

# 5G抗干扰技术综述

许辰人<sup>1</sup>, 马翔天<sup>1</sup>, 徐昊天<sup>1</sup>, 刘启瑞<sup>2</sup>, 王诚科<sup>1</sup>, 王 雄<sup>1</sup>, 高 峰<sup>3</sup>, 陈晓光<sup>4</sup>, 孔令和<sup>5</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191; 3. 北京云智软通信息技术有限公司研发部, 北京 100080; 4. 华为技术有限公司, 陕西西安 710000; 5. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 5G技术不仅在以蜂窝网络为代表的移动互联网中占据主要角色, 还正在积极地为工业场景提供技术变革的契机. 目前, 国内外已经开展了大量和5G抗干扰技术相关的工作, 但仍缺乏对5G在授权和非授权频谱下抗干扰技术的系统性综述. 本文分析了5G无线干扰的主要来源, 指出了抗干扰研究的技术难点, 并以授权频段5G蜂窝网络干扰与非授权频段异构系统间干扰两个关键问题为例, 对现有的无线抗干扰方案进行了具体分析和归纳对比, 最后对5G技术在授权频段和非授权频段抗干扰技术的未来研究方向进行了展望.

**关键词:** 5G技术; 抗干扰; 异构系统间干扰; 小区间干扰; 异构网络; 工业互联网

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2020YFB1710900)

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)03-0765-14

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20221102

## A Survey of 5G Anti-Interference Technology

XU Chen-ren<sup>1</sup>, MA Xiang-tian<sup>1</sup>, XU Hao-tian<sup>1</sup>, LIU Qi-rui<sup>2</sup>, WANG Cheng-ke<sup>1</sup>, WANG Xiong<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>3</sup>,  
CHEN Xiao-guang<sup>4</sup>, KONG Ling-he<sup>5</sup>

(1. Peking University, Beijing 100871, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China; 3. R&D, Beijing Yunzhiuantong Info Tech Ltd., Beijing 100080, China; 4. Huawei Technologies Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 5. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Today, 5G technology not only plays a significant role in mobile Internet, but is also providing opportunities for technological advancements in industrial scenarios. While there have been extensive domestic and international efforts to explore 5G anti-interference technology, comprehensive research on both licensed and unlicensed spectrum remains insufficient. In this paper, we analyze the primary interferences of 5G wireless networks, identify the technical challenges of anti-interference research, and examine existing wireless anti-interference solutions using two key issues: interference in licensed bands and cross-technology interference in unlicensed bands. Finally, we offer a perspective on future research directions for 5G anti-interference technology in licensed and unlicensed bands.

**Key words:** 5G; anti-interference; cross technology interference; inter-cell interference; heterogeneous network; industry internet

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Plan (No.2020YFB1710900)

## 1 引言

近年来,随着无线通信技术的飞速发展,以及互联网应用对高可靠、强实时和高速率通信需求的快速增长,5G技术的研究、开发和应用受到了广泛的关注. 目前,5G已然进入大规模应用时代. 在商用授权频段,5G技术凭借其大带宽、低延时和广连接的特性脱颖而出,5G公网随着移动通信运营商的推动逐渐发展成为中国主流移动通信网络. 然而,在面对智能制造、智能物流

等新兴场景时,现有面向通用移动通信场景的商用5G公网存在着新的困难和限制,例如难以与工业网络融合,以及在公网下部署时由于企业无法得到授权而无法管理网络. 这些限制阻碍了5G公网在移动蜂窝网以外领域的广泛应用. 为了提高5G技术在新兴智能场景的易用性,GSMA 3GPP第16版规范引入了基于NR的免许可接入技术(New Radio based access to Unlicensed spectrum, NR-U)<sup>[1]</sup>,用于实现非授权频段的5G专网

(Private 5G). 相比于 5G 公网, 5G 专网让用户使用专用设备设置运行自己的本地网络, 提供了偏远地区覆盖、独占的网络容量、完全的控制能力和个性化的定制服务, 能够满足高性能通信的需要和实际场景的需求<sup>[2]</sup>.

随着用户量增加, 频谱资源日益紧张, 5G 技术需要考虑信道冲突带来的干扰问题. 目前, 5G 技术以使用的频谱为依据可以分为两类, 一种使用授权频段中专用频谱, 最主要的是授权频段的 5G 蜂窝网络; 另一种使用公共的非授权频段频谱, 和 Wi-Fi 等无线通信协议共享信道资源, 包括运营商推出的 5G 专网, 亚马逊提供的 AWS Private 5G 等基于 NR-U 的 5G 服务. 这两类 5G 技术除了使用频谱不同外, 在抗干扰研究领域主要有以下三点区别.

(1) 基于授权和非授权频段的抗干扰方法因为干扰来源不同, 抗干扰的对象存在本质差异. 由于授权频段基站部署时已经对部署位置进行了优化以避免相互影响, 授权频段蜂窝网内的干扰通常发生在用户终端设备上, 主要受影响的是来自基站的数据包. 非授权频段的设备在接收和发送数据时都会受到来自环境中其他设备的干扰, 因而需要同时考虑解决上下行链路干扰问题. 第 2 节中具体描述了授权和非授权频段 5G 干扰问题的场景差异.

(2) 授权频段和非授权频段在解决干扰问题上面临截然不同的挑战. 在授权频段, 干扰主要来源于附近的 5G 基站, 基站在分配信道资源时需要以控制自身和相邻基站间干扰为前提提高频谱资源利用率. 而在非授权频段中, 来自不同无线通信技术的干扰成为干扰的主要来源, 对应的抗干扰技术需要降低不同技术竞争信道资源带来的信道冲突问题. 具体对干扰问题的物理模型分析详见第 3 节.

(3) 授权频段和非授权频段的 5G 技术在结构上存在差异. 授权频段的 5G 抗干扰技术依托于较为成熟的标准化协议与软硬件结构实现. 出于成本、复杂性以及和 5G 授权频段网络间相互服务的融合集成考虑, 非授权频段 5G 技术的无线协议架构建立在授权 5G 技术之上<sup>[3]</sup>, 从而在与之相关的抗干扰技术上具有一定相似性. 然而, 非授权频段的 5G 设备需针对信道占用评估和接入机制、信道占用策略、MAC(Media Access Control) 调度策略、上行信号频谱变换等方面进行额外的考虑. 从而在抗干扰技术的研究方向上, 非授权频段相关的研究集中在 MAC 层上, 但对 5G 基站数据调制解调过程的物理层优化同样可以在非授权频段的基站上有效.

本文首先从授权频段中 5G 蜂窝网络的干扰和非授权频段异构系统间干扰两个方向概述了 5G 干扰问题, 详细阐述了对应的无线抗干扰技术方案和特点, 最后指出了 5G 抗干扰技术在实际应用时面临的挑战和

未来研究方向.

## 2 无线环境干扰问题概述

在无线网络中, 多个异构设备为了竞争有限的频谱资源, 存在着相互干扰的问题. 我们把 5G 无线干扰分为授权频段的干扰和非授权频段的干扰两种类型. 5G 授权频段的典型应用场景是蜂窝网络通信, 该频段是移动通信运营商申请的独占频谱资源; 而非授权频段允许采用不同无线通信技术的设备同时工作, 具体的技术包括 Wi-Fi, Zigbee 和蓝牙等. 5G 在授权频段和非授权频段中面对的干扰不同, 因而面临的干扰问题有所差异. 本节将介绍 5G 在授权频段和非授权频段遇到的主要干扰问题.

### 2.1 授权频段中 5G 蜂窝网络干扰问题

蜂窝网络采用信道复用技术以提高频谱利用率, 但信道复用面临着同频信号干扰的风险. 根据干扰是否由毗邻小区的基站在相同或相邻信道工作引起, 可以将蜂窝网络干扰分为小区内干扰和小区间干扰. 前者可以通过加入循环前缀配合信道均衡等成熟的系统设计算法抑制, 而后者可以通过频率复用、协调控制和接收信号干扰消除等技术解决. 因为小区间干扰是影响多小区蜂窝网络性能, 阻碍频谱利用率和能量效率提高的关键因素<sup>[4]</sup>, 所以下文将主要探讨小区间干扰相关的抗干扰技术. 图 1 展示了小区边缘用户受毗邻小区干扰的情况, 对处于小区边缘或弱信号的用户来说, 小区间干扰会带来明显的负面效应.

5G 蜂窝网络相比 LTE 实现了更高的传输速率、更低的延迟和更高的能耗比, 提高了系统容量和大规模设备连接能力. 为了实现易部署、经济实惠和低能耗, 5G 蜂窝网络通常采用异构模型, 包含宏蜂窝(Macro Cell)、微蜂窝(Micro cell)、皮蜂窝(Pico Cell)和飞蜂窝(Femto Cell)等, 然而异构蜂窝网络具有低协作效率的特性, 使小区间干扰问题愈发严重<sup>[4]</sup>. 总体而言, 在蜂窝网络引入异构模型带来的挑战包括三个方面: 一是设备密度不均匀, 如微蜂窝基站部署在人群密集的区域以提供额外的容量, 导致用户和基站的位置相关性带来的影响变大; 二是蜂窝更加密集的部署在住宅区或办公楼, 而异构的蜂窝导致共层和跨层的干扰同时存在, 因此需要对异构蜂窝网络的三维特性有更加细致的考量; 三是复杂室内和建筑间无线信号干扰和传输过程为干扰管理带来了更大的挑战<sup>[5]</sup>.

