

面向 B5G 的超密集网络干扰协调技术研究

邹 磊

(电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 后第五代移动通信系统 (Beyond 5G, B5G) 是第五代移动通信向第六代移动通信演进的关键过渡形态, 其核心目标是在 5G 三大应用场景的基础上进一步实现更高容量、更低时延、更广连接、更高可靠以及更智能的网络服务能力。为满足未来智慧城市、工业互联网、车联网、远程医疗、沉浸式媒体、空天地一体化通信等新兴业务的持续增长需求, 移动通信网络正从传统宏蜂窝主导的单层架构向多层异构、超密集部署、高频谱复用的方向快速演进。超密集网络 (Ultra-Dense Network, UDN) 通过在有限空间内密集部署大量低功率小功率接入节点, 显著提升单位区域内的频谱复用效率与系统吞吐量, 被公认为 B5G 实现容量倍增与深度覆盖的核心技术路径之一。然而, 随着基站密度持续提升、频谱资源全复用、网络架构异构化、接入节点类型多样化以及用户业务动态化, 网络中的干扰问题呈现出复杂化、全域化、动态化与耦合化的特征。传统以小区为中心的干扰协调机制在面对 B5G 超密集场景时, 逐渐暴露出协调粒度粗糙、动态适应能力不足、信令开销庞大、鲁棒性较差以及可扩展性有限等问题, 难以满足未来网络对高速度、低时延、高可靠与广连接的综合要求。本文以面向 B5G 的超密集网络干扰协调技术为研究对象, 围绕超密集网络干扰产生机理、传统干扰协调技术瓶颈、新型干扰协调体系构建以及仿真性能验证等关键问题展开系统性研究。首先梳理 B5G 网络的核心需求、技术特征与超密集网络的基本架构, 明确复合干扰的来源、类型与演化规律; 其次总结传统干扰协调技术的基本原理与应用场景, 深入分析其在 B5G 高动态、高密度、高异构环境下的局限性; 再次从频域与时域联合协同、智能算法驱动优化、波束赋形与空域协同增强三个层面, 构建一套适配 B5G 超密集网络特性的新型干扰协调技术体系, 分别从资源协同、智能决策、空域抑制与协同调度等角度提升干扰抑制能力与系统整体性能; 最后通过构建贴近实际工程部署的仿真场景, 对所提干扰协调方案进行多维度性能验证与对比分析, 从干扰抑制效果、频谱效率、边缘用户性能、系统吞吐量、用户公平性以及时延可靠性等指标出发, 证明新型干扰协调技术在 B5G 超密集网络中的有效性与先进性。研究结果表明, 面向 B5G 设计的多维协同与智能增强干扰协调技术, 能够有效抑制同层干扰、层间干扰、交叉链路干扰、导频污染与波束间干扰等复合干扰, 显著提升边缘用户信干噪比、系统频谱效率与全网吞吐量, 同时改善用户公平性并降低业务时延。本文所构建的理论体系、技术方案与性能分析结果, 可为 B5G 超密集网络的商用部署、网络规划、干扰优化以及 6G 移动通信干扰管理技术预研提供理论参考与工程支撑。

关键词: B5G; 超密集网络; 干扰协调; 多维资源协同; 智能算法; 波束赋形

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 3106-2709 (2025) 06-0025-11

DOI: 10.62022/NCAR.issn3106-2709.2025.06.003

Research on Interference Coordination Technology for Ultra-Dense Networks in B5G

Zou Lei

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract: Beyond 5G (B5G) is a critical transition stage from the 5th generation mobile communication to the 6th generation. Its core goal is to achieve higher capacity, lower latency, more connections, higher reliability and more intelligent network services on the basis of the three 5G application scenarios. To meet the ever-growing demands of emerging services such as smart cities, industrial Internet, vehicle-to-everything, telemedicine, immersive media and integrated space-air-ground-sea communication, mobile communication networks are rapidly evolving from the traditional macrocell-dominated single-layer architecture to a multi-layer heterogeneous, ultra-densely deployed and high-spectrum-reuse structure. As one of the core technical approaches for B5G to achieve capacity multiplication and deep coverage, Ultra-Dense Network (UDN) significantly improves spectrum efficiency and system throughput in a limited area by densely deploying a large number of low-power access nodes. However, with the continuous increase of base station density, full reuse of spectrum resources, heterogeneous network architecture, diversification of access node types and dynamic user services, the interference in the network presents the characteristics of complexity, globalization, dynamics and coupling. The traditional cell-centric interference coordination mechanisms gradually expose problems such as rough coordination granularity, insufficient dynamic adaptability,

作者简介: 邹磊, 博士, 研究员, 研究方向为无线通信、干扰管理。

large signaling overhead, poor robustness and limited scalability in the face of B5G ultra-dense scenarios, which are difficult to meet the comprehensive requirements of future networks for high rate, low latency, high reliability and wide connectivity.

This paper takes the interference coordination technology of B5G-oriented ultra-dense networks as the research object, and carries out systematic research on key issues such as the interference generation mechanism of ultra-dense networks, the bottleneck of traditional interference coordination technologies, the construction of new interference coordination systems and the verification of simulation performance. Firstly, the core requirements, technical characteristics of B5G networks and the basic architecture of ultra-dense networks are sorted out to clarify the source, type and evolution law of composite interference. Secondly, the basic principles and application scenarios of traditional interference coordination technologies are summarized, and their limitations in B5G high-dynamic, high-density and high-heterogeneous environments are deeply analyzed. Thirdly, from the three levels of frequency-time domain joint coordination, intelligent algorithm-driven optimization, beamforming and airspace collaborative enhancement, a new interference coordination technology system adapted to the characteristics of B5G ultra-dense networks is constructed, which improves the interference suppression capability and overall system performance from the perspectives of resource collaboration, intelligent decision-making, airspace suppression and cooperative scheduling. Finally, by constructing a simulation scenario close to the actual engineering deployment, multi-dimensional performance verification and comparative analysis of the proposed interference coordination scheme are carried out. Starting from indicators such as interference suppression effect, spectrum efficiency, edge user performance, system throughput, user fairness and delay reliability, the effectiveness and advancement of the new interference coordination technology in B5G ultra-dense networks are proved. The results show that the multi-dimensional collaborative and intelligent enhanced interference coordination technology designed for B5G can effectively suppress composite interference such as intra-layer interference, cross-tier interference, cross-link interference, pilot contamination and inter-beam interference, significantly improve the signal-to-interference-plus-noise ratio of edge users, system spectrum efficiency and overall network throughput, and improve user fairness and reduce service delay. The theoretical system, technical scheme and performance analysis results constructed in this paper can provide theoretical reference and engineering support for the commercial deployment, network planning, interference optimization of B5G ultra-dense networks and the pre-research of 6G mobile communication interference management technology.

