信息科学技术专著丛书

非正交多址接入理论与分析

岳新伟　李学华　刘荣科　姚媛媛　刘元玮　著

THEORY AND ANALYSIS OF NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS

非外借

北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

非正交多址接入理论与分析

岳新伟　李学华　刘荣科
姚媛媛　刘元玮　著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书全面深入地介绍了非正交多址接入(NOMA)技术理论,对 Nakagami-m 衰落信道下 NOMA 系统性能、全双工/半双工模式下的协作 NOMA 通信技术、基于 NOMA 的中继选择技术、双向中继 NOMA 通信系统以及 NOMA 统一技术框架、基于 NOMA 的物理层安全通信系统以及基于 NOMA 的卫星通信技术等进行了阐述,突出了 NOMA 技术的理论、性能、应用及未来发展演进方向,为 NOMA 系统设计及研究提供了理论基础。

本书既可作为高等院校高年级本科生、研究生的前沿技术课程教材,也可作为无线通信技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非正交多址接入理论与分析 / 岳新伟等著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2021.6
ISBN 978-7-5635-6269-5

Ⅰ.①非… Ⅱ.①岳… Ⅲ.①多址联接方式 Ⅳ.①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 253669 号

策划编辑:刘纳新 姚 顺 **责任编辑**:满志文 **封面设计**:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社
社 址:北京市海淀区西土城路 10 号
邮政编码:100876
发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578
E-mail:publish@bupt.edu.cn
经 销:各地新华书店
印 刷:唐山玺诚印务有限公司
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16
印 张:11.25
字 数:275 千字
版 次:2021 年 6 月第 1 版
印 次:2021 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6269-5 **定 价**:45.00 元

·如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系·

前　言

随着移动通信数据业务需求的飞速增长，对下一代移动通信系统的频谱效率和用户连接宽度等关键技术指标提出了更高要求。移动通信系统从第一代到第四代均采用传统的正交多址接入方案，即无线资源在时域、频域、码域或空域等方向的自由度受限于接入方案的正交性；接收端使用较低复杂度算法进行用户信息检测，这不仅使得无线资源无法得到充分利用，而且限制了用户的接入数量。面对无线通信业务量以及设备接入量的爆炸式增长，非正交多址接入（Non-Orthogonal Multiple Access，NOMA）凭借其能提高无线通信系统频谱效率和网络容量等优势，已经成为未来移动通信网络的关键技术之一。

本书将从 NOMA 基本原理、下行 NOMA 通信、协作 NOMA 通信、NOMA 中继选择技术、双向中继 NOMA 通信、NOMA 统一技术框架、NOMA 物理层安全通信以及基于 NOMA 卫星通信技术等角度进行阐述，每部分内容又将从系统模型构建、理论性能分析、数值仿真验证等方面展开，力求让读者对 NOMA 的理论与技术有一个整体认知，通过介绍相关技术原理，引领读者逐层深入 NOMA 研究领域，帮助读者把握无线通信物理层关键技术的发展方向，为未来就业和科研打下坚实的理论基础。

本书在内容设置上注重时代性和技术前沿性，结合 NOMA 技术的最新研究进展，构建了 9 个章节的模块化结构。第 1 章介绍了 5G 研究现状、标准化进展以及关键技术，并对下一代移动通信相关技术进行了展望；第 2 章介绍了 NOMA 的基本知识、分类以及性能评估指标等，让读者了解 NOMA 的发展历程，为后续章节的学习打下必备的理论基础；第 3 章介绍了 Nakagami-m 衰落信道下 NOMA 系统的性能；第 4 章介绍了基于全双工/半双工的协作 NOMA 系统性能，将近端用户当作 DF 中继以协助基站转发信息给远端用户；第 5 章介绍了基于 NOMA 的单阶段/双阶段中继选择技术，借助随机几何理论分析了这两种中继选择机制的理论性能；第 6 章介绍了双向中继 NOMA 通信系统的性能，两组用户在中继的帮助下完成信息的交互；第 7 章介绍了一种用于下行 NOMA 通信的统一技术框架，根据子载波数的设置，该框架可以分别应用于功率域 NOMA 和码域 NOMA；第 8 章介绍了基于 NOMA 的物理层安全通信技术，在 NOMA 统一框架下讨论了内部窃听和外部窃听两种通信场景；第 9 章介绍了基于 NOMA 的卫星通信技术，分析了阴影-莱斯衰落信道下地面用户的中断性能。本书各章节之间既相对独立，又前后呼应，有机地结合在一起，每个章节均采取数学建模-理论研究-仿真分析的研究思路，分阶段逐步解决，力求让读者对 NOMA 技术有一个深刻的认识，同时了解相关技术细节的原理。

