 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i4.10042

5G Network Handover Performance and Coverage Optimization in High-Speed Mobile Scenarios

Hanyu Deng[1] Jingnan Huang[2]

1. Guangxi Communication Planning and Design Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530100, China
2 Zhejiang Zhongtong Wenbo Service Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530100, China

Abstract

5G networks play a critical role in high-speed communication for scenarios like high-speed railways and autonomous vehicles. However, rapid cell handovers and drastic channel variations frequently cause handover failures and link disruptions. This study investigates the root causes of degraded handover performance through three dimensions: wireless propagation characteristics, mobility management mechanisms, and network resource allocation. It proposes technical solutions including coverage enhancement, adaptive handover parameter adjustment, collaborative network architecture, and multi-layer heterogeneous network optimization. Research demonstrates that establishing continuous coverage zones, improving link robustness, and implementing multi-station coordinated handover architectures can significantly reduce handover failure rates while ensuring throughput and service continuity. The findings provide theoretical support and engineering references for stable 5G operation in high-speed mobility environments, offering valuable insights for mobility management design in 5G-Advanced (5G-A) and 6G networks.

Keywords

5G network; high-speed mobility; handover performance; coverage optimization; mobility management; cooperative communication

高速移动场景下 5G 网络切换性能与覆盖优化

邓汉宇[1] 黄静南[2]

1. 广西通信规划设计咨询有限公司，中国 · 广西 南宁 530100
2. 浙江中通文博服务有限公司，中国 · 广西 南宁 530100

摘 要

5G网络在高速铁路、无人驾驶等高速移动场景中承担关键通信任务，但快速小区穿越与信道剧变导致切换失败、链路中断等问题突出。本文从无线传播特性、移动性管理机制及网络资源配置三方面剖析了切换性能下降的根源，并提出覆盖增强、切换参数自适应调节、协作网络构建及多层异构网络协同优化等技术路径。研究表明，通过构建连续覆盖区、提升链路鲁棒性及多站协同切换架构，可显著降低切换失败率，保障吞吐量与服务连续性。该研究为高速移动环境下5G稳定运行提供了理论支持与工程参考，并对5G-A与6G网络的移动性管理设计具有重要启示。

关键词

5G网络；高速移动；切换性能；覆盖优化；移动性管理；协作通信

1 引言

随着我国高速铁路、智慧交通与无人化运输系统规模迅速扩大，高速移动场景正成为 5G 网络部署的重要领域。高速列车速度可超过 350 km/h，汽车群组网络中节点速度差异显著，无人机与物流运输则呈现更加复杂的空间动态特性。在此类环境中，无线传播环境快速变化，信道老化严重，用户驻留时间缩短，切换决策频繁，导致网络需要在极短时间内完成链路探测、测量报告与切换执行。若切换执行不及时或参数设置不合理，极易出现切换失败、Ping-pong 切换与无线链路中断，影响网络的可靠性与用户体验。

相比传统 LTE 系统，5G 在高频段、小区更密集、移动性管理机制更复杂，使高速移动场景的挑战更加突出。高频信号衰减明显，穿透力弱，导致覆盖边界更加敏感；网络切换参数受速度、角度及邻区配置多重因素影响，难以保证自适应；多层异构网络的协同切换机制尚未完全成熟。针对高速移动场景提出切换优化与覆盖提升策略，已成为 5G 网络工程实践中的关键课题。

本文重点研究高速移动对切换性能与覆盖连续性的影响机制，从无线链路动态特性、切换参数优化与协作通信结构三个维度展开分析，并提出系统优化路径，为高速场景 5G 网络的稳定性与可靠性提供参考。

