

5G 若干关键技术评述

张平, 陶运铮, 张治

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘 要: 第五代移动通信网络 (5G) 目前得到了全球企业、研究院所和高校的广泛关注和大量研究。详细介绍和总结了 5G 的发展历程和国内外研究进展, 分析了基于虚拟化的 5G 网络架构。从无线传输、无线接入、网络这 3 个角度, 深入全面地介绍了 5G 潜在的关键技术及最新进展, 包括大规模多天线、全双工、信道建模与信道编码等, 分析了其中一些关键技术的优缺点及未来可研究方向。最后, 展望了 5G 未来发展的重点任务及主要方向。

关键词: 5G; 网络架构; 无线传输; 无线接入; 网络

中图分类号: TN929

文献标识码: A

Survey of several key technologies for 5G

ZHANG Ping, TAO Yun-zheng, ZHANG Zhi

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The fifth-generation (5G) mobile communications system has got extensive attention and research by enterprises, research institutes and universities of the world at present. The development history and domestic and abroad research progresses of 5G were described and summarized in detail. 5G network architecture based on virtualization were analyzed. From wireless transmission, wireless access and network perspectives, the potential key technologies of 5G, including massive MIMO, full-duplex, channel modeling, channel coding, etc. and their latest progress are introduced comprehensively and thoroughly. Some advantages, disadvantages and future research directions of some key technologies are analyzed. At last, key tasks and main directions of the future development of 5G are prospected.

Key words: 5G, network architecture, wireless transmission, wireless access, network

1 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 移动通信从模拟语音通信发展成为今天能提供高质量移动宽带服务的通信, 终端用户数据速率达到每秒数兆比特, 用户体验也在不断提高。此外, 随着新型移动设备的增加, 通信业务不断增长、网络流量持续上升, 现有的无线技术已无法满足未来通信的需求。

与前几代移动通信相比, 第五代移动通信技术 (5G) 的业务提供能力将更加丰富, 而且, 面对多样化场景的差异化性能需求, 5G 很难像以往一样以某种单一技术为基础形成针对所有场景的解决方

案。我国 IMT-2020 (5G) 推进组发布的 5G 概念白皮书^[1]从 5G 愿景和需求出发, 分析归纳了 5G 主要技术场景、关键挑战和适用关键技术, 提取了关键能力与核心技术特征并形成 5G 概念。2015 年 6 月, 国际电信联盟 (ITU) 将 5G 正式命名为 IMT-2020, 并且把移动宽带、大规模机器通信和高可靠低时延通信定义为 5G 主要应用场景^[2], 如图 1 所示。图 2 展示了不同应用场景下不同的技术要求^[2]。5G 不再单纯地强调峰值速率, 而是综合考虑 8 个技术指标: 峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性、时延、连接数密度、网络能量效率和流量密度。

与现有 4G 相比, 随着用户需求的增加, 5G 网

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-07-01

通信作者: 陶运铮, yunzhengtao@163.com

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目 (No.61421061); 华为开放课题基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation for Creative Research Groups of China (No.61421061), Huawei Innovation Research Program

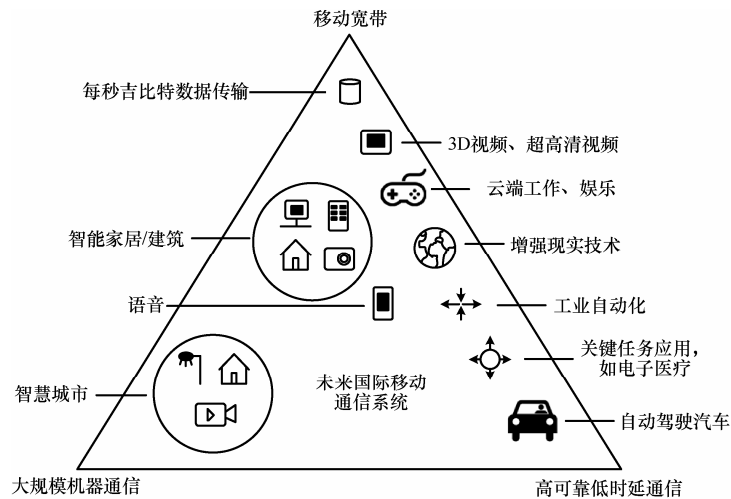


图 1 5G 应用场景

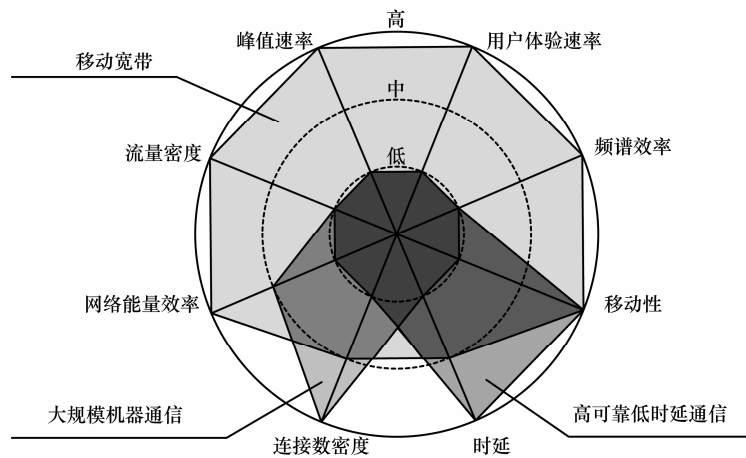


图 2 5G 关键技术指标

络应重点关注 4G 中尚未实现的挑战，包括容量更高、数据速率更快、端到端时延更低、开销更低、大规模设备连接和始终如一的用户体验质量 (QoE) [3]。图 3 简略描述了这些挑战以及潜在的解决方案和相应的设计原则[3]。随着这些技术的融入，5G 的性能将不断得到提升。本文第 3 节从无线传输、无线接入、网络这 3 个角度详细介绍分析了 5G 一些潜在的关键技术，阐述了学术界具有代表性的观点。

早在全球规模部署 4G LTE 时，5G 的研发已成为业界关注的焦点。欧洲 METIS 计划提出了支撑移动宽带、超可靠机器通信、大规模机器通信的关键技术，分别是高效系统控制层、动态无线接入网络、本地内容/业务分流和频谱工具箱[4]。诺基亚认为网络架构将在 5G 中扮演重要角色，5G 网络将会使程序化、软件驱动以及全面管理、多样化服务的实现成为可能[5]。爱立信提出的“网络即服务”的方式，可以非常灵活地根据用户需求进行资源分配和资源

再分配，其关键在于将传统的“一刀切”网络进一步抽象为网络切片[6]。华为在 5G 组网架构、频谱使用、空口技术等领域提出多种新技术，并在其场外测试中联合中国移动开通首个大规模多天线基站[7]。中兴通讯在 4G cloud radio 架构的基础上，发布了基于动态 mesh 的全新 5G 接入网架构，并推出了采用简单非正交码组设计的多址接入技术[8]。

当前，制定全球统一的 5G 标准已成为业界共同的呼声，如图 4 所示[1]，ITU 在 2016 年开展 5G 技术性能需求和评估方法研究，2017 年底启动 5G 候选方案征集，2020 年底完成标准制定。3GPP 作为国际移动通信行业的主要标准组织，将承担 5G 国际标准技术内容的制定工作。3GPP Rel-14 阶段被认为是启动 5G 标准研究的最佳时机，Rel-15 阶段可启动 5G 标准工作项目，Rel-16 及以后将对 5G 标准进行完善增强。我国也已启动 5G 技术研发试验，在 IMT-2020(5G)推进组的组织下，已经完成了第一阶段无线测试规范的制定工作。