本书由北京信息科技大学、北京航空航天大学和伦敦玛丽女王大学相关专业老师和专家撰写，其中第1章由李学华撰写，第2章由刘荣科撰写，第3、4章由姚媛媛撰写，第5、6章由刘元玮撰写，第7、8、9章由岳新伟撰写，全书由岳新伟定稿。

本书获国家重点研发计划（No. 2020YFB1807102）和国家自然科学基金（No. 62071052）部分资助，撰写过程得到了北京信息科技大学信息与通信工程学院的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于本书涉及移动通信前沿技术及多个学科领域，加之作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请各位专家、学者、同行批评指正！

作　者

主要符号对照表

x	标量
$\boldsymbol{x}$	矢量
$\boldsymbol{I}$	单位矩阵
$(\cdot)^{\mathrm{T}}$	转置
$(\cdot)^{\mathrm{H}}$	共轭转置
$E[\cdot]$	数学期望
$\|\ \|_{\mathrm{P}}$	P 范数
$\|x\|$	取 x 的模
$\mathrm{diag}(\boldsymbol{a})$	以矢量 $\boldsymbol{a}$ 的元素为对角元素的对角矩阵
$\mathrm{tr}(\cdot)$	矩阵的迹
$\max\{\cdot\}$	取最大值运算
$\min\{\cdot\}$	取最小值运算
$\underset{x}{\mathrm{argmin}} f(x)$	使 $f(x)$ 最小的 x 值
$\underset{x}{\mathrm{argmax}} f(x)$	使 $f(x)$ 最大的 x 值

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　5G 研究现状 …… 1
1.2　5G 标准化进展 …… 3
1.3　5G 关键技术 …… 4
1.4　NOMA 研究背景 …… 6
1.5　下一代移动通信相关技术展望 …… 7
1.5.1　6G 总体愿景 …… 8
1.5.2　6G 关键技术 …… 9
1.5.3　6G 研究进展 …… 11
1.6　本书主要内容 …… 11

第 2 章　NOMA 基本知识 …… 14

2.1　概述 …… 14
2.2　NOMA 分类 …… 14
2.3　NOMA 基本概念 …… 15
2.3.1　PD-NOMA 技术 …… 16
2.3.2　CD-NOMA 技术 …… 18
2.4　NOMA 研究现状 …… 20
2.4.1　点对点 NOMA 研究现状分析 …… 20
2.4.2　MIMO-NOMA研究现状分析 …… 21
2.4.3　协作 NOMA 研究现状分析 …… 21
2.4.4　NOMA 物理层安全研究现状分析 …… 23
2.4.5　NOMA 卫星通信研究现状分析 …… 24
2.5　性能评估指标 …… 24
2.5.1　中断概率 …… 25
2.5.2　遍历速率 …… 25
2.5.3　能量效率 …… 25
2.6　本章小结 …… 26

第 3 章　下行 NOMA 通信系统性能分析 …… 27

3.1　概述 …… 27
3.2　系统模型 …… 28
3.2.1　场景 1 …… 28
3.2.2　场景 2 …… 29
3.3　系统性能分析 …… 30
3.3.1　中断概率 …… 30
3.3.2　分集阶数 …… 34
3.3.3　系统吞吐量 …… 36
3.4　数值仿真结果 …… 36
3.4.1　场景 1 …… 36
3.4.2　场景 2 …… 38
3.5　本章小结 …… 41

第 4 章　协作 NOMA 通信系统性能分析 …… 42

4.1　概述 …… 42
4.2　系统模型 …… 43
4.3　接收信号模型 …… 44
4.4　系统性能分析 …… 45
4.4.1　中断概率 …… 45
4.4.2　遍历速率 …… 51
4.4.3　能量效率 …… 58
4.5　仿真结果分析 …… 59
4.5.1　无直连链路情况 …… 59
4.5.2　有直连链路情况 …… 62
4.5.3　能量效率 …… 65
4.6　本章小结 …… 67

第 5 章　基于 NOMA 的中继选择技术 …… 68

5.1　概述 …… 68
5.2　系统模型 …… 69
5.2.1　网络描述 …… 69
5.2.2　接收信号模型 …… 70
5.2.3　中断选择机制 …… 71
5.3　中断性能分析 …… 72

5.3.1 单阶段中继选择机制 …… 72
5.3.2 双阶段中继选择机制 …… 74
5.3.3 随机中继选择机制 …… 78
5.4 分集阶数与系统吞吐量 …… 78
5.4.1 分集阶数 …… 78
5.4.2 系统吞吐量 …… 81
5.5 数值仿真结果 …… 82
5.5.1 单阶段中继选择机制 …… 82
5.5.2 双阶段中继选择机制 …… 86
5.6 本章小结 …… 89