### 2.2 非授权频段的异构系统间干扰问题

在非授权频段中运行着各种协议, 包括 Wi-Fi、Zigbee、LTE-U、NR-U 等, 不同异构设备采用了相同或者重叠的频谱作为载波频率实现信号传输, 因此, 这些信道之间会存在冲突. 以 2.4 GHz 频段为例, Wi-Fi 802.11n

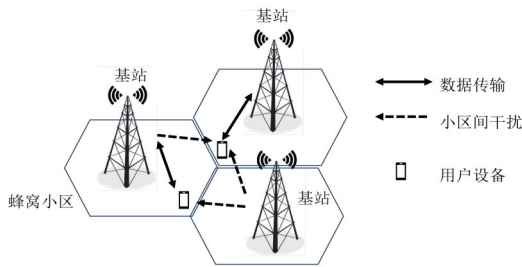


图1 边缘用户受小区间干扰示意图

协议规定的1~13信道各自有20 MHz,重叠覆盖了2 402~2 482 MHz范围; Zigbee 802.15.4协议在2.4 GHz频段范围内使用的11~26信道均匀分布在2 405~2 480 MHz;中国规定的蓝牙工作频率在2.402~2.483 GHz,每个频道的宽度为1 MHz;LTE-U则没有具体规范,可以在当地法规允许的非授权频段运行.不同技术之间使用重叠频段的同时缺乏相互之间的信息交流来协调传输,因而使用不同技术的异构系统容易相互产生干扰,这也是非授权频段干扰问题的主要研究方向.

将LTE扩展到非授权频段的技术LTE-非授权(LTE-Unclicensed, LTE-U)和LTE辅助授权接入(LTE-Licensed Assisted Access, LTE-LAA)以及5G非授权技术(NR-U)在非授权频段中引入了新的竞争.以本文中主要考虑的NR-U为例,图2显示了NR-U设备与Wi-Fi共频带部署的情况, NR-U对Wi-Fi造成的潜在同信道干扰的主要是两个来源.一个是下行信令,该信令主要是用户的数据传输.同信道干扰的另一个来源是上行信令,主要包括各类控制信息.上述干扰会同时影响Wi-Fi无线接入点(Access Point, AP)和用户终端站点(STation, STA).

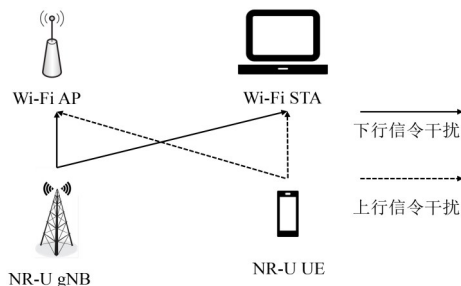


图2 非授权频段5G异构系统干扰示意图

由于在非授权频段下基于802.11的Wi-Fi设备遵守带有回退机制、基于竞争的媒体接入控制(MAC)协议,直接将授权频段技术运用在非授权频段会导致Wi-Fi设备长时间处于退避状态,大幅降低其传输速率<sup>[6,7]</sup>.为解决这一问题,在3GPP R13规范中批准了LTE-LAA技术,支持授权频谱与非授权频谱通过载波聚合的方式捆绑使用.在规范中要求LTE-LAA设计应以与现有Wi-Fi网络公平共存为目标,添加额外的LTE-LAA设备对网络中Wi-Fi设备吞吐量和延迟的影响不会比添加

额外的Wi-Fi设备更大.这种以共存为目标的接入方式也同样体现在3GPP对NR-U的设计中.因此,非授权频段5G技术主要需要解决和其他无线通信技术的异构系统间干扰问题.

### 3 5G异构网络干扰系统模型

随着城市微型基站、家庭基站和大规模阵列天线等新兴通信基础设施在5G网络中的部署,以及非正交多址接入、大规模波束赋形等新兴通信技术在业界的探索与应用,未来无线环境中的干扰来源也愈加多样复杂<sup>[8]</sup>.因此,对于无线环境的干扰分析与量化建模至关重要.与以往对5G信道建模的工作不同<sup>[9,10]</sup>,本章将从授权和非授权频段对采用正交频分复用多址接入技术的多层异构网络进行通用化建模,为后文阐述业界在该领域的干扰管理方法研究提供理论分析基础.

#### 3.1 授权频段网络干扰模型

如图3所示,本文首先考虑一个采用正交频分复用多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术的异构双层5G网络<sup>[11]</sup>,其中包括1个宏基站(Macro Base Stations, MBS)和 $N$ 个同频部署的以微蜂窝、皮蜂窝为代表的小基站(Small Base Stations, SBS).基站集合表示为 $n \in \mathbb{N}, \mathbb{N} = \{1, 2, \dots, N, N+1\}$ ,其中前 $N$ 个元素为小基站,第 $N+1$ 个元素表示宏基站.小基站随机部署在宏小区中,三维位置为 $\mathbf{b}^n = [b_x^n, b_y^n, b_z^n]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ .网络中小基站服务区域内的用户集合为 $i \in \mathbb{I}, \mathbb{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ ,位置为 $\mathbf{I}^n = [I_x^n, I_y^n, I_z^n]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ .在该网络中,系统带宽 $B$ 将根据网络服务需求被分为 $K$ 个子信道,表示为 $k \in \mathbb{K}, \mathbb{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ ,中心频率为 $f_k$ .

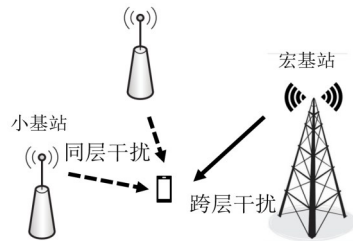


图3 授权频段5G异构系统干扰示意图

假设每个用户在网络移动性管理功能的约束下同时只能接入一个小基站,基站 $n$ 在子信道 $k$ 上发射的下行信号功率为 $p_n^k$ ,在传播过程中共经过 $L_i$ 条不同的路径到达第 $i$ 个用户接收天线,其中第 $l$ 条信号传播路径的距离为 $d_{n,i}^l = \|\mathbf{b}^n - \mathbf{I}^n\|_2 + \Delta d_{n,i}^l$ ,而 $\Delta d_{n,i}^l \geq 0$ 为该条路径相比直射路径多的传播距离.进一步考虑电磁波传播速度为 $c$ ,则传播时延为 $\tau_{n,i}^l = d_{n,i}^l / c$ ,衰减为 $\alpha_{n,i}^l$ ,则信道频率响应(Channel Frequency Response, CFR)和信道冲

击响应(Channel Impulse Response, CIR)可分别表示为

$$H_{n,i}^k(f) = \sum_{l=0}^{L_i-1} \alpha_{n,i}^l e^{-j2\pi f \tau_{n,i}^l} \quad (1)$$

$$h_{n,i}^k(t) = \text{IFFT}(H_{n,i}^k(f)) = \sum_{l=0}^{L_i-1} \alpha_{n,i}^l \delta(t - \tau_{n,i}^l) \quad (2)$$

其中,  $\delta(\cdot)$  是 Delta 函数. 设基站  $n$  在子信道  $k$  上为用户  $i$  发射的下行信号为  $x_{n,i}^k$ , 则用户接收信号可表示为

$$y_{n,i}^k(t) = \underbrace{p_n^k h_{n,i}^k(t) * x_{n,i}^k(t)}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{n' \in \mathbb{N} \setminus \{n\}} \sum_{j \in \mathbb{I}\{i\}} p_{n'}^k h_{n',i}^k(t) * x_{n',j}^k(t)}_{\text{Interference}} + \underbrace{w_{n,i}^k(t)}_{\text{Noise}} \quad (3)$$

其中,  $*$  表示卷积运算, 第一项为用户预期的信号, 第二项为干扰信号, 第三项  $w_{n,i}^k(t)$  表示用户接收机噪声, 假设用户信号已经过归一化, 即  $\mathbb{E}[|x_{n,i}^k|^2] = 1 (\forall n \in \mathbb{N}, i \in \mathbb{I}, k \in \mathbb{K})$ .

由此, 用户接收信号的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)可表示为

$$\text{SINR}_{n,i}^k = \frac{p_n^k h_{n,i}^k}{\underbrace{p_{N+1}^k h_{N+1,i}^k}_{\text{Cross-layer interference}} + \underbrace{\sum_{n' \in \mathbb{N} \setminus \{n, N+1\}} p_{n'}^k h_{n',i}^k + w_{n,i}^k}_{\text{Inter-layer interference}}} \quad (4)$$

在 SINR 表达式中, 可进一步将式(3)中的干扰信号划分为宏基站小基站共用频段导致的跨层干扰和小基站之间的同层干扰, 即式(4)分母的前两项. 基于香农容量公式, 在时间段  $T$  内用户  $i$  接收基站  $n$  在子信道  $k$  上的数据速率为

$$r_{n,i}^k = TB \log_2(1 + \text{SINR}_{n,i}^k) \quad (5)$$

上述场景为小基站、宏基站双层异构网络共用信道的部署模式, 在非完全共用频段的部署中, 干扰基站的集合可根据网络采用的具体频率复用方式进行修改<sup>[12]</sup>, 以包括与基站  $n$  共用同一通信资源的基站.

由上述信道容量表达式可得, 基站跨层与同层干扰将严重影响用户的服务质量, 如何选择合适的功率分配可通过建立相应的优化问题并基于凸优化、强化学习和智能优化算法等典型方法求解. 优化方法将部署在具备较高计算能力的核心网云计算单元或基站集中式计算单元(Central Unit, CU)中, 求解结果将在宏基站、小基站 CU 以及各分布式单元(Distributed Unit, DU)中完成配置, 实现较为有效的干扰管理. 在优化问题中, 优化目标可进一步考虑区域内用户总通信容量、能量效率以及考虑时延敏感、用户服务质量(Quality of Service, QoS)与公平性等目标; 约束条件可考虑功率约束、子载波分配约束和用户与基站关联约束等<sup>[13]</sup>.

