

密级： 保密期限：

北京邮电大学

硕士学位论文



题目： 5G NR 系统共存干扰研究

学 号： _____

姓 名： _____

专 业： 信息与通信工程

导 师： _____

学 院： 信息与通信工程学院

2019 年 1 月 21 日

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解并同意北京邮电大学有关保留、使用学位论文的规定，即：北京邮电大学拥有以下关于学位论文的无偿使用权，具体包括：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文，有权允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，有权允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

5G NR 系统共存干扰研究

摘 要

5G (the 5th Generation wireless systems) 是在 4G LTE (the 4th Generation wireless systems long term evolution, 4G LTE) 之后的新一代移动通信系统。5G 通信系统建成后将具有高速率、超低时延、高可靠性以及低能耗等指标,以满足不同业务场景的专业化以及差异化需求。但是受限于频段资源之间的干扰,在实际组网之前需要考虑 5G 系统与其他系统之间的共存,为 5G 系统的组网与正式商用提供参考数据。

本文围绕 5G 新空口 (new radio, NR) 系统共存展开研究,具体分析了 5G NR 系统与 4G LTE 系统、5G NR 系统之间以及使用无人机辅助的 NR 蜂窝网络之间的系统共存。并利用蒙特卡罗仿真技术搭建仿真平台,针对不同场景给出系统共存时所需要的 ACIR (Adjacent Channel Interference Ratio) 隔离度。

在 5G NR 系统与 4G LTE 系统之间共存部分,研究的主要是 6GHz 以下的频段。通过分别分析两个系统的传播模型以及天线增益等,得到信号在传播过程中受到的耦合损耗,并结合基站与用户的发射功率和 ACIR 模型进一步得出上下行的 SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)。通过将 SINR 映射为吞吐量,得到不同 ACIR 隔离度下的吞吐量损失。借助搭建的仿真平台,可以得出 NR 系统与 LTE 系统共存时所需要的 ACIR 隔离度大概为 25dB。

在 5G NR 系统之间的共存部分,首先分析了 6GHz 以上的 NR 系统传播模型与低频段时的异同,然后着重研究波束赋形对系统性能的影响,得出波束赋形能够提高服务用户接收有用信号强度,并降低干扰信号强度,从而提高用户的 SINR,进而提高系统吞吐量的结论。同时,利用仿真平台对不同网络拓扑及场景下的 NR 系统进行仿真分析,得出各自所需要的 ACIR 隔离度,并分析了地理位置偏移及带内阻塞的仿真结果。

在利用无人机辅助的 NR 蜂窝网络之间的系统共存部分,主要研究无人机基站的部署以及两个系统的共存。首先利用二分 K 均值聚类算法部署无人机基站,该方法能够实现无人机的自动部署并有效提高系统吞吐量。然后研究了无人机小区系统与蜂窝宏小区网络之间的

系统共存, 得出在特定场景下两者共存时所需要的 ACIR 隔离度大概为 5dB 的结论。

关键词 5G 系统共存 ACIR 无人机基站

COEXISTENCE INTERFERENCE OF 5G NR SYSTEM

ABSTRACT

5G (the 5th Generation wireless systems) is a new generation wireless system after 4G LTE (the 4th Generation wireless systems long term evolution). In the future, 5G wireless system will have high speed, ultra-low latency, high reliability and low energy consumption to meet the specialized and differentiated requirements of multiple business scenarios. However, due to the interference between the frequency resources, the coexistence between the 5G wireless system and other systems needs to be considered before the actual networking, and provide reference data for the formal commercial deployment of the 5G wireless system.

This thesis focuses on the coexistence of 5G new radio (NR) system, and analyzes the system coexistence between 5G NR system and 4G LTE system, 5G NR systems, UAV-assisted (Unmanned Aerial Vehicle) cellular networks systems. Meanwhile, Monte Carlo simulation technology is used to build the simulator and the ACIR (Adjacent Channel Interference Ratio) isolation required for different scenarios is studied.

In the part of coexistence between the 5G NR system and the 4G LTE system, the research is mainly on the frequency below 6 GHz. By separately analyzing the propagation models and the antenna gain of the two systems, the coupling loss of the signal during the propagation is obtained, and the uplink and downlink SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) is further obtained by combining the base station and the user's transmit power and ACIR model. Through the mapping of SINR to throughput, throughput loss under different ACIR is obtained. With the simulator, it can be concluded that the ACIR required for the NR system to coexist with the LTE system is approximately 25dB.

In the part of coexistence between 5G NR systems, the similarities and differences between the NR system propagation model above 6 GHz and below 6 GHz are analyzed firstly. Then the influence of beamforming on system performance is studied. The beamforming can strengthen the

service signal and reduce the interference signal, thereby improving the SINR of the user and improving the throughput of the system. At the same time, the simulator is used to simulate and analyze the NR system in different network topologies and scenarios. The simulation results of geographical offset and in-band blocking are analyzed at last.

In the part of coexistence in the UAV-assisted cellular networks systems, it mainly studies the deployment of UAV base stations and the coexistence of two systems. The UAV base station is first deployed by the bisecting K-means clustering algorithm. This method can realize the automatic deployment of UAV base station and effectively improve the system throughput. Then the system coexistence between the drone small cell system and the cellular macro cell network system is studied. At last, the conclusion that the ACIR isolation required for coexistence in particular scenarios are about 5 dB is obtained.

KEY WORDS 5G, system coexistence, ACIR, UAV base station

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.2 论文主要内容与成果.....	2
第二章 NR 系统共存干扰原理分析.....	4
2.1 5G NR 系统介绍	4
2.2 共存干扰原理分析.....	6
2.2.1 同频干扰与邻频干扰.....	6
2.2.2 邻频泄漏功率比.....	7
2.3 5G NR 系统候选频段	8
第三章 NR 与 LTE 系统之间共存研究.....	10
3.1 背景概述.....	10
3.2 系统模型.....	11
3.2.1 6GHz 以下 NR 系统模型	11
3.2.2 LTE 系统模型.....	16
3.3 仿真平台搭建.....	18
3.4 仿真结果及分析.....	21
3.4.1 评估准则.....	21
3.4.2 仿真参数.....	22
3.4.3 结果分析.....	23
3.5 本章小结.....	28
第四章 NR 系统之间共存研究.....	29
4.1 背景概述.....	29
4.2 系统模型.....	29
4.3 AAS 天线模型对系统性能的影响.....	33
4.4 仿真结果及分析.....	36
4.4.1 仿真参数.....	36
4.4.2 结果分析.....	37
4.5 本章小结.....	42
第五章 无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络共存研究	44

5.1 背景概述.....	44
5.2 系统模型.....	45
5.2.1 网络拓扑模型.....	45
5.2.2 空对地信道模型.....	46
5.2.3 资源模型.....	47
5.3 基于二分 K 均值聚类算法的无人机部署方案.....	47
5.4 仿真结果及分析.....	52
5.4.1 仿真平台搭建.....	52
5.4.2 仿真参数.....	53
5.4.3 结果分析.....	53
5.5 本章小结.....	59
第六章 总结与展望	60
6.1 研究工作总结.....	60
6.2 下一步的研究计划.....	61
参考文献	62
缩略语	65
致谢	66
攻读学位期间发表或已录用的学术成果	67

第一章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

过去 10 年,移动数据流量以惊人的速度增长。据统计^[1],国内移动互联网接入流量从 2010 年的 50000 万 G 增长到 1000000 万 G 仅仅用了 6 年时间。放眼全球也是如此,预计到 2021 年,全球移动数据流量规模将是 2016 年的近 7 倍。数据流量的增长得益于第四代移动通信系统(the 4th Generation wireless systems, 4G)的全面部署,以及借助通信系统发展东风而迅速壮大的移动互联网产业。4G LTE(long term evolution)以及在此基础上的 LTE-A(long term evolution advanced)系统是人类目前最为成功的陆上商用通信系统,它的诞生直接推动了国内乃至全球的互联网产业的更新换代,产生了一家又一家估值数亿级的移动互联网公司。同时移动互联网技术的发展又反过来推动着通信系统的发展。一些新的应用场景的出现,让当今的 LTE 系统有点捉襟见肘。首先是人们对数据速率的要求大大增加。不少厂商意欲推出 4K 直播或者是虚拟现实之类的产品,用户要想在这些产品上获得良好的体现,需要数据速率至少 100Mbps。其次是需要更低的时延以及更高的可靠性。低时延高可靠性通常应用在车联网以及远程手术等特殊场景,这些场景需要通信系统来保障人们的生命安全。然后是设备的成本及能耗。随着社会的发展,能源问题越来越成为一个日益关注的问题,寻找低能耗的通信系统一直是人类的理想。

为此,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)在 2012 年开始组织全球业界展开第五代移动通信系统(the 5th Generation wireless systems, 5G)的技术趋势研究,并在同年成立了一个名为 IMT for 2020 的项目组,期望在 2020 年前完善并正式商用 5G 移动通信系统。第五代移动通信系统相比于第四代移动通信系统,在数据速率上将会实现 1000 倍的增长,同时也将会通过重新设计物理层和完善组网等方式降低网络时延并提高数据的可靠性。届时,5G 系统将会成为一个满足海量数据业务需求,并具有网络自感知、自调整等智能化能力,能够应对未来移动信息社会快速变化的通信系统。

但是在 5G 系统实际部署前,需要研究 5G 系统对现有系统的影响以及 5G 系统自身的影响。因为在组网过程中,各类系统可能会邻频或同频部署,因此会带来不可避免的系统间干扰,比如邻频干扰和同频干扰。如果在部署 5G 系统前不进行频率共存的研究,可能会导致 5G 系统对原有的 4G 系统造成过大的干扰,4G 系统反过来也会对 5G 系统造成很大的干扰,导致两个系统互相不能工作,

得不偿失。即使是在同一个区域部署相同的系统，根据所用的频率资源分配方案以及基站部署的位置等，对系统之间的共存也会产生不一样的影响。因此，第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）在对 5G 进行标准化过程中设立了专门的工作组对 5G 系统的共存进行研究。本文将基于 5G 标准化进程对 5G 系统的共存展开论述。

1.2 论文主要内容与成果

本论文的主要研究内容为 5G NR（new radio）系统共存及其相关问题。主要内容由三部分组成，分别是 NR 系统与 LTE 系统之间的共存、NR 系统之间的共存以及使用无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络共存，详细内容如下。

（1）NR 系统与 LTE 系统之间的共存

距离 5G 系统正式商用还有一段时间，而且 5G 系统正式商用前期必须要考虑新加入的系统对原有的 LTE 系统之间的影响，以避免新系统给旧系统或者是旧系统给新系统带来过大的干扰。现有的 5G 频段分配方案分为 6GHz 以下频段以及 6GHz 以上频段，本文在该部分主要研究 6GHz 以下的 NR 系统与 LTE 系统的共存。在研究过程中，首先分析了 NR 系统与 LTE 系统的系统模型，包括传播损耗模型、天线模型、上行传输功率控制模型以及 ACIR 模型。接着利用蒙特卡罗仿真技术搭建系统级仿真平台。最后使用仿真平台对 LTE 系统干扰 NR 系统、NR 系统干扰 LTE 系统进行仿真研究，并得出 NR 系统与 LTE 系统共存时下行干扰下行以及上行干扰上行两个干扰方向上所需要的 ACIR 保护间隔。

（2）NR 系统之间的共存

本文在该部分主要关注 6GHz 以上的 NR 系统之间的共存。6GHz 以上的 NR 系统主要使用 30GHz 左右的毫米波频段。在过去，毫米波频段相比于低频段有着比较差的传播特性，比如路径损耗大以及信号穿透障碍物的能力差等。为了弥补使用毫米波带来的传播损耗的增加，研究人员提出了多种方法，比如使用大规模 MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）。其中 AAS（Active Antenna System）天线就是一种多输入多输出的天线模型，AAS 天线带来的一项好处是提供了波束赋形增益，波束赋形能够增强接收信号强度以及降低干扰信号强度，从而提高接收的 SINR（Signal to Interference plus Noise Ratio）。因此本部分将会首先在 6GHz 以下 NR 系统传播模型的基础上介绍 6GHz 以上 NR 系统的传播模型。然后着重分析波束赋形对系统性能的影响。最后利用上一部分搭建的仿真平台对 3GPP 提出的城市宏小区，城市微小区以及室内热点三个场景进行系统级仿真，得出三个场景下行干扰下行以及上行干扰上行所需要的共存隔离度，并分析宏基

站中天线数目对 ACIR 隔离度的影响。

（3）无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络共存研究

为解决将来 NR 系统中可能出现的越来越多的无线设备产生的连接问题，有研究人员提出使用无人机作为基站用来拓展宏基站的服务区域及提高系统容量。在研究利用无人机基站辅助的 NR 宏蜂窝网络时，首先需要解决的问题便是无人机小区与现有的宏蜂窝小区之间的共存问题，也即是对于两个系统的小区之间的干扰管理问题。进行干扰管理的方法有很多，本文该部分将主要使用将无人机小区系统与宏蜂窝网络系统部署在不同频段，然后利用发射机与接收机对邻频信号的抑制来降低两个系统之间的干扰，实现共存。同时，将无人机基站部署到合适的位置也可以降低无人机基站对宏小区用户以及宏基站对无人机小区用户的干扰。因此本部分将首先研究无人机基站的部署方案，然后分析无人机小区系统与宏蜂窝网络系统共存时所需要的 ACIR 隔离度，最后研究无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络对系统性能的提升。

第二章 NR 系统共存干扰原理分析

2.1 5G NR 系统介绍

人们关注的 5G 指标主要有以下三项：数据速率、时延以及能耗成本。在这之中最引人注目的当然是 5G 的数据速率将会比 4G 提高 1000 倍。为了实现如此苛刻的要求，主要使用了三项关键技术：超密集异构网络、毫米波通信以及大规模 MIMO^[2]。

(1) 超密集异构网络

超密集网络 (Ultra-Dense Networks, UDN) 指的是在某个地理空间内基站比用户数目多的网络^[3]。超密集网络通常由小小区 (small cell) 及宏小区组成异构网络。其中小小区的基站又可以分为具有完备功能的基站以及宏基站的拓展接入点。功能完备的基站能够在较小的区域内实现整个协议栈的全部功能，只不过相较于宏基站，小基站的覆盖范围小功率低。而宏基站的拓展接入点主要用来拓展宏基站的覆盖范围，它仅执行物理层的全部或部分功能。现在较为常见的小基站主要有 picocell、femtocell 等，这些基站在 5G 中的 Urban Micro 和 Indoor Hotspot 等仿真场景均有使用。

相比于传统网络，超密网有其独特的优势。其中最重要的一点是超密网能够大大提高系统的吞吐量并降低能耗。这是由于小小区的基站一般位于用户附近，基站与用户之间的距离一般只有几米到十几米。同时，由于基站到用户距离足够小，导致信号能够高概率地通过 LOS (Line of Sight) 径传输。但此项技术的运用也受到一些问题的制约。首先，超密网环境中小小区的基站密度过大会带来严重的小区间干扰，导致吞吐量不升反降。这是超密网面临的主要问题，很多文献对其进行了相关研究，比如可以通过干扰管理方案降低干扰，或是 COMP (Coordinated Multiple Points Transmission/Reception) 提高系统吞吐量。另外，由于基站密度可能大于用户密度，所以有很多基站不活跃，因此关闭其中的不活跃基站可以减轻相邻小区的干扰。其次，需要创新的频率复用技术。在传统的蜂窝网络中，频率在小区簇中复用，在不同小区簇中重用相同的复用模式。该方案在 3G 和 4G 系统中受到了很大的限制，它们的频谱在每个小区中被复用，即是频率复用因子为 1。在超密网中需要研究新的频率复用概念。最后，在超密网中回传数据是一项不小的挑战。运营商可能难以为每个小小区保证理想的高速低时延的回传。此外，小小区的回传可能是其容量的瓶颈，其中回程容量将限制无线空中接口的容量。

（2）毫米波通信

现在的地面通信系统使用的频率大都在几百 MHz 到几 GHz 之间，对应的波长为几厘米到一米左右。随着通信系统的发展，这个频带现在已经变得非常拥挤，为了使用更大的带宽，就只能使用更高的频率。幸运的是，在 30-300 GHz 的毫米波范围内确实存在大量相对空闲的频谱，其中波长为 1-10 mm，在 20-30 GHz 范围内还有几 GHz 可能的频谱。毫米波频谱闲置的原因主要是它并不利于信号的传播。因为毫米波频段的信号传播损耗非常大，衍射和穿透障碍物的能力差以及容易受到大气和雨水的吸收。另外还受制于设备的精度和成本及高频带来的相位噪声。但随着半导体技术到的成熟，设备的成本和功耗在不断下降而精度在不断上升，使得毫米波技术得以实现。将通信系统的频率搬移到毫米波频段可以使得能够利用的带宽提高，例如在 30GHz 的频段附近，系统带宽可以高达 200MHz 到 400MHz，这将是 LTE 系统的 10 倍。系统带宽变大意味着在相同时间内可以传输更多的数据，或者说传输同样多的数据花费的时间更短了。子帧持续时间缩短，并减小了端到端时延。但是带宽过大带来的代价是噪声的变大，同时也会影响做 IFFT 变换的复杂度。这便需要 5G 系统的物理层设计的支持。

（3）大规模 MIMO

MIMO 技术指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线，使信号通过发射端与接收端的多个天线传送和接收，从而改善通信质量。不同天线发送相同信号可以获得发射分集增益，不同天线发送不同信号可以获得空间复用增益，这两种方法都可以用来提高系统吞吐量。MIMO 技术在 LTE 系统中就已经有充分的研究与实现，但是在 LTE 系统中，MIMO 天线数量较少，多为 4 个或者 8 个，天线数量少就限制了 LTE 网络的通信容量。5G 在 LTE 研究的基础上，提出了大规模 MIMO (massive MIMO) 的概念，MIMO 天线数量可以是成百上千个，而理论上的通信容量则是无限的。相比于传统的 MIMO，大规模 MIMO 的优势主要有：(a) 具有很大的天线阵列增益。(b) 天线的空间分辨率明显，可以充分利用空间资源，在垂直及水平维度上形成较强的波束。(c) 当发射端天线数量远远大于接收端天线数量时，各个用户的接收信道接近于正交。(d) 大规模 MIMO 系统具有良好的鲁棒性，单个天线单元的受损不会给整个系统的性能带来明显的影响。(e) 与毫米波技术相辅相成，毫米波需要大规模 MIMO 去弥补高频率带来的传播损耗提高，大规模 MIMO 需要毫米波波长较短使得天线容易集成的特点。但同时大规模 MIMO 也带来了一些问题，比如天线数目的增加引起信号处理复杂度的增加，再比如会带来导频污染的问题，因为在相干时间内相互正交的导频序列有限，天线数目的增加会导致用户使用的导频不再正交，影响系统的性能。

此外，MIMO 技术的实现离不开预编码技术。在 MIMO 系统中，不同天线之间的信道存在相关性，这种相关性会降低 MIMO 系统的性能，因此在接收端需要进行均衡来解除信道之间的相关性。为了降低接收端做均衡时的复杂度，通常会在发射端进行预编码。简单来说，预编码就是根据接收端上报的信道状态信息对数据进行预处理，使得发送信号匹配该发射端到接收端这段无线信道的特性而产生一个较强增益，而对不匹配的信号进行削弱。预编码技术和下文提到的波束赋形技术实际上是对同一种实现的不同描述。

2.2 共存干扰原理分析

2.2.1 同频干扰与邻频干扰

同频干扰是指使用相同频率资源的小区之间产生的干扰。邻频干扰指使用相邻或相近频率资源的小区之间产生的干扰，邻频干扰的产生是由于调频信号含有无穷多个边频分量，当其中某些边频分量落入邻道接收机的通带内，就会造成邻频干扰。在不同制式的通信系统下同频干扰与邻频干扰额表现形式不太一样。2G GSM 系统使用 FDMA，为了提高频率利用率，增加系统容量，常常使用频率复用技术。频率复用是指在相隔一定距离后，在给定的覆盖区域内，存在着使用同一组频率的小区，这些小区称为同频小区。

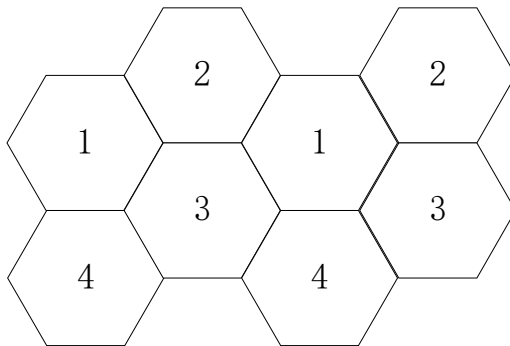


图 2-1 复用因子为 4 的小区簇

如图 2-1 所示，图中频率复用因子 $N=4$ ，含有数字 1~4 的小区称为一个小区簇，在一个小区簇内使用不同的频率，而在不同的小区簇之间使用相同的频率。在这种场景下，含有数字 4 的小区对另一个含有数字 4 的小区产生同频干扰，而含有数字 1~3 的小区可能对含有数字 4 的小区产生邻频干扰。频率复用因子越大则产生的同频干扰越小。

但对于 3G 往后的通信系统来说，同一个通信系统内所有用户共享一个无线频率，即若干个小区内的基站和用户都工作在相同频率上^[4]。因此任一小区的用户都会受到相邻小区基站的同频干扰，任一小区的基站也会受到相邻小区用户的干扰。此时若在同一地理空间内部署另一个使用的无线频率资源相邻或相近的通

信系统，基站和用户受到的干扰在同频干扰的基础上仍需要加上邻频干扰，如图 2-2 所示。将用户 a 作为研究对象，则蓝色实线为用户 a 的服务信号，蓝色虚线为相邻小区的同频干扰，红色实线和红色虚线均为邻频干扰。为了研究被干扰系统中同频干扰与邻频干扰情况，本文使用 SINR 指标作为衡量标准。SINR 即是接收信号功率与接收干扰功率加上噪声的比值，SINR 越大说明信道质量越好，解调解码后的误码率越低。被干扰系统中某用户的 SINR 可以通过下式来描述

$$SINR = \frac{P_m}{\sum_{i \in M_1, i \neq m} P_i + \rho \cdot \sum_{j \in M_2} P_j + N} \quad (2-1)$$

式中， M_1 表示被干扰系统的基站集， M_2 表示干扰系统的基站集； P_m 表示接收到的服务信号功率， $m \in M_1$ ； P_i 表示接收到的同频干扰功率， P_j 表示接收到的邻频干扰功率， N 表示噪声功率； ρ 表示邻频泄漏功率比，这个变量将在下一节进行研究。该表达式主要用于下行干扰下行，但可以轻易推广到上行干扰上行，下行干扰上行及上行干扰下行等不同干扰方向。

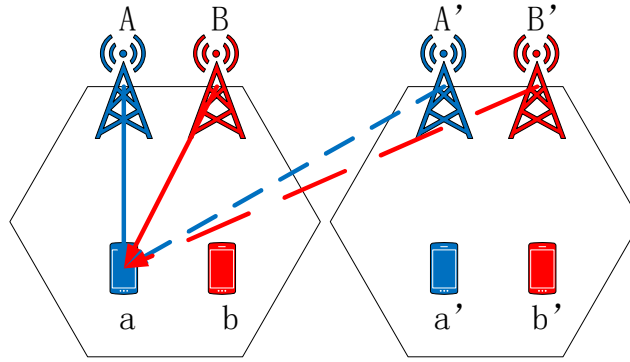


图 2-2 被干扰系统用户接收到的同频及邻频干扰

2.2.2 邻频泄漏功率比

上一节提到的邻频泄漏功率比（Adjacent Channel Interference Ratio, ACIR）是一个衡量发射机与接收机性能的指标。邻频信号产生干扰主要是由发射机与接收机的非理想特性造成的。发射机在发射有用信号时，由于器件本身的非线性和滤波器的带外抑制能力有限，会在它的工作频带外产生杂散、谐波、互调等无用信号，对带外系统形成干扰。另外，接收机在接收有用信号的同时，落入信道内的干扰信号可能会导致接收机灵敏度的损失，落入接收带宽内的干扰信号可能会引起带内阻塞。理想来说，发射机和接收机滤波器理论上都应该是矩形的，但实际上滤波器是一个升余弦脉冲，会产生一个带外辐射。

