



专题：移动通信（5G）测试

5G 毫米波 OTA 测试技术

凌云志^{1,2}, 张煜¹, 许虎¹, 陈婷³

(1. 中电科仪器仪表(安徽)有限公司, 安徽 蚌埠 233010;

2. 电子信息测试技术安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233010;

3. 北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 毫米波(mmWave)是5G通信关键技术之一,5G将在网络容量、数据速率和时延等方面带来革命性的改进。5G测试从以往传导式测试向空口测试变革。分析了5G毫米波大带宽OTA测试将遇到的挑战及困难,并提出了多种OTA测试关键技术,深入探讨5G毫米波大带宽OTA测试平台构建,完成了对多种设备在毫米波OTA下的整机射频性能测试。

关键词: 5G; OTA测试; 大带宽测试

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021042

5G mmWave OTA test technologies

LING Yunzhi^{1,2}, ZHANG Yu¹, XU Hu¹, CHEN Ting³

1. China Electronics Technology Instruments (Anhui) Co., Ltd, Bengbu 233010, China

2. Anhui Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, Bengbu 233010, China

3. Northern Information Control Research Institute Group Co.,Ltd, Nanjing 211106, China

Abstract: Millimeter wave (mmWave) is one of the key technologies of 5G communication, 5G communication will bring revolutionary improvements in network capacity, data rate, and delay. 5G testing has changed from the previous conduction type to OTA testing. The challenges and difficulties encountered in 5G mmWave large bandwidth OTA testing were analyzed, and a variety of OTA test key technologies was put forward, finally the construction of 5G mmWave OTA test platform for a large bandwidth was discussed, the radio performance testing of various devices under millimeter wave OTA was completed.

Key words: 5G, OTA testing, large bandwidth testing

1 引言

移动通信自20世纪80年代诞生以来,经过三十多年的爆发式增长,已成为连接人类社会的基础信息网络。5G毫米波多天线传输测试技术是

5G提升性能的关键,5G典型场景中的连续广域覆盖场景、热点高容量场景、高速移动场景所要求的高速率、大带宽、高移动的特性均依赖于5G毫米波多天线传输测试技术的实现。鉴于当前通信技术进入成熟期,从时域、频域、码域所能获



得的技术红利已进入技术瓶颈期，空域是进一步改善通信能力的必要手段，多路分集、复用、多流多天线、多小区波束成形等多天线技术都有效地提升通信传输速率。所以，5G 毫米波多天线传输测试技术是当前 5G 和未来移动通信设备（开发、生产、应用）实施中必不可少的重要组成部分，是开发、生产进程的源头^[1]。5G 毫米波多天线传输测试技术攻关的难点在于 5G 毫米波测试、大带宽处理、多天线测试等，从未来需求角度看，为满足新型蜂窝通信设备不断发展的需求，对 5G 毫米波基站和终端的测试方法进行研究，同时结合连续广域覆盖场景和热点高容量场景的高速率大带宽的测试需求，同时考虑支持 500 km/h 以上的高速移动场景，将对提高 5G 系统的性能和质量具有重要意义。

FR2 频段 5G 通信中的基站和终端均采用了大规模天线技术，提高天线的定向性增益，同时为了保证足够的区域覆盖，要求天线波束具有在方位面和俯仰面 2D(二维)空间波束成形的能力。因此，对 FR2 频段 5G 基站和终端的性能测试只能采用空口（over-the-air, OTA）测试方案^[2-3]。

当前主要的 OTA 测试系统包括：混响室（reverberation chamber, RC）法^[4]、辐射两阶段（radiated two-stage, RTS）法^[5]和多探头吸波暗室（multi-probe anechoic chamber, MPAC）法^[6]。根据 CTIA^[7]和 3GPP 标准，主流的 OTA 测试方案是 MPAC 法。多探头吸波暗室 OTA 测试系统示意图如图 1 所示。图 1（a）通过信道模拟器连接在不同暗室的毫米波基站和终端，分别对基站和终端进行测试；图 1（b）是在图 1（a）的基础上进行演进，用基站模拟器代替实际的基站，可以对终端进行测试；图 1（c）是用终端模拟器代替实际的终端，对基站进行测试。

