

**专家简介:**刘祖深,男,1961年11月出生,中国电子科技集团首席科学家,博士,研究员,博士研究生



导师,享受国务院政府特殊津贴专家。长期从事微波毫米波通信测试技术与仪器产品研发,承担TD-SCDMA增强技术终端综合测试仪、TD-LTE无线综合测试仪、TD-LTE空口监测仪、TD-LTE射频一致性测试系统、毫米波5G信号源、增强移动宽带5G终端模拟器等国家03重大专项。主要成果荣获省部级科学奖励19项,制定国家和行业标准5项,出版论著4部,发表论文30余篇,申请和授权发明专利20余项。

## 5G 测试仪器关键技术与产品开发\*

刘祖深<sup>1,2</sup>

(1.中国电子科技集团公司第四十一研究所,安徽 蚌埠 233010;

2.中电科仪器仪表有限公司,山东 青岛 266000)

**摘要:**随着5G技术研发试验和产品研发试验的推进,作为支撑产业发展的测试仪器也进入到发展快车道,国内厂家已经成功开发出基站、终端、外场与核心网等5G通信测试仪器。介绍了5G通信测试仪器的关键技术突破与最新产品成果,包括高性能5G通信测试平台设计与制造、多标准5G NR物理层测试、5G异构网络空口协议解析、微波毫米波测试校准等关键技术,也介绍了基站测试、终端综测和空口监测等测试仪器性能,这些测试仪器在5G通信产业链各环节发挥了重要作用,为产业的快速发展提供了有力支撑。

**关键词:**5G测试;EVM校准;新空口;基站综测仪;终端综测仪

**中图分类号:** TN98;TN929.5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16157/j.issn.0258-7998.209501

**中文引用格式:** 刘祖深. 5G测试仪器关键技术与产品开发[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 1-8, 13.

**英文引用格式:** Liu Zushen. Key technology research and product development of 5G test instruments[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 1-8, 13.

### Key technology research and product development of 5G test instruments

Liu Zushen<sup>1,2</sup>

(1.The 41st Institute of CETC, Bengbu 233010, China;

2.China Electronics Technology Instrument Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** With the promotion of 5G technology R & D tests and product R & D tests, as a support of the development of the industry, the test instruments have entered the fast development track. Domestic manufacturers have successfully developed 5G communication test instruments such as base stations, terminals, outfields and core networks. This article introduces the key technology breakthroughs and latest product achievements of 5G communication test instruments, including high-performance 5G communication test platform design and manufacture, multi-standard 5G NR physical layer test, 5G heterogeneous network air interface protocol analysis, microwave and millimeter wave test and calibration and other key technologies, also introduces the performance of test instruments such as base station test, terminal comprehensive test and air interface monitoring. These test instruments are important in every link of 5G communication industry chain, and provide strong support for the rapid development of the industry.

**Key words:** 5G test; EVM calibration; new air interface; base station radio communication tester; terminal radio communication tester

\* 基金项目: 国家科技重大专项 03 专项基金资助项目(2017ZX03001020)

## 0 引言

移动通信自 20 世纪 80 年代诞生以来,经 30 多年的爆发式增长,深刻改变了人们的生活方式,已成为连接人类社会的基础信息网络。2G 是在 1982 年欧洲邮电管理大会 CEPT 决定开发的,GSM 覆盖面积最广,用户达到 43 亿。2G 实现了模拟到数字通信的跨越,是颠覆性的技术创新。2009 年 1 月工信部为中国移动、电信和联通发放 3 张 3G 牌照,标志着中国进入 3G 时代。2013 年 12 月国内三大运营商获发 4G 的 TD-LTE 牌照,2015 年 2 月电信、联通获发 FDD-LTE 牌照,中国开启了 4G 时代。2015 年 10 月国际电联批准了推进 5G 研究进程的决议,并正式确定 5G 的法定名称为“IMT2020”。伴随着 ITU5G 计划的推出和实施,我国推进 5G 网络的步伐加速。5G 列入国家“十三五”规划,得到了国家 863 计划、国家科技重大专项的支持,2018 年已经完成关键技术验证、技术方案验证和系统验证 3 个阶段的技术研发试验,2019 年启动了 5G 增强及毫米波技术研发试验、终端测试和互操作测试。2019 年开始预商用建网,2020 年正式商用。

## 1 5G 通信测试需求与挑战

5G 具有三大应用场景与九大性能指标。移动互联网和物联网是 5G 发展的两大驱动力,发展 5G 必须解决多样化应用场景下差异化性能所带来的挑战。5G 有

3 个典型应用场景,即增强移动宽带(eMBB)、海量机器通信(mMTC)和超高可靠低时延连接(uRLLC)。eMBB 场景主要满足移动互联网高清视频、高移动速度等业务需求,也是传统的移动通信主要应用场景。mMTC 和 uRLLC 场景主要面向物联网业务,是 5G 新拓展的场景,重点解决传统移动通信无法很好地支持物联网及垂直行业应用的问题。

5G 的九大性能指标包括体验速率 0.1~1 Gbps、流量密度 10~100 Tbps/km<sup>2</sup>、连接密度 10<sup>6</sup>/km<sup>2</sup>、峰值速率 10~100 Gbps、时延 1~10 ms、移动性 500+ km/h,频谱效率提高 5~15 倍、成本效率提高 100 倍、能源效率提高 100 倍<sup>[1]</sup>。

为实现既定目标,5G 通信整体网络架构随之改变了许多,将更加有利于目标的实现,如图 1 所示,主要包括:

- (1)采用大规模 MIMO 技术、毫米波频段的 400 MHz 带宽、大规模聚合的天线接口技术,5G 网络空口至少支持 20 Gbps 速率;
- (2)核心网功能分离,核心网(控制面)在核心云中,分布式核心网(用户面)在边缘云中;
- (3)分布式应用服务器(AS)部分功能下沉至中心主机房(CO),节省回传成本,降低时延,并在 CO 部署移动边缘计算(MEC);
- (4)重新定义 BBU 和 RRU 功能,将物理层下沉,降低

