训练样本，从完整轨迹中随机截取包含至少3个轨迹点且不超过20个轨迹点的连续轨迹片段作为模型输入。在模型选择方面，本方案构建了以Transformer为主干的深度神经网络模型进行用户分类，输入特征包括时间戳和基站标识，输出为用户身份及其对应的置信度。测试时，类似地对测试样本进行轨迹截取，并通过置信度阈值（如高于80%）进行身份判定，若高铁/公网用户置信度均无法达到给定阈值，则判定为未知用户。评估阶段，为尽可能模拟现网实际部署时的情形，使用基于真实信令构建的独立评估样本集，逐步增加模型输入样本轨迹长度多次判断，并将可获得满足置信度要求的最短输入轨迹的判断结果作为模型对该样本的最终身份判定。

2.3 关键业务流程设计

图10展示了高铁用户画像启动流程，具体步骤如下。

5	2024-06-11 08:57:38	12718083	9
6	2024-06-11 08:58:14	12718467	10
7	2024-06-11 08:58:40	12718080	11
8	2024-06-11 08:59:10	12718468	12
9	2024-06-11 09:00:12	12718466	13
10	2024-06-11 09:00:23	12718464	14
11	2024-06-11 09:00:46	12718463	15
12	2024-06-11 09:01:19	12718462	16
13	2024-06-11 09:01:42	12718465	17
14	2024-06-11 09:02:02	12743548	18
15	2024-06-11 09:02:28	12743549	19
16	2024-06-11 09:02:59	12743550	20
17	2024-06-11 09:03:39	12743551	21
18	2024-06-11 09:04:27	12743558	22
19	2024-06-11 09:05:07	12743557	23
20	2024-06-11 09:05:45	12743565	24
21	2024-06-11 09:06:18	12743567	25
22	2024-06-11 09:06:47	12743552	26
23	2024-06-11 09:07:41	12743559	27
24	2024-06-11 09:07:46	12743568	28
25	2024-06-11 09:08:17	12743553	29

(a) 高铁高速行驶基站切换序列

0	2024-06-11 11:56:53	12718083	9
1	2024-06-11 11:58:05	12718467	10
2	2024-06-11 11:59:01	12718080	11
3	2024-06-11 11:59:48	12718468	12
4	2024-06-11 12:06:49	12718464	14
5	2024-06-11 12:21:07	12718463	15
6	2024-06-11 12:31:56	12718462	16
7	2024-06-11 12:46:02	12743550	20
8	2024-06-11 12:58:53	12743553	29
9	2024-06-11 13:00:27	12743554	30

(b) 并线公路行驶基站切换序列

17	2024-06-11 09:16:41	12743569	46
18	2024-06-11 09:22:57	12743570	47
19	2024-06-11 09:24:21	12743578	48
20	2024-06-11 09:25:28	12743597	49
21	2024-06-11 09:26:15	12743599	51
22	2024-06-11 09:26:53	12743601	53
23	2024-06-11 09:27:36	12743584	54
24	2024-06-11 09:28:05	12743585	55