该测试系统可以进行天线和射频整机的统一测试，性能更接近真实情况，能够支持宽带、多频点、复杂、多样真实环境的模拟和实验，测试

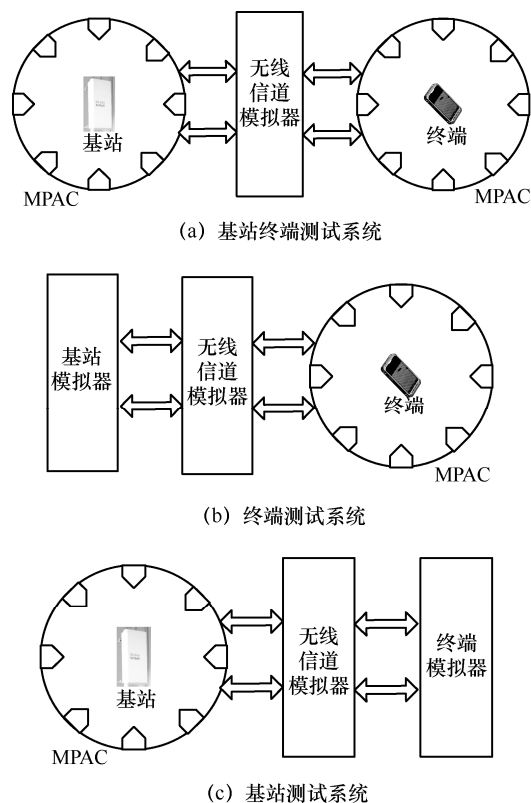


图 1 多探头暗室 OTA 测试系统示意图

系统主要由基站模拟器、信道模拟器和微波暗室组成。基站模拟器模拟 FR2 频段 5G 通信基站网络，输出信号进入信道模拟器；信道模拟器的功能是模拟实际通信场景的真实信道环境，使测试系统可以准确地测试和评估通信质量，是 OTA 测试系统中的核心测试设备，信道模拟器的性能直接和测试系统的测试准确度相关；经过信道模拟器处理后的信号输出映射到微波暗室的各测试探头上，各探头发射信号在被测设备所在的测试区域得到不同空间信息、延迟特性、极化方向等特征的多径信号，模拟出无线空间信道以及预期干扰^[8]。

2 毫米波 OTA 测试技术

毫米波 OTA 系统具备多通道、大带宽、FR2 毫米波频段覆盖、5G 通信协议等特性，系统核心包括宽带微波毫米波收发单元、3D 信道建模单元、时变动态信道估计、暗室探头优化算法等，

关键技术挑战包括以下几个方面。

2.1 宽带微波毫米波收发单元设计

宽带微波毫米波收发单元包括基站模拟器、信道模拟器以及OTA测试系统中必要的外接射频电路设计,涉及的主要器件包括振荡器、功率放大器、变频器、滤波器、低噪声放大器等。由于毫米波频段的频率高、带宽大、波长短,这对各种射频器件的设计、加工和调试都提出更高的要求。因此,开发5G毫米波OTA测试系统时,需要针对FR2频段的相关毫米波射频模块和测试系统所处硬件平台进行设计,解决FR2频段5G通信的频率覆盖和大带宽设计(1GHz以上的连续带宽)问题,还要兼顾FR1频段5G通信的OTA测试需求等问题。

2.2 3D信道建模

毫米波频段信号传输的损耗较大。为了抵消传输路径损耗,FR2频段5G通信基站和终端中的天线均采用大规模阵列天线提高方向性增益;同时为确保足够的空间区域覆盖和足够强度的信号连接,二者采用的阵列天线具有相控在水平和俯仰方向进行二维波束成形和波束扫描的能力;另外,天线具有多个波束,满足系统多流传输的通信需求。另一方面,毫米波通信的信道更加复杂,传输路径中的建筑物或其他遮挡物的形状、体积和材质都会严重影响通信系统的通信质量。因此,为了真实模拟实际通信信道环境,需要通过先进的建模技术建立3D信道模型。

2.3 时变动态信道估计

因为FR2频段5G通信基站和终端的天线定向性好、波束窄,所以如果二者的波束固定(即静态信道模型),那么即使终端在同一个地点与基站建立通信连接,当终端空间角度发生变化时(如手机横放/竖放)也会有很大的断开概率;另外单个窄波束的空间覆盖小,当终端快速运动时,如果二者的波束固定或慢速扫描,也会导致通信连

