



专题：移动通信（5G）测试

5G 信道建模与性能测试方法

魏贵明, 张翔, 郭宇航, 乔尚兵
(中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 随着 5G 移动通信系统的快速发展, 5G 基站和终端在实际外场环境下的吞吐量性能对用户体验至关重要。如何在室内精确建模和复现外场信道环境, 成为学术界和产业界的研究热点。介绍了 4G 和 5G 的信道建模方法, 并针对 5G 终端设备, 阐述了目前实验室多输入多输出 (multi-input multi-output, MIMO) 空口 (over-the-air, OTA) 测试解决方案的优势, 然后给出了具体的 OTA 信道建模原理描述以及吞吐量仿真结果, 期为相关工作提供参考。

关键词: 5G; 吞吐量; 信道建模; 空口测试

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021034

Channel modeling and performance test method for 5G

WEI Guiming, ZHANG Xiang, GUO Yuhang, QIAO Shangbing
China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: With the rapid development of 5G wireless communication system, the throughput of 5G gNB and user equipment (UE) in the practical field environment is of great important. How to generate the accurate model in lab, which can represent the propagation condition in the field, has drawn great interests from both the academic and industrial communities. The channel modeling methods of 4G and 5G were introduced, and for 5G UE testing, the advantages of the multi-input multi-output (MIMO) and over-the-air (OTA) performance test solution were showed. Then, a detailed description of the OTA channel modeling principle and throughput simulation results were given in order to provide reference for related work.

Key words: 5G, throughput, channel modeling, over-the-air testing

1 引言

2019 年 6 月 6 日, 工业和信息化部正式为中国移动、中国联通、中国电信和中国广电 4 家企业发放 5G 移动通信牌照, 意味着中国在移动通信领域正式从长期演进 (long term evolution, LTE)

进入 5G 时代。传输速率的大幅提升和端到端时延的明显降低为移动互联网、车联网、工业互联网等业务的发展提供了有力支撑, 目前已经有超过 300 个运营商在 100 多个国家和地区部署商用 5G 网络或正在进行 5G 试验。

为提升频谱效率和系统容量, 从已经成熟的

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2021-02-04

通信作者: 张翔, zhangxiang1@caict.ac.cn



4G LTE 到现今的 5G NR，诸多新技术被广泛应用：Sub 6G、毫米波和大规模天线都是其中的典型代表^[1]。新技术的应用也带来了信道建模方案的变更以及终端性能测试方法的革新。传统的测试方案采用线缆直连信道模拟器的方式，仅可评估终端基带的性能，且不适用于大规模天线阵列的测试^[2]。为解决该问题，5G 的通用方案是采用多探头吸波暗室（multi-probe anechoic chamber, MPAC），利用 OTA 暗室建立一个无反射的自由空间，使用多角度的探头天线模拟出目标信道环境，从而将目标信道搬移到实验室，以评估终端的整体性能。

为精准实现 MIMO OTA 测试系统构建，将信道模型在实验室中进行真实的复现，信道建模的理论与技术显得至关重要。随着大规模 MIMO 的应用，信道模型的构建也日趋复杂完善。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）在 TR38.901 中提出了适用于 0.5~100 GHz 的信道模型^[3]，信道由传统增强随机信道模型（stochastic channel model enhanced, SCME）的二维模型升级为三维，且对传播簇的数量和应用场景进行了进一步的划分。

2 信道建模

信道模型按照建模方式可以分为两大类：基于相关性矩阵的信道模型以及基于几何的随机信道模型（stochastic channel model, SCM）^[4]，前者通过预先设定的相关性矩阵，乘以多径衰落生成；后者依托发送端和接收端的几何地理关系，确定不同传播路径发送和接收端的角度、功率、相位等信息。相关矩阵信道模型的最大优势是模型不确定性小，测试结果稳定，但是由于其无法确定传播方向，因此不能用于波束成形技术的验证。从 LTE 中后期至 5G 阶段，性能测试均倾向采用 SCM 模型。