第 6 章 双向中继 NOMA 通信系统性能分析 …… 90

6.1 概述 …… 90
6.2 系统模型 …… 91
6.2.1 系统描述 …… 91
6.2.2 信号模型 …… 92
6.3 系统性能评估 …… 93
6.3.1 中断概率 …… 93
6.3.2 遍历速率 …… 97
6.3.3 能量效率 …… 101
6.4 数值仿真结果 …… 101
6.5 本章小结 …… 107

第 7 章 下行 NOMA 通信统一技术框架 …… 108

7.1 概述 …… 108
7.2 网络模型 …… 109
7.2.1 网络描述 …… 109
7.2.2 接收信号模型 …… 110
7.2.3 信道统计特性 …… 111
7.3 性能评估 …… 113
7.3.1 第 f 个用户的中断概率 …… 113
7.3.2 第 n 个用户的中断概率 …… 114
7.3.3 分集阶数与系统吞吐量 …… 115
7.4 数值仿真结果 …… 117
7.5 本章小结 …… 121

第 8 章　基于 NOMA 的物理层安全通信技术 …… 122

8.1　概述 …… 122
8.2　系统模型 …… 123
8.2.1　网络描述 …… 123
8.2.2　接收信号模型 …… 124
8.2.3　信道统计特性 …… 125
8.3　安全性能分析 …… 126
8.3.1　外部窃听场景 …… 127
8.3.2　内部窃听场景 …… 132
8.3.3　安全分集阶数 …… 133
8.4　数值仿真结果 …… 135
8.4.1　外部窃听场景 …… 135
8.4.2　内部窃听场景 …… 139
8.5　本章小结 …… 142

第 9 章　基于 NOMA 的卫星通信技术 …… 143

9.1　概述 …… 143
9.2　系统模型 …… 144
9.3　性能评估 …… 145
9.3.1　中断概率 …… 146
9.3.2　分集阶数 …… 147
9.4　数值仿真结果 …… 148
9.5　本章小结 …… 151

附录 A　缩略语说明 …… 152

参考文献 …… 154

第1章 绪 论

1.1 5G研究现状

随着第五代移动通信系统(The Fifth Generation Mobile Communication System,5G)的发展,5G网络建设和终端设备已逐步定型并进入商用阶段。全球主要国家的通信运营商都在加速进行5G网络的建设和商用进度。自2013年成立面向2020年的宽带无线移动通信系统(International Mobile Telecommunications-2020,IMT-2020)推进组以来,中国5G技术持续快速发展,在世界范围内已经成为5G技术的领跑者。2019年中国工信部正式向中国电信、中国移动、中国联通、中国广电发放5G商用牌照,我国正式进入5G商用元年。对于中国市场,业界预计在2020—2025年期间,中国5G商用直接带动的经济总产出将超过10万亿元人民币,间接拉动的经济总产出将超过24亿万元人民币。预计到2025年,5G将直接创造超过300万个就业岗位,支撑未来十年(2020—2030年)信息社会的无线通信需求,成为有史以来最庞大复杂的通信网络,并将深刻影响人类生活方式及社会发展的方方面面。与水和电一样,未来移动通信也将成为人类社会的基本需求,成为推动社会经济、文化和日常生活的社会结构变革的重要驱动力。IMT-2020推进组在《5G愿景与需求白皮书》中指出,5G无线通信系统相较4G具有以下优势:典型用户在传输速率方面将提高10～100倍,可以实现10 Gbit/s的峰值传输速率和100 Mbit/s～1 Gbit/s的边缘传输速率;端到端传输时延缩短5倍,显著提高能量效率和频谱效率;无线应用终端容量增加10～100倍。

到目前为止,5G已经成为国内外无线移动通信的焦点,许多国家和组织已经对其开展了全面而丰富的研究。IMT-2020推进组由我国工业和信息化部牵头,联合科学技术部等科研机构推动成立,其目的在于借助于产学研力量推进中国5G技术研发和开展国际交流与合作。欧盟在2012年组建了面向2020年的无线移动通信推动组项目进行有关5G方面的研究和设计,提供了技术需求、系统框架和性能评估等阶段性研究成果,为欧盟5G关键技术研究与技术突破提供参考和依据。紧接着,欧盟还启动了5G基础设施公共私人合作科研项目,该项目以欧盟构建2020年信息社会的无线移动通信关键技术(Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Twenty (2020) Information Society,METIS)的研究成果为基础,目的是更好地衔接5G在不同阶段的研究成果。另外,韩国、日本等国家也分别成立了各自的5G项目推进组开展5G相关技术的研究开发工作。

