

## 5G 移动通信测试技术进展与挑战

张治中 毛亚丽 朱 磊

(重庆邮电大学通信网测试工程研究中心, 重庆, 400065)

**摘要:** 第五代移动通信系统(The fiith generation mobilecommunication system, 5G)测试作为整个通信产业链的关键一环,能够对5G全网设备以及不断演进的新技术进行验证。它具有灵活多样的测试技术,并能真实全面反映网络状况的特点,为增强5G网络覆盖能力,全面提升网络整体性能提供了强有力的保障。本文先对全球5G发展现状进行简要概述,随后从5G关键技术验证、核心网验证以及接入网验证3个方面对中国的测试发展状况作介绍,详细介绍了新空口的空口辐射(Over the air, OTA)测试技术及其在大规模天线技术(Massive MIMO)上的应用优势。最后,对未来5G测试面临的挑战和发展趋势进行了展望。

**关键词:** 第五代移动通信系统;测试技术;空口辐射;大规模MIMO

**中图分类号:** TN915      **文献标志码:** A

## 5G Mobile Communication Test Technology Progress and Challenges

Zhang Zhizhong, Mao Yali, Zhu Lei

(Communication Networks Testing Technology Engineering Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065, China)

**Abstract:** As a key part of communication industry chain, the 5th generation mobilecommunication system (5G) testing technology makes it possible to simulate and test 5G network devices and evolving new standard technology. Flexible and diverse test technology can truly reflect the network status, providing a strong guarantee for enhancing the coverage of 5G network and improving the overall performance of the network. This paper first gives a brief overview of global 5G development status and an introduction to China's test progress in 5G key technology verification, core network verification and access network verification. Then it particularly presents the over-the-air (OTA) testing technology of 5G NR (New radio) and its advantages for massive MIMO. Finally, the challenges and development trends of future 5G testing are forecasted.

**Key words:** 5G; testing technology; over the air (OTA); massive MIMO

## 引 言

第五代移动通信系统(The 5th generation mobilecommunication system, 5G)将开启万物互联的时代,其技术主要应用于3个典型的场景,分别是增强移动宽带(Enhanced mobile broadband, eMBB)、大规

模物联网 (Massive machine-type communications, mMTC)以及低时延高可靠通信 (Ultra-reliable and low-latency communications, URLLC)<sup>[1]</sup>。到目前为止,韩国、美国、瑞士、英国和西班牙已开通了5G服务。

韩国和美国作为最早开通5G商用服务的国家<sup>[2]</sup>,在实测过程中都出现了基站覆盖不足、网络服务质量不稳定等问题。据调查,韩国5G室内外实测传输速率差距较大,室外传输速度约为430 Mb/s,而室内仅为193 Mb/s。并且,在测试过程中存在连接频繁中断,地下信号弱等问题。根据美国运营商Verizon的5G服务实测结果显示,在没有阻挡的室外环境下5G毫米波基站的覆盖范围在100~150 m之间,但由于5G毫米波信号穿过障碍物后损耗严重,从而无法完成室内覆盖。所以,为了保障5G商用后的性能,必须在商用前做好全方位测试与有效评估。

在通信产业链中,通信网络的规划、建设和运营都离不开测试这一重要环节。测试可为移动通信系统的关键技术研究及产品研发与维护提供支撑。5G通信的测试主要包括:关键技术、5G网络架构、5G新空口技术(New radio, NR)、5G设备和应用测量。其中,5G相比于长期演进(Long term evolution, LTE)技术在空口部分引入了毫米波、Massive MIMO和新多址接入等多种技术<sup>[3]</sup>。传统空口测试技术无法对5G新技术的有效性进行验证,因此急需发展全新的测试技术。此外,5G测试还面临着终端智能化与应用场景多样化带来的新挑战<sup>[4]</sup>。

中国在5G商用前期建设中稳中求进,按照计划进行5G全产业链的整体协同工作。2016年IMT-2020(5G)推进组开启5G技术研发试验;2017年全国首批5G试验网建设和外场测试分别在广州、上海、苏州和宁波4座城市进行<sup>[5]</sup>;2018年3大运营商在上海、苏州和杭州等城市开展5G试点;2019年6月提前发放5G商用牌照,促进5G形成完整的产业链,5G商用提上日程。

## 1 国内5G测试进展

### 1.1 5G关键技术及测试进展

为了适应未来移动网络通信需求,5G引入了大规模天线、新型多址接入、新型多载波、高频段通信、超密集组网和新型编码六大关键技术<sup>[6-7]</sup>。

大规模天线:由于5G的使用频段高,传输速度快,因此会面临波长短,信号传输衰减严重,穿透性弱的问题,从而影响信号的接收。根据理想条件下的弗里斯传输公式

$$P_r = \frac{P_s}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_t G_s \quad (1)$$