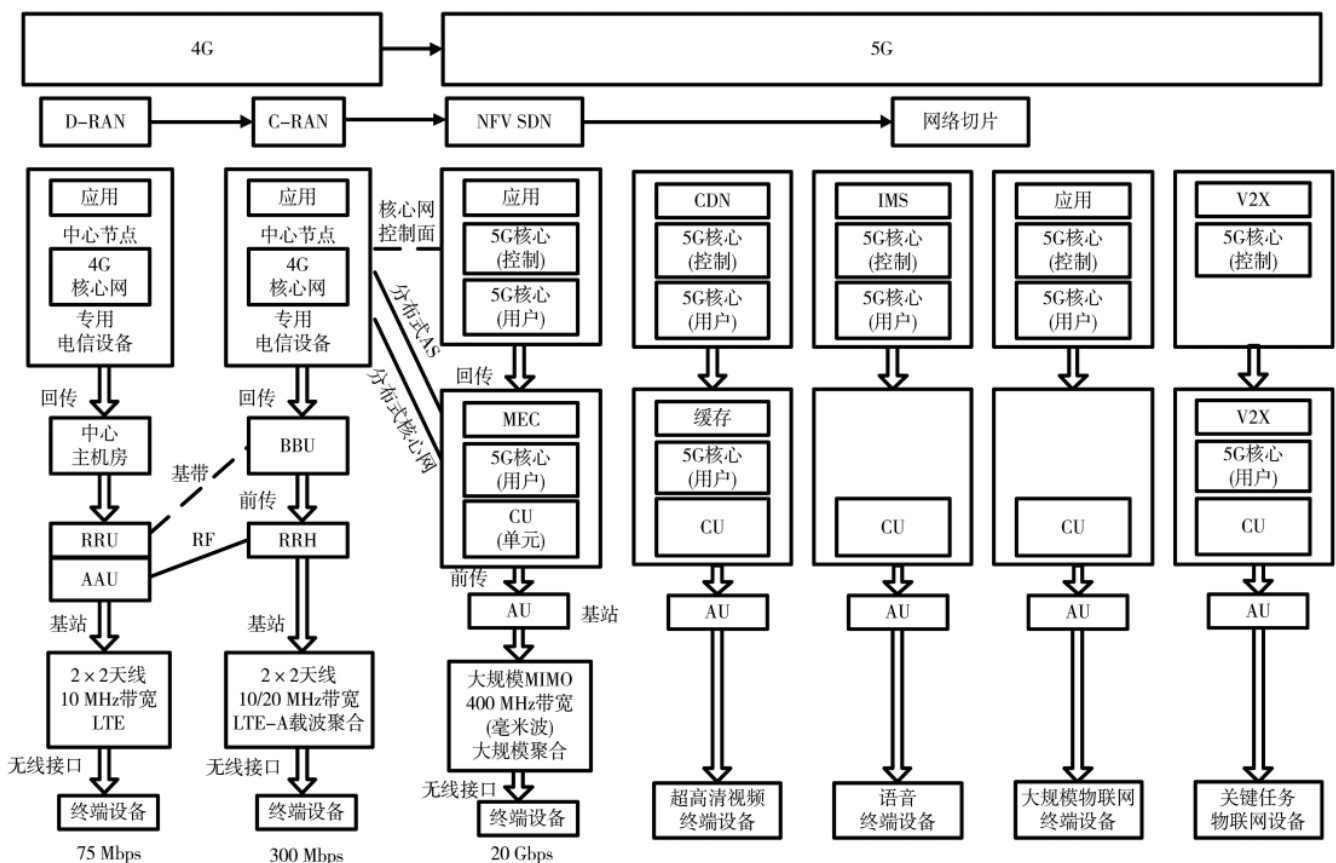


图 1 5G 与 4G 整体网络架构的区别

前传成本；

(5) 通过网络功能虚拟化(NFV)技术,在通用商用服务器上利用软件实现网元功能,将商用服务器虚拟化；

(6) 通过软件定义网络(SDN)连接边缘云和核心云中的虚拟机,SDN 控制器执行映射,建立核心云与边缘云之间的连接；

(7) 引入网络切片技术,通过调度和提供不同的 L1/L2 配置,满足用户差异化需求。

从 5G 通信全球频谱划分情况来看,中国的 5G 的频谱规划主要分布在中频段和高频段,如表 1 所示,我国 5G 频谱的最高频率为 43.5 GHz,已经进入到毫米波通信波段。

表 1 5G 通信的频谱划分

| 国家 | 频段                 |               |                | 运营商            |
|----|--------------------|---------------|----------------|----------------|
|    | 低频段                | 中频段           | 高频段            |                |
| 中国 |                    | 251~2 675 MHz | 24.25~27.5 GHz | 中国移动           |
|    |                    | 3.4~3.6 GHz   | 37~43.5 GHz    | 中国联通           |
|    |                    | 4.8~4.9 GHz   |                | 中国电信           |
| 美国 | 600 MHz<br>2.5 GHz | 3.55~3.7 GHz  | 24.25~27.5 GHz | Sprint         |
|    |                    | 3.7~4.3 GHz   | 37~40 GHz      | AT&T           |
|    |                    | 5.9~7.1 GHz   | 47.2~48.2 GHz  | T-Mobile       |
|    |                    |               | 64~71 GHz      | Verizon        |
| 韩国 |                    | 3.42~3.7 GHz  | 26.5~28.9 GHz  | SKTelecom      |
|    |                    |               |                | KT             |
| 日本 |                    | 3.6~4.2 GHz   | 27~29.5 GHz    | NTTDoCoMo      |
|    |                    | 4.4~4.9 GHz   |                | 软银             |
| 德国 | 700 MHz            | 3.4~3.8 GHz   | 27.8~28.4 GHz  | 德国电信           |
|    |                    |               | 28.9~29.4 GHz  | Telefonica(O2) |
| 英国 | 700 MHz            | 3.4~3.8 GHz   | 24.25~27.5 GHz | EE/BT          |
|    |                    |               |                | Vodafone O2    |