值得注意的是, 上述优化问题通常需要以用户-基站之间的信道信息  $h_{n,i}^k$  作为先验条件, 即信道状态信息

(Channel State Information, CSI). 在 LTE 网络下行链路中的小区参考信号(Cell Reference Signal, CRS)对用户与基站间的 CSI 进行估计<sup>[14]</sup>, 得到  $\hat{h}_{n,i}^k$ . CRS 的信号设计在 5G NR 标准中在资源灵活配置性方面得到了进一步改进, 逐步采用专用的 CSI 参考信号, 即 CSI-RS<sup>[15]</sup>.

令基站时域发射信号  $x_{n,i}^k(t)$  在 OFDM 调制中对应的 OFDM 符号为  $X_{n,i}^k(\text{sc})$ , 用户接收信号经过 OFDM 解调后, 每个 OFDM 符号可表示为  $Y_{n,i}^k(\text{sc})$ , 其中, sc 表示该 OFDM 符号上的子载波序号. 通过是否包含 CRS/CSI-RS 等用于信道估计的参考信号这一标准, 可将  $X_{n,i}^k(\text{sc})$  进一步划分为

$$X_{n,i}^k(\text{sc}) = \begin{cases} X_{n,i}^{\text{Ref}}(\text{sc}), & \text{if } \text{sc} \in \mathbb{X}_{\text{CSI-RS}}^k \\ X_{n,i}^{\text{Data}}(\text{sc}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $X^{\text{Ref}}(\text{sc})$  指 CSI-RS 等参考信号, 子载波集合为  $\mathbb{X}_{\text{CSI-RS}}^k$ ,  $X^{\text{Data}}(\text{sc})$  表示除用于信道估计的参考信号以外的数据信号. 由于基站广播的参考信号可通过网络协议与用户系统实现交互, 即用户先验已知, 可通过最小二乘等方法对频域的信道状态信息(CFR)开展估计,

$$\hat{H}_{n,i}^k(\text{sc}) = Y_{n,i}^k(\text{sc}) (X_{n,i}^{\text{Ref}}(\text{sc}))^* \quad (7)$$

上式经过 IFFT 运算可得到  $\hat{h}_{n,i}^k$ , 表示为

$$\hat{h}_{n,i}^k(t) = \text{IFFT}(\hat{H}_{n,i}^k(\text{sc})) \quad (8)$$

在实际工程中, 系统应充分考虑非理想的 CSI 估计误差  $\Delta h_{n,i}^k(t) = h_{n,i}^k(t) - \hat{h}_{n,i}^k(t)$  对资源管理等方法造成的影响.

本节前文所提到的干扰管理与无线资源分配机制是针对移动蜂窝网络下行链路的, 可扩展为上行场景, 主要包括把下行信道响应信息 CSI 替换为上行, 并将每个基站的总功率约束换为用户的上行功率约束.

在算法复杂度方面, 本节将对各类优化算法通用的计算步骤与次数进行分析. 首先, 若考虑最优子信道分析, 该系统形成的优化问题可大致总结为: 优化目标是最大化系统通信容量, 约束包括但不限于最大功率约束, 用户服务质量约束和跨层干扰约束. 若采用朴素的穷举搜索法, 则计算复杂度可等效为每个小基站搜索所有用户的可用子信道, 计算次数为  $O(N^K)$ , 即使考虑单用户接入的简化情况则复杂度也将为  $O(N^K)$ , 依然为指数复杂度. 若对上述问题建立以拉格朗日对偶乘法为代表的求解方法<sup>[16]</sup>, 则所需计算次数为用户数量、基站数量和子信道数量的乘积, 即  $INK$ . 在实际工程中, 小基站发送功率通常较小且部署在室内环境中由于墙壁诸多导致路径损耗较大, 因此为降低复杂度可仅考虑跨层干扰. 核心网将根据可用子信道信息的计算结果对最优的子信道进行分配. 在分配过程中由于功率约束、跨层干扰约束和用户公平通信速率约

束导致的对偶因子梯度更新计算次数为  $O(K)$ 、 $O(IN)$  和  $O(IN)$ , 考虑迭代次数为  $L$ . 因此, 基于梯度的优化算法总体计算复杂度可等效为

$$O(INK \times IN \times K \times L) = O(I^2 N^2 K^2 L) \quad (9)$$

可以看出, 若采用基于梯度的优化算法, 将获得与穷举法相比较低的指数复杂度. 若目标函数较复杂难以推导梯度的闭式表达式, 可考虑智能优化方法等无梯度优化算法, 或将原问题转换为若干子问题以便于求解.

上述复杂度的计算基础可根据 3GPP TR38.901<sup>[17]</sup> 等统计信道模型进行预估. 在实际工程应用中 5G 宏基站覆盖范围大约为 500 m, 功率为 46 dBm; 城市微基站覆盖范围大约为 200~300 m, 室内小基站覆盖范围 10~20 m, 在宏基站覆盖范围内小基站数量通常为 10~50 个, 功率为 26~37 dBm, 单基站可用带宽为 20~100 MHz, 子信道数量为 10~50.

### 3.2 非授权频段网络干扰模型

本小节将在 3.1 节授权频段建模的基础上, 对非授权频段如 NR-U 网络进行系统建模. 非授权频段的网络节点在使用该频段前需要监听信道占用情况. 常用于大范围覆盖的宏基站功率远大于 5G 用户终端的功率, 且覆盖环境较复杂, 使得基站和用户终端两侧的信道测量结果都不能准确反映实际情况<sup>[18]</sup>. 因此, 宏基站覆盖场景中的暴露和隐藏节点问题难以解决. 在小基站覆盖场景中, 功率与覆盖环境的不利因素得到一定程度的缓解, 信道占用情况和测量相比宏基站覆盖场景更加准确. 由此, 本节主要考虑一个 5G 小基站、Wi-Fi 和 Zigbee 等物联网系统共同使用非授权频段的部署场景, 并对于干扰机理建立一种简化的分析模型.

同 3.1 节所述模型类似, 设该场景中可共用的多个子信道组成的频带资源集合为  $\mathbb{K} = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ , 可调控时隙集合为  $\mathbb{T} = \{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$ , 5G 小基站  $n \in \mathbb{N}$  的固定发射功率为  $p_{NR}$ , 5G 用户  $i \in \mathbb{I}_{NR}$ , Wi-Fi 节点  $m \in \mathbb{M}$  固定发射功率为  $p_{WiFi}$ , Wi-Fi 用户为  $j \in \mathbb{I}_{WiFi}$ . 以时间分析片段  $t$  为例, Wi-Fi 与 5G 基站通过任意类型的信道监听机制获取当前的信道使用情况以二进制关联变量  $a_{NR,n}^{k,t} \in \{0, 1\}$  与  $a_{WiFi,m}^{k,t} \in \{0, 1\}$  表示, 并根据网络选用的信道分配协议决定在  $t+1$  时刻各基站的发送功率  $p_{NR,n}^{k,t}$  和  $p_{WiFi,m}^{k,t}$ . 上述过程可表示为

$$p_{NR,n}^{k,t+1} = a_{NR,n}^{k,t+1} p_{NR} = f \left( \sum_{n \in \mathbb{N}} a_{NR,n}^{k,t}, \sum_{m \in \mathbb{M}} a_{WiFi,m}^{k,t} \right) p_{NR} \quad (10)$$

$$p_{WiFi,m}^{k,t+1} = a_{WiFi,m}^{k,t+1} p_{WiFi} = g \left( \sum_{n \in \mathbb{N}} a_{NR,n}^{k,t}, \sum_{m \in \mathbb{M}} a_{WiFi,m}^{k,t} \right) p_{WiFi} \quad (11)$$

其中, 函数  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$  分别表示 5G NR-U 和 Wi-Fi 系

统根据信道占用信息做出的决策函数. 若系统将基于多时隙的历史信息进行决策, 则式(10)和式(11)可对变量  $t$  进行修改. 进一步, 非授权频段中 5G 用户的接收信号 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{n,i}^{k,t} = \frac{p_{NR,n}^{k,t} h_{n,i}^{k,t}}{\underbrace{\sum_{m \in \mathbb{M}} p_{WiFi,m}^{k,t} h_{m,i}^{k,t}}_{\text{Cross-system unauthorized interference}} + \underbrace{\sum_{n' \in \mathbb{N} \setminus \{n\}} p_{n'}^{k,t} h_{n',i}^{k,t}}_{\text{Inter-layer interference}} + w_{n,i}^{k,t}} \quad (12)$$

同理, 设 Wi-Fi 用户  $j$  接入的 Wi-Fi 基站序号为  $m_j$ , 则非授权频段中 Wi-Fi 用户  $j$  的接收信号 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{m,j}^{k,t} = \frac{p_{WiFi,m}^{k,t} h_{m,j}^{k,t}}{\underbrace{\sum_{n \in \mathbb{N}} p_{NR,n}^{k,t} h_{n,j}^{k,t}}_{\text{Cross-system unauthorized interference}} + \underbrace{\sum_{m' \in \mathbb{M} \setminus \{m_j\}} p_{WiFi,m'}^{k,t} h_{m',j}^{k,t}}_{\text{Inter-layer interference}} + w_{m,j}^{k,t}} \quad (13)$$

根据如式(4)所示的香农信道容量计算方法, 上述表达式可进一步反映部署在非授权频段系统的通信容量.