(c) 高铁加速行驶基站切换序列

图9 用户专网轨迹片段示例

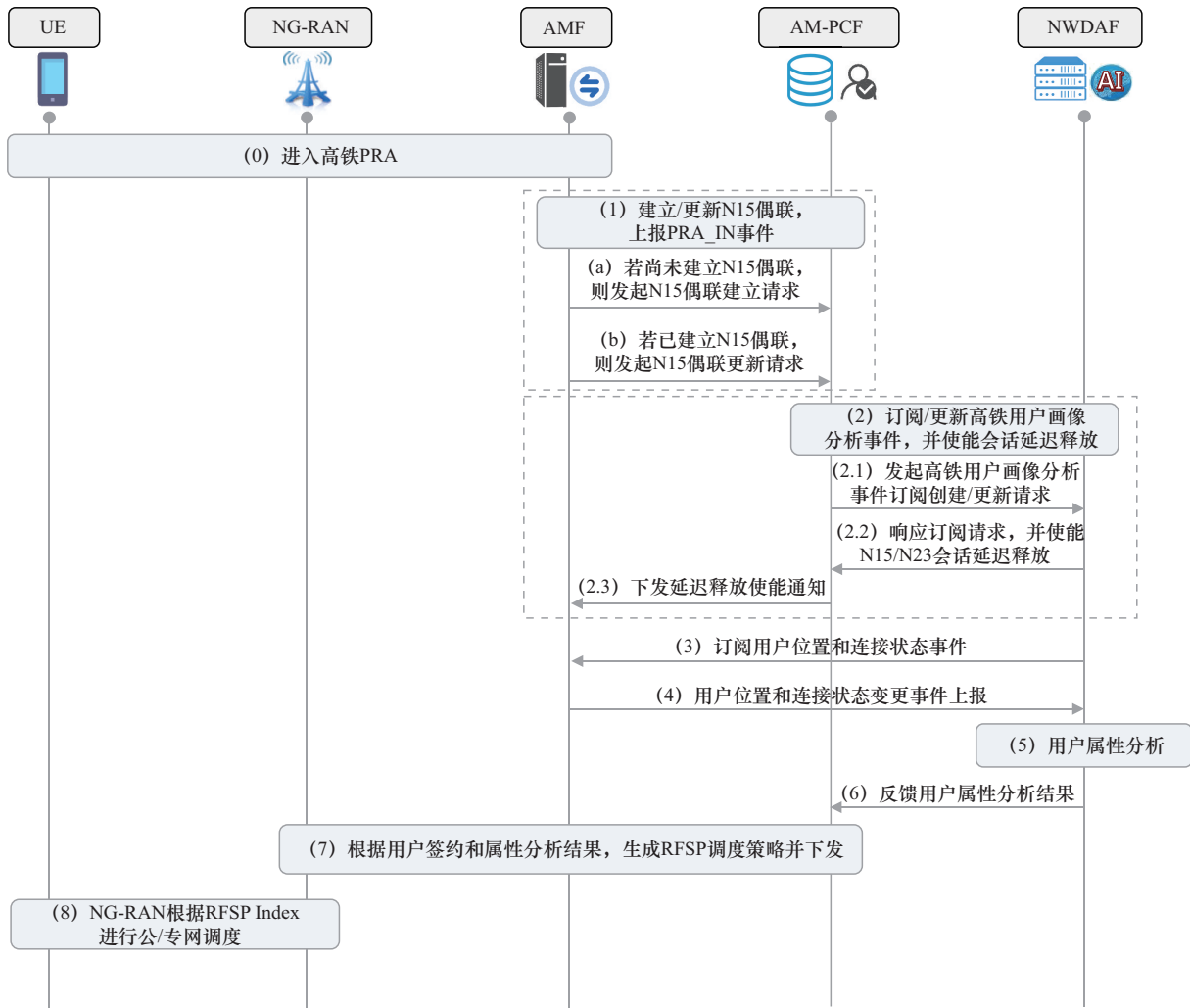


图10 高铁用户画像启动流程

预置条件：用户已完成初始注册；5G核心网端到端开启高铁业务保障功能，完成高铁PRA配置。

步骤1 用户进入高铁PRA。

步骤2 AMF向AM-PCF发起N15偶联建立/更新请求，并上报PRA_IN事件。若AMF与AM-PCF尚未建立N15偶联，则AMF发起N15偶联建立请求；否则，发起N15偶联更新请求。AM-PCF在接收到N15偶联的建立/更新请求后，通过请求响应，向AMF发起PRA变更事件订阅。AMF在收到PRA变更事件订阅后，再通过N15偶联更新请求，上报PRA_IN事件。

步骤3 AM-PCF向NWDAF发起用户画像

分析订阅/更新请求。若此前尚未订阅用户画像分析任务，则向NWDAF发送订阅消息，携带AMF网元标识、PRA状态等信息；若此前已订阅用户画像分析任务，则发起分析订阅更新，携带PRA状态信息。NWDAF在收到分析订阅/更新请求后，在请求响应中，携带N15/N23会话延迟释放标识，使能延迟释放。AM-PCF收到NWDAF发出的延迟释放使能请求后，再将其通过N15偶联更新通知消息向AMF下发。

