

高速移动通信的信号优化处理方法分析

李浩然 张栋栋

上海航天电子技术研究所 上海 201109

摘要: 高速移动通信中,多普勒效应导致频偏与信道快衰落,引发解调失败与子载波间干扰;基站重叠不足、传统切换算法延迟导致切换失败;非平稳信道建模困难,参数快速时变。优化处理需结合物理层技术,如多普勒频移补偿、动态波束跟踪,网络层快速切换算法,及跨层协同优化,如物理-MAC层联合动态调制编码、AI赋能的资源分配自优化,以提升高速移动场景下的通信稳定性与效率。

关键词: 高速移动通信;信号优化;处理方法

引言:随着交通技术的飞速发展,高铁、航空等高速移动场景日益普遍,对通信质量提出了更高要求。然而,高速移动带来的多普勒效应、信道快衰落、空间覆盖与切换难题,以及非平稳信道建模挑战,严重影响了通信的稳定性与可靠性。因此,深入研究高速移动通信的信号优化处理方法,提升信号抗干扰能力与传输效率,成为当前通信领域亟待解决的关键问题,对推动高速移动通信发展具有重要意义。

1 高速移动通信信号衰落机理与挑战分析

1.1 多普勒效应与信道快衰落

(1)在高速移动场景中,多普勒效应引发的频偏问题尤为显著。当移动终端速度达到350km/h(如高铁运行速度)时,多普勒频偏值可达 $\pm 600\text{Hz}$,该频偏会导致接收信号的载波频率发生偏移,破坏信号与本地oscillator(振荡器)的频率同步,进而造成解调性能下降,严重时甚至会出现信号解调失败的情况,对高速移动通信的正常通信质量产生直接影响。(2)信道时间选择性衰落会对OFDM(正交频分复用)符号产生严重干扰。由于高速移动使信道特性在极短时间内发生快速变化,OFDM符号的正交性被破坏,不同子载波之间出现相互干扰(即子载波间干扰,ICI)。这种干扰会导致接收端误码率升高,尤其在高速移动场景下,OFDM系统的抗干扰能力大幅减弱,难以保障稳定的通信传输。

1.2 空间覆盖与切换问题

(1)基站间重叠区不足易引发切换失败,典型案例为高铁穿越隧道时的信号断续。隧道环境对无线信号存在较强的衰减作用,若隧道内及隧道出入口附近的基站重叠覆盖区域设计不合理、覆盖强度不足,高铁快速通过时,移动终端难以在有效时间内完成基站间的信号切换,导致通信中断、信号断续等问题。(2)传统切换算法(如A3事件)存在判决延迟问题。A3事件基于邻区

信号强度高于服务小区信号强度一定阈值来触发切换判决,但在高速移动场景下,信号强度变化迅速,传统算法的测量周期、判决阈值设置难以适配快速变化的信号环境,导致切换判决延迟,错过最佳切换时机,引发切换失败或通信短暂中断^[1]。

1.3 非平稳信道建模难题

(1)现有信道模型(如3GPPTR38.901)对高速场景的适用性存在局限。3GPPTR38.901信道模型主要基于中低速移动场景设计,其假设的信道平稳性、参数变化规律与高速场景下信道的快速时变、非平稳特性不符,无法准确描述高速移动时信道的衰落特性、多径传播特性等,导致基于该模型设计的通信系统在高速场景下性能偏差。(2)信道参数(如时延扩展、角度谱)具有快速时变特性。在高速移动场景中,移动终端与基站间的相对位置快速变化,周围散射环境也随之快速改变,导致信道的时延扩展(多径信号到达时间差)、角度谱(信号入射与出射角度分布)等关键参数在毫秒级甚至微秒级时间内发生显著变化,增加了信道建模的难度,难以构建精准反映实际信道特性的模型。

2 高速移动通信场景下的信号优化处理方法

2.1 物理层优化技术

2.1.1 多普勒频移补偿

(1)基于导频的频偏估计通过最小二乘(LS)与最小均方误差(MMSE)算法实现精准补偿。在OFDM系统中,发送端插入周期性导频信号,接收端利用LS算法计算导频位置的频偏误差,该方法计算复杂度低、实时性强,可快速初步修正频偏;而MMSE算法进一步结合信道噪声统计特性,对LS估计结果进行加权优化,降低噪声干扰对频偏估计的影响,提升补偿精度,适用于高速移动中噪声波动较大的场景。(2)机器学习辅助的实时频偏预测以长短期记忆(LSTM)网络为核心。LSTM

网络凭借门控机制可捕捉频偏随时间变化的时序依赖关系,通过训练历史频偏数据、移动速度、信道环境等特征,建立频偏预测模型,能提前感知频偏变化趋势,实现前瞻性补偿,避免传统补偿方法的滞后性,尤其在350km/h以上超高速场景中,可将频偏补偿误差降低30%以上。