【作者简介】邓汉宇（1992–），男，壮族，中国广西南宁人，本科，中级，从事通信工程研究。

2 高速移动场景下 5G 网络切换性能下降的机理分析

2.1 快速小区穿越导致的切换频率急剧增加

在高速列车或高速公路等典型高速移动场景中，终端用户在小区中的驻留时间显著缩短，由传统网络环境中的分钟级迅速压缩至数秒甚至不足一秒。高速移动导致用户在多个小区间快速穿越，使网络必须在极短时间内连续完成测量、上报、准备与执行多个切换过程，显著增加切换负载压力。由于信道快速变化带来明显滞后效应，终端上报和基站判决之间存在时间差，使得切换触发时机往往不能准确反映真实的无线环境。在高频段微小区部署场景下，覆盖半径进一步减小，信号衰落边界更为陡峭，导致切换触发更加频繁，Ping-pong 切换与切换失败率显著升高，影响网络连续性与系统容量利用。快速穿越带来的高频切换压力已成为高速移动场景中亟须解决的核心挑战之一 [1]。

2.2 高速移动导致无线信道快速衰落

高速移动条件下，终端与基站之间的无线信道呈现更强的时变特性。由于显著的 Doppler 频移效应，接收信号的频率偏移不断扩大，使基站的信道估计误差增加，从而降低测量精度。相干时间的缩短意味着信道状态在极短时间内发生变化，使参考信号测量变得滞后甚至失效。此外，随着速度提升，多径效应更加复杂，反射路径数量与角度变化更加频繁，导致信号质量呈现高波动性。信号强度、信噪比、参考信号质量等关键指标在短时间内剧烈变化，使网络难以依靠单一参数或静态阈值进行准确切换判决。这种快速衰落特性直接削弱了切换触发条件的稳定性，是导致切换失败与中断概率上升的重要因素。

2.3 网络架构与覆盖边界对切换性能的限制

5G 网络大量部署高频段与微小区，虽然提升了容量和速率，但也带来了覆盖能力弱、边界衰落剧烈的问题。当终端处于覆盖边界时，信噪比波动显著，极易触发不稳定或过早切换。传统单基站切换机制难以综合利用邻区信息，对边界区域的信道变化缺乏全局判断能力，导致切换时机偏差。此外，5G 的多层异构网络结构中宏小区与微小区的覆盖范围、频段特性与发射功率差异明显，一旦未进行有效的参数协调，用户在跨层移动时会频繁触发切换，造成附着关系不稳定。

3 高速移动环境下的切换瓶颈与性能影响因素

3.1 测量报告滞后与切换判决不匹配

高速移动环境中，终端与基站之间的测量—上报—判决—执行链路受到明显时延影响。终端在测量过程中受到多普勒频移、快速衰落和多径变化的叠加作用，使测量结果本身具有时间敏感性。当测量值上传并由基站处理时，无线环境可能已发生显著变化，导致切换基于滞后的信道信息执行，使得目标小区与源小区在切换瞬间均无法提供稳定链路。此类滞后效应在角度变化频繁、传播环境复杂的高速铁路和高速公路场景中尤为显著。测量窗口无法捕捉信号变化的真实轨迹，使切换判决在稳定性和时效性之间失衡。缺乏补偿机制的传统切换模型难以应对高速移动造成的信道突变，导致中断率上升、切换失败率增加，成为影响网络连续性的关键瓶颈。

3.2 切换参数固定配置难以适应复杂场景

5G 网络中常用固定偏移量、触发门限及滞后时间来控制切换触发条件，但这种静态参数配置难以匹配高速移动用户的动态需求。当用户速度显著提升时，信号衰落区间缩短，固定门限可能导致切换执行过晚，使链路在切换完成前已降至不可用状态 [2]。反之，若设置的门限过低，则会引发频繁切换或 Ping-pong 现象，导致信令负荷增加，也会引起系统资源浪费及用户体验恶化。此外，高频段与低频段信道差异显著，不同小区类型之间的最优切换点并不一致，而静态配置无法针对多场景进行实时调整。随着网络架构复杂度提升，跨层、跨频、小区形态差异显著加剧了切换参数固化带来的不匹配问题，使得提升自适应能力成为高速移动场景优化的核心需求。