2.1 LTE SCME

LTE 阶段，广泛采用的信道模型是增强的 SCM

（SCME）^[5]，适用于中心频率为 6 GHz 以下、带宽为 100 MHz 的系统，可模拟 3 种不同的外场环境：市区宏小区（urban macro, UMa）、郊区宏小区（rural macro, RMa）以及市区微小区（urban micro, UMi）。SCME 中独立的传播链路（簇）共 6 条，簇被进一步细分为具有不同时延与子径数的中径，使得大带宽系统的信道模型能够体现出频率选择性衰落。各个子径除了具有各自特定的离开角、到达角等角度信息和时延信息之外，簇内的子径功率还呈现一定的功率分布（如拉普拉斯分布），该分布的标准差即簇的角度扩展。SCME 信道模型生成流程如图 1 所示。

2.2 5G 信道模型

3GPP 在无线电接入网（radio access network, RAN）第 69 会议上批准了关于“6 GHz 以上频谱的信道模型”的研究。该模型基于前期三维 SCM^[3]，针对场景、频率、带宽等指标进行升级。

新的信道模型适用范围如下。

- 支持的场景包括城市微蜂窝街道峡谷、城市宏蜂窝、室内办公室和农村宏蜂窝。
- 频率支持 0.5~100 GHz，带宽最高支持中心频率的 10%，但不超过 2 GHz。
- 支持链路一端的移动性。
- 采用簇时延线（cluster delay line, CDL）建模方式。
- 支持视距（line of sight, LOS）和非视距（none line of sight, NLOS）模型。
- 终端移动速度高达 500 km/h，被测设备支持大型天线阵列。

5G 信道模型的生成流程与 SCME 类似，两种信道模型对比见表 1。

3 MIMO OTA 测试系统架构

3.1 传统线缆直连方案

在 LTE 系统中，传统低频基站和终端芯片的性能测试主要采用线缆级联的方式。测试系统由基站（或综测仪）、信道模拟器和终端组成。信道

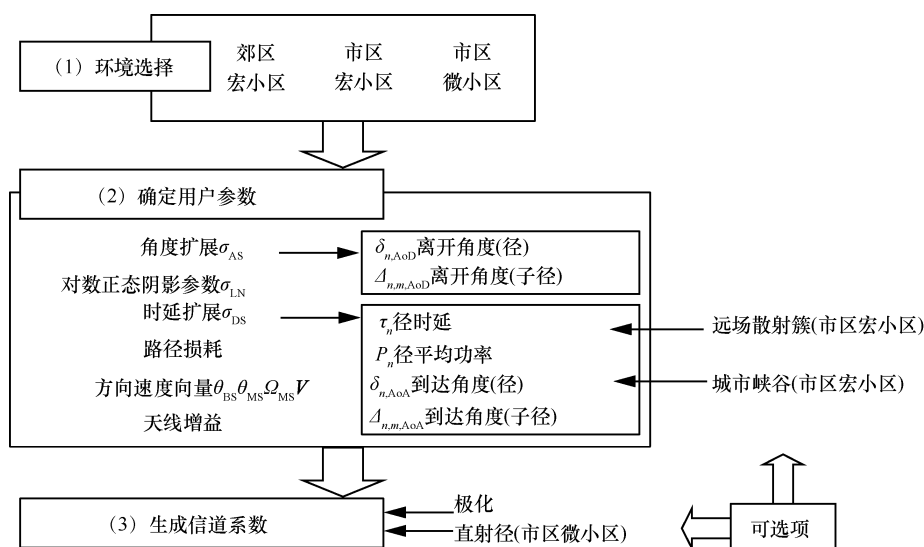


图 1 SCME 信道模型生成流程

表 1 两种信道模型对比

模型	LTE SCME	5G
类型	几何模型	几何模型
簇的数目	6	12+(NLOS)/20+(LOS)
分类	宏小区、微小区、室内或热点	A/B/C/D/E
是否支持 LOS 径	是	是
天线	线性	阵列
维度	二维	三维
角度参数	局部	全局

模拟器内运行包含路径衰落、阴影效应、快速衰落、基站天线模型、终端天线模型在内的信道模型，模拟基站与终端之间由于空间传播带来的损耗，若单台信道模拟器的射频端口数量不够，可采用多台信道模拟器级联使用。通过如图 2 所示的系统，可以测试基站和终端在衰落场景下的吞吐量性能，但是传统线缆级联的性能测试方法存在以下问题。