Keywords: B5G; Ultra-Dense Network; Interference Coordination; Multi-dimensional Resource Collaboration; Intelligent Algorithm; Beamforming

1 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

进入 21 世纪第二个十年以来,全球移动通信技术经历了从 4G 向 5G 快速演进的过程,5G 网络在全球主要国家和地区逐步实现规模化商用,为移动互联网、高清视频、物联网等业务提供了坚实的网络支撑。随着数字经济持续深化、智能终端全面普及、行业应用不断拓展,用户对移动通信网络的速率、时延、连接数与可靠性提出了远超 5G 设计目标的新需求。为承接这种持续爆发的流量增长与业务创新,移动通信领域正式进入面向 5G 演进及 6G 技术预研的新阶段,这一阶段通常被称为 B5G 阶段。B5G 并非简单的 5G 增强版本,而是在网络架构、空口技术、部署方式、业务承载与智能能力上实现全面升级,旨在为未来十年的数字化社会提供泛在、高速、智能、绿色、安全的通信保障。

在各类支撑 B5G 容量提升的技术路径中,超密集网络是最具工程可行性与经济价值的方向之一。超密集网络的核心思想是在传统宏蜂窝覆盖范围内,密集部署微基站、皮基站、家庭基站、射频频远单元、无源智能反射面等多种类型的低功率接入节点,使网络节点与用户终端的距离大幅缩短,基站与用户的数量比例显著提升,从而实现信号传播损耗降低、频谱复用效率提升、区域容量成倍增长的目标^[1]。在商业中心、

交通枢纽、大型场馆、高密度社区、工业园区等热点场景,超密集部署能够使区域系统容量提升一个数量级以上,是解决局部流量拥堵、提升用户体验最直接有效的手段。

然而,超密集网络在带来巨大容量增益的同时,也引发了前所未有的干扰问题。在传统蜂窝网络中,干扰主要来源于相邻同频小区的边缘用户,干扰源数量有限、干扰路径相对稳定、干扰强度可控,通过传统的频率规划、功率控制与小区间干扰协调即可实现有效抑制。但在 B5G 超密集网络中,基站间距缩小至十几米甚至数米,覆盖重叠区域急剧扩大,为了最大化频谱效率,网络通常采用全频复用模式,几乎所有节点都在相同或相近的频带上同时工作,导致干扰从局部问题扩展为全域问题,从静态问题转变为动态问题,从单一类型干扰演变为多类型复合干扰^[2]。

具体而言,B5G 超密集网络中的干扰主要包括宏基站与小基站之间的层间干扰、小基站之间密集部署产生的同层干扰、时分双工模式下上下行调度不匹配导致的交叉链路干扰、大规模天线与高频段部署带来的导频污染干扰、多波束并行传输产生的波束间干扰,以及设备到设备、车联网等直连通信引入的额外随机干扰。这些干扰相互叠加、相互耦合,使得边缘用户信干噪比急剧下降,系统吞吐量难以达到理论预期,用户公平性严重恶化,甚至在极端情况下会导致网络拥塞与业务中断。可以说,干扰问题已经成为制约 B5G 超密

集网络性能提升、影响大规模商用部署的最核心瓶颈之一。

为应对上述挑战,国内外学术界与产业界均开展了大量研究。传统干扰协调技术如小区间干扰协调、增强型小区间干扰协调、进一步增强型小区间干扰协调、协同多点传输与接收、基础功率控制等,在4G与5G初期低密度网络中发挥了重要作用,但在B5G超密集、高动态、高异构、低时延需求场景下,其固有的缺陷逐渐暴露。传统技术大多以小区为协调单位,协调粒度过粗,无法支持波束级、资源块级、用户级的精细化干扰管理;协调机制多为静态或半静态配置,难以适应快速变化的干扰环境与高速移动用户;节点间协同依赖大量信息交互,信令开销巨大,在密集部署场景下会造成回传链路拥塞与时延增加;同时,传统方案大多基于理想信道状态信息与严格同步假设,在实际非理想条件下性能大幅下降,鲁棒性不足。

在标准化方面,第三代合作伙伴计划、国际电信联盟、下一代移动通信网络组织等国际标准组织均将超密集网络干扰管理列为B5G与6G的关键研究方向。国内从“十四五”新型信息基础设施建设规划到6G总体愿景,均明确提出支持超密集组网、立体覆盖网络与智能干扰优化技术研发^[3]。在产业层面,国内外主流设备商与运营商均在推进超密集组网试点与商用部署,干扰优化是实际网络运维中最复杂、最关键、成本最高的环节之一。因此,面向B5G典型场景与技术特征,开展系统性、体系化、可工程化的超密集网络干扰协调技术研究,具有极为迫切的现实需求与重要的研究价值。

1.1.2 研究意义

本研究围绕面向B5G的超密集网络干扰协调技术展开深入探索,其研究意义体现在理论意义、工程意义与社会意义三个层面,对推动移动通信技术进步、网络产业升级与数字社会发展均具有积极作用。

从理论意义来看,本研究有助于完善B5G超密集网络干扰建模与干扰协调理论体系。当前针对超密集网络的干扰研究大多聚焦于单一干扰类型或单一协调手段,缺乏对复合干扰机理的统一刻画与多维协同协调机制的系统性构建。本文通过系统分析B5G网络特征、超密集部署模式、干扰产生与传播规律,建立一套覆盖多域、多场景、多业务的干扰分析框架,能够丰富移动通信网络干扰管理的基础理论。同时,本研究将频域、时域、空域、功率域、码域资源协同思想与人工智能技术相结合,提出新型智能干扰协调架构,突破传统干扰协调技术的设计边界,为6G无蜂窝网络、空天地一体化网络、通感算控一体化网络中的干扰管理问题提供理论铺垫与思路借鉴^[4]。此外,本研究建立的干扰协调性能评价体系,不局限于传统吞吐量与速率指标,同时兼顾时延、可靠性、公平性、能效与开销,能够为未来智能化、绿色化

移动通信系统的理论研究提供更全面的评价参考。

从工程意义来看,本研究成果能够直接支撑B5G超密集网络的商用部署与实际运维。在网络规划阶段,研究结论可为基站布局、参数规划、资源划分提供理论依据,降低部署前期干扰风险,减少人工优化成本。在网络运行阶段,所提出的轻量级、自适应、分布式干扰协调方案,可直接应用于实体基站与核心网设备,提升边缘用户速率、降低掉话率、提升系统容量,改善高负荷、高密度场景下的用户体验。针对交叉链路干扰、导频污染、波束干扰等工程中难以解决的问题,本研究提出的具体抑制方法,能够为设备厂商提供算法设计参考,推动物理层、媒体接入控制层与无线资源管理层技术升级。同时,研究中对信令开销、计算复杂度、鲁棒性的综合优化,有助于降低设备成本与回传压力,提升网络投资回报率,推动超密集组网在更多行业场景落地。