发射机的性能优劣可用相邻信道泄漏比（Adjacent Channel Leakage Power Ratio, ACLR）来衡量，定义为发射功率与发射功率落入相邻信道上的功率之比，如式(2-2)所示。 $P_{main\ channel}$ 表示主信道功率， $P_{adjacent\ channel}$ 表示落入相邻信道的功率。

当发射功率一定时, ACLR 越小, 说明落入相邻信道的功率越大; ACLR 越大, 说明主信道功率比泄漏到邻信道的功率越大, 对相邻信道的影响越小。

$$ACLR = \frac{P_{main\ channel}}{P_{adjacent\ channel}} \quad (2-2)$$

接收机的性能优劣可用相邻信道选择性 (Adjacent Channel Selectivity, ACS) 来衡量, 定义为接收机滤波器对来自相邻信道功率的衰减与主信道上功率的衰减的比值, 如式(2-3)所示。 $\alpha_{adjacent\ channel}$ 表示对相邻信道功率的衰减, $\alpha_{main\ channel}$ 表示主信道的衰减。ACS 越小, 说明对相邻信道功率的抑制越差; ACS 越大, 说明对相邻信道功率的抑制越好, 抗干扰能力越强。

$$ACS = \frac{\alpha_{adjacent\ channel}}{\alpha_{main\ channel}} \quad (2-3)$$

ACIR 则是发射机与接收机性能的综合表现, 如式(2-4)所示。ACLR 和 ACS 越大, 则 ACIR 越大, 反之亦然。在实际通信系统中, 较低的 ACIR 值可以降低发射机与接收机对硬件性能的要求, 但是会给被干扰系统的用户带来较大的邻频干扰, 从而降低了被干扰系统的吞吐量; 较高的 ACIR 值虽然会使被干扰系统获得较好的性能, 但是会导致发射机与接收机的成本增大, 而且后文会分析到, 系统性能先随着 ACIR 的提高而提高但而后趋于平稳。因此无节制地提高 ACIR 要求是没必要的, 本文的一个重要任务便是找到合适的 ACIR 值, 使得两个通信系统能够在同一地理环境中实现共存。

$$\frac{1}{ACIR} = \frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS} \quad (2-4)$$

2.3 5G NR 系统候选频段

5G 系统的候选频段跨度比较大, 因为不同的频率适用于不同的应用场景, 如表 2-1 所示。表 2-2 是可能与 5G 系统产生共存干扰的现有业务。

表 2-1 5G 候选频段^[5]

海量机器通信场景	470MHz~698MHz(WRC-15) 1427MHz~1518MHz(WRC-15)
高可靠低时延场景	3300MHz~3400MHz(WRC-15) 3600MHz~3700MHz(WRC-15) 4800MHz~4990MHz(WRC-15)
增强移动宽带场景	24.25GHz~86GHz

表 2-2 部分中、高频段现有业务^[6]

频段	现有业务
3.3GHz~3.4GHz	雷达

4.4GHz~4.5GHz 4.8GHz~4.99GHz	固定微波 无线电导航 航空移动
24.25GHz ~ 24.45 GHz 24.45 GHz ~ 24.65 GHz 24.65 GHz ~ 24.75 GHz 24.75GHz ~ 25.25 GHz 25.25 GHz ~ 25.5 GHz 25.5 GHz ~ 27 GHz 27GHz ~ 27.5 GHz	固定微波 无线电定位 卫星间 卫星与地面
27.5GHz ~ 28.5GHz 28.5GHz ~ 29.1GHz 29.1GHz ~ 29.5GHz	固定微波 卫星与地面
37GHz ~ 40.5GHz 40.5GHz ~ 42.5GHz 42.5GHz ~ 43.5GHz	固定微波 卫星与地面

第三章 NR 与 LTE 系统之间共存研究

3.1 背景概述

LTE 是第四代移动通信系统，也是现在广泛使用的移动通信系统。LTE 的第一版在 3GPP 规范系列的 Release 8 中完全呈现，并经历了 6 个版本的完善成为了一个非常成熟的通信系统。5G NR 系统作为一个新的通信系统，有必要研究它与 4G LTE 系统之间的影响，以避免混合组网时新系统给旧系统或者是旧系统给新系统带来过大的干扰。

对一个新的通信系统与旧通信系统共存的研究，在通信发展的长河中从未缺少。在 3G 时期，就有学者对 WCDMA 与 TD-SCDMA、CDMA2000 以及 GSM 系统之间的共存进行了研究^[7]。作者在该文章中指出 WCDMA 与 CDMA2000 之间的干扰较小，共存要求最低；WCDMA 与 GSM 或 TD-SCDMA 之间干扰较大，需要对信号提供额外衰减要求或增大基站间地理偏置。对于 LTE 系统与 3G、2G 以及 LTE 系统之间的共存，文献[8][9]做了较为详细的研究。其中[8]使用确定性分析的方法研究系统共存，并提到了使用智能天线能降低共存要求，但是没有做详细的仿真验证。另外也有学者对 LTE 系统与卫星通信系统^[10]以及 LTE 系统在非授权频段中与 WiFi 的共存^[11]进行了研究。进入到 5G 时代，学者们的研究成果也不断涌现。文献[12]分析了 5G 与 4G 系统共存时所面临的问题，而文献[13][14]主要研究了 5G 中的 NB-IOT 与 4G 系统及以往系统之间的共存。文献[15]研究了 5G 与 4G 在上行方向上的共存，但主要关注的是物理层的设计方面。文献[16]从数值分析与系统仿真两方面研究了具有 3D-MIMO 天线的通信系统对系统共存的影响。

总的来说，研究通信系统间干扰共存的方法有两种，一是确定性分析法，二是系统仿真法。前者主要选取受干扰最大的链路，通过数值计算得到不同系统共存时所需要的隔离度。该方法简单易行，但由于选取的是最差的链路，得到的结果比较悲观，与实际情况差距较大。系统仿真法则需要搭建仿真平台，模拟基站与用户的工作工程，利用计算机通过复杂的计算得到不同系统共存时的统计数据。该方法能够相对精确地得到与实际情况符合的数据，因此本文剩下内容的主要研究方法为系统仿真法。

本章首先介绍了 NR 系统与 LTE 系统的系统模型，包括传播损耗模型、天线模型、上行传输功率控制模型以及 ACIR 模型。接着利用蒙特卡罗仿真技术搭建系统级仿真平台。最后使用仿真平台对 LTE 系统干扰 NR 系统、NR 系统干扰

LTE 系统进行仿真研究,并得出 NR 系统与 LTE 系统共存时所需要的保护间隔。

3.2 系统模型

NR 系统目前有两种频段使用方案,一种使用 6GHz 以下频段(又称 FR1 频段),一种使用 6GHz 以上频段(又称 FR2 频段)。其中 6GHz 以下频段与 LTE 所用的频段有可能产生邻频干扰,因此本章主要研究 6GHz 以下的 NR 系统与 LTE 系统的共存。

3.2.1 6GHz 以下 NR 系统模型

(1) 传播损耗模型

传播损耗指的是信号从端到端所经历过所有衰落,通常表示如下:

$$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in} + N(0, \sigma_p^2) \quad (3-1)$$

其中 PL_b 表示室外的路径损耗, PL_{tw} 表示穿透损耗, PL_{in} 表示室内路径损耗, σ_p 表示穿透损耗的标准差。对于室外用户来说只有室外的路径损耗而没有室内路径损耗,对室内用户来说既有室外路径损耗也有室内的路径损耗。

路径损耗指的是信号在空间中随着距离的增加而产生的损耗。6GHz 以下 NR 系统的路径损耗模型采用 ITU-R M.2412-0^[17]中 Model A 的路径损耗模型,该模型分为两个部分,一个是 LOS 径的损耗模型,一个是 NLOS (Non Line of Sight) 径的损耗模型,具体数学模型如下:

LOS 径	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$
NLOS 径	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ $PL'_{UMa-NLOS} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(20.0) + 7.5 \log_{10}(20.0) - (24.37 - 3.7(20.0/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS})$ $+ (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(17.625))^2 - 4.97)$ $- 0.6(h_{UT} - 1.5)$
LOS 概率	$P_{LOS} = \left(\min\left(\frac{18}{d_{2D}}, 1\right) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-d_{2D}}{63.0}\right)\right) + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{63.0}\right) \right) \cdot (1 + C(d_{2D}, h_{UT}))$ $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0 & h_{UT} < 13\text{m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} g(d_{2D}) & 13\text{m} \leq h_{UT} \leq 23\text{m} \end{cases}$

	$g(d_{2D}) = \begin{cases} 0 & d_{2D} \leq 18\text{m} \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100} \right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2D}}{150} \right) & 18\text{m} < d_{2D} \end{cases}$
--	--

(3-2)

其中, d'_{BP} 是距离的转折点, $d'_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UT}f_c/c$; h_{BS} 和 h_{UT} 分别是基站和用户的实际天线高度, 而 h'_{BS} 和 h'_{UT} 是基站和用户的有效天线高度, 可由下式计算得到: $h'_{BS} = h_{BS} - h_E$, $h'_{UT} = h_{UT} - h_E$; 有效天线高度 h_E 以概率 $1/(1+C(d_{2D}, h_{UT}))$ 取 1, 剩下的 h_E 等概率地从 $(12, 15, \dots, (h'_{UT}-1.5))$ 取; f_c 是载频的中心频率, 单位为 Hz; d_{2D} 是基站与用户之间二维平面的距离, d_{3D} 是基站与用户之间包括高度差的距离, 计算方式如式(3-3)所示, 距离的参数说明如图 3-1 所示。

$$d_{3D} = d_{3D-out} + d_{3D-in} = \sqrt{(d_{2D-out} + d_{2D-in})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2} \quad (3-3)$$

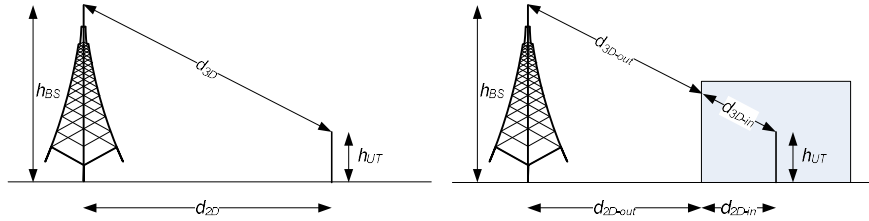


图 3-1 距离参数示意图

对室内用户来说, 除了有室外路径损耗外还存在一个穿透损耗。穿透损耗指的是信号穿越阻挡物时所经历的损耗。对于 6GHz 以下的 NR 系统来说穿透损耗 $PL_{fw} = 20\text{dB}$, 而信号在室内经历的损耗 $PL_{in} = 0.5d_{2D-in}$ 。

(2) 天线模型

在 5G NR 系统中为了提高小区吞吐量将使用 3GPP TR 37.842^[18]提出的 AAS 天线技术。AAS 技术在 3GPP TSG RAN 第 53 次会议上通过, 该技术将射频组件与天线阵子整合在了一起^[19]。因此, 每个天线阵子可以通过数字接口独立地控制, 从而动态地调整信号的幅度和相位。与传统的天线相比, 使用 3DAAS 技术的可以更方便灵活地在水平和垂直方向上产生精细的波束。

由于 AAS 技术可以方便地调整阵子上信号的相位和幅度, 所以可以通过阵子间的协作实现波束赋形。波束赋形技术简单来说就是利用电磁波在远场处产生的干涉现象。在远场的某个地方, 电磁波同相叠加导致振幅增强, 而在另一个地方电磁波反相叠加导致振幅减小。所以可以利用波束赋形增强被服务用户的信号而减弱被干扰用户的信号, 进而改善用户对接收信号的 SINR, 提高小区吞吐量。相比于传统 MIMO, 大规模 MIMO 不仅需要在水平方向上实现波束赋形, 还需要在垂直方向上实现波束赋形。

波束赋形方案有两种, 一种是 UE-specific 波束赋形, 该方案基于每个用户调整波束方向, 使得波束峰值指向服务用户。这种方案可以使接收信号功率最大化,

但是它对垂直和水平方向都需要更窄的波束宽度,以便减轻对相邻用户的干扰泄漏。第二种是 UE group-specific 波束赋形,在该方案中,一组用户可能共用同一个波束。具体来说,基站通过向小区用户广播 CSI (Channel State Information) 告知用户它所拥有的波束集,然后用户估计信道信息并从波束集中选择一个能使接收信号最好的波束上报,最后基站将通过该波束传输数据信息。相比于第一种方案,第二种方案可能会导致非服务用户的干扰变大,因为服务用户和非服务用户位置可能相邻,而他们刚好共用同一个波束,这就导致了非服务用户收到的干扰信号变大。这个干扰可以通过在用户端也使用波束赋形减轻。若无额外说明本文将使用 UE-specific 波束赋形方案。

AAS 天线由 $M_g \times N_g$ 个天线面板组成,它们在垂直及水平方向上的间隔分别为 $d_{g,H}$ 和 $d_{g,V}$ 。而一个天线面板上面在垂直方向和水平方向上以 d_H 和 d_V 的间隔分布着 $M \times N$ 个天线阵子,如下图 3-2 所示。

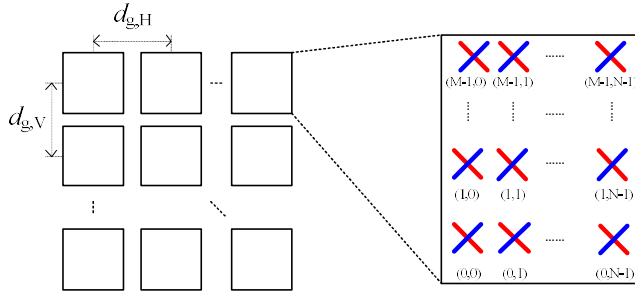


图 3-2 天线面板模型

AAS 天线模型由三部分组成,一个是天线阵子辐射方向图 (array element pattern),二是阵列系数 (array factor),最后是系统中使用的信号^[18]。其中天线阵子辐射方向图又由垂直方向增益以及水平方向增益组成。

为描述天线模型中使用的角度,本文将使用 GCS (Global Coordinate System) 及 LCS (Local Coordinate System) 坐标系^[17]。如图 3-3 所示, GCS 坐标系也即笛卡尔坐标系,在地图上看, x 轴指向正南方, y 轴指向正东方, z 轴垂直于地面指向天上。 φ_{GCS} 表示发射端与接收端在水平方向上所成直线 (也即信号传播方向) 与 x 轴正方向的夹角,范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$; θ_{GCS} 表示天顶角,范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, $\theta_{GCS} = 0^\circ$ 指向 z 轴正方向, $\theta_{GCS} = 90^\circ$ 指向水平方向。以基站或用户为原点,天线视轴 (antenna boresight) 方向为 x 轴又可以定义 LCS 坐标系,如图 3-4 所示。 φ 为信号传播方向在水平面上偏离天线视轴的角度,范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$, 当 φ 为 0 时意味着发射端的天线视轴正好指向接收端; LCS 坐标系下的天顶角 $\theta = \theta_{GCS}$, 为信号在垂直面上的传播角度,因为表达的意思与 GCS 中的一样,所以在图 3-4 中不再画出。

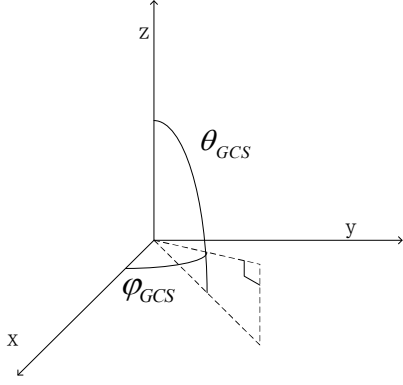


图 3-3 GCS 坐标系

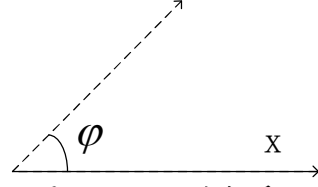


图 3-4 LCS 坐标系

➤ 天线阵子辐射方向图

水平方向增益表示为

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right\} \quad (3-4)$$

φ_{3dB} 表示水平方向上的半功率带宽， A_m 表示水平天线阵子的背向增益。

垂直方向增益表示为

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\theta - 90^\circ}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right\} \quad (3-5)$$

θ_{3dB} 表示垂直方向上的半功率带宽， SLA_v 表示垂直天线阵子的背向增益。

总的天线阵子辐射方向图增益如下，其中 $G_{E,max}$ 为最大天线阵子增益。

$$A_E(\varphi, \theta) = G_{E,max} - \min \left\{ -[A_{E,H}(\varphi) + A_{E,V}(\theta)], A_m \right\} \quad (3-6)$$

➤ 复合天线阵列辐射方向图

复合天线阵列辐射方向图 (composite array radiation pattern) 由天线阵子辐射方向图和阵列系数构成。复合天线阵列辐射方向图的增益也可以称作波束赋形增益，表示波束的主瓣与旁波瓣产生的增益。假设只产生一个波束，则复合天线阵列辐射方向图产生的增益可通过下式进行计算：

$$A_A(\varphi, \theta) = A_E(\varphi, \theta) + 10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{n,m} \cdot v_{n,m} \right|^2 \right) \quad (3-7)$$

$v_{n,m}$ 和 $w_{n,m}$ 为阵列系数。其中 $v_{n,m}$ 表示位置矢量，由下式算得

$$v_{n,m} = \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \cos(\theta) + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \sin(\varphi) \right) \right) \quad (3-8)$$

上式中的 λ 表示波长。

$w_{n,m}$ 表示权重因子，可由下式计算

$$w_{n,m} = \frac{1}{\sqrt{M \cdot N}} \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \sin(\theta_{etilt}) - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos(\theta_{etilt}) \sin(\varphi_{escan}) \right) \right)$$

(3-9)

其中 φ_{scan} 表示在 LCS 坐标系下波束指向的水平方位角, θ_{etilt} 表示在 LCS 坐标系下波束指向的下倾角, 下倾角可以通过加 90 度转变成天顶角。

由上式(3-6)可以推导出, 当信号传播方向与天线视轴方向相同也即 $\varphi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ 时, 天线阵子辐射方向图能取得最大值 $G_{E,max}$ 。在此时若波束正好对准用户, 也即信号传播方向与波束方向一致时, 复合天线阵列辐射方向图增益最大。复合天线阵列辐射方向图增益的大小同时也与阵子数目的大小有关, 更详细的研究在下一章进行。图 3-5 给出阵元数目 4×4 , $G_{E,max} = 0\text{dBi}$ 时的复合天线阵列辐射方向图。图中 $\varphi_{scan} = 0^\circ$, $\theta_{etilt} = 0^\circ$, $A_m = SLA_V = 30$ 。因此图中在 $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$ 时, 复合天线阵列辐射方向图的增益能取得最大值。

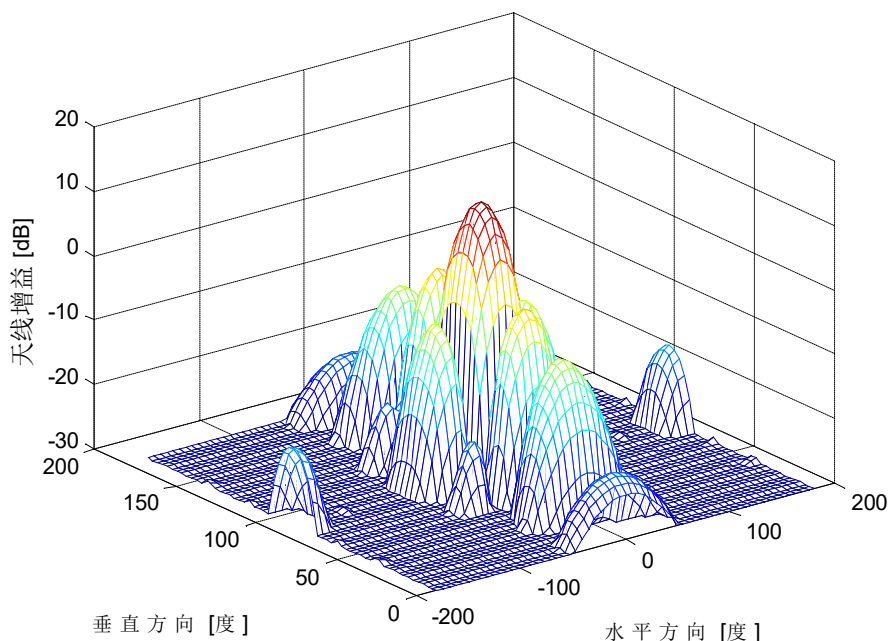


图 3-5 天线数目 4×4 时天线阵列辐射方向图

(3) 上行传输功率控制模型

5G NR 系统下行链路不使用功率控制, 当同一时刻只服务一个用户时, 将功率与频带资源全部分配给一个用户。

5G NR 系统上行链路使用功率控制, 功率控制模型采用 3GPP TR 36.942^[20] 中的功率控制模型。该功率控制模型的主要思想是信道质量好的用户不使用满功率发送信号而是按照一定的比率降低发射功率, 但是也存在最低发射功率值。信道质量差的用户满功率发送信号, 以使得接收端收到的信号强度尽量大。功率控制对蜂窝通信系统来说相当重要。假设不使用功率控制, 信道质量好的用户和信道质量差的用户都使用满功率发送信号, 这就导致当信道质量好的用户作为干扰用户时, 基站接收到的来自信道质量差的用户 SINR 过小无法正确解调解码造

成误码率过高的现象，该现象称为远近效应。当使用了功率控制后，所有用户的发送信号到达基站时它们的功率大致相当，既能符合通信要求，同时又避免对其他用户信号产生不必要的干扰，使得系统吞吐量最大化。该功率控制模型的数学描述如下：

$$P_t = P_{\max} \cdot \min \left\{ 1, \min \left[\frac{P_{\min}}{P_{\max}}, \left(\frac{CL}{CL_{x-ile}} \right)^\gamma \right] \right\} \quad (3-10)$$

其中， P_t 为实际发送的功率， P_{\max} 为用户最大的发送功率， P_{\min} 为用户最小的发送功率， $\frac{P_{\min}}{P_{\max}}$ 为最小功率与最大功率比，用来防止信道条件好的用户以非常低的功率发射； CL 为用户到基站这条路径上的耦合损耗， CL_{x-ile} 指耦合损耗值最高的前 $x\%$ 用户以 P_{\max} 的功率发送信号，其余用户将按照比率 $\left(\frac{CL}{CL_{x-ile}} \right)^\gamma$ 降低发射功率； γ 是用于平衡信道质量好的用户和信道质量差得用户的参数，它的取值范围是 0 到 1。3GPP TR 36.942 中定义了两套功控参数，在 10MHz 带宽下分别是 set1: $CL_{x-ile} = 112\text{dB}$ ， $\gamma=1$ ；set2: $CL_{x-ile} = 129\text{dB}$ ， $\gamma=2$ 。本文若不特殊说明，均采用第一套功控参数。

(4) ACIR 模型

在 5G NR 系统中，无论上行还是下行链路，ACIR 模型相同。该模型为平坦的 ACIR 模型，所有 RB 均使用相同的 ACIR 值来计算系统间干扰。

3.2.2 LTE 系统模型

(1) 传播损耗模型

根据 3GPP TR 36.942 中对 LTE 的传播模型描述，LTE 系统中接收功率可由下式计算：

$$RX_{PWR} = TX_{PWR} - \max(PL - G_{TX} - G_{RX}, MCL) \quad (3-11)$$

其中， RX_{PWR} 是接收信号功率， TX_{PWR} 是发射信号功率， PL 是路径损耗， G_{TX} 是发送端天线增益， G_{RX} 是接收端天线增益， MCL 是最小的耦合损耗值。

对于城市宏小区模型， PL 的数学模型如下

$$PL = 40 \cdot (1 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hb}) \cdot \log_{10}(R) - 18 \cdot \log_{10}(D_{hb}) + 21 \cdot \log_{10}(f) + 80\text{dB} \quad (3-12)$$