2.1.2 波束成形与MIMO优化

(1) 动态波束跟踪结合用户位置预测技术,通过基站侧的定位模块(如GNSS辅助定位)获取终端实时位置,利用卡尔曼滤波算法预测终端下一时刻位置,提前调整波束指向与增益,使波束始终精准跟踪终端,减少高速移动导致的波束失准问题,在高铁场景中可将波束覆盖稳定性提升40%,降低信号中断概率。

(2) 3DMIMO技术通过垂直维度的波束赋形,优化高铁沿线基站的覆盖角度,针对高铁车厢的垂直高度(约3.5m),调整垂直波束的下倾角与波束宽度,增强车厢内的信号强度,解决传统2DMIMO在垂直方向覆盖不均的问题,实测可使高铁车厢内的信号信噪比提升5-8dB,改善用户通信体验^[2]。

2.1.3 毫米波通信抗遮挡技术

(1) 智能超表面(RIS)通过调整表面单元的相位与振幅,重构毫米波的传播路径,当毫米波信号被隧道壁、建筑物等遮挡时,RIS可构建反射传输链路,绕开遮挡物,提升信号传输可靠性,在隧道场景中,可将毫米波通信的通断比从1:5优化为1:20,大幅降低信号断续频率。

(2) 混合波束成形技术结合数字波束成形的灵活性与模拟波束成形的低复杂度,通过少量数字射频链路与大量模拟移相器的组合,在保证波束赋形精度的同时,降低硬件成本与功耗,相比全数字波束成形,可减少60%的硬件复杂度,适配高速场景下基站的大规模部署需求。

2.2 网络层优化技术

2.2.1 快速切换算法

(1) 基于速度感知的切换门限调整通过终端上报的移动速度,动态配置切换触发阈值,例如高铁场景下(速度>200km/h),将A3事件的切换偏置从常规的2dB提升至5dB,缩短切换判决时间,同时扩大邻区测量范围,提前触发切换流程,避免切换不及时导致的掉话,实测可将高铁场景切换失败率从8%降至2%以下。(2) 双连接(DC)与载波聚合(CA)协同切换技术,使终端同时与主基站、邻区辅基站建立连接,在切换过程中,先通过CA技术将业务数据分流至辅基站,再完成主基站切换,实现“无缝切换”,避免传统硬切换的业务中断,切换时延可从50ms缩短至10ms以内,保障语音、视

频通话的连续性。

2.2.2 移动性管理优化

(1) 分布式移动性管理(DMM)架构打破传统集中式核心网的控制模式,将移动性管理功能下沉至边缘节点(如基站网关),终端切换时无需与核心网进行频繁信令交互,减少信令传输距离与处理时延,可将核心网信令开销降低50%,适配高速场景下密集切换产生的大量信令需求^[3]。(2) 边缘计算辅助的本地切换决策利用边缘节点的实时数据处理能力,在边缘侧完成邻区信号质量评估、切换时机判断等操作,无需将测量数据上传至核心网,缩短决策周期,同时边缘节点可结合区域内终端移动规律,提前优化切换参数,进一步提升切换效率,在高速路网场景中,可使切换决策响应速度提升40%。

2.3 跨层协同优化技术

2.3.1 物理-MAC层联合优化

(1) 基于信道质量指示(CQI)的动态调制编码策略(AMC),由物理层实时采集信道质量信息并反馈至MAC层,MAC层根据CQI值动态调整调制方式(如QPSK、16QAM、64QAM)与编码速率,当信道质量好时(CQI>12),采用高阶调制与高编码速率提升传输速率;当信道质量差时(CQI<5),切换至低阶调制与低编码速率保障传输可靠性,实现速率与可靠性的动态平衡。(2) 半静态调度(SPS)与动态调度的混合使用,针对高速场景中语音、视频等周期性业务,采用SPS预先分配资源,减少调度信令开销;针对突发数据业务,采用动态调度实时分配资源,提升资源利用率,两者结合可使资源调度效率提升35%,满足高速场景下多样化业务需求。

2.3.2 AI赋能的端到端优化

(1) 数字孪生技术构建高速信道仿真平台,通过采集实际高速场景(如高铁、高速公路)的地理环境、电磁干扰、用户移动轨迹等数据,在虚拟空间中构建与真实场景一致的信道模型,可模拟不同速度、不同环境下的信道变化,为信号优化算法的研发与测试提供逼真的仿真环境,缩短算法迭代周期60%以上。(2) 强化学习通过深度Q网络(DQN)算法实现资源分配自优化,将基站的资源分配(如功率、带宽)视为智能体的动作,将用户通信质量(如吞吐量、误码率)视为奖励信号,DQN算法通过不断与信道环境交互,学习最优资源分配策略,可实时适配高速场景下信道的快速变化,使系统资源利用率提升25%,用户平均吞吐量提升20%^[4]。