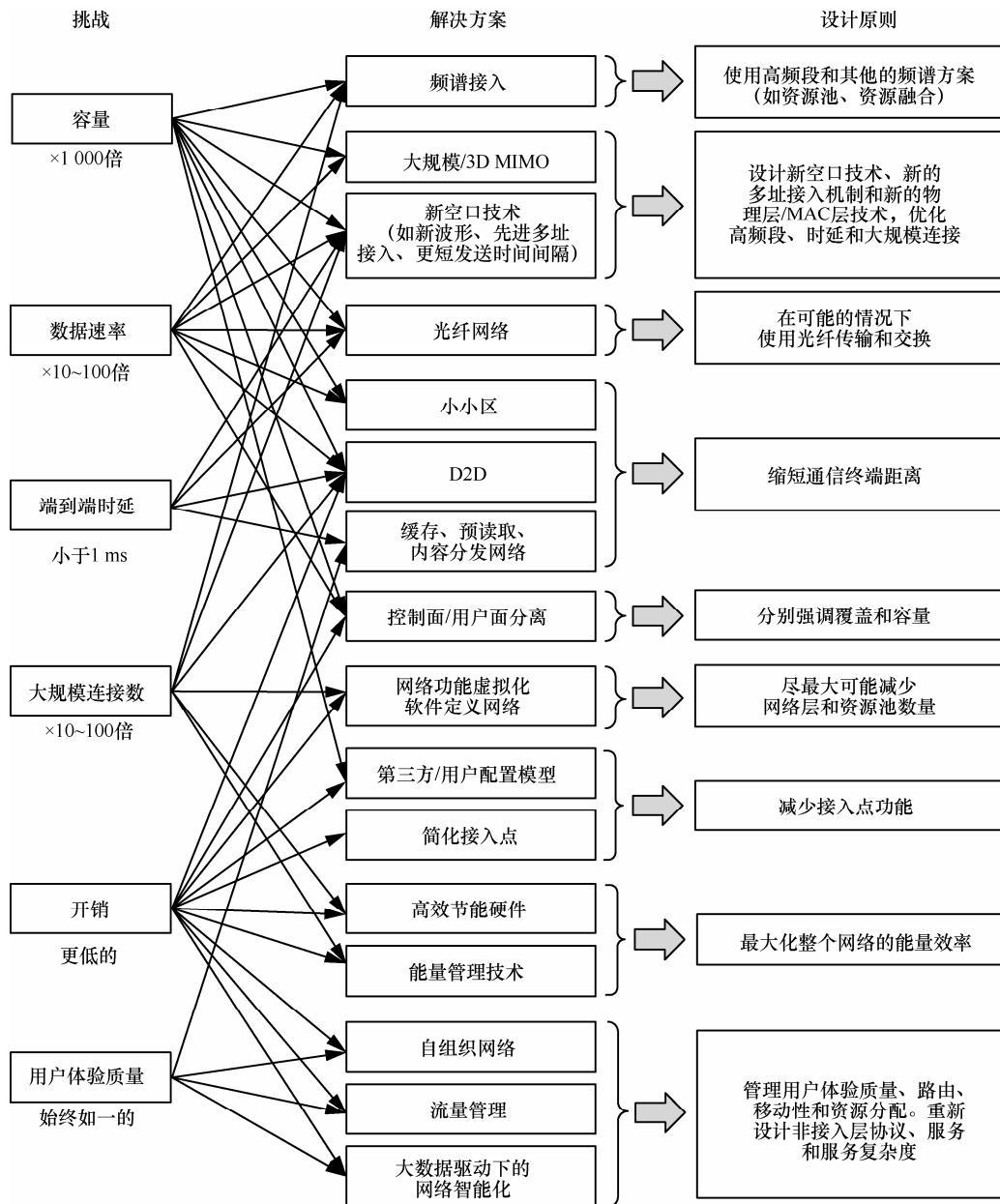


图 3 5G 挑战、潜在解决方案和设计原则

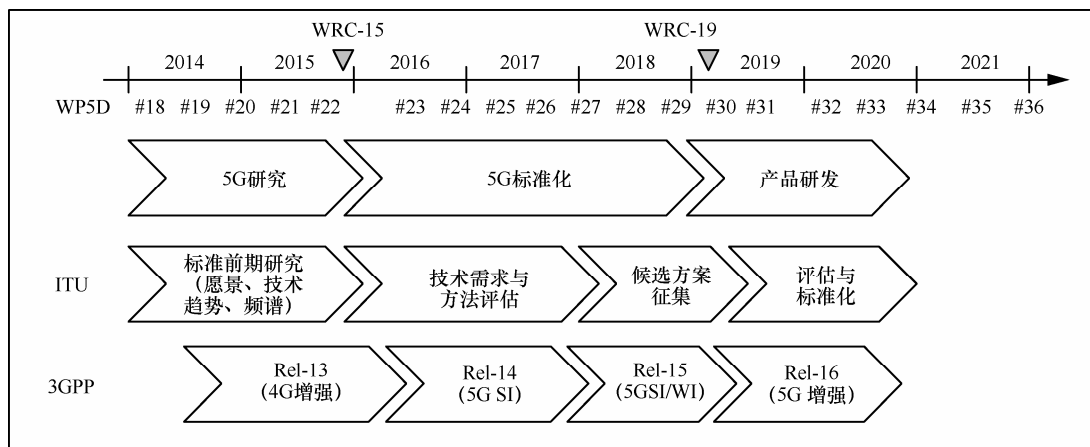


图 4 5G 工作计划

2 5G 网络架构

5G 网络将融合多类现有或未来的无线接入传输技术和功能网络，包括传统蜂窝网络、大规模多天线网络、认知无线网络 (CR)、无线局域网 (Wi-Fi)、无线传感器网络 (WSN)、小型基站、可见光通信 (VLC) 和设备直连通信 (D2D) 等，并通过统一的核心网络进行管控，以提供超高速率和超低时延的用户体验和多场景的一致无缝服务，一个可能的 5G 系统架构如图 5 所示^[9]。

为此，对于 5G 网络架构，一方面通过引入软件定义网络 (SDN) 和网络功能虚拟化 (NFV) 等技术，实现控制功能和转发功能的分离，以及网元功能和物理实体的解耦，从而实现多类网络资源的实时感知与调配，以及网络连接和网络功能的按需提供和适配；另一方面，进一步增强接入网和核心网的功能，接入网提供多种空口技术，并形成支持

多连接、自组织等方式复杂网络拓扑，核心网则进一步下沉转发平面、业务存储和计算能力，更高效实现对差异化业务的按需编排。

在上述技术支撑下，5G 网络架构可大致分为控制、接入和转发平面，其中，控制平面通过网络功能重构，实现集中控制功能和无线资源的全局调度；接入平面包含多类基站和无线接入设备，用于实现快速灵活的无线接入协同控制和提高资源利用率；转发平面包含分布式网关并集成内容缓存和业务流加速等功能，在控制平面的统一管控下实现数据转发效率和路由灵活性的提升。