在上述两类用户的接收信号 SINR 表达式中, 与授权频段相比, 式(12)和式(13)除同一系统内多基站资源共用导致的同层干扰外, 还包括由于非授权频段共用导致的跨系统干扰. 该类干扰由于系统间相互异构, 通常不能通过直接复用授权频段由核心网处理的功率控制、时隙分配等干扰抑制技术, 需要进一步通过 MAC 层协议协调多系统干扰, 具体方法将在本文第 6 节进行详细阐述. 值得注意的是, 与授权频段不同, 3GPP 标准要求当 Wi-Fi 等系统与 NR-U 系统发生冲突时, 对 Wi-Fi 的干扰水平需要降低至同系统中同层干扰的级别. 因此, 区别于授权频段场景中基于功率、时间和频率等无线资源约束优化 5G 系统的整体信道容量, 非授权频段的优化问题需为 NR-U 系统的基站和用户引入干扰约束可表示为

$$\left| \underbrace{\sum_{n \in \mathbb{N}} p_{NR,n}^{k,t} h_{n,j}^{k,t}}_{\text{NR interference}} - \underbrace{\sum_{m' \in \mathbb{M} \setminus \{m_j\}} p_{WiFi,m'}^{k,t} h_{m',j}^{k,t}}_{\text{WiFi interference}} \right| \leq \phi_{NR-U}^{\text{Interf}}, \forall j \in \mathbb{I}_{WiFi} \quad (14)$$

其中,  $\phi_{NR-U}^{\text{Interf}}$  表示 NR-U 系统对 Wi-Fi 系统的干扰阈值, 其规定了 NR-U 系统的干扰与 Wi-Fi 系统内干扰应该处于同一水平.

## 4 无线抗干扰方案概述

无线通信抗干扰技术是提高通信系统性能的重要技术之一. 本文的总框架如图 4 所示, 基于授权频段和非授权频段抗干扰技术的差异以及前文对授权频段和非授权频段干扰问题的分析, 我们选择授权频段蜂窝

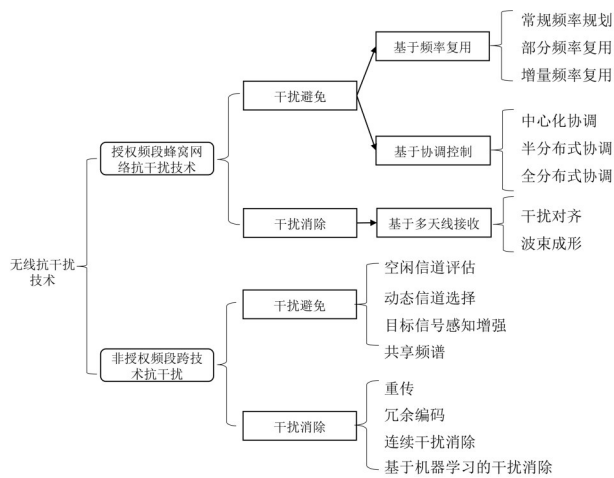


图4 无线抗干扰技术方案

网络下针对小区间干扰问题的解决方案和非授权频段异构系统间干扰解决方案进行详细叙述。这两大类按照具体的实现原理可以细分为若干小类,后文将分析

各类技术的特点并介绍它们的发展趋势。

## 5 授权频段5G蜂窝网络抗干扰解决方案

现有解决蜂窝网络的小区间干扰的方案主要分为三类:频率复用、协调控制和接收信号干扰消除。(1)频率复用方案是指使用相同频段覆盖不同区域以提高蜂窝网络的频谱资源利用率,但该类方案会导致不同小区之间的同频干扰问题。通过控制相同频段的使用范围,可在一定程度上降低邻区干扰。(2)协调控制方案是指不同小区之间的基站进行共同决策。通过基站之间的信息沟通计算,每个基站避免相互干扰的资源分配策略和传输方式<sup>[19]</sup>。(3)接收信号干扰消除方案是指利用多天接收信号,实现消除干扰的效果。例如,在基于MIMO的蜂窝网络系统中,可以通过多天接收信号来消除信号中的干扰<sup>[20]</sup>,或利用波束成形消除干扰<sup>[21]</sup>。表1对比了本节的小区间干扰的几种典型解决方案,并分析了其应用场景、技术特点、和算法效果。

表1 5G蜂窝网络抗干扰解决方案

具体方案	应用场景	技术特点	算法效果
FFR <sup>[22]</sup>	5G微小区蜂窝网络	动态选择复用频段	将最大吞吐量由3 Mbps提高到7 Mbps
EB-DSFR <sup>[23]</sup>	28 GHz频段5G网络	相邻小区在每个时隙间共享资源块	将平均吞吐量提高30%,在小区中心半径比 $\alpha=0.3$ 时达到33 Mbps
LSC-MU-MIMO <sup>[4,24]</sup>	密集5G蜂窝网络	添加多个分布式传输点改善视距环境	将总吞吐量提升了4.0倍,达到了700 Mbps
CS-NOMA <sup>[25]</sup>	5G大规模物联网	联合调度器缓解小区间干扰	将平均吞吐量提高了58%,超过50%的用户终端吞吐量超过120 Kbps
MMBN <sup>[26]</sup>	5G毫米波覆盖异构网络	启发式信道分配、波束选择和功率分配	提高了抗干扰有效距离,在250 m内保持6.76 Gbps的链路最大吞吐量
PA-IA-CB <sup>[27]</sup>	下行链路MIMO-NOMA异构网络	基于功率分配来同时干扰对齐和协调波束成形	随着信噪比SNR的增加,系统总容量优于OMA和NOMA,在SNR=30 dB时达到40 Bps/Hz
JB-PCIC <sup>[28]</sup>	异构5G蜂窝网络	深度强化学习联合优化波束成形、功率控制和干扰协调	提高系统容量至接近性能上限,在天线数为64时达到22 bps/Hz

### 5.1 基于频率复用的方案

5G超密集异构蜂窝网络<sup>[29]</sup>在达到更高容量的同时,也加剧了小区间的干扰问题。以第3节所述的异构网络系统模型分析为例,因为宏基站、小基站和用户终端在空间上分布更加密集,且异构基站共享部分频段的子信道,所以位于不同层级的用户终端将同时受到同层和跨层的干扰<sup>[30]</sup>。

基于频率复用的方案是处理由频率复用引起的小区间干扰的一类技术方案<sup>[31]</sup>,这类方案主要关注以下三个指标:(1)小区使用的频段,即如何将有限的频谱资源划分给相邻小区;(2)使用频段的工作功率,即如何控制基站的工作功率以控制干扰;(3)子信道覆盖的小区范围,即如何将小区内的频段划分为不同子信道,并划分每个子信道覆盖的区域,通常来说小区中心区

域和小区边缘区域使用的子信道不同。上述三点分别与第3节系统模型中各基站分配的总信道带宽、功率分配因子和子信道分配集合对应。如式(3)所示,上述优化配置结果直接影响了用户在5G蜂窝网络中的接收信号SINR,进而决定了信道容量和用户服务质量等一系列通信性能。基于频率复用的方案可根据对频谱资源的划分方式分为常规频率资源规划、部分频率复用、增量频率复用三类,其中常规频率资源规划直接设定固定的小区频段划分方案,部分频率复用对小区中心区域和边缘区域使用的频段进行了更细致的划分,增量频率复用则动态的改变不同区域使用的频段。

常规频率资源规划通常采用固定的频段划分方式,譬如为达到最高频谱利用率,允许所有小区复用同一频谱资源,这会导致频繁的小区间干扰,使得小区边

缘设备服务质量处于较差水平;而通过相邻小区完全划分不同可用频段以避免干扰又会导致频谱资源利用率低下,在频谱资源短缺的情况下也难以表现出较高的整体性能。

为克服常规频率复用方案的缺点,部分频率复用方案(Fractional Frequency Reuse, FFR)选择划分不同小区区域使用的频谱资源,是在基于正交频分多址的蜂窝网络中达成干扰协调的关键技术之一<sup>[32]</sup>。在部分频率复用方案中,有两种常见的部署方式,一是硬频率复用(Strict Fractional Frequency Reuse),二是软频率复用(Soft Frequency Reuse)<sup>[33]</sup>,这两种方案对于小区中心区域的子带分配策略不同。硬频率复用针对多小区模型对常规频率复用做了一些延伸修改,在硬频率复用方案下,在小区中心的用户被分配一个公共的子带,而小区边缘的用户使用不相交的子带以避免干扰。对于小区区域划分方式,动态硬频率复用(Dynamic Strict Fractional Frequency Reuse, DSFFR)<sup>[34]</sup>相比于静态区域划分方式能达到更高的频谱利用率,在这种情况下中心公共子带用户和边缘用户的干扰程度都能保持在较低的水准。

相比于硬频率复用,软频率复用采用与其类似的频段划分方式,但中心区域可复用毗邻小区边缘子带,即每个小区除开自身的边缘子带外,中心区域使用的子带为周边毗邻小区边缘子带的并集,因此软频率复用方案相比于硬频率复用提高了频谱资源利用率,但也导致中心区域用户与毗邻小区边缘用户受到的干扰增大。5G场景下用户和基站位置分布更加不均匀导致频谱利用更加不均衡,这使得部分子带过载而部分子带相对空闲,限制了频谱资源利用率。为了减轻中心区域对毗邻小区边缘区域的干扰,该类方案通常都会控制中心区域的功率,因此在复用因子为3的情况下最多有三分之一的子带可以通过高功率传输数据,而剩下的三分之二子带被限制工作在较低的功率,于是在提高边缘用户的服务质量的同时使得整体小区容量降低。在5G异构网络中使用基于部分频率复用的方案能够显著减少小区间干扰并提高用户服务质量<sup>[22]</sup>。基于经验的动态软频率复用(Experience Based Dynamic Soft Frequency Reuse, EBDSFR)进一步在28 GHz的5G网络中减少小区间干扰,并通过动态信道分配在保证边缘用户服务质量的前提下提高系统总容量<sup>[23]</sup>。