接的中断。因此,建立的信道模型必须考虑当终端状态改变和高速移动时的通信场景。这些通信场景下,无线终端在多种信道场景中连续切换,此时观察到的无线信道是在不同静态通信场景之间的平滑过渡。OTA测试系统不仅能够对离散快照内的信道特性进行较为准确的模拟,更重要的是要设法真实还原信道快照之间的连续演进,而这一点对于多天线波束成形、软切换和信道估计等技术的评估十分关键。OTA测试系统应该具备能够建立时变、动态的信道模型,满足应用场景的实际需求。

2.4 暗室探头优化算法

基于多探头吸波暗室的OTA测试方法通过基站模拟器、信道模拟器和多个测试探头在微波暗室中创建的无线通信环境,具有准确性、可配置性和可重复性的优点,是OTA测试系统中最常用的测试方法。但是,这种方案的一个主要挑战是系统成本,探头数量越多,测试系统复杂度越大,系统造价成本越高^[9]。因此,在毫米波频段下,OTA测试系统建设的一个最大挑战是在满足测试精度的前提下,最大限度地减少测试系统中暗室内的测试探头数目,降低系统的建设成本。

3 毫米波OTA测试系统建设方案

依托现有研究技术,采用系统模块化、硬件平台集成化、软件平台分层处理等先进设计方法,研发多通道、大带宽FR2频段5G通信OTA测试系统。根据不同应用需求,OTA测试系统建设方案包括基站/终端测试、基站测试和终端测试3个系统。

该测试系统主要由基站模拟器、信道模拟器和多探头吸波暗室组成,整个系统中基站产生的信号传输到信道模拟器,并由信道模拟器完成分组处理和通道配置后,映射分配到多探头吸波暗室的各个测试探头,测试探头发送经过处理的信号还原信道环境,并对待测设备性能进行测试。

MPAC毫米波终端OTA测试系统架构如图2

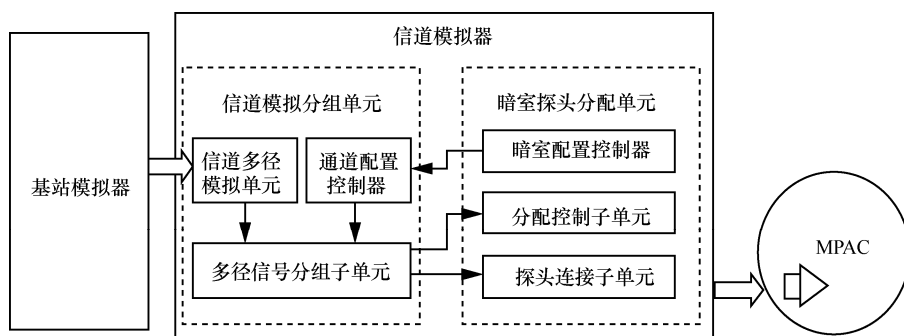


图2 MPAC 毫米波终端 OTA 测试系统架构

所示。在多探头吸波暗室的基础上，通过对多径信号（基站模拟器产生）进行分组处理，复用信道模拟分组单元的输出端口，在保留多径信号的角度信息的同时，解决了信道模拟分组单元输出端口个数有限的问题，降低了测试系统的成本。另外通过对分组后的多径信号进行动态的探针天线资源分配，复现了真实的无线多径信道传播环境，从而可以得到待测设备在 OTA 测试系统中测试出的整机射频性能。

3.1 毫米波射频收发设计

作为终端/基站模拟器的硬件平台，要在单台仪表上支持面向 6 GHz 以上高频段，工作频率支持 6~76 GHz 中与 5G 相关的波段（包括 24.25~30 GHz、37~43.5 GHz、66~76 GHz 频段等），支持 5G 毫米波射频发射和 5G 毫米波射频接收，如图 3 和图 4 所示，难点包括毫米波超宽带高纯频率合成、毫米波混频波导微带转换设计等。

在毫米波超宽带高纯频率合成设计上，采用超低噪声晶体振荡器技术作为近载波噪声基准，以宽带低噪声 YTO 作为基本的微波振荡单元，以高纯本振取样变频合成方式作为微波高纯频率合成的基本方案，利用宽带锁相环路产生高纯高频信号作为微波信号取样变频的本振，然后再利用宽带锁相环路将微波信号锁定在高分辨率参考信号上，从而实现高性能的微波频率合成，然后再通过多次分段倍频方式实现高端频率覆盖，分频方式实现低端的射频频率覆盖。