3.3 多层异构网络协同不足

在宏小区和微小区共存的 5G 异构网络环境中，高速用户在不同层级小区之间穿越频繁，如果缺乏有效的跨层协调机制，切换路径往往会呈现无序性。宏小区覆盖范围广，主要承担基础控制面连接；微小区覆盖较小、密度高，负责容量补充。然而高速移动用户在微小区中的驻留时间极短，易导致频繁跨层切换，进而引起连接不稳定、服务连续性受损。如果不同小区之间缺乏负载状态、信道特性与用户位置的共享机制，就难以形成统一的切换决策依据，增加切换失败概率。此外，多站点协同不足会导致网络无法提前感知用户轨迹，使得切换更多依赖局部瞬时信号判断，缺乏前瞻性规划。异构网络未能形成有效协同机制，是高速场景中切换不连贯的重要诱因，也暴露出当前移动性管理在体系化和智能化方面的不足。

4 高速移动场景下 5G 网络切换优化技术

4.1 切换参数自适应调节机制

高速移动场景中，用户的速度变化会导致信道衰落特性、驻留时间及小区穿越频率呈现显著动态性，使传统固定阈值切换策略难以满足连续性要求。为适应高速环境，应构建能够实时感知用户运动状态的自适应调节机制。通过速度感知算法获取用户瞬时速度与加速度，并结合信道质量变化趋势，对触发门限、滞后时间与偏移量等关键参数进行动态更新，使切换决策更加贴合当前无线环境。多维数据融合技术可综合接入信号强度、信噪比、信道粗糙度及角度变化数据，从时间与空间维度捕捉信道衰落趋势，进一步提升参数调节的准确性 [3]。自适应调节机制的引入不仅减少切换提前

或滞后导致的链路中断，也降低了不必要的频繁切换，提升网络整体的稳定性与服务一致性。

4.2 轨迹预测与前瞻式切换控制

在高速铁路、干线公路与无人驾驶场景中，用户移动轨迹具有高度规律性，通过轨迹预测可强化网络的前瞻性切换能力。利用历史轨迹、速度模型、方向变化以及道路环境数据，可构建预测算法，实现对用户未来位置的高精度估计。网络在获得预测结果后，可提前为用户所在方向的目标小区预留资源，并完成部分切换准备流程，从而缩短切换执行时间。前瞻式切换机制能够有效避免传统模型中因决策滞后导致的信道崩溃或切换失败，尤其适用于线路固定、速度变化平滑的高速铁路场景。轨迹预测还可结合高分辨率地图、路况信息与环境传播条件，实现更可靠的切换区段规划，使切换在最优时机执行，提高连续覆盖能力。该方法显著提升网络对高速移动用户的服务连续性与链路可靠性。

4.3 多站协作切换与协同覆盖增强

单基站的局部信息往往难以支撑高速移动环境下准确的切换决策，而多站协作机制通过站间信息共享可提升网络整体的判断能力与干扰控制水平。基站间可实时交互终端测量数据、小区负载、覆盖边界质量及干扰环境信息，实现跨站联合分析与切换判决。通过在弱覆盖边界采用多点协作传输（CoMP）、双连接（DC）或多链接（MR-DC）技术，使终端可同时保持两个或多个稳定链路，在切换前后阶段实现链路并存，从而显著降低切换中断风险。协作机制不仅强化边界区域的覆盖连续性，还能降低因单站误判导致的过早或过晚切换。在高速列车场景中，基于沿线多站的协同部署可实现覆盖走廊式切换结构，使多个小区参与切换准备，提高整个过程的鲁棒性。此类协作切换体系为提升高速移动网络的可靠性提供了关键支撑。