从 5G 标准进展来看,独立组网标准已经冻结,完成了第一阶段全功能标准化工作,具备了构建端到端全新的业务能力。5G NR 具有毫米波大带宽通信、大规模 MIMO 技术、灵活的空口技术、多址技术和分布式网络架构等 5 类技术应用与创新,其中毫米波大带宽通信要求频率从 RF 到 42.5 GHz 和 71 GHz,分析带宽达 400 MHz、1 GHz、2 GHz;大规模 MIMO 技术是在已有的 MIMO 基础上进行了增强,引入大规模天线阵列技术,例如 64CH、128CH、256CH,甚至更多。在空口技术方面,对 OFDM 时隙结构和时频资源块进行划分优化,提出更加灵活的空口技术。多址技术还将引入 NOMA 非正交多用户接入技术,支撑广域覆盖中低速率物联网应用。分布式网络架构将无线网络架构的功能单元划分成分布式单元 DU 和中心单元 CU,并引入基于云计算的网络虚拟化与切片技术。

5G 物理层与协议栈的测试需要满足如下新要求：

(1) 支持 15/30/60/120/240 kHz 灵活的子载波间隔配置；

(2) 支持载波带宽部分(BWP)技术,可配置 4 个 BWP,共 400 MHz；

(3) 支持多种调制格式,包括  $\pi/2$  BPSK、BPSK、QPSK、16QAM、64QAM、256QAM 等；

(4) 支持基于波束扫描的初始接入；

(5) 支持服务数据适配协议(SDAP)实现 QoS 流到 DRBs 的映射。

5G 的三大应用场景和九大性能指标对测试仪器提出了严峻的挑战,可归结为“超、极、多、全、新”和“真实场景模拟”等。

(1) “超”是超宽带,要求信号发生与接收的测试带宽满足 500 MHz、1 GHz 和 2 GHz。为兼容 4G,需要带宽 1.4 MHz~500 MHz 可变,具备宽带 IQ 调制能力,对通道的幅度和群时延的平坦度要求比较高,校准后误差矢量幅度 EVM  $\leq 1\%$ ；

(2) “极”是极高速,要求具有数 10 Gbps 速率的数据传输处理能力,包括宽带数据传输、海量数据存储,需要解决严苛的传输时延和实时测试的难题；

(3) “多”是多通道,至少满足 64/128 阵列以上多小区多天线测试,其中 64/128 通道的小型化、多通道相位相关性、幅度响应和相位响应的一致性和稳定性以及高精度校准模型等是需要解决的关键技术；

(4) “全”是全频谱,除了 6 GHz 以下频段之外,5G 测试仪器的频谱覆盖已经扩展到 6~76 GHz。需要解决宽带微波毫米波部件设计和制造技术、MMIC、毫米波多层立体电路设计与工艺；

(5) “新”是新多址,要求测试仪器具备 SCMA、PDMA、MUSA、NOMA 等多址方式；

(6) “真实场景模拟”包括异构网络、多层覆盖和三维信道等技术,要求测试仪器支持蜂窝、非蜂窝等多种无线接入,具备互操作信令连接测试、信道立体建模与模拟能力。

## 2 5G 测试技术体系与产品体系

5G 测试技术体系分为大规模 MIMO 通信测试技术、微波毫米波通信测试技术、通信信令仿真与模拟技术、网络性能测试技术、系统集成与验证、物联网测试技术等六大类,主要包括了 29 项关键技术,如图 2 所示。在大规模 MIMO 通信测试技术中,5G 特征明显且急需解决的是 5G 信道模拟、5G 信号模拟与 OTA 测试技术,需要解决高维矩阵运算与 3D 信道建模、大规模阵列设计及校准、小型化多通道相位相关性、幅相一致性测试与校准等。5G 信号模拟需要解决多种小区覆盖、多点协作传输、接入层级算法及干扰抑制、高层协议传输控制分离及调度等。基站一体化与异形终端颠覆了传统传导测试方法,需要构建 OTA 测试和校准新模型与方法,如何降低测试不确定度以及提高标准溯源精度是解决实际问题的关键。



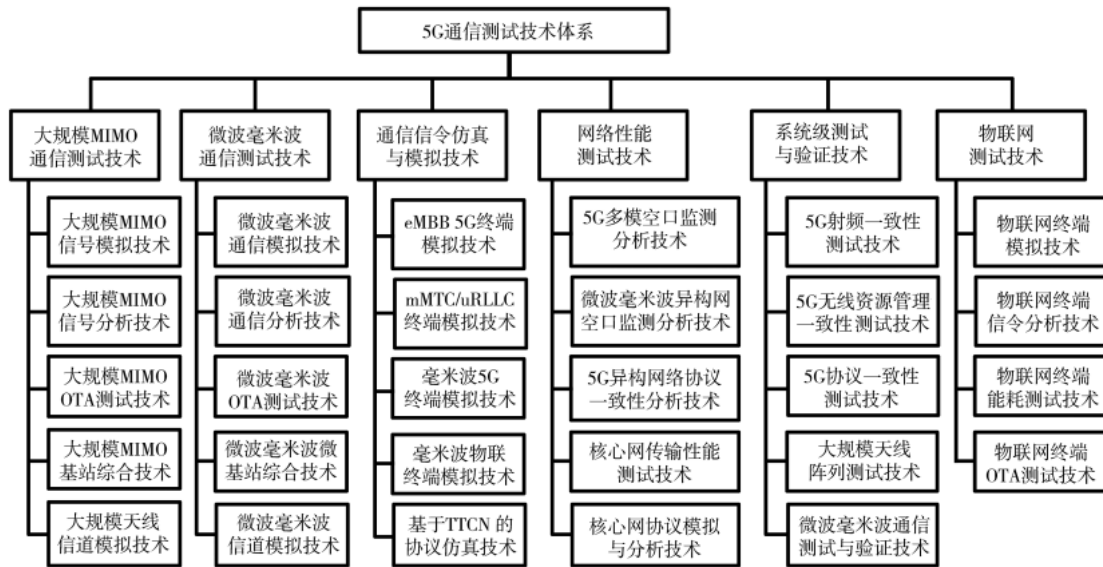


图2 5G测试技术体系

微波毫米波通信测试技术的难点不仅仅是在频率的提升上,还在如何解决TR模块的低成本要求所带来的极大挑战。在基础理论、设计建模、高频元器件、精密加工等方面已经具有很好的积累,毫米波测试仪器也成体系地发展并得到广泛应用。但是,面向满足5G发射分集、空间复用和波束赋形等多种不同的MIMO实现方案,目前要求128或256通道,未来甚至1024通道,如何用低成本方案实现是至关重要的。其次是毫米波通道性能及调制解调补偿算法必须进一步研究。另外,多通道的一致性和稳定性使得传统设计方案难以达到设计目标,需要解决毫米波前端(T/R+本振+ADC)的芯片化。