国际电信联盟针对5G业务需求定义了连接数密度、峰值速率、移动性、用户体验速率、流量密度以及端到端时延等关键性能指标。在5G的主要应用场景中,比如移动互联网业

务、虚拟现实、大数据、物联网和智能家居等，差异化业务特征对关键性能指标的需求各不相同。如图 1-1 所示，5G 场景下具体的关键性能指标描述如下：5G 应用场景需要支持的用户体验速率为 0.1～1 Gbit/s(比特每秒)、连接数密度为一平方千米支持一百万个终端设备接入、峰值速率 10 Gbit/s 以上、流量密度为每平方千米支持 10 Tbit/s 以上、移动性支持每小时 500 km、端到端的时延为毫秒级，其中，连接数密度、用户体验速率和端到端的时延是 5G 网络中最基本的关键性能指标。

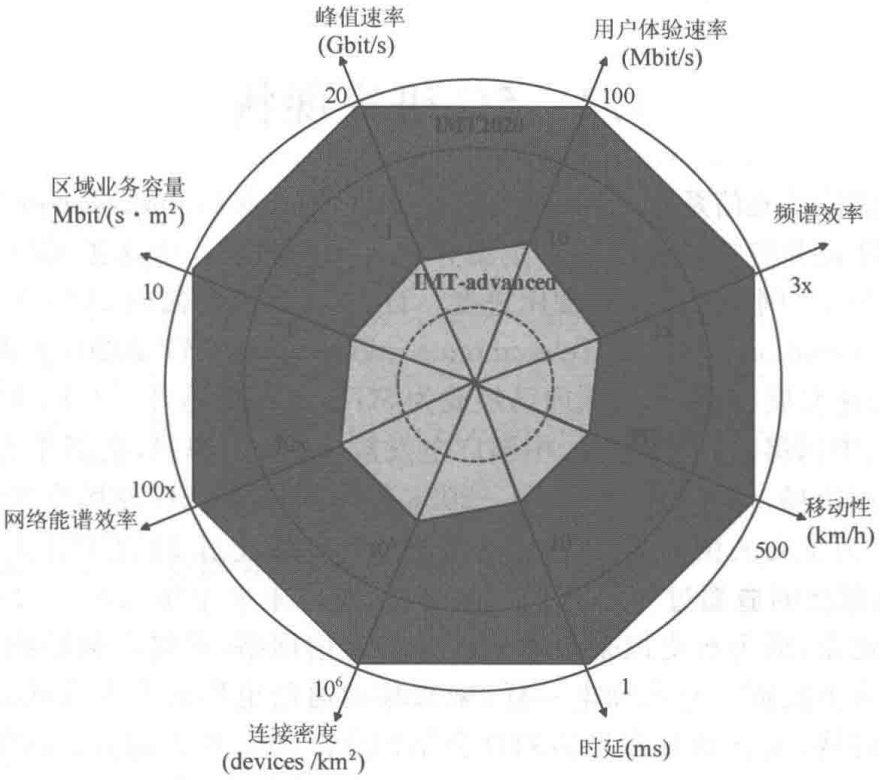


图 1-1　5G 关键性能指标示意图

面对上述业务需求和技术指标，第三代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partner Project，3GPP)定义了 5G 三大应用场景，如表 1-1 所示，它们分别是增强性移动宽带(Enhanced Mobile Broadband，eMBB)场景、大连接机器类通信(Massive Machine Type Communication，mMTC)场景和超可靠和低时延通信(Ultra-Reliance and Low Latency Communications，uRLLC)场景。

表 1-1　5G 三大应用场景

5G 应用场景	主要技术需求
eMBB	提升系统吞吐量、用户连接密度、提供统一的用户体验以及支持混合业务模型发送方式等
mMTC	支持大连接和高效率业务发送方式等
uRLLC	支持超低时延和高可靠性发送方式等

eMBB 是以人为中心的应用场景，集中表现为超高的传输数据速率，广覆盖下的移动性保证等。在该场景下需要提升系统吞吐量和用户连接密度、提供统一的用户体验以及支持混合的业务发送方式等，支持移动宽带业务，包括随时随地的三维/超高清视频直播和分享、虚拟现实、随时随地云存取、高速移动上网等大流量移动宽带业务。在大带宽、低时延需求