为提高小区边缘用户服务质量,部分频率复用限制了频谱的复用程度。为了克服控制干扰导致的频谱利用率不足问题,增量频率复用方案采用更加动态的方式控制干扰以提高频谱利用率。增量频率复用尝试在低流量下有效降低小区间干扰<sup>[35]</sup>,它通过毗邻小区分别按照不同序列分配子带资源,并随着流量增加逐渐增加分配的子带资源,使得在低流量下,毗邻小区分

配的子带资源互不干扰,直到流量增加导致毗邻小区出现分配相同子带资源从而导致小区间干扰,该类方案在低流量下有着良好的表现,然而在高流量负载下表现急剧变差。增强型部分频率复用<sup>[36]</sup>为解决高流量负载下的问题,将毗邻小区分为三类,同时将可用频段分为三段正交子段,每一段对应每一类小区的主要频段,其余两类小区的主要频段组成该小区的次要频段,次要频段中只有一部分是可被复用的,每一类小区可占据全部的主要频段,并时刻监听次要频段,依据信号与干扰加噪声比(SINR)选择复用的子带,在高流量负载下降低小区间干扰的同时尽可能提高整体容量。而基于主从分布式算法的多小区部分频率复用方案<sup>[37]</sup>通过多小区间协商频率复用方式,在保持高频谱利用率的同时进一步提高了SINR。

## 5.2 基于协调控制的方案

基于协调控制的方案主要通过实时的协调来避免发生小区间干扰,如防止毗邻小区的边缘区域使用同一子载波从而避免干扰的发生。这类方案从协调层级上可以分为中心化协调、半分布式协调和全分布式协调,主要区别在于信息收集和交换的方式不同。这些基于协调控制的方案主要关注以下三种优化目标,分别是最大化系统吞吐量、最小化小区间干扰和最小化能耗。

在时分多址和码分多址系统中,常常使用中心化协调方案,该类方案使用中央控制单元收集所有系统中每个用户终端的信道状态信息(CSI),并试图为每个基站最大化分配可用的资源<sup>[38]</sup>。以下行网络为例,用户通常采用本地参考信号基于式(7)对接收信号开展CSI估计,并通过网络协议将CSI反馈至基站。进一步,基站将接收到的CSI转发至核心网的集中控制器并等待接收资源的分配信息。然而,中心化调度过程中信息交互频繁且开销较大,难以支持日益剧增的时延敏感性服务需求。因此,在新兴的蜂窝网络中已逐渐摒弃了完全中心化的控制方案。

相比中心化协调方案,半分布式协调方案并不直接使用中央控制器分配信道资源给用户终端,而是由每个基站负责在帧级别上将信道资源分配给服务的用户终端,并由一个类似中央控制器的中央节点负责处理小区间干扰问题<sup>[39]</sup>。在此过程中,每个基站会监测毗邻小区对服务小区内用户的干扰情况,并通过收集CSI信息形成一个干扰信息集合,同时记录为减轻干扰需要限制的资源块,中央节点如移动管理节点(Mobility Management Entity, MME)负责在保证最高频谱效率的条件下确定最终限制的资源块,通过整数线性规划等方法求解上述干扰协调问题<sup>[40]</sup>。对于大型5G蜂窝网络,半分布式协调算法通过二级干扰协调将整个网络划分为多个集群,集群内采用中心化的方式分配用户

资源,集群间交换干扰信息并通过动态时域算法来优化边缘用户体验<sup>[41]</sup>. 基于半分布式的混合动态小区间干扰协调(hybrid dynamic inter-cell interference coordination)通过减缓两级微蜂窝共层和跨层干扰来提高小区边缘性能<sup>[42]</sup>. 离散萤火虫算法(Discrete Firefly Algorithm, DFA)通过启发式优化减轻跨层和共层干扰进一步提高了异构蜂窝网络下的 SINR<sup>[43]</sup>. 由于 5G 网络引入了大规模机器型通信,在超高密集部署的物联网等环境下,大规模连接将导致大规模干扰,严重限制了设备连接密度的增加,基于联合调度的半分布式算法通过基站之间共享调度信息并由联合调度器来计算最小干扰策略以提高设备连接密度<sup>[25]</sup>.

频繁的资源分配更新会导致较高的基站与中央节点的通信开销<sup>[44]</sup>,因此中心化方案和半分布式协调方案在支持高移动性的移动通信系统中显得过于繁重,全分布式协调方案通过基站之间交换 CSI 信息并做出干扰协调决策避免了与中央节点的通信负担,便于异构蜂窝网络的部署. 这类方案采用基于交换的干扰协调算法(Exchange-based Interference Coordination, EIC)<sup>[45]</sup>,将多小区干扰协调优化问题转换为单小区优化问题,由每个基站根据来自本地用户终端信息和来自毗邻小区基站的交换信息来调控资源块的传输功率以减轻小区间干扰. 除基站之间对称交换信息外,也有方案通过高负载小区的边缘用户终端向毗邻低负载小区基站请求限制使用资源块,在减轻干扰的情况下达成更好的负载均衡<sup>[46]</sup>.

作为基于分布式协调控制的经典干扰协调方案,协调多点系统被用于提高蜂窝网络容量和覆盖性,其控制干扰的能力在 5G 密集蜂窝网络中表现良好<sup>[47]</sup>,对于蜂窝边缘用户来说能明显提高其用户体验. 该系统收集信息的方式类似半分布式或全分布式方案,其协调调度的方式是不同基站之间共同控制对用户的资源块分配,对边缘用户选择干扰最小的资源分配方式;在同信道情况下,也会使用多点共同传输,提高用户的传输效率,或使用协调波束成形(Coordinated Beamforming, CB)机制,通过协商错开方向来达成控制干扰的效果. 对于干扰协调算法,利用强化学习(Reinforcement Learning, RL)等机器学习技术来优化干扰协调算法的研究,主要通过异构蜂窝网络中的基站共同收集信息并学习最佳的小区范围扩展偏置(Cell Range Expansion, CRE)和传输功率分配(Transmit Power Allocation, TPA)等参数,相比静态方案显著提升用户平均吞吐量和边缘用户吞吐量<sup>[48,49]</sup>;强化学习算法(Joint Beamforming, Power Control, and Interference Coordination, JB-PCIC)在解决波束成形、功率控制和干扰协调的联合非凸优化问题上表现优异,相比于标准固定功率分配算

法提高了 SINR 和系统容量<sup>[28]</sup>.

基于协调控制的方案通过动态交换信息并限制资源使用来减轻小区间干扰,使得小区边缘用户被分配到频谱中互补部分的资源,同时更加适应非均匀且易变的流量特性,在 5G 密集异构蜂窝网络中能有更佳的表现.

### 5.3 基于多天线接收抗干扰的方案

5G 网络为了利用具备更大可用带宽的毫米波频段,并达到 100 bps/Hz 的高频谱效率,需要在功率约束以及高频段衰减剧增的情况下辐射更强的信号. 因此,5G 系统亟须进一步利用大规模 MIMO 和更先进的波束成形技术<sup>[50]</sup>. 基于多天线接收抗干扰的方案通常通过改进天线系统和接收信号解码方式检测并解码干扰信号,然后根据抗干扰算法的输出,从接收信号中重建并消除干扰,以提高目标信号的解码效果. 与本文第 3 节所述的单天线多层异构网络相比, MIMO 技术使得基站与用户之间能够建立更精确的发射波束与接收波束,其波束赋形增益将通过波束赋形向量体现在如式(3)所示的发射和接收信号模型中,进而有望提升 SINR 和通信容量的增益. 然而,受限于基站与用户的波束赋形能力,在单个波束覆盖范围内的用户仍会受到一定程度的波束间干扰,最终体现在 SINR 计算式(4)中的干扰项中.

为了提高 MIMO 信道质量,干扰消除(Interference Cancellation, IC)技术被用于解决小区内和小区间干扰问题,其基本原理是通过重建干扰信号并从接收信号中消除干扰信号. 小区内干扰消除技术包括连续干扰消除、并行干扰消除、迭代干扰消除<sup>[51]</sup>. 在超密集 5G 异构蜂窝网络中,为减轻小区间干扰问题,基于协方差矩阵估计的干扰抑制技术在减轻接收端同频干扰上表现良好<sup>[52]</sup>. 同时,利用波束成形机制也可以减轻接收信号受到的干扰,该方法利用波束成形的方法通过到达角算法估计接收目标和干扰源的方向,并在干扰方向产生较深的零点<sup>[53]</sup>. 协调多点系统充分利用波束成形技术,通过不同的波束模式设计,使得毗邻小区之间的边缘用户接收不同基站的波束,在增加边缘用户的容量下将波束范围外的其他区域的干扰最大程度减少,提高了小区间干扰控制的质量<sup>[54]</sup>.