步骤4 NWDAF根据AM-PCF订阅消息中携带的AMF网元标识，向对应的AMF订阅用户位置（基站粒度）、连接状态或用户位置趋势相关信息。

步骤5 AMF根据数据订阅请求，当用户位

置、连接状态发生变更时，或用户位置趋势到期时，向NWDAF进行数据上报，包括时间戳、用户标识、基站ID等。

步骤6 NWDAF执行用户属性分析。

步骤7 NWDAF通过N23向AM-PCF反馈用户画像分析结果。

步骤8 AM-PCF基于签约信息和用户画像信息，生成RFSP调度策略，并通过AMF下发至NG-RAN。不同用户类型下发RFSP Index参考方案见表4，实际部署时可按需调整。

步骤9 新一代无线接入网（next generation radio access network, NG-RAN）根据下发的RFSP Index，执行公/专网调度。

图11展示了高铁用户画像去订阅流程，即用户离开高铁PRA后，触发用户画像去订阅的业务流程，具体步骤如下。

表4 不同用户类型下发RFSP Index参考方案

用户属性类型	用户是否签约	RFSP Index推荐值
公网用户	否	公网RFSP Index
公网用户	是	公网RFSP Index
高铁用户	否	不下发RFSP Index
高铁用户	是	专网RFSP Index
未知用户	是/否	不下发RFSP Index
普通用户 (由公网用户转换)	否	RFSP Index值为NULL
普通用户 (由公网用户转换)	是	RFSP Index值为NULL
普通用户 (由高铁用户转换)	否	不下发RFSP Index
公网用户	否	公网RFSP Index