通信信令仿真与模拟技术主要包括eMBB终端模拟技术、mMTC/uRLLC终端模拟技术、基于TTCN终端协议仿真技术以及物联网终端模拟技术。

网络性能测试技术主要包括5G多模空口监测与分析、微波毫米波异构网空口分析等。主要涉及多层协议分析、多用户随机接入、各层PDU协议分析、信息安全解密、CA联合调度、接入和释放识别等空口监测关键技术。在协议解析方面涉及参数交互反馈、过程参数自提取和多用户参数自关联等核心技术<sup>[2-3]</sup>。

系统集成与验证包括5G射频一致性测试技术、无线资源管理一致性测试技术、微波毫米波大规模天线阵列测试技术。物联网测试技术包括海量物联网终端模拟、信令分析、能耗测试和终端OTA测试等。

5G测试仪器产品体系分为基站测试仪器、终端/芯片测试仪器、外场环境模拟与监测仪器、器件/部件测试仪器、接入网性能测试仪器、核心网测试仪器,主要包括28种测试仪器,如图3所示。基站测试包括sub6G与

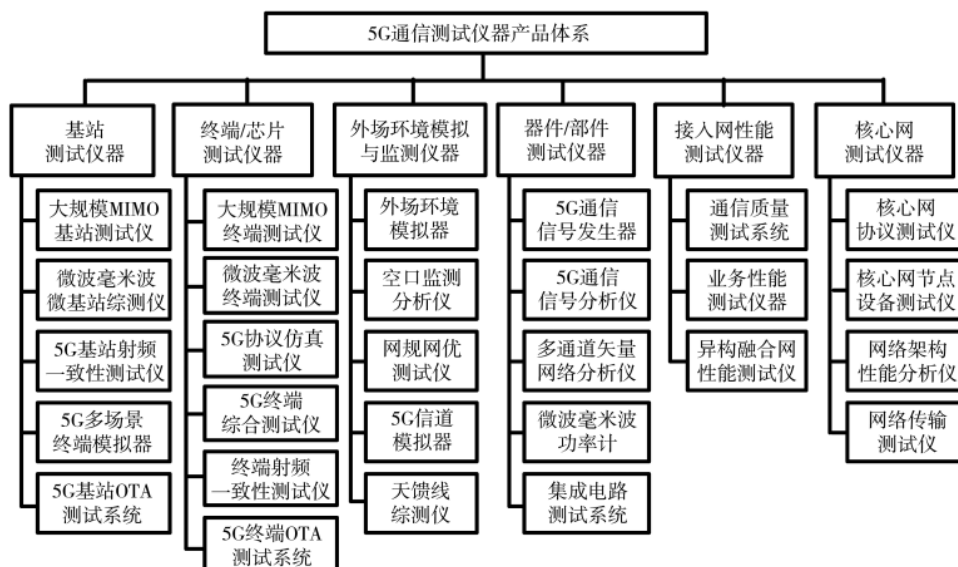


图3 5G测试仪器产品体系

毫米波基站测试仪、大规模 MIMO 基站测试仪、5G 终端模拟器与基站射频一致性测试仪等。终端/芯片测试仪器包括 sub6G 与毫米波终端综测仪、终端协议仿真测试仪、终端射频一致性测试系统等。外场环境模拟与监测包括 5G 空口监测仪和网络优化测试仪器。器部件测试仪器属于通用测试仪器,但信号源和信号分析仪必须具备 5G 协议选项,信号源主要包括 FR1 和 FR2 在内的 eMBB 上下行发生和 eMBB 下行解调。信号分析仪主要包括 5G NR 信号分析、LTE TDD/FDD 信号分析、WLAN a/b/g/n/ac/ax、NB-IoT 信号分析和蓝牙信号分析等。接入网性能测试仪器包括通信质量测试仪和业务性能测试仪等。核心网测试仪器包括协议测试、节点设备综测仪和网络传输分析仪等。

### 3 5G 通信测试仪器关键技术突破

通信测试不仅要对被测的电参数进行精确测量,而且还要与被测互联互通,要对真实通信环境进行模拟与重构,包括多种业务的调度、多层协议的传输与解析、多种制式的无线接入、复杂信道环境的模拟等。因此,通信测试仪器是测试技术与通信技术紧密相连的,具有“精确无误”、“稳定可靠”、“实时高效”、“多模并存”等四大特征。

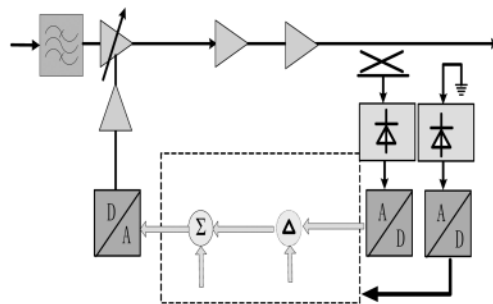
在通信测试技术与测试仪器开发的实践中,需要解决而尚未解决的科学问题主要有 4 个,即“平台高端化”、“算法多域化”、“协议智能化”和“校准精确化”。面对“四化”科学问题,需要解决的技术瓶颈有:(1)高性能多模一体化通信测试平台设计技术;(2)多标准、多域物理层测试技术;(3)异构网络空口监测与协议解析技术;(4)宽带、高精度、多参数测试校准技术。