在毫米波混频波导微带设计上，毫米波混频器混频二极管安装于平面电路上，必须将毫米波信号从波导传输模式转换为平面传输模式，馈入二极管。平面电路一波导过渡作为连接平面电路与波导系统的重要形式，具有体积小、结构简单、频带宽、损耗小等优点。在探针过渡设计当中，探针的输入阻抗是探针宽度、长度、波导终端短路距离以及频率的函数，可选择一定的探针宽度、长度和波导终端短路距离，使其成为相对稳定的结构，这种结构在较宽的频率范围内，探针输入阻抗变化很小。由于探针过渡具有容性电抗，因此还应串联一段高阻抗线，用来抵消其电容效应，然后通过四分之一波长阻抗变换器实现与 50 Ω 标准微带线的阻抗匹配，从而完成波导到微带的过渡。探针距波导终端短路面的长度取 $\lambda_g/4$ ，以保证探针在波导内处于最大电压，即电场最强的波腹位置，以达到尽量高的耦合效率。由于射频输入信号频率高，探针转换结构中各尺寸处于较小的量值，装配引起的位置偏移变化很可能导致转换效率大大降低，因此将在微带片上设计多个对位点，分别对应转换结构中腔体上相应位置，装配时对各点进行对位，从而降低装配误差导致的转换效率的损失。

在毫米波传输阻抗匹配设计上，目前常用的混频二极管等效电路在毫米波频段准确度较差，如果直接用来计算二极管的输入阻抗值，将增大因阻抗失配引起的本振功率的损失。而在毫米波

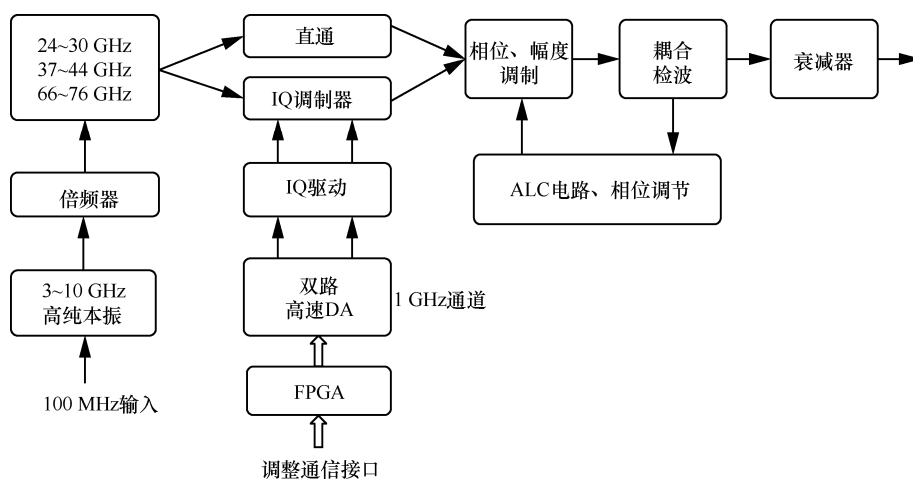


图3 5G毫米波射频发射设计方案

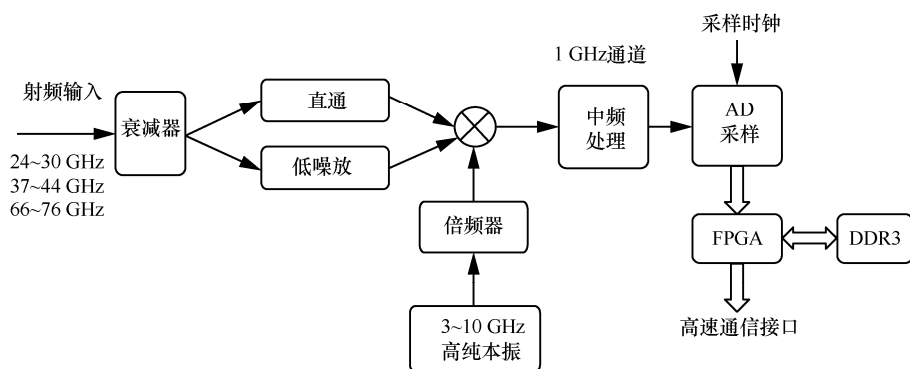


图4 5G毫米波射频接收设计方案

频段，对功率的需求越大意味着难度和成本越高。因此需要在使用的本振频率、功率范围内对二极管等效电路进行修正，得到准确的二极管的输入阻抗值进行匹配电路设计，从而降低由阻抗匹配引起的本振功率损失。