步骤1 用户离开高铁PRA。

步骤2 AMF向AM-PCF发起N15偶联更新请求，上报PRA_OUT事件。AM-PCF收到事件上报后，向NWDAF发起用户画像分析订阅更新请求

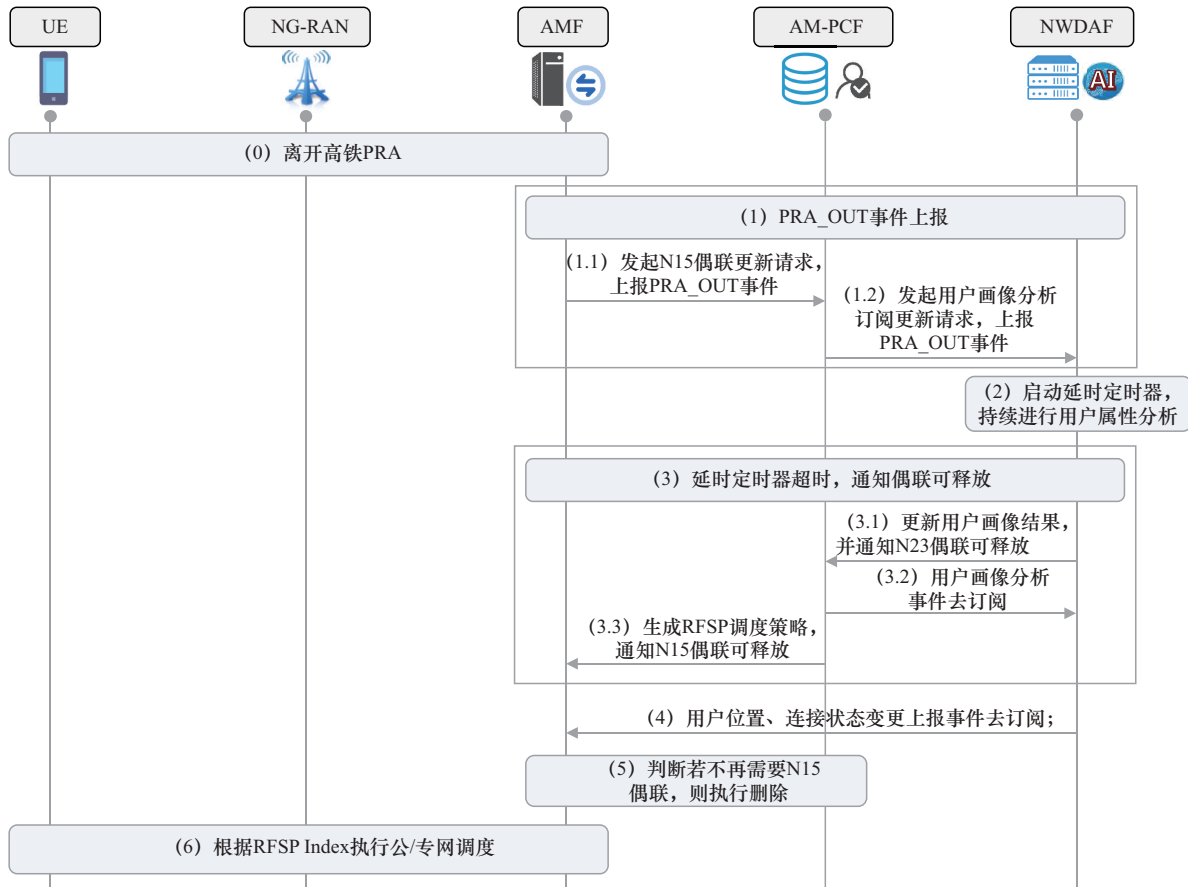


图11 高铁用户画像去订阅流程



新, 传递PRA_OUT事件。

步骤3 NWDAF收到订阅更新后, 启动延时定时器, 并在延时定时器超时前持续进行数据采集和分析。定时器时长可根据保障效果、用户身份等按需调整。

步骤4 延时定时器超时, 触发NWDAF更新用户画像结果(超时场景下的分析结果只包括普通用户和未知用户两种情形), 并向AM-PCF通知可释放N23/N15会话。AM-PCF收到会话释放请求和更新的用户画像结果后, 生成RFSP策略, 向AMF下发, 并通知其可释放N15会话, 同时, 向NWDAF发起用户画像分析事件去订阅。

步骤5 NWDAF向AMF取消用户位置、连接状态事件或用户位置趋势的订阅。

步骤6 AMF收到可释放N15会话的通知后, 若无其他需使用N15接口的业务, 则发起N15会话删除, 否则继续保留。

步骤7 AMF收到AM-PCF更新的RFSP策略后, 向NG-RAN下发。NG-RAN根据收到的RFSP Index, 执行用户调度。

3 实验效果

为验证优化方案效果, 本文选取了某省份一段约31 km, 且已完成5G专网覆盖的高速铁路作为试点路段。试点环境的搭建涉及对无线侧和核心网侧的改造和版本升级。无线侧主要完成了对试点路段所涉及的18个专网基站和45个公网基站的TAC改造和选频策略配置。核心网侧则部署了独立的试点网元, 包括AMF、PCF、用户数据管理功能(user data management function, UDM)、NWDAF等。对于AMF和PCF, 完成了高铁专网PRA和跟踪区(tracking area, TA)列表配置、RFSP策略配置以及与NWDAF的对接信息配置; 对于UDM, 完成了签约信息配置; 对于NWDAF, 完成了用户画像模型部署。

基于试点环境, 本文首先开展了模型功能测

试, 采集试点路段的无线专网工参数据(基站ID、经纬度等信息)和信令数据(约10万条), 利用自标注策略和用户行为仿真构建了模型训练集、测试集和评估集。训练集和测试集准确率收敛过程如图12所示。由图12可知, 经过531次迭代, 模型准确率趋于稳定。在评估集中, 用户画像模型可准确识别90.66%的高铁用户和92.87%的公网用户(模型性能指标见表5)。同时, 为验证算法的实际识别效果, 采用测试终端, 通过乘坐高铁以及在高铁沿线步行移动等方式, 模拟了高铁用户和公网用户在专网内的移动性行为。结果显示, 在50次高铁用户行为模拟中, 47次被成功识别并实现专网驻留; 在50次公网用户模拟中, 48次被成功识别并实现专网迁出。