从社会意义来看,高效可靠的B5G超密集网络是数字经济发展的重要底座。通过干扰协调技术提升网络容量与服务质量,能够支撑高清视频、云游戏、虚拟现实、增强现实等消费级业务普及,丰富民众数字生活;能够保障工业互联网、远程医疗、智能驾驶、智能电网等关键行业应用的通信需求,推动实体经济数字化转型;能够实现全域深度覆盖,缩小城乡数字鸿沟,提升公共服务均等化水平^[5]。超密集网络结合智能干扰协调技术,还能够降低单位流量能耗,实现绿色通信,助力双碳目标实现。总体而言,本研究从最基础的干扰问题出发,通过技术创新提升网络性能,最终服务于社会数字化、智能化、绿色化发展大局,具有广泛而深远的社会价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外在超密集网络与干扰协调领域起步较早,从4G后期开始,欧美、日韩等国家和地区的高校、科研机构与企业就围绕小基站部署、异构组网、干扰抑制等问题开展了系统性研究,并在理论创新、标准化推进与产业实践方面保持领先。

在基础理论与算法研究方面,欧盟通过METIS、5G PPP、Hexa-X、Hexa-X II等一系列重大科研项目,对超密集网络架构、干扰建模、协同机制进行了全面探索。研究人员针对异构分层网络中的层间干扰问题,提出了几乎空白子帧、小区范围扩展、偏置优化等机制,形成了增强型与进一步增强型小区间干扰协调技术框架,成为后续5G标准化的基础^[6]。针对密集小站之间的同层干扰,研究人员提出了基于图论、博弈论、优化理论的分布式分簇、动态资源分配与功率控制算法,实现干扰规避与系统容量之间的平衡。针对时分双工系统中突出的交叉链路干扰,国外学者提出了上下行时隙对齐、干扰测量、快速调度避让、分布式协商等机制,有效降

低了跨链路强干扰问题。在大规模天线场景下,针对导频污染这一核心难题,相关研究从导频序列设计、非正交导频复用、盲信道估计、鲁棒波束赋形等角度提出了多种解决方案,缓解了信道估计失真带来的性能恶化。

在人工智能与干扰协调结合方面,美国高校与研究机构处于前沿位置。斯坦福大学、麻省理工学院、加州大学伯克利分校等高校将强化学习、深度学习、多智能体系统、图神经网络、联邦学习等技术引入无线资源管理与干扰协调领域。相关研究将基站或用户抽象为智能体,以系统吞吐量、边缘速率、能效、公平性为优化目标,通过与环境不断交互实现最优资源策略,使干扰协调具备自学习、自适应、自优化能力。与传统基于规则或凸优化的方法相比,智能算法能够应对非凸、非线性、高动态、强耦合的复杂干扰场景,在无法建立精确模型的情况下仍能实现较优决策,特别适用于B5G超密集网络环境。

在空域干扰抑制方面,国外企业与高校提出了大量先进技术。大规模多输入多输出技术通过在基站端配置大量天线,实现空域多路复用与干扰抑制;基于信道状态信息的波束赋形与干扰零陷技术,能够在空间上将信号能量集中于目标用户,同时抑制干扰方向的辐射功率^[7]。近年来,智能反射面成为研究热点,通过大量低成本无源单元重构无线传播环境,能够主动调控信号与干扰的传播路径,将干扰信号反射至无用户区域,或将有用信号增强,在不增加发射功率的前提下实现干扰抑制与性能提升,被认为是B5G与6G极具潜力的关键技术之一。

在标准化与产业方面,第三代合作伙伴计划在Release 13到Release 18的一系列标准中,逐步完善了异构组网、超密集组网、增强型干扰协调、协同多点传输、波束管理、跨基站协同、直连通信等相关规范。爱立信、诺基亚贝尔、高通、三星、英特尔等企业在标准制定中占据主导地位,推动了大量干扰协调相关技术落地。在商用部署方面,日韩、欧美等人口密度高、频谱资源紧张的国家地区较早开展小基站与超密集组网商用,在高层住宅、商圈、体育场等场景积累了丰富的干扰优化与网络运维经验。

总体来看,国外研究呈现出理论体系完善、标准化引领、产业结合紧密、技术演进路线清晰的特点,正逐步从传统干扰协调向智能协同、从单域优化向多域融合、从小区中心向用户中心、从被动抑制向主动调控方向发展。

1.2.2 国内研究现状

国内超密集网络与干扰协调研究虽然起步略晚于发达国家,但发展速度极快,在国家政策支持、高校科研投入、企业工程驱动的共同作用下,已经形成从基础理论、关键技术到试验部署的完整创新链,部分领域达到国际先进水平。

在高校与科研机构层面,清华大学、北京邮电大学、电子科技大学、东南大学、上海交通大学、西安电子科技大学等国内通信领域优势高校,围绕超密集网络干扰建模、资源分配、协同调度、智能优化、智能反射面辅助干扰抑制等方向开展了大量研究。国内学者在基于博弈论、凸优化、深度学习、多智能体强化学习的干扰协调算法上取得了丰富成果,针对边缘用户性能提升、系统能效优化、用户公平性保障等实际问题提出了大量改进方案^[8]。在交叉链路干扰、导频污染、异构协同干扰等难点问题上,国内研究也形成了具有原创性的思路与方法,相关成果发表于国际顶级期刊与会议,提升了我国在该领域的学术影响力。

在企业与标准化层面,华为、中兴、中国移动、中国联通、中国电信等企业积极参与第三代合作伙伴计划、国际电信联盟、中国通信标准化协会等国内外标准制定工作,主导或联合主导了多项关于B5G超密集组网、干扰协调、超级上行、分布式协同、智能无线资源管理的研究课题。国内企业提出的弹性空口、分布式单元协同、智能干扰协调、波束增强与干扰规避等方案,被广泛纳入国际标准。在商用部署方面,国内运营商已建成全球规模最大的5G网络,并在一线城市核心商圈、交通枢纽、大型园区、高校等区域开展超密集立体组网试点,通过干扰协调与网络优化,显著提升了系统容量与用户感知速率。

与此同时,国内研究与国际先进水平相比仍存在一定差距。一是在原创性基础理论与新型网络架构方面,多数研究仍以改进型、增强型为主,颠覆式创新较少;二是面向B5G极致指标,如极低时延、超高可靠、海量连接的干扰协调方案仍不够成熟,缺乏端到端的系统性设计;三是多域联合、实时自适应、轻量化干扰协调技术的工程化程度不足,在实际设备中的部署与验证相对有限;四是基于人工智能的干扰协调算法在泛化能力、收敛速度、鲁棒性、轻量化方面仍需进一步突破,距离大规模商用仍有距离。

总体而言,国内在超密集网络干扰协调领域已经实现从跟跑到并跑的转变,在部分应用方向上逐步实现领跑。随着6G研发全面启动,面向未来更密集、更智能、更泛在的网络场景,干扰协调技术仍将是国内研究的重点与热点。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文以面向B5G的超密集网络干扰协调技术为核心,按照“基础理论→现状分析→机理建模→技术设计→仿真验证→总结展望”的逻辑主线展开研究,具体研究内容如下。

第一,系统梳理B5G通信网络与超密集网络相关理论

基础。明确 B5G 网络的核心需求、典型能力指标与关键支撑技术，总结超密集网络的基本架构、部署特征、组网模式与资源复用方式，深入分析超密集网络中各类干扰的产生机理、传播特性与耦合关系，明确干扰对系统性能的影响，为后续干扰协调技术研究奠定理论基础。