#### 3.1 高性能多模一体化通信测试平台设计技术

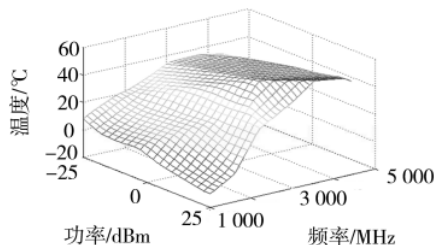
从 3G、4G 到 5G,测试平台的性能迅速向着“高频大带宽、高精度、高纯度、高稳定度”的方向发展,兼容 3G 和 4G 的测试需求,必须采用更先进、更合理的技术方案实现平台性能的提升。平台的收发频率满足 5G 标准要求,接收通道的镜像抑制为 70 dBc,最大输入功率优于 +30 dBm,射频衰减范围 30 dB(1 dB 步进),噪声系数  $\leq 25$  dB,端口驻波小于 1.5,160 MHz 带内平坦度  $\leq 1$  dB,  $EVM \leq 1\%$ 。发射通道的输出功率范围为 -120 dBm ~ -5 dBm,功率分辨率为 0.01 dB,不确定度优于 0.6 dB,相噪优于 -105 dBc/Hz@10 kHz,输出杂波小于 -60 dB,源驻波小于 1.5,功率稳定度为  $\pm 0.35$  dB。业内基站和终端性能不断提升,对 5G 测试平台在高精度、高纯度、高稳定度等方面提出了更高的要求。

在时隙脉冲信号的幅度控制方面已有多种实现方案:(1)“开环控制”,这种简单且完全拼硬件的方法存在着幅度稳定性差的缺陷;(2)“取样保持”稳幅,幅度得到实时修正,幅度精度得到提升,仍属于开环控制方式;(3)“模拟闭环”稳幅,这种脉内闭环稳幅大大提高了幅

度稳定度,同时提高了驻波比性能;(4)新型平台采用“数字化闭环/双检波/3D 补偿”,脉内数字化闭环稳幅提高幅度稳定度,同时对定向检波传感器进行频率、功率和温度三维补偿,提高仪器环境适应性<sup>[4]</sup>。另外,采用双检波实现温升补偿,如图 4 所示。新型平台的输出功率准确度为  $\pm 0.35$  dB,动态范围从 30 dB 提升到 40 dB,15 天内的输出功率稳定度优于  $\pm 0.35$  dB。



(a) 原理框图



(b) 补偿效果

图 4 时隙信号稳幅原理框图及补偿效果

在提高信号纯度方面,通常采用窄带 PLL 合成和限制型  $\Sigma-\Delta$  调制频率合成方法,目前采用无结构寄生  $\Sigma-\Delta$  调制频率合成新方法,利用素数模 MASH 模型、反馈型 MASH 模型和抖动型 MASH 模型等随机化  $\Sigma-\Delta$  小数分频模型技术,把结构寄生杂散全部量化成高频噪声并加以滤除<sup>[5-6]</sup>。

#### 3.2 频域并行预判决小区搜索与 DCI 盲检技术

移动通信的现状是多标准共存的,测试仪器除了满足 5G 测试之外,还要兼容 3G 和 4G 的测试。对于 5G-NR 而言,物理层协议主要由 3GPP TS38.201-215 等 7 个规范构成,对 NR 物理信道与调制、NR 复用与信道编码和 NR 物理层过程等进行了规定。在物理层信道与调制方面,测试仪器必须满足规范要求的帧结构和物理资源、调制映射、OFDM 符号生成、加扰、调制和上变频、层映射和预编码、上行和下行物理共享信道、上下行参考信号、物理随机接入、PSS 和 SSS 同步。在传输信道和控制信道数据处理方面,必须满足规范要求的信道编码方案、速率匹配、上下行传输信道和 L1/L2 控制信息的编码等。在物理层过程方面,测试仪器必须满足规范要求的用于控制的物理层过程特性和用于数据的物理层过程特性等。

在 5G 测试仪器的设计与实现中,除了必须符合 3GPP TS 38.201-215 的规定以外,还有很多测试关键技术

需要突破。在物理层测试中,最关键的是无线接入,关系到测试仪器与通信设备的互联互通,要求测试仪器能够在很大动态范围内与基站实现同步。基于频域快速预判决的小区搜索方法是一种采用频域并行预判决和时域抗干扰识别技术,增强了抗频偏和抗干扰的能力,解决了低信噪比情形下的基站信号同步检测难题。构建基站下行控制信息(DCI)格式盲检测模型,利用多小区参数、传输模式、控制信道元素数量等信息,构建概率分布模型,创新盲检流程,可以大大降低盲检次数,提升物理层的调度能力<sup>[7]</sup>。基站同步并行处理与DCI盲检模型如图5所示。

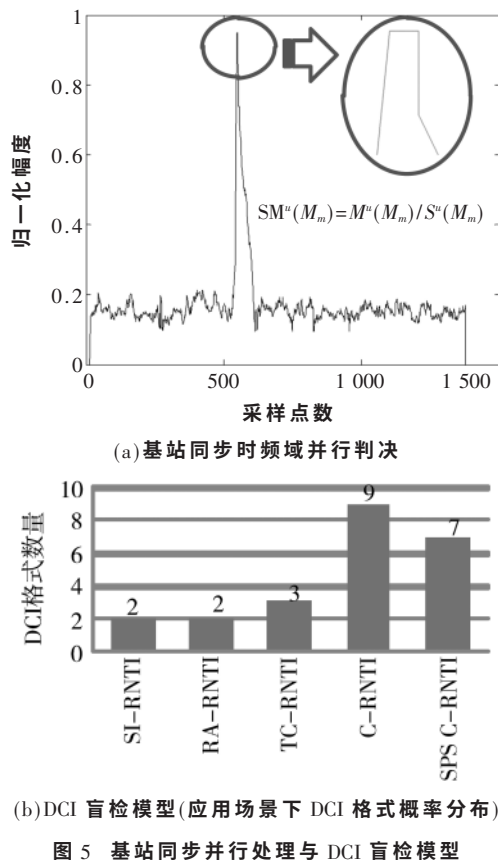


图5 基站同步并行处理与DCI盲检模型

### 3.3 异构网络空口监测与协议解析技术

在网络建设和运维中,经常存在多家设备互联互通问题难以定位的情况,尤其是深层次的疑难杂症,需要一个“空中在线”测试进行实时捕获和分析,一种异构网络空口监测与协议解析示意图如图6所示。异构网络空口监测与协议解析技术是实现上行和下行信号同时“空中在线”测试的关键。需要突破基于参数交互反馈机制的空口实时解析技术、过程参数自提取和多用户参数自关联方法等。在多用户监测能力方面,满足同时实时监测48个用户,提升网络性能外场测试能力<sup>[3]</sup>。