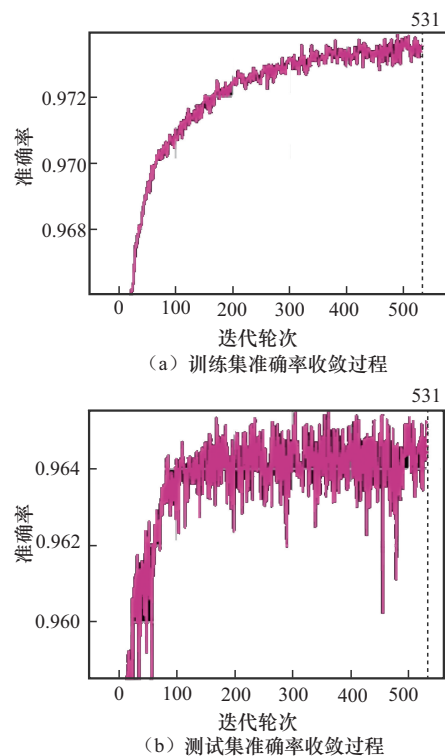


图12 训练集和测试集准确率收敛过程

表5 模型性能指标

用户类型	查准率	查全率	误判率	检出时间中位数/s
高铁用户	91.43%	90.66%	7.12%	179
公网用户	92.22%	92.87%	9.34%	597

进一步，本文基于信令数据分析了用户画像模型对高铁用户和非高铁用户的检出时间差异。检出时间被定义为输出准确判定结果时的信令时间戳与首次输入时的信令时间戳之间的差值。图 13 展示了高铁/非高铁用户的检出时间累积分布。由图 13 可见，公网用户的检出时间中位数为 597 s，高铁用户检出时间中位数为 179 s。根据高铁运营时速和超小区（合并后的小区）覆盖范围推断，该模型大约需 3 个基站轨迹点来实现较准确的高铁用户识别，行程跨度为 6~12 km，而公网用户由于移动性数据采集频次更低，所需判定时间更长。

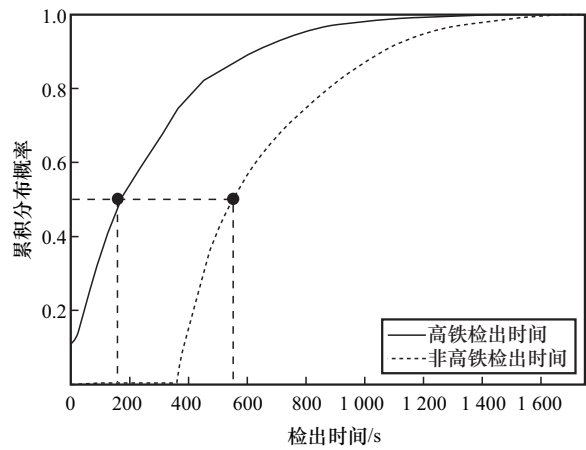
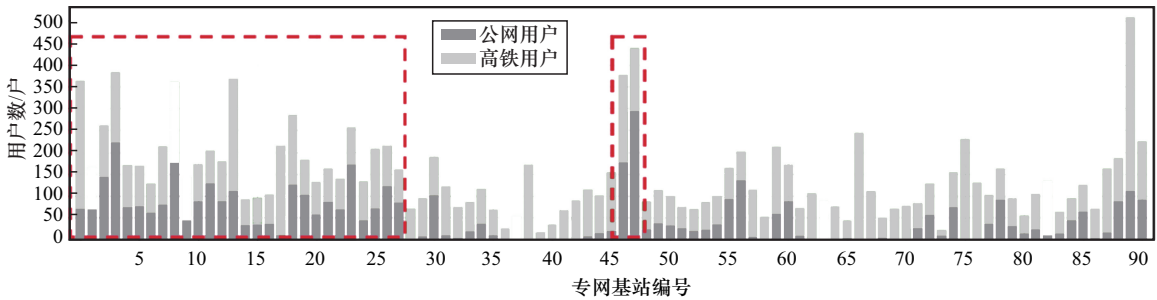