式中: $R$ 为发送端与接收端的距离, $P_r$ 为接收功率, $P_s$ 为发射功率, $G_s$ 为发射天线增益, $G_r$ 为接收天线增益, $\lambda$ 为波长。在5G使用高频频段进行通信时,能够通过增大发送功率、缩短发送端与接收端的距离与增大接收天线与发射天线增益等方式保证接收信号。综合考虑实施的可行性与成本等方面,改善接收与发射天线增益是最佳方案。大规模天线技术通过在基站侧配置多根天线,并在水平和垂直方向对天线进行动态调整,从而达到提升无线通信系统的容量、扩大覆盖范围、提高波束控制能力的效果<sup>[8-12]</sup>。然后通过空间复用技术,提升频谱效率。

新型多址接入:传统的正交多址技术为了服务不同的用户,通过切割资源的方式进行传输,但在面对5G的用户密度大、频谱效率高等要求时,传统正交多址接入方案难以满足要求。新型多址接入技术不再进行分割,而是采用叠加传输的方式,在资源上复用更多的用户<sup>[13]</sup>,传统的时分多址(Time division

multiple access, TDMA)和频分多址(Frequency division multiple access, FDMA),与非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)的对比如图1所示。新型多址技术在接收端利用接收算法(如连续干扰抵消(Successive interference cancellation, SIC)算法)进行了信息的分离,可以提高系统的接入容量和频谱效率。通过免调度传输,新型多址技术还能达到简化信令流程和缩短空口传输时延的效果<sup>[14-16]</sup>。

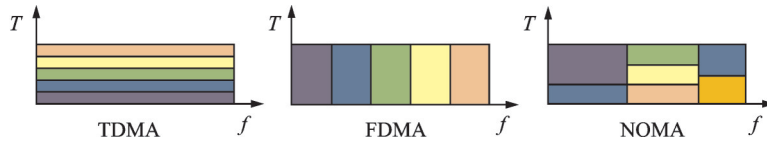


图1 正交多址与非正交多址对比

Fig.1 Orthogonal multiple access and non-orthogonal multiple access comparison

新型多载波:子带滤波的正交频分复用(Filtered-orthogonal frequency division multiplexing, F-OFDM)、滤波器组多载波(Filter bank multi-carrier, FBMC)、通用滤波器多载波(Universal filtered multi-carrier, UFMC)作为新型多载波技术<sup>[15]</sup>,可以降低子带或子载波的带外泄露,降低保护带开销。文献[17-21]中有3种载波技术的相关介绍,F-OFDM将一个完整的频带划分为多个子带,根据业务进行波形参数的设置,对子带的滤波处理,适用于LTE与5G;滤波器组多载波(Filter bank multi-carrier, FBMC)技术对通信网络的内部子载波进行单独滤波,其中各子载波之间不必正交,通过设计系统内滤波器能够消除码间串扰;UFMC对连续子载波进行过滤,处理5G信号更加灵活。

高频段通信:2G到LTE普遍使用的是3 GHz以下的频段,该频段具有覆盖范围广、受干扰较小且传播衰减较小等优点。由于低频开发时间较早,剩余的频段资源达不到5G的需求。因此5G采用以sub 6 GHz作为主要频段结合高频段的方式,构成了5G的工作频段<sup>[22-27]</sup>。5G采用的波束赋形技术,能够提高频谱利用效率。文献[28]中假设 $n$ 个对称振子作为阵元构成离散元直线阵,其方向函数如式(2)所示, $A_i$ 代表天线元电流的幅度, $\varphi_i$ 代表其相位, $d_{i1}$ 代表每个阵元相对于第1个阵元的中心距离。从方向函数中可以看出通过控制天线阵列的相位和幅度可以实现对特定方向的信号进行叠加,有

$$f(\theta) = \sum_{i=1}^n [A_i e^{j(kd_{i1} \cos\theta + \varphi_i)}] f_i(\theta) \quad (2)$$

超密集组网:在无线网络中通过增加小区数和信道数,可以获得更高的频率复用效率,从而在局部热点区域实现百倍量级的系统容量提升<sup>[29-30]</sup>。5G超密集组网可以分为“宏+微”及“微+微”两种方式。在“宏+微”部署方式中,宏基站负责大面积广域覆盖,微基站负责容量。在“微+微”部署方式中,微基站组成的密集网络形成一个虚拟宏小区,完成类似于“宏+微”模式下宏基站的功能<sup>[31-33]</sup>。

新型编码:信道编码通过在发送端对原数据添加冗余信息,在接收端检测并纠正传输中产生的差错的方式,消除传输过程的干扰,过程如图2所示。低密度校验码(LDPC码)和极化码(Polar码)作为5G新型编码技术,分别用于数据信道和控制信道。LDPC码是一种前向纠错码,其校验矩阵中的非零元素很少,使得译码复杂度与最小码距仅随码长的增加而线性地增加。同时,LDPC码是通过其校验矩阵 $H$ 进行迭代译码的。