3.2 信道建模设计方案

FR2 频段 5G 通信基站和终端均采用大规模阵列天线技术，支持水平和俯仰方向波束成形和快速扫描、多流传输，所以进行 OTA 测试时必然需要进行 3D 动态信道的建模。建设 3D 球面多探头吸波暗室，根据暗室所设计的探头数目和位置，优化信道仿真算法，有效建立模拟真实通信应用环境的通信信道模型。

信道测量参数软件架构如图 5 所示，由数据导入、数据存储、数据挖掘、分布式计算、电波

传播模型修正计算、数据导出六大子模块构成。无线信道模型建模软件运行在计算机上，采用分布式存储和计算架构。基于大量测试数据、无线环境数据、地理信息数据、气候信息数据等，利用大数据挖掘算法开展对无线信道模型中的计算参数统计或修正，实现无线电波传播模型优化。

3.3 时变动态信道仿真技术

对无线信道的时变、动态特性进行连续建模和仿真，通过对无线信道中散射体簇数量以及簇空时特性的动态演进进行真实还原，将现有的几何统计信道模型与射线跟踪等确定性信道模型相结合，可以在较低的复杂度下实现实际环境中的动态信道再现。

5G 通信网络结构和信道传播特性是 5G 通信系统设计中的最基本因素，细致地了解信道传播

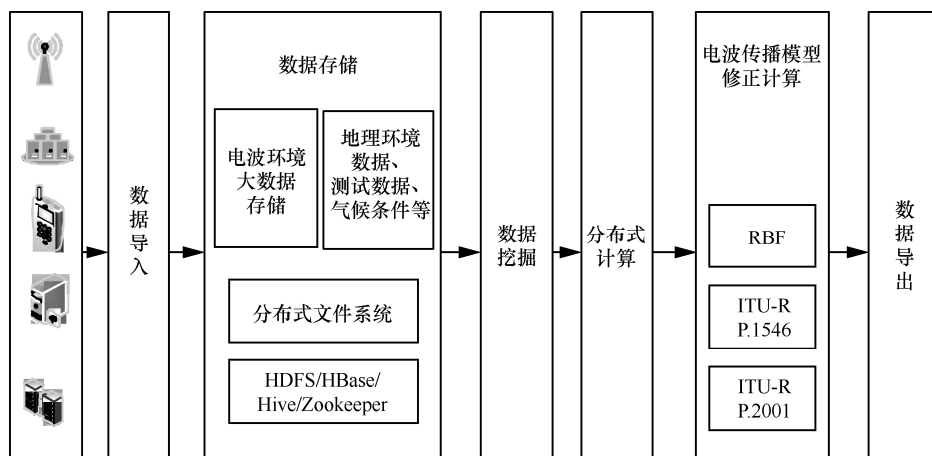


图5 5G信道测量参数软件架构设计方案

环境对成功开发和研究一个通信系统或收发装置非常必要。尤其是对于无线通信系统，收发端之间的用户信道特性是其所能提供的业务可行性和质量的决定性因素，必须全面了解和模拟实际信道特性才能设计出高质量的收发装置。为了研究这些信道特性的影响，需要在一定传播特性下进行实验。由于条件所限，不可能在设备研制的全过程都进行现场实验，尤其是5G毫米波信道，采用一个有良好近似效果的信道模拟器是一个较好的而且通用的解决方案。本方案根据信道测量采集的IQ数据提取瞬时信道参数，以统计的方式描

述时变信道的平均特性，形成信道建模参数，并进行图形化展示，以方便用户进行统计分析，如图6所示。

5G设备输入数据经过MIMO天线阵列单链路传输到信道中，按照3GPP协议的规定参数，通过大尺度衰落（主要包括路径损耗和阴影衰落）、小尺度衰落（主要包括簇时延、多普勒频移和多径效应）到达移动台，最终得到满足设定场景的信道模型。多天线阵列多径传输的输入数据传输经过信道，最终叠加得到输出数据，如图7所示。