图 13 高铁/非高铁用户检出时间累积分布

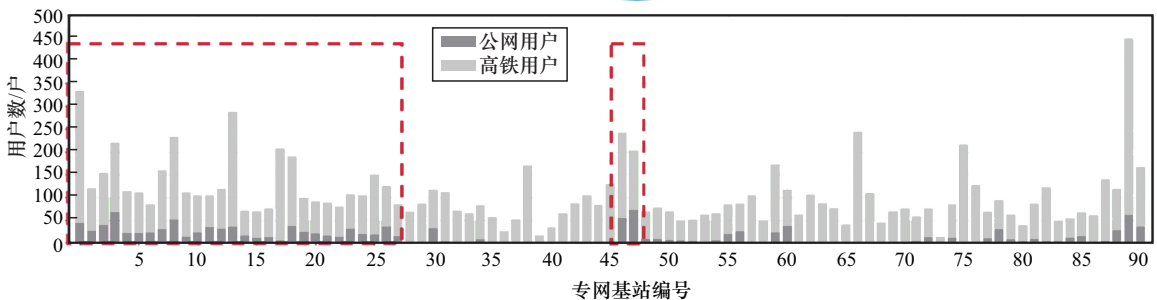
此外，基于信令数据，本文还分析模拟了该优化方案对入侵用户的迁出效果，高铁专网入侵用户迁出效果对比结果如图 14 所示。在功能开启前，公网入侵用户数为 4 628 户；功能开启后，入侵用户可减少至 1 288 户，实现了超过 70% 的入侵用户迁出。其中，虚线框标识了迁出效果较明显的专网基站。

4 结束语

随着 5G 网络建设逐步从规模化覆盖转向高价值场景的精准规划，持续推进高铁 5G 专网建设，提升国民出行用网体验，已成为运营商塑造市场口碑和增强客户服务能力的重要举措。本文首先深入分析了高铁 5G 专网建设面临的场景特异性挑战，然后进一步针对公网用户频繁入侵导



(a) 功能开启前的用户分布情况



(b) 功能开启后的用户分布情况

图 14 高铁专网入侵用户迁出效果对比结果



致专网资源利用率不足这一问题, 创新地提出了一种基于移动用户画像的高铁5G专网优化方案。与以往侧重无线优化的方案不同, 本方案首次通过无线网与核心网的跨域协同, 以NWDAF为中心, 实现了更精准、全面的用户属性智能分析, 并综合多维度用户信息, 实现了更加定制化和细粒度的保障策略生成。本文所提出的方案为网络智能化技术的应用落地以及未来智慧内生网络建设提供了重要参考, 为实现更加丰富的网络用户感知和更加精准的智能调度提供了基础框架。

参考文献:

- [1] 苏德悦. 中国5G,何以跑出“加速度”?[N]. 人民邮电, 2024-06-13(1).
Su D Y. How has China's 5G achieved an "acceleration"?[N]. Posts and Telecommunications News, 2024-06-13(1).
- [2] 岐洁, 李晓飞, 程锋, 等. 行业发展面临不确定性升级 期待新业务新连接释放需求[J]. 通信企业管理, 2025(4): 21-25.
Qi J, Li X F, Cheng F, et al. Industry development faces uncertainty upgrade, expecting new business and new connection release demand[J]. C-Enterprise Management, 2025(4): 21-25.
- [3] 王怡. 推进高速高铁沿线“信号升格”[J]. 科技创新与品牌, 2025(2):31.
Wang Y. Promote the "signal upgrade" along expressways and high-speed railways[J]. Sci-tech Innovations and Brands, 2025(2):31.
- [4] 何亮. 我国铁路高质量发展交出亮眼成绩单[N]. 科技日报, 2025-01-03(2).
He L. China's railway industry has delivered an outstanding performance in high-quality development[N]. Science and Technology Daily, 2025-01-03(2).
- [5] 周琼. 铁路行业多个关键领域成效显著[N]. 人民铁道, 2025-09-01(001).
Zhou Q. Railway industry achieves remarkable results in multiple key areas[N]. People's Railway Daily, 2025-09-01(001).
- [6] 贺琳, 范天伟, 王伟, 等. 高铁5G双频组网方案及策略研究[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 48-52.
He L, Fan T W, Wang W, et al. Research on 5G dual-band net-
- working scheme of high speed rail scenario[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2025(2): 48-52.
- [7] 孙普. B5G 高铁网络演进方案研究[J]. 中兴通讯技术, 2024: 1-15. (2024-12-13).
Sun P. Research on the evolution of B5G high-speed railway networks[J]. ZTE Technology Journal, 2024: 1-15. (2024-12-13).
- [8] 王佐, 曾伟, 李长长, 等. 高铁多场景5G网络规划和性能验证[J]. 邮电设计技术, 2023(12): 56-62.
Wan G Z, Zeng W, Li C C, et al. 5G network planning and performance verification for multi-scenario of high-speed railway[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(12): 56-62.
- [9] 曹广山, 张胜东, 马云刚. 基于8T8R大功率设备高铁场景下的5G覆盖方案研究[J]. 广东通信技术, 2020, 40(6): 10-14, 19.
Cao G S, Zhang S D, Ma Y G. Research on 5G coverage scheme based on 8T8R high-power equipment in high-speed railway scene[J]. Guangdong Communication Technology, 2020, 40(6): 10-14, 19.
- [10] 李春旭, 王晓楠. 高速铁路5G网络覆盖方案研究[J]. 数字通信世界, 2025(1): 40-42.
Li C X, Wang X N. Research on 5G network coverage scheme for high speed railway[J]. Digital Communication World, 2025(1): 40-42.
- [11] 周娇, 何文林, 李新, 等. 5G NR 高铁网络优化方案研究[J]. 信息通信技术, 2022, 16(3): 57-64.
Zhou J, He W L, Li X, et al. Research on network optimization of 5G NR high speed railway[J]. Information and Communications Technologies, 2022, 16(3): 57-64.
- [12] 梁松柏, 郭颖悟, 李新卫. 高铁场景网络质量和用户感知提升方法[J]. 电信科学, 2021, 37(3): 162-170.
Liang S B, Guo Y W, Li X W. Network quality and user perception improvement of high-speed rail scene[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(3): 162-170.
- [13] 成剑波. 高铁环境下5G网络切换方案研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
Cheng J B. Research on 5G network handover solutions in high-speed railway environments[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [14] 申方舟. 基于5G需求的高铁专网覆盖思考[J]. 网络安全技术与应用, 2020(11): 104-105.
Shen F Z. Thoughts on coverage of high-speed railway private network based on 5G demand[J]. Network Security Technology