这里 D_{hb} 为基站天线的高度， f 为信号的中心频率，单位 MHz， R 为基站与用户之间的距离，单位 km。

除了基础的路径损耗外，还需要考虑穿透损耗，但这里为了简单起见，使用与上一节 6GHz 以下 NR 系统相同的穿透损耗模型。

(2) 天线模型

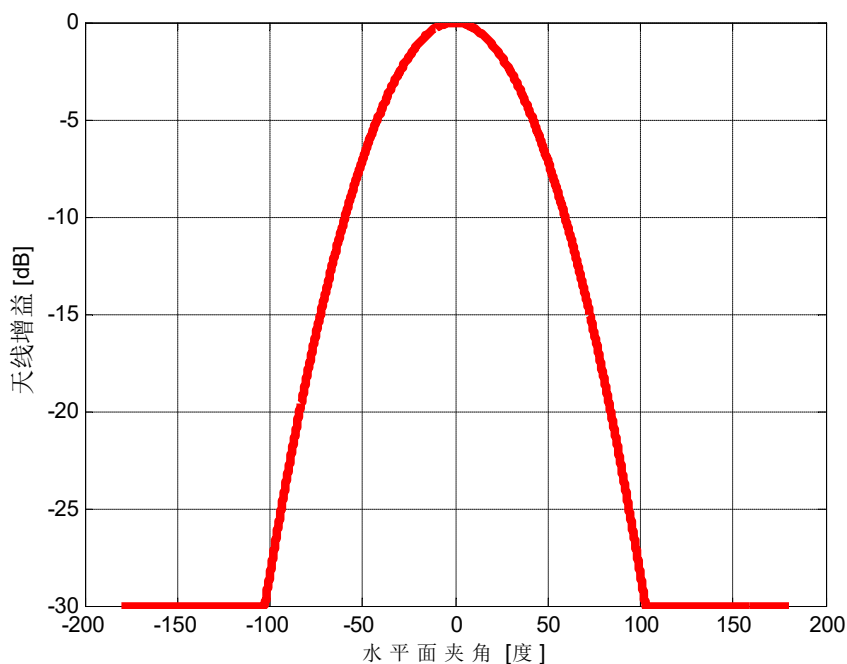


图 3-6 二维天线辐射方向图

以现有的 LTE 基站的天线结构，只能在水平维实现对传输过程的优化，没能充分利用信号在垂直维度上的自由度。因此本文中的 LTE 天线模型使用 3GPP TR 36.942 中的二维天线模型，天线增益可以根据下式(3-13)算出：

$$A(\varphi) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right\} \quad (3-13)$$

其中 φ 表示信号传播方向与天线视轴方向的夹角，取值范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$ ， φ_{3dB} 表示水平方向上的半功率带宽， A_m 表示水平天线阵子的背向增益，也就是水平面上的最大天线增益。假设 $\varphi_{3dB}=65^\circ$ ， $A_m=30\text{dB}$ ，可以得到该模型的天线辐射方向图，如图 3-6 所示。由图可得，当信号传播方向与天线视轴方向重叠，也即 $\varphi=0^\circ$ 时，天线增益能取到最大值。

(3) 上行传输功率控制模型

LTE 中的上行传输功率控制模型与 6GHz 以下的 NR 系统的上行传输功率控制模型一样，在此不再赘述。

(4) ACIR 模型

据 3GPP TR 36.942 中的描述，LTE 系统中下行链路使用平坦的 ACIR 模型，即所有 RB 均使用相同的 ACIR 值来计算系统间干扰。对于上行链路，ACIR 值主要由用户端的 ACLR 值来确定。与平坦的 ACIR 模型不同，这里的 ACLR 模型是阶梯状的，具体取值情况见表 3-1。

表 3-1 ACLR 取值

	与干扰 RBs 相邻	与干扰 RBs 不相邻
ACLR [dB]	$30+X$ (W 个 RBs 带宽内)	$43+X$ (W 个 RBs 带宽外)
X 为仿真步长, $X = \dots -10, -5, 0, 5, 10 \dots$ dB		

W 为干扰系统中每个用户使用的 RB 数目。以 20MHz 系统干扰 10MHz 系统为例, 20MHz 系统中每个用户上行传输时使用 16 个 RB, 10MHz 系统中每个用户上行传输时使用 8 个 RB, 则 20MHz 系统对 10MHz 系统的干扰情况如图 3-7 所示。在被干扰系统中, UE1 与 UE2 所使用的 RB 刚好与干扰系统中某个 UE 使用的 RB 相邻, UE3 使用的 RB 距离干扰 UE 使用的 RB 大于 16 个 RB 带宽。因此在被干扰系统中, 只有 UE1 与 UE2 的 ACLR 值取 $30+X$, UE3 的 ACLR 取值为 $43+X$ 。当干扰系统与被干扰系统使用的带宽相等时, 最多只有一个 UE 的 ACLR 值取 $30+X$, 其余 UE 的 ACLR 值取 $43+X$ 。

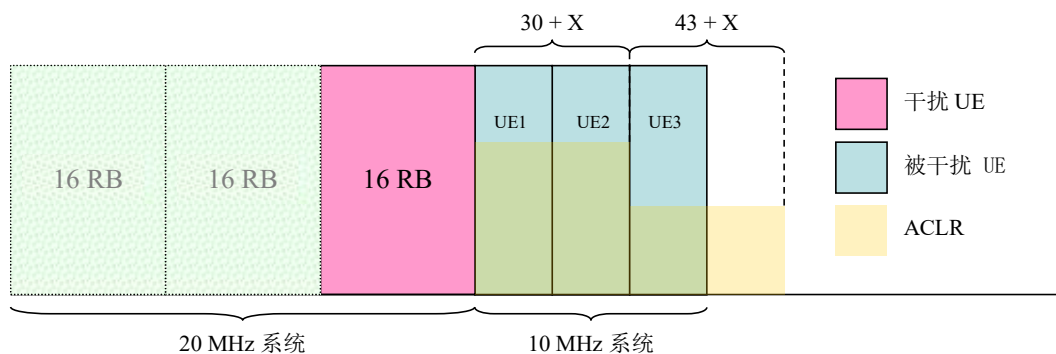


图 3-7 20MHz 系统干扰 10MHz 系统 ACLR 分布情况

3.3 仿真平台搭建

本文将借助蒙特卡洛仿真法搭建系统级仿真平台。在蜂窝网络系统中, 用户出现在小区中的位置是不确定的, 有可能聚集在某个区域, 也有可能平均分布在小区中。更重要的是, 信号在空间传播中的规律并不是仅仅使用上文提到的公式就能完美模拟的。在这种情况下, 随着计算机性能的发展, 可以通过在空间中大量地撒点取模拟出基站与用户的位置关系, 但是信号的不规律性是现在计算机所不能完美模拟的。但是当求解的问题是一个概率时, 比如说需要系统用户接收到的 SINR 的 CDF, 我们可以先求这个事件出现的频率或者这个事件的平均值作为这个问题的解。这就是蒙特卡洛仿真法的基本思想。蒙特卡罗仿真是一种通过设定随机过程, 计算估计量和统计量, 进而研究问题的分布特征的方法。详细来说, 如果一个系统中某个变量难以建立精确的数学模型或者是模型太复杂

不能应用,可以使用随机模拟法近似计算出该变量的预计值,随着模拟次数的增多,它的预计精度也逐步提高。因此,要得到一个问题的—般性规律需要使用高容量高速率的计算机进行多次仿真。

在将蒙特卡洛仿真法具体应用于系统共存平台搭建时需要预先明确系统中元素的数学模型以及它们涉及到的随机过程。如上文提到的穿透损耗,穿透损耗值由一个基础损耗及一个服从均值为 0,方差为 σ_p 的正态分布的随机过程构成。除此之外,影响链路耦合损耗的因素还有阴影衰落,阴影衰落服从对数正态分布,具体参数在不同场景下有不同要求。对于基站与用户,基站位置通常是固定的,而用户一般在基站的附近范围或特定区域内服从均匀分布。在一次仿真过程中,主要模拟基站与用户的工作流程,比如基站调度与小区接入,同时也需要根据上述提到的数学模型与随机过程模拟信号在空间环境中的衰落和增益。一次仿真过程在蒙特卡洛仿真法又称为一次快照(snapshot),通常情况下为了得到较为准确的模拟,需要进行多次快照。因为快照次数越多,越有可能模拟出实际系统中用户真实的位置以及信号经历的真实衰落。但是快照数目越多也需要耗费越多的时间与计算机资源,所以需要权衡两者的关系,选择合适的快照次数。同时我们也需要记录每次快照得到的结果,在最后的时候将每次快照得到的数据进行统计与处理。

系统共存平台的搭建与完整的系统级仿真平台的搭建略微不同。系统共存平台更为关注两个系统之间的大尺度衰落的影响,同时为了简单起见也没有链路级到系统级的映射而是使用香农公式作为 SINR 到吞吐量的映射。本文搭建的仿真平台工作流程如下图 3-8 所示。

其中,参数模块分为输入参数以及输出参数两部分。输入参数模块是用来实现系统的参数的配置,各个实体的参数的配置以及对各个协议内部参数进行配置。输出参数模块用于对结果进行图形化呈现,或者以文本的形式存储仿真结果。

基站部署用于实现拓扑的搭建,确定站址与基站配置等相关操作。通过对该模块的控制参数进行设置,可以实现对不同场景、不同 ISD(Inter System Distance)以及单、双系统仿真。

UE 部署主要分为两部分,一个是 UE 的地理位置,二是用户的特征。对于 UE 的地理位置,首先需要根据基站的位置确定小区的范围及扇区的范围,然后在这些区域内均匀撒点,得到用户的二维平面位置。用户的高度,在不同场景下不同。对于 Urban macro 场景来说,室外用户高度 1.5m,室内用户高度为 $h=3(n_{f1}-1)+1.5$,其中 n_{f1} 服从 $(1, N_{f1})$ 的均匀分布,而 N_{f1} 又是一个服从 $(4,8)$ 均匀分布的变量^[21]。用户特征主要指的是用户所处位置的特征,如室内室外或者车上,用户到基站是视距还是非视距等。室内用户除了有特殊的高度外,

还存在一个室内距离，室内距离指的是室内用户到建筑物外墙的距离，表示为 $\min(n_{f2}, n_{f2})$ ， n_{f2} 是一个服从 (0,25) 均匀分布的变量。视距和非视距的概率由式(3-2)计算。

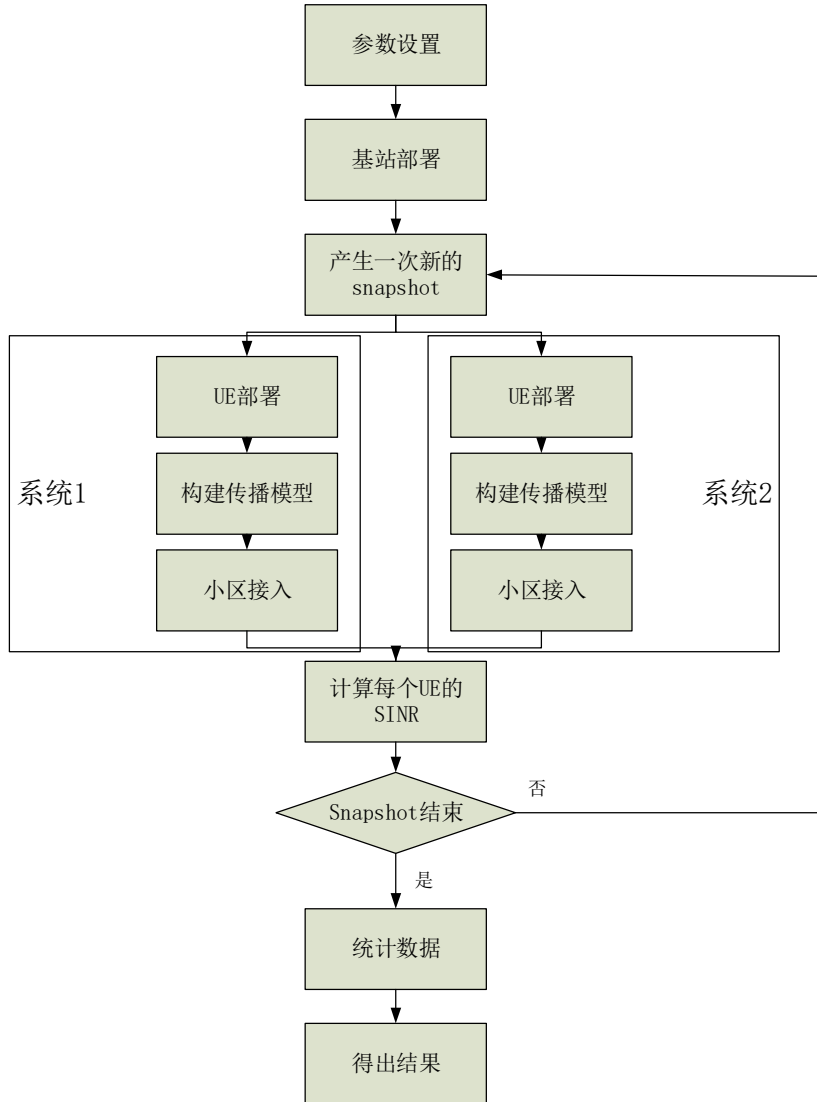


图 3-8 仿真流程图

传播损耗模型计算也即是计算链路的耦合损耗，耦合损耗表示如下式所示

$$couplingloss = pathloss + penetration\ loss + shadow\ fading - Tx\ antenna\ gain - Rx\ antenna\ gain$$

(3-14)

其中包括了路径损耗、穿透损耗以及阴影衰落等方面的计算。天线增益根据系统天线模型的不同提供不同的天线增益。在得到每个用户到各个基站的耦合损耗后，就可以通过信号的发射功率与耦合损耗计算出每个用户接收到来自各基站信号的接收功率，再利用 handover 切换模型进行小区接入。Handover 切换模型是非理想情况下的软切换。对于软切换，切换窗口为 3dB。小区中的用户在接入时，在他们选择服务基站的时候需要从候选基站中随机选取一个基站作为服务基站。候选基站由接收信号强度在切换窗口内的基站组成，切换窗口是一个接收信号强

度范围，范围通常为用户接收到的最强接收信号功率到最强接收信号功率减去 3dB。这样做是为了模拟实际场景中为了避免乒乓效应而使用的软切换技术。

小区接入完成后，用户接入的基站就被称为服务基站，其它基站被称为干扰基站，对基站来说接入的用户称为服务用户，其它用户称为干扰用户。有了服务基站、干扰基站以及服务用户、干扰用户后就可以计算每个用户的 SINR 进而通过映射求得吞吐量了。

3.4 仿真结果及分析

3.4.1 评估准则

判断两个系统是否在同一地理空间内共存的标准有很多，这里选择 5%吞吐量损失指标作为共存的衡量标准。5%吞吐量损失指被干扰系统的吞吐量在加入干扰系统后损失了 5%。一般认为吞吐量损失少于 5%意味着两个系统可以共存。吞吐量损失可以表示为：

$$Thr_{loss} = 1 - \frac{Thr_{with\ interference}}{Thr_{without\ interference}} \quad (3-15)$$

其中， $Thr_{with\ interference}$ 表示存在邻频干扰时的吞吐量， $Thr_{without\ interference}$ 不存在邻频干扰时的吞吐量。

如前文所述，随着 ACIR 值的提高，意味着发射机与接收机性能越好，系统的吞吐量损失越低。因此，通过考察吞吐量损失随着 ACIR 值的变化，可以得出两个系统共存时所需要的 ACIR 隔离度。在系统共存仿真中，本文使用香农公式将 SINR 映射为吞吐量，即采用截断修正的香农公式将 SINR 映射为吞吐量^[22]：

$$Thr = \begin{cases} 0 & SINR < SINR_{min} \\ \alpha \cdot W \log_2(1 + SINR) & SINR_{min} \leq SINR \leq SINR_{max} \\ Thr_{max} & SINR > SINR_{max} \end{cases} \quad (3-16)$$

式中， W 为被干扰系统的带宽，SINR 是测得的信干噪比，在香农公式中为线性值，其余参数由下表描述。

表 3-2 截断修正香农公式参数

参数	下行	上行	注释
α	0.6	0.4	衰减因子
$SINR_{min}$ [dB]	-10	-10	调制方式：QPSK 下行链路：1/8 码率， 上行链路：1/5 码率
$SINR_{max}$ [dB]	30	22	下行链路：调制方式：256QAM，0.93 码率 上行链路：调制方式：64QAM，0.93 码率

3.4.2 仿真参数

下表 3-3 为本次仿真中用到的部分仿真参数。在 6GHz 以下的 NR 系统和 LTE 系统的仿真中，本文仅考虑基站端存在方向性的天线增益，而用户端使用全向天线，只有基础的天线增益而没有方向性的天线增益。LTE 系统中心频率根据 3GPP TR 36.942 所述使用 2GHz，6GHz 以下 NR 系统中心频率使用 ITU-R M.2412-0 所述的 4GHz。

表 3-3 NR 系统与 LTE 系统共存仿真参数表

仿真场景		Urban macro
通信系统		5G NR 与 4G LTE
系统中心频率		NR:4GHz/ LTE:2GHz
载波带宽		10MHz
站间距		500m
系统间偏移		两系统共址
基站与用户最小距离		35m
阴影衰落相关系数		站间 0.5，站内为 1.0
阴影衰落标准差		4dB(LOS)/6dB(NLOS)
基站 参数	天线高度	25m
	发射功率	41dBm
	天线配置	(M,N)=(4,4) , (d _H ,d _V)=(0.5λ, 0.8λ)
	天线类型	三扇区天线
	天线视轴方向	0° / 120° / 240°
	$G_{E,max}$	8dBi
用户 参数	天线高度	根据 TR 36.873 中 3D-UMa 模型
	发射功率	23dBm
	天线配置	(M,N)=(2,1) , (d _H ,d _V)=(0.5λ, N/A)
	天线类型	全向天线
	$G_{E,max}$	0dBi
	用户分布	80% 室内, 20% 室外
	穿透损耗	20dB
	下行用户数	1
	上行用户数	1,3,6,9

3.4.3 结果分析

仿真结果主要考察两部分，一个是 NR 系统干扰 LTE 系统，另一个是 LTE 系统干扰 NR 系统，每部分又分为下行干扰下行及上行干扰上行进行研究。

➤ NR 系统干扰 LTE 系统

(1) 下行干扰下行

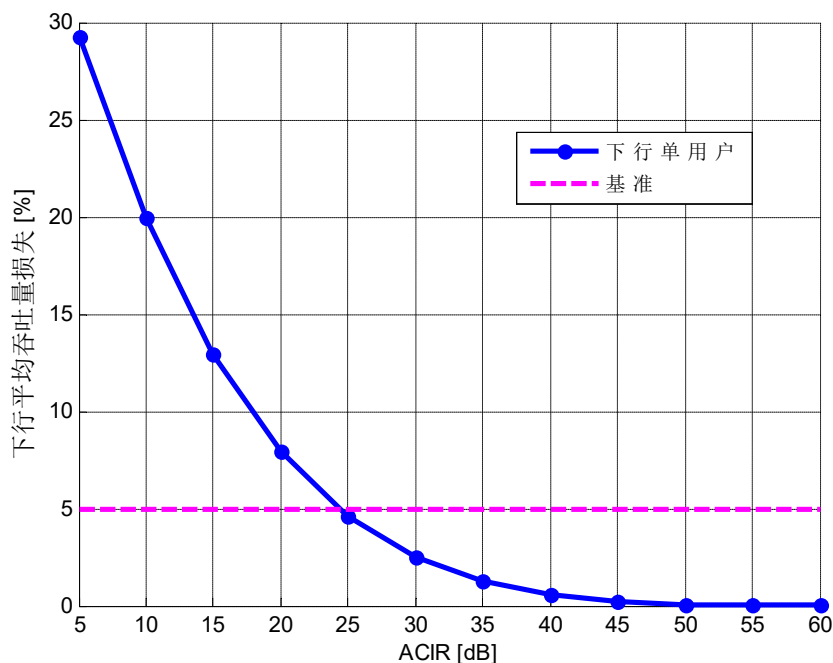


图 3-9 NR 干扰 LTE 下行平均吞吐量损失

6GHz 以下 NR 系统干扰 LTE 系统的下行仿真结果如图 3-9 所示。横坐标表示 ACIR 的取值，取值范围为 5dB 到 60dB，步长为 5dB。纵坐标表示下行平均吞吐量的损失。对于下行链路，基站将所有 RB 分给正在服务的用户，即一个用户占用了全部带宽。由图可以看出，随着 ACIR 的增长，吞吐量的损失逐渐降低。图中粉色基线用来指明符合吞吐量损失小于 5% 时的 ACIR 范围。可见，在基线之上的 ACIR 范围为 5dB 到 25dB，此时吞吐量损失为 5% 到 30%；在基线之下的 ACIR 范围为 25dB 到 60dB，吞吐量损失由 5% 逐渐降低为 0。所以，对于 LTE 系统下行链路来说，当 ACIR 大于 25dB 时，NR 系统对 LTE 系统的干扰可以接受。

ACIR 的增长意味着发射机及接收机的性能越好，邻频干扰信号对有用信号的影响越小。人们当然希望 ACIR 值趋于无穷大，这样对蜂窝小区的用户来说干扰就只来自于同频信号。但是 ACIR 越大，发射机接收机的成本便越高，不利于商业化使用。因此对于 NR 干扰 LTE 下行的场景，ACIR 指标可以选择 25dB 到 30dB 之间。

另一方面 NR 系统使用的 AAS 天线模型有利于降低对 LTE 系统的干扰。文献[9]中给出了中心频率 2GHz，带宽 10MHz 的 LTE 系统之间的 5%下行平均吞吐量损失所需要的 ACIR 为 30dB 到 35dB，而 NR 干扰 LTE 系统的只需要 25dB。这是因为 AAS 天线带来的波束赋形增益增强了服务用户的信号强度，同时如果将零陷对准被干扰用户的话，又能减弱被干扰用户接受干扰信号的强度。波束赋形如果应用到用户端的话，效果会更加显著。但是受限于天线尺寸的大小，厘米波频段很难在小空间内集成大量天线实现波束赋形。

(2) 上行干扰上行

对于上行链路，基站允许同时与多个用户进行通信。本文假设基站将 RB 平均分给调度的用户，每个用户所分得的 RB 数目相等。当上行用户数仅为一个时，吞吐量损失随 ACIR 的变化如图 3-10 所示。由图 3-10 可以看出，蓝色点线与粉色虚线的交点的横坐标为 13dB。这意味着当 ACIR 大于 13dB 时，吞吐量的损失在可接受范围内。

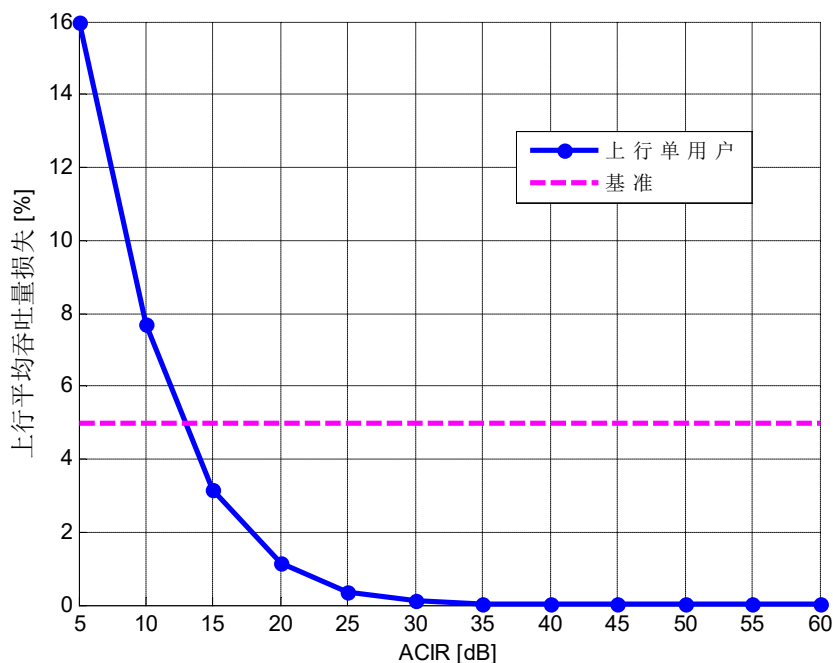


图 3-10 NR 干扰 LTE 上行平均吞吐量损失

值得注意的一点是，在共存时，上行链路与下行链路对于 ACIR 值的需求不一样。在下行链路中 ACIR 需要 25dB，上行链路则仅需要 13dB。而且在同样的 ACIR 情况下，上行链路的吞吐量损失往往比下行链路的吞吐量损失要小，比如在 ACIR 为 5dB 时，上行链路吞吐量损失为 16%，而下行链路吞吐量损失为 30%。这主要是因为上行链路采用了功率控制，干扰用户并不是总是满功率发射信号，使得基站接收到的干扰信号功率和相比于不使用功率控制时的小。上行时用户发