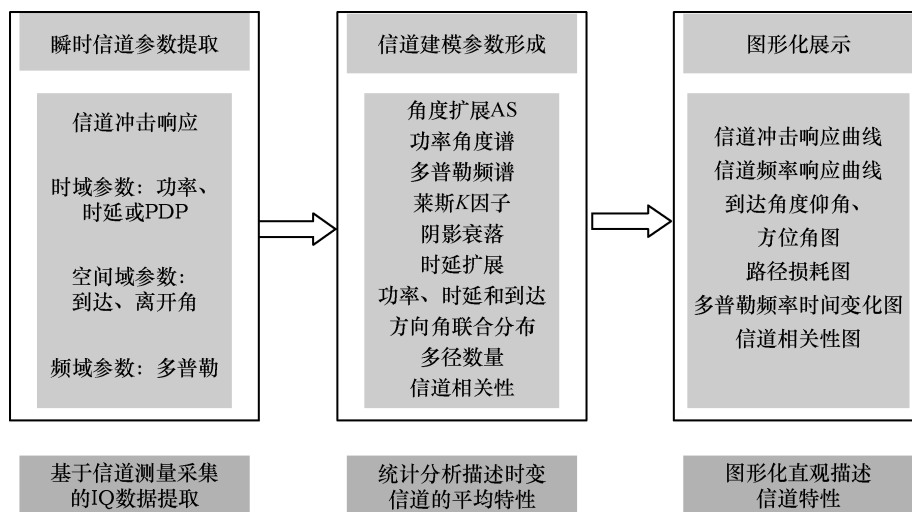


图6 5G时变动态信道仿真设计方案

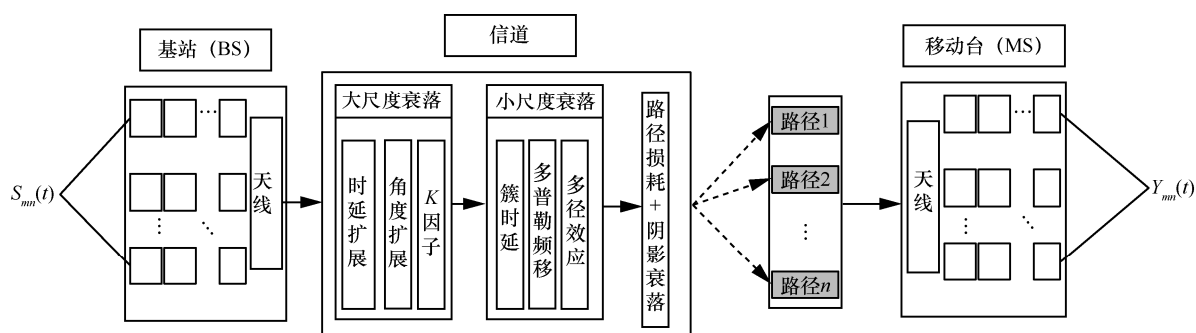


图7 5G时变动态信道模拟实现流程设计方案

3.4 暗室探头优化算法

因为探头数目多少和 OTA 测试系统的成本直接相关,所以需要在信道模拟器研发过程中,对多探头吸波暗室中各探头的位置和功率权重进行优化,以最少的探头数量准确模拟出真实的信道环境。拟对比研究基于粒子群算法、遗传算法和 multi-shot 算法,进行 OTA 探头进行选择,并选取在复杂度和性能方面最优的算法作为核心算法。另外,以目标信道的空间相关性和实际信道的空间相关性的均方误差作为评价因子,在探头位置确定以后,利用凸优化算法对探头功率权重进行优化。

4 毫米波 OTA 测试系统测试验证

暗室信道探测系统软件支持通用矢量信号解

调分析、支持信号短时记、支持通用矢量信号解调分析、支持信号短时记录和回放、支持系统同步和系统链路校准,包含功率补偿、带内平坦度修正、通道间幅相一致性修正,支持探测信号产生和波束控制、支持接收信号采集和实时运算、支持信号传输和存储、支持提供相关软件测试环境。为了满足信道探测系统软件主要性能指标及软件设计约束情况,软件总体实现框图如图8所示。

依据 MPAC 毫米波终端 OTA 测试系统架构,结合 FR2 频段、3D 信道建模和时变动态信道仿真技术以及暗室探头优化算法,完成了对 5G 终端模拟器在 OTA 测试系统中测试得到的整机射频性能,进行了 NSA 和 SA 两种模式下的 5G 设备 OTA 信令链接测试,信令测试流程如图9和图10所示,物理层性能如图11和图12所示。