- 5G 采用的毫米波频段链路损耗较大^[6]，基站和终端将无法引出测试端口，线缆级联的测试将因为没有测试连接端口而失效。
- 大规模 MIMO 基站通道数过多，以 64 通

道基站为例，若需测试 8 流传输的性能，需要信道模拟器同样具备 64 收、8 发的双向射频能力，具备 1 024 路逻辑通道。仪表成本昂贵，连线过程复杂。

- 大规模天线阵列基站主要通过成形技术产生分集增益和复用增益，而线缆级联的测试方式屏蔽了模拟波束成形部分，测试结果与基站在实际场景下的性能不符。

出于成本原因，毫米波 gNB 的射频通道数与低频基站相比大幅减少，通常为 2 个或 4 个。每一个射频通道对应大量的有源天线，一个毫米波 gNB 的天线数量可高达 1 024 根。利用混合波束成形、波束跟踪等技术，克服较大的路径损耗，

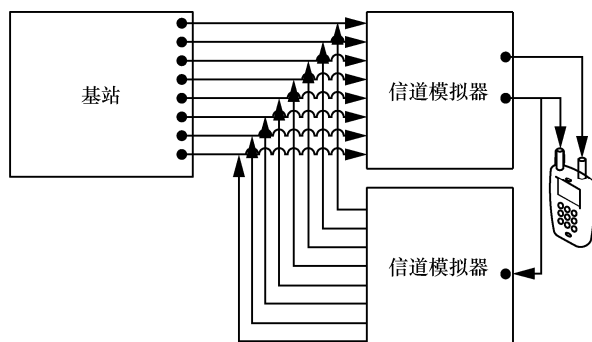


图2 传导性能测试系统连接

实现有限距离下超大带宽、超高速率、超低时延的数据传输。正如前文所述，由于毫米波缺乏可供线缆连接的物理射频接口，必须通过空口测试方案进行性能验证。

3.2 OTA 测试系统

为了克服传导测试无法模拟终端天线的劣势，LTE 和 5G 的终端整机性能测试目前都倾向于采用 OTA 方式^[7]。LTE 的 MIMO OTA 方案已经在 3GPP 完成讨论，5G 测试方案正在讨论中。该方案通过电波暗室建立一个无反射的自由空间，将衰落信道模型在实验室中进行真实的复现。目前主流的 MIMO OTA 方案包括多探头法、混响室法和两步法^[8]。多探头法由于理论精确和复现性好，成为目前的主流方案。

Sub 6 GHz 的 5G 终端 MIMO OTA 测试系统可沿用 LTE 的消音暗室、双极化探头、转台、功放等设备，仅需对仪表进行功能和性能升级。综测仪需支持 5G 终端连接，并能够进行下行业务传

输。信道模型需升级带宽至 100 MHz，射频通道数量至少为 4×16 。MIMO OTA 三维多探头测试系统结构如图 3 所示。除去在水平维度的探头环之外，系统还在该环直径形成的球面上，按照相等的仰角在上下方分别摆放一个探头环，每个环上等角度间隔均匀地摆放探头。上中下 3 个环分别放置 4 根、16 根、4 根双极化天线。

目前 3GPP RAN4 已明确 5G 终端 MIMO OTA 测试信道模型、探头布局、转台旋转方式、静区空间相关性等关键指标。5G 综测仪下行信号经过信道模拟器添加衰落信道模型，为保证终端接收功率强度，信道模拟器出口信号添加固定增益的低噪声功率放大器。面向信道模型中的不同来波角度和角度功率谱分布，采用凸优化的方式，完成同一个簇在不同探头上的功率分配，但是目前标准的 5G MIMO OTA 测试系统存在如下瓶颈。

- 不支持上行性能测试：由于 5G 的商用频点高于 LTE，路径损耗较大，对终端上行发射信号功率及质量要求高，5G 终端上行链路的设计挑战大。
- 不支持多种 5G 物理层关键技术：由于综测仪功能限制，标准的 MIMO OTA 系统不支持三维波束成形、波束跟踪、自适应编码调制、混合自动重传等。
- 不支持大尺度模拟：目前的 MIMO OTA 系