射功率的 CDF 如下图 3-11 所示。图中可以看出，有差不多一半的用户没有使用满功率发送信号，因此可以使得在上行链路中基站受到邻频和同频干扰减少，ACIR 隔离度的需求降低。

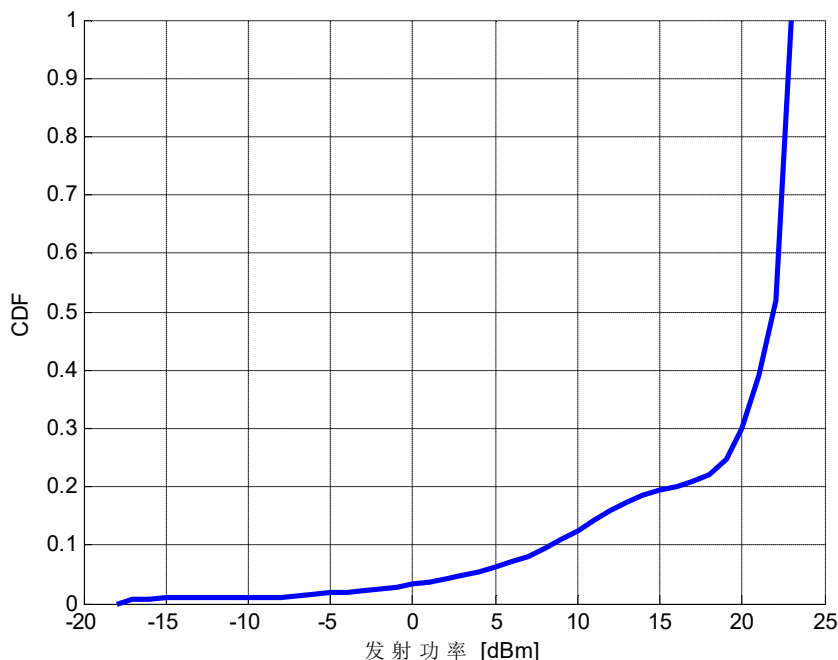


图 3-11 上行用户发射功率 CDF

对上行功率控制模型影响最大的一个参数是 CL_{x-ile} 。由前面所述， CL_{x-ile} 指耦合损耗值最高的前 $x\%$ 用户以 P_{\max} 的功率发送信号，其余用户将按照比率

$\left(\frac{CL}{CL_{x-ile}}\right)^\gamma$ 降低发射功率。

CL_{x-ile} 如果选得小则会导致大多数用户使用满功率发射信号，没能达到功率控制的效果，ACIR 隔离度要求变高，在图 3-11 表现为曲线整体偏低且收敛突然；如果选得大则会使得用户的发射功率过小，基站没法正确接收并解调有用信号，同样会使得 ACIR 隔离度变高，在图 3-11 将会表现为曲线变为一条近似直线。本章的功控参数来源于 3GPP TR 36.942 的 set 1。

当上行用户数目不一样时，共存时所需要的 ACIR 值是不一样的。图 3-12 是上行用户数目分别为 1,3,6,9 时吞吐量损失随 ACIR 的变化情况。可以看到上行单用户的曲线位于最左下方，而上行 9 用户的曲线位于最右上方，说明达到同样的吞吐量损失时上行用户数目越多所需要的 ACIR 隔离度越大。比如，当吞吐量损失达到 5% 时，单用户需要的 ACIR 值为 13dB，上行 3 用户 ACIR 为 20dB，上行 6 用户和 9 用户所需的 ACIR 值较为接近，约为 24dB。而且随着上行用户

数目的增多，达到 5%吞吐量损失时的 ACIR 值趋近。

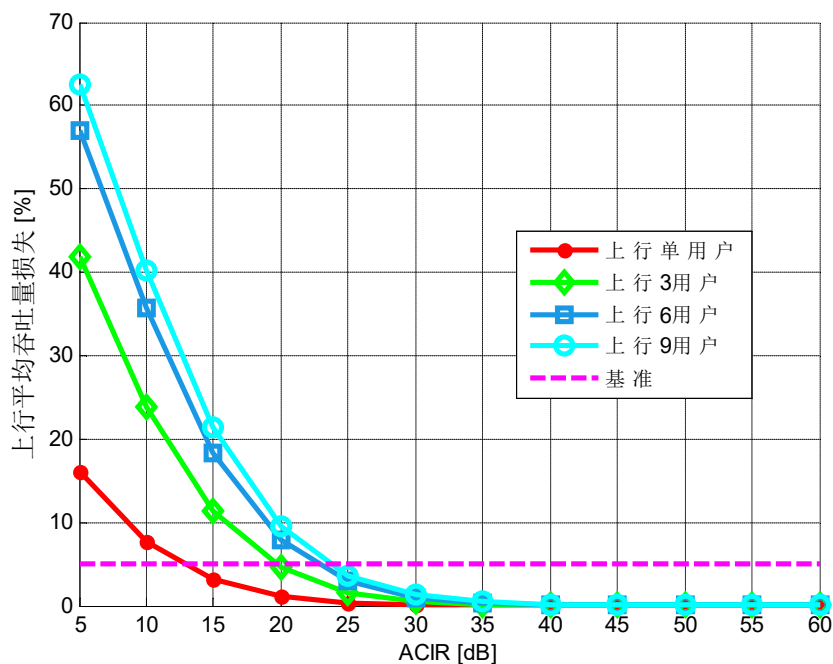


图 3-12 上行用户数目不同时 NR 干扰 LTE 上行平均吞吐量损失

导致上行用户数目越多所需要的 ACIR 值越大的原因有两个，一是对基站来说干扰源变多了；二是上行调度的用户变多之后每个用户分配到的 RB 数目变少，但是每个用户的发射功率不变，因此每个 RB 分配到了更大的功率，因此对被干扰系统的基站产生了更大的干扰。

➤ LTE 系统干扰 NR 系统

（1）下行干扰下行

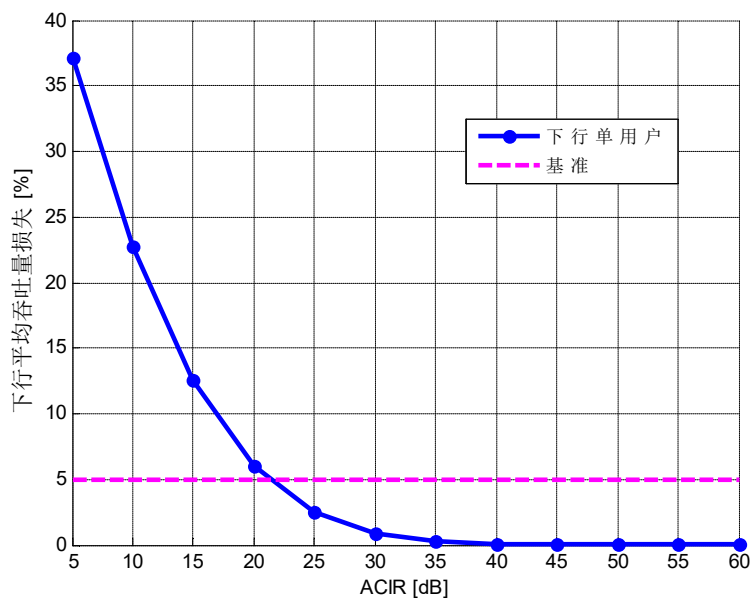


图 3-13 LTE 干扰 NR 下行平均吞吐量损失

LTE 系统下行链路干扰 NR 系统下行链路的平均吞吐量损失如图 3-13 所示。当 ACIR 范围为 5dB 到 22dB 时，下行单用户曲线位于基准线上方；ACIR 范围为 22dB 到 60dB 时，下行单用户曲线位于基准线下方。因此，当 ACIR 隔离度约为 22dB 时，可以认为两系统能够共存。

(2) 上行干扰上行

至于上行链路，LTE 系统干扰 NR 系统的曲线表现与 NR 系统干扰 LTE 系统的曲线大致相当，如下图 3-14 所示。当 ACIR 为 13dB 时，LTE 系统对 NR 系统的干扰可以认为在可接受范围内。

不同数目上行用户的吞吐量损失随着 ACIR 的变化情况如图 3-15 所示。可以看到当吞吐量损失达到 5% 时，各条曲线的 ACIR 值都较为接近，当 ACIR 为 18dB 以上时，能够满足不同上行用户数目的共存要求。

LTE 系统干扰 NR 系统上行与 NR 系统干扰 LTE 系统上行略有不同。由于 LTE 系统的上行 ACIR 主要由用户端的 ACLR 决定，也即是用户端的发射机性能代表了整体的隔离度。因此当 LTE 上行用户采用阶梯状的 ACLR 时，在 NR 系统中只有使用与 LTE 系统相邻的 RB 的用户才会受到最大的干扰。换句话说，当上行用户数目越多时，NR 系统中使用与 LTE 系统相邻 RB 的概率越小，则 LTE 系统中的用户对 NR 系统中的基站造成的邻频干扰也就越小。因此在上行用户数目较多时，并不会像 NR 系统干扰 LTE 系统那样需要那么大的 ACIR 隔离度，使得不同用户数目的共存要求相近。在 NR 系统中使用了平坦的 ACLR 模型，所有 RB 受到的影响相当，因此不同用户数目情况下差距较大。

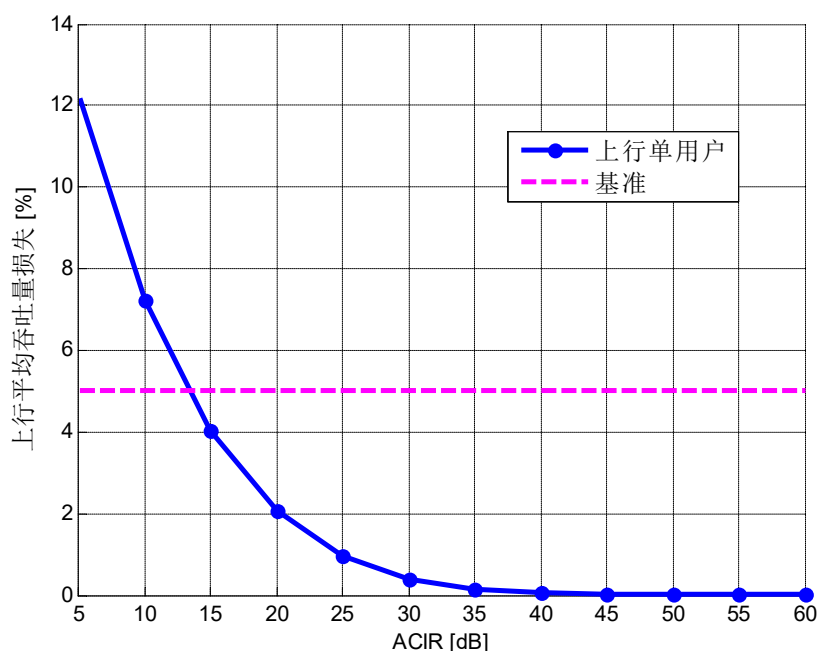


图 3-14 LTE 干扰 NR 上行平均吞吐量损失

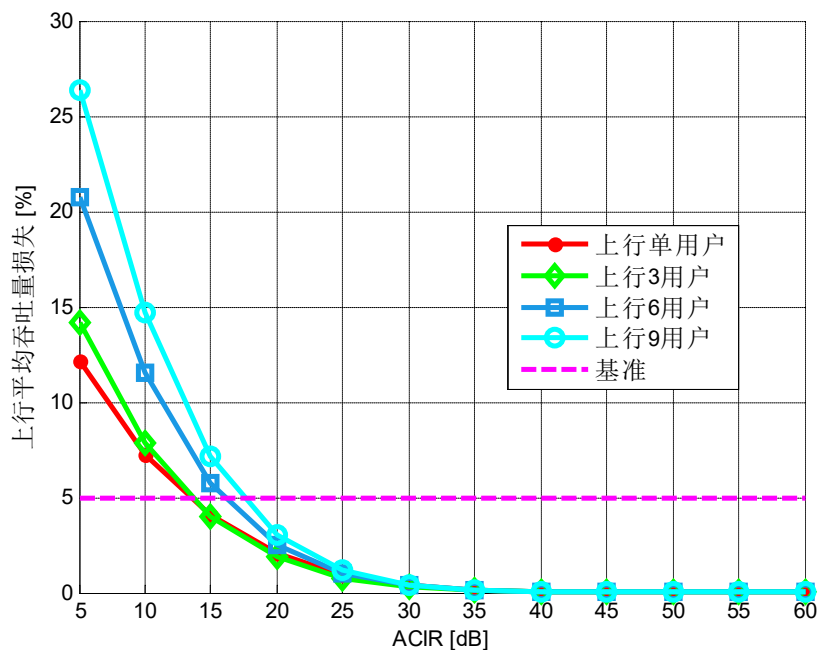


图 3-15 上行用户数目不同时 LTE 干扰 NR 上行平均吞吐量损失

3.5 本章小结

本章主要研究了 NR 系统与 LTE 系统共存的要求。首先从传播损耗模型、天线模型、上行传输功率控制模型以及 ACIR 模型等几个角度介绍了 NR 系统与 LTE 系统的模型。接着利用蒙特卡洛仿真技术搭建仿真平台，该仿真平台不仅适用于 NR 系统与 LTE 系统的共存干扰研究，稍加改动后也可以用于 NR 系统之间的共存研究。因此下一章将会在该仿真平台基础上研究 NR 系统之间的共存要求。最后给出判断两个系统能否共存的准则并利用该仿真平台对 NR 系统干扰 LTE 系统以及 LTE 系统干扰 NR 系统进行了研究，分别从下行干扰下行、上行干扰上行两个方面给出共存隔离度建议。从总体来说当 ACIR 隔离度大于 25dB 时 NR 系统与 LTE 系统能够达到共存要求。

第四章 NR 系统之间共存研究

4.1 背景概述

频率范围上, 3GPP 38.104^[23]中指定了 6GHz 以上的 NR 系统使用 24.25GHz 到 52.6GHz 的频率范围。相比 6GHz 以下的 NR 系统, 6GHz 以上的 NR 系统使用的频率高了, 波长短了, 传播模型将会呈现出与低频段时完全不一样的特征。具体来说, 路径损耗将和穿透损耗将会变大, 过大的耦合损耗将会使得通信变得困难。同时又因为波长变短了, 所需要的天线长度下降, 有利于在更小的空间内集成更多的天线阵子提供更强的天线增益以抵消耦合损耗过大带来的负面效果。另一方面, 考虑到 6GHz 以上的 NR 系统实际组网时, 有可能使用不同频段的运营商会将基站部署在同一地理空间。因此需要合理考虑基站的部署位置以及发射机与接收机的性能, 以使得不同运营商之间的 5G NR 系统能够共存。

对毫米波频段的 NR 系统的共存研究起步较晚, 但是也有了一些研究成果。文献[24]中就根据现有的标准对 70GHz 的 NR 系统与现存的通信系统能否共存进行了评估。在文献[25]中, 作者研究了不同 numerology 配置下 eMBB 场景中系统共存状况。Numerology 指的是可配的子载波间隔, 是 5G 与 4G 在物理层上最主要的改进。文献[26]使用实际的数据库和建筑布局, 分析了 70GHz 的 5G 系统与现有的固定基站之间的干扰, 发现大多数现有基站的干扰远低于噪声, 因此在 70 和 80 GHz 时具有良好的与 5G 共存能力, 对于部分引起高干扰的基站也可以通过空间功率控制或者干扰协调技术缓解。

本章会首先介绍 6GHz 以上的 NR 系统的模型包括网络拓扑模型、传播模型等, 然后研究 AAS 天线带来的波束赋形增益对系统性能的影响, 最后研究系统共存的相关问题并得出共存所需要的隔离度。

4.2 系统模型

(1) 网络拓扑模型

5G 标准化进程中主要关注三种网络拓扑模型, 分别是城市宏小区 (Urban Macro, UMa)、城市微小区 (Urban Micro, UMi) 以及室内热点 (Indoor Hotspot, InH) ^[27]。下面对它们分别进行介绍。

➤ 城市宏小区

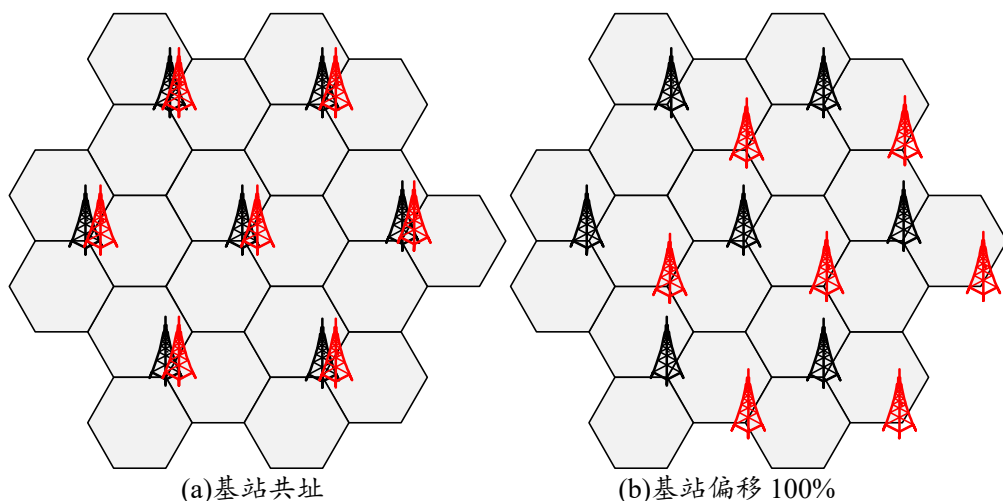


图 4-1 城市宏小区网络拓扑

城市宏小区模型采用传统的 19 个基站 57 个扇区的拓扑模型，每个扇区呈六边形，用户在扇区内均匀分布。两个不同系统间可以存在偏移，一般有共址及偏移 100% 两种形式，如图 4-1 所示。

➤ 城市微小区

城市微小区模型分为宏蜂窝层与微蜂窝层。如图 4-2 所示，宏蜂窝层拓扑结构与城市宏小区中的三扇区宏蜂窝拓扑一致。在每一个宏蜂窝中都有三个圆形区域作为微蜂窝层。微蜂窝基站随机分布在圆形边缘，用户随机均匀分布在圆形范围之内。在该模型中假设用户只与微蜂窝基站进行通信而不与宏蜂窝基站进行通信。在多系统中，宏蜂窝基站共址，微蜂窝基站随机分布，但不同系统微蜂窝基站间最小距离不得小于 10m。

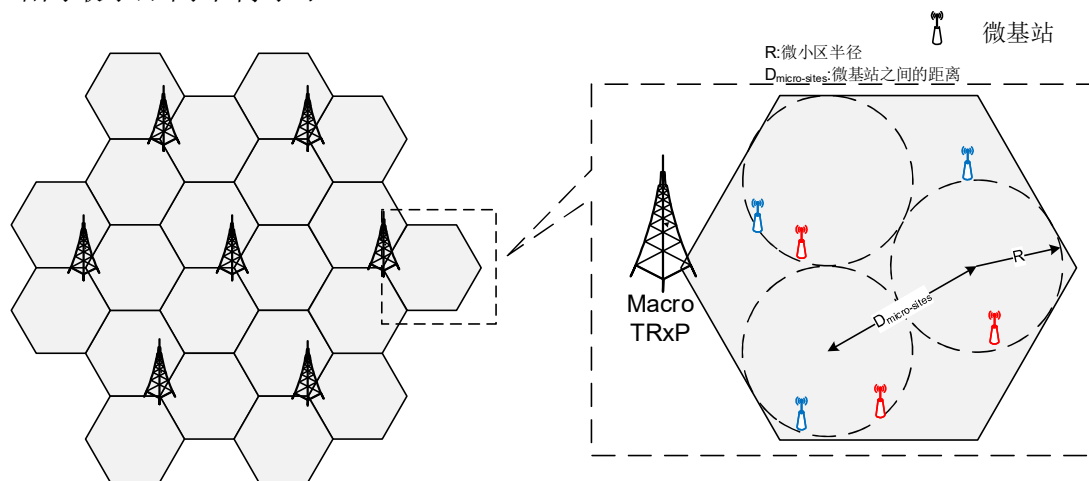


图 4-2 城市微小区网络拓扑

➤ 室内热点

室内热点模型模拟的是室内空旷的办公室场景，如图 4-3 所示， $50\text{m} \times 120\text{m}$ 的长方形区域内分布着 12 个基站，ISD 设定为 20m。基站天线高度为 3m。用户随机均匀分布在长方形区域内，用户均为室内用户，用户天线高度为 1.5m。由于

用户与基站均在室内，因此不存在信号由外至内穿透墙体的过程，也就是说该场景下没有穿透损耗。

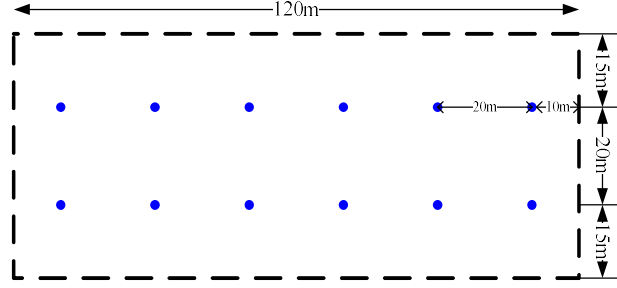


图 4-3 室内热点网络拓扑

(2) 传播损耗模型

6GHz 以上 NR 系统的传播损耗模型与 6GHz 以下的差别主要在于由高频带来的路径损耗与穿透损耗的上升。不同的网络拓扑有不同的路径损耗模型，具体的数学描述如下^[17]：

➤ 城市宏小区

LOS 径	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$
NLOS 径	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ $PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$
LOS 概率	$P_{LOS} = \left(\min\left(\frac{18}{d_{2D}}, 1\right) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-d_{2D}}{63.0}\right)\right) + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{63.0}\right) \right) \cdot (1 + C(d_{2D}, h_{UT}))$ $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0 & h_{UT} < 13\text{m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} g(d_{2D}) & 13\text{m} \leq h_{UT} \leq 23\text{m} \end{cases}$ $g(d_{2D}) = \begin{cases} 0 & d_{2D} \leq 18\text{m} \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2D}}{150}\right) & 18\text{m} < d_{2D} \end{cases}$

(4-1)

式中的变量含义与 3.1.1 中的一样。

➤ 城市微小区

LOS 径	$PL_{UMi-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9.5 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$
NLOS	$PL_{UMi-NLOS} = \max(PL_{UMi-LOS}, PL'_{UMi-NLOS})$

径	$PL'_{UMi-NLOS} = 22.4 + 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$
LOS 概率	$P_{LOS} = \min\left(\frac{18}{d_{2D}}, 1\right) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-d_{2D}}{36.0}\right)\right) + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{36.0}\right)$

(4-2)

与 UMa 场景不同, UMi 场景中天线有效高度 $h_E = 1$, 其余变量描述与 UMa 相同。

➤ 室内热点

LOS 径	$PL_{InH-LOS} = 32.4 + 17.3 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$
NLOS 径	$PL_{InH-NLOS} = \max(PL_{InH-LOS}, PL'_{InH-NLOS})$ $PL'_{InH-NLOS} = 17.3 + 38.3 \log_{10}(d_{3D}) + 24.9 \log_{10}(f_c)$
LOS 概率	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2d} \leq 5\text{m} \\ \exp\left(\frac{-(d_{2D}-5)}{70.8}\right) & 5\text{m} < d_{2D} \leq 49\text{m} \\ \exp\left(\frac{-(d_{2D}-49)}{211.7}\right) \cdot 0.54 & d_{2D} > 49\text{m} \end{cases}$