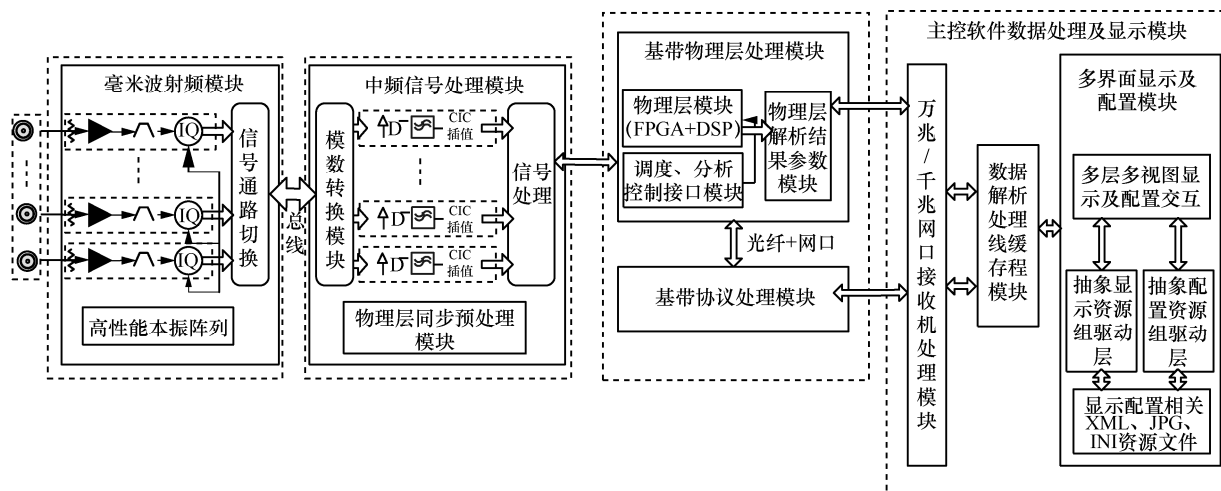


图8 暗室信道探测系统软件功能实现框图



No.	BTS	Message	UEID	MsgType	Dir	LCID
9	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
10	0	AuthenticationResponse	0	NAS-MSG	UL	NAS_DL
11	0	dlInformationTransfer	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
12	0	SecurityModeCommand	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
13	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
14	0	securityModeComplete	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
15	0	securityModeCommand	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
16	0	securityModeComplete	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
17	0	FrequencyBandList	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
18	0	ueCapabilityEnquiry	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
19	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
20	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
21	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
22	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
23	0	ue-NR-Capability	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
24	0	ue-NR-Capability	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
25	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
26	0	rrcConnectionReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
27	0	rrcConnectionReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
28	0	AttachRequest	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
29	0	ActivatedefaultEPSbearercontextrequest	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
30	0	ActivatedefaultEPSbearercontextaccept	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
31	0	AttachComplete	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
32	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
33	0	measurementReport	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
34	0	rrcConnectionReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
35	0	rrcConnectionReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH
36	0	rrcConnectionReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	DL_DCH
37	0	rrcConnectionReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	DL_DCH

图9 毫米波暗室 OTA 测试设备 5G NSA 连接信令流程

No.	BTS	Message	UEID	MsgType	Dir	LCID
9	0	AuthenticationRequest	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
10	0	AuthenticationResponse	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
11	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
12	0	dlInformationTransfer	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
13	0	SecurityModeCommand	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
14	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
15	0	securityModeComplete	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
16	0	securityModeComplete	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
17	0	UE-CapabilityRequestFilter	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
18	0	ueCapabilityEnquiry	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
19	0	UE-NR-Capability	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
20	0	ueCapabilityInformation	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
21	0	dlInformationTransfer	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
22	0	RegistrationRequest	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
23	0	RegistrationComplete	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
24	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
25	0	PDUSessionEstablishmentRequest	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
26	0	ULNASTransport	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
27	0	ulInformationTransfer	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
28	0	RRCCReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
29	0	RRCCReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
30	0	DUASTransport	0	NAS-MSG	DL	NAS_DL
31	0	PDUSessionEstablishmentAccept	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL
32	0	RRCCReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
33	0	RRCCReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
34	0	RRCCReconfiguration	0	RRC-MSG	DL	NR_DL_DCH
35	0	RRCCReconfigurationComplete	0	RRC-MSG	UL	NR_UL_DCH
36	0	DeregistrationRequest	0	NAS-MSG	UL	NAS_UL