干扰对齐(Interference Alignment, IA)是在复数接收端处理干扰的一种传统方案,其基本思想为通过线性预编码方案来对齐多个接收到的信号,并计算求解接收信号中的干扰以得到目标信号. 在 MIMO 蜂窝网络系统中,一种基于最大 SINR 的前向后向迭代算法被用于预编码方案,以在多天线基站多天线用户模型中达成零干扰条件<sup>[55]</sup>. 基于功率分配的干扰对齐协调波束成形(Power Allocation based Interference Alignment and Coordinated Beamforming, PA-IA-CB)在干扰对齐和协调波束成形两个阶段,利用用户可用自由角在降维

子空间对齐跨层和共层干扰,使得剩余维度可用于无干扰数据传输<sup>[27]</sup>。

## 6 非授权频段异构系统间抗干扰解决方案

与授权频段设备相比,非授权频段设备在解决无线信号的干扰问题上面临着新的挑战。首先,非授权频段上有多种协议共用频段,设备必须与种类繁多的其他协议共用频段。其次,设备难以与使用其他协议的设备交换信息以实现高效的协同通信,只能通过监听来推测当前信道环境。为了应对这些挑战,在非授权频段工作的协议需要采用信道隔离的方法,以频率和时间片段为依据,并通过空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA)和先听后说(Listen Before Talk, LBT)的信号接入机制分配信道资源。最终实现在自身设备传输的时间片 $t$ 内减少冲突,消除使用其他协议的设备带来的干扰,降低其他无线通信系统引入的干扰,提高当前目标通信系统的通信容量。在非授权频段的5G技术和非授权频段协议实现共存时,可以从信道接入机制和信道检测机制两个方面研究抗干扰方案。

### 6.1 信道接入机制

LTE-LAA是LTE在非授权频段上的扩展。它主要通过MAC层支持LBT来规避与频段内其他技术的干扰。此外,LTE-LAA还支持授权频谱与非授权频谱通过载波聚合(Carrier Aggregation, CA)的方式捆绑使用,文献[6]具体对CCA实现的细节进行了阐述总结。基于5G技术的NR-U则是沿用LTE-LAA的设计思路,即实现基于LBT的竞争机制以避免对其他非授权频段协议的干扰。NR-U将支持3种LBT<sup>[56]</sup>。

(1) Cat 1 LBT:不启用LBT。

(2) Cat 2 LBT:NR-U设备必须在固定持续时间内检测信道。如果在此期间信道保持空闲,则设备可以访问该信道。

(3) Cat 4 LBT:NR-U设备必须根据具有指数退避的CSMA/CA程序退避。

CAT2-LBT用于半静态信道访问,也称为基于帧的设备(FBE),或发送关键帧,例如发现帧,或在未被其他人共享时访问信道。CAT 4 LBT已被LTE-LAA采用,也被视为共享频谱接入或基于负载的设备机制(LBE)的NR-U的基础,如果NR-U设备需要和使用其他协议的非授权频段设备竞争信道占用时间,则需要使用CAT 4 LBT。对于CAT 4 LBT(如图5所示),在数据传输前,NR-U会检测信道占用情况,若在初始空闲信道检测(Initial Clear Channel Assessment, ICCA)时间内,信道一直处于空闲状态,可以直接进行数据传输。若在初始空闲信道检测ICCA时间(例如 $34\ \mu\text{s}$ )内,信道一直处于空闲状态,可以直接进行数据传输。若检测到信道繁

忙,则进入退避过程,此时,节点需要在竞争窗口大小内随机产生一个整数值 $N$ 用作计时器值,该计时器为实际退避时长。若信道空闲一个扩展CCA(extended CCA, eCCA)推迟时间(例如 $34\ \mu\text{s}$ ),节点会继续执行另一个持续时间为eCCA时隙(例如 $9\ \mu\text{s}$ )的CCA过程,计时器值减去1,直到计时器归零时,节点就可以进行数据传输。过程中若检测到信道繁忙,计时器暂停,直到检测到信道空闲一个eCCA推迟时间,节点会继续执行另一个持续时间为eCCA时隙的CCA过程,计时器将从保留的值继续计时。若传输结束后还有数据要传,可直接进入退避过程。同时根据传输反馈调整竞争窗口,如果NACK的数量超过阈值(通常为80%),则竞争窗口大小加倍,直到成功传输则重置竞争窗口长度。如果由于信道冲突导致LBT失败,就会对空口消息交互产生影响,包括系统消息、接入请求、RRC信令等均无法发送,导致网络侧或终端侧接收延迟或失败,造成时延增加和可靠性降低,影响用户的QoS和业务体验。总体而言,提高LBT成功率和减少冲突概率是5G非授权频段抗干扰技术的重要挑战<sup>[18]</sup>。

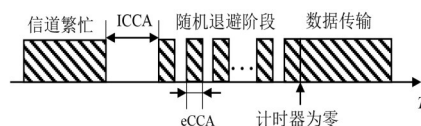


图5 CAT 4 LBT过程示意图

非授权频段5G技术可以被应用于不同频段、不同用户密度、不同干扰强度的场景中,在这些不同场景中可以对LBT架构进行调整从而实现针对场景的优化。此外,在NR-U LBT的实现框架中,数据传输是在时隙(Slots)中调度的。由于LBT过程的随机特性,LBT很难在时隙边界处结束。因此,发送设备通常在LBT成功点和最近的时隙边界之间发送预留信号,以防止使用其他无线协议的设备占用信道。这也给非授权频段5G技术LBT提供了一个研究方向。目前,对于5G非授权频段LBT框架的优化是非授权频段5G抗干扰技术最主要的研究方向,具体的优化方向包括具体场景优化<sup>[57,58]</sup>,对预留信号机制优化<sup>[59,60]</sup>以及根据场景切换LBT策略<sup>[61]</sup>,详细信息如表2所示。

### 6.2 信道检测机制

对信道环境进行检测是干扰避免的另外一个研究方向。信道环境检测通过阈值来推断信道占用情况,为信道资源调度提供依据。信道检测的方法传统上分为两类,检测当前信道的能量强度是否超过阈值的能量检测(Energy Detection)和判断前导信号强度是否超过阈值的前导码检测(Preamble Detection)。Wi-Fi设计了独特的前导信号通过前导码检测来进行检测,而LTE-LAA技术在3GPP的规范中使用了能量检测,在LTE-LAA上也有

表 2 非授权频段 5G LBT 优化方案

具体方案	优化方向	技术特点	技术效果
文献[57]	6G 大规模物联网场景优化	空间 LBT, 借助协调多点传输充分利用空间资源	实现在协调多点传输架构下的空间 LBT
文献[58]	5G NR 超密集网络优化	允许相邻的基站在感知和传输阶段进行协作, 以提高服务质量	将冲突概率从 0.492 8 减少到 0.163 2
文献[59]	优化预留信号机制	在预留信号中携带信息通知其他设备 LBT 成功	成功 LBT 的节点提高 92%
文献[60]	优化预留信号机制	提出了冲突解决方案减少预留信号产生的信道资源浪费	在 Wi-Fi 和 NR-U 节点数量相同情况下最高提高 Wi-Fi 吞吐量为 3 倍
文献[61]	切换 LBT 策略	检测当前相邻节点的密度和活动状态切换全向和定向 LBT	吞吐量和冲突次数优于任一单一方法

将两者结合的工作<sup>[62]</sup>。此外,机器学习也可以应用在信道检测领域,基于深度神经网络的研究<sup>[63]</sup>可以不对信号进行解码而检测共存信号类型,从而精确区分 Wi-Fi、LTE-LAA 和 5G NR-U 信号。非授权频段 5G 技术使用的信道检测方式尚未有明确结论。相比较而言,基于前导码的检测能够实现更精准的干扰检测,能量检测容易实现并且不需要和其他无线传输协议协调,混合方法和基于机器学习的方法可以更好地适应不同的无线传输协议,但会带来更高的复杂性和计算开销。非授权频段 5G 技术可以根据具体场景选择不同的干扰检测方法。

决定信道检测算法的关键在于选定合适的信道检测阈值,提高信道检测的阈值可以提高空间频谱的利用率,但也可能导致忽视部分低功率设备并带来不公平竞争以及隐藏终端问题。目前,5 GHz 频段的 NR-U 系统使用 -72 dBm 作为 20 MHz 信道带宽的能量检测阈值。在没有应用其他协议的系统干扰情况下,该阈值可以放宽到 -62 dBm,并且可以根据 3GPP 讨论的通道带宽进行缩放<sup>[64]</sup>。当使用前导码检测时的阈值则为 -82 dBm。此外, NR-U 在运用于 6 GHz 以及毫米波频段时,需要根据频段中使用的无线传输协议调整信道检测阈值,以获得更好的性能<sup>[7]</sup>。为了确定一个合适的检测阈值,使 NR-U 和其他无线传输协议之间能够公平有效地共存,必须研究所选阈值对不同无线传输协议的系统范围性能的影响。在 5 GHz 频段中的 LAA-Wi-Fi 共存研究<sup>[65-67]</sup>已经奠定了相关分析模型、仿真平台的基础,可以扩展到其他频段中。基于强化学习的方案也为调整信道检测阈值提供了新的思路<sup>[68,69]</sup>。

## 7 5G 抗干扰技术总结与展望

本文介绍了授权频段和非授权频段存在的干扰问题,归纳分析了蜂窝网络抗干扰方案和非授权频段异构系统间抗干扰方案,并总结了对应的技术特点和局限性等。二者的抗干扰技术既相似又存在差异。授权频段和非授权频段的抗干扰技术都着重于对信道资源的分配。授权频段抗干扰技术相关研究基于基站的信道资源分配方案,非授权频段抗干扰技术则是注重基