Polar码是理论上可以达到香农极限的编码,根据信道极化理论,当码长 $N$ 不断增大时,能产生容量

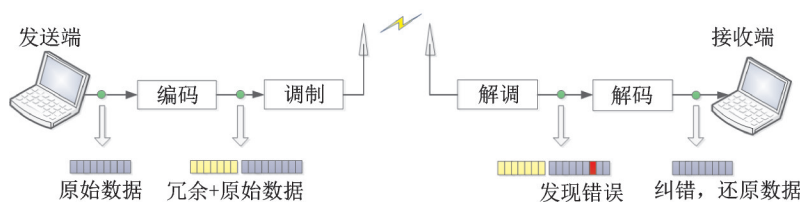


图2 信道编码解码过程

Fig.2 Channel coding and decoding process

趋于1的无误码信道。同时,Polar码使用复杂度较低的SC译码算法,消除了错误平层现象,并且相关研究<sup>[34-35]</sup>针对SC算法的吞吐量等问题也提出了优化算法。

针对5G关键技术,推进组做了以下测试内容,如表1所示。5G推进组于2016年在MTNet实验室与怀柔顺义外场针对5G单点关键技术进行了验证测试<sup>[36]</sup>。测试结果如表2所示。

表1 5G关键技术测试内容  
Tab.1 Test contents of 5G key technologies

关键技术	测试内容	指标
大规模天线	用户水平分布 MIMO 性能 用户水平+垂直分布 MIMO 性能	用户密集分布 MIMO 性能 MIMO 覆盖性能
新型多址接入	上下行容量测试 MIMO 覆盖性能	大连接能力测试 上行用户连接能力、下行吞吐量性能、上行免调度能力
新型多载波	射频与基带频谱性能对比 下行同步/异步性能测试	上行同步/异步性能测试 频谱模板与误差向量幅度 (Error vector magnitude, EVM) 性能 存在时偏和频偏的异步情况下 CP-OFDM 与新型多载波技术的性能对比
高频段通信	室内外视距单用户吞吐量性能 室内外非视距多用户吞吐量性能 室外视距覆盖性能测试	室内外非视距单用户吞吐量性能 室内外波束跟踪测试 单终端峰值速率、两个终端同时工作峰值速率以及视距/非视距的平均下行吞吐量
超密集组网	UDN 流量密度测试	独立小区与协作小区 UDN 性能 流量密度
先进编码	用户静止极化码长码性能测试 用户移动极化码长码性能测试	用户静止极化码短码性能测试 用户移动极化码短码性能测试 在静止/移动场景下短码与长码的性能增益

通过对关键技术的测试结果进行分析,可以得到以下结论:

(1)关键技术测试开展促进了研发与标准生成。5G 关键技术是支撑 5G 实现的基石,大规模天线、新型多址技术、高频通信等关键技术为 5G 的低时延、高可靠性能指标的实现提供了解决途径。通过“测试先行”的思想,推动了 5G 全球标准的研究与生成,确保中国在 5G 标准体系中具有举足轻重的地位,实现真正意义上的“5G 引领”。

表2 5G关键技术测试结果  
Tab. 2 Key technology test results

关键技术	测试通过厂家	性能
大规模天线	华为、中兴、上海贝尔、大唐、英特尔	水平分散分布与水平+垂直分散分布场景:大唐测试峰值吞吐量为4 Gb/s@100 MHz,比SU-MIMO增益超过8倍。
新型多址接入	华为、中兴、大唐	(1)下行吞吐量性能:华为、中兴增益超过86%(相比LTE);(2)上行用户连接能力:华为、中兴、大唐均可提升3倍;(3)上行免调度性能:中兴组内碰撞相较于组件碰撞吞吐量下降48.5%。
新型多载波	华为、中兴、三星、上海贝尔	(1)干扰功率比信号功率高10 dB,频偏4 kHz时,诺基亚UF-OFDM性能基本无损失,CP-OFDM性能下降6 dB;(2)同步偏差1/2符号:诺基亚UF-OFDM比CP-OFDM性能好2 dB。
高频段通信	华为、中兴、爱立信、三星、上海贝尔	爱立信高频测试结果:(1)室内单终端峰值速率可达15.1 Gb/s;两个终端合计可达23.1 Gb/s;(2)室内视距平均下行吞吐量为7.7 Gb/s,非视距为4.3 Gb/s;(3)室外单终端峰值速率可达11.4 Gb/s,两个终端合计可达21.1 Gb/s;(4)室外视距平均下行吞吐量7.2 Gb/s,非视距5.1 Gb/s;(5)可有效支持波束跟踪和切换。
超密集组网	大唐	由6个支持4.9 GHz BRU组成的UDN小区内,使流量密度达到了61.3 Tb/(s·km <sup>-2</sup> ),相比ITU定义的10 Tb/(s·km <sup>-2</sup> ),提高了6倍。
先进编码	华为	华为Polar码与Turbo码对比:(1)静止场景:短码长性能增益0.35~0.48 dB,长码长性能增益0.35~0.6 dB;(2)移动场景:短码长性能增益约0.34 dB,长码长增益约0.37 dB。