(4-3)

高频下的穿透模型与低频时有较大不同。信号穿越不同的材料导致的衰减如下表 4-1 所示。 PL_{tw} 和 PL_{in} 可以通过表 4-2 计算。

表 4-1 不同材质穿透损耗

材料	穿透损失 [dB] (f 单位为 GHz)
标准多窗格玻璃	$L_{glass} = 2 + 0.2f$
IRR 玻璃	$L_{IRRglass} = 23 + 0.3f$
混凝土	$L_{concrete} = 5 + 4f$
木材	$L_{wood} = 4.85 + 0.12f$

表 4-2 穿透损耗计算

	外墙穿透损失 PL_{tw} [dB]	室内损失 PL_{in} [dB]	标准差 σ_P
低穿透损耗模型	$5 - 10 \log_{10}(0.3 \cdot 10^{-L_{glass}/10} + 0.7 \cdot 10^{-L_{concrete}/10})$	$0.5d_{2d-in}$	4.4
高穿透损耗模型	$5 - 10 \log_{10}(0.7 \cdot 10^{-L_{IRRglass}/10} + 0.3 \cdot 10^{-L_{concrete}/10})$	$0.5d_{2d-in}$	6.5

(3) 上行功率控制模型

和 6GHz 以下的 NR 系统一样, 下行不进行功率控制, 上行进行功率控制。与 6GHz 以下系统功控模型不同的是耦合损耗值最高的前 $x\%$ 用户 CL_{x-ile} 通过下

式(4-4)计算。X 为系统带宽，单位为 MHz。

$$CL_{x-ile} = 88 + 10 \log_{10} \left(\frac{200}{X} \right) \quad (4-4)$$

4.3 AAS 天线模型对系统性能的影响

上一章中提到 AAS 天线可以通过阵子间的协作实现波束赋形，在水平维度和垂直维度上产生波束，提供波束赋形增益。与传统的天线相比，AAS 天线一个最主要的特征便是能控制波束在垂直维度上的角度，因此提高了对用户的三维空间分辨率，增加用户接收信号功率并且降低干扰。具体来说，在城市宏小区场景下，基站天线高度一般高于用户，基站可以发射不同下倾角的垂直波束来区分不同高度的用户，如图 4-4 所示。在城市微小区场景下，基站高度可能高于用户也可能比用户低，因此基站可以调整波束的上下倾角来对准不同高度的用户，如图 4-5 所示。用户的空间区分度的提高可以大大降低不同小区之间的干扰。比如说基站 A 要服务用户 a，基站 B 要服务用户 b，假如 a 和 b 在同一栋楼的不同楼层，若不区分垂直维度，用户 a 会接收到来自基站 B 很强的干扰信号。

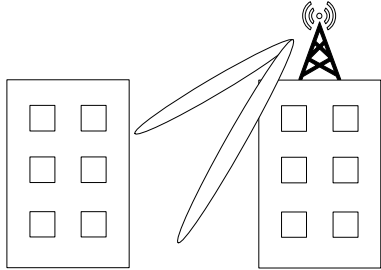


图 4-4 城市宏小区基站示意图

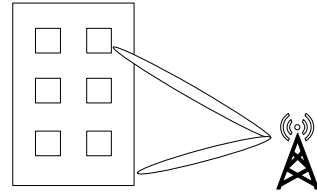


图 4-5 城市微小区基站示意图

另外波束赋形增益大小也与天线阵子的数目有关。假设 $G_{E,max}$ 为 0dBi，图 4-6 是不同天线阵子数目下得到的复合天线阵列辐射方向图。随着天线阵子数目的增多，天线增益能取得的最大值也随之增大，分别为 6.02dB、12.04dB、18.06dB、21.07dB。但随之而来的问题是带来了更多的旁瓣和零陷。零陷会带来两个影响，一个是将零陷对准非服务用户能够降低非服务用户的干扰，二是对主瓣对准服务用户的精度要求更高了，波束跟踪如果达不到应有的精度反而会导致用户接收到的 SINR 变小。

假设与波束完全对准用户进行对比，图 4-7 和图 4-8 分别是在水平维度以及垂直维度偏离 1~10 度时在不同天线配置下获得的波束赋形增益与完全对准时获得的波束赋形增益差值。在图 4-7 可以看到，随着水平偏离角度的增大，波束赋形增益的衰减单调递增。另一方面随着天线阵子数目的增多，衰减值越大，但 8x8 的天线配置与 16x8 的天线配置结果相似。分析该图可以得知，在水平方向上偏离 0~10 度范围内复合天线阵列辐射方向图呈下降趋势但变化平缓，没有出现明

显的零陷。与之相比，在垂直方向上 8×8 的天线配置与 16×8 的天线配置并非单调变化， 8×8 的天线配置在 9 度时出现极大值， 16×8 的天线配置在 5 度与 9 度时均出现极大值。出现这种现象的原因是在垂直方向上偏离 0~10 度范围内既出现了零陷，也出现了旁瓣。零陷的出现使得衰减突然变大，旁瓣的出现使得衰减突然变小。零陷的出现的原因如 3.2.1 节所述，是电磁波反相叠加所致。横向对比图 4-7 和图 4-8，垂直方向上在相同偏离角度范围内出现了明显的零陷说明，在垂直方向上的波束赋形对精度控制的要求更高。但幸运的是，在常用的应用场景中，用户在垂直方向上位置变化不是很大，因此可以更关注水平方向上的波束赋形。另一方面，零陷也有降低干扰的作用，但可以看到图中的零陷比较窄，可以通过一些零陷展宽算法^{[28][29]}对其进行展宽。

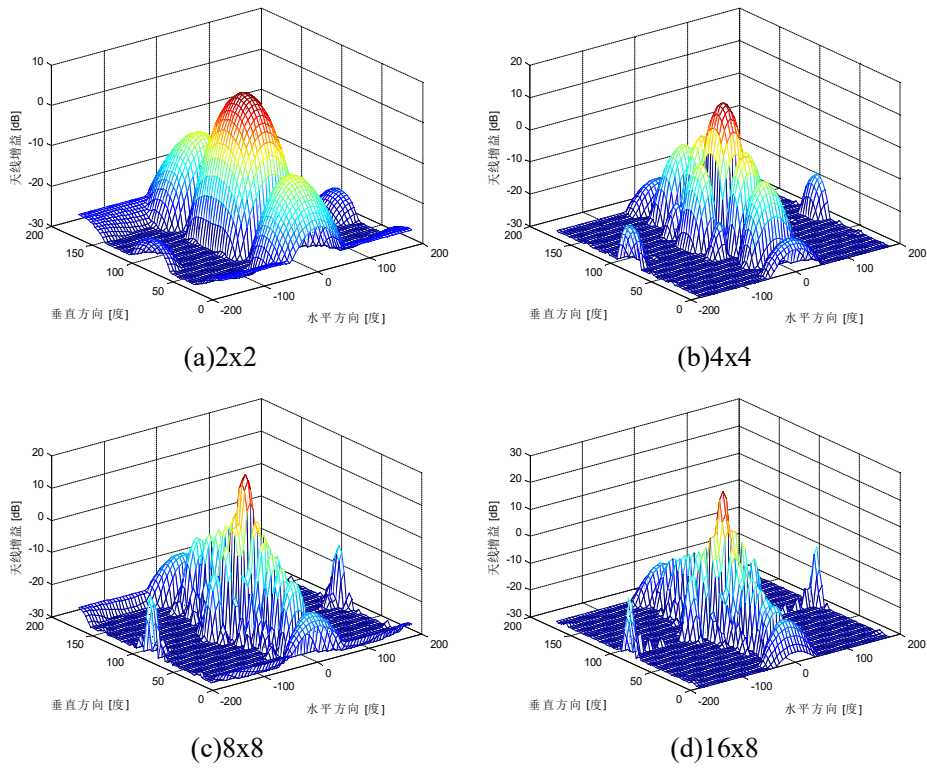


图 4-6 不同天线阵子数目下天线阵列辐射方向图

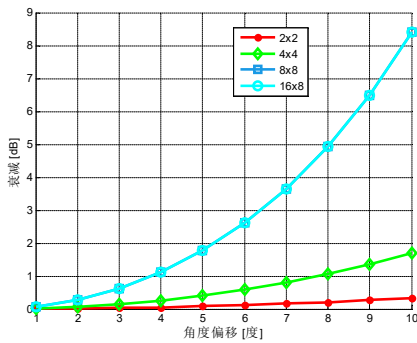


图 4-7 水平方向偏离波束赋形增益衰减

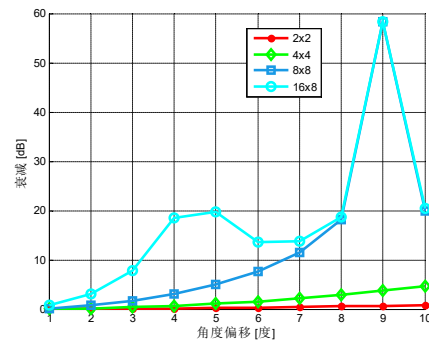


图 4-8 垂直方向偏离波束赋形增益衰减

不同天线阵子数目下用户的 SINR 分布如图 4-9 所示，可以看到随着天线阵

子数目的变多，SINR 曲线右移，意味着 SINR 整体变好。图 4-10 为没有邻频干扰时，不同天线阵子数目下，系统吞吐量的表现。随着天线阵子数目的变多，系统平均吞吐量和边缘用户吞吐量均有提高，而且边缘用户吞吐量表现尤为明显。

可以看到波束赋形对系统性能的提升非常明显，且随着天线数目的增多越发显著。根本原因是使用 AAS 模型的天线能够将主瓣对准服务用户从而提高用户接收服务信号强度，将旁瓣或零陷对准被干扰用户从而降低接收干扰信号的强度。由式 (2-1) 可知，有用信号功率变大，干扰信号功率变小而噪声基本不变的情况下所得 SINR 会随之变大，进而提高了整个系统吞吐量。

另外波束赋形对边缘用户吞吐量的提升会显著于小区中心用户。这是因为对边缘用户距离信号源更远而更靠近干扰源，受到的邻频干扰影响更大，而波束赋形的引入正好能更显著地降低边缘用户受到的影响程度。

影响波束特性的参数主要有两个，一个是天线阵子的数目，另一个是水平方向和垂直方向上的半功率带宽。所谓半功率带宽即是增益降到最大的一半时所需要的带宽。半功率带宽越小意味着主瓣越窄，给非服务用户带来的干扰越小。实际上这两个参数对系统性能的影响相似，天线数目越多或者半功率带宽越小，系统吞吐量越大，但同时要求对波束有更加精准的控制。

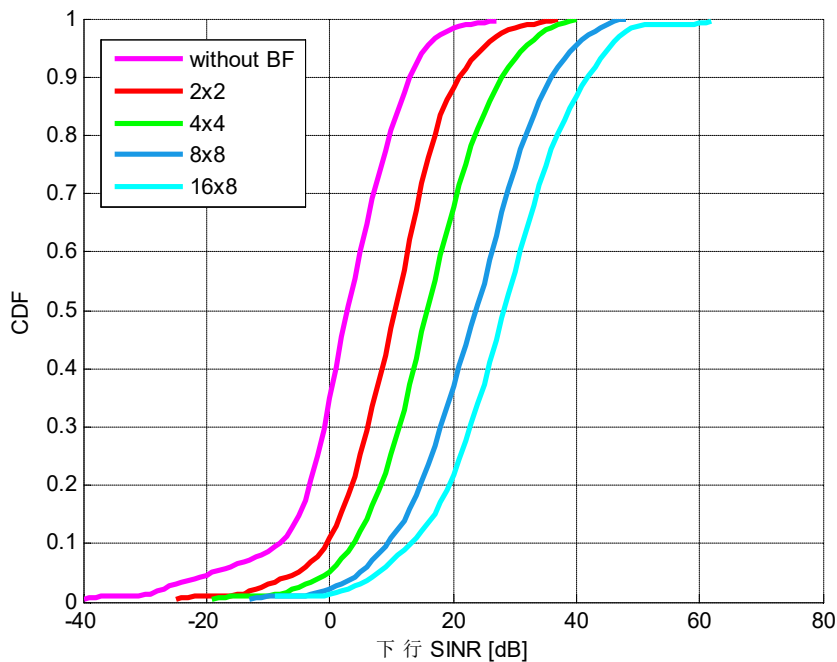


图 4-9 不同天线阵子数目下用户 SINR 分布

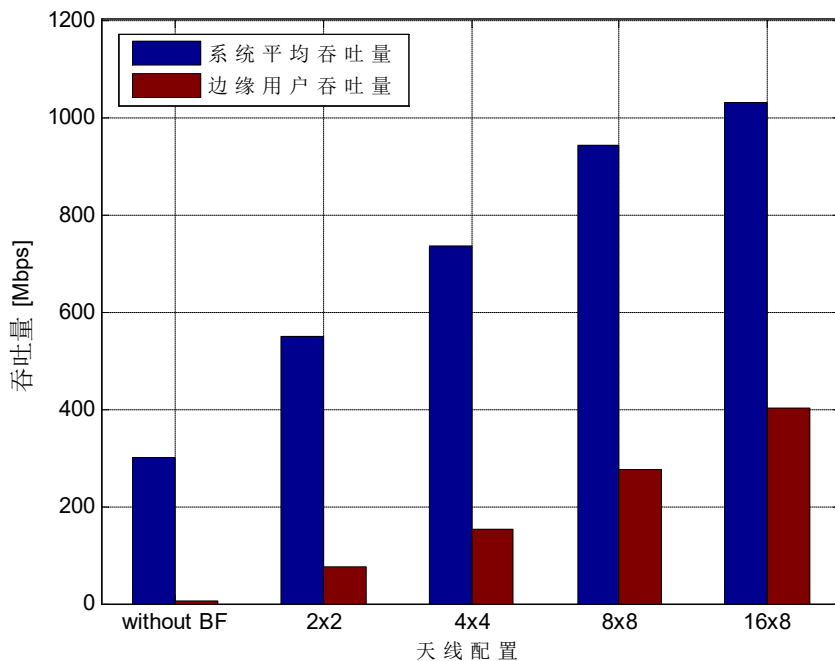


图 4-10 不同天线阵子数目下系统吞吐量

4.4 仿真结果及分析

本章将利用 3.2 节搭建的仿真平台对城市宏小区、城市微小区以及室内热点三个场景进行共存研究，将以系统平均吞吐量损失和边缘用户吞吐量损失作为主要参考指标。边缘用户在这里指的是吞吐量大小在整个系统中排第 5% 的用户，这些用户受相邻小区干扰严重，在地理位置上通常位于小区边缘。此外还将分析不同系统间基站地理位置偏移及带内阻塞的情况。

4.4.1 仿真参数

下表主要仿真参数来源于 3GPP TR 38.803。对于城市微小区来说，由于基站随机部署，因此站间距没法确定。

表 4-3 NR 系统之间共存仿真参数

仿真场景	Urban macro	Urban micro	Indoor hotspot
通信系统	6GHz 以上 NR 系统		
系统中心频率	30GHz		
载波带宽	200MHz		
站间距	200m	N/A	20m
系统间偏移	共址/偏移	偏移	共址
基站与用户最小距离	35m	2m	0m

阴影衰落相关系数		站间 0.5，站内为 1.0		
阴影衰落标准差		4dB(LOS)/6dB(NLOS)	4dB(LOS)/7.82dB(NLOS)	3dB(LOS)/8.03dB(NLOS)
基站参数	天线高度	25m	10m	3m
	发射功率	43dBm	33dBm	23dBm
	天线配置	(M,N)=(16,8), (d _H ,d _V)=(0.5λ, 0.8λ)	(M,N)=(16,8), (d _H ,d _V)=(0.5λ, 0.8λ)	(M,N)=(8,4), (d _H ,d _V)=(0.5λ, 0.8λ)
	天线类型	三扇区天线	单扇区天线	单扇区天线
	天线视轴方向	0°/120°/240°	指向微小区中心	垂直向下
	$G_{E,max}$	8dBi		
用户参数	天线高度	根据 TR 36.873 中 3D-UMa 模型	根据 TR 36.873 中 3D-UMa 模型	1.5m
	发射功率	23dBm		
	天线配置	(M,N)=(2,2), (d _H ,d _V)=(0.5λ, 0.5λ)		
	天线类型	非全向天线		
	$G_{E,max}$	5dBi		
	用户分布	80% 室内, 20% 室外	80% 室内, 20% 室外	室内
	下行用户数	1		
	上行用户数	1		

4.4.2 结果分析

(1) 不同场景下共存仿真结果与分析

➤ 城市宏小区

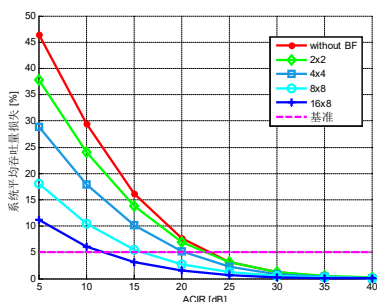
城市宏小区在不同天线配置下的共存仿真结果如图 4-11 所示。图 4-11 (a) 是下行时系统平均吞吐量，可以看到随着天线阵子数目的增多，曲线与基准线的交点对应 X 轴的值越来越小。这意味着随着天线阵子数目的增多，邻频干扰逐渐降低，所需要的 ACIR 隔离度也随之降低。同时，我们可以看到不同天线配置在相同 ACIR 隔离度的情况下，带来的吞吐量损失并不一样。总体来说存在波束赋形比不使用波束赋形的吞吐量损失少，天线阵子数目多的比天线阵子数目少的吞吐量损失少，在 ACIR 为 5dB 时效果尤为明显。这也印证了波束赋形技术能够

降低被干扰用户接收干扰信号强度。图 4-11 (b~d) 可以得到类似的结论。比较下行与上行的吞吐量损失结果, 我们可以看到下行的吞吐量损失比上行吞吐量损失大而且所需要的 ACIR 隔离度也大。这主要是因为下行没使用功率控制而上行使用了功率控制。因此功率控制技术也能明显降低邻频干扰和发射机接收机的性能要求。另外, 可以看出, 边缘用户受邻频干扰相比小区中心用户受到的干扰要大。体现在相同 ACIR 隔离度的情况下, 边缘用户吞吐量损失要远大于系统平均吞吐量损失。

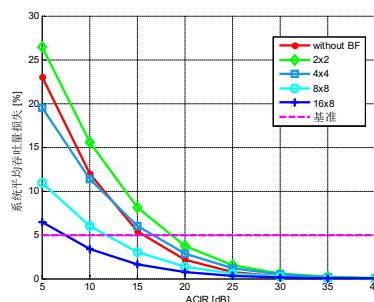
此外在图 4-11 (d) 中, without BF 和 2x2 天线配置下, 吞吐量损失不随 ACIR 变化一直为 100%。这是因为在 3.3.1 中的评估准则规定, SINR 小于 -10dB 时, 吞吐量映射为 0, 这些用户处于无法通信状态。也就是说这种情况下, 同频干扰占据主要地位并且已经使得基站接收到用户的 SINR 小于 -10dB, 通信无法进行。所以 6GHz 以上频率的 NR 系统为了抵消毫米波带来的连路损耗的增加, 大规模天线阵列的使用是必不可少的。

由图可以得到天线配置为 16x8 时下行以及上行所需要的 ACIR 隔离度大致分别为 12dB 和 7dB。这个值相比于 6GHz 以下 NR 系统与 LTE 系统之间的干扰要小。原因有两个, 一个是 LTE 没有使用 AAS 天线技术, 二是 6GHz 以下 NR 系统使用的天线阵子数目比较少。这主要由于波长较长的通信系统需要的天线长度较长, 不容易集成在一个较小的空间内。但毫米波波长较短, 需要的天线长度较短, 容易集成。

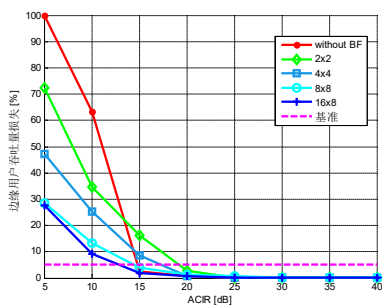
在共存研究的标准化过程中, 曾经一度沿用过 LTE 时期的站间距为 500m 的仿真假设。但是经过仿真验证发现, 在 ISD=500m 的设定下, 无论上下行都有超过 5% (甚至 10%) 的用户 SINR 小于 -10dB 这个阈值。解决这个问题的方法之一是缩短站间距。虽然站间距变小了会同时增大有用信号功率和干扰信号功率, 但是在该仿真假设下, 对于部分边缘用户来说无论有用信号或者是干扰信号都过小, 导致在 SINR 计算中占主导地位的为热噪声功率。因此在后期的仿真研究中, 将站间距缩小为 200m 以降低链路损耗, 提高接收有用信号功率强度。所以在将来的 6GHz 以上的 NR 系统部署过程中, 基站密度想必会大大增加。



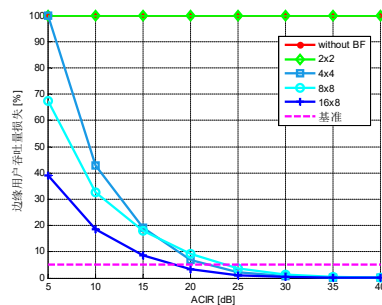
(a) 下行平均吞吐量损失



(b) 上行平均吞吐量损失



(c)下行边缘用户吞吐量损失



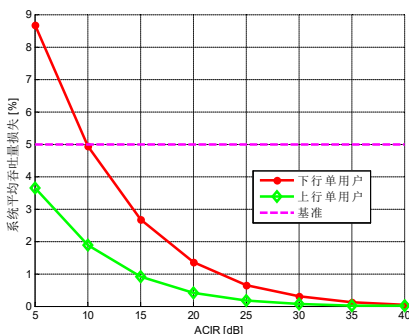
(d)上行边缘用户吞吐量损失

图 4-11 城市宏小区共存仿真结果

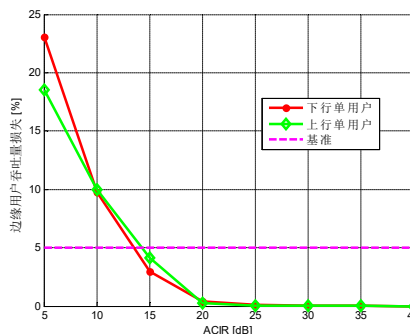
➤ 城市微小区

城市微小区的下行及上行的吞吐量损失如图 4-12 所示。可以看到下行及上行系统平均吞吐量损失较小且上行的系统吞吐量损失曲线整体位于基准线以下。边缘用户吞吐量损失稍大，但也当 ACIR 为 15dB 时下降到 5%以下。综合来看，下行所需要的 ACIR 隔离度大概为 10dB 至 15dB，而上行需要的隔离度约为 5 至 15dB。

该场景中吞吐量损失较小主要是因为微小区的基站的天线视轴方向各自对准小区热点用户而且服务基站到服务用户的距离较近，能够降低来自非同一个热点小区的邻频干扰。对于来自同一个热点小区的邻频干扰，由于波束赋形的引入，也可以大大降低其带来的干扰。



(a)平均吞吐量损失



(b)边缘用户吞吐量损失

图 4-12 城市微小区共存仿真结果

➤ 室内热点

室内热点场景和城市微小区场景结果类似，下行所需要的 ACIR 隔离度大概为 15dB，而上行所需要的隔离度为 5dB 到 10dB。吞吐量损失与城市宏小区相比均有下降。

使用较少的天线阵子配置的室内热点场景和使用较多天线阵子配置的室外场景所需 ACIR 隔离度相当甚至更小，可以看出作为一种为蜂窝小区提供补充覆盖的微小基站部署方案，能够降低小区间干扰并提高系统吞吐量。