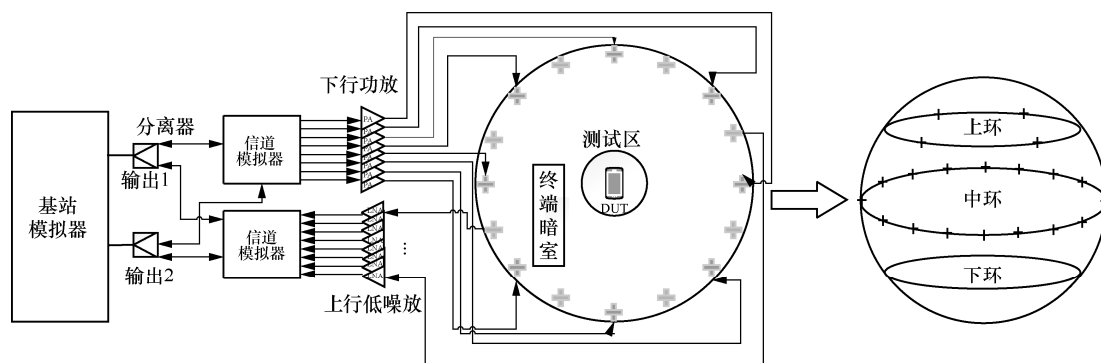


图3 MIMO OTA 三维多探头测试系统结构示意图

统仅模拟小尺度快衰模型, 不支持阴影衰落和路径损耗的环境模拟。

在此阶段, 终端设备厂商和运营商均尝试采用真实 5G 基站替代综测仪, 同时增加上行低噪放和信道模拟器通道, 实现上下行双向互易信道模拟。并可通过调相网络设备对信道模型进行降维, 实现 5G 终端的精确性能测试。

4 MIMO OTA 测试系统实现

4.1 MIMO OTA 信道建模

OTA 信道模型的构建, 需要在暗室中还原每个簇的时延、功率、方位角以及交叉极化比等信息, 具体 CDL (common channel data link, 公共信道数据链) 参数可以依照相关的信道建模标准 (如 3GPP TR38.901)。而其难点在于对 OTA 暗室中不同天线探头赋予不同的权重因子, 从而模拟 CDL 簇的定向传播与角度拓展。

在 MPAC 系统中, 有两种较为通用的探头赋值算法, 即预衰落合成 (prefaded signal synthesis, PFS) 法和平面波合成 (plane wave synthesis, PWS) 法。而 PFS 算法由于不受系统的相位波动影响, 鲁棒性更强, 其弱点在于无法精准模拟角度拓展很小的直射径信号。本文重点对 PFS 算法进行介绍。

在 PFS 算法中, 选择空间相关性作为对信道的空间特性建模的评价因子。空间相关性是接收信号相似性的统计量度。OTA 探头设置示意图如图 4 所示。AoA 以角度为 ϕ_p 的平面波射入间距为 d 的天线阵列, 天线法向与水平面夹角为 ϕ_a , ϕ 是平面波相对于天线元向的角度。忽略天线极化, 对于一对天线 u 和 v 而言, 假设终端天线是理想的点源天线, 对于信道模型下的连续功率角频谱, 可以写为^[8]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Target}}(d_{\text{VAP}}, \phi_a) = & \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\bar{r}_u - \bar{r}_v)\bar{\phi}_p\right\} P(\phi_p) d\phi_p = \\ & \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left\{-j\frac{2\pi d_{\text{VAP}}}{\lambda} \sin(\phi_p - \phi_a)\right\} P(\phi_p) d\phi_p \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $P(\phi)$ 是信道的角度功率谱, 其分布满足 $\int_{-\pi}^{\pi} P(\phi) d\phi = 1$ 。

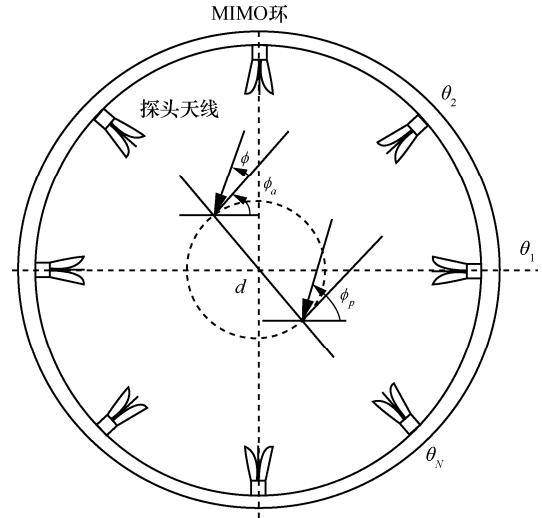


图4 OTA探头设置示意图 (θ_i 是第 i 个探头的角度位置)