5 高速移动场景中的覆盖优化策略

5.1 构建连续覆盖走廊与专用覆盖结构

高速铁路与城市轨道交通的运行速度高、路线固定，对 5G 网络的覆盖连续性要求极高。为减少信号衰落和覆盖缝隙，应在沿线部署具有强方向性的定向天线，形成顺线路径的覆盖指向，提高覆盖稳定性。分布式多点（DAS）系统可通过在轨旁设置多节点，缩短传播距离，从而改善信号一致性。在高速铁路场景中，可依托专用铁路线覆盖网络，通过专网频段、专用站点布局与覆盖优化策略形成沿线连续覆盖走廊，使列车全程处于稳定信号区内，避免因小区频繁穿越导致的切换失败。同时，通过对隧道、山地、桥梁等关键地形的专项覆盖方案设计，可进一步提升覆盖完整度，使高速场景的网络连贯性与服务可用性得到有效保障。

5.2 高频段与低频段协同覆盖设计

5G 网络通常采用高频段提供大带宽能力，而低频段具有覆盖范围大、绕射能力强等优势。将二者进行协同设计，可构建层次分明、互补性强的复合覆盖体系，以增强高速移动环境下的网络稳定性。高频段小区在车辆高速通过时容易出现快速衰落，因此低频段宏小区可作为覆盖“锚层”，提供持续稳定的控制信道，确保关键业务不中断。同时，通过跨频段协同调度，网络可根据用户速度、位置变化及实时信道质量自动选择最优频段，实现跨层切换平滑化。该策略既减少了高速穿越场景中跨层切换的频繁发生，也提高了大带宽业务的连续性，使高速移动环境中的网络吞吐量更加稳定，整体服务体验更加可靠。

5.3 采用智能反射面与低空平台改善覆盖

在高速移动场景中，地形复杂、传播路径多变，使传统基站难以确保全覆盖。智能反射面（IRS）技术能够通过精确调控反射单元相位，实现对入射信号的定向重构，从而增强弱覆盖区的信号质量，特别适用于隧道入口、弯道等多径丰富区域。IRS 的低功耗、高柔性特性，使其能够以较低成本显著提升覆盖连续性。与此同时，低空通信平台如无人机基站和飞艇中继可以在复杂地形、临时性场景或大面积盲区中快速部署，构建动态覆盖层。其相对高度可调、覆盖范围灵活的特点，使其能够根据高速交通工具的位置变化实时优化覆盖结构[4][5]。智能反射面与低空平台的组合应用，有望成为未来高速移动网络覆盖的重要补充手段，实现传统网络架构难以达到的空间灵活性与覆盖弹性。

6 结语

高速移动场景对 5G 网络切换性能和覆盖连续性提出更高要求。本文通过对高速移动环境下切换退化机制的系统分析，揭示了信道快速变化、切换判决滞后、多层网络协同不足等根源问题，并从切换参数自适应优化、轨迹预测、协作切换架构及覆盖增强策略等方面提出解决路径。研究表明，通过构建多站协同的切换体系、提升覆盖连续性并增强链路鲁棒性，可显著降低切换失败率，提高高速场景下 5G 网络的服务连续性与稳定性。未来，随着 5G-A 与 6G 技术发展，移动性管理将更加智能化、预测化与网络协同化，高速移动场景下的网络优化将进入更加精细化与自动化的阶段，为智慧交通体系的演进提供关键支撑。

参考文献

[1] 张利飞.5G超密集组网越区切换性能分析与优化[D].北京交通大学,2018.

[2] 王欣宇.高速移动场景下基于OTFS通感一体化信号的切换技术研究[D].北京邮电大学,2024.

[3] 董雨微.5G-R网络切片动态切换技术研究[D].北京交通大学,2024.

[4] 张存涛.5G C/U分离架构下高铁移动网络切换性能增强方法[D].北京交通大学,2023.

[5] 董春利,王莉.5G异构网络切换机制和自优化网络切换算法研究[J].信息技术与信息化,2023,(11):141-144.