上具有一定优势，是三大场景中最先实现商用的部分。对应的关键技术性能指标：下行峰值速率为 20 Gbit/s、上行峰值速率为 10 Gbit/s、下行用户体验速率为 100 Mbit/s、上行用户体验速率为 50 Mbit/s、控制面时延 20 ms、用户面时延 4 ms 等。

mMTC 场景支持海量连接、低功耗、低带宽、低成本和时延不敏感的应用，如智慧路灯、可穿戴设备和智能抄表等。以往的 Wi-Fi、ZigBee、蓝牙等无线技术属于家庭小范围用的通信技术，回传线路主要靠长期演进(Long Term Evolution，LTE)系统，近期随着大范围覆盖的 NB-IoT、LoRa 等无线技术标准的出炉，将促使物联网的发展更为广泛。与 eMBB 不同，mMTC 追求的不是高速率，而是低功耗和低成本。需要满足每平方公里内 100 万个终端设备之间的通信需求，以较低速率发送数据且对传输延迟有较低需求。在该场景下的设备连接数密度将达每平方千米 100 万个，功耗方面要求续航 10 年，电表气表等一般设备只有 2～5 年续航能力。

uRLLC 场景需要支持超低时延和高可靠性发送方式等，侧重于人与物之间的信息交互，主要包括车联网、智能物流、智能资产管理等，要求提供多连接的承载通道，实现万物互联。其应用主要涉及车联网、工业应用和控制、交通安全和控制、远程制造、远程培训及远程手术等行业。工业自动化控制时延需求大约为 10 ms，在 4G 时代难以实现。在无人驾驶方面，对时延的要求则更高，传输时延需要低至 1 ms，而且对安全可靠性要求极高，uRLLC 在无人驾驶业务方面表现出巨大的潜力。此外对于安防行业也十分重要。

1.2 5G 标准化进展

上述提出的 5G 愿景还需要通信领域的技术人员与其他相关行业人员一起努力逐步实现，包括标准不断完善、工程化逐步落地及商业应用模式突破等。从标准化角度来看，5G 标准是一个不断完善的过程。在标准化的初期阶段，即 Release 14(R14)，终止了 LTE 系统启动了 5G 无线技术和网络架构体系的研究项目。在 R14 上的 5G 研究项目集中在新的无线电接入网络技术和新的系统架构方面。关于 5G 的新无线电接入网络技术的研究称为新空口(New Radio，NR)，其重点是定义足够灵活的新无线电接入，以支持更大范围的频带。紧接着，3GPP 在 Release 15(R15)的基础上开始了 5G 规范第一阶段的研究，即 5G 基础功能标准化阶段。该阶段主要针对 eMBB 技术特性优化，同时兼顾 uRLLC 和 mMTC 两种特性的基础需求。2017 年 12 月 3GPP 完成了针对 R15 非独立 5G NR 规范的升级，2018 年 6 月 R15 的独立式 5G NR 规范提供了一套完整的带有独立式 NR 系统的套件。其后，5G 标准的第二阶段 Release 16(R16)的研究项目和工作项目致力于解决 R15 中的所有未解决问题。R16 相对于 R15 在网络能力扩展、挖潜以及降低运营成本等方面做了改进。主要场景包括 uRLLC 的增强、对垂直行业和 LAN 服务的支持、蜂窝物联网的支持与扩展、增强 V2X 支持、5G 定位和定位服务、用户无线功能信令优化、5G 卫星接入、5G 网络自动化架构的支持、无线和有线融合增强、流媒体和广播、用户身份验证，多设备支持、增强网络切片、增强无线 NR 功能等。5G 效率的提高将包括 5G 自组网、大数据功能的增强、多输入多输出(Multiple Input and Multiple Output，MIMO)的增强、对设备功能交换的支持以及对非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access，NOMA)支持的研究。5G 标准化的下一阶段从 2020 年开始，对应的标准版本为 5G NR Release 17(R17)及后续版本，标准化重点包括优化 uRLLC 和 mMTC 两种物联网场景应用，以更好支持垂直行业的应用(例如工业无线互联网、高铁无线通信等)。

1.3 5G 关键技术

针对上述三大应用场景，5G 关键技术为这些场景需求提供了解决思路。这些技术主要包括：大规模 MIMO、毫米波通信(Millimeter Wave Communications，mmWave)、超密集组网(Ultra-Dense Network，UDN)、NOMA、全双工通信、设备到设备(Device-to-Device，D2D)通信以及基于滤波器组的多载波(Filter-Bank based Multicarrier，FBMC)等技术。下面对这几种技术进行逐个介绍。