& Application, 2020(11): 104-105.

[15] 赵俊涛, 孟繁丽, 刘昱鹏, 等. 高铁5G天线技术及选型应用分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(7): 62-67.

Zhao J T, Meng F L, Liu Y P, et al. Analysis of 5G antenna technology and selection application for high-speed rail[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2024, 37(7): 62-67.

[16] 李爱华, 吴晓波, 陈超, 等. 5G网络大数据智能分析技术[J]. 电信科学, 2022, 38(8): 129-139.

Li A H, Wu X B, Chen C, et al. Big data intelligent analysis technology for 5G network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(8): 129-139.

[17] 史媛媛, 魏彬, 李爱华, 等. 5G-Advanced核心网运行智能架构演进、关键技术及应用研究[J]. 电信科学, 2024, 40(12): 146-162.

Shi Y Y, Wei B, Li A H, et al. Research on the evolution, key technologies, and applications for AI enabled 5G-Advanced core network running[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(12): 146-162.

[作者简介]



胥铭 (1997-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为网络智能化、网络大模型等。



史媛媛 (1984-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为5G/5G-Advanced核心网、网络智能化。



黎丹 (1981-), 女, 中国移动通信集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信核心网。



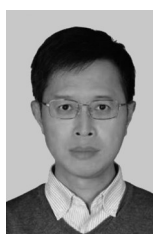
李爱华 (1974-), 男, 中国移动通信有限公司研究院技术经理, 主要研究方向为5G-Advanced架构演进、网络智能化及运行大模型、物联网技术等。



魏彬 (1983-), 男, 中国移动通信有限公司研究院网络与IT技术研究所副所长, 主要研究方向为5G专网、5G工业互联网、网络智能化等领域的标准化、商用技术攻关及产业推动。



张翀 (1980-), 男, 中国移动通信有限公司研究院项目经理, 主要研究方向为核心网策略控制与计费。



李晖晖 (1975-), 男, 中国移动通信集团广东有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络新技术、网络规划、工程建设。



郭红峰 (1974-), 女, 中国移动通信集团广东有限公司工程师, 主要研究方向为移动通信网络、5G智能化。



覃世慧 (1985-), 男, 中国移动通信集团广东有限公司工程师, 主要研究方向为无线网络优化。