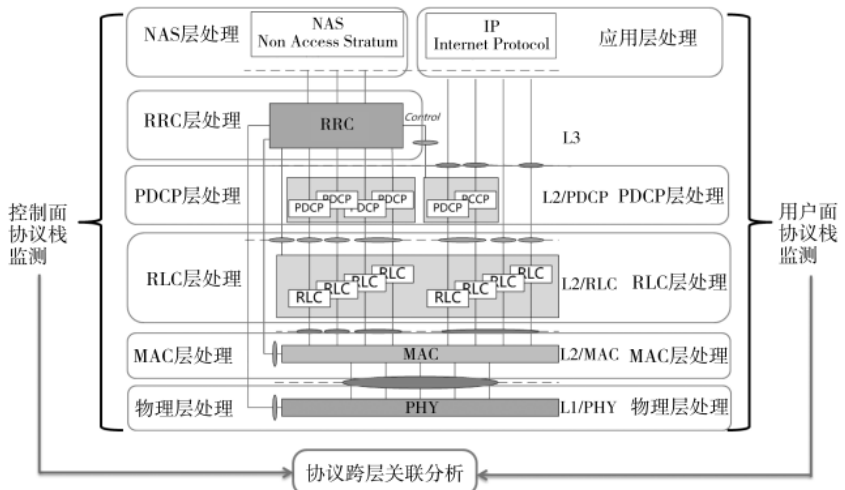


图6 异构网络空口监测与协议解析示意图

### 3.4 宽带高精度EVM补偿校准技术

在通信信号发生与分析中,总是存在着非正交、不平衡、零点偏移以及通道的幅度和相位误差等,造成信号调制和解调性能的恶化,综合体现在误差矢量幅度EVM指标上。通道的幅度和群时延的修正通常采用正弦模型和硬软件均衡方案,修正不够全面,指标也难以再提升<sup>[8]</sup>。例如,窄带调制情况下,对于“微波预选器+中频通道+AD前端”的幅度和相位误差的校准,校准前 $EVM \leq 3.7\%$ ,校准后系统级信号 $EVM \leq 2.0\%$ ,单机信号 $EVM \leq 1.2\%$ 。

面对5G高阶调制信号,采用max近似函数化简LLR软解调算法,即max-log-map解调算法简化运算,与硬判决和软判决log-map算法相比,可以获得更低误码率、更低运算量,提升实时解调能力。100 MHz带宽内OFDM调制下,校准采用线性加正弦模型、基于信道估计的补偿、基于反馈拟合的系统校准等方案,校准后系统级信号 $EVM \leq 1\%$ ,单机信号 $EVM \leq 0.4\%$ 。256QAM信号解调EVM星座图如图7所示。

### 3.5 Massive MIMO阵列天线OTA测试技术

Massive MIMO是提升系统容量、能源效率和频谱效率的关键技术,结合上下行多天线阵列可以为多用户同时提供数据传输调度。Massive MIMO波束赋形技术大幅增加了空间自由度,也为天线增益提升、系统容量扩大和干扰降低等方面带来了益处。由于5G的RRH与天线的一体化设计,在既无连接电缆也无定向耦合端口的情况下,5G基站射频指标的测试只能采用OTA空口测试方法。OTA测试的难点在于如何降低测试不确定度、测试系统定标和溯源、系统链路校准等方面,在波束切换效果与UE移动性影响,以及波束赋形的效果等方面的测试方法还需要标准化。

大规模MIMO测试包括Massive MIMO组件RF测试和OTA性能测试两类,第一类涵盖RF测试、RF组件测试和RF系统校准;第二类涵盖静态/半静态测试、动态



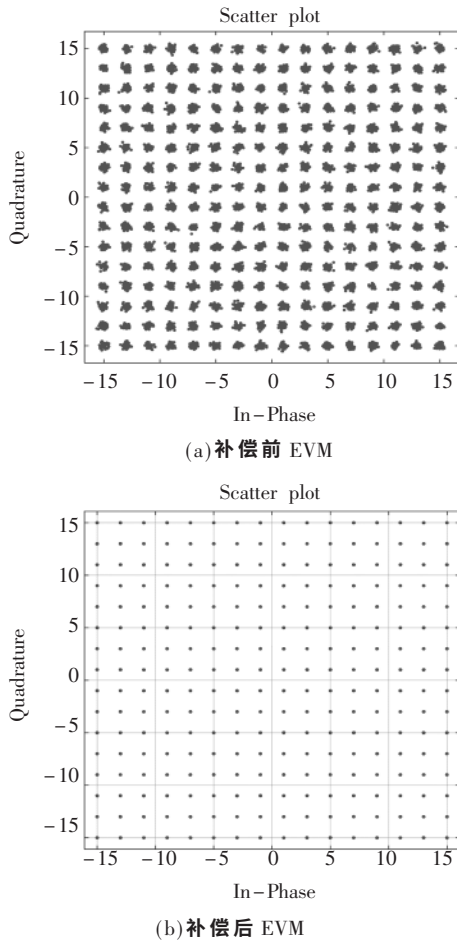


图7 256QAM信号解调EVM星座图

波束控制测试和解调性能测试。这两类测试方案都需要在射频通道数、基带处理能力、测试时间和测试成本之间找到一个合理的平衡点。

阵列天线的性能测试已经解决了近场、远场和紧缩场3种方案测试难题,包括突破了基于平面近场测试到口径场反演关键技术,实现天线故障单元的定位诊断。测试频率已经覆盖28~110 GHz毫米波波段,系统灵敏度达到-114~-94 dBm,动态范围为95~118 dB,增益测量不确定度为 $\pm 0.25$  dB,扫描架重复定位精度为0.03 mm,波束宽度 $\geq 2^\circ$ 情况下,波束指向测量精度达到波束宽度的1%。