也就是说, 对于定义连续 PAS, 空间相关性是成对的虚拟天线之间的距离和相对位置 (角度) 的函数。在 MPAC 中, 信道模型中的连续 PAS 由来自离散多探针天线的信号模拟, 可以通过式 (1) 推导得出。测试区域中离散天线探头的空间相关函数为:

$$\rho_{\text{OTA}}(d_{\text{VAP}}, \phi_a) = \sum_{k=1}^K \omega_k \exp\left\{-j\frac{2\pi d_{\text{VAP}}}{\lambda}(\theta_k - \phi_a)\right\} \quad (2)$$

其中, ω_k 是第 K 个探头的权重。

衡量 OTA 建模标准的评价因子是空间相关性误差, 即 $|\rho_{\text{OTA}} - \rho_{\text{Target}}|$, 需要注意的一个限制是探头权重要满足归一化条件, 且不能小于 0。因此, 目标函数是:

$$\begin{aligned} \min_{\omega} & \|\rho_{\text{OTA}} - \rho_{\text{Target}}\|_2^2 \\ \text{s.t.} & \|\omega\|_1 = 1, 0 \leq \omega_i \leq 1, i \in [1, N] \end{aligned} \quad (3)$$

通过此方案, 可以计算出每个簇在各个探头的权值映射关系, 代入信道公式的对应链路, 即可还原出标准中所定义的信道模型。



4.2 吞吐量性能仿真

目前 5G 的低频基站通常采用 64 个发送和接收通道、192 根天线的配置，即 1 个射频通道映射为 3 个相同极化方向的阵子。支持同时并行传输高达 16 流的独立数据，与传统 8 天线 2 流的基站数据传输方式相比，在不增加系统带宽的情况下，基站的峰值速率提升 8 倍。5G 低频终端多采用 4 根天线配置，支持下行 4 流接收和上行 1 流发送。以中国移动商用的带宽和时隙配比如例，峰值速率约为 1.6 Gbit/s，远高于目前商用的 LTE 网络。

衰落场景单用户不同信噪比下吞吐量比较如图 5 所示，采用水平 8 探头吸波暗室环境，通过 CDL 信道仿真计算的不同速度下终端的吞吐量结果。

由仿真结果可以看到，在 5G 的大规模 MIMO 天线配置下，单用户吞吐量可以达到近乎峰值。在信道质量好（SNR 高）的情况下，LOS 信道的

峰值要低于 NLOS 信道。这表明，反射和散射径所带来的系统吞吐量提升，对于终端性能尤为重要。

5 结束语

终端性能测试作为 5G 技术与应用的重要环节，对于优化终端设计方案、推进 5G 商用、反哺 5G 理论体系都有极其重要的意义。本文着眼于 5G 终端性能测试系统的构建，从信道理论、OTA 系统架构、建模技术以及吞吐量仿真等各个维度，通过传统方案与新技术的对比分析，给出了进行 OTA 性能测试的必要性与优越性，指明了测试系统未来的发展方向。

参考文献：

- [1] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 40-45.
NI S J, ZHAO J H. Key technologies in physical layer of 5G