(1) MIMO 技术作为提高系统频谱效率和传输可靠性的有效手段，已经广泛应用于多种无线通信系统。它利用空间中多径因素，在发送端和接收端分别使用多个天线阵列，通过空时处理技术实现空间复用增益和分集增益，充分利用空间资源来提高系统频谱利用率。具体而言，空间复用是充分利用空间传播中的多径分量，在同一频带上使用多个数据通道发射信号，使得容量随着天线数量的增加而线性增加。这种信道容量的增加不需要占用额外的带宽，也不需要消耗额外的发射功率，因此是提高系统信道容量一种非常有效的手段；空间分集分为接收分集和发送分集两类，一般是用两副或者多副大于相关距离的天线同时接收信号，然后在基带处理中将多路信号合并，可以显著提高信道的传输可靠性，降低信道误码率。相对于传统 MIMO 的 2、4、8 天线的配置，大规模 MIMO 采用几十甚至数以百计的天线振子，利用大规模天线提供空间自由度，在相同的时频资源上为数十个甚至更多的用户提供服务，有效提升系统容量和频谱效率，从而更好地面对未来数据传输业务与用户数量激增的情况。其优势主要体现在：

① 空间分辨率较传统 MIMO 显著增强，可实现空间资源的深度挖掘；

② 通过波束赋形技术将波束集中在很窄的范围内，进而大幅度降低干扰；

③ 当天线数量足够大时，使用简单的线性预编码即可有效防止各类噪声的干扰。

然而，大规模 MIMO 的发展和应用仍存在诸多挑战，例如导频污染问题，对于不具有上下行互易性的频分双工系统，如何实现有效的信道估计仍然是一个需要深思的开放性课题。

(2) 毫米波是指波长从 1～10 mm、频率从 30 GHz 至 300 GHz 的电磁波，利用毫米波进行通信的方法称为毫米波通信。毫米波属于甚高频段，它以直射波的方式在空间传播，波束很窄，具有良好的方向性。mmWave 技术能够实现数十 Gbit/s 的高速率传输，因此成为 5G 移动通信技术关注的焦点，其基本原理是利用非授权频段进行超大带宽传输，实现极高速率的无线传输从而获得更大的系统容量。mmWave 技术具有频率较高、波长较短以及数据传输稳定的特点，比较适合在人口密集的区域使用，是一种典型具有高质量、恒定参数的无线传输通信技术。优点主要表现为：

① 极宽的带宽。通常认为毫米波频率范围为 26.5～300 GHz，带宽高达 273.5 GHz。超过从直流到微波全部带宽的 10 倍。配合各种多址复用技术的使用可以极大提升信道容量，适用于高速多媒体传输业务，这在频率资源紧张的今天无疑极具吸引力。

② 波束窄。在相同天线尺寸下毫米波的波束要比微波的波束窄得多。例如一个 12 cm 的天线，在 9.4 GHz 时波束宽度为 18 度，而 94 GHz 时波束宽度仅 1.8 度。因此可以分辨相距更近的小目标或者更为清晰地观察目标的细节。

③ 可靠性高。较高的频率使其受干扰很少，能较好抵抗雨水天气的影响，提供稳定

的传输信道；与激光相比，毫米波的传播受气候的影响要小得多，可以认为具有全天候特性。

④ 方向性好。毫米波受空气中各种悬浮颗粒物的吸收较大，使得传输波束较窄，增大了窃听难度，适合短距离点对点通信。

⑤ 波长极短。所需的天线尺寸很小，易于在较小的空间内集成大规模天线阵。和微波相比，毫米波元器件的尺寸要小得多。因此毫米波系统更容易小型化。

但面向5G及下一代移动通信，其传输损耗大、易被遮挡等信道传输特性为mmWave通信在实际中的应用带来了巨大挑战。

(3) UDN技术通过更加密集化的无线网络部署，将基站间距离缩短为几十米甚至十几米，使得站点密度大大增加，拉近了终端与基站间的距离，使得网络的频谱效率得到大幅度提升；同时扩大了网络覆盖范围，提高了频谱利用率、单位面积网络容量和用户体验速率。虽然超密集异构网络架构在5G网络中有很大的发展前景，但是节点间距离的减少、越发密集的网络部署将使网络拓扑变得尤为复杂，进而导致严重的干扰和设备不兼容等问题。因此，需要进行有效的干扰管理和干扰协调抑制。3GPP提出了小区干扰协调机制，分别从时域、频域和功率控制三个不同的层面来减轻密集网络引发的干扰。而对于多小区协作以及频谱资源匮乏难以进行频段分配的场景，则要求未来提出更加先进干扰消除算法尽可能地提高频谱效率。随着各种无线接入技术的广泛应用，5G将成为一种多样化的异构密集分布网络节点覆盖下、面向各种服务需求的多业务和多技术融合的新型无线通信系统，其中一个关键的特征是不同无线接入终端设备间的整合。广覆盖的多无线接入异构网络是5G网络中必须解决的任务。