针对紧缩场测试成本较高的问题,不用反射屏而采用具有动态赋形的阵列天线作为聚焦器件,通过调整天线阵列中每个阵子的幅度和相位权值,在设定测试距离的区域内拟合出平面波,是一种低成本的适合于5G OTA射频测试的动态赋形紧缩场(DBCR)实现方案<sup>[9]</sup>。目前支持Sub-6 GHz频段,200 MHz带宽,对带内和带外EIRP、EIS、TRP、ACLR、杂散、EVM等射频指标进行测试,可以完成大部分3GPP测试项。

#### 4 5G典型测试仪器与解决方案

##### 4.1 5G基站测试仪器

已经开发出5G终端模拟器、5G基站综测仪、5G多

通道基站测试平台等基站类测试仪器,如图8所示。5G终端模拟器具有5G基站功能测试、5G基站容量测试和5G UE行为模拟等测试能力,该仪器主要应用于eM-BB场景,支持大带宽、极化码、LDPC码、8天线、16个终端模拟等功能。Sub-6 GHz频段支持400 MHz~6 GHz,单个终端带宽100 MHz。高频段支持24.25~30 GHz、37~43.5 GHz和66~76 GHz,单个终端带宽200 MHz。产品支持HARQ、MAC、RLC、PDCP以及RRC和NAS等多种测试模式,支持从5G物理层到协议栈的测试,支持上下行独立测试和验证。



图8 5G基站测试仪表

在L1和L2测试功能方面,支持自包含帧结构、支持所有上下行子帧配置和特殊子帧配置;支持QPSK、16QAM、64QAM、256QAM上下行调制解调,带宽100 MHz,子载波间隔30 kHz;支持小区搜索、小区选择、上行功率控制(PUSCH、PUCCH、PRACH、SRS)功能,开环和闭环功控;支持随机接入功能,具备竞争模式随机接入过程和非竞争模式随机接入过程。

在L3测试功能方面,支持RRC连接建立、重配和释放;支持专用承载建立、删除、修改;支持同频切换和异频切换;支持PDCP完整性保护算法和加密算法、NAS完整性保护算法和加密算法。为仿真外场真实的无线环境,特别是多UE情况下的仿真,需要具备信道模拟器仿真功能,还需要具备多UE测试能力、多用户切换能力验证等。

5G基站测试仪是完成5G基站收发机射频性能测试的一种多通道并行测试仪表,兼容LTE、WCDMA、GSM等多制式;测试指标包括EVM、OBW、ACLR、时域、频域、灵敏度等;具有频域、时域、调制域等多域同时分析能力,支持一键测试3GPP规定基站测试用例,分析带宽5 MHz~200 MHz/500 MHz可变;具有频段覆盖范围宽、调制带宽大、通道数量多、配置灵活等特点,解决了5G大带宽、多通道、灵活帧结构等测试难题,单模块支持4通道收发,级联实现64通道收发,可满足5G基站研发、生

产、网络建设和优化等不同阶段的测试需求。

#### 4.2 5G 终端测试仪器

已经开发出 5G 终端综测仪、终端射频一致性测试系统、IOT-G 终端综测仪和 5G 物联网综测仪等 5G 终端测试仪器,如图 9 所示。5G 终端综测仪主要用于 5G 终端和基带芯片的研发、生产、校准和检测等环节,具有 5G 信号发生、5G 信号解调和频谱分析等功能。仪表遵循 3GPP TS38521 协议 R15 版本,支持多域并行同步测试,多角度、多维度的分析 5G 终端信号,支持毫米波频段测试。



图 9 5G 终端测试仪表

5G 物联网综测仪主要包括物联网信号发生和分析部分,突破了物联终端综合测试与移动物联多域解析关键技术,实现 NB-IoT 上、下行信号发生、CW 信号发生、宽带矢量调制信号发生、TD-LTE、FDD-LTE 等通信标准制式射频信号发生功能,也包括 NB-IOT 信号分析解调、CW 射频信号分析、LTE 通信信号分析等功能。该产品广泛应用于芯片、终端、基站设备和系统的研制、生产和维护等方面。

#### 4.3 5G 外场及核心网测试仪器

已经开发出 5G 空口监测仪、5G 采集海量存储仪、手持式天馈线分析仪、5G 高速光模块测试平台等 5G 外场及核心网测试仪器,如图 10 所示。

空口监测仪主要用在 5G 外场试验、网络部署和网



图 10 5G 外场与核心网测试仪表

络优化等环节。基站和终端互联互通的功能性和兼容性问题会经常出现,但问题根源的查找和故障的排障都是困扰技术人员的难题。空中接口监测仪是面向新空口测试的协议解析仪,无需接入网络,不参与通信,对终端和基站的上下行信号进行高速采集,按照 3GPP 标准协议对采集到的数据从物理层、链路层至网络层进行完整详细的解析,可以准确定位物理层、MAC 层和 RRC 层存在的问题,支持实时解析和离线解析;可进行多基站、多 UE 的测试和解析,便于解决疑难问题;支持 PHY、MAC、RLC、PDCP、RRC 和 NAS 控制面协议栈,以及 PHY、MAC、RLC、PDCP、IP、应用用户面协议栈的监测;采用 5G 采集海量存储仪配合多通道实时并行采集,存储深度 96 TB,为离线分析提供存储空间。

在核心网测试方面,开发出 5G 光模块高速测试平台,单通道支持 28 Gbps,单模块支持 400 Gbps。

在 5G 技术研发与试验验证测试方面,已经推出了 5G 毫米波测试验证系统(6 GHz~110 GHz)和 5G 大规模 MIMO 阵列天线测试系统,如图 11 所示。



图 11 5G 毫米波测试验证与天线测试系统

高频段大带宽是 5G 测试的重点之一,5G 毫米波测试验证系统利用微波上下变频技术将测试扩展到毫米波频段,5G 信号的模拟与分析是在中频上处理的,上下行环回采用天线或有线连接。该系统支持 sub-6 GHz 和 24.5~30 GHz、37~43.5 GHz、57~66 GHz、71~76 GHz 等毫米频段,支持 f-OFDM、FBMC、UFMC、GFDM 等各种新波形导入和数据抓取,实现功率衰减、频谱响应、信号质量恶化、QAM/PSK/FSK 失真特性分析、图像和视频传输等参数测量与分析。