(2)5G关键技术性能初步验证成功。推进组对5G的关键技术测试的结果显示,7家参与测试单位的成果实现了对5G的8项关键技术的验证。关键技术成功验证为5G网络架构下新技术的可行性提供了有效的证明,也为5G多样化场景的实现提供了有效支撑。

## 1.2 5G核心网测试进展

非独立组网(Non-standalone, NSA)和独立组网(Stand-alone, SA)是5G网络部署的两种方式<sup>[37]</sup>,如图3所示。

从长远来看,SA才是5G通信的主流方向,但考虑到前期投入与5G商用速度,许多运营商会先进行NSA规模部署再逐渐向SA演进,为此需要演进LTE中使用的演进分组核心网(Evolved packet core,EPC)的功能。SA作为5G网络最终的发展方向,其核心网架构基于网络功能虚拟化(Network function virtualization,NFV)和软件定义网络(Soft defined network,SDN)等技术<sup>[38]</sup>,能有效提升网络灵活性,降低部署成本,提供给用户数据连接和数据业务服务。

针对核心网测试,5G推进组邀请运营商、设备商和芯片商等共同参与,通过在MTNet实验室搭建的室内测试环境,完成了NSA/SA核心网功能测试<sup>[39]</sup>。此外,三大运营商通过联合华为、中兴等设备商,构建5G核心网室外测试环境,进行了端到端的技术和业务测试。NSA/SA核心网测试结果如表3、

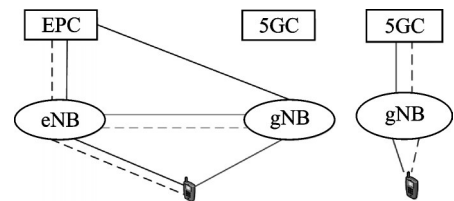


图3 NSA/SA架构  
Fig.3 NSA/SA architecture



表4所示。

表3 NSA核心网测试  
Tab.3 NSA core network test

完成时间	测试地/测试商	参与单位	测试内容	测试结果
2018	中国信息通信研究院实验室	运营商、设备商、芯片商、仪表企业和器件企业	系统功能:双连接、NR接入限制、UE处理能力、QoS计费数据报告、网关选择等 业务流程测试:终端注册、业务请求、移动性管理和会话管理等	华为、爱立信、中兴、诺基亚贝尔和中国信科通过NSA核心网室内测试
2018	中国联通NSA外场	华为	2/3/4/5G融合接入、双连接、UE接入能力管理、5G独立计费和策略控制等 通过AR、VR和高清视频等eMBB场景的真实业务测试了5G NSA的超大带宽能力	实测TUE下行峰值2.2 Gb/s、CPE上行峰值93 Mb/s,在5G核心网,单用户转发性能可以达到20 Gb/s

表4 SA核心网测试  
Tab.4 SA core network test

完成时间	测试地/测试商	参与单位	测试内容	测试结果
2018	中国信息通信研究院实验室	运营商、设备商、芯片商、仪表企业和器件企业	基本功能:移动性管理、会话管理、系统间互操作等 新型服务化架构(SBA)、网络切片、边缘计算功能测试	华为、爱立信、中兴、中国信科通过SA核心网测试; 存在IPV6地址、切片标识、服务化回调接口等分配管理是各系统自定义的 用户注册试验需要进一步优化的问题
2018	中国移动实验室	中兴	AMF、SMF、UPF、NSSF、UDM、AUSF、UDR、PCF等基本网络功能与业务流程的内场测试	具备实验室出场条件
2019	中国电信	中兴	服务化架构、移动性管理、会话管理、PCC和QoS策略控制、Xn接口切换、N2接口切换、安全管理、网络切片、4G和5G双向互操作、支持VoNR等多个业务功能;手动缩扩容、自动缩扩容、可靠性处理等虚拟化功能	率先完成中国电信SA 5G核心网一阶段测试,积极推动5G网络设备产业链的发展与成熟
2019	中国电信	华为	基本业务流程、网络切片、4G/5G互操作、语音业务等 基于虚拟机容器的5G SA核心网元的快速部署、扩扩容、升级、自愈等	在业界首次完成了5G SA核心网的容器化部署

### 1.3 5G 接入网技术测试进展

接入网由一些部署成蜂窝状的基站构成。由于5G所处频段较高,相较4G基站,其覆盖范围变小。因此5G基站部署的密度将会增大,形成以宏基站覆盖为主,小基站辅助完成深度覆盖和容量吸收的模式。华为、中兴和爱立信等系统设备厂商们研发了基于3.5/4.9 GHz基站以及面向新获批的2.6 GHz频率的基站,基站天线配置如表5所示。

推进组在MTNet实验室内完成5G基站功能测试,并利用传导测试方法对3.5 GHz/4.9 GHz基站进行了射频测试。同时还通过空口辐射(Over the air, OTA)测试在信通院的暗室中对3.5 GHz频段的基站性能指标进行测量。NSA/SA接入网测试结果如表6,7所示。从5G组网的测试的结果不难看出:

表5 基站天线配置情况

Tab. 5 Base station antenna configuration

基站频段/GHz	通道数	阵子数	发射功率/W
3.5	64	192	200
4.9	64	192	大部分<200
2.6	64	128/192	200

表6 NSA接入网测试(频率:3.5GHz/4.9GHz/2.6GHz)

Tab. 6 NSA access network tests(Frequency: 3.5 GHz / 4.9 GHz / 2.6 GHz)

测试内容	测试结果
基站功能 物理层基本功能,多天线,双连接等关键技术	实现了各项关键技术
射频 通过传导和OTA测量基带输出功率、占用带宽、临道抑制比等	5家系统完成可3.5 GHz基站天线和射频指标的测试,包括EIRP, Pattern, EVM(64QAM, 256QAM), EIS等各系统的小区间切换成功率均达100%
NSA外场 统计切换性能和平均吞吐量	单终端的移动平均下行吞吐量为350 Mb/s左右,平均上行吞吐量为80 Mb/s左右

表7 SA接入网测试(频率3.5 GHz)

Tab. 7 SA access network tests(Frequency: 3.5 GHz)

测试内容	测试结果
基站功能:5G基站吞吐量	平均下行吞吐量为1.14 Gb/s,超过理论峰值70%
SA外场:单小区吞吐量、单用户吐量、用面和控制面时延、多小区移动性、上行增强测试	华为、中兴和爱立信完成测试,诺基亚、中国信科测试过半

(1)5G系统组网测试基本完成,助力运营商部署网络。推进组在内外场进行了5G基站与核心网设备验证,已基本具备了支持两种组网模式的能力。其中,2.6 GHz频段的基站功能测试通过对中国移动的网络部署起到推进作用。

(2)OTA测试方法在5G NR测试中重要性突显。在此次基站测试中,OTA测试方法不仅使用于射频性能的验证,还是验证有源天线涉及外场射频性能测试的首要技术。这主要归因于在设备集成度逐渐升高的情况下,使用OTA测试方法能最有效地反应在真实环境下的使用情况,且可行性高。

## 2 5G NR的OTA测试技术及在基站天线测试的应用

相较于LTE,5G在空口技术方面发生了重大的变化,其中Massive MIMO技术的运用使得无线网

络设备更为复杂。针对天线尺寸小、集成天线不提供射频测试接口且难以拆分等问题采用基于 OTA 技术的一体化测试方法,实现对基站天线及射频的测试<sup>[40]</sup>。

## 2.1 5G OTA 测试方法分类

5G OTA 测试场主要分为 3 种:远场、近场和紧缩场。对测试场的选择不同,将在指标测试、场地要求和路径损耗等方面有不同的表现,表 8 从测量指标到建设难度多个维度对 3 种场地进行对比。

表 8 测试方案对比表  
Tab. 8 Test scheme comparison table

对比指标	远场	近场	紧缩场
辐射功率(有效全向辐射功率/总辐射功率)	可实现	可实现	可实现
灵敏度(总全向灵敏度/有效全向灵敏度)	可实现	可实现	可实现
临道选择性(Adjacent channel selectivity, ACS)	困难	可实现	可实现
相邻频道泄露功率比(Adjacent channel leakage power ratio, ACLR)	困难	可实现	可实现
误差向量幅度(Error vector magnitude, EVM)	可实现	可实现	可实现
方向图	可实现,但效率低	可实现	可实现,但效率低
多用户空间信道模拟	容易	困难	困难
场地要求	高	较小	小
路径损耗	高	中	低
造价	昂贵	较高	中等

(1) 远场测试:通过对远场的测试环境的设置能够达到接近于真实的传播环境,因此,测试结果最接近实地测试结果。同时,远场还具备多用户测试的能力,并且是小区覆盖和温度测试的最佳选择。但存在的缺点是,远场测试距离与频率呈正比,由此,带来场地占地面积较大、造价最高和路径损耗较高的问题。

(2) 近场测试:近场测试拥有测量距离小、抗干扰能力强、测量精度高和保密性高等优点。但是,近场的测量设备精度高,导致了设备造价很高。同时,近场是根据信号的幅度和相位变换到远场,变换后不可避免会出现误差。因此,对于非全向的指标也要采集全向的数据信息,这将导致测量效率降低。

(3) 紧缩场测试:紧缩场运用反射面,将馈源产生的球面波转换成平面波,减小了测试场的大小,降低了路径损耗。紧缩场测试对等效全向辐射功率、有效全向灵敏度、误差向量幅度和邻道泄漏等射频辐射指标的测试和远场测试效果最接近。但是紧缩场的反射面成本高,安装与维护的要求也比较高。此外,紧缩场无法进行多用户测试。

在对远场、近场和紧缩场分析后,可以看出这 3 种场地无法覆盖所有的 5G 测试项。因此,在测试场的选择中,可以根据测试需求、成本和可行性等方面的综合考量,灵活选用单场测试或组合场测试的方法。