3 高速移动通信未来研究方向与挑战

3.1 6G太赫兹通信的Doppler补偿

(1) 太赫兹通信作为6G核心技术之一,其超宽频带($> 100\text{GHz}$)特性虽能带来超高传输速率,但也加剧了多普勒扩展问题。相较于现有毫米波($28\text{GHz}/60\text{GHz}$),太赫兹频段的载波频率更高,在相同移动速度下,多普勒频偏值呈正比提升,例如当终端速度为 350km/h 时, 100GHz 频段的多普勒频偏可达 $\pm 1.6\text{kHz}$,远超毫米波频段的数百赫兹级,且超宽频带会导致不同子载波间的多普勒频偏差异增大,形成“多普勒色散”,破坏信号正交性,传统基于单频点的频偏补偿算法难以适配,需研发可覆盖超宽频带的多子载波联合补偿机制。(2) 太赫兹信号的穿透损耗与传播衰减显著,叠加高速移动带来的多普勒扩展,进一步增加了补偿难度。太赫兹波在大气中易受水汽、氧气吸收,且难以穿透非金属障碍物,在高速移动场景(如高铁、低空飞行器)中,信号传播路径快速变化,多普勒频偏与信道衰减的动态耦合,导致补偿算法需同时应对频偏修正与信号增强,现有补偿技术的实时性与精度难以满足需求,需探索结合信道预测与自适应补偿的一体化方案。

3.2 量子通信与高速移动的融合

(1) 量子密钥分发(QKD)在高速场景的信道适配面临多重挑战。QKD依赖光子的量子态传输实现安全密钥生成,而高速移动会导致收发端之间的对准偏差,例如高铁运行中终端振动、姿态变化,会使量子信道的光子接收效率大幅下降,传统固定光路的QKD系统难以维持稳定通信。同时,高速场景下信道的非平稳性会增加量子态的退相干概率,导致密钥生成速率降低、误码率升高,需设计可动态调整光路的QKD终端,提升抗移动干扰能力。(2) 量子通信与传统高速移动通信的协同组网难度较大。现有高速移动通信采用经典电磁波传输数据,而QKD需独立的量子信道(如光纤、自由空间),两者在网络架构、资源调度上难以兼容。在高速移动场景中,如何实现量子密钥的实时分发与经典数据的加密传输协同,如何解决量子信道与经典信道的干扰问题,以及如何降低QKD终端的体积、功耗以适配移动终端,

均是亟待突破的关键问题。

3.3 全息无线电与智能环境感知

(1) 基于环境散射体的信号增强技术是全息无线电的核心研究方向,但在高速移动场景下,环境散射体的位置与特性快速变化,增加了信号调控难度。全息无线电通过调控环境中散射体(如墙面、家具、智能反射面)的电磁特性,构建多径传输链路以增强信号覆盖,而高速移动终端会快速穿越不同散射环境,导致已构建的传输链路频繁失效,需研发可实时感知散射体动态变化的算法,实现传输链路的快速重构。(2) 智能环境感知与信号增强的协同优化存在技术瓶颈。现有环境感知技术(如雷达、摄像头、无线感知)难以在高速移动中精准获取散射体的实时信息,且感知数据与信号调控策略的融合存在时延,无法及时适配信道变化。此外,如何在复杂电磁环境中区分有用散射信号与干扰信号,如何平衡感知精度与系统功耗,仍是全息无线电在高速移动通信中应用的重要挑战。

结束语

高速移动通信信号优化处理是保障通信质量的关键。本文围绕信号衰落机理与挑战,深入剖析了物理层、网络层及跨层协同等多维度优化技术,这些方法为提升高速场景通信性能提供了有效路径。但未来,6G太赫兹通信的Doppler补偿、量子通信融合及全息无线电等新方向仍面临诸多挑战。持续探索创新优化方法,突破技术瓶颈,才能满足高速移动通信不断增长的需求,推动通信技术迈向新高度。

参考文献

- [1]刘利平,暴桐,辛雨,等.太赫兹频段高速移动场景参考信号方案研究[J].电信科学,2024,(08):84-85.
- [2]吴海燕.新工科背景下通信工程专业信号处理课程群建设与改革[J].现代职业教育,2021,(10):78-79.
- [3]宋昊洋,刘实,刘莹.浅谈当代数字信号处理特点及应用[J].科技风,2020,(11):106-107.
- [4]李为,鲁信金,仲健,等.高速移动场景中人机混编通信物理层安全技术[J].兵工学报,2024,(S1):32-33.