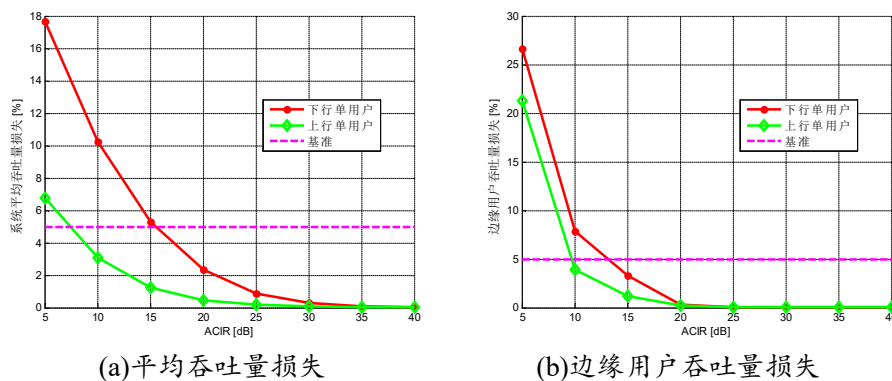


图 4-13 室内热点共存仿真结果

(2) 地理位置偏移对系统性能影响

地理位置偏移主要研究共址、偏移 100%以及偏移 141m 这三种情况。偏移 100%指的是 4.1 节所述的形式。偏移 141m 指的是第二个系统相比于第一个系统在右下方 45 度的方向偏移了 141m,在地图上看即是第二个系统的基站往东偏移 100m 往南偏移 100m,两个系统基站间距离 $100\sqrt{2}$ m (约为 141m)。

图 4-14 是下行时三种拓扑偏移情况的吞吐量损失随 ACIR 的变化。由图 4-14 (a) 可以看出,系统三种情况下的系统平均吞吐量损失曲线比较接近,只是共址情况下在 ACIR 较小时吞吐量损失略大。然而对小区边缘用户来说,由图 4-14 (b) 可以看出,共址情况下边缘用户吞吐量损失反而是最小的,偏移 100%次之,偏移 141m 最大。

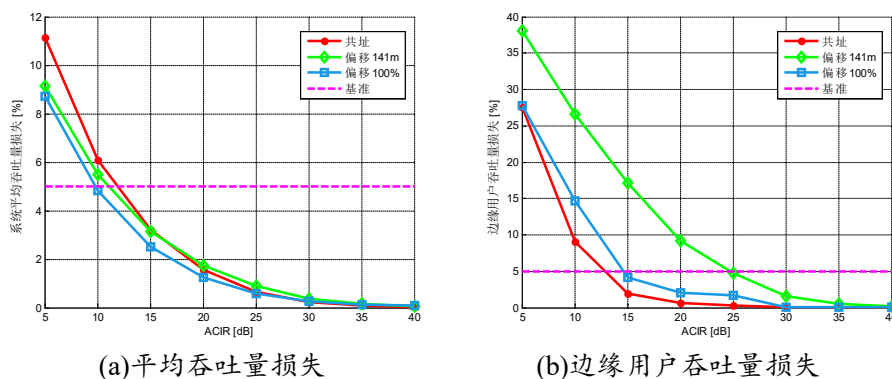


图 4-14 下行时三种基站偏移方案的吞吐量损失

对小区中心用户受到的邻频干扰来说,对被干扰用户产生的影响最大的往往是距离被干扰用户最近的基站,这个干扰占总干扰的主导地位。在共址情况下,距离被干扰的小区中心用户最近的邻频基站正好与该用户的服务基站共址,因此带来了较大的干扰。

边缘用户受到的干扰情况又有所不同。如图 4-15 所示,以边缘用户为圆心半径为 115m ($200\sqrt{3}/3 \approx 115$) 的范围内分析边缘用户受到的主要干扰源的干扰情况。可以得到基站偏移 100%与基站共址两种场景下的边缘用户主要干扰源相似,

因此偏移 100%与共址时吞吐量损失相近；但是当基站偏移 141m 时，邻频干扰基站到边缘用户的距离会小于前面两种场景，导致此时边缘用户受到的邻频干扰变大，使得不同 ACIR 情况下吞吐量损失差异变大。偏移 141m 只是一种可能的情况，实际上另一个系统可以往任意一个方向偏移一定的距离。但是基站共址以及偏移 100%的性能会好于任意偏移，同时因为基站共址与偏移 100%对系统共存性能影响不大，使用共址的基站会减少建站的成本，因此在实际部署时可以着重考虑在同一个位置部署不同运营商的基站。

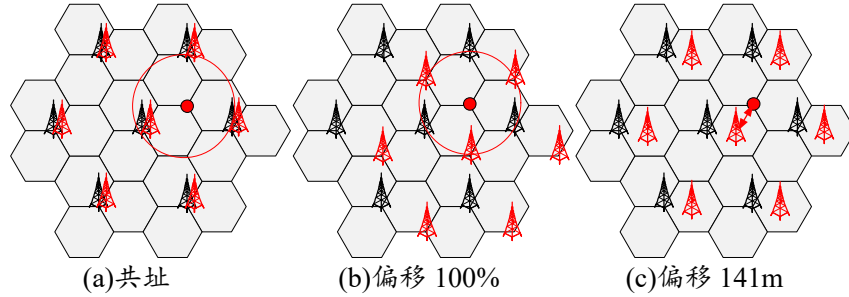


图 4-15 边缘用户受干扰情况分析

(3) 带内阻塞仿真结果与分析

带内阻塞干扰指的是接收端接收有用信号时，受到接收频率两旁强干扰信号的影响。带内阻塞干扰轻则会降低接收灵敏度，重则会导致通信中断。本小节将会研究在 $ACIR=0dB$ 时，上行方向基站接收到的邻频干扰信号强度。

不考虑波束赋形增益的前提下，城市宏小区场景下两系统基站共址与非共址的带内阻塞仿真结果如图 4-16 所示。比较两种拓扑情况下 CDF 曲线中 99%对应的阻塞值，共址状况下的阻塞值为 $-60.99dBm$ ，非共址状况下的阻塞值为 $-60.27dBm$ 。在考虑波束赋形增益的前提下，共址及非共址 CDF 曲线 99%处对应的邻频干扰功率分别为 $-63.26dBm$ 和 $-60.44dBm$ 。

对比有波束赋形以及没有波束赋形，可以看到两组曲线之间有很明显的差距，有波束赋形的邻频干扰功率比没有波束赋形的小了大概 $10dBm$ 。而拓扑共址与拓扑偏移 100%的曲线区别主要表现在邻频干扰功率相对较小时，共址的曲线偏右，但在邻频干扰功率相对较大时，如 CDF 曲线 99%处，拓扑共址对应的邻频干扰值有比拓扑偏移 100%小的趋势。

有波束赋形的情况下，系统中的用户或基站受到邻频干扰影响更小了。这主要是因为发射端的天线对准非服务用户的是旁瓣或者是零陷；在非服务用户的接收端，天线也会将零陷对准干扰，从而进一步削弱干扰信号强度。

基站共址以及偏移 100%的差别来自于小区中心用户以及小区边缘用户的差别。小区中心用户受到的邻频干扰较小，表现为图中曲线的左侧；小区边缘用户受到的邻频干扰较大，表现为图中曲线的右侧。共址情况下，小区中心用户距离

邻频基站更近，因此共址曲线偏右；边缘用户在共址或者是偏移 100% 情况下受到的干扰相似，因此两条曲线在邻频干扰较大时比较重合。这里的结论与上一小节的吻合。

值得注意的是，基站接收到的来自服务用户的信号功率可能会远小于干扰功率。这是因为在路径损耗计算 LOS/NLOS 中，同一位置处的用户相对于两个系统的视距状态取值是不相关的。举个例子，当两个距离很近的用户分属两个系统时，被干扰系统的用户在被干扰系统中处于 LOS 状态，干扰系统的用户在干扰系统中处于 NLOS，在被干扰系统中处于 LOS 状态。这样干扰系统的基站到干扰系统用户的耦合损耗相对较大，因而功控后的功率也相应变大。而干扰基站相对于被干扰系统的用户的路损与被干扰基站相对于被干扰系统的用户的路损相近。因而干扰系统的用户因其较大的发射功率会对被干扰系统用户产生比服务信号更大的干扰。

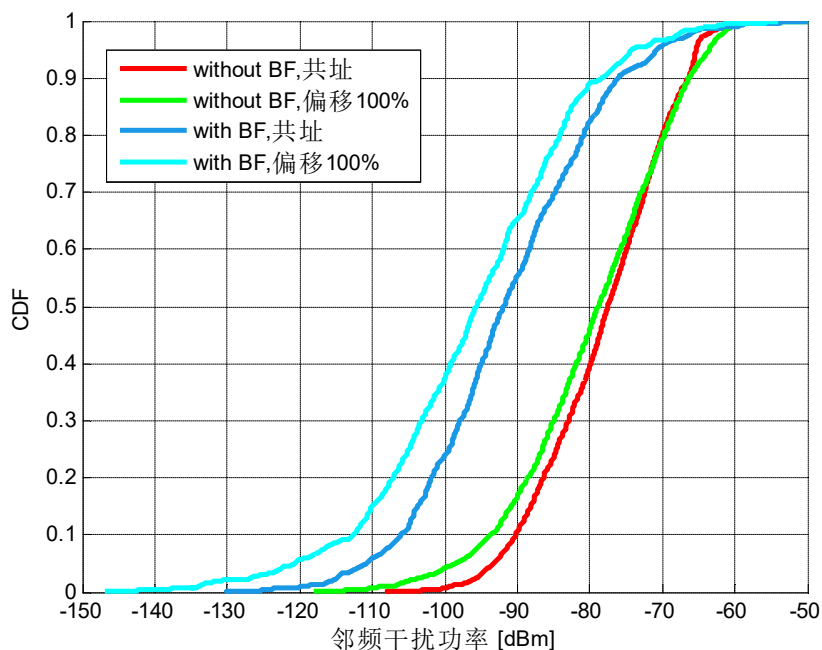


图 4-16 邻频干扰功率 CDF

4.5 本章小结

本章主要研究了 6GHz 以上 NR 系统之间的共存要求。本章首先分析了 6GHz 以上 NR 系统传播模型与 6GHz 以下 NR 系统的异同，并简要介绍了系统拓扑模型。接着，本章研究了 AAS 天线的使用对系统性能的影响。AAS 天线可以灵活地调整阵子上信号的相位和幅度，产生一个在垂直及水平面上的波束赋形增益。波束赋形对系统性能的影响主要体现在提高服务用户的接收服务信号强度，而降

低被干扰用户接收干扰信号强度，从而提高用户的 SINR ，进而提高系统的吞吐量。另外还通过仿真研究了天线阵子数目对系统性能的影响，天线阵子数目越多对系统性能提高越明显，但对波束灵敏度要求越高且系统越复杂。最后，本章从不同场景下的 ACIR 隔离度需求、地理位置偏移以及带内阻塞三个方面研究了共存的相关问题。

第五章 无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络共存研究

2014 年, Google 和 Facebook 提出使用无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 作为基站用来拓展服务区域及提高系统容量^[30], 这项技术对于将来 NR 系统中出现的越来越多的无线设备产生的连接问题提供了解决思路。在研究利用无人机基站辅助的 NR 宏蜂窝网络时, 首先需要解决的问题便是无人机小区与现有的宏蜂窝小区之间的共存问题, 也即是对于两个系统的小区之间的干扰管理问题。常用的干扰管理技术有干扰消除, 干扰随机化以及干扰协调。干扰消除是指在接收端利用解调或解码技术使干扰信号从有用信号中消除。干扰随机化是通过将干扰信号在时域、频域的规律性破坏掉, 使干扰信号变成影响较小的类白噪声信号进而抑制干扰。干扰协调则是在时间或频率上协调小区资源, 避免各个小区之间使用相同资源时产生的干扰。对于无人机小区系统及宏蜂窝网络系统, 在频率上进行干扰协调是个简单方便的解决方案。通常来说, 我们可以将无人机小区系统与宏蜂窝网络系统部署在不同频段, 利用发射机与接收机对邻频信号的抑制来降低两个系统之间的干扰, 实现共存。同时, 也可以从无人机的部署着手, 降低无人机基站对原本的 NR 宏蜂窝小区里的用户的干扰。因此, 本章将会研究使用无人机辅助的 NR 宏蜂窝网络, 解决无人机基站部署以及无人机小区系统与 NR 宏蜂窝网络系统之间的共存问题。

5.1 背景概述

随着直播, 游戏等移动互联网络服务的兴起, 人们对无线数据速率的需求越来越大。宏蜂窝基站覆盖范围大, 能够满足小区中大部分用户的通信需求。但遇到特殊的场景比如运动会或者节假日涌入大量人流时, 宏基站的处理能力就略显不足了。为了解决这个问题, 我们可以利用无人机基站来覆盖宏小区中的热点用户。

无人机基站是指无人机搭载基站模块作为空中基站部署, 实现地面热点覆盖以及与用户进行通信的功能。无人机基站有多种应用场景: (1) 在突发性的应急救援场景中, 突发事件的发生使得地面通信基础设施处于拥塞瘫痪状态。此时无人机可快速进入自然情况复杂的地区, 建立空域通信传输链路, 传输搜救所需要的有效信息。(2) 对于热点小区, 无人机基站可以快速为热点小区提供分流服务, 降低宏基站负载。相比于传统的固定节点, 无人机基站的好处主要有如下三点:

(1) 摆脱地理环境的限制。无人机基站可以盘旋在 100m 以上的空中, 不受地面复杂环境的限制。在诸如商业中心或者狭窄的街道, 无人机基站均可以轻松

为地面用户提供服务而不像固定节点需要考虑各方面的利益关系。

(2) 降低开销。与固定节点不同,设计好算法后,无人机基站可以自动部署到热点地区为用户提供服务,减少了部署地面基站和光缆等设备的成本。

(3) 灵活。在某些场合,例如举办大型赛事或是节日庆典等突发性活动,无人机可以迅速部署并能根据人群的活动调整自己的位置。当活动结束后,小区中的业务需求减少,无人机可以被快速收回。

尽管无人机作为空中基站具有诸多的优点,但需要解决无人机小区与宏小区之间的干扰问题。无人机基站的引入有可能会使原来的蜂窝网络中的用户受到来自无人机基站的干扰过大反而降低了网络的性能。因此寻找无人机小区与宏小区的共存方案成为本章的重点。

自无人机基站这个概念被提出之后,就有很多研究者对其进行了研究。Mohanmod^[31]等人分析了单个无人机辅助地面下的通信系统性能随系统参数的变化规律,系统参数包括无人机的高度和地面用户密度等。但是此文献只面向单个无人机基站场景,没有考虑无人机组网的场景。[32]给出单个无人机可部署的最佳高度,这一高度使得无人机在某个角度下实现对地面的最大覆盖范围。然而,这篇文章仅通过损耗门限来确定覆盖半径,并没有考虑到覆盖概率的问题。[33]分析了无人机小区和地面共享频谱下的网络通信性能,同时也分析了无人机在不同高度下的中断概率。在[34]中,Gruber 证明了无人机高度的灵活性不能转化为性能的增益。此外,不少文献也对无人机的部署进行了研究。[35]采用分布式路径选择算法使得无人机在最少时间内访问尽量多的节点。[36]将无人机的部署问题视为圆盘覆盖问题,该问题的目标是用一些圆盘去覆盖区域中尽可能多的节点。[37]利用了 K-means 的聚类方式部署无人机基站来协助地面小区基站工作。但此文献没有考虑小区间干扰协调,仅用仿真证明了无人机基站可以增强用户的接收信号强度。文献[38]使用遗传算法部署无人机基站并且使用时域小区间干扰协调的方法解决小区间干扰问题。

5.2 系统模型

5.2.1 网络拓扑模型

使用无人机辅助的宏蜂窝网络如图 5-1 所示。 N_{MBS} 个宏小区基站(Macro Base Station, MBS)放置在区域 A 中,用户的分布服从 3GPP TR 36.814^[39]里面提出的热点分布模型。 N_{UE} 个用户设备(User Equipment, UE)分布在各个宏小区中,同时随机且均匀地在宏小区中产生 $N_{hotspot}$ 个热点,并在热点半径 40m 的范围内均匀地撒上 $N_{UE-hotspot}$ 个 UE,其中 $N_{UE-hotspot} = \lfloor P_{hotspot} \cdot N_{UE} / N_{hotspot} \rfloor$ 。这里 $P_{hotspot}$ 为

热点小区用户数与总用户数的比值。剩下 $N_{UE} - N_{UE-hotspot} \cdot N_{hotspot}$ 个 UE 在包括热点区域的整个宏小区中均匀分布。随着小区中用户数量的增加，宏小区基站的负载增加，并且由于 MBS 的有限资源而无法从基站处获取资源的用户也增加。为了解决这个问题，本文采用无人机作为基站来提高网络性能。当网络中存在无人机基站时，UE 可以连接到无人机基站以获得更好的服务。但由于无人机基站资源也是有限的，即使被无人机基站服务也无法获得更好 QoS (Quality of Service) 或无法连接到无人机基站的其余 UE 继续被宏小区基站服务。本文将假设所有无人机在服务 UE 时保持相同的高度。因此，我们可以简化无人机放置问题，并专注于寻找无人机部署的二维坐标，以使得无人机基站对宏基站影响尽量小并为用户提高最好的服务。

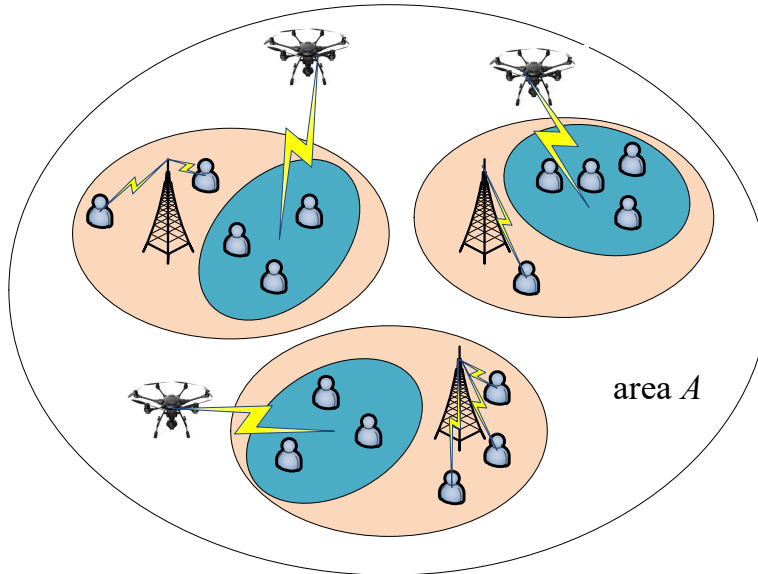


图 5-1 使用无人机辅助的宏蜂窝网络

5.2.2 空对地信道模型

空对地信道模型与地面通信系统的信道模型有所不同。最主要的区别体现在 LOS 的概率不一样。根据文献[40]，LOS 径的概率可由下式计算

$$P_{LOS} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \exp\left(-\beta \left(\frac{180}{\pi} \theta_{etilt} - \alpha\right)\right)} \quad (5-1)$$

其中 θ_{etilt} 表示仰角， α 和 β 是一个与环境有关的常数。由该式可知，LOS 概率随着仰角的增大而增大。而 $\theta_{etilt} = \arctan \frac{h}{d}$ ，换句话说，LOS 概率仅与无人机的高度与无人机到用户的水平距离有关。当无人机到用户的水平距离一定时，无人机高度越高，LOS 概率越大；当无人机的高度一定时，无人机到用户的水平距离越小，LOS 概率越大。LOS 径和 NLOS 径的路径损耗可以表示为

$$PL_{LOS} = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d_{3D}}{c} \right) + \xi_{LOS} \quad (5-2)$$

$$PL_{NLOS} = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d_{3D}}{c} \right) + \xi_{NLOS} \quad (5-3)$$

ξ_{LOS} 和 ξ_{NLOS} 是由环境决定的额外损耗, f_c 为载波频率, d_{3D} 为发射机与接收机的距离。结合式(5-1)(5-2)(5-3)并忽略穿透损耗及阴影衰落, 可知当无人机高度一定时, 传播损耗仅由无人机与用户的水平距离决定, 平均传播损耗模型可由下式(5-4)表示。

$$PL_{UAV} = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c \sqrt{h^2 + d_{2D}^2}}{c} \right) + \xi_{NLOS} + \frac{1}{1 + \alpha \cdot \exp \left(-\beta \left(\frac{180}{\pi} \arctan \frac{h}{d_{2D}} - \alpha \right) \right)} (\xi_{LOS} - \xi_{NLOS}) \quad (5-4)$$

值得注意的一点是, 无人机高度越高虽然可以使得取得 LOS 概率增大, 但是同样地也增大了发射机到接收机的距离导致信号在自由空间传播的损耗变大。因此寻找合适的无人机部署高度是一个课题, 文献[32][34]对此进行了深入研究, 本文限于篇幅不再赘述。

5.2.3 资源模型

在本章中, 用户业务均被假设采用固定业务速率 (constant bit rate, CBR)。用户要求达到的速率为 D_u , 则保证该用户业务速率所需要的频率资源为

$$R_u = \frac{D_u}{R(SINR_u)} \quad (5-5)$$

其中 R_u 为该 UE 占用基站的频率资源, $R(SINR_u)$ 为频谱效率, 该值可以通过 $R(SINR_u) = \log_2(1 + SINR_u)$ 计算。定义基站的某一时刻的负载为该基站同时服务的用户所需频率资源之和为 $LOAD_{BS}$, 它可以通过下式计算

$$R_{BS} \geq LOAD_{BS} = \sum_{u \in U_{BS}} R_u \quad (5-6)$$

这里 R_{BS} 表示基站所拥有的全部频率资源, U_{BS} 表示被基站服务的 UE 的集合。当 $LOAD_{BS} > R_{BS}$ 时, 意味着某些 UE 不能被这个基站服务了。

在频段资源划分上, 通常来说宏基站可以使用稍低的频段, 以抵抗过大的路径损耗, 而无人机基站由于距离用户较近可以使用稍高的频段。

5.3 基于二分 K 均值聚类算法的无人机部署方案

考虑无人机基站组成的无人机小区系统与现有的 NR 宏基站组成的宏蜂窝系统之间的共存, 首先要解决的一个问题便是如何部署无人机基站。我们希望无人

机基站系统能够“即插即用”，即是无人机基站能够自动部署到宏蜂窝网络中的热点区域，并且找到需要从 MBS 卸下的 UE 并使用无人机基站为他们提供服务，从而最大化整个系统的吞吐量。该问题是一个优化问题，并且该优化问题是非连续非凸以及 NP-hard 的^[19]。定义用户 u 接收到来自 MBS m 及 UAV v 的 SINR 分别为

$$SINR_u^m = \frac{P_u^m}{\sum_{i \in M, i \neq m} P_u^i + \sum_{j \in V} P_u^j + N} \quad (5-7)$$

$$SINR_u^v = \frac{P_u^v}{\sum_{i \in M} P_u^i + \sum_{j \in V, j \neq v} P_u^j + N} \quad (5-8)$$

其中 $P_u^m = P_M / PL_u^m$ ， $P_u^v = P_V / PL_u^v$ 分别为接收到 MBS m 和 UAV v 信号的功率， PL_u^m 和 PL_u^v 分别是它们之间的路损。 $\sum_{i \in M, i \neq m} P_u^i$ 和 $\sum_{j \in V, j \neq v} P_u^j$ 是除了服务基站的来自 MBS 和 UAV 的总接收功率。假设所有无人机工作在同一高度，由于原有的宏蜂窝系统中用户与宏基站的位置固定，用户接收到的服务信号与干扰信号与无人机部署有关，所以 UE 的 SINR 可以写成一个仅与无人机位置有关的函数，如下式 (5-9)(5-10) 所示。 (x_v, y_v) 表示 UAV v 的位置且 $(x_v, y_v) \in A$ 。

$$SINR_u^m = SINR_u^m(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_v, y_v) \quad (5-9)$$

$$SINR_u^v = SINR_u^v(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_v, y_v) \quad (5-10)$$