## 2.2 Massive MIMO 的测试方案

为了体现天线整体的辐射性能,需要在指定的微波暗室中通过有源测试方法,对接收灵敏度以及总辐射功率指标进行测量。MIMO天线的性能测试方法主要有混响室(Reverberation chamber, RC)、辐射两步法(Radiated two-stage, RTS)、多探头消声室(多探头消音室(Multi-probe anechoic chamber, MPAC)方法)OTA方法<sup>[41]</sup>,3种测试方法对比如表9所示。

表9 天线有源测试方法  
Tab.9 Antenna active test method

有源测试方法	特点
RC	优点:通过金属搅拌器构成统计均匀电磁场,成本较低。 缺点:不能控制信号的来波方向。
RTS	优点:可以模拟方向性的信道;具有扩展性。 缺点:不适用于自适应天线系统;测试精度较依赖于被测件上报数据的准确性;探头和信道仿真器资源与被测设备天线的数量成正比,不适合测量天线数量过大的设备。
MPAC	优点:可控地复现信道在时域、频域、空间域的特性;可生成方向性可控的信道。 缺点:若实现3D信道模型,系统则更加复杂,成本、校准、测试复杂性将显著高于其他方案。

采用MPAC法的天线测试系统如图4所示,该测试系统由多探头全波暗室、信道模拟器和综测仪等组成。为了保证测试在无反射且无回波的环境中进行,通常在暗室的内部安装吸收反射信号的吸波材料。测量时,将被测设备放置于暗室中的转台上,综合测试仪的产生信号进入信道仿真器进行衰落,信号通过围绕被测设备的圆周上的双极化天线(即多探头)传播到待测设备,从而进行吞吐量的测量。

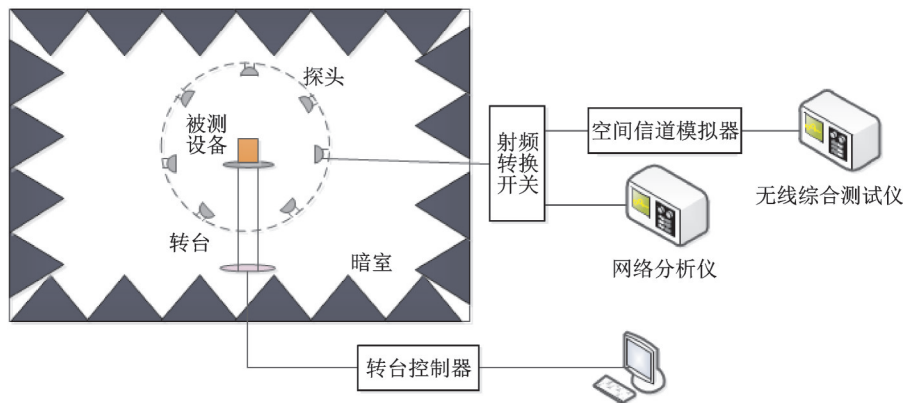


图4 MIMO天线测试系统  
Fig.4 MIMO antenna test system

理论上通过MPAC方法能够实现5G天线系统的OTA测试,而且该方法具有完全可控的再现信道模型的优点<sup>[42]</sup>。若在5G测试时使用3D模型,则需要通过在整个球面布置多个探头以模拟各信号方向,这将增加探头与信道仿真器数量,使测试系统复杂,成本高。因此,可以使用简化扇区化方法,或者通过全环法多簇与单簇测试的折中方法。

### 3 未来5G测试将面临的挑战

推进组在2018年第4季度已经完成了5G技术研发试验,基本完成了基站功能测试,已达到预商用要求,并规划在2019年开启商用终端和芯片研发试验。在进入下一阶段5G测试时,仍面临着挑战。

(1)5G高频毫米波技术测试的挑战:毫米波作为5G实现高吞吐、低时延要求的关键技术,推动其技术研究及产品研发试验尤为重要<sup>[43]</sup>。26 GHz和39 GHz频段被认为是最有可能成为我国使用的毫米波频段。高频信号的传输损耗较高,进行外场测试较难,因此将给测试带来新的挑战。

(2)5G测试向智能化发展的挑战:未来5G网络将具备智能化和自动化的能力,能够按需、灵活地支撑各种行业应用和业务场景,提升网络性能和效率<sup>[44]</sup>。同时,在5G运维阶段的测试也需要向智能化发展,例如在规划优化、告警处理和异常检测等方面提升智能化水平,以及在运维工程师和备件管理之类的一线运维服务中引入智能化,将在提升运维效率的同时达到降低运维成本的效果。

(3)5G网络测试技术与产品的挑战:长期以来,网络测试关键技术主要被国外的是德科技(Key-sigh)、思博伦(Spirent)、罗德与施瓦茨公司(R&S)主导,中国企业仍然需要从西方国家进口部分高端仪器设备,在支付高昂的采购和维护费用,还面临部分技术与服务无法实时更新的问题。因此,为了打破国外企业垄断,也为了确保国家网络安全,发展自主网络测试技术非常重要。