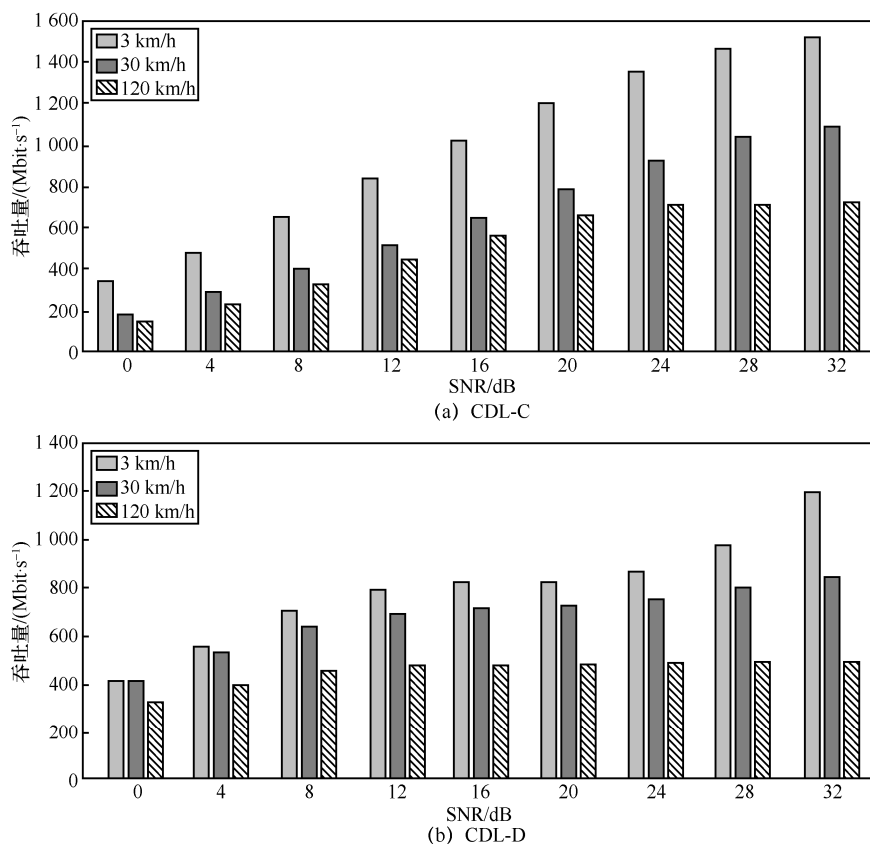


图 5 衰落场景单用户不同信噪比下吞吐量比较（3.5 GHz，100 Mbit/s 带宽）

- wireless communications network[J]. Telecommunications Science. 2015, 31(12): 40-45.
- [2] 刘晓龙, 魏贵明, 张翔, 等. 5G 大规模天线基站的性能评估与测试[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 158-169.
LIU X L, WEI G M, ZHANG X, et al. Performance emulation and test for 5G massive MIMO base station[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 158-169.
- [3] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR38. 901 V16. 1. 0. [S]. 2019.
- [4] ALMERS P, BONEK E, BURRUA. et al. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems[C]//Proceedings of Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. [S.l.:s.n.], 2007(1).
- [5] 3GPP. Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations: TR25. 996 V15. 0. 0 [S]. 2018.
- [6] AL-OGAILI F, SHUBAIR R M. Millimeter-wave mobile communications for 5G: challenges and opportunities[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [7] 郑洋, 李雷. 5G 射频测试技术及发展趋势[J]. 电信网技术, 2017(12): 26-29.
ZHENG Y, LI L. Introduction and developing trend of 5G radio frequency test[J]. Telecommunication Network Technology. 2017(12): 26-29.
- [8] 吴醒峰, 张志华, 马玉娟, 等. MIMO OTA 测试区域扩大方法及信道建模实现原理[J]. 广播与电视技术, 2014(12): 121-130.
WU X F, ZHANG Z H, MA Y J, et al. Test zone extension method and channel modeling principle in MIMO OTA[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2014(12): 121-130.

[作者简介]



魏贵明 (1970-), 男, 中国信息通信研究院移动通信创新中心常务副主任, 主要研究方向为移动通信技术标准、产业组织和发展策略等。



张翔 (1984-), 男, 博士, 中国信息通信研究院移动通信创新中心副主任, 主要研究方向为大规模天线技术、5G OTA 测试方法、基站和终端的射频与性能测试技术等。



郭宇航 (1993-), 男, 中国信息通信研究院移动通信创新中心工程师, 主要研究方向为模拟外场测试系统构建、OTA 性能测试技术、5G FR1 信道建模技术、无线产品的性能测试与标准化。



乔尚兵 (1994-), 男, 中国信息通信研究院移动通信创新中心工程师, 主要研究方向为大规模天线技术、5G 毫米波信道建模技术、OTA 终端性能测试系统构建、无线产品的性能测试与标准化。