3 5G 关键技术

3.1 无线传输技术

3.1.1 大规模多天线

在 2010 年底，贝尔实验室的 Thomas^[10]在《无线通信》中提出了 5G 中的大规模多天线的概念。

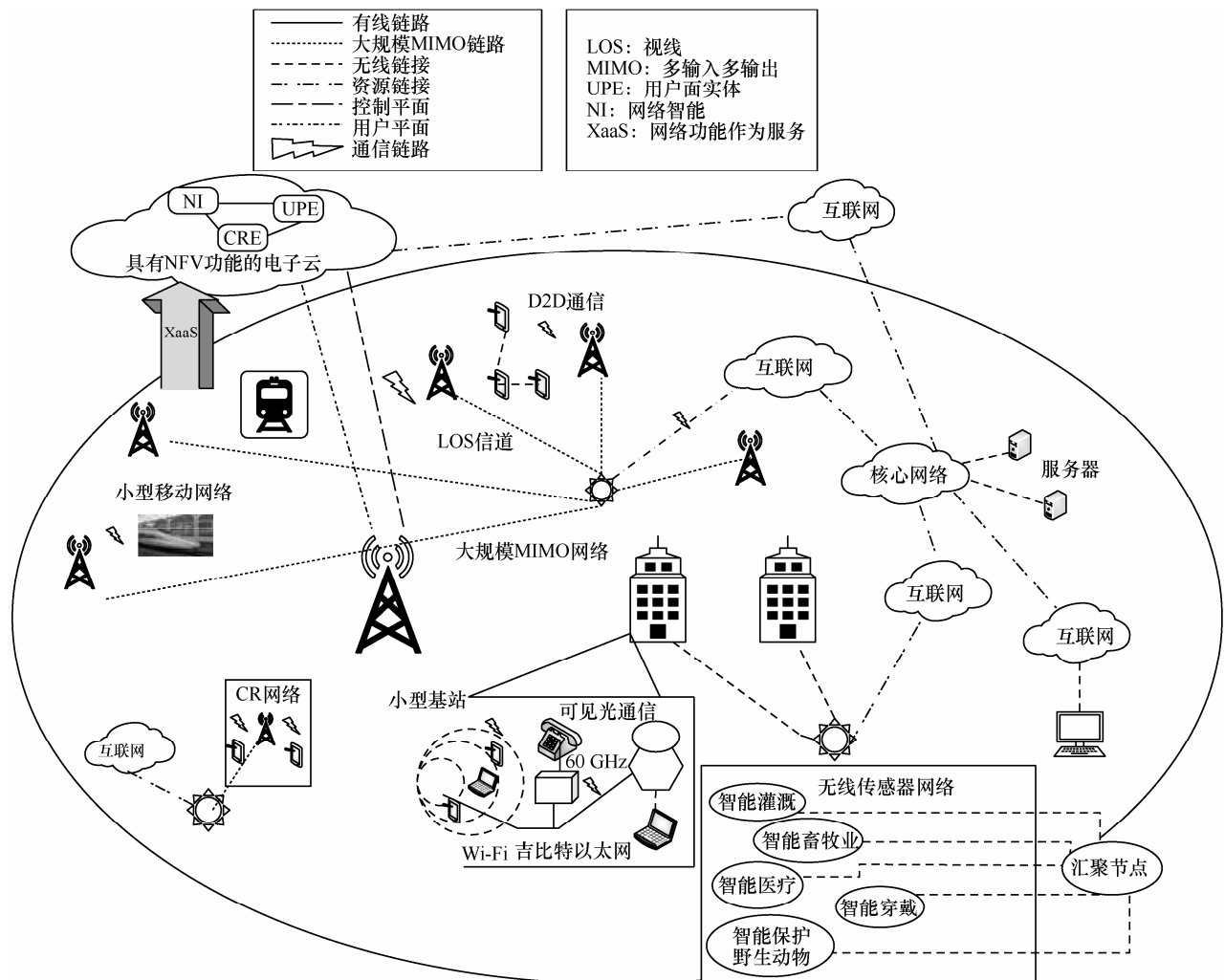


图 5 5G 网络架构

大规模多天线(又叫大范围多入多出技术和大范围天线系统)是一种多入多出(MIMO, multiple input and multiple output)的通信系统,在系统中基站的天线数远高于终端的天线数目,通过建立极大数目达到终端的信道实现信号的顽健高速传输,并通过大规模天线简化 MAC 层设计来最终实现信号的低时延传输。在下一代无线通信系统中,大规模多天线的应用场景如图 6 所示。在 5G 的大规模天线场景下,小区为宏蜂窝和微蜂窝 2 种小区共存,网络分类可以为同构网络也可为异构网络,场景分为室外和室内这 2 种场景,从相关测试文献得知,陆地移动通信系统 70%的通信来自于室内,因此,大规模天线的信道可以分为宏小区基站对室外用户、室内用户,微小区基站对室外用户、室内用户,同时微小区也可作为中继基站进行传输,信道也包括从宏小区基站到微小区基站。基站天线数可以趋于无限大,同时用户天线数目也可增大。大规模多天线技术在整个 5G 系统中会带来以下的一系列优点。

1) 相比于传统的多入多出系统,大规模多天线多入多出系统的空间分辨率被极大地提升了。大规模多天线技术可以在没有基站分裂的条件下实现空间资源的深度挖掘。

2) 波束赋形技术能够让能量极小的波束集中在一块小型区域,因此干扰能够被极大地减少。波束赋形技术可以与小区分裂、小区分簇相结合,并与毫米波高频段共同应用于无线短距离传输系统中,将信号强度集中于特定方向和特定用户群,实现信号的可靠高速传输。

3) 相比于单一天线系统,大规模多天线技术能够通过不同的维度(空域、时域、频域、极化域)提升频谱利用效率和能量利用效率。

因为这些可实现的优点,大规模多天线技术被认为是 5G 中的一项关键可行技术。

作为一种思维的转变,在重新思考无线通信的

理论、系统和实现的过程中,大规模多天线技术是一种结合了通信理论、电磁传播理论等的全新研究领域。为了实现大规模多天线技术,有一系列的挑战需要克服,例如导频污染问题,当小区内采用正交的导频序列、小区间采用相同的导频序列组时,存在导频污染问题。它产生的主要原因是在上行信道估计中,当不同小区的用户使用同一套训练序列,或者非正交的训练序列时,由于相邻小区的用户发送的训练序列非正交,导致基站端进行信道估计的结果并非本地用户和基站之间的信道,而是被其他小区的用户发送的训练序列污染之后的估计。因此, TDD 系统和 FDD 系统存在着很大差别,由于信道互惠策略,大规模天线技术大都应用于 TDD 系统,同时,导频污染的存在,使上、下行数据传输的信干比(SIR, signal to interference ratio)不能随着基站天线数增加而增加。对于大规模多天线来说,产业实现上目前重在 TDD,往 FDD 发展需要考虑好信道估计、信息回传及干扰控制。同时,为了充分地利用潜在的技术优势,特殊的实际场景下大规模多天线和测试模型的信道测量工作也是需要的。同时,信道估计和信道反馈也是需要大量研究和调查的。另一方面,在基站侧部署大规模多天线技术会带来大量的成本问题,例如大幅度增加的硬件和信号处理开销^[11]。在实际场景中,由于设计和完成大规模多天线需要灵活地适应复杂的无线电环境,因此完成大规模多天线系统的搭建是很难的。

总之,大规模多天线技术是一种同时提升系统容量和峰值速率、减少能量消耗和传输时延的潜在可行的关键技术。在现今的实验网络中,常规的多入多出方案已经不再适用于日益增长的通信需求了,尤其是 4~128 的天线。在 5G 大规模多天线技术方案中,基站天线数目将极大增长,潜在大规模范围阵列会从 10×10 至 100×100 ,甚至更大。直

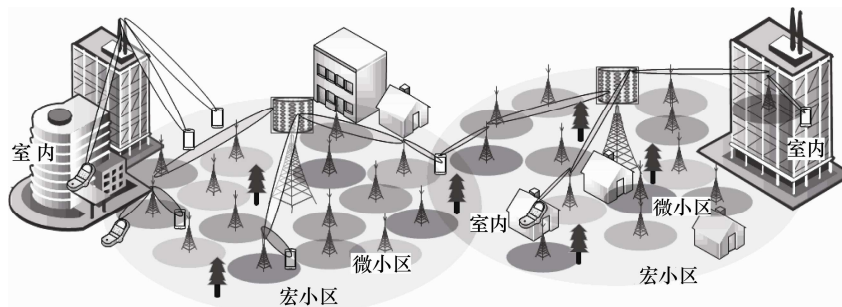


图 6 大规模多天线技术应用场景

到现在,大规模多天线系统的设计和工程也面临着上述一系列关键技术问题带来的挑战。

3.1.2 信道建模

信道建模通过对无线环境的抽象性描述,可用一系列的参数来表征无线环境的物理特征,进而准确刻画出无线信号的传播机制,是评估无线技术性能的最有效手段之一。进入 4G 时代以来,无线信道建模得到了高速发展。由于 MIMO 技术的应用,信道模型由时—频 2 个维度扩展成空—时—频这 3 个维度。很多研究机构或组织进行了大量的信道测量与建模工作,如表 1 所示。

随着 5G 技术的发展,信道建模也表现出了如下的新特性。

1) 空间连续性与移动性。一方面, D2D 技术的发送端和接收端具有双移动特性,而传统的信道模型^[19,20]中发送端位置固定,只有接收端移动的建模方式已经不再适用。另一方面,目前的信道模型是基于时间快照(drop based)的,即对每条链路而言,散射环境是随机产生的,使即使距离很近的移动台所处的散射环境也是独立的,这明显也与实际情况不符。许多学者针对上述特性提出了新的信道模型^[22,23]。比如 Tommi 等^[22]为了描述 D2D 信道的双移动性和空间连续性,提出了一种基于随机几何信道模型(GSCM, geometry-based stochastic channel models),讨论了阴影衰落、角度、多普勒效应等特性在建模时与传统 GSCM 的不同。

2) 大规模多天线阵列的信道特性。为了提高信道容量和频谱利用率,大规模多天线技术将成为 5G 的关键技术之一,则相应的信道建模也呈

现出新的特性。比如要考虑用球面波取代平面波进行建模^[24];信道能量往往集中在有限的空间方向上,不满足信道是独立同分布(IID, independent and identically distributed)条件^[25];随着天线阵列的增大,不同的散射体只对不同的天线单元可见,衰落表现出非静态特性^[26,27]。

3) 高频段通信的信道特性。未来的短距离无线通信系统需要支持吉比特甚至数十吉比特的数据率,发展毫米波段中大量未被使用的频谱资源具有很好的应用前景^[28]。毫米波信道建模具有很多新的特征,比如高路损、高散射和对动态环境敏感等^[29]。大量的学者对此进行了建模研究^[29,30]。比如, Bai 等^[30]提出了在对大尺度参数建模时,采用直射径和非直射径的概率分布函数来代替原来的对数距离路径损耗与阴影衰落,进而,评估了毫米波通信小区下行链路的性能。

随着 5G 的深入研究,相应的信道模型也表现出了不同的特性,因此,相关新技术的测量与建模工作亟需深入开展。

3.1.3 信道编码

低密度奇偶校验(LDPC, low density parity check)码和极化(polar)码是 5G 信道编码的关键候选码。在 LDPC 码发现之初,由于当时硬件技术和 LDPC 码编译码复杂度的限制,LDPC 码一直没有得到人们的重视。近年来,随着集成电路技术的演进,LDPC 码在实际通信系统中的应用逐渐可行,LDPC 码重新进入了人们的视野,并将在深空通信、光纤通信、卫星数字视频、数字水印、移动和固定无线通信及数字用户线(DSL, digital subscriber line)中得到广泛应用。虽然 LDPC 码有很好的抗

表 1 主要研究机构及信道模型

研究结构或组织	标准模型	简述
COST	COST259 ^[12]	相比于 COST 259, COST 273 改进了角度特征的建模,而且能适用于更多的场景和更高的传输频段。COST 2100 主要提出了散射簇可见区域(CVR, cluster visibility region)的概念来描述移动平台处于不同位置时经历的散射簇数量的变化,进一步精确地描述了信道特性
	COST273 ^[13]	
	COST2100 ^[14]	
3GPP	TR 25.996 ^[15]	TR 25.996 首次给出了基于空间的建模(SCM, spatial channel model),该信道模型适用于中心频率为 2 GHz,带宽为 5 MHz,包含了城市宏蜂窝、城市微蜂窝以及城市郊区这 3 个场景,同时可以配置任意的天线阵列。TR 36.814 增加了中继(relay)、微微蜂窝(pico cell)以及家庭蜂窝(femto cell)等场景的建模。然后,TR 36.873 给出了 3D MIMO 的信道建模,重点阐述了对俯仰角的建模
	TR 36.814 ^[16]	
	TR 36.873 ^[17]	
WINNER	SCME ^[18]	SCME、WINNER I/II、WINNER+基于 SCM 进行扩展,支持带宽 100 MHz,载频 2~6 GHz,支持的场景多达 18 种
	WINNER I/II+ ^[19]	
ITU	M.2135 ^[20]	为了评估 IMT-Advanced 的性能,在综合了 3GPP、IST-WINNER 等研究机构的科技成果基础上,提出了 M.2135,其适用于带宽 20~100 MHz,中心频点 450 MHz~5 GHz
METIS	D1.2 ^[21]	基于 WINNER II+扩展,针对 5G 信道建模新特性进行了改进,主要方面包括频谱范围、空间连续性、3D、球面波等,适用的中心频率为 380 MHz~86 GHz

干扰性能,但是 LDPC 码的编译码的复杂性一直是 LDPC 码应用于实际通信系统的最大障碍。目前,关于 LDPC 码的研究主要集中在寻找低复杂度的编码算法和译码算法以及 LDPC 码在实际通信系统中的应用。文献[31~33]提出了几种 LDPC 码的低复杂度的译码方案。文献[34]研究了多元 LDPC 码在瑞利衰落信道中的应用,文献[35]研究了多元 LDPC 码在频率选择信道中的应用,文献[36~38]研究了多元 LDPC 码在 MIMO 信道中的应用。Polar 码是由 Arikan 提出的一种基于信道极化现象的新型信道编码方案^[39,40],它是目前唯一一种在理论上被证明了的,在二进制离散无记忆信道(BDMC, binary discrete memoryless channel)中的通信系统容量能够达到到香农极限的编码方式。

LDPC 码与在 4G 中广泛应用的 Turbo 码相比,其译码是基于一种稀疏矩阵的并行迭代算法,并且由于结构并行的特点,在硬件实现上比较容易。因此在大容量通信应用中,LDPC 码更具有优势,这也正迎合了 5G 的发展趋势。而 Polar 码可以由简单的编码器与解码器来实现,编译码复杂度仅为 $O(n \log n)$,再考虑到其优良的性能,Polar 码相比于 Turbo 码来说优势明显。

5G 网络要求将端到端的延迟降到 4G 网络的 5 倍以下,连接的设备数量达到 4G 网络的 10~100 倍,数据速率达到 4G 网络的 10~100 倍。因此,这给 5G 网络的网络延迟、能耗、频带利用等各方面带来了严峻的挑战。为了满足 5G 网络的这些高性能要求,本文希望能选择的编码方案不仅有很好的抗干扰性能,而且要有很高的能量利用率,低系统延迟和高频谱利用率,并且能应用于多终端场景下。LDPC 码和 Polar 码作为 5G 网络信道编码的候选码,在应用于 5G 网络时各有优缺点:1)在编译码复杂度上,与 LDPC 码相比,Polar 码逐渐能达到任意二元对称离散无记忆信道的信道容量,具有较低的编译码复杂度,译码算法无需复杂的迭代计算并且能很好地应用于多终端系统中;2)在频带利用率方面,Polar 码远不如多元 LDPC 码,此外,Polar 码在中短码长下的性能也不及多元 LDPC 码。由于应用到 5G 网络时,LDPC 码和 Polar 码各有优缺点,有学者提出了 LDPC 码和 Polar 码的级联方案^[41],该方案将 LDPC 码作为外码,将 Polar 码作为内码,实验证明 LDPC-Polar 级联方案能很好地综合这 2 种编码方案在不同码长时的各自优势。

3.1.4 全双工

全双工技术(FD, full duplex)也被称为同时同频全双工技术(CCFD, co-frequency co-time full duplex),被认为是下一代移动通信(5G)关键空中接口技术之一。全双工技术可以使通信终端设备能够在同一时间同一频段发送和接收信号,理论上,比传统的 TDD 或 FDD 模式能提高一倍的频谱效率,同时还能有效降低端到端的传输时延和减小信令开销^[42]。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巨大,在接收天线处,同时同频信号(自干扰)会对接收信号产生强烈干扰。因此,全双工技术的核心问题是如何有效地抑制和消除强烈的自干扰。

从目前自干扰消除的研究成果来看,全双工系统主要采用物理层干扰消除的方法。全双工系统的自干扰消除技术主要包括天线自干扰消除、模拟电路域自干扰消除以及数字域自干扰消除方法。天线自干扰消除方法主要依靠增加收发天线间损耗包括分隔收发信号^[43]、隔离收发天线^[44,45]、天线交叉极化^[46]、天线调零法^[47]等;模拟电路域自干扰消除主要包括环形器隔离^[48],通过模拟电路设计重建自干扰信号并从接收信号中直接减去重建的自干扰信号等^[49];数字域自干扰消除方法主要依靠对自干扰进行参数估计和重建后,从接收信号中减去重建的自干扰来消除残留的自干扰^[50];全双工终端自干扰消除方法的原理如图 7 所示。目前的研究通过自干扰消除技术的联合应用,在特定的场景下,能够消除大部分自干扰(约 120 dB^[51]),但是研究中的实验系统基本上是单基站、少天线和小带宽,并且干扰模型较为简单,对多小区、多天线、大带宽和复杂干扰模型下的全双工系统缺乏深入的理论分析和系统的实验验证。因此,在多小区、多天线、大带宽和复杂干扰模型等背景下,更加实用的自干扰消除技术需要进一步深入研究。

目前,关于全双工技术的研究除了自干扰消除技术外,还包括很多其他方面的内容,包括:设计低复杂度的物理层干扰消除的算法,研究全双工系统功率控制与能耗控制问题^[52];将全双工技术应用于认知无线网中,使次要节点能够同时感知与使用空闲频谱,减少次要节点之间的碰撞,提高认知无线网的性能^[53];将全双工技术应用于异构网络中,解决无线回传问题^[54];将全双工技术同中继技术相结合,能够解决当前网络中隐藏终端问题、拥塞导

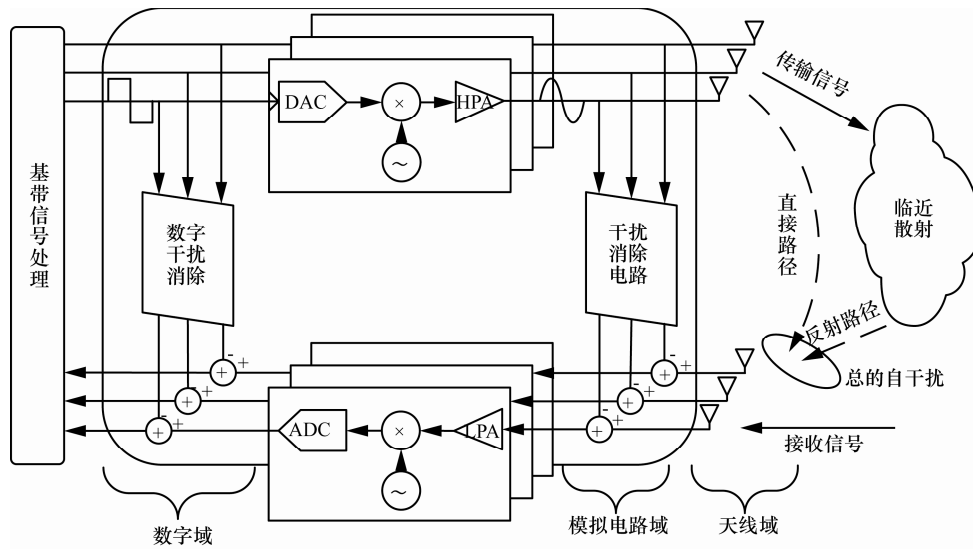


图 7 多天线全双工终端结构示意图

致吞吐量损失问题以及端到端延时问题等^[55]；将全双工中继与 MIMO 技术结合，联合波束赋形的最优化技术，提高系统端到端的性能和抗干扰能力^[56]。

为了使全双工技术在未来的无线网络中得到广泛的实际应用，对于全双工的研究，仍有很多工作需要完成，不仅需要不断地研究全双工技术的自干扰消除问题，还需要更加全面地思考全双工技术所面临的机遇和挑战，包括设计低功耗、低成本、小型化的天线来消除自干扰；解决全双工系统物理层的编码、调制、功率分配、波束赋形、信道估计、均衡、解码等问题；设计介质访问层及更高层的协议，确定全双工系统中干扰协调策略、网络资源管理以及全双工帧结构；全双工技术与大规模多天线技术的有效结合与系统性能分析等。

3.2 无线接入技术

3.2.1 多址接入

多址技术是现代移动通信系统的关键特征，很大程度上来说，多址技术就是每一代移动通信技术的关键特点^[57]。5G 除了支持传统的 OFDMA 技术外，还将支持 SCMA、NOMA、PDMA、MUSA 等多种新型多址技术^[58]。新型多址技术通过多用户的叠加传输，不仅可以提升用户连接数，还可以有效提高系统频谱效率，通过免调度竞争接入，还可以大幅度降低时延^[57]。

非正交多址接入 (NOMA) 是基于功率域复用的新型多址方案，以增加接收端的复杂度为代价换取更高的频谱效率^[59]。未来设备计算能力将会有大幅度提升，所以该方案具有可行性。NOMA 有 2 种

关键技术：1) 在用户接收端，利用连续干扰消除技术进行多用户检测^[60]；2) 在发送端进行功率域复用，根据相关算法进行功率分配^[61,62]。NOMA 也面临一些技术实现的问题。一方面非正交传输接收机非常复杂，SIC 接收机的设计需要芯片的信号处理技术有大的提升，另一方面，功率域复用技术还在研究阶段，后续还有很多工作要做。

稀疏编码多址接入(SCMA)技术是一种新型基于码域复用的多址方案，该方案将 QAM 调制和签名传输过程融合，输入的比特流直接映射成一个从特定码本里选出的多维 SCMA 码字，然后再以稀疏的方式传播到物理资源元素上^[63]。一组码字非正交复用，组成一个 SCMA 块，由于码字的数量大于其所占用的资源元素数量，所以可以提供高达 300% 的过载率 (overloaded)^[64]。目前，对于 SCMA 的研究主要有最佳码本设计^[65]、低复杂度接收算法研究^[66]、速率和能效研究^[67]以及 SCMA 与其他无线技术结合的研究^[68]等。

图样分割多址接入技术或简称图分多址接入 (PDMA) 是基于发送端和接收端联合设计的新型非正交多址接入技术^[69]。发送端，在相同的时频域资源内，将多个用户信号进行功率域、空域、编码域单独或联合地编码传输，采用易于干扰抵消接收机算法的特征图样进行区分；接收端，对多用户采用低复杂度、高性能的串行干扰抵消接收机算法进行检测，做到通信系统的整体性能最优。根据目前的研究结果，在上行系统中，PDMA 可以提升系统容量的 2~3 倍，而下行通信系统的频谱效率可以提

高至 1.5 倍^[70]。PDMA 的实现要解决的几大难题, 比如如何设计发送端的图样才能更容易地区分不同的用户, 如何简化接收机, 如何将 PDMA 和 MIMO 设计融合来设计空间域编码图样。

多用户共享接入 (MUSA) 是一种基于复数域多元码的上行非正交多址接入技术, 适合免调度的多用户共享接入方案, 有利于实现低成本、低功耗 5G 海量连接 (万物互联)^[71]。各接入用户利用基于 SIC 接收机的、具有低相关性的复数域多元码序列将其调制符号进行扩展, 扩展后的符号可以在相同的时频资源里发送。接收侧使用线性处理和码块级 SIC 来分离各用户的信息。扩展序列会直接影响 MUSA 的性能和接收机复杂度, 是 MUSA 的关键部分。MUSA 是 5G 中潜在的多址技术, 然而它的实现仍具有一定的挑战性。比如, 传播序列的映射方式, 图样选择的标准以及系统容量如何随着用户数量的增加而改变等。

下面给出上述 4 种多址技术的特点比较^[57], 如表 2 所示。

除了上述多址技术之外, 针对 5G 通信, 研究者还提出比特分割多址接入 (BMA)、软件定义多址接入^[57](SoDeMA)等。总之, 5G 时代的多址技术的改革和创新, 将会使未来移动通信的无线接入技术达到一个新的高度。

3.2.2 动态 TDD

5G 网络的关键特征将会是超密集小小区部署 (小区半径小于几米) 和不同的从超低时延到千兆速率的需求。基于 TDD 的空口被提议应用于针对小小区信号小延迟传播经验的部署, 灵活分配每个子帧上下行传输资源。这种在灵活选择上下行配置

的 TDD 也被称为动态 TDD。在动态 TDD 上下行配置的情况下, 不同的小区能更加灵活适应业务需求, 对减小基站能耗也有一定作用^[72]。动态 TDD 技术一般只在小覆盖的低功率节点小区中使用, 而在大覆盖的宏基站小区中一般不使用动态 TDD 技术^[73]。超密集小小区组网和大量的应用将成为 5G 无线通信系统的基本内容。一个动态 TDD 的部署可能引起上下行子帧交错干扰和降低系统性能^[74]。5G 动态 TDD 的主要挑战包括更短的 TTI、更快的 UL/DL 切换和 MIMO 的结合等。为了应对这些挑战, 目前被考虑的解决方案有如下 4 种: 小区分簇干扰缓解 (CCIM)、eICIC/FeICIC、功率控制、利用 MIMO 技术^[75]。

CCIM 是根据小区间的某个阈值 (如耦合损耗, 干扰水平) 将小区分簇的方法^[76]。每个簇可以包含一个或多个小区。每个簇中的全部小区主动传输任何子帧或全部子帧的子集中要么都是上行链路要么都是下行链路, 以便在同一簇中的基站—基站之间的干扰与用户—用户之间的干扰得到缓解。属于同一簇的多小区之间的协作是必要的。属于不同簇小区的传输方向在一个子帧中可以不同, 通过自由地选择不同的 TDD 配置, 来获取基于业务自适应的 TDD 上下行链路重新配置所带来的收益。CCIM 本质上包括 2 个功能, 即形成小区簇和每个小区簇中的协作传输。文献 [77] 为了合理地形成小区簇, 基站的测量是必要的, 而基站测量的目的是评价来自于另一个基站的干扰水平。此外, 与基站测量相关的信号和过程都必须被支持。至于小区簇内的协作形成条件需要进一步研究。

表 2 4 种多址技术的特点比较

多址技术	关键技术	优点	缺点
非正交多址接入 (NOMA)	1) SIC 检测 2) 功率域复用	1) 无明显远近效应 2) 上行链路的频谱效率提升近 20% 3) 下行链路吞吐量提升超过 30%	1) 接收机复杂度高 2) 功率域复用技术仍在研究中
稀疏编码多址接入 (SCMA)	1) 低密度签名算法 2) 高维调制技术 3) 通过 MPA 进行近似最优检测	1) 频谱效率提升 3 倍以上 2) 上行链路系统容量比 OFDM 系统提升 2.8 倍 3) 相较于 OFDMA, 下行链路小区的吞吐量提升 5%, 平均增益提升 8%	1) 最优码的设计和实现比较难 2) 用户间干扰增加
图分多址接入 (PDMA)	1) 合适复杂度的 SIC 的联合/整体设计 2) 低复杂度最大似然 SIC 检测	1) 下行链路频谱效率提升 1.5 倍 2) 下行链路系统容量提升 2~3 倍	1) 图样的设计和最优化的实现较难 2) 用户间干扰增加
多用户共享接入 (MUSA)	1) SIC 检测 2) 复数域多元码 3) 叠加编码和叠加信号扩展技术	1) 较低的块出错率 2) 支持大规模的用户接入量	1) 传输信号的设计比较难 2) 用户间干扰增加

eICIC 是依靠几乎空白子帧 (ABS) 协调宏小区和小小区的层间干扰。然而, eICIC 方案并没有解决小区特定参考信号(CRS)上的干扰控制, 为了确保后向兼容性, CSR 不能为空白子帧。FeICIC 考虑了 CRS 干扰, 并使用减少功率的几乎空白子帧 (RP-ABS) 增加了系统容量。借鉴小区间干扰协调 (ICIC) 和增强型小区间干扰协调 (eICIC) 在时间或频率域上资源分配正交化的思路解决相邻小区间的干扰。这些基于 ICIC 的方案在干扰抑制中也许会造成资源不必要的浪费。FeICIC 的主要挑战是宏小区和小小区之间的智能调度和协调以及如何减少功率。eICIC 和 FeICIC 设计起初是用来解决异构网中下行链路干扰问题。在本项目中, 基于干扰抑制 (IM) 方法的干扰协调将会被用在小小小区间的干扰抑制中。

在动态 TDD 系统中, 上行链路的性能将会显著下降。为了提高上行链路的性能, 业内提出了一些功率控制的方案。基本原则如下所述: 减弱造成 eNB-eNB 干扰的下行子帧传输功率、增加受到 eNB-eNB 干扰的上行子帧传输功率。目前的干扰抑制方法主要集中在确定功率的变化范围以及控制策略这 2 个方面, 比如一些静态和动态的控制方案。然而, 在基于功控的方法中, 增加传输功率可能会造成额外的干扰, 降低基站的功率也将减小小区的覆盖范围。在以上方法中, 将重点研究功率增强和减弱。

虽然阐述结合大规模多天线实现干扰消除方法的文献不多, 但一些潜在的想法还是值得考虑, 比如干扰对齐的方法^[78]。干扰对齐技术使 MIMO 系统的空间自由度最大化, 从而显著地改善了系统容量。干扰对齐方法的核心思想是将不同来源的干扰调整到一个约束的信号子空间, 那么目标信号就能在这个子空间的零空间被接收。创建一个联合干扰对齐波束成形问题, 那么单个波束成形解决方案就能够处理几个不同干扰场景下的波束成形问题。

3.3 网络技术

3.3.1 C-RAN

4G 中广泛采用的还是传统蜂窝结构式的无线接入网, 尽管采用了一些先进的技术, 仍然无法满足不断增长的用户和网络需求, 接入网越来越成为严重影响用户体验的瓶颈。这迫使运营商在下一代移动通信网络中找到一种显著提高系统容量、减少

网络拥塞、成本效益较高的接入网架构。结合集中化和云计算, 新型的基于云的无线接入网架构 (C-RAN) 的提出能有效解决上述问题^[74,79]。

如图 8 所示, C-RAN 架构主要包括 3 个组成部分: 由远端无线射频单元(RRH)和天线组成的分布式无线网络; 由高带宽低延迟的光传输网络连接远端无线射频单元; 由高性能处理器和实时虚拟技术组成的集中式基带处理池 (BBU pool)。分布式的远端无线射频单元提供了一个大容量广覆盖的无线网络。高带宽低延迟的光传输网络需要将所有的基带处理单元和远端射频单元之间连接起来。基带池由高性能处理器构成, 通过实时虚拟技术连接在一起, 集成异常强大的处理能力来为每个虚拟基站提供所需的处理性能需求^[80,81]。

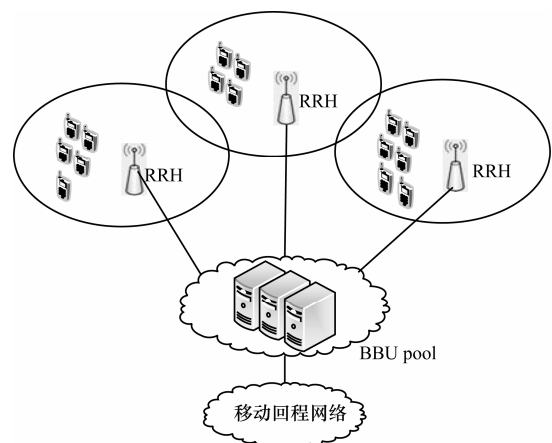


图 8 C-RAN 架构

集中化的 BBU 池可以使 BBU 高效的利用, 从而减少调度与运行的消耗。C-RAN 的主要优点如下。

1) C-RAN 适应非均匀流量。通常一天中业务量峰值负荷是非峰值时段的 10 倍多。由于在 C-RAN 的架构下多个基站的基带处理是在集中 BBU 池进行, 总体利用率可提高。所需的基带处理能力的池预计将小于单基站能力的总和^[82]。作为基站的布局功能, 分析表明, 相比传统的 RAN 架构, C-RAN 架构下 BBU 的数量可以减少很多^[83]。

2) 能量和成本节约。采用 C-RAN 使电力成本减少, 如在 C-RAN 的 BBU 数量相比传统无线接入网减少了。在低流量期间(夜间), 池中的一些 BBU 可以关掉, 不影响整体的网络覆盖。此外, RRH 是悬挂在桅杆上或楼宇的墙壁上, 能够自然冷却^[84], 从而减少电量消耗。

3) 增加吞吐量, 减少延迟。BBU 池的设计使

基带资源集中化,网络可以自适应地均衡处理,同时可以对大片区域内的无线资源进行联合调度和干扰协调,从而提高频谱利用率和网络容量。文献[85]提出了一种下行链路天线选择优化方案基于 C-RAN 表明比传统的天线选择方案的优点多。时延方面,由于切换是在 BBU 池中进行的而不是基站之间进行的,这样可以减少切换时间。

4) 缓解网络升级和维护。C-RAN 产生的失败可能因 BBU 池自动吸收重组,因此减少了对人为干预的需要,而且每当有硬件故障和升级需要时,人为干预也只需要在少数的几个 BBU 池进行,这刚好与传统无线接入网相反。由于硬件通常需要放在几个集中的地点,C-RAN 与虚拟 BBU 池提出能够使新的标准方式平稳引入。

目前,C-RAN 的研究和挑战有如下 3 个方向。

1) 基于光网络的无线信号传输。由于 C-RAN 构架是由分布式 RRH 和集中式 BBU 组成的,因此,如何实现低成本、高带宽、低延迟的光传输网络成为 C-RAN 的一个挑战。

2) 动态无线资源分配和协作式无线处理。C-RAN 系统的一个主要目标是显著提高系统频谱效率,并提高小区边缘用户吞吐量。C-RAN 将采用有效的多小区联合资源分配和协作式的多点传输技术,可以提高系统频谱效率^[86]。

3) 云计算应用于虚拟化技术。通信硬件和软件的虚拟化都会为通信网络和协议带来新的挑战,特别是在大规模协作信号处理和云计算中。目前,致力于无线接入虚拟化方面的云计算得到的关注较少,包括物理层的信号处理,介质访问控制(MAC)层的调度和资源分配以及网络层的自组织无线资源管理等。因此,将云计算运用于无线接入虚拟化将是未来一个重要的研究方向^[87]。

3.3.2 D2D

随着科学技术的快速发展,智能终端设备的种类越来越多,如智能手环、智能手表、智能手机、可穿戴设备等,并且这些设备具有很强的无线通信能力,通过 Wi-Fi、蓝牙蜂窝网络通信技术实现终端设备间的直接通信^[59];另外,未来网络将会面临移动数据流量的爆炸性增长、海量的终端设备急需连接以及频谱资源濒临匮乏等问题^[88]。由于设备到设备通信(D2D, device-to-device communication)具有潜在的减轻基站压力、提升系统网络性能、降低端到端的传输时延、提高频效率的潜力^[89-91]。

因此,D2D 是未来下一代网络(5G)中的关键技术之一。

D2D 通信,顾名思义是 2 个终端设备不借助于其他设备直接进行通信的新型技术。由于其优越的特点以及结合未来网络发展的需求和趋势,人们已经开始研究了比较多可考虑的 D2D 通信的应用场景,比如将 D2D 通信应用于未来车辆中,未来车联网需要车车、车路、车人(V2V、V2I、V2P,统称 V2X)的频繁交互的短程通信,通过 D2D 通信技术可以提供短时延、短距离、高可靠的 V2X 通信^[92];还有基于多跳 D2D 组建 ad hoc 网络,如果通信网络基础设施被破坏,终端之间仍然能够建立连接,保证终端之间的正常通信^[93,94];此外,就是蜂窝与 D2D 异构网络,如图 9 所示,在系统基站的控制下,D2D 通信复用蜂窝小区用户的无线资源,保证 D2D 带给小区的干扰在可接受的范围内,终端之间直接进行通信,这样能够减轻基站压力,提高频谱效率^[95]。

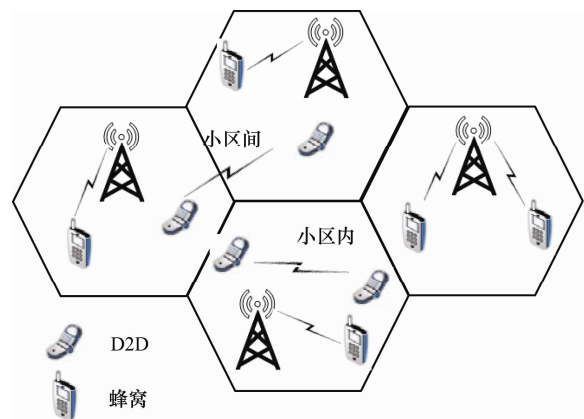


图 9 蜂窝与 D2D 异构网络

为了能够很好地应用 D2D 通信技术,人们需要重点解决 D2D 通信潜在的技术难点。首先,D2D 发现技术,需要检测和识别邻近 D2D 终端用户,进而建立 D2D 通信链路^[96]。由于蜂窝网络中的 D2D 通信技术势必会对蜂窝通信带来额外干扰,所以高效的无线资源分配和干扰管理方案是至关重要的,通过高效的调度和管理无线资源以及控制 D2D 用户的发射功率等方法,降低 D2D 通信对蜂窝小区带来的干扰^[97]。最后,通信模式切换也是人们特别关注的研究点之一,因为它将决定着是否能够提高系统的频谱效率,并且影响蜂窝用户和 D2D 用户之间的干扰程度^[95]。现在人们已经考虑 D2D 用户之间的干扰、路径损耗、信道质量和距离等因素,

制定用户通信模式切换准则^[98,99]。

由于 D2D 通信技术具有提升网络性能、优化未来网路架构等优点,已经引起了研究人员的广泛关注,并且针对一些关键性问题展开了研究,取得了一些成果,但是,对于 D2D 通信技术的研究,还存在一些问题和挑战未被解决,比如在通信模式切换方面,大多数文献都没有考虑用户的移动性^[100,101],而在实际中,用户处于移动状态,这样会对通信模式切换产生比较大的影响;还有在资源分配和干扰管理方面,人们比较趋向于 D2D 通信链路固定地复用上行链路或者下行链路,而没有考虑根据蜂窝上下行链路的情况动态地决定 D2D 通信链路复用何种蜂窝通信链路^[95],此外,对于潜在的基于 D2D 通信技术的网络场景还需进一步设计,而新型的网络场景中会引进新的资源分配问题和干扰问题,因此,新型的资源分配和干扰管理方案也值得深入研究。

4 未来展望

目前,世界各国针对未来 5G 移动通信网络在技术的可行性研究、标准化以及产品发展方面进行了大量的投入,5G 的发展需要在统一的框架下进行全球范围内的协调。同时,在 5G 通信系统中,大规模多天线和信道建模等的不断研究和创新,不仅能够有效改善无线频谱的利用效率,而且加快了无线数据传输速率并支持更多终端的接入。为了应对未来信息社会高速发展的趋势,网络应具备智能化的自感知和自调整能力,C-RAN、D2D 等技术的研究正是出于这一目的,并且高度的灵活性也将成为未来 5G 网络必不可少的特性之一。同时,绿色节能也将成为 5G 发展的重要方向,网络的功能不再以能源的大量消耗为代价,实现无线移动通信的可持续发展。

未来的 10 年,移动通信将发生翻天覆地的变化,目前,4G 刚刚部署不久,还将持续很长的一段时间用于商用。作为面向 2020 年之后产业发展的新一代移动通信技术,5G 在提高大带宽、解决万物互连、实现更可靠和更低时延通信方面具有重要影响。2016 年,5G 技术发展将进入中期,3GPP 已经在 2016 年开始了 5G 标准的预研,后续 5G 技术方案征集、标准化工作等也会紧锣密鼓地开展。

5G 是一个融合的网络,也是一个更加复杂和密集的网络。5G 的支持远超 3G、4G 网络所满足的

场景、数据量及设备接入量,实现这一网络需要技术的不断发展和创新。此外,5G 也将更全方位地注重用户体验,将根据不同用户的个性化需求智能部署,实现用户在任何时间、任何地点都能够方便、快捷地接入。同时,5G 技术的未来不仅在于数据传输速度的进一步提升,更在于它是人类能力的延伸,周围的一切物体都处于实时联网状态,能够互相感知交互。

5 结束语

本文详细介绍和总结了 5G 的发展历程和国内外研究进展,分析了基于虚拟化的 5G 蜂窝网络架构。从无线传输、无线接入、网络这 3 个角度,深入全面地介绍了 5G 潜在的关键技术及最新进展,分析了一些关键技术的优缺点及未来可研究方向。最后,展望了 5G 未来发展的重点任务及主要方向。未来的 5G 网络将更加开放、智能、灵活。为满足移动通信的发展及需求,5G 预计在 2020 年成为主要的移动通信系统。相比现今广为流行的 4G 移动通信,5G 在资源利用率、传输速率以及频谱利用率等方面都有明显优势,而且在用户体验、传输时延、无线网络的覆盖性能等方面也会得到大幅度的提高。总体来说,目前,5G 的研究处于关键发展阶段,各技术研究进展迅速,而未来围绕用户需求、规模性、成本能耗等因素进行的标准化和技术评估等,仍有大量工作亟待完成。

参考文献:

- [1] IMT-2020. 5G Concept[EB/OL]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/listByQuery?currentPage=1&content>.
- [2] ITU-R M 2083-0. IMT vision, framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[S]. ITU-R, Document 5/199-E, 2015.
- [3] AGYAPONG P, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(11): 65-75.
- [4] TULLBERG H, POPOVSKI P, GOZALVEZ-SERRANO D, et al. METIS system concept: the shape of 5G to come[J]. IEEE Communications Magazine, 2015.
- [5] Nokia. 5G masterplan [EB/OL]. <http://networks.nokia.com/innovation/5g>.
- [6] Ericsson 5G systems-enabling industry and society transformation[EB/OL]. <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/what-is-a-5g-system.pdf>.
- [7] 华为. 华为 4.5G 荣获两项 GTI 年度大奖: 杰出贡献推动 TDD+全速发展[EB/OL]. <http://www.huawei.com/cn/news/2016/2/rong-huo-2xiang-GTI-2015niandu-da-jiang>, 2016.

HUAWEI. Huawei 4.5G won two GTI award of the year: outstanding

- contributions to promote TDD+ development at full speed[EB/OL]. <http://www.huawei.com/cn/news/2016/2/rong-huo-2xiang-GTI-2015niandu-da-jiang>, 2016.
- [8] 中兴通讯. Pre5G,用技术创新勾画 5G 蓝图[J].通信产业报,2014(34). ZTE. Pre5G, draw 5G blueprint by technical innovation [J]. Communications Weekly, 2014(34).
- [9] GUPTA A, JHA R K. A survey of 5G network: architecture and emerging technologies[J]. IEEE Access,2015, 3:1206-1232.
- [10] MARZETTA T L. Non-cooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [11] ZENG Y, ZHANG R, CHEN Z N. Electromagnetic lens-focusing antenna enabled massive MIMO: performance improvement and cost reduction[C]//IEEE/CIC International Conference on Communication in China, c2014: 454-459.
- [12] MOISCH A F, ASPLUND H, HEDDERGOTT R, et al. The COST259 directional channel model-part I: overview and methodology[J]. IEEE Transactions On Wireless Communications,2007,5(12):3421-3433.
- [13] CZINK N, OESTGES C. The COST273 MIMO channel model: there kinds of clusters[C]//IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. c2008:282-286.
- [14] LIU L, OESTGES C, POUTANEN J, et al. The COST2100 MIMO channel model[J]. IEEE Journals & Magazines,2012,19(6):92-99.
- [15] 3GPP. Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations[S]. 3GPP TR 25.996 version 12.0.0 Release 12, 2014.
- [16] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[S]. 3GPP TR 36.814 Release 9, 2010.
- [17] 3GPP. Study on 3D channel model for LTE[S]. 3GPP TR 36.873, 2015.
- [18] BAUM D S, HANSEN J, SALO J. An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)[C]//IEEE 61st Vehicular Technology Conference, c2005: 3132-3136.
- [19] KYOSTI P, MEINILA J, HENTILA L, et al. WINNER II Channel Models part II Radio Channel Measurement and Analysis Results[S]. 2007.
- [20] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced[S]. ITU-RM 2135, 2008.
- [21] NURMEL A V, KARTTUNEN A, ROIVAINEN A, et al. Initial channel models based on measurements[S]. Deliverable D1, METIS. 2015.
- [22] TOMMI J, PEKKA K. Device-to-device extension to geometry-based stochastic channel models[C]//IEEE European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). c2015:1-4.
- [23] LI Y, WANG Q, ZHONG Z D, et al. Three-dimensional modeling, simulation and evaluation of Device-to-Device channels[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. c2015:1808-1809.
- [24] ZHOU Z, GAO X, FANG J, et al. Spherical wave channel and analysis for large linear array in LOS conditions[C]//IEEE Globecom Workshop. c2015:1-6.
- [25] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz[C]//IEEE Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers(ASILOMAR). c2012:295-299.
- [26] WU S, WANG C X, AGGOUNE E H M, et al. A non-stationary 3-D wideband twin-cluster model for 5g massive MIMO channels[J]. IEEE Journal & Magazines, 2014, 32(6):1207-1218.
- [27] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O. Massive MIMO channels-measurements and models[C]//IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. c2013: 280-284.
- [28] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work![J]. IEEE Journals & Magazines, 2013,1(1):335-349.
- [29] LI Q, SHIRANI-MEHR H, BALERCIA T, et al. Millimeter wave channel model and system design considerations[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop(ICCW). c2015: 1214-1219.
- [30] BAI T Y, DESAI V, ROBERT W, et al. Millimeter wave cellular channel models for system evaluation[C]//IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications(ICNC). c2014: 178-182.
- [31] FOSSORIER, MARC P C, MIODRAG M, et al. Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999,47(5): 673-680.
- [32] YAZDANI, MOHAMMAD R, SAIED H, et al. Improving belief propagation on graphs with cycles[J]. Communications Letters, IEEE,2004,8(1):57-59.
- [33] SONG H X, CRUZ J. R. Reduced-complexity decoding of Q-ary LDPC codes for magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003. 39(2): 1081-1087.
- [34] PENG R, CHEN R R. Application of non-binary LDPC codes for communication over fading channels using higher order modulations[C]//IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'06). c2006.
- [35] BOUTROS J, GHAITH A, WU Y Y. Non-binary adaptive LDPC codes for frequency selective channels: code construction and iterative decoding[C]//IEEE Information Theory Workshop. c2006:184-188.
- [36] BYERS G J, TAKAWIRA F. Non-binary and concatenated LDPC codes for multiple-antenna transmission[C]//7th AFRICON Conference in Africa. c2004: 83-88.
- [37] GUO F, HANZO L. Low complexity non-binary LDPC and modulation schemes communicating over MIMO channels[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'04). c2004:1294-1298.
- [38] PENG R, CHEN R R. Design of non-binary LDPC codes over GF(q) for multiple-antenna transmission[C]//IEEE Military Comm Conf (MILCOM'06). c2006:1-7.
- [39] ARIKAN, E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [40] ARIKAN E. On the origin of polar coding[C]//arXiv preprint arXiv:1511.04838 (2015).
- [41] ESLAMI, ALI, HOSSEIN P N. A practical approach to polar codes[C]//2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT), IEEE, c2011.
- [42] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D, et al. In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9): 1637-1652.
- [43] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full duplex radios[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, ACM, 2013, 43(4): 375-386.

- [44] EVERETT E, SABHARWAL A. Spatial self-interference isolation for in-band full-duplex wireless: a degrees-of-freedom analysis[J]. arXiv preprint arXiv:1506.03394, 2015.
- [45] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 680-694.
- [46] JOHNSTON S E, FIORE P D. Full-duplex communication via adaptive nulling[C]// 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, c2013: 1628-1631.
- [47] FOROOZANFARD E, FRANEK O, TATOMIRESCU A, et al. Full-duplex MIMO system based on antenna cancellation technique[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(16): 1116-1117.
- [48] LAUGHLIN L, BEACH M A, MORRIS K A, et al. Optimum single antenna full duplex using hybrid junctions[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(9): 1653-1661.
- [49] ASKAR R, KAISER T, SCHUBERT B, et al. Active self-interference cancellation mechanism for full-duplex wireless transceivers[C]// 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). IEEE, c2014: 539-544.
- [50] CHUNG M K, SIM M S, KIM J, et al. Prototyping real-time full duplex radios[J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2015, 53(9): 56-63.
- [51] WANG J, ZHAO H, TANG Y. A RF adaptive least mean square algorithm for self-interference cancellation in co-frequency co-time full duplex systems[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, c2014: 5622-5627.
- [52] ZHOU M, SONG L, LI Y, et al. Simultaneous bidirectional link selection in full duplex MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 4052-4062.
- [53] LIAO Y, WANG T, SONG L, et al. Listen-and-talk: protocol design and analysis for full-duplex cognitive radio networks[J]. arXiv preprint arXiv:1602.07579, 2016.
- [54] SHARMA A, GANTI R K, MILLETH J K. Joint backhaul-access analysis of full duplex self-backhauling heterogeneous networks[J]. arXiv preprint arXiv:1601.01858, 2016.
- [55] KIEU T N, DO D T, XUAN X N, et al. Wireless information and power transfer for full duplex relaying networks: performance analysis[M]//AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. Springer International Publishing, 2016: 53-62.
- [56] ZHENG G. Joint beamforming optimization and power control for full-duplex mimo two-way relay channel[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(3): 555-566.
- [57] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. *China Communications*, 2015, 121(10): 1-15.
- [58] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74-81.
- [59] IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G 无线技术架构白皮书[R]. 2015. IMT-2020(5G) Promotion Group. white paper, wireless technology architecture for 5G[R]. 2015.
- [60] HIGUCHI K, KISHIYAMA Y. Non-orthogonal access with successive interference cancellation for future radio access[C]//APWCS2012, c2012.
- [61] AL-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks[C]//Wireless Communications Systems (ISWCS), 2014 11th International Symposium on Barcelona. IEEE, c2014: 781-785.
- [62] AL-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks[C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). c2014: 781-785.
- [63] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). c2013:332-336.
- [64] LU L, CHEN Y, GUO W, et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation[J]. *China Communications*. c2015:38-48.
- [65] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA Codebook Design[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC, c2014:1-5.
- [66] WU Y, ZHANG S, CHEN Y. Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). c2015: 2918-2923.
- [67] ZHAI D, SHENG M, WANG X, et al. Rate and energy maximization in SCMA networks with wireless information and power transfer[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(2): 360-363.
- [68] LIU T, LI X, QIU L. Capacity for downlink massive MIMO MU-SCMA system[C]//Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). c2015:1-5.
- [69] Datang Telecom Technology & Industry Group. Spectrum-efficiency enhancing techniques for 5G[R]. IMT-2020 Promotion Group 5G Summit, Beijing, China, 2014.
- [70] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向 5G 的 PDMA 图样分割多址接入技术[J]. *电信网技术*, 2015(5): 43-47.
- [71] KANG S L, DAI X M, REN B. Pattern division multiple access for 5G[J]. *Telecommunication Network Technology*, 2015(5): 43-47.
- [72] YUAN Z, YU G, LI W. Multi-user shared access for 5G[C]//Telecommun, Network Technology. c2015:28-30.
- [73] Samsung. Performance evaluation of dynamic TDD reconfiguration[S]. 3GPP R1-120196, 2012.
- [74] Huawei. Evaluation of TDD traffic adaptive DL-UL reconfiguration in isolated cell scenario[S]. 3GPP R1-120059, HiSilicon, 2012.
- [75] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio access network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 8(3): 47-53.
- [76] SHEN Z, KHORYAEV A, ERIKSSON E, et al. Dynamic uplink-downlink configuration and interference management in TD-LTE[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(11):51-59.
- [77] Further enhancements to LTE TDD for DL-UL interference management and traffic adaption[S]. 3GPP TR 36.828, 2012.
- [78] Evaluation on TDD UL/DL reconfiguration with interference mitigation in multi-cell Pico scenario[S]. 3GPP R1-122209, 2012.
- [79] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference alignment and degrees of freedom of the k-user interference channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008,54(8): 3425-3441.
- [80] ROST P, BERNARDOS C J, DOMENICO A D, et al. Cloud technologies for flexible 5G radio access networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 68-76.
- [81] CHECKO A, CHRISTIANSEN H L, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorial*, 2015,17(1): 405-426.

- [81] ANGER F. Smart mobile broadband[C]//RAN Evolution to the Cloud Workshop, c2013.
- [82] China Mobile. C-RAN the road towards green ran[R]. China Mobile Research Institute, 2011.
- [83] NAMBA S, MATSUNAKA T, WARABINO T, et al. Colony-RAN architecture for future cellular network[C]//FutureNetw Mobile Summit. c2012:1-8.
- [84] C-RAN the road towards green ran[R]. China Mobile Research Institute, 2011.
- [85] LIU A, LAU V. Joint power and antenna selection optimization for energy-efficient large distributed MIMO networks[C]//IEEE ICCS. c2012:230-234.
- [86] LIU L, YANG F, WANG R, et al. Analysis of handover performance improvement in cloudRAN architecture[C]//7th Int ICST Conf CHINACOM. c2012: 850-855.
- [87] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471.
- [88] 5G vision and requirements[Z]. China IMT-2020 (5G) Promotion Group Whiter Paper, 2014.
- [89] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763.
- [90] ZHAO W, WANG S. Resource sharing scheme for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12): 4838-4848.
- [91] XING H, RENFORS M. Resource management schemes for network assisted device-to-device communication for an integrated OFDMA cellular system[C]// 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, c2015: 1520-1525.
- [92] REN Y, LIU F, LIU Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
- [93] JUNG Y, FESTIJO E, PERADILLA M. Joint operation of routing control and group key management for 5G ad hoc D2D networks[C]// 2014 International Conference on Privacy and Security in Mobile Systems (PRISMS). IEEE, c2014: 1-8.
- [94] WANG J, ZHANG X. Adaptive power control for maximizing channel capacity over Full-Duplex D2D Q-OFDMA ad hoc networks[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, c2015: 1-6.
- [95] MACH P, BECVAR Z, VANEK T. In-band device-to-device communication in OFDMA cellular networks: a survey and challenges[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(4): 1885-1922.
- [96] LEI L, ZHONG Z, LIN C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 96.
- [97] ZULHASNINE M, HUANG C, SRINIVASAN A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]// 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). IEEE, c2010: 368-375.
- [98] ELSAWY H, HOSSAIN E, ALOUINI M S. Analytical modeling of mode selection and power control for underlay D2D communication in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 4147-4161.
- [99] CHO B, KOUFOS K, JANTTI R. Spectrum allocation and mode selection for overlay D2D using carrier sensing threshold[C]// 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). IEEE, c2014: 26-31.
- [100] HAN M H, KIM B G, LEE J W. Subchannel and transmission mode scheduling for D2D communication in OFDMA networks[C]// Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2012 IEEE, c2012: 1-5.
- [101] LEI L, SHEN X, DOHLER M, et al. Queuing models with applications to mode selection in device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6697-6715.

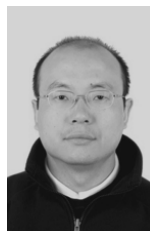
作者简介:



张平(1959-), 男, 陕西汉中, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、认知无线网络、TD-LTE、OFDM。



陶运铮(1989-), 男, 江苏无锡人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为基于能量收集的下一代无线网络、认知无线网络。



张治(1977-), 男, 北京人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为信道编码、射频测试技术、无线资源管理。