### 4 结束语

为了更好地进入5G时代,国内正进行相关测试实验。运营、制造企业和科研单位等机构在推进组牵头的5G技术研发试验阶段以及三大运营商的试验网中进行了测试。测试结果表明,目前中国5G产品日渐成熟,已基本达到商用水平,具有商用部署的条件。

采用了Massive MIMO天线技术的5G基站,不仅在架构上发生了变化,也在测试的指标与方法上发生了改变。传统传导测试无法满足所有测试指标的需求。鉴于此,OTA测试方法成为不二之选,通过选择合适的测试场地及OTA测量方案可以有效测量天线的性能指标。

同时,毫米波及芯片测试阶段中,OTA测试方法依旧不可或缺。在测试完成后的5G商用时期,通信设备商和运营商对运营阶段的测试测量技术和产品需求将迅速增长。测量仪表行业近几年迅速向多功能、自动化、数字化和智能化方向发展,根据需求构建定制化智能解决方案成为应用热点。因此研发自主创新的5G网络测试仪表刻不容缓。

#### 参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G愿景与需求白皮书[R].北京:IMT-2020(5G)峰会,2014.  
IMT-2020 (5G) promotion group. White paper on 5G vision and demand[R]. Beijing: IMT-2020(5G) SUMMIT, 2014.
- [2] 武文星,刘瑞婷.全球5G发展综述[J].通信世界,2019(5):25-26,39.  
Wu Wenxing, Liu Ruiting. Overview of global 5G development[J]. Digital Communication World, 2019(5): 25-26, 39.
- [3] 周一青,潘振岗,翟国伟,等.第五代移动通信系统5G标准化展望与关键技术研究[J].数据采集与处理,2015,30(4):714-724.  
Zhou Yiqing, Pan Zhengang, Zhai Guowei, et al. Standardization and key technologies for future fifth generation of mobile communication systems [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 714-724.
- [4] Li R, Zhao Z, Zhou X, et al. Intelligent 5G: When cellular networks meet artificial intelligence[J]. IEEE Wireless communications, 2017, 24(5): 175-183.
- [5] 梁丽雯.5G竞争进入白热化阶段,谁能突围?[J].金融科技时代,2017(8):82.  
Liang Liwen. 5G competition into the white-hot stage, who can break out?[J]. Financial Technology Time, 2017(8): 82.
- [6] Akyildiz I F, Nie S, Lin S C, et al. 5G roadmap: 10 key enabling technologies[J]. Computer Networks, 2016, 106: 17-48.

- [7] 王庆扬, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.  
Wang Qingyang, Xie Peirong, Xiong Shangkun, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [8] Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 52(2): 186-195.
- [9] Ngo H Q. Massive MIMO: Fundamentals and system designs[D]. Swedish: Linköping University, 2015.
- [10] Swindlehurst A L, Ayanoglu E, Heydari P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9): 56-62.
- [11] Björnson E, Larsson E G, Debbah M. Massive MIMO for maximal spectral efficiency: How many users and pilots should be allocated? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 2014(2): 1293-1308.
- [12] Gao X, Edfors O, Rusek F, et al. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3899-3911.
- [13] Cohen A, Heller J, Viterbi A. A new coding technique for asynchronous multiple access communication[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 2003, 19(5): 849-855.
- [14] Dai X, Zhang Z, Bai B, et al. Pattern division multiple access: A new multiple access technology for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 54-60.
- [15] Fan B, Su X, Zeng J, et al. A unified framework of new multiple access for 5G systems [C]//World Conference on Information Systems and Technologies. Madeira, Portugal: [s.n.], 2017: 1034-1038.
- [16] Yang M J, Hsieh H Y. Moving towards non-orthogonal multiple access in next-generation wireless access networks[C]// IEEE International Conference on Communications. London, UK: [s.n.], 2015: 5633-5638.
- [17] Schaich F, Wild T. Waveform contenders for 5G-OFDM vs. FBMC vs. UFMC[C]// International Symposium on Communications. Athens: [s.n.], 2014: 457-460.
- [18] Schellmann M, Zhao Z, Hao L, et al. FBMC-based air interface for 5G mobile: Challenges and proposed solutions[C]// International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications. [S.l.]: IEEE, 2014.
- [19] Nikopour H, Baligh H. Sparse code multiple access[C]// IEEE International Symposium on Personal Indoor & Mobile Radio Communications. London, UK: IEEE, 2013: 332-336.
- [20] Wei Fan, Chen Wen. Low complexity iterative receiver design for sparse code multiple access[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 621-634.
- [21] Chen Xiaoming, Zhang Shuai, Zhang Anxue. On MIMO-UFMC in the presence of phase noise and antenna mutual coupling[J]. Radio Science, 2017, 52(11): 1386-1394.
- [22] Corre Y, Tenoux T, Stéphan J, et al. Analysis of outdoor propagation and multi-cell coverage from ray-based simulations in sub-6GHz and mmwave bands[C]// European Conference on Antennas & Propagation. Davos, Switzerland: IEEE, 2016: 1-5.
- [23] Imai T, Kitao K, Tran N, et al. Development of high frequency band over 6 GHz for 5G mobile communication systems[C]// European Conference on Antennas & Propagation. Lisbon, Portugal: IEEE, 2015: 1-4.
- [24] Suyama S, Mashino J, Kishiyama Y, et al. 5G multi-antenna technology and experimental trials[C]// IEEE International Conference on Communication Systems. Shenzhen, China: IEEE, 2016: 1-6.
- [25] Zhang Jianhua, Tang Pan, Tian Lei, et al. 6-100 GHz research progress and challenges from a channel perspective for fifth generation (5G) and future wireless communication[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(8): 301.
- [26] Roh W, Seol J Y, Park J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results[J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(2): 106-113.
- [27] Han Shuangfeng, Chihlin I, Xu Zhikun, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186-194.
- [28] 白晓平. 基站天线波束赋形及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
Bai Xiaoping. Study of beamforming for base station antennas and its application[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [29] Leung V C M, Zhang Haijun. Ultra-Dense networking architectures and technologies for 5G[J]. ZTE Communications, 2018, 16(2): 5-6.