为了最大限度地利用无人机基站，假设每个无人机尽可能地服务于尽可能多的 UE，直到其频率资源耗尽为止。因此，无人机基站将优先考虑那些需要较少频率资源的 UE。相反，对于宏小区基站则公平地为每个 UE 服务直到达到频率资源的上限。在本文中，我们将中断概率定义为由于资源有限而无法访问基站的 UE 数量与 UE 总数的比率，可以表示为

$$P_{outage} = 1 - \frac{\sum_{m \in M} \sum_{u \in U_m} a_u^m}{N_{MBS} \cdot N_{UE}} \quad (5-11)$$

这里 a_u^m 取值为 0 或 1，分别表示 UE 没有从 MBS m 申请到频率资源以及成功从 MBS m 申请到频率资源，并且该值受限于

$$\sum_{u \in U_m} a_u^m \cdot R_u = LOAD_m \leq R_{MBS} \quad (5-12)$$

结合式(5-9) (5-10) (5-11) (5-12)，我们可以得到约束方程

$$\begin{aligned} \min \quad & P_{outage} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} (x_v, y_v) \in A \\ LOAD_m \leq R_{MBS} \end{cases} \end{aligned} \quad (5-13)$$

因此，上式(5-13)的目的是找出目标区域中无人机部署的最佳位置，以最小化网

络中的 P_{outage} 。为了解决这个问题，本文将使用二分 K 均值聚类算法。

聚类算法是一种无监督学习算法，它将数据集划分为预先设定的 K 类，并且使得每个类内数据的相似度最高，各类之间的数据差别尽可能大。K 均值聚类算法是典型的基于距离的聚类算法，该算法选定距离作为评价相似性的指标，当两个数据之间的距离越近时，便认为它们的相似度越大。但对传统的 K 均值聚类算法来说，初始聚类中心点的选择对结果的影响很大，因为聚类结果在很多情况下只会收敛到局部最小值而不是全局最小值。为此，有些学者提出了二分 K 均值聚类算法。二分 K 均值聚类算法首先将所有点看成一个簇，然后利用传统 K 均值聚类算法将该簇一分为二，之后再对能最大限度降低聚类代价函数的簇使用传统均值聚类算法一分为二，并以此进行下去直到簇的数目等于 K 为止。在本章中选择簇内点的误差平方和作为聚类代价函数，该值越小表示数据点越接近它们的中心，所以在二分 K 聚类算法中需要对误差平方和最大的簇进行一分为二，因为误差平方和越大代表该簇聚类效果越差，越有可能是多个簇被当成了一个簇。

利用二分 K 均值聚类算法可以将区域 A 中的 UE 划分为 K 个子集，这些子集表示由不同无人机基站服务的不同 UE 集合。但是，如果仅仅通过用户的位置确定无人机基站的位置会带来两个问题，一是原本就能通过被宏基站服务便能获得较好服务质量的用户再重新连接到无人机基站是没有意义的；二是无人机基站有可能距离宏蜂窝基站过近，无人机基站下行对宏小区用户的上行造成较为严重的干扰。因此，在使用二分 K 均值聚类算法时需要考虑用户当前的 QoS。迫切需要从宏小区基站卸下接入无人机基站的 UE 的一般位于宏小区边缘且成簇。这类 UE 受到相邻小区干扰大，SINR 值小，需要服务它的基站提供大量的频率资源以维持该 UE 的固定用户速率。另外，正因为这类 UE 位于宏小区边缘且成簇，所以在此处部署无人机基站的话可以尽可能地减小宏小区与无人机小区之间的干扰，并能使得无人机基站的资源得到最大限度的使用。基于用户当前 QoS 的二分 K 均值聚类算法一个主要思想是将 K 均值聚类看成 $K + N_{MBS}$ 聚类，而这 N_{MBS} 个质点是不动的，看作是宏基站，K 个质点看作是无人机基站。

该算法的实现步骤由算法 1 和算法 2 描述。由上面的证明可知，在算法 1 中，从基站接收到的 SINR 可以用 UE 与其服务基站之间的距离代替，这是因为 SINR 可以被写成仅与距离有关的函数。因此，我们可以通过距离比较找出迫切需要从宏小区基站卸载的 UE 并确定无人机基站的位置。

在算法 1 中，首先需要输入用户的位置及用户到其原来的服务宏基站的距离 (line 1)，然后创建 $K=2$ 个点作为起始质心 (line 2~3)。当任意点的簇分配结果发生改变时，对数据集中的每个用户计算各自到所有质心之间的欧氏距离，如果用户到某个质心的欧氏距离小于用户到其原本服务宏基站的欧氏距离并且无人

基站资源允许该用户接入则将该用户分配到这个质心所属的簇，否则仍将该用户连接到宏基站，并用 *clusterAssignment* 记录结果 (line 4~18)。最后需要更新簇中心，对每一个簇，计算簇中所有点的均值并将均值作为质心 (line 19)。该算法中循环的终止条件是每个点的簇分配结果没有发生改变，但为了提高效率也可以设定最大的循环次数。

算法 1 基于用户当前 QoS 的 K 均值聚类算法

1	input UEs location L ($L[u]=(x_u, y_u)$) and the distance d_u^m between UE u and their serving MBS m
2	let $K=2$
3	randomly initialize K centroids
4	$clusterChange=True$, initialize $clusterAssignment$
5	while $clusterChange$
6	$clusterChange=False$
7	for $u=1:\text{len}(L)$
8	calculate the Euclidean distance between UE u and each centroid k respectively
9	get the smallest distance d_u^k
10	if $d_u^k < d_u^m$
11	calculate the resource R_u that UE u will use
12	if $LOAD_k + R_u \leq R_{UAV}$
13	assign the UE u to the cluster k , and use $clusterAssignment$ to record it
14	$LOAD_k += R_u$
15	else
16	UE remains connecting or change to connect to MBS, and use $clusterAssignment$ to record it
17	if $clusterAssignment$ changed
18	$clusterChange=True$
19	update the centroid of each cluster

算法 2 二分 K 均值聚类算法

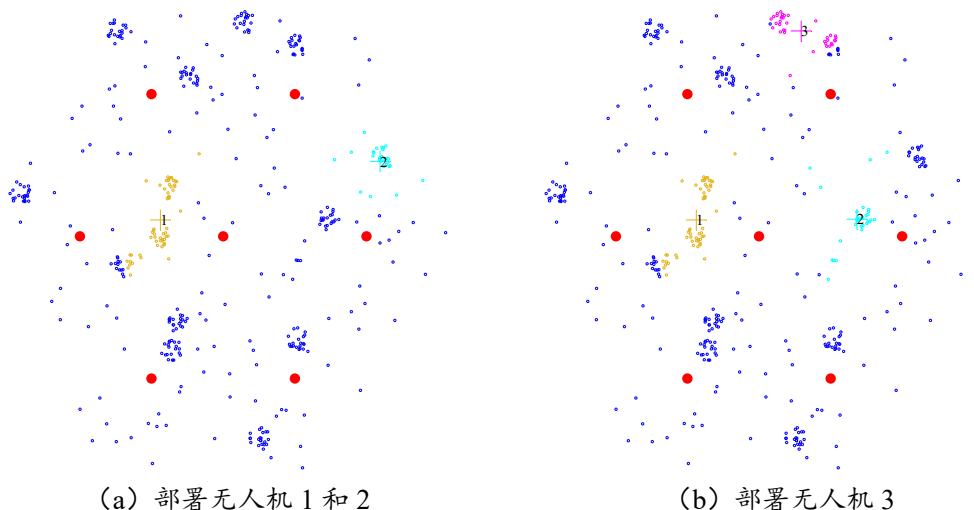
1	input K
2	$numCluster=1$
3	while $numCluster < K$
4	for $k=1: numCluster$

5	calculate the SSE of cluster k
6	implement K-means clustering algorithm on cluster k
7	calculate the SSE after splitting the cluster k into two
8	select the cluster that minimizes the SSE, and divide it into two
9	$numCluster += 1$

算法 2 中，首先把所有数据初始化为 1 个簇（line 2）。当簇的数目小于输入的 K 时，对每一个簇计算这个簇的误差平方和，并在该簇上使用算法 1 将其划分为两个簇，然后计算划分为两个簇后的总误差平方和（line 3~7）。最后选择使得误差平方和最小的那个簇进行划分操作（line 8~9）。

图 5-2 是往宏蜂窝小区中部署 5 台无人机的过程。红点表示宏基站，蓝色空心点表示由宏基站服务的用户，彩色空心点表示由无人机基站服务的用户，十字代表无人基站部署的位置。图中的数字代表无人机编号。每个图表代表一次迭代过程。最开始，拓扑中所有用户均由宏小区基站服务。图 5-2（a~d）开始往宏小区蜂窝网络中逐步部署无人机：（a）代表执行了第一次迭代，将原来的一个簇划分成为了两个，并将无人机部署到了图中十字点；（b）代表执行了第二次迭代，由于将原来右半边的簇一分为二后能使误差平方和最小，因此将其进行划分操作，并将无人机 3 部署到图中粉色十字的位置；（c）和（d）的过程与（b）类似。

可以看到，经过 4 次迭代后，无人机部署的位置往往位于小区边缘并且刚好处于热点小区中心的位置。无人机基站可能覆盖了超过 1 个热点小区，但仍有热点小区的用户不能全部被无人机基站覆盖，这些用户距离无人机基站较远所以仍然可以被宏基站服务。



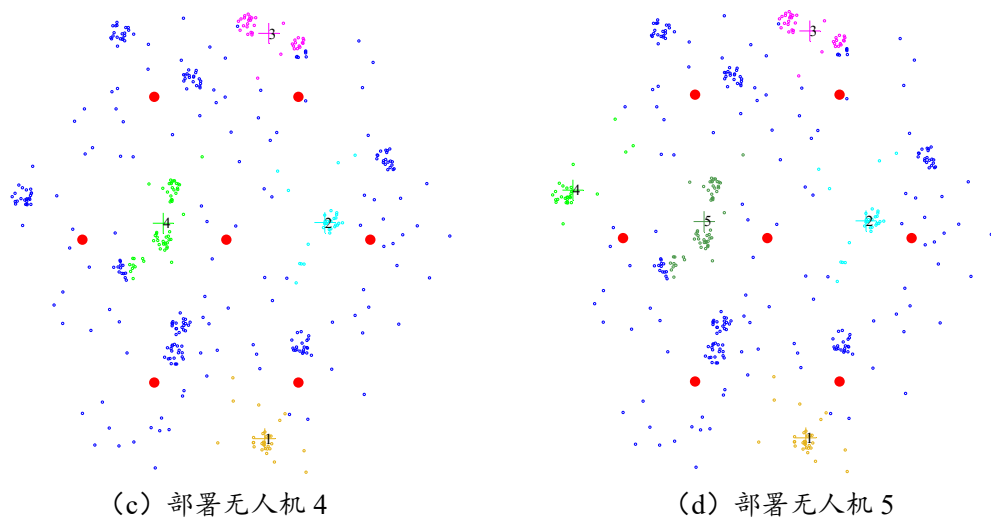


图 5-2 部署无人机基站过程

5.4 仿真结果及分析

5.4.1 仿真平台搭建

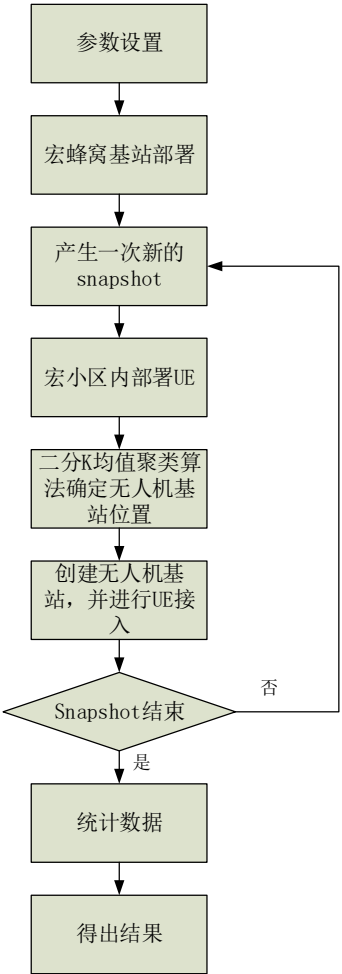


图 5-3 仿真流程图

本章同样利用蒙特卡洛仿真法搭建仿真平台。与前两章使用的仿真平台不同的是，在部署完单层的宏蜂窝网络后，需要利用二分 K 均值聚类算法部署无人机基站，具体仿真流程图如图 5-3 所示。为了简单起见，本仿真平台中对传播模型进行了简化，忽略了穿透损耗及阴影衰落。

5.4.2 仿真参数

具体的仿真参数设置如表 5-1 所示。

表 5-1 无人机小区系统与宏蜂窝网络系统共存仿真参数

参数	符号	值
宏基站数目	N_{MBS}	7
每个宏小区中 UE 数目	N_{UE}	30~100
无人机基站数目	N_{UAV}	4~12
每个宏小区中热点数目	$N_{hotspot}$	2
热点用户数与总用户数比率	$P_{hotspot}$	2/3
宏基站间距离	ISD	500m
无人机基站高度	h_{UAV}	150m
宏基站、无人机基站中心频率	f_c	3GHz、4GHz
系统带宽	BW	20MHz
固定用户速率	D_u	1Mbps
宏基站、无人机基站发射功率	P_M 、 P_V	43Bm、33dBm

5.4.3 结果分析

(1) 空对地信道模型与无人机高度的关系

与地面基站不同，无人机基站的高度可以灵活变化，同时，空对地通信系统中的传播损耗模型也不一样。首先，空对地传播模型中的 LOS 径概率随着发射机的高度的不同而不同。发射机高度越高 LOS 径概率越大。因为发射机高度越高，越有机会躲开障碍物的阻挡直接对准接收机。无人机高度分别为 50m、100m、150m 时，无人机到其服务用户的 LOS 径概率 CDF 如图 5-4 所示。可以看到，随着无人机基站高度的升高，CDF 曲线越向右偏移。这意味着，无人机基站越高，被服务用户能取得 LOS 径的概率越大。当无人机基站高度达到 150m 时，有接近 95% 的被服务用户必能取得 LOS 径。

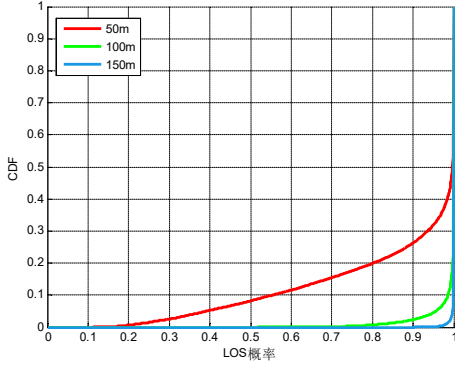


图 5-4 不同高度下 LOS 概率分布

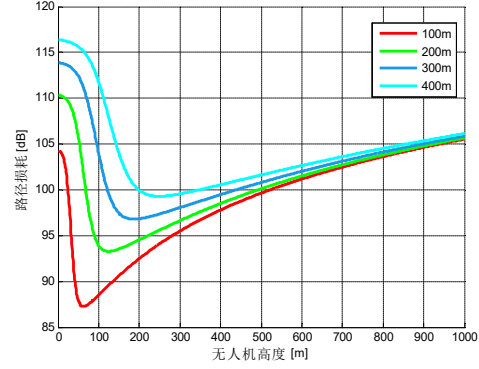


图 5-5 不同高度与服务半径下的路径损耗

LOS 径取得的概率越大并不会使得平均路径损耗越小。因为当无人机基站服务半径一定时，无人机高度越高，无人机与用户之间的距离越大，导致路径损耗也相应变大。当无人机服务半径分别为 100m、200m、300m 及 400m 时，路径损耗随无人机高度的变化如图 5-5 所示。可以看到下面四条曲线的路径损耗值随着无人机高度变化都是先变小后变大，也即均能取得极小值，意味着 LOS 径概率提高带来的增益先是远大于距离增加带来的减益，后来逐渐抵消不了距离增加带来的减益。不同服务半径取得极小值时所需要的无人机高度不一样。服务半径越大，取得极小值时无人机高度越高。

（2）无人机小区系统与宏蜂窝网络系统共存

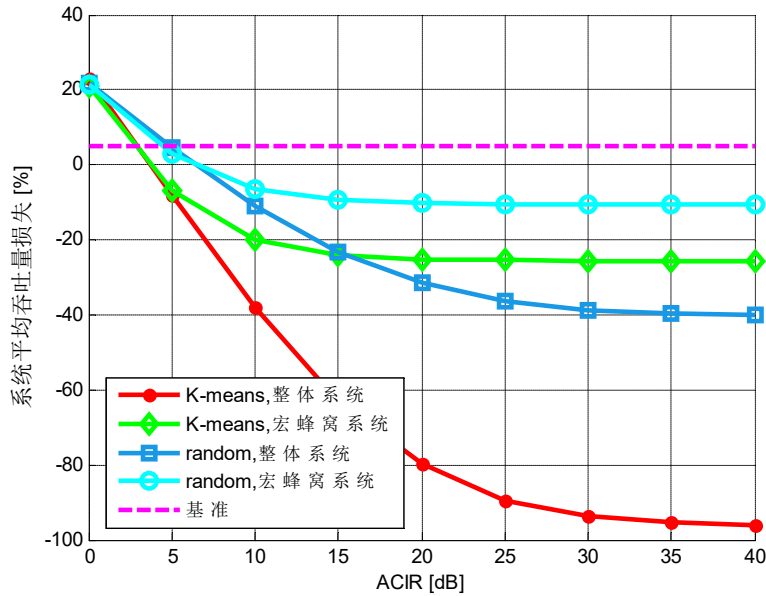


图 5-6 不同部署方案下系统平均吞吐量损失

本文中将无人机小区系统与宏蜂窝网络系统部署在不同频段来实现频域干扰协调。首先需要关注的是引入无人机小区系统后对原有的宏蜂窝网络系统造成的影响。由前两章所述，部署在相邻或相近频段的两个系统会产生邻频干扰，邻频干扰可通过接收机和发射机的抑制进行减弱，而衡量发射机与接收机性能的便

是 ACIR。在这里我们主要关注无人机小区系统下行对宏蜂窝网络系统的下行造成的邻频干扰。

➤ 平均吞吐量损失

图 5-6 展示的是使用二分 K 均值聚类算法以及随机部署两种无人机基站部署方案，整体系统及仅宏蜂窝网络系统的平均吞吐量损失随着 ACIR 的变化情况。图中吞吐量损失存在负值意味着引入无人机小区系统后，新系统的吞吐量比原有的宏蜂窝网络系统的吞吐量要高。

- ACIR 隔离度要求

可以看到，当 ACIR 取值大于 5dB 时，4 条曲线都位于 5% 吞吐量损失曲线的下方。说明当 ACIR 隔离度大于 5dB 时，可以认为两个系统可以共存；当 ACIR 隔离度小于 5dB 时，无人机小区系统的引入反而会导致原有系统的吞吐量下降，达不到应有的作用。

可以看到无人机基站系统与宏蜂窝网络之间共存所需要的 ACIR 隔离度较小，这里有两个原因，一是无人机基站部署到宏小区的边缘，远离宏小区中心用户，对宏小区中心用户造成的影响小，宏基站对无人机基站的用户影响同理；而对于小区边缘用户来说，大部分边缘用户被无人机基站服务了，反而提高了原来宏小区中边缘用户的吞吐量。二是无人机基站是一个小功率基站，宏小区用户接收到无人机基站的干扰功率较小。

- 整体系统与宏蜂窝系统的吞吐量损失

整体系统指的是无人机小区系统与宏蜂窝网络系统组成的整个新系统，宏蜂窝系统指的是引入无人机小区系统后的原本的宏蜂窝网络系统。随着 ACIR 的增大，这两种情况下的 ACIR 损失都在下降，最终能得到一个负值。意味着在达到一定 ACIR 隔离度后，引入无人机小区系统确实能够使整体系统及原本的宏蜂窝网络系统的吞吐量提高。

原本的宏蜂窝网络系统的平均吞吐量能得到提高主要是因为，宏小区中的边缘用户被无人机基站服务，而使得整体得到提高。同理，整体系统平均吞吐量的提高也是因为使用了无人机基站去服务宏小区中的边缘用户。另外，在 ACIR 值较大时，整体系统与宏蜂窝网络系统的平均吞吐量不一样，总的来说整体系统的平均吞吐量要大。这说明随着 ACIR 的变大系统性能的提升主要来源于宏基站对无人机小区用户干扰的减小，而宏小区中的用户干扰也逐渐恢复到引入无人机小区系统之前的水平。

- 二分 K 均值聚类算法与随机部署无人机的效果

可以看到使用二分 K 均值聚类算法部署无人机基站的效果要远远好于随机部署无人机基站，不管是整体系统还是宏蜂窝网络系统都能达到比随机部署更大

的吞吐量。另外，注意到，在 ACIR 较大时，如 40dB，使用二分 K 均值聚类算法能达到接近 100%的吞吐量提高，而随即部署无人机仅能达到 40%。这是因为随机部署往往不能将无人机部署到用户需要的地方去，即使两个系统之间的干扰很小，随机部署方法仍然不能有效提高吞吐量。

➤ 边缘用户吞吐量损失

整体系统及仅宏蜂窝网络系统的边缘用户吞吐量损失随着 ACIR 的变化情况如图 5-7 所示。当 ACIR 隔离度大于 20dB 时，四条曲线趋于收敛，引入无人机小区系统后边缘用户吞吐量提高大约 10%到 30%。

边缘用户吞吐量损失与系统平均吞吐量损失类似，由于无人机基站服务了原本宏小区中的边缘用户，使得宏小区中的边缘用户吞吐量提高，从而带动了整个系统的吞吐量提高。

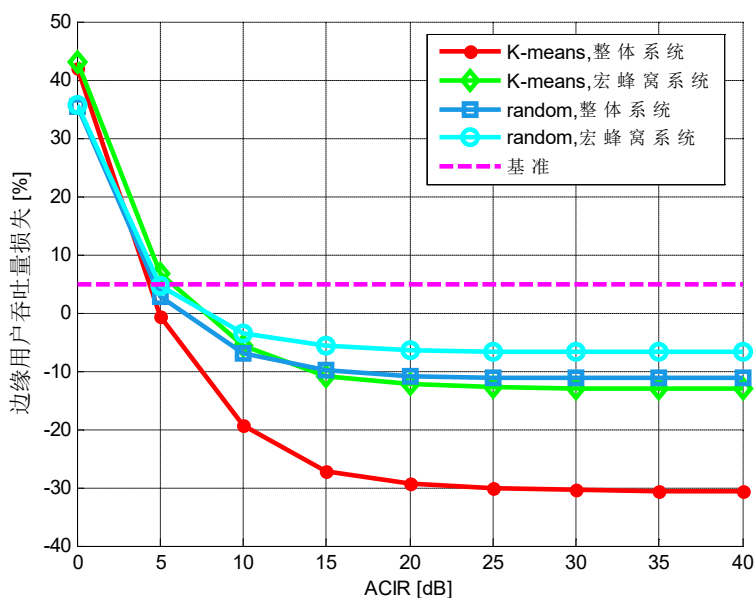


图 5-7 不同部署方案下边缘用户吞吐量损失

(3) 用户数目与无人机基站数目对系统的影响

➤ 用户数目对系统的影响

图 5-8 展示的是 outage 概率随着每个小区中用户数目增多的变化情况。可以看到，图中三条曲线由上之下分别是不往网络中部署无人机基站，随机部署无人机基站以及使用二分 K 均值聚类算法部署无人机基站。虽然三条曲线的 outage 概率均随着小区中用户数目的增多而增多，但是不部署无人机基站的 outage 是最大的，随机部署无人机基站次之，利用二分 K 均值聚类算法的最少。

由于基站的资源有限，所以当有用户想接入基站时可能会因为基站负载过大而拒绝该名用户接入。在原本的宏蜂窝网络系统中，为了服务达到小区边缘用户的固定用户速率，宏基站需要提供大量的资源，而导致别的用户无法接入。引入