随着小区部署密度的增加，UDN将面临许多新的技术挑战，如回传链路、干扰、移动性、站址、传输资源和部署成本等。为了实现易部署、易维护及用户体验佳等目标，超密集组网的研究方向包括小区虚拟化、自组织自优化、动态时分双工、先进的干扰管理和先进的联合传输等。

(4) NOMA技术是无线移动通信系统实现网络升级的核心问题。面向5G的多址接入技术需要从系统和网络的角度出发，来实现在给定频谱资源条件下的系统总接入用户数和总吞吐量的提升。传统正交多址接入(Orthogonal Multiple Access，OMA)分别从频域、时域、码域、空域等资源维度给用户分配不同的正交资源，以便于对原始信号在接收端进行检测与恢复。基于OMA的移动通信系统有利于接收端采用低计算复杂度的线性检测算法，然而根据多用户信息理论可知，OMA技术只能达到多用户信道容量的内界，无法充分利用多用户信道的传输能力。随着移动业务不断增加与相对紧缺的频谱资源之间矛盾的不断升级，NOMA技术的研究逐渐受到重视。截止到3GPP RAN1第86次会议，各家公司提出了多种NOMA技术方案，其支持多用户的非正交资源分配，通过功率复用或特征码本设计，发送端允许多个用户占用相同的时间、频谱、空间等多维度资源进行多用户叠加传输，接收端采用非线性检测算法进行多用户检测，不仅大幅度提升了用户接入数量而且提高了频谱利用率。在保证用户传输速率的前提下，NOMA相对于OMA大幅度提升了系统频谱效率以及系统容量，受到学术界和工业界的广泛关注。

(5) 全双工技术即同时同频进行双向通信的技术，能够显著提升频谱利用率，被认为是5G空中接口关键技术之一。由于通信终端能够在同一时间同一频段同时发送和接收信号，

从理论上来说，相对于传统时分双工或频分双工模式能够提升将近一倍的频谱效率，还能有效降低端到端的传输时延并减小信令开销。但是当全双工技术采用收发独立的天线时，由于收发天线距离较近且收发信号功率差异较大，在接收端侧导致严重的自干扰。因此，实现全双工技术应用的首要问题是如何有效地抑制、消除自干扰信号。随着天线和信号处理技术的发展，自干扰消除技术得到了广泛研究，目前实现的自干扰抑制主要有空域、射频域和数字域联合等技术方案，且研究以高校的理论分析和技术试验为主，目前尚无成熟的产品样机和应用。此外，全双工在解决无线网络中的某些特殊问题时具有潜在优势，如隐藏终端问题和多跳无线网络端到端时延问题等。

(6) D2D 通信技术在提升系统网络性能、降低端到端传输时延以及提高频谱效率方面表现出巨大的潜力，可以有效地解决移动数据流量爆炸式增长、海量的终端设备连接等引发的频谱资源利用效率低下等问题。D2D 通信，即两个终端设备不用借助于其他设备直接进行通信的新型技术，凭借其优越的特点可应用到多种通信场景中，如车联网和蜂窝网等。应用 D2D 技术需要通过检测和识别邻近 D2D 的终端用户建立通信链路。由于蜂窝网络中的 D2D 技术会给蜂窝通信带来额外干扰，可通过高效的无线资源调度和管理以及控制 D2D 用户发射功率等方法降低干扰；通信模式切换决定着是否能够提高系统的频谱效率，并影响着蜂窝用户和 D2D 用户间的干扰程度，已成为备受关注的研究点。为了保证 5G 通信网络的通信质量，需建设超密集异构网络来提升网络的覆盖密度，增加覆盖区域。这种方案虽然在一定程度上扩宽了 5G 通信网的覆盖范围以及提高了通信质量。但当大量用户同时通过 D2D 设备连接入网时，很可能造成网络通信延迟大幅提升，对用户的实际使用造成影响。

(7) FBMC 通信采用多个载波信号将高速数据流分割成若干并行的子数据流，使得每个子数据流具有较低的传输速率，并利用这些子数据流分别调制相应的子载波信号。与正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM)技术相比，FBMC 中原型滤波器的冲激响应和频率响应可以根据需要进行设计，各载波之间不再必须是正交的，不需要插入循环前缀。它能够实现对各子载波带宽设置、各子载波之间交叠程度的控制，从而灵活控制相邻子载波之间的干扰，并且便于使用一些空闲零散的频谱资源；各子载波之间不需要同步，可在各子载波上单独进行信道估计和检测，尤其适用于难以实现各用户之间严格同步的上行通信链路。需要指出的是由于各载波之间相互不正交，使得子载波之间存在干扰，需要采用一些干扰消除技术来降低干扰。由于 FBMC 针对不同的子载波分别进行滤波处理，并且子载波的间隔较窄，只有滤波器的长度较长时才能满足窄带滤波的性能需求，因此在突发性小文件包或对时延要求较高的应用场景下的使用效果会受到影响。