于终端设备的信道资源分配研究。

与 LTE 授权频段类似,在 5G 授权频段,由于基站的密集部署,商用 5G 信号主要干扰源同样来自于附近基站的信号。然而,5G 信号所用的频率更高,衰减也越快,更容易被障碍物屏蔽,因此需要部署更加密集的 5G 基站,并提高信号功率,5G 蜂窝网之间的相互干扰也变得愈发严重。针对这种情况,我们基于已有的 LTE 蜂窝网的研究,从发送-传输-接收三个过程提出了三种适用于基于 5G 蜂窝网络的干扰避免和消除策略。

(1) 在 5G 基站端,由于 5G 频率带宽大,基于 5G 基站之间的相互协作,我们可以为相邻基站分配不同的频率带宽,使相邻基站之间的中心频率相互错开,从而避免 5G 蜂窝网络之间的干扰;伴随着下一阶段 5G 毫米波的应用,基站覆盖范围缩小,其部署密度会进一步提高,同时基站的部署也会为了适应人流变化而更加动态,过去划分频率的方式难以满足高密度、高动态下的抗干扰需求。基于软件定义网络的动态频率复用方案在分配频谱资源、抑制小区间干扰方面更加智能高效,是未来 5G 基站部署方案面对信号干扰这一挑战的重要解决思路。

(2) 在 5G 信号传输过程中,可以在 5G 蜂窝网络的边缘区域内部署智能反射面,通过对智能反射面进行合理的配置,从而对 5G 无线传输环境进行重构,从而减少相邻蜂窝网络之间的干扰。

(3) 在 5G 商用接收端,可以基于已有的干扰消除算法(例如连续干扰消除,基于天线阵列的空间滤波等算法),并结合特有的 5G 技术(例如大规模波束成形),提出新的干扰消除算法,以消除来自附近其他 5G 蜂窝网络的干扰。此外,考虑到未来网络中有望使用非正交多址接入(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA),利用多天线在接收端实现干扰消除对保障共信道下的数据传输性能至关重要。联合连续干扰消除、并行干扰消除、波束成形并通过机器学习技术做出最佳决策来构建合作式 NOMA 网络在抑制干扰、提高网络性能方面具有极大的潜力,是 5G 毫米波大规模 MIMO 通信采用 NOMA 技术的关键保障。

在非授权频段,部分研究表明 NR-U 在一般室内场景中可以实现和其他无线传输协议的良好共存<sup>[69]</sup>。因

此,非授权频段 5G 抗干扰技术的主要发展方向可能是针对特殊场景的优化.近年来,非授权频段 5G 技术已经被广泛运用于智慧医疗、自动驾驶和智能制造在内等智慧场景,在新兴应用场景中,具有大规模、高密度、强实时和高可靠需求的工业互联网成为 5G 技术的重点应用场景.工业互联网场景下的 5G 技术存在以下新的问题需要进一步的研究.

(1) 工业互联网场景下的无线信道竞争机制不同.在复杂工业互联网场景下,存在着大量密集异构设备,这些设备之间存在着相互干扰.与此同时,这些异构设备的通信优先级也存在着差异,工业场景的抗干扰技术需要解决这一特殊需求.为了保证不同类型设备的正常工作,确保资源在多元异构场景下的合理分配,防止频谱竞争导致的设备失效发生,可通过中心化协调控制管理异构设备,解决干扰问题.

(2) 工业环境信道环境复杂.在高动态室内环境下,非授权频谱上的异构协议之间竞争大干扰多,工业设备运行产生的环境电磁也会对基站产生影响.为了提高在复杂场景下数据传输的可靠性,需要动态调整信道检测阈值使得在准确发现其他设备的同时规避电磁干扰的影响,并且考虑引入授权频段 5G 的干扰消除技术以减轻信道冲突带来的影响.

(3) 异构协议难以高效协调.多元异构工业网络协议之间互不兼容,难以设计高效的协同机制,这导致抗干扰技术能够获取的信息和采取的方案有限.传统的基于频率隔离的方法往往需要牺牲频率资源的利用率,进而导致传输效率较低.为不同的工业网络协议设置统一的前导码可以进行有效的管理,从而基于 LBT 机制进行信道资源调度.

#### 参考文献

- [1] 5G; NR; packet data convergence protocol (PDCP) specification (release 16), V16.1.0: ETSI TS 138 323-2020[S/OL]. [2022-09-25]. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/etsi/f2f5675e-6717-48ea-867a-e47ca90eb699/etsi-ts-138-323-v16.1.0-2020-07#1>.
- [2] AIJAZ A. Private 5G: The future of industrial wireless[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2020, 14(4): 136-145.
- [3] HIRZALLAH M, KRUNZ M, KECICIOGLU B, et al. 5G new radio unlicensed: Challenges and evaluation[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 689-701.
- [4] ABDALLAH JAZEA N, ABOOD KADIM H, HASAN SALLOMI A. Study and analysis of intra-cell interference and inter-cell interference for 5g network[J]. Journal of Engineering and Sustainable Development, 2020, 24(3): 43-57.
- [5] RIIHIJÄRVI J, MÄHÖNEN P, PETROVA M. What will interference be like in 5G HetNets?[J]. Physical Communication, 2016, 18(P2): 85-94.
- [6] CHEN B L, CHEN J M, GAO Y, et al. Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with corresponding deployment scenarios: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 7-32.
- [7] NAIK G, PARK J M, ASHDOWN J, et al. Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 153027-153056.
- [8] 钱志鸿, 肖琳, 王雪. 面向未来移动网络密集连接的关键技术综述[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 22-43.
- [9] QIAN Z H, XIAO L, WANG X. Review on strategic technology of dense connection for the future mobile network [J]. Journal on Communications, 2021, 42(4): 22-43. (in Chinese)
- [10] PANG L H, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Investigation and comparison of 5G channel models: From QuaDRiGa, NY-USIM, and MG5G perspectives[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(1): 1-17.
- [11] 孙健, 张文胜, 王承祥. 5G 高频段信道测量与建模进展 [J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1249-1260.
- [12] SUN J, ZHANG W S, WANG C X. Developments on channel measurement and models in 5G high frequency band[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1249-1260. (in Chinese)
- [13] ZHANG H J, SUN M Y, LONG K P, et al. Supermodular game based energy efficient power allocation in heterogeneous small cell networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] FOOLADIVANDA D, ROSENBERG C. Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 248-257.
- [15] ZHANG H J, FANG F, CHENG J L, et al. Energy-efficient resource allocation in NOMA heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 48-53.
- [16] Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation (release 16), V16.6.0: 3GPP TS 36.211[S/OL]. [2022-09-25]. <https://itcspec.com/archive/3gpp-specification-ts-36-211/>.
- [17] Physical channels and modulation (release 17), V17.0.0: 3GPP TS 38.211[S/OL]. [2022-09-25]. <https://itcspec.com/archive/3gpp-specification-ts-38-211/>.
- [18] ZHANG H J, JIANG C X, BEAULIEU N C, et al. Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA femto-cells with heterogeneous services[J]. IEEE Transactions

- on Communications, 2014, 62(7): 2366-2377.
- [17] Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, V15.0.0: 3GPP TR 38.901[S/OL]. [2022-09-25]. <https://itcspec.com/archive/3gpp-specification-tr-38-901/>.
- [18] 卢斌, 陈兵. 5G非授权频谱技术与应用建议[J]. 移动通信, 2020, 44(8): 49-55.  
LU B, CHEN B. Consideration and introduction of 5G NR in unlicensed spectrum[J]. Mobile Communications, 2020, 44(8): 49-55. (in Chinese)
- [19] YAACOUB E, DAWY Z. A survey on uplink resource allocation in OFDMA wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2): 322-337.
- [20] JOSE J, SUBRAMANIAN S, WU X Z, et al. Opportunistic interference alignment in cellular downlink[C]//2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). Monticello: IEEE, 2012: 1529-1534.
- [21] ZHANG S, LIU L, CHENG Y, et al. Energy-efficient beamforming for massive MIMO with inter-cell interference and inaccurate CSI[C]//2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Maui: IEEE, 2018: 518-523.
- [22] SAHU G, PAWAR S S. An approach to reduce interference using FFR in heterogeneous network[J]. SN Computer Science, 2020, 1(2): 100.
- [23] YAĞCI OĞLU M. Dynamic resource allocation and interference coordination for millimeter wave communications in dense urban environment[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2022: e4442.
- [24] KUMAGAI S, KOBAYASHI T, OYAMA T, et al. Experimental trials of 5G ultra high-density distributed antenna systems[C]//2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). Honolulu: IEEE, 2019: 1-5.
- [25] MWAKWATA C B, ELGARHY O, ALAM M M, et al. Cooperative scheduler to enhance massive connectivity in 5G and beyond by minimizing interference in OMA and NOMA[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(3): 5044-5055.
- [26] NAKAMURA M, TRAN G K, SAKAGUCHI K. Interference management for millimeter-wave mesh backhaul networks[C]//2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE, 2019: 1-4.
- [27] NASSER A, MUTA O, ELSABROUTY M, et al. Interference mitigation and power allocation scheme for downlink MIMO-NOMA HetNet[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6805-6816.
- [28] MISMAR F B, EVANS B L, ALKHATEEB A. Deep reinforcement learning for 5G networks: Joint beamforming, power control, and interference coordination[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1581-1592.
- [29] 谭晓衡, 谢朝臣, 郭坦. 基于区域感知贝叶斯决策的5G超密集异构网络联合垂直切换技术研究[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 582-588.  
TAN X H, XIE C C, GUO T. Research of joint vertical handoff technology based on area sensing Bayesian decision in ultra-dense het net for 5G[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(3): 582-588. (in Chinese)
- [30] HASSAN T U, GAO F. An active power control technique for downlink interference management in a two-tier Macro-Femto network[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(9): 2015.
- [31] SOULTAN E M, NAFEA H B, ZAKI F W. Interference management for different 5G cellular network constructions[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 116(3): 2465-2484.
- [32] DAVID NOVLAN T, GANTI R K, GHOSH A, et al. Analytical evaluation of fractional frequency reuse for OFDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 4294-4305.
- [33] ELDIN ELMUTASIM OSMAN MOHAMED ELFADIL H, ALI M A I, ABAS M. Fractional frequency reuse in LTE networks[C]//2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN). Sousse: IEEE, 2015: 1-6.
- [34] GEBREMARIAM A A, BAO T N, SIRACUSA D, et al. Dynamic strict fractional frequency reuse for software-defined 5G networks[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.
- [35] KIM K T, OH S K. An incremental frequency reuse scheme for an OFDMA cellular system and its performance[C]//VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference. Marina Bay: IEEE, 2008: 1504-1508.
- [36] XIE Z, WALKE B. Enhanced fractional frequency reuse to increase capacity of OFDMA systems[C]//2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security. Cairo: IEEE, 2009: 1-5.
- [37] DEB P, MUKHERJEE A, DE D. Fractional frequency reuse based frequency allocation for 5G HetNet using master-slave algorithm[J]. Physical Communication, 2020, 42: 101158.
- [38] BONALD T, BORST S, PROUTIERE A. Inter-cell scheduling in wireless data networks[C]//11th European Wireless Conference 2005-Next Generation wireless and Mobile Communications and Services. Nicosia: VDE, 2005: 1-7.