无人机小区系统后,边缘用户和热点用户均能被无人机基站服务,而且无人机基站距离这些用户近,所需要的频率资源将会更少,从而大大减轻宏基站负载,而又能提高小区吞吐量。

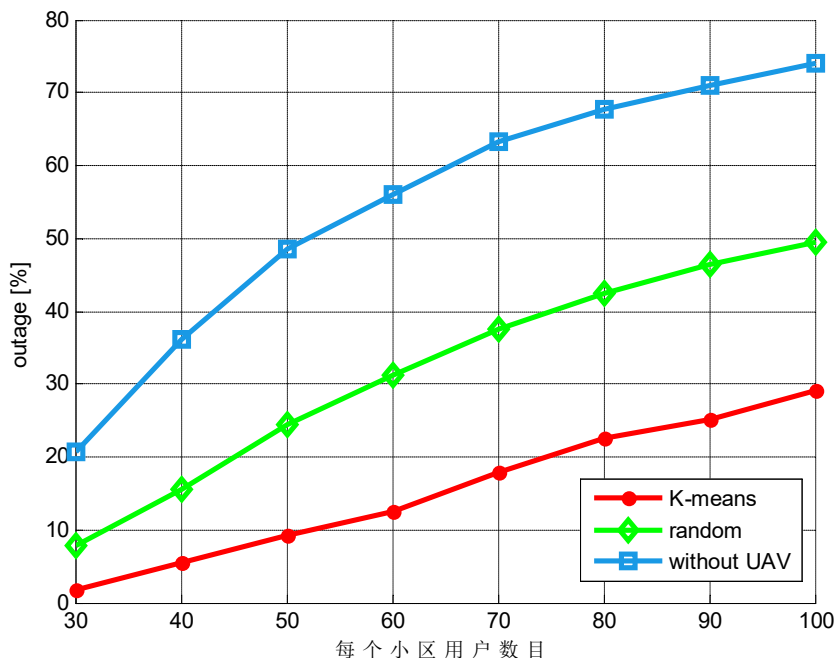
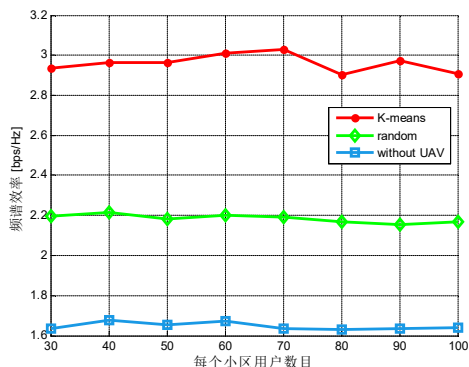
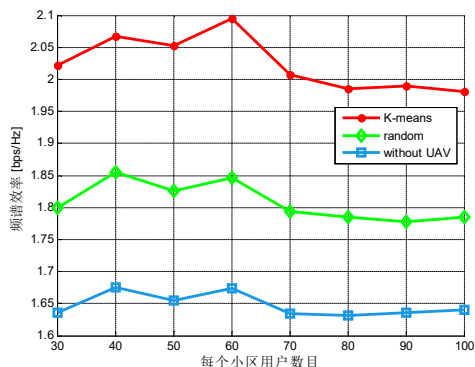


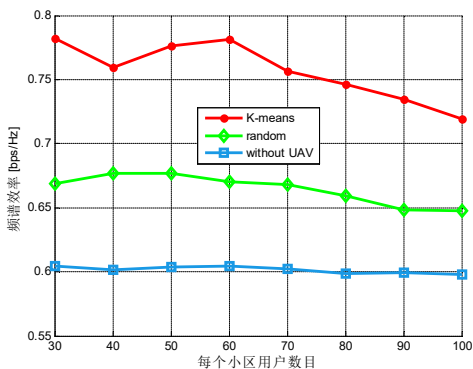
图 5-8 outage 概率随用户数目的变化



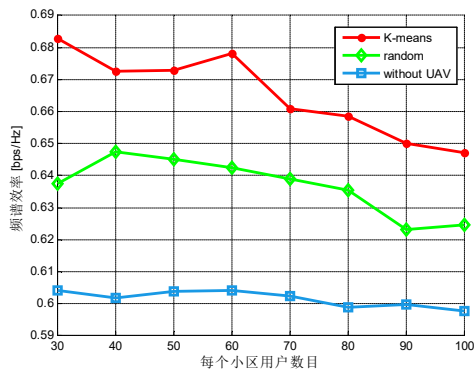
(a)整个系统平均频谱效率



(b)仅宏小区平均频谱效率



(c)整个系统边缘用户频谱效率



(d)仅宏小区边缘用户频谱效率

图 5-9 频谱效率随用户数目变化

用户数目的变化对频谱效率的影响如图 5-9 所示。可以看到使用二分 K 均值聚类算法部署无人机在不同状况下均能取得最大的频谱效率。各图中三条曲线的表现较为平稳，使用二分 K 均值聚类算法部署无人机基站以及随机部署无人机基站的频谱效率相比于不使用无人机基站均有大幅提高。

但是也可以看到随着用户数目的增多二分 K 均值聚类算法的性能有所下降，对边缘用户的表现来说尤为明显。这主要是因为无人机基站的服务能力有限，并不是所有边缘用户都能接入无人机基站。随着用户数目的增多，无法接入无人机基站的用户比例也随之增多，这些用户受到的干扰较大频谱效率较低，因此在统计上来看拉低了整体的平均频谱效率。

➤ 无人机基站数目对系统的影响

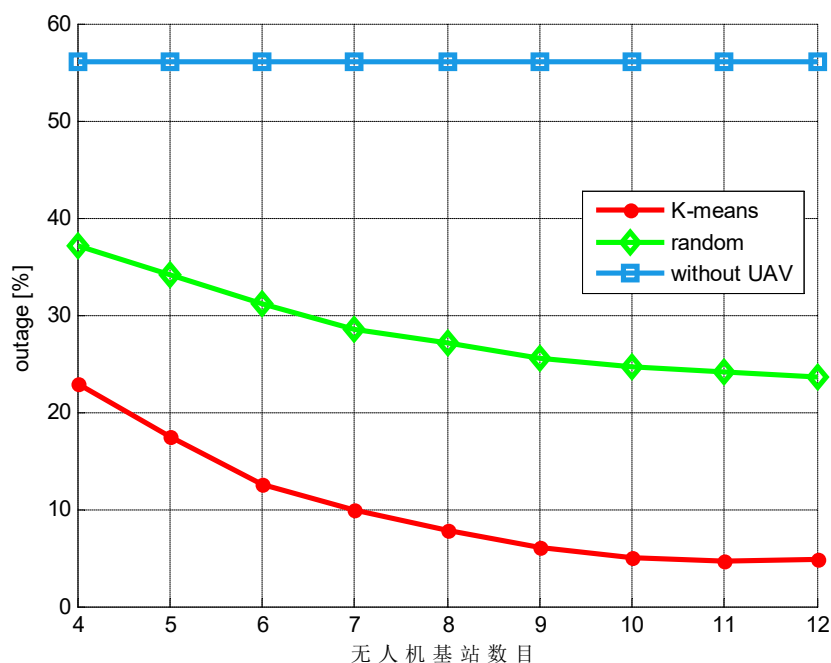


图 5-10 outage 概率随无人机数目的变化

如图 5-10 所示是随着无人机基站数目的增多，系统的 outage 概率变化状况。可以看到，随着无人机数目的增多，outage 概率不断下降，说明无人机数目的增多是能降低 outage 概率的。但是无人机数目在 10 和 12 时 outage 概率变化不大，说明此时部署的无人机造成了浪费。

无人机基站数目对频谱效率的影响如图 5-11 所示。可以看到在图 5-11 (a) 中，系统平均频谱效率先随无人机数目的增多而变大，但当无人机基站数目大于 6 时，频谱效率又随着无人机基站数目的增多而变小。图 5-11 (b~d) 中结果相近，随着无人机数目的增多频谱效率变大，但是当无人机数目大于 9 时逐渐趋于平缓。

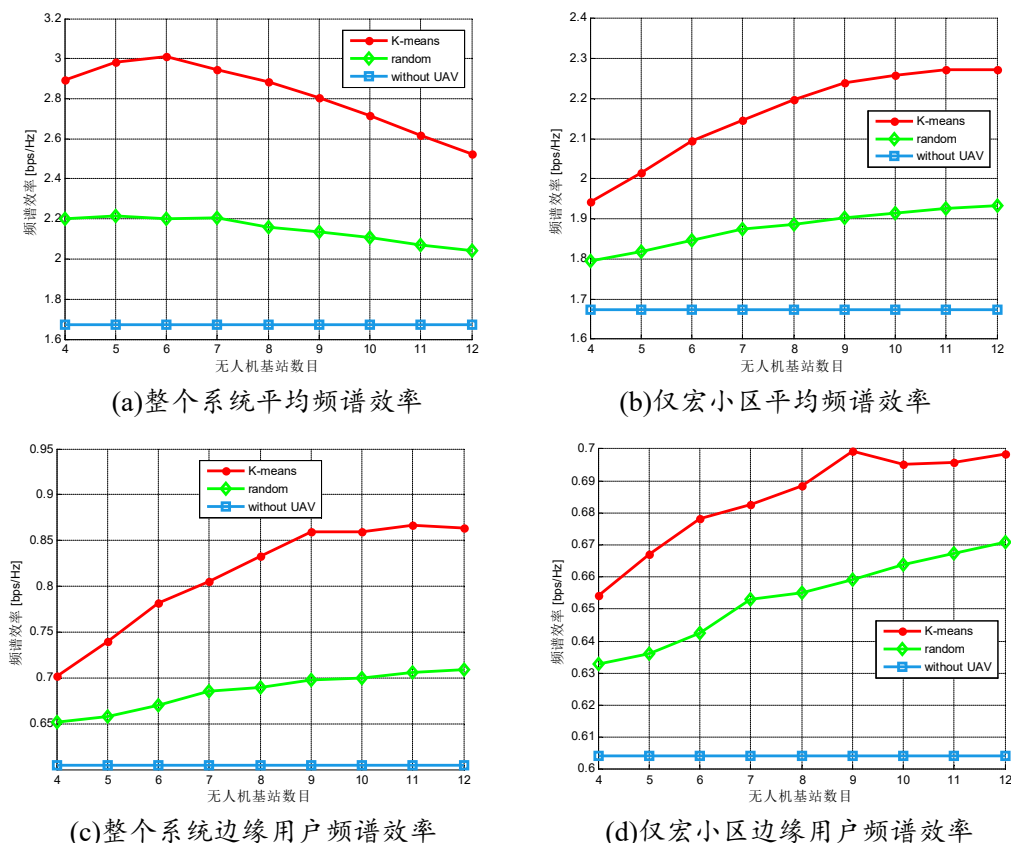


图 5-11 频谱效率随无人机数目变化

产生这个结果的原因是，如果往宏蜂窝网络中部署的无人机数目如果不足，则对小区中的热点覆盖能力不足，带来不了明显的系统性能提升。但是若往宏蜂窝网络中部署了过多的无人机，则会导致无人机基站对宏小区用户带来的邻频干扰变大，同时也会使得无人机小区内的用户受到的同频干扰变大，反而导致系统性能的下降。综合来看，当前仿真假设前提下，往蜂窝网络中部署 6 至 9 台无人机基站能得到不错的结果。

5.5 本章小结

本章主要解决了无人机辅助 NR 宏蜂窝网络中无人机的部署以及无人机小区系统与宏蜂窝网络系统共存的问题。本章中主要利用频率干扰协调处理无人机小区系统与宏蜂窝网络系统之间的干扰，通过将无人机小区系统与宏蜂窝网络系统部署在不同频段，利用发射机与接收机对邻频信号的抑制解决干扰问题。通过仿真得出，当 ACIR 隔离度大于 5dB 时无人机小区系统与宏蜂窝网络系统可以共存。另外，本章使用了二分 K 均值聚类算法解决无人机基站的部署问题。该方法相比于随机部署无人机基站对系统性能有大幅提升。

第六章 总结与展望

6.1 研究工作总结

本论文主要围绕系统共存进行研究，主要包括 NR 系统与 LTE 系统的共存，NR 系统之间的共存以及无人机辅助的 NR 蜂窝网络共存三部分。本文在这三部分中主要通过研究上下行链路中接收到的 SINR，并将 SINR 映射到吞吐量，得出在不同 ACIR 隔离度情况下的吞吐量损失，然后以吞吐量损失少于 5% 作为衡量标准得到系统共存所需要的 ACIR 隔离度。除此之外，本文在各章节中还进一步研究了共存的相关问题。

第一章主要介绍了 5G NR 系统的发展背景，共存研究的目的以及论文主要内容如研究成果。首先介绍了研究背景与研究意义，包括 5G 系统诞生必要性、5G 在系统性能上的提升以及共存研究的目的等。然后对本文主要研究的内容进行简单的概括介绍，包括 NR 系统与 LTE 系统的共存，NR 系统之间的共存以及无人机辅助的 NR 蜂窝网络共存三部分。

第二章主要介绍 NR 系统共存干扰原理，具体从 NR 系统的关键技术以及系统间的共存干扰原理两部分进行说明。首先介绍了人们对 5G 系统的期望以及 5G 使用到的关键技术。然后分析干扰的由来，并对衡量发射机和接收机对邻频信号的抑制作用的重要指标 ACIR 进行详细的介绍，为本文下面的研究提供理论依据。

第三章对 NR 系统与 LTE 系统之间的共存干扰进行了研究。首先从传播损耗模型、天线模型、上行传输功率控制模型以及 ACIR 模型等几个角度介绍了 NR 系统与 LTE 系统的模型。接着利用蒙特卡洛仿真技术搭建仿真平台。最后利用该仿真平台对 NR 系统干扰 LTE 系统以及 LTE 系统干扰 NR 系统进行了研究，分别从下行干扰下行、上行干扰上行两个方面给出共存隔离度建议，并分析了上行用户数目不同时对 ACIR 隔离度的影响。从总体来说当 ACIR 隔离度大于 25dB 时 NR 系统与 LTE 系统能够达到共存要求。

第四章对 NR 系统之间的共存干扰进行了研究。本章首先分析了 6GHz 以上 NR 系统传播模型与 6GHz 以下 NR 系统的异同。然后着重研究了波束赋形对系统性能的影响。波束赋形对系统性能的影响主要体现在提高服务用户的接收服务信号强度，而降低被干扰用户接收干扰信号强度，从而提高用户的 SINR，进而提高系统的吞吐量。同时天线数目也会对系统性能产生影响，天线数目越多能获得的波束赋形增益越大，但同时对波束的精度要求越高。最后本章对 3GPP 提出的三个应用场景进行了仿真，得到了不同场景下的 ACIR 隔离度要求大致在 10dB

至 15dB 范围内。

第五章主要解决了无人机辅助 NR 宏蜂窝网络中无人机的部署以及无人机小区系统与宏蜂窝网络系统共存的问题。本章首先研究了无人机的部署方案，这里使用了二分 K 均值聚类算法解决无人机基站的部署问题，并通过仿真提出该方法相比于随机部署无人机基站对系统性能有大幅提升。然后，本章在此部署无人机方案的前提下，研究了在特定场景下无人机系统与蜂窝宏小区网络系统共存时所需要的 ACIR 隔离度大概为 5dB。最后分析了无人机辅助 NR 宏蜂窝网络对性能的提升。

6.2 下一步的研究计划

本论文主要研究了不同通信系统之间的共存，但是系统之间除了共存还需要有必需的协作。对系统内以及系统间的协作进行探讨，甚至对网络融合方面进行研究，这是大幅提高整个系统性能的必要步骤。另外，共存不仅体现在系统级层面，不同系统之间信令甚至是物理层的设计都会对两个通信系统的共存产生非常重要的影响。因此，下一步的研究将会集中在网络协作以及物理层与信令的设计方面。

对于无人机辅助的宏蜂窝网络来说，制约该技术发展的因素主要是无人机基站的技术不成熟。一个是目前民用的无人机主要是通过电池供能，导致续航时间短承载的重量低。二是无人机基站回传数据到地面的问题。另外，无人机辅助的宏蜂窝网络也可以视作一个异构网络，可以从异构网络的干扰管理方案中获得思路，解决无人机小区系统与宏蜂窝网络系统之间的共存问题。因此下一步的研究也可以从无人机回传数据或者是使用异构网络干扰管理的思路实现共存两方面着手。

参考文献

- [1] CY329. 2017 年中国数据流量行业发展概况分析[EB/OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201705/523250.html>, 2017-05-17.
- [2] J. G. Andrews et al. What Will 5G Be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] M. Kamel, W. Hamouda and A. Youssef. Ultra-Dense Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [4] 啜钢. 移动通信原理与系统[M]. 北京邮电大学出版社, 2015.
- [5] 陈佳佳, 王坦, 曾昱祺. 全球 5G 频谱发展动态[J]. 电信技术, 2019(01):13-17.
- [6] ITU. Radio Regulations Articles[M]. 2th ed. Switzerland: Geneva, 2012: 118-169.
- [7] 吴江, 梁双春, 牛凯, 吴伟陵. WCDMA 与其它蜂窝系统共存时电磁兼容性能研究[J]. 电波科学学报, 2004(06): 673-678.
- [8] 王大鹏, 李新. TD-LTE 无线网络与既有网络的干扰分析[J]. 移动通信, 2011, 35(19): 33-38.
- [9] 房英龙, 张欣, 郑瑞明, 杨大成. 3GPP LTE 系统间共存干扰研究[J]. 广东通信技术, 2009, 29(03): 38-43.
- [10] 张萌, 于海, 付昱霖, 常永宇. 移动卫星系统与 LTE 网络间干扰共存性能的研究(英文)[J]. 中国通信, 2013, 10(07): 1-11.
- [11] 蔡凤恩, 成蕾, 刘欢, 高月红. 非授权频段中 LTE 和 Wi-Fi 共存系统性能研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2015, 28(10): 88-92.
- [12] 闫志宇. 5G 新空口系统和 LTE 系统的共存研究[J]. 电信网技术, 2017(12): 36-40.
- [13] H. Kim, S. Cho, J. Oh and G. Jo. Analysis of LTE and NB-IoT coexistence[A]. // 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)[C], Jeju, 2017: 870-872.
- [14] 李贵勇, 杨艳娟, 邢苹苹, 李安艺. NB-IoT 与现存网络系统干扰共存研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(06): 19-23.
- [15] T. Levanen et al. 5G new radio and LTE uplink coexistence[A]. // 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C], Barcelona, 2018: 1-6.
- [16] K. Xia, Y. Wang and D. Zhang. Coexistence interference evaluation and analysis

- of LTE with 3D-MIMO system[A]. // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)[C], Montreal, QC, 2017: 1-6.
- [17]ITU-R M.2412-0, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020[S]. 2017.
- [18]3GPP TR 37.842 V13.2.0, Radio Frequency (RF) requirement background for Active Antenna System (AAS) Base Station (BS)[S]. 2017.
- [19]B. Yu, L. Yang and H. Ishii. 3D beamforming for capacity improvement in macrocell-assisted small cell architecture[A]. // 2014 IEEE Global Communications Conference[C], Austin, TX, 2014: 4833-4838.
- [20]3GPP TR 36.942 V15.0.0, Radio Frequency (RF) system scenarios[S]. 2018.
- [21]3GPP TR 36.873 V12.6.0, Study on 3D channel model for LTE[S]. 2017.
- [22]3GPP R4-168767, WF on SINR vs throughput mapping[S]. 2016.
- [23]3GPP TS 38.104 V15.3.0, Base Station (BS) radio transmission and reception[S]. 2018.
- [24]G. Hattab, E. Visotsky, M. Cudak and A. Ghosh. Toward the Coexistence of 5G MmWave Networks with Incumbent Systems beyond 70 GHz[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(4): 18-24.
- [25]D. Demmer, R. Gerzaguet, J. Dore and D. Le Ruyet. Analytical study of 5G NR eMBB co-existence[A]. // 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)[C], St. Malo, 2018: 186-190.
- [26]G. Hattab, E. Visotsky, M. C. Cudak and A. Ghosh. Uplink Interference Mitigation Techniques for Coexistence of 5G Millimeter Wave Users With Incumbents at 70 and 80 GHz[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 324-339.
- [27]3GPP TR 38.803 V14.2.0, Study on new radio access technology: Radio Frequency (RF) and co-existence aspects[S]. 2017.
- [28]李文兴, 毛晓军, 孙亚秀. 一种新的波束形成零陷展宽算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2882-2888.
- [29]李荣锋, 王永良, 万山虎. 自适应天线方向图干扰零陷加宽方法研究[J]. 现代雷达, 2003(02): 42-45.
- [30]V. Sharma, M. Bennis and R. Kumar. UAV-Assisted Heterogeneous Networks for Capacity Enhancement[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1207-1210.
- [31]M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah. Drone Small Cells in the Clouds:

- Design, Deployment and Performance Analysis[A]. // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)[C], San Diego, CA, 2015: 1-6.
- [32] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and S. Lardner. Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [33] C. Zhang and W. Zhang. Spectrum Sharing in Drone Small Cells[A]. // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)[C], Washington, DC, 2016: 1-6.
- [34] M. Gruber. Role of altitude when exploring optimal placement of UAV access points[A]. // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C], Doha, 2016: 1-5.
- [35] J. Yoon, Y. Jin, N. Batsoyol and H. Lee. Adaptive Path Planning of UAVs for Delivering Delay-Sensitive Information to Ad-Hoc Nodes[A]. // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C], San Francisco, CA, 2017: 1-6.
- [36] J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim. Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 604-607.
- [37] B. Galkin, J. Kibilda and L. A. DaSilva. Deployment of UAV-mounted access points according to spatial user locations in two-tier cellular networks[A]. // 2016 Wireless Days (WD)[C], Toulouse, 2016: 1-6.
- [38] A. Kumbhar, İ. Güvenç, S. Singh and A. Tuncer. Exploiting LTE-Advanced HetNets and FeICIC for UAV-Assisted Public Safety Communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 783-796.
- [39] 3GPP TR 36.814 V9.2.0, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[S]. 2017.
- [40] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and A. Jamalipour. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[A]. // 2014 IEEE Global Communications Conference[C], Austin, TX, 2014: 2898-2904.

缩略语

2G	2th-Generation	第二代移动通信技术
3G	3th-Generation	第三代移动通信技术
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
4G	4th-Generation	第四代移动通信技术
5G	5th-Generation	第五代移动通信技术
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio	邻频泄漏功率比
ACLR	Adjacent Channel Leakage Power Ratio	邻信道泄漏比
ACS	Adjacent Channel Selectivity	邻信道选择性
ASS	Active Antenna System	有源天线系统
COMP	Coordinated Multiple Points Transmission /Reception	协同多点传输
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址
GCS	Global Coordinate System	全球坐标系
InH	Indoor Hotspot	室内热点
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
LCS	Local Coordinate System	局部坐标系
LOS	Line of Sight	视距
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MBS	Macro Base Station	宏基站
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多入多出
NLOS	Non Line of Sight	非视距
NR	New Radio	新空口
QoS	Quality of Service	服务质量
RB	Resource Block	资源块
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信干噪比
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机
UMa	Urban Macro	城市宏小区
UMi	Urban Micro	城市微小区
UE	User Equipment	用户设备

致谢

攻读学位期间发表或已录用的学术成果

论文

- [1] Deployment of UAV and Interference Coordination in UAV-assisted Cellular Networks[A]. // IEEE CIC ICCCW'18[C], Beijing, 2018: 1-5. (第一作者)
- [2] Analysis of Downlink Co-existence in 5G New Radio Homogeneous Networks[A]. // 2018 International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC)[C], Guiyang, 2018: 324-328. (第二作者)

提案

- [1] Source: CATT, R4-1609500, Discussion on the DL co-existence performance of indoor hotspot, 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #81
- [2] Source: CATT, R4-1700183, Co-existence results of urban macro, 3GPP TSG-RAN WG4 NR Ad-hoc Meeting
- [3] Source: NEC, R4-1714126, Proposal on NR BS EVM Requirement for FR1, 3GPP TSG RAN WG4 Meeting #85
- [4] Source: NEC, R1-1808364, Evaluation results for eMBB spectrum efficiency in FDD, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #94
- [5] Source: NEC, R1-1808365, Evaluation results for eMBB spectrum efficiency in TDD, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #94