

# 高频通信技术

## High Frequency Communication Technology

**摘要:**毫米波是第5代移动通信系统的重要通信技术,利用大带宽承载大量信息,有效提升系统的吞吐量。第3代合作伙伴计划(3GPP)已经对毫米波频段做了划分,各个国家逐步对频谱进行分配。毫米波因其频谱特性,需要与大规模天线阵列结合使用,获得波束赋形增益。通过对波束设计与波束管理等核心技术的创新,实现热点高速传输。同时,通过高低频无线协作组网的方式,实现整个区域内的基础覆盖,以适应不同的通信场景需求。

**关键词:**毫米波;混合波束赋形;波束管理;高低频协作组网

**Abstract:** Millimeter wave is an important technology for the 5th generation mobile communication system. By utilizing wide frequency band for high data transmission, millimeter wave can greatly increase the experienced data rates of users and the system throughput. The millimeter-wave bands have been standardized by third Generation Partnership Project (3GPP), and the spectrum has been allocated gradually by many countries. Due to its spectral characteristics, millimeter waves need to be combined with large-scale antenna arrays to obtain beamforming gain. The high-speed transmission of hotspots is realized by the innovation of beam design and beam management. In addition, the basic coverage in the entire area and the requirement for different communication scenarios can be satisfied by multi-frequency wireless cooperative networking.

**Key words:** millimeter wave; hybrid beamforming; beam management; multi-frequency cooperative networking

随着社会经济的日益发展,无线通信中的数据业务量持续增长,在近几年来呈现出指数级的爆发态势。数以亿计的智慧终端将介入网络,相互连接交互信息,使得业务和应用更加多样化和多元化<sup>[1]</sup>。第5代移动通信系统(5G)也称为IMT-

2020,已经成为当前最为热门的研究方向和研究领域。根据IMT-2020(5G)推进组《5G愿景与需求白皮书》的要求,5G还将大幅提高网络部署和运营效率,与4G相比,频谱效率提升5~15倍,能量效率和成本效率提升百倍以上,5G的容量预计是4G的



李萍/LI Ping  
魏浩/WEI Hao  
黄静月/HUANG Jingyue

(中兴通讯股份有限公司,广东深圳  
518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201901003  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190129.1118.002.html>

收稿日期: 2018-12-28  
网络出版日期: 2019-01-29

1 000 倍<sup>[2]</sup>。

然而,作为构建新一代信息基础设施重要载体,无线电频谱资源愈发稀缺,资源结构性紧缺问题愈发突出<sup>[3]</sup>;因此,在规划和分配 5G 系统频率的时候,基于 6 GHz 以上高频段的频谱划分和使用,就自然成为大势所趋。毫米波具体是指波长在 1~10 mm 的电磁波,其频率大约在 30~300 GHz 之间。毫米波可以采用大载波带宽承载大量数据信息,能够支持 5G 时代 0.1~1 Gbit/s 的用户体验速率要求。

近年来,工业界对 5G 毫米波频段的商用推进愈发加快。Verizon、Vodafone、中国移动、中国电信、中国联通等全球知名电信运营商,相继公布其在 5G 毫米波频段的布局 and 试验进展,毫米波通信的商用已经近在眼前。

## 1 5G 高频频谱分配

### 1.1 协议标准的频谱划分

2018 年 7 月,针对 5G 毫米波频谱规划问题,未来移动通信论坛 5G 微波毫米波特别工作组发布了《5G 毫米波频谱规划建议白皮书》,建议在 2018 年前分别完成 24.75~27.5 GHz 以及 37~42.5 GHz 的 5G 频率规划等,以给产业明确指导方向<sup>[4]</sup>。标准化方面,国际电联无线电通信部门 (ITU-R) 在 2017 年底发布的 IMT-2020 技术评估报告中,室内热点及密集城区增强型移动宽带 (eMBB) 场景中以 4 GHz (代

表以 3.5 GHz 为主的频段区间) 和 30 GHz (代表 26 GHz、39 GHz 等毫米波频段) 作为 5G 技术评估的典型频段配置。第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 5G 标准作为主流的 5G 技术体制,目前获得了最为广泛的国家及移动通信产业的支持。3GPP 新空口 (NR) 毫米波频段的射频标准讨论和制定工作由 3GPP 无线接入网络 (RAN) 4 牵头开展,26 GHz 和 39 GHz 为全球范围内备受关注的毫米波频段,被首先纳入了 3GPP 标准,为相关毫米波频段的产业培育及设备开发制造创造条件并提供保障。

目前 3GPP 定义的频率范围分为频率范围 (FR) 1 和 FR2。FR1 是低于 6 GHz 的部分,频率范围为 450~6 000 MHz,覆盖能力越强穿透能力越好。FR2 范围主要是高频,也就是我们通常说的毫米波频段,频率范围为 24 250~52 600 MHz,穿透能力较弱,但带宽充足,频谱干净,未来的应用十分广泛。在 FR2 频段中,又继续细分了不同的频段,并做了标号,如表 1 所示。

### 1.2 各国频谱分配

各国电信监管机构在分配 5G 频谱时都会通盘考虑已分配频谱和未分配频谱。目前全球主流运营商都已对频谱进行了分配,并制定了对未来 5G 频谱的分配计划,如表 2 所示。

在 2018 的韩国平昌冬奥会上,Intel 和韩国运营商 KT 部署

▼表 1 频率范围 2 中的 NR 工作频段 (3GPP 已标准化的毫米波频段)

| NR 频段 | UL 和 DL 频段          | 双工模式 |
|-------|---------------------|------|
| n257  | 26 500 ~ 29 500 MHz | TDD  |
| n258  | 24 250 ~ 27 500 MHz | TDD  |
| n260  | 37 000 ~ 40 000 MHz | TDD  |
| n261  | 27 500 ~ 28 350 MHz | TDD  |

DL: 下行链路  
NR: 新空口  
TDD: 时分双工  
UL: 上行链路

了迄今为止规模最大的 5G 网络,在 10 个奥运场馆搭建 22 个 5G 链路,支持交互式网络电视 (IPTV)、虚拟现实、Wi-Fi 等应用,还为观众和游客提供千兆级速度服务。同时,为备战 2020 年东京奥运会,日本加速推进 5G 技术开发。美国在其可持续频谱战略中提出:要确保美国在 5G 中处于领导地位,促进就业增长和经济增长,并保护国家安全。中国在国务院发布的《“十三五”国家信息化规划》中,16 次提到了 5G,提出在 5G 网络技术要走在全球前列。

5G 不仅是无线通信产业的一次升级换代,更是一次重大的技术变革,与数字化转型技术、人工智能 (AI) 技术一起,成为国民经济转型升级的重要推动力。5G 已经成为国与国之间战略竞争的重要组成部分。

## 2 传输特性与信道建模

高频的信道特性和模型是 5G 高频关键技术研究 and 系统设计的关键环节之一。对于室外到室内的穿透损耗,高频中不再区分 Umi/Uma 场景,且模型中增

▼表2 各国频谱分配现状与计划

| 国家  | 高频段频谱分配情况  |
|-----|--|
| 新加坡 | 重点关注 28 GHz 毫米波频段  |
| 日本  | 计划于 2019 年 3 月分配 27 ~ 29.5 GHz 的 5G 毫米波频段  |
| 韩国  | 2017 年初发布国家宽带/频谱计划, 高频段为 27.5 ~ 28.5 GHz 频段, 计划于 2019 年 3 月开始 5G 商用  |
| 俄罗斯 | 计划于 2020 年开始部署 5G, 2024 年覆盖所有大城市, 目前 5G 测试高频段为 25.25 ~ 29.5 GHz 频段   |
| 德国  | 确认 26 GHz (24.25 ~ 27.5 GHz)、28 GHz (27.5 ~ 29.5 GHz) 和 32 GHz (31.8 ~ 33.4 GHz) 为 5G 毫米波频段, 并认为 26 GHz 最重要  |
| 英国  | 确定 24.25 ~ 27.5 GHz 作为 5G 的高频段   |
| 美国  | 规划 4 大高频段用于 5G 移动网络和固定无线: 27.5 ~ 28.35 GHz (28 GHz)、37 ~ 38.6 GHz (37 GHz)、38.6 ~ 40 GHz (39 GHz) 和 64 ~ 71 GHz。其中, 28 GHz、37 GHz 以及 39 GHz 为授权频谱, 64 ~ 71 GHz 为未授权频谱, 合计约 11 GHz 带宽 |
| 中国  | 2017 年, 工信部批复了 24.75 ~ 27.5 GHz 和 37 ~ 42.5 GHz 高频段用于 5G 技术研发试验, 这样可确保未来每家运营商平均获得至少 2 000 MHz 带宽的 5G 高频段   |

加标准方差, 其中穿透损耗取决于墙体材料(如玻璃、水泥、木头等)。对于信道模型的小尺度参数, 如 delay spread、发射端离开角(AoD)、接收端到达角(AoA)、散射簇到移动端的俯仰到达角(ZoA)等, 高频模型中均与载波频率相关<sup>[5]</sup>。3GPP 于 2016 年 6 月的第 72 次全会上启动了 5G 高频信道模型(0.5 ~ 100 GHz)的研究工作。为了凸显高频段与低频传播特性的区别, 5G 高频信道模型中引入了更多与高频相关的新特性, 包括: 氧衰模型、大带宽及天线阵列模型、空间一致性模型、阻挡模型、多频段相关性模型、时变多普勒模型、用户(UE)转动模型和确定性地面反射模型、随机簇模型等。图 1 为 IMT-2020 给出的信道模型模块。

混合信道模型以电磁理论物理学为基础构建信道模型, 适合 400 MHz ~ 100 GHz 多种带宽的配置, 对于当前 5G 对信道的

空间相关性、时间相关性、频率相关性等特性自然满足, 具有很强的向后兼容性。图 2 是混合信道模型。

混合信道模型包括确定性模型、统计模型 2 大部分, 确定性模型主要基于确定性场景 3D 模型, 利用射线追踪技术, 考虑直射、透射、反射、绕射等物理现象, 进行确定性计算, 得到发射及接收的主要射线径确定性结果。统计模型主要反映确定

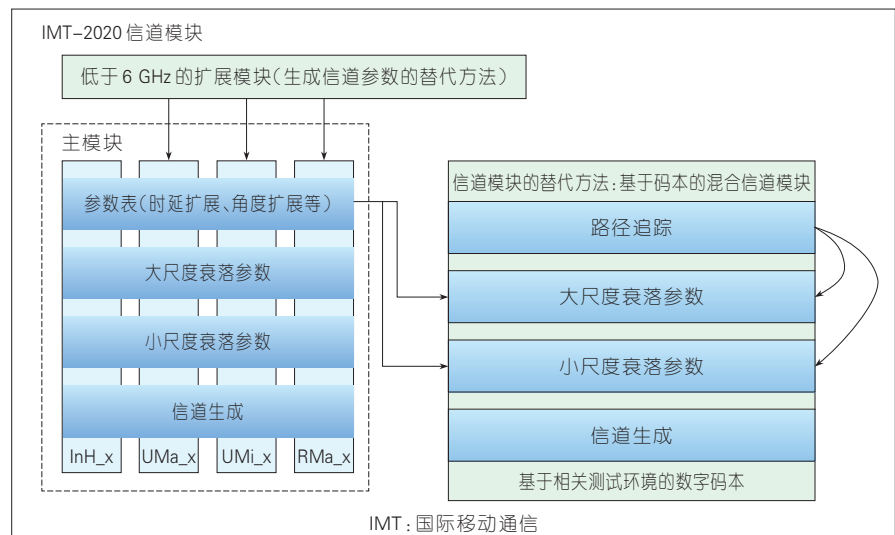
性模型中未进行建模的小物件、粗糙面以及因为人流、车辆、植被等引发的散射、阻挡和闪烁反射现象。

### 3 波束与赋形

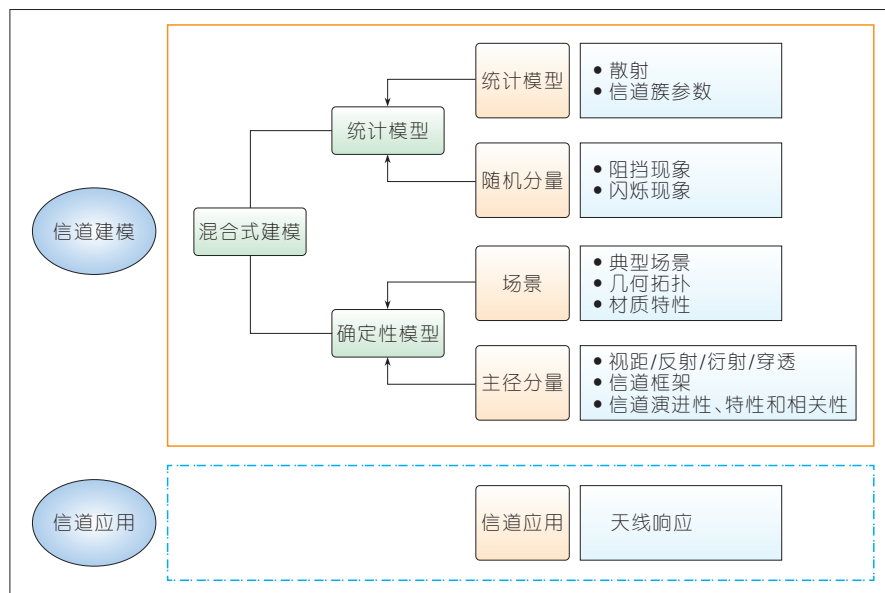
毫米波与低频段电磁波相比, 波长比较短, 面临的一个主要问题是自由空间路损使得接收端信号产生大幅度衰减<sup>[6]</sup>。但同时, 较短的波长使其能够在发射端部署大规模天线阵列以提供显著的波束赋形增益, 以抵抗路径损耗带来的性能损失。波束就成了毫米波的标配属性, 被更多地研究与设计。

#### 3.1 赋形结构

全数字波束赋形的大规模多输入多输出(MIMO)系统虽然可以产生最优性能, 然而射频(RF)链路个数需要与基站端部署的天线数量相同, 硬件复杂度和成本、信号处理的复杂度和能耗均迅速增加<sup>[7]</sup>。模数混合波束



▲图1 5G信道模型模块图



▲ 图2 混合信道模型总体思路

赋形结构由一个低维度的数字波束和一个高维度的模拟波束组成,不需要如同传统纯数字波束赋形结构一般的RF链路的数量,有效降低实现成本和设备体积,成为毫米波通信的主流结构方式<sup>[8]</sup>,如图3所示。

在图3中, $N_i$ 代表发射端总天线数,而 $N'_{RF}$ 代表发射端的RF链路个数。每条RF链路都将连接全部的天线,实际RF链路数为 $N_i N'_{RF}$ 条。在满足一定的条件时,可以得到和纯数字波束赋形结构同等的波束赋形增益,但结构的复杂度和成本都相当高。

因此,可以采用低复杂度和低成本的其他连接结构。

(1)部分连接结构:每条RF链路连接的天线数为 $N_i/N'_{RF}$ ,该种结构牺牲了一部分的波束赋形增益,但在硬件实现上具有显著优势<sup>[9]</sup>。

(2)重叠子阵结构:每条RF链路连接的天线数在 $N_i/N'_{RF}$ 到 $N_i$ 之间,是全连接结构和部分连接结构的折中。

(3)双倍移相器结构:每1个等效的模拟波束赋形因子通过2个移相器实现,能够调节的幅度和相位选择更多,实现更好的性能。

(4)开关结构:通过控制对

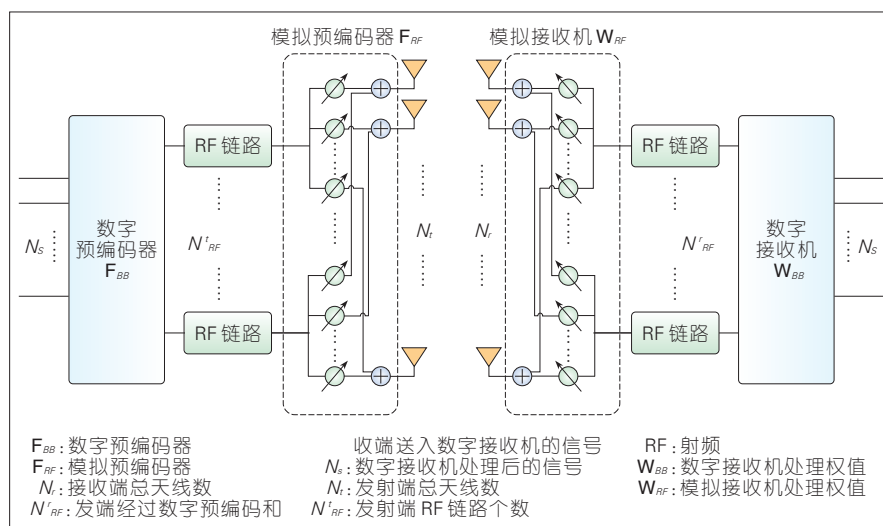
应通路的开关,利用 $N_c$ 个相移器实现幅度和相位的控制,其性能决定于 $N_c$ 的数量。相对于双倍相移器结构来说,开关结构能够达到的精度更高,性能更好。

在实际系统中,模拟赋形增益的效果取决于多种因素,包括移相器的精度、RF链路的长度、器件响应时延、功率放大器的非线性等<sup>[10-12]</sup>;因此,采用何种结构需要在硬件实现复杂度和波束赋形增益上做出权衡。

### 3.2 波束算法

波束是毫米波通信不同于低频段通信的主要特征,基站通过波束赋形的方式来进行毫米波覆盖;因此波束设计与波束管理就必然成为毫米波通信的核心技术<sup>[13]</sup>。

波束设计中对于控制波束和业务波束的管理,可以独立进行也可以统一调整,这2种方式可以通过高层信令配置来实现。对于控制波束,考虑其传输



▲ 图3 模数混合波束赋形结构

的鲁棒性,可以在不同时刻使用不同方向的波束配置给终端控制信道,以解决高频信道突发阻塞的问题。对于业务波束,根据具体场景,相对较窄的波束会有较好的模拟赋形增益和干扰屏蔽效果,更适合于对移动性需求相对较低、用户位置相对较固定的场景。而设计相对较宽的波束,可以减少总波束的个数,降低测量开销,用户移动出波束的时间也更长,有利于更好地跟踪波束<sup>[14]</sup>。

波束管理包括波束扫描、波束跟踪<sup>[15]</sup>和波束恢复。基站和UE通过其最优的波束对实现连接通信,当相邻波束的能量大于当前能量时立即发生切换。基站侧和UE侧分别发起波束轮扫,通过一轮完全轮扫,基站侧与UE侧共同维护了一个最优波束对。在基站侧和UE侧使用最优波束对时,继续进行基站侧和UE侧波束测量与维护;当UE侧发生位置变化或者旋转时,UE侧可以及时切换到最优波束上。同时,基站侧也可以根据UE位置变化来调整基站侧波束。如果当前由于遮挡导致所有候选波束均不可用时,UE侧发起波束失败恢复流程(BFR),向基站发起同步请求,当收到基站侧反馈时则恢复成功,实现快速同步。采用良好的波束管理方案,使得系统在工作过程中,尽可能对波束切换无感知,即波束切换对系统性能没有明显的影响。

当前人工智能(AI)在各个领域掀起了应用热潮,我们还可以将AI与传统通信相结合,基于AI机器学习算法,对实际的通信场景进行分类和识别,以实现波束的自适应设计与管理策略,从而快速跟踪无线信道场景的变化<sup>[16]</sup>。

#### 4 协作组网

高低频无线协作组网是5G网络架构的必然发展趋势,主要是宏基站通过低频段实现整个区域内的基础覆盖,微基站通过高频段承担热点覆盖和高速传输,以满足5G网络更高数据流量、更快用户体验速率、海量终端连接和更低时延的需求<sup>[17-18]</sup>。

在组网方式中,高低频可以各自独立组网,也可以通过双连接部署实现组网,如图4所示。

在独立组网方式中,5G低频/长期演进(LTE)主要用于基础覆盖和移动性保证,而5G高频主要用于提升用户吞吐量,5G低频/LTE与5G高频之间通过小区选择、重选或负载均衡策略接入用户。在双连接部署组

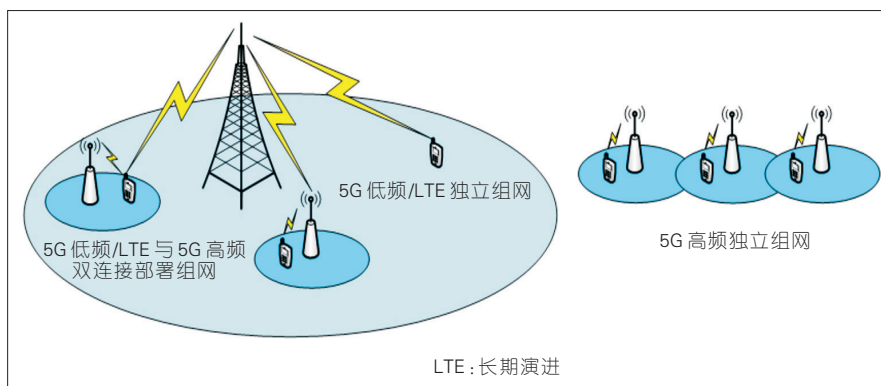
网方式中,5G低频/LTE与5G高频之间通过双连接实现共同组网<sup>[19]</sup>,采用集中单元(CU)和分布单元(DU)分离技术,由CU集中对低频和高频资源做统一管理,并对高低频双连接做数据流的分发。无线资源控制(RRC)和分组数据汇聚协议(PDCP)在CU,无线链路层控制协议(RLC)/媒体访问控制(MAC)/物理层(PHY)在DU。

在实际通信中,具体的组网方式,可以根据具体的组网场景来进行选择。

##### 4.1 组网场景

高频段通信属于5G中的eMBB场景,主要承担热点高速传输,可以细分为如下几种组网场景。

(1)高频孤立小区组网。在热点区域开启单个高频5G小区,小区周围一定区域内没有同频的高频小区。该小区不存在小小区间干扰,与低频5G或LTE进行互操作来保证用户的体验。该组网方式的缺点是高频5G存在严重遮挡后的覆盖盲区。



▲ 图4 高低频无线协作组网

(2)高频连续覆盖小区同频组网。这种组网方式就是传统意义上的三叶草同频组网,小区间干扰将降低用户的信号与干扰加噪声比(SINR)和体验,如何管理波束规避干扰,也需要重点考虑。

(3)高频连续覆盖小区异频组网。这种组网方式下的小区间干扰将会大大降低,但是频谱资源将有数倍的消耗,取决于运营商是否有足够的频谱。

(4)超密集区域小区组网。如演唱会、运动赛、大规模会议以及球赛等场景,业务需求量很大,高频5G正好能够满足各方面的需求且可以根据覆盖区域、容量等需求灵活调整频率资源。

(5)室内大容量组网。由于室内的房间、隔墙等建筑物构成了天然的隔离,以及室内丰富的多径的存在,使得高频5G尤其适用于室内覆盖,而且可以根据覆盖和容量需求调整频谱资源,选择合适的产品形态。

(6)室外向室内的覆盖。高频穿透玻璃后的效果是非常好的,如大的玻璃幕墙办公区、商区等,但水泥墙体对高频损耗比较大。

## 4.2 关键技术

根据上文所述的组网场景,高低频协作组网的关键技术研究主要涉及以下3个方面。

(1)对移动终端连续覆盖。

实际组网时,对于每个孤立的高频单站,很容易出现由于固

定或者流动遮挡导致的覆盖空洞。对于高频参与的组网场景,如何在多个站的穿插覆盖区域内保持对移动终端的连续覆盖服务是技术方案首要考虑的问题。该问题包括融合空口设计的考虑、支持数模混合赋型的高频基站的最优设计(射频天线的偏硬件设计、预编码码本等算法设计),以及波束切换、波束搜索等波束管理方面的设计。在支持多用户通信的需求下,还需要对大规模MIMO设备和算法能力提出更高要求。

(2)移动终端业务连续性。

在超密集组网场景中,高频信号覆盖半径小,多站穿插覆盖部署,导致移动终端在该区域内的业务服务在多个基站间不断快速切换,这需要保证用户业务的连续性,尽可能使得用户对切换无感知。因此,在方案中如何分层调度、具体切换或调度的算法以及包括终端参与的流程等都是需要研究的问题<sup>[20]</sup>。

(3)协作组网规模能力。

高低频协作组网要针对相应实际可能部署场景,提供整体的解决方案。在组网能力下,关于服务用户数、平均吞吐率,以及覆盖边缘的定义必须明确清晰。同时,高频和低频协作的范围能力、负载均衡等,也是高低频融合组网规模能力的关键问题。这些关键问题的研究,涉及融合空口设计、CU分离和双连接的具体架构设计,以及完整的终端技术方案和移动性管理方

案。此外,还需要结合信道建模基础上的系统仿真,以及验证性样机系统原型开发。

## 5 结束语

中兴通讯从2013年开始对5G无线通信进行研究,在毫米波通信方面有着深厚的技术积累,包括实际应用场景的探究、关键技术的掌握研发、组网方面的策略与方案设计等。目前,已经通过由工信部主导、IMT-2020(5G)推进组负责实施的5G国测第3阶段测试。同时完成5G实验网的建设,与全球知名工业界厂商进行联合测试。2019年将迎来5G预商用建网。

2018年11月,工信部IMT-2020(5G)推进组无线技术工作组表示,启动6G的概念研究工作。未来的6G移动通信系统,是一种泛在融合信息网络,可达到兆比特每秒级别的信息传输速率。为了支持如此高的吞吐量和高速组网,使人们对新频率资源开发的目光自然地从小毫米波频段转向波长更短且从前较少关注的太赫兹频段。毫米波频段已经在学术界和工业界得到广泛认可,而太赫兹无线通信作为一个新兴领域,其学术价值和应用前景更是不可估量。未来是学术界和工业界融合的时代,无线通信也必将迎来崭新的发展。

## 致谢

本文得到了中兴通讯股份

有限公司无线研究院算法部窦建武、柯雅珠、张波、李杰、田力、武艺鸣的大力帮助和支持，谨致谢意！

## 参考文献

- [1] WANG D, ZHANG Y, WEI H, et al. An Overview of Transmission Theory and Techniques of Large-scale Antenna Systems for 5G Wireless Communications [J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(8): 081301:1-081301:18. DOI: 10.1007/s11432-016-0278-5
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书 [EB/OL]. (2014-05-28)[2018-12-28]. <http://www.imt-2020.cn>
- [3] 工业和信息化部. 国家无线电管理规划 (2016—2020年) [EB/OL]. (2016-08-29)[2018-12-28]. <http://www.miit.gov.cn>
- [4] 未来移动通信论坛. 5G 毫米波频谱规划建议白皮书 [EB/OL]. (2018-07-01)[2018-12-28]. <http://www.future-forum.org>
- [5] WANG C, BIAN J, SUN J, et al. A Survey of 5G Channel Measurements and Models [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):3142-3168. DOI: 10.1109/COMST.2018.2862141
- [6] PI Z, KHAN F. An Introduction to Millimeter-wave Mobile Broadband Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6):101-107. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5783993
- [7] MOLISH F, RATNAM V, HAN S, et al. Hybrid Beamforming for Massive MIMO - A Survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9):134-141. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600400
- [8] HUANG J, CHENG Z, CHEN E, et al. Low-Complexity Hybrid Analog/Digital Beamforming for Multicast Transmission in mmWave Systems [C]//International Conference on Communications. USA: IEEE, 2017:1-6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7997049
- [9] GENG J, WEI Z, WANG X, et al. Multiuser Hybrid Analog/Digital Beamforming for Relatively Large-scale Antenna Arrays [C]//Globecom Workshops. USA: IEEE, 2014: 123-128. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6824973
- [10] DEMIR T, TUNCER T. Hybrid Beamforming with Two Bit RF Phase Shifters in Single Group Multicasting [C]//International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. USA: IEEE, 2016:3271-3275. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472282.
- [11] AYACH O, RAJAGOPAL S, ABUSURRA S, et al. Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3):1499-1513. DOI: 10.1109/TWC.2014.011714.130846
- [12] RUSU C, MENDEZ-RIAL R, GONZALEZPRELCICY N, et al. Low Complexity Hybrid Sparse Precoding and Combining in Millimeter Wave MIMO Systems[C]// 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2015:1340-1345. DOI: 10.1109/ICC.2015.7248509
- [13] GIORDANI M, POLESE M, ROY A, et al. A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies [J].IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018: 1-22. DOI: 10.1109/COMST.2018.2869411
- [14] WANG J, ZHU H, DAI L, et al. Low-Complexity Beam Allocation for Switched-Beam Based Multiuser Massive MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(12):8236-8248. DOI: 10.1109/TWC.2016.2613517
- [15] XUE Q, FANG X, XIAO M, et al. Beam Management for Millimeter Wave BeamSpace MU-MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018:1-14. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2867487
- [16] WANG J, WANG J, WU Y, et al. A Machine Learning Framework for Resource Allocation Assisted by Cloud Computing [J]. IEEE Network, 2018, 32(2):144-151. DOI: 10.1109/MNET.2018.1700293
- [17] ZHANG Y. Energy Efficiency Analysis of Heterogeneous Cellular Networks with Extra Cell Range Expansion [J]. IEEE ACCESS, 2017, (5):11003-11014. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2713814
- [18] BHUVANESWARI P T V, INDU S, SHIFANAN L, et al. An Analysis on Cell Range Expansion in 4G LTE Networks[C]// International Conference on Signal Processing, Communication and Networking. USA: IEEE, 2015:1-6. DOI: 10.1109/ICSCN.2015.7219824
- [19] MIDDLETON R H, WIGREN T, LAU K, et al. Data Flow Delay Equalization for Feedback Control Applications Using 5G Wireless Dual Connectivity[C]//Vehicular Technology Conference (VTC Spring). USA:IEEE, 2017: 1-7. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108608
- [20] NAM W, BAI D, LEE J, et al. Advanced Interference Management for 5G Cellular Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 52-60. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815893

## 作者简介



李萍，中兴通讯股份有限公司无线研究院资深算法系统工程师；从事 5G NR 高频无线技术研究和算法设计工作，主要研究方向为系统架构设计、基带算法方案设计和信号检测解调和网络特性优化等。



魏浩，中兴通讯股份有限公司无线研究院算法系统工程师；从事 5G NR 无线通信算法预研与设计工作，主要研究方向为信道估计、信号检测、信道译码、混合预编码等；发表论文 20 余篇。



黄静月，中兴通讯股份有限公司无线研究院算法工程师；从事 5G NR 毫米波通信算法研究与开发工作，主要研究方向为信道估计、混合预编码、多播波束赋形等。