- [39] RAHMAN M, YANIKOMEROGLU H. Enhancing cell-edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1414-1425.
- [40] RAHMAN M, YANIKOMEROGLU H. Multicell downlink OFDM subchannel allocations using dynamic inter-cell coordination[C]//*IEEE GLOBECOM 2007 - IEEE Global Telecommunications Conference*. Washington: IEEE, 2007: 5220-5225.
- [41] WANG J, WEITZEN J, BAYAT O, et al. Interference coordination for millimeter wave communications in 5G networks for performance optimization[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019: 46.
- [42] PADMALOSHANI P, NIRMALA S. Semi-distributed dynamic inter-cell interference coordination scheme for interference avoidance in heterogeneous networks[J]. *ETRI Journal*, 2020, 42(2): 175-185.
- [43] XAPHAKDY K, MUSTIKA I W, BUDI SETIAWAN F, et al. Resource optimization in heterogeneous networks using discrete firefly algorithm[C]//*2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICOSTA)*. Surabaya: IEEE, 2020: 1-5.
- [44] LI G Q, LIU H. Downlink dynamic resource allocation for multi-cell OFDMA system[C]//*The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*. Pacific Grove: IEEE, 2003: 517-521.
- [45] TRIKI A, NUAYMI L. Intercell interference coordination algorithms in OFDMA wireless systems[C]//*2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Budapest: IEEE, 2011: 1-6.
- [46] ZHENG S Q, TIAN H, HU Z, et al. QoS-guaranteed radio resource allocation with distributed inter-cell interference coordination for multi-cell OFDMA systems[C]//*2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. Taipei: IEEE, 2010: 1-5.
- [47] JUNGnickel V, Manolakis K, Zirwas W, et al. The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 44-51.
- [48] SIMSEK M, BENNIS M, GÜVENÇ İ. Learning based frequency- and time-domain inter-cell interference coordination in HetNets[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(10): 4589-4602.
- [49] SIMSEK M, BENNIS M, CZYLWIK A. Dynamic inter-cell interference coordination in HetNets: A reinforcement learning approach[C]//*2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Anaheim: IEEE, 2012: 5446-5450.
- [50] MOHAMED K S, ALIAS M Y, ROSLEE M, et al. Towards green communication in 5G systems: Survey on beamforming concept[J]. *IET Communications*, 2021, 15(1): 142-154.
- [51] ANDREWS J G. Interference cancellation for cellular systems: A contemporary overview[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(2): 19-29.
- [52] MA W Z, ZHAO H Z, LIU Y, et al. A Co-channel interference rejection method for 5G ultra dense heterogeneous networks[C]//*2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Kansas City: IEEE, 2018: 1-5.
- [53] ABOHAMRA Y ALI, SOLEYMANI M R, SHAYAN Y R. Using beamforming for dense frequency reuse in 5G [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 9181-9190.
- [54] CHANGYOUNG A, JANG K, RYU H, et al. Robust digital retrodirective beamforming technique for multipath channel environment[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 56: 427-432.
- [55] ZHUANG B N, BERRY R A, HONIG M L. Interference alignment in MIMO cellular networks[C]//*2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Prague: IEEE, 2011: 3356-3359.
- [56] Summary of Rel-16 Work Items (Release 16), V16.0.1: 3GPP TR 21.916[S/OL]. [2022-09-25]. <https://itecspec.com/archive/3gpp-specification-tr-21-916/>.
- [57] CHEN Q M, YANG K X, JIANG H, et al. Joint beamforming coordination and user selection for CoMP-enabled NR-U networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 14530-14541.
- [58] SONG H G, CUI Q M, GU Y, et al. Cooperative LBT design and effective capacity analysis for 5G NR ultra dense networks in unlicensed spectrum[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 50265-50279.
- [59] PEI X M, QIAN H, WANG H F, et al. An improved listen-before-talk scheme for uplink multiple access in 5G unlicensed band[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 19843-19853.
- [60] LOGINOV V, KHOROV E, LYAKHOV A, et al. CR-LBT: Listen-before-talk with collision resolution for 5G NR-U networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(9): 3138-3149.
- [61] LAGEN S, GIUPPONI L, PATRICIELLO N. LBT switching procedures for new radio-based access to unlicensed spectrum[C]//*2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Abu Dhabi: IEEE, 2018: 1-6.
- [62] HONG S T, LEE H, KIM H, et al. Lightweight Wi-Fi

frame detection for licensed assisted access LTE[J]. IEEE Access, 2019, 7: 77618-77628.

- [63] ZHANG W H, FENG M J, KRUNZ M, et al. Signal detection and classification in shared spectrum: A deep learning approach[C]//IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications. Vancouver: IEEE, 2021: 1-10.
- [64] Physical layer procedures for shared spectrum channel access (release 16), V16.3.0: 3GPP TS 37.213[S/OL]. [2022-09-25]. <https://itcspec.com/archive/3gpp-specification-ts-37-213/>.
- [65] MEHRNOUSH M, SATHYA V, ROY S, et al. Analytical modeling of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence: Throughput and impact of energy detection threshold[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(4): 1990-2003.
- [66] LI Y Z, BACCELLI F, ANDREWS J G, et al. Modeling and analyzing the coexistence of Wi-Fi and LTE in unlicensed spectrum[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6310-6326.
- [67] AJAMI A K, ARTAIL H. On the modeling and analysis of uplink and downlink IEEE 802.11ax Wi-Fi with LTE in unlicensed spectrum[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 5779-5795.
- [68] HIRZALLAH M ALI. Protocols and Algorithms for Harmonious Coexistence Over Unlicensed Bands in Next-Generation Wireless Networks[D]. Tucson: The University of Arizona, 2020.
- [69] HIRZALLAH M, KRUNZ M. Intelligent tracking of network dynamics for cross-technology coexistence over unlicensed bands[C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Big Island: IEEE, 2020: 698-703.

#### 作者简介



**许辰人** 男, 1985年11月出生于上海市. 现为北京大学计算机学院特聘副教授、网络与高效计算研究所副所长. 主要研究方向为无线网络、移动系统和普适计算. 中国电子学会会员编号: E190026855S.

E-mail: chenren@pku.edu.cn



**马翔天** 男, 1998年11月出生于浙江省慈溪市. 现为北京大学软件与微电子学院硕士研究生. 主要研究方向为无线网络.



**徐昊天** 男, 1997年11月出生于湖北省宜昌市. 现为北京大学软件与微电子学院硕士研究生. 主要研究方向为智能运维.

Email: haotian@pku.edu.cn



**刘启瑞** 男, 1997年2月出生于北京市. 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为蜂窝网络无线资源管理方法.



**王诚科** 男, 1998年7月出生于广东省佛山市. 现为北京大学高效计算与应用中心博士研究生, 主要研究方向为边缘智能计算系统.



**王雄** 1990年8月出生于湖北省黄冈市. 现为北京大学高效计算与应用中心博士后研究员. 主要研究方向为无线网络和安全以及移动计算.



**高峰** 男, 1982年2月出生于山西省阳泉市. 毕业于北京航空航天大学, 现为北京云智软通信信息技术有限公司技术总监. 从事5G专网与工业互联网技术方面的研发和研究.

E-mail: gaofeng@yunzhiruandong.com



**陈晓光** 男, 1988年3月出生于山东省济南市. 现为华为云核心网络技术生态专家, 长期从事于5G及未来网络、5G+工业互联网等方面的技术研究和标准制定工作. 担任国家“十三五”重点研发计划“网络协同制造和智能工厂”课题负责人. 主导3GPP CT1 5G垂直行业相关标准项目2项, 贡献提案200余篇, 主导/参与5G+工业互联网方向国家标准(TC124)/行业标准(CCSA、国家能源局)/团体标准(AII)等10余项, 拥有国内外相关授权技术发明专利10余项.

E-mail: ace.chen@huawei.com



**孔令和** 男, 1983年4月出生于上海市. 现为上海交通大学计算机科学与工程系副系主任、教授、博导. 主要研究方向物联网. 发表学术论文150余篇, 获国际会议最佳论文奖11项. 主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金专项重点项目等科研项目.