第二，全面总结传统干扰协调技术并分析其在 B5G 场景下的局限性。介绍经典干扰协调技术的基本原理、适用场景与工作流程，包括小区间干扰协调、增强型干扰协调、进一步增强型干扰协调、功率控制、协同多点传输、波束赋形等。在此基础上，从协调粒度、动态适应性、信令开销、鲁棒性、可扩展性、复合干扰处理能力等角度，深入分析传统技术无法适配 B5G 超密集网络的根本原因，明确技术改进方向。

第三，构建面向 B5G 的超密集网络新型干扰协调技术体系。从三个维度展开研究：其一，频域与时域协同干扰协调技术，包括动态分簇、自适应几乎空白子帧、资源块级精细化分配、跨层资源隔离与复用等；其二，智能算法辅助干扰协调技术，包括基于强化学习、多智能体强化学习、联邦学习、图神经网络的干扰感知、预测、决策与优化方法；其三，波束赋形类空域干扰抑制技术，包括大规模天线鲁棒波束设计、干扰零陷、智能反射面辅助干扰调控、波束级协同调度等。通过多技术融合，形成一套全域、精细化、自适应、低开销、高鲁棒的干扰协调方案。

第四，开展仿真实验与多维度性能分析。搭建符合 B5G 标准的超密集网络仿真场景，设置贴近实际工程的网络参数、信道模型、业务模型与节点部署方式。选取干扰抑制效果、频谱效率、边缘用户速率、系统吞吐量、用户公平性、时延、可靠性、信令开销等指标，将所提新型干扰协调技术与无协调、传统干扰协调方案进行对比实验，验证所提方案在不同基站密度、用户密度、移动速度与业务负载下的性能增益与鲁棒性。

第五，对全文研究工作进行总结与未来展望。凝练本文在理论、技术与方法上的主要创新点与研究结论，归纳研究成果的理论价值与工程意义。结合 6G 技术发展趋势，对未来空地海一体化、通感算控一体化、无细胞网络、智能内生网络中的干扰管理问题进行展望，提出后续值得深入研究的方向。

1.3.2 技术路线

为保证研究工作系统性、科学性与可行性，本文采用理论分析、文献调研、算法设计、仿真验证相结合的完整技术路线。

第一步，文献与标准调研。全面收集国内外关于 B5G、超密集网络、干扰协调、智能无线资源管理、波束赋形、智

能反射面等方向的学术论文、专利、标准文档与产业白皮书，梳理技术演进脉络、研究热点与现存问题，明确本文研究切入点与创新方向。

第二步，理论建模与机理分析。建立 B5G 超密集网络系统模型，包括网络拓扑模型、接入节点模型、用户模型、信道传播模型、业务模型与干扰模型。从理论层面分析各类干扰的产生条件、耦合关系与对系统性能的影响，为干扰协调技术设计提供依据。

第三步，传统技术瓶颈分析。对现有经典干扰协调机制进行归纳与原理分析，通过对比与推演，总结其在密集化、高动态、全频复用、低时延需求下的性能缺陷，明确新型干扰协调技术需要解决的关键问题。

第四步，新型干扰协调技术设计。以多域资源协同与智能增强为核心思路，分别设计频域时域协同机制、智能优化算法与空域干扰抑制方案，形成层次化、模块化的干扰协调框架。在设计过程中兼顾性能提升、信令开销、计算复杂度与工程可实现性。

第五步，仿真平台搭建与实验设计。基于主流网络仿真工具，构建城区超密集异构网络场景，合理设置宏基站、小基站、用户的数量、位置、功率、带宽、天线配置、移动性与业务模型。确定对比方案、评价指标与实验场景，保证实验结果具有说服力与可重复性。

第六步，实验执行与结果分析。运行多组仿真实验，采集关键性能指标数据，从干扰抑制、容量提升、边缘体验、公平性、时延可靠性等角度进行全面分析，验证所提技术的优势，并对参数敏感性、鲁棒性与适用场景进行总结。

第七步，论文撰写与成果凝练。按照学术论文规范，整理研究思路、理论推导、技术方案、仿真结果与分析结论，形成结构完整、逻辑清晰、内容详实的学术论文，为相关领域研究提供参考。

2 相关理论基础

2.1 B5G 通信网络核心特征

2.1.1 B5G 网络核心需求

B5G 是 5G 系统向 6G 系统演进的关键阶段，既继承 5G 的技术基础与应用场景，又在能力指标、覆盖范围、业务类型与智能化水平上实现全面跃升。B5G 网络的核心需求可以概括为极致性能、全域覆盖、智能内生、绿色低碳、安全可信与通感算控一体化六个方面。

极致性能是 B5G 最直观的需求。与 5G 相比，B5G 在峰值速率、用户体验速率、时延、可靠性、连接密度与移动性支持上均有数量级提升。峰值速率将从 5G 的 10Gbps 向

100Gbps 甚至 1Tbps 演进,用户体验速率达到 1Gbps 以上,空口时延降低至 1 毫秒以内,可靠性提升至 99.9999%,每平方公里连接数达到百万级,同时支持高铁、飞行器等高速移动场景,保证高速状态下业务不中断。

全域覆盖需求旨在实现任何人、任何物、任何地点、任何时间的稳定连接。传统地面移动通信在偏远地区、海洋、高空、地下空间等场景存在覆盖盲区,B5G 将通过地面通信、低空通信、卫星通信、海面通信融合,构建空天地海一体化覆盖网络,实现全球无死角泛在连接,满足海洋监测、高空物联、偏远地区通信、航空通信等特殊需求。

智能内生需求是 B5G 区别于 5G 的重要标志。5G 网络的智能化更多体现在运维与管理层面,而 B5G 将人工智能能力嵌入空口传输、物理层处理、媒体接入控制、资源调度、干扰协调、移动性管理等各个环节,实现网络自配置、自优化、自愈合、自演进。基于人工智能的动态调制编码、智能波束管理、智能干扰协调、智能资源分配,使网络能够自适应环境变化、业务变化与干扰变化,始终保持最优性能。

绿色低碳需求是 B5G 可持续发展的必然要求。随着网络规模扩大、设备数量增加,通信网络能耗持续上升,B5G 必须在提升容量的同时降低能耗。通过超密集部署缩短传输距离、通过智能关断与休眠降低设备功耗、通过智能负载均衡平衡网络负荷、通过高效算法降低计算开销,实现单位流量能耗下降 90% 以上的目标,推动通信行业走向绿色低碳。

安全可信需求贯穿 B5G 全流程。B5G 承载大量行业关键业务与用户隐私数据,必须具备高等级安全能力。从物理层安全、链路加密、身份认证、接入控制,到边缘计算隐私保护、联邦学习数据隔离,构建全方位、多层次、端到端的安全体系,抵御干扰攻击、入侵攻击与数据泄露风险,保证网络与业务安全稳定运行。

通感算控一体化需求是 B5G 面向未来智能社会的核心能力。通信、感知、计算、控制功能不再相互独立,而是深度融合。同一套硬件与空口资源,同时实现数据传输、环境感知、边缘计算与实时控制,支撑自动驾驶、工业机器人、远程操控、无人机集群等高度智能化业务,使网络从单纯的信息传输管道转变为智能信息处理中枢。

2.1.2 B5G 关键支撑技术

为满足上述核心需求,B5G 依托一系列关键支撑技术实现能力升级,其中与超密集网络和干扰协调最相关的技术包括以下几类。

超密集网络是 B5G 提升容量与覆盖的核心技术。通过密集部署低功率小节点,缩短信号传播距离,提高频谱复用效率,实现深度覆盖与容量提升,是应对流量爆炸最直接有效的手段。

大规模多输入多输出与智能反射面是 B5G 空域资源利用的关键技术。大规模多输入多输出通过大量天线实现空域多路复用与干扰抑制,提升频谱效率;智能反射面通过低成本无源单元重构无线信道,主动调控信号与干扰,在不增加发射功率的前提下改善覆盖与抑制干扰。

全频谱接入技术充分利用低频、中频、高频、毫米波、太赫兹等全频段资源,实现带宽扩展与覆盖互补。低频段保证广覆盖与移动性,中高频段提供超大带宽与高速率,不同频段协同满足多样化业务需求。

新型多址技术支持海量设备并发接入,通过非正交资源复用提升连接数与频谱效率,满足物联网海量连接需求,同时降低接入干扰。

超可靠低时延通信增强技术通过短帧结构、快速混合自动重传、同步优化、冗余传输等手段,将时延与可靠性推向极致,满足工业控制、远程医疗、自动驾驶等严苛需求。

通感一体化技术使通信与感知共享波形、时频资源与硬件平台,在通信的同时实现环境感知、定位、测速与成像,为干扰协调、资源调度、移动性管理提供额外环境信息。

人工智能原生空口技术将人工智能模型嵌入空口各层,实现智能调制编码、智能波束管理、智能干扰协调、智能资源分配,使空口具备自适应、自学习、自优化能力。

网络虚拟化与云原生技术通过集中单元与分布单元分离、开放无线接入网、边缘计算等手段,实现网络功能软件化、部署灵活化、协同便捷化,为跨节点干扰协调提供架构支撑。

空天地海一体化组网技术将地面基站、无人机基站、卫星基站、海面节点融合,实现全域覆盖与无缝切换,同时带来跨平台干扰协调新挑战。

2.2 超密集网络(UDN)基础

2.2.1 超密集网络架构与部署特征

超密集网络是面向未来高速率、大连接、低时延通信需求而提出的高度异构、多层重叠、密集部署的先进无线网络架构,其核心目标在于在有限的物理空间与频谱资源内,最大化提升系统容量、频谱效率与终端用户体验,为高密度场景下的海量数据传输提供可靠支撑。在组网结构上,超密集网络普遍采用分层异构架构:由宏基站作为上层覆盖主体,承担广域连续覆盖、用户移动性管理、核心信令传输以及高速移动用户业务承载等关键功能,保障网络基础服务的稳定性与可靠性;在宏基站形成的广域覆盖范围内,密集部署大量低功率小基站、射频拉远单元、智能反射面等轻量化接入节点,针对热点区域、盲区与业务高需求场景提供深度覆盖补盲与系统容量增强,主要承载局部区域的高速率、大流量数据业务。这种宏微协同、分层覆盖的异构组网模式,能够

在全局层面兼顾网络覆盖的连续性、无缝切换能力与局部区域的系统容量提升,是当前 5G-A 及 6G 移动通信系统中应用最广泛、技术最成熟的超密集组网实现方式。

超密集网络在实际部署与运行过程中呈现出鲜明的技术特征,可概括为高密度、全频复用、低功率、异构重叠、自组织与灵活回传六个核心方面,这些特征共同决定了其组网性能、干扰特性与运维模式。

高密度是超密集网络区别于传统蜂窝网络最显著的标识性特征。在部署密度上,基站与接入节点的间距由传统蜂窝网络数百米级别的覆盖半径,大幅缩短至几十米乃至十几米,单位区域内接入节点数量可提升一个数量级甚至更高。节点密度的显著提升使得信号传播路径大幅缩短,路径损耗与穿透损耗显著降低,终端用户可在更靠近信号发射节点的位置接入网络,有效改善接收信号质量,为高速率、低时延传输奠定基础。

全频复用是超密集网络突破频谱资源限制、提升频谱效率的关键技术手段。为充分利用稀缺的授权频谱,超密集网络普遍采用频率复用因子为 1 的组网模式,即网络中所有接入节点共享相同的工作频段进行信号传输。全频复用模式能够在有限频谱资源下实现系统容量的成倍提升,但与此同时,同频节点间的信号相互影响也会显著加剧,引入更为复杂且动态变化的层间、层内干扰,成为制约超密集网络性能的核心问题。

低功率是超密集网络中微站、皮站、射频拉远单元等轻量化节点的共同技术特点。这类节点发射功率远低于宏基站,单节点覆盖范围小,信号干扰主要集中在局部有限区域内,具有干扰范围可控、影响区域集中的优势,便于通过分布式资源调度、局部干扰协调、功率控制等机制实现干扰抑制,为网络高效稳定运行提供条件。

异构重叠体现了超密集网络多类型、多层次节点协同覆盖的组网形态。宏基站、微基站、皮基站、射频拉远单元、智能反射面等不同形态、不同功能、不同覆盖能力的节点在空间上相互重叠、信号交织覆盖,形成立体式异构覆盖环境。终端用户可根据信号强度、业务需求、移动状态与网络负载,在多层异构网络之间进行动态选择与无缝切换,有效提升业务连续性与服务质量。

自组织能力是超密集网络应对高动态、高复杂部署环境的重要保障。依托自组织网络技术,超密集网络可实现自动配置、自动优化、自动愈合等智能化运行能力,能够根据实时业务负载、干扰分布与节点状态,自适应调整发射功率、工作频段、切换参数与资源分配策略,在降低人工运维成本与部署难度的同时,快速适应动态变化的干扰环境与业务波动,提升网络鲁棒性与智能化水平。

灵活回传是支撑超密集网络大规模、轻量化部署的关键支撑条件。针对不同场景下部署条件与成本约束差异,超密集网络支持光纤、微波、毫米波等多种有线与无线回传方案,同时兼容无线自回传、多跳回传等灵活组网方式,有效降低了密集节点在复杂场景中的部署难度与工程成本,增强了网络对热点区域、室内场景、偏远区域等复杂环境的适应能力。

2.2.2 超密集网络干扰产生机理

超密集网络干扰的本质是多节点共享时频空码功率资源,信号在无线信道中叠加,对目标用户解调产生负面影响。干扰产生的核心原因包括资源共享、覆盖重叠、非理想协同、信道衰落与非对称调度。

超密集网络中的主要干扰类型包括同层干扰、层间干扰、交叉链路干扰、导频污染、波束间干扰与直连通信干扰。

同层干扰指相同类型节点之间的干扰,如小基站与小基站之间的干扰。由于部署密集且全频复用,相邻小站在相同资源上发送信号,直接造成干扰,是超密集网络中最普遍的干扰类型。

层间干扰指宏基站与小基站之间的跨层干扰。宏基站功率高、覆盖广,会对周围小基站用户产生强干扰;小基站虽然功率低,但数量巨大,也会对宏用户产生累积干扰。层间干扰是影响边缘用户体验的主要因素。

交叉链路干扰主要出现在时分双工系统中。当相邻节点上下行时隙配比不一致时,一个节点的上行信号会对另一个节点的下行信号产生强干扰,由于上下行功率差异与路径损耗差异,这种干扰往往强度极高,难以抑制。

导频污染是大规模天线超密集网络中的特有现象。当多个相邻基站使用相同或相近导频序列时,终端无法区分有用信号与干扰信号,导致信道估计失真,波束赋形性能急剧下降。

波束间干扰来自多波束并行传输。大规模天线与智能反射面将信号聚焦为窄波束,波束数量大幅增加,波束旁瓣与交叠区域会产生波束间干扰,尤其在用户密集时更为严重。

直连通信干扰来自设备到设备、车联网等直连业务。直连用户与蜂窝用户共享资源,会对蜂窝网络产生随机干扰,增加干扰协调难度。

总体而言,超密集网络干扰具有强度高、密度大、动态快、耦合强、分布不均的特征,直接导致边缘用户信干噪比下降、系统吞吐量受限、公平性恶化、时延增加,必须通过高效干扰协调技术解决。

2.3 干扰协调技术核心概念

干扰协调是通过资源分配、功率控制、波束优化、协同调度、干扰规避、干扰消除等手段,降低干扰对系统性能影响的一系列技术总称,是蜂窝网络提升容量与用户体验的核心手段。

干扰协调的核心目标包括：有效抑制强干扰，提升边缘用户信干噪比与传输速率；提升频谱效率与系统吞吐量，最大化资源利用率；降低信令开销与计算复杂度，保证实时性；保障用户公平性，避免近远效应严重分化；适应 B5G 高动态、高可靠、低时延需求。

按照资源域划分，干扰协调技术可分为频域干扰协调、时域干扰协调、空域干扰协调、功率域干扰协调、码域干扰协调与协同域干扰协调。

频域干扰协调通过频率、资源块、子载波划分实现干扰正交化，避免同频重叠干扰。时域干扰协调通过子帧、时隙、符号级避让与调度，在时间维度规避干扰。空域干扰协调利用波束赋形、干扰零陷、多天线、智能反射面等技术，在空间上分离信号与干扰。功率域干扰协调通过调整发射功率，控制干扰强度。码域干扰协调通过扩频码、扰码、导频序列区分不同用户与节点，降低码域干扰。协同域干扰协调通过多节点信息交互、联合调度、联合传输，将干扰信号转化为有用信号，实现协同增益。

传统干扰协调以小区为中心、以静态配置为主、以单域优化为主，而 B5G 超密集网络干扰协调向用户中心、动态自适应、多域联合、智能驱动、分布式协同方向发展，这也是本文研究的重点。

3 面向 B5G 的超密集网络干扰协调技术分析

3.1 传统干扰协调技术及其局限性

3.1.1 经典干扰协调技术介绍

在 B5G 技术体系尚未成熟、网络部署仍以低密度宏站为主的阶段，传统干扰协调技术在 4G LTE 及 5G 早期低密度组网场景中得到了规模化部署与广泛应用，是保障蜂窝网络同频组网下系统稳定性与用户体验的关键手段。按照技术实现机制与演进路径，主流传统干扰协调技术可分为小区间干扰协调系列技术、功率控制、协同多点传输与接收以及基础波束赋形等类别，各类技术在适用场景、实现复杂度与干扰抑制效果上存在显著差异，共同构成了 4G/5G 低密度网络的干扰管控基础框架。

小区间干扰协调 (ICIC) 是蜂窝网络中最基础、实现成本最低的干扰协调技术，其核心思路是通过频域资源划分与基站发射功率约束，实现邻区干扰的被动抑制。该技术将系统可用频谱资源划分为小区中心频段与小区边缘频段两类正交资源，小区中心用户因距离基站近、干扰水平较低，可采用较高发射功率保障传输速率；小区边缘用户由于易受到相邻同频小区的强干扰，专属分配正交边缘频段，从资源维度避免同频重叠干扰。ICIC 技术原理直观、协议适配性强、

无需复杂的基站间协同，在低密度宏站网络中可有效降低小区边缘干扰。但该技术依赖固定的资源分割策略，频谱资源无法实现全域复用，频谱利用率偏低，且仅能应对宏站间的简单干扰，当网络进入超密集部署场景时，干扰源数量激增、拓扑结构复杂，该技术的干扰抑制能力会快速失效。

增强型小区间干扰协调 (eICIC) 在 ICIC 基础上，从时域维度引入干扰规避机制，主要用于解决 5G 早期宏微异构组网中的层间强干扰问题。其核心技术特征是配置几乎空白子帧 (ABS)，宏基站在预设的几乎空白子帧上大幅降低发射功率，仅保留少量控制信号传输，为微基站、小基站用户创造无强干扰的传输时隙，使小基站用户可在此时隙内稳定接收信号。eICIC 针对性缓解了宏站对小站的“穿透干扰”，提升了异构网络边缘用户的吞吐量。但该技术存在明显局限：一方面需要基站间保持严格的时钟同步，同步偏差会直接导致干扰规避失效；另一方面采用静态或半静态的几乎空白子帧配置，无法根据实时业务量、用户分布与干扰强度动态调整，在业务潮汐效应显著、用户高速移动的场景中，干扰抑制灵活性严重不足。

进一步增强型小区间干扰协调 (FeICIC) 是 eICIC 的优化演进版本，在保留时域几乎空白子帧机制的基础上，新增了功率精细调节与小区范围扩展 (CRE) 功能。通过为小基站配置小区选择偏置参数，扩大小基站的有效覆盖范围，引导更多用户接入小基站，降低宏基站负载，从而提升整体网络容量与资源利用率。FeICIC 虽然在负载均衡与干扰缓解上较 eICIC 有所提升，但其核心仍依赖资源与功率的半静态配置，未突破传统干扰协调的技术框架。当网络进入超密集组网状态，小基站间距极小、干扰呈现全域密集分布时，FeICIC 无法实现多节点、多维度的协同干扰管控，依旧难以解决复杂密集干扰问题。

功率控制是贯穿 4G/5G 网络的基础性抗干扰手段，通过标准化的开环功率控制与闭环功率控制两种模式，实时调整用户与基站的发射功率。开环功率控制基于路径损耗与接收信号强度自主估算发射功率，响应速度快；闭环功率控制基于上行/下行反馈信息精准修正功率，控制精度更高。功率控制可直接降低过高发射功率带来的交叉干扰，提升小区边缘用户的信干噪比与传输可靠性。但在 B5G 全频复用超密集网络中，由于干扰源密集且无专属正交资源，单纯降低单个节点功率会导致信号覆盖不足，为保障连通性易引发网络整体功率抬升，形成“功率竞赛”，反而加剧全域干扰，因此独立功率控制在超密集场景下的应用效果极为有限。