1.4 NOMA 研究背景

多址接入作为移动通信系统更新换代的标志性技术历来受到业界的广泛关注。从无线移动通信的发展历程来看，可以将其划分为四个阶段：第一代移动通信系统(The First Generation Mobile Communication System，1G)使用频分多址接入(Frequency Division Multiple Access，FDMA)技术，其主要特性是将系统频带资源划分成若干个互不相交的频段，每个用户只占用一个频段进行通信；第二代移动通信系统(The Second Generation

Mobile Communication System，2G）使用时分多址接入（Time Division Multiple Access，TDMA）技术，其主要特性是将时间划分成若干个不同的时隙，每个用户只占用一个时隙进行通信；第三代移动通信系统（The Third Generation Mobile Communication System，3G）使用码分多址接入技术，其主要特性是通过扩频码字来区分用户；第四代移动通信系统（The Fourth Generation Mobile Communication System，4G）使用 OFDM 技术，其主要特性是在频域上采用相互正交的子载波来区分用户，融合了 OFDM 和 FDMA 技术，从频域和时域两个维度，实现资源的有效管理和高效利用。4G 网络相对于前三代移动通信网络在用户体验、传输时延、系统安全以及无线覆盖等性能方面有了较大的提升。需要注意的是由于 OFDM 技术需要引入足够长的循环前缀来抵抗符号间干扰以及载波间干扰，带来了子载波频偏等问题。同时循环前缀占据整个频带资源的比例较大，严重浪费了有限的频谱资源。可以看出传统 OMA 技术天然存在资源利用率低等缺点以牺牲额外资源为代价确保用户间的正交性。

5G 应用场景提升峰值速率和实现海量连接的有效解决方案是提高系统频谱效率，然而频谱资源的紧缺性严重制约了无线移动通信业务的发展。1G 到 4G 无线移动通信系统普遍采用 OMA 的方式来避免用户在时域、频域以及码域等资源上的干扰问题；接收端使用相对简单的算法进行用户信息检测。虽然 OMA 技术在物理资源上避免了干扰问题，但限制了无线通信系统资源的使用自由度，无法实现最优的频谱利用率。根据多用户信息理论可知，在多址接入信道和退化广播信道下，发送端使用叠加编码机制将多个用户的信息进行叠加发送，接收端使用串行干扰删除（Successive Interference Cancellation，SIC）机制进行多用户检测可以达到多用户系统的容量界。因此从提升用户连接数密度和频谱效率的性能角度分析，NOMA 技术相对于 OMA 技术具有潜在的优势。自 1972 年 T. M. Cover 提出了叠加编码之后，NOMA 技术逐渐成为学术界的研究热点。2012 年初，在世界无线电大会上国际电信联盟通过了 4G 标准之后，5G 的研究在产业界逐步开展起来。中国的 IMT-2020 推进组、METIS、第五代基础设施公私合作伙伴关系以及下一代移动网络等 5G 组织，都将 NOMA 作为 5G 系统最重要的基础技术并开展了相应的研究工作。3GPP 最初在 R14 中开展了下行多用叠加编码（Multiuser Superposition Transmission，MUST）项目的研究，讨论了下行两个非正交用户通信的问题，随后在基于 R15 的 NOMA 研究项目中讨论了上行多个非正交用户通信技术方案。

受限于基站和用户的硬件实现能力，1G 至 3G 系统难以采用高复杂度的非线性检测算法，例如 SIC 算法和低复杂度的最大似然检测算法等。随着大规模集成电路数字信号处理芯片能力在摩尔定律下的逐年提升，硬件设备的处理能力进一步增强，4G 系统的基站和用户已经开始采用 SIC 算法和最大似然检测算法，支撑了非线性检测算法在 5G 以及下一代移动通信系统中的工程应用。

1.5 下一代移动通信相关技术展望

随着 5G 商用的开启，第六代移动通信系统（The Sixth Generation Mobile Communication System，6G）逐渐成为学术界和工业界关注的焦点。相对于 5G 而言，6G 需要实现更快的网络传输速率、更低的传输延迟、更广泛的覆盖范围、更智能的网络连接以及更高的能量和频