5G 大规模 MIMO 阵列天线测试系统具有近场测试、远场测试和紧缩场测试功能,可以对常规天线、相控阵天线、DBF 天线和片上天线进行测试,包括天线方向图、增相一致性和 OTA 等。其中,MIMO OTA 性能和射频测试系统用于 5G 基站设备和终端设备的实验室测试,支持 5G 通信各个频段,支持系统和终端之间在三维信道衰落模型中的上/下行吞吐量验证以及典型射频指标的 OTA 测试。产线 5G 终端 OTA 性能测试系统用于 5G 终端设备的产线上测试,支持 5G 异型终端设备的产线上

(下转第 13 页)



表 3 NSA 接入网共享演进方案对比

| 项目       | 全 SA 组网                   | NSA 和 SA 分区组网                                     | 全网 NSA/SA 双模组网方案              | NSA/SA 双模+SA 混合组网                                 |
|----------|---------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| 组网复杂度    | 低                         | 较低                                                | 高                             | 中                                                 |
| 运维/优化复杂度 | 低                         | 较低                                                | 高                             | 中                                                 |
| 用户体验     | NSA 单模终端不能使用 5G, 且国际漫游受影响 | NSA 单模终端较 NSA/SA 双模终端业务体验差, 且部分区域 (SA 区域) 国际漫游受影响 | 各类 5G 终端在全网均能体验 5G 业务, 用户体验最佳 | NSA 单模终端较 NSA/SA 双模终端业务体验差, 且部分区域 (SA 区域) 国际漫游受影响 |

#### 4 结论

受限于国际漫游、NSA 单模终端等因素, NSA 接入网共享向 SA 接入网共享演进的过程中必然存在着 NSA 和 SA 共存的过渡阶段。本文对几种潜在的接入网共享演进方案进行了详细的阐述和分析, 总体来看, 不同接入网共享演进方案在组网复杂度、运维/优化复杂度、用户业务体验等方面各有优劣, 运营商在网络演进过程中可结合网络的实际需求按需选择。

#### 参考文献

- [1] 周瑶, 李福昌. FDD 基站共享技术应用解析[EB/OL]. (2016-04-08)[2020-04-13]. [http://zhuanli.cww.net.cn/article/article\\_weixin.asp?id=289860](http://zhuanli.cww.net.cn/article/article_weixin.asp?id=289860).
- [2] 曹亘, 吕婷, 李轶群, 等. 3GPP 5G 无线网络架构标准化进展[J]. 移动通信, 2018, 42(1): 7-14.
- [3] 刘毅, 郭宝, 张阳, 等. 5G 独立组网与非独立组网浅析[J]. 电信技术, 2018(9): 88-90.
- [4] 吕婷, 曹亘, 李轶群, 等. 基站架构及面向 5G 的演进研究[J]. 邮电设计技术, 2017(8): 46-50.
- [5] 黄蓉, 王友祥, 刘珊. 5G RAN 组网架构及演进分析[J]. 邮电设计技术, 2018(11): 1-6.

- [6] 3GPP TS 23.501. 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system[S/OL]. (2020-03-27)[2020-04-13]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] 3GPP TS 38.211. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; NR; physical channels and modulation[S/OL]. (2020-04-03)[2020-04-13]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [8] 3GPP TS 38.331. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; NR; radio resource control(RRC) protocol specification[S/OL]. (2020-03-31)[2020-04-13]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

(收稿日期: 2020-04-13)

#### 作者简介:

高谦(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 5G 无线新技术。

贺琳(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 5G 无线标准及新技术等。

李福昌(1977-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 移动通信技术等。

(上接第 8 页)

测试, 支持 5G 终端 MIMO OTA 吞吐量测试, 满足快速、低成本测试需求。

#### 4 结束语

我国测试仪器厂家从 3G、4G 和 5G 一路走来, 孜孜不倦地追求了十几年, 研发能力不断增强, 产品性能不断提升, 产品种类不断扩大, 呈现出可喜的局面。在 5G 测试标准方面, 积极参加国际 5G 技术发展的研讨会, 参与“第五代移动通信空口技术测试白皮书”和“5G 测试规范”的编制工作, 在测试源头上处于行业第一阵营。特别是在国家 03 专项的大力支持下, 国内厂家通过多年的技术研究和产品研发, 实现了上百个测试仪器关键技术的突破, 已经形成了门类相对齐全、性能与国外最高水平相当的产品体系, 为全面保障 5G 测试打下了坚实的基础。

#### 参考文献

- [1] IMT-2020(5G) promotion group white paper on 5G concept[R]. 2015.
- [2] 张煜. 4G/5G 移动通信系统测试关键技术与应用[J]. 中国科技成果, 2017, 12(23): 22-24.

- [3] 刘祖深, 张煜. LTE-Advanced 空口监测与分析关键技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1881-1889.
- [4] 张煜, 刘祖深, 凌云志, 等. 一种基于双检波 LTE 信号电平闭环控制装置和方法: 中国, 201610616396.1[P]. 2016-12-07.
- [5] 刘祖深. 高性能小数分频频率合成技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2017.
- [6] 刘祖深, 凌云志. 一种 5G 移动通信数字调制信号发生装置及其发生方法: 中国, 201510888709.4[P]. 2018-11-20.
- [7] 徐兰天, 凌云志. 一种无线通信测试系统的符号同步方法及装置: 中国, 201410835505.X[P]. 2015-05-13.
- [8] 刘祖深. 微波毫米波测试仪器技术的新进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 1-8.
- [9] 任宇鑫, 张翔, 魏贵明, 等. 适用于 5G OTA 射频测试的动态赋形紧缩场研究及其应用[J]. 信息通信技术与政策, 2019(8): 17-21.

(收稿日期: 2020-03-17)

#### 作者简介:

刘祖深(1961-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 微波毫米波通信测试技术研究与仪器产品研发。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所