协同多点传输与接收 (CoMP) 是传统干扰协调技术中性能提升最显著的技术之一，其核心思路是变“干扰抑制”为“干扰利用”，通过多基站协同调度、联合传输、联合

接收等方式,将原本的邻区干扰信号转化为用户的有用叠加信号。CoMP技术可显著提升小区边缘用户的吞吐量与系统公平性,在低密度精品组网中表现优异。但该技术对网络硬件与协议架构要求极高:需要基站间具备低时延、大带宽的理想回传链路,用于实时共享信道信息、用户数据与调度策略;同时伴随海量的信令交互与复杂的联合信号处理算法,系统实现复杂度高、部署成本高。在超密集网络中,基站节点数量呈指数级增长,回传负载与算法复杂度难以承受,因此CoMP无法实现大规模商业化部署。

基础波束赋形技术基于精准的信道状态信息(CSI),通过调整天线阵列的相位与幅度,将信号能量集中指向目标用户方向,降低信号旁瓣带来的邻区干扰,属于空域干扰协调手段。该技术可提升信号指向性与接收功率,在低密度、信道状态理想的场景中,能有效降低邻区干扰。但在B5G超密集场景下,用户高速移动导致信道状态信息获取滞后、非理想信道信息占比提升,同时密集节点带来多向密集波束干扰,基础波束赋形的旁瓣抑制能力与指向精准度大幅下降,难以满足精细化干扰管控需求。

3.1.2 传统技术在B5G超密集场景中的不足

B5G超密集网络以“海量小基站、全频资源复用、高频谱效率、高用户密度、高移动性”为典型特征,网络干扰呈现密集化、动态化、多元化、全域化的新特点,传统基于低密度宏站设计的干扰协调技术,在技术机理、适配能力与性能表现上均存在明显短板,已无法支撑B5G超密集网络的可靠运行。

传统干扰协调技术的协调粒度过粗,核心以小区为基本协调单位,资源调度与干扰管控范围局限于小区级,无法支持波束级、资源块级、单用户级的精细化干扰管理。B5G超密集网络中,干扰源从宏站间交叉干扰,细化为波束间、资源块间、用户间的微干扰,粗粒度协调机制无法精准定位与抑制局部强干扰,难以应对密集且碎片化的复杂干扰环境。

动态适应性差是另一核心缺陷。传统技术多采用静态或半静态参数配置,资源分配、功率策略、子帧配置等参数难以实时自适应调整。B5G网络中用户高速移动、业务突发性强、干扰拓扑实时变化,静态配置无法快速跟踪干扰波动与用户位置变化,在高动态场景下干扰抑制性能急剧下降,无法保障实时业务的传输可靠性与时延要求。

超密集组网下,传统技术的信令开销问题被无限放大。ICIC、eICIC、CoMP等技术均依赖基站间信息交互,当网络中部署海量小基站时,节点间的协同信令、信道信息、调度数据交互量呈指数级增长,大幅加剧回传链路负载,导致网络时延上升、实时性下降,甚至因信令拥塞引发干扰协调机制失效。

传统技术对理想网络条件过度依赖,鲁棒性严重不足。其干扰抑制效果建立在理想信道状态信息、严格时钟同步、无链路损耗等理想假设之上,而实际B5G网络中存在信道估计误差、同步偏差、导频污染、链路衰减等非理想因素,会直接导致传统技术性能大幅衰减,干扰抑制效果远低于理论值。

在可扩展性方面,传统技术难以适配超密集网络的节点扩容需求。随着小基站数量增加,协同节点数量增多,联合调度、功率计算、资源分配的算法复杂度呈指数上升,现有硬件与协议架构无法支撑大规模协同计算,不具备海量小站部署的可扩展性。

同时,传统技术仅针对宏站间同频干扰设计,对B5G新型复合干扰的处理能力缺失。面对交叉链路干扰、高频波束干扰、直连通信干扰、导频污染等新型干扰形态,传统干扰协调机制无对应的抑制策略,无法实现全域复合干扰的统一管控。

此外,能效性能不符合绿色B5G发展需求。传统技术多采用固定资源配置与保守功率策略,为保障干扰抑制效果,长期维持较高的功率消耗与冗余资源占用,能耗效率低下,与B5G绿色低碳、高能效的网络发展目标相悖。

综上所述,传统干扰协调技术在协调粒度、动态适应性、信令开销、鲁棒性、可扩展性、新型干扰处理能力及能效等多个核心维度,均无法满足B5G超密集网络的应用需求。因此,亟需突破传统技术框架,设计适配超密集组网、支持精细化协同、低信令开销、高鲁棒性的新型干扰协调技术体系。

3.2 面向B5G的新型干扰协调技术

3.2.1 频域/时域协同干扰协调技术

频域时域协同干扰协调以动态分簇、精细资源分配、时隙对齐、自适应避让为核心,实现多维度干扰正交化。

动态分簇协同根据干扰强度、拓扑关系、负载情况将密集小站划分为协作簇,簇内资源正交,簇间资源复用,分簇结果自适应调整,降低跨簇干扰。

自适应几乎空白子帧与时隙对齐根据实时干扰、负载、业务优先级动态调整几乎空白子帧比例与图案,全网时隙对齐,最小化交叉链路干扰。

资源块级动态资源分配基于干扰矩阵与信干噪比预测,为边缘用户分配低干扰资源,中心用户复用高干扰资源,在抑制干扰的同时提升频谱效率。

跨层资源隔离与复用在宏站与小站之间采用部分频段正交、部分频段复用的策略,结合功率与波束控制,平衡干扰抑制与容量提升。

频域时域协同技术实现简单、开销较低、兼容性强,是B5G超密集网络干扰协调的基础。

3.2.2 智能算法辅助干扰协调技术

智能算法辅助干扰协调利用人工智能实现干扰感知、预测、决策、优化闭环,适应复杂动态场景。

基于强化学习的干扰协调将基站作为智能体,以吞吐量、能效、公平性为奖励,通过与环境交互学习最优资源与功率策略,无需精确模型。

多智能体强化学习实现多基站分布式协同,共享全局奖励,避免局部最优,降低信令开销,适合大规模密集网络。

联邦学习实现本地训练、参数聚合,保护数据隐私,支持多厂商异构网络协同。

图神经网络以网络拓扑为图结构,精准建模干扰关系,提升干扰预测与资源分配精度。

干扰预测与主动规避基于时序模型预测未来干扰变化,提前调度资源,实现主动抑制,提升时延性能。

智能算法使干扰协调具备自学习、自适应、自优化能力,是B5G智能内生的重要体现。

3.2.3 波束赋形类干扰抑制技术

波束赋形类技术从空域角度抑制干扰,实现信号与干扰空间分离。

大规模多输入多输出鲁棒波束赋形考虑信道状态信息误差,提升非理想条件下稳定性,避免干扰泄露。

干扰零陷与波束正交化在干扰方向形成凹陷,多用户波束空间正交,降低用户间与小区间干扰。

智能反射面辅助干扰调控通过动态调整反射相位,重构传播环境,将干扰信号偏折至无用户区域,增强有用信号。

波束级协同调度实现跨基站波束协同,避免波束重叠干扰,提升空域复用效率。

空域干扰抑制与频域时域智能算法结合,形成多域协同干扰协调体系,全面提升B5G超密集网络性能。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验环境搭建