- [30] Chuang M C, Chen M C, Yeali S. Resource management issues in 5G ultra dense smallcell networks[C]// International Conference on Information Networking. Cambodia, Cambodia, IEEE, 2015: 159-64.
- [31] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义. 5G超密集组网网络架构及实现[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 36-43.  
Zhang Jianmin, Xie Weiliang, Yang Fengyi. Architecture and solutions of 5G ultra dense network[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 36-43.
- [32] 赵静, 孙一, 刘淑凡. 5G网络部署方案研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(10): 69.  
Zhao Jing, Sun Yi, Liu Shufan. Research on 5G network deployment plan[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(10): 69.
- [33] 崔晓亮. 5G超密集组网网络架构及实现路径[J]. 数字通信世界, 2017(10): 127.  
Cui Xiaoliang. 5G ultra-dense networking network architecture and implementation path[J]. Digital Communication World, 2017 (10): 127.
- [34] Hashemi S A, Condo C, Gross W J. A fast polar code list decoder architecture based on sphere decoding[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2016, 63(12): 2368-2380.
- [35] Seo J, Lee J, Kim K. Decoding of polar code by using deep feed-forward neural networks[C]// 2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 238-242.
- [36] 中国联通. 中国联通给出5G时间表2019年完成外场组网验证[J]. 移动通信, 2016, 40(17): 82.  
China United Telecommunications Co. Ltd. China United Telecommunications Co. Ltd has given a timetable for 5G to be completed in 2019[J]. Mobile Communications, 2016, 40(17): 82.
- [37] 杨旭, 肖子玉, 邵永平, 等. 5G网络部署模式选择及演进策略[J]. 电信科学, 2018(6): 138-146.  
Yang Xu, Xiao Ziyu, Shao Yongping, et al. Deployment mode selection and evolution strategy of 5G network[J]. Telecommunications Science, 2018(6): 138-146.
- [38] Blanco B, Fajardo J O, Giannoulakis I, et al. Technology pillars in the architecture of future 5G mobile networks: NFV, MEC and SDN[J]. Computer Standards & Interfaces, 2017, 54: 216-228.
- [39] 程琳琳. 5G第三阶段测试结束, 达到预期结果[J]. 通信世界, 2019(4): 34-35.  
Cheng Linlin. The third phase of 5G test was completed and achieved the expected results[J]. Communications World, 2019(4): 34-35.
- [40] 蒋晓虞. Massive MIMO测试进展及性能分析[J]. 通信世界, 2018(22): 33.  
Jiang Xiaoyu. Massive MIMO test progress and performance analysis[J]. Communications World, 2018(22): 33.
- [41] García-Fernández M Á, Sánchez-Hernández D A. Challenges for effective and realistic 5G OTA testing[J]. Microwave Journal, 2019, 62(2): 70-80.
- [42] Zhang P, Yang X, Chen J, et al. A survey of testing for 5G: Solutions, opportunities, and challenges[J]. China Communications, 2019, 16(1): 69-85.
- [43] Shafi M, Molisch A F, Smith P J, et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [44] 尤肖虎, 张川, 谈晓思, 等. 基于AI的5G技术-研究方向与范例[J]. 中国科学:信息科学, 2018, 48(12): 1589-1602.  
You Xiaohu, Zhang Chuan, Tan Xiaosi, et al. AI for 5G: Research directions and paradigms[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2018, 48(12): 1589-1602.

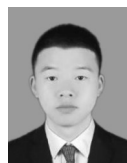
## 作者简介:



张治中(1972-),男,教授,博士生导师,研究方向:5G移动通信系统、通信网测试、宽带信息网络,E-mail: zhangzz@cqupt.edu.cn.



毛亚丽(1995-),女,硕士研究生,研究方向:宽带通信网测试。



朱磊(1994-),男,博士研究生,研究方向:移动通信测试、绿色通信。