图10 毫米波暗室 OTA 测试设备 5G SA 连接信令流程

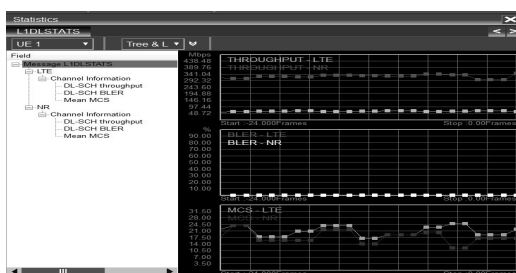


图11 毫米波暗室 OTA 测试设备 5G NSA 物理层参数

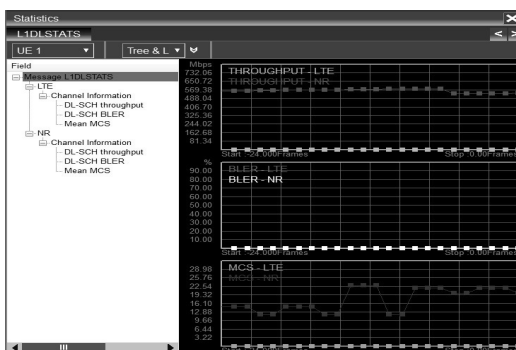


图12 毫米波暗室 OTA 测试设备 5G SA 物理层参数

5 结束语

本文主要对 5G 毫米波测试技术进行研究,首先对 5G 毫米波测试系统采用 OTA 的必要性进行分析和说明,紧接着对国内外 OTA 测试方法进行概述并对毫米波 OTA 测试方法研究趋势进行展望,然后对 5G 毫米波 OTA 测试技术的挑战进行归纳和说明,最后依据现有科学技术水平提出应对各项挑战的解决方案搭建 5G 毫米波 OTA 测试系统,完成毫米波终端在 OTA 环境下的射频性能测试。

参考文献：

- [1] 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, 12(31): 10-18.
LIU Z S, ZHANG Y. Research on the key technologies of LTE-Advanced Uu monitoring and analyzing[J]. Journal of Electronic Measurement and instrumentation, 2017, 12(31): 10-18.
- [2] 张瑞艳, 邵哲, 曹景阳. 大规模阵列天线基站的 OTA 测试方法研究[J]. 移动通信, 2017, 41(5): 91-96.
ZHANG R Y, SHAO Z, CAO J Y. Research on OTA testing method of large scale array antenna base station[J]. Mobile Communication, 2017, 41(5): 91-96.
- [3] 詹文浩, 戴国华. 毫米波终端技术及测试方案缝隙[J]. 移动通信, 2017, 41(17): 12-15.
ZHAN W H, DAI G H. Millimeter wave terminal technology and test scheme gap[J]. Mobile Communication, 2017, 41(17): 12-15.
- [4] CHEN X. Throughput modeling and measurement in an isotropic-scattering reverberation chamber [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4): 2130-2139.
- [5] YU W, QI Y, LIU K, et al. Radiated two-stage method for LTE MIMO user equipment performance evaluation[J]. IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1691-1696.
- [6] KAUSAR R, CHEN Y. Adaptive time domain scheduling algorithm for OFDMA based LTE-Advanced networks[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2011: 476-482.
- [7] CTIA. Test plan for 2x2 downlink MIMO and transmit diversity over-the-air performance[EB]. 2017.

- [8] FAN W, PEDERSEN G F, KYOSTI P, et al. Recent advances on OTA testing for 5G antenna systems in multi-probe anechoic chamber setups[C]//Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [9] JING Y M, RUMNEY H K, WEN Z. Analysis of applicability of radiated two-stage test method to 5G radiated performance measurement[C]//Proceeding of 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). [S.l.:s.n.], 2018.

[作者简介]



凌云志（1976—），男，中电科仪器仪表（安徽）有限公司研究员，电子信息测试技术安徽省重点实验室移动通信测试方向带头人，主要研究方向为通信测试技术与仪器。



张煜（1980—），男，中电科仪器仪表（安徽）有限公司研究员，主要研究方向为移动通信测试技术。



许虎（1985—），男，中电科仪器仪表（安徽）有限公司高级工程师，主要研究方向为移动通信测试技术。

陈婷（1986—），女，北方信息控制研究院集团有限公司高级工程师，主要研究方向为测控技术与仪器。