4.1.1 仿真参数设置

仿真场景采用城区商业中心超密集异构网络,区域范围设置为符合实际部署的规模。宏基站提供广覆盖,小基站均匀密集部署,用户随机分布并包含热点区域,模拟真实高流量场景。载波频率、系统带宽、子载波间隔、帧结构、信道模型均遵循第三代合作伙伴计划B5G/NR标准。宏基站与小基站采用不同天线配置,发射功率符合实际设备参数。用户具备一定移动速度,模拟日常移动性。仿真时间足够长以保证统计结果稳定。对比方案包括无干扰协调、传统小区间干扰协调、增强型干扰协调与本文所提多维协同智能干扰协调

方案,保证对比公平合理。

4.1.2 性能评价指标

为全面评价干扰协调效果,选取多维度指标。干扰抑制指标包括平均干扰功率、边缘用户信干噪比、信干噪比累积分布。系统容量指标包括平均频谱效率、系统吞吐量、边缘用户平均速率。用户公平性指标采用贾因公平性指数。开销与复杂度指标包括信令开销、算法收敛时间。业务体验指标包括平均时延、丢包率与业务可靠性。通过多指标综合评价,可全面反映干扰协调技术在B5G超密集网络中的实际性能。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 干扰抑制效果分析

干扰抑制效果是评价干扰协调技术最直接的指标。实验结果表明,无协调场景下干扰功率极高,边缘用户信干噪比极低,无法满足业务需求。传统干扰协调技术能够在一定程度上降低干扰,但效果有限,尤其在基站密度较高时性能提升缓慢。本文所提多维协同智能干扰协调技术,通过频域时域正交、智能决策与空域抑制联合作用,可显著降低系统平均干扰功率,大幅提升边缘用户信干噪比。

对不同干扰类型的抑制效果显示,所提方案对层间干扰、同层干扰、交叉链路干扰均有良好抑制能力,同时缓解导频污染与波束间干扰。在高用户密度、高基站密度、高速移动场景下,所提方案仍能保持稳定性能,鲁棒性远优于传统方案。干扰累积分布曲线整体明显右移,说明全网用户信干噪比普遍提升,边缘用户改善最为显著,有效解决了超密集网络中边缘体验差的问题。

4.2.2 网络性能提升验证

网络性能提升验证结果表明,在干扰得到有效抑制后,系统频谱效率、吞吐量、边缘速率与公平性均得到大幅提升。与无协调方案相比,所提方案频谱效率与系统吞吐量提升明显,边缘用户速率提升数倍,有效解决了近快远慢问题。贾因公平性指数显著提升,全网用户体验更加均衡。

在时延与可靠性方面,由于采用动态调度、主动干扰规避与轻量化智能算法,系统平均时延明显降低,业务可靠性提升至满足超可靠低时延业务需求。同时,通过分布式协同与信息压缩,信令开销得到有效控制,计算复杂度在可接受范围内,具备实际部署可行性。

多场景对比实验表明,随着基站密度与用户密度增加,所提方案性能增益更加突出,完全适配B5G超密集部署需求。

5 总结与展望

5.1 研究总结

本文围绕面向B5G的超密集网络干扰协调技术展开系

统性研究,针对超密集网络复合干扰严重、传统技术适应性差等问题,构建了一套多域协同、智能增强、低开销、高鲁棒的新型干扰协调技术体系。

首先,本文梳理了B5G网络与超密集网络的理论基础,明确了复合干扰的产生机理、类型特征与性能影响,指出传统干扰协调技术在协调粒度、动态性、开销、鲁棒性与扩展性方面存在难以克服的缺陷。

其次,本文从频域时域协同、智能算法辅助、波束赋形空域抑制三个维度,设计了一套面向B5G的干扰协调方案,包括动态分簇、自适应资源分配、智能决策、鲁棒波束、智能反射面辅助等关键技术,实现从被动干扰抑制向主动干扰调控、从单域优化向多域协同、从规则驱动向智能内生的转变。

再次,通过构建贴近实际工程的仿真场景,对所提方案进行全面性能验证,结果表明所提干扰协调技术能够显著抑制各类复合干扰,提升边缘用户性能、系统容量、频谱效率与用户公平性,同时降低时延并保证可靠性,综合性能远优于传统干扰协调技术。

最后,本文形成了从理论建模、技术设计到仿真验证的完整研究体系,研究成果可为B5G超密集网络商用部署、网络优化、设备研发与6G干扰管理技术预研提供理论支撑与工程参考。

5.2 未来研究展望

随着6G研发逐步深入,未来无线网络将向空天地海一体化、无细胞组网、通感算控一体化、智能内生、极致能效方向发展,干扰协调技术仍面临新的挑战与机遇。

未来可研究通感算控一体化干扰协调技术,将感知信息、计算结果、控制指令与干扰协调联合优化,实现通信性能与感知性能双赢。空天地海一体化网络带来跨平台、跨频

段、跨架构干扰问题,亟需研究广域、高动态、异构干扰协同抑制技术。

无细胞与用户中心网络打破传统小区边界,干扰模式发生根本性变化,需研究无小区大规模天线、分布式协同、用户中心的新型干扰管理机制。AI原生端到端干扰协调,从物理层到应用层全栈嵌入智能模型,实现自演进、自优化干扰抑制,是未来重要方向。

极低能耗干扰协调将干扰协调与节能关断、负载迁移联合优化,推动绿色6G实现。安全与隐私保护干扰协调结合物理层安全、抗干扰攻击、联邦学习等技术,在抑制干扰的同时提升网络安全。

工程化与标准化方面,未来可进一步推进轻量化算法实现、样机开发与试验验证,推动相关技术纳入3GPP后续版本与6G标准,形成完整商用解决方案,真正实现技术落地。

参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等.5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J].中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [2] 张平,陶小峰,许晓东,等.超密集蜂窝网络关键技术[M].北京:人民邮电出版社,2017.
- [3] 彭木根,李华,王文博.5G超密集网络干扰协调与资源管理技术[J].通信学报,2016,37(1):1-14.
- [4] 王碧鸿.超密集网络中干扰协调与资源分配算法研究[D].北京:北京邮电大学,2020.
- [5] Chen S, Sun S, Kang S, et al. User-Centric Ultra-Dense Networks for 5G: Challenges and Enabling Technologies [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10):58-65.
- [6] 李立华,王磊,张慧.基于强化学习的超密集网络干扰协调算法[J].电子与信息学报,2022,44(3):901-909.
- [7] 张朝阳,张凯,张宇.智能超表面辅助的超密集网络干扰抑制技术[J].电波科学学报,2023,38(2):198-208.
- [8] 彭哲,陈明,赵永祥.面向B5G的交叉链路干扰协调技术研究[J].移动通信,2022,46(8):34-41.