



5G 大规模天线基站的性能评估与测试

刘晓龙, 魏贵明, 张翔, 任宇鑫, 江甲沐

(中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要: 5G 新空口 (NR) 技术集合三大应用场景, 打破了空口传输的限制, 为信息科学的突破奠定了坚实的基础。在 5G 网络的实施部署过程中, 基于大规模天线的基站 (massive MIMO based base station, MMBS) 成了 5G 关键技术的重要支点。为了确定 6 GHz 以下频段的 MMBS 性能, 首先介绍了 MMBS 中的物理层关键技术, 给出了 MMBS 物理层峰值性能和衰落信道环境下性能的主要评估方法, 为后续 MMBS 产品的测试提供了参考指标。在此基础上, 分析了当前主流的 MMBS 性能测试方法, 并提出了一套适合当前商业版本的 MMBS 的性能测试方案。该方案可对基站的 5G 技术功能和性能进行测试。截至 2019 年年底, 已有多家 5G MMBS 厂商进行了该项测试。

关键词: 5G 大规模基站; 性能评估; 性能测试

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020169

Performance emulation and test for 5G massive MIMO base station

LIU Xiaolong, WEI Guiming, ZHANG Xiang, REN Yuxin, JIANG Jiamo

Technology and Standards Research Institute, China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China

Abstract: The new radio (NR) of 5G has gathered three main application scenarios and has broken the restrict of the air interface transmission, laying a solid foundation of the information science. Massive MIMO based base station (MMBS) has become the important fulcrum in the implementation deployment of 5G networks. In order to determine performance of the MMBS in sub 6 GHz band, the physical (PHY) layer techniques were firstly introduced, then, for providing a benchmark of the MMBS products, the evaluation method for upbound of the PHY performance and the PHY performance under the fast fading channel environment was given. Based on that, the current mainstream MMBS performance testing methods were analyzed, and a performance testing scheme was proposed which had been suitable for current commercial version of the MMBS. The proposed scheme can be used to test the function and performance of the products with 5G technique. By the end of 2019, there are many manufacturers of MMBS products have been tested by this solution.

Key words: 5G MMBS, performance emulation, performance test

收稿日期: 2019-12-21; 修回日期: 2020-05-20

通信作者: 魏贵明, weiguiming@caict.ac.cn

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2018ZX03001028)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2018ZX03001028)

1 引言

中国三大运营商在2019年11月正式推出5G套餐,意味着5G三大应用场景中的增强大带宽场景(eMBB)在中国从预研状态成功实现落地。相比于4G技术,5G将支持更大的带宽、更多的连接数以及更低的时延。从整个物理层关键技术的层面来看,5G商用技术与4G商用技术主要的创新之一在于引入了大规模多天线(massive MIMO)技术作为提高通信有效性和可靠性的主要手段,同时,大规模MIMO也在提高空间资源利用率上做出了重大贡献。在整个eMBB 5G场景的部署中,具有大规模天线阵列的基站(massive MIMO based base station, MMBS)起到了关键作用。MMBS由天线阵列单元(antenna array unit, AAU)和基带单元(base band unit, BBU)组成。AAU主要为大规模天线阵列的射频单元部分,类似于4G时的RRU加天线单元。BBU为基带处理单元,负责对基带的信号进行处理。为了确保5G网络在商用模式下的通信质量和稳定性,对MMBS产品的评估和测试至关重要。其中,评估指的是对MMBS的性能进行预估,进而得出MMBS性能的预期指标,给后续的实际测试做参考。测试指的是对MMBS进行实际的测试工作,主要包括功能测试部分和性能测试部分:功能测试验证技术的基本功能,性能测试主要是对通信的有效性和可靠性进行测试。考虑AAU可以进行拉远,那么对MMBS测试的实际被测件可以认为是AAU部分。

MMBS的峰值计算和性能仿真一直是预先评估通信系统性能的重要手段。峰值计算主要是根据现有信令结构以及最大支持的传输能力来最终确定。性能仿真又分为链路级仿真和系统级仿真^[1]。其中,链路级仿真主要是模拟MMBS通过空口和用户设备(user equipment, UE)进行数据传输的过程,这其中包含了MMBS从基带处理到射频单

元调制发射、空口信道、UE进行解调和基带处理的接收的下行过程,以及从UE调制发射到MMBS侧解调的上行过程。链路级仿真通常用来评估单MMBS到UE间的性能。而系统级仿真则用来评估多MMBS的整体组网性能,其中,需要考虑BS之间以及UE间的同频干扰,最后对上行和下行的平均小区性能和平均用户性能进行评估。性能仿真可对MMBS平均吞吐指标、谱效指标、用户平均吞吐、谱效等一系列指标进行评估。MMBS的性能评估需要根据5G技术特点,对峰值性能进行计算,并对通信链路多项性能指标进行仿真评估。结合5G物理层的主要关键技术,后续将会给出对MMBS的峰值速率评估和衰落信道下性能评估的具体方法。

对无线产品进行无线性能测试是验证无线产品性能优劣的主要方法。考虑5G MMBS的主要技术特点,对主流的测试方法的适用性进行分析和改进是确认最终测试方案的关键。在此基础上,为了能够实现对不同厂商5G MMBS产品进行稳定可靠的测试,需要充分考虑各厂商测试需求的跨区域性、测试方法本身的时间成本和建造成本,进行最终测试方案的确定和测试系统的搭建。最终方案需要支持MMBS波束追踪与管理以及eMBB下各个场景无线信道环境模拟。此外,5G MMBS拥有垂直维波束成形的能力,测试LTE系统时的常用的2D信道模型已经不适用于MMBS的性能测试。针对上述MMBS技术特点,本文提出了一种基于3D空间衰落信道建模的分步传导测试方案。在此基础上,通过对衰落信道模型进行特征提取和降维拆分,给出了基于调相网络加信道模拟器的分步传导测试方法。

2 5G MMBS 关键技术指标与性能评估

首先介绍了MMBS的物理层技术和主要的评估指标,随后给出了性能评估方法以及物理下行



共享信道 (physical downlink shared channel, PDSCH) 的峰值速率和其在衰落信道速率评估示例。根据评估方法得出的评估性能可作为实际测试的参考,起到相互印证的作用。

2.1 物理层关键技术与指标

为了满足 5G 大带宽、低时延、高速率要求,且考虑对 4G 系统的兼容性,5G MMBS 空口使用特殊的参考信号、同步信号、广播信道、控制信道、MIMO 技术、自适应调制编码 (AMC) 方案以及特殊的物理层帧结构。对物理层关键技术的主要性能评估指标为物理层的速率、谱效等一系列数据信道的性能指标。

5G 系统参考信号、同步信号、广播信道和控制信道的主要作用包括辅助数据解调、信道状态信息测量、波束训练、时频跟踪、MMBS 和 UE 之间的同步以及物理层信令的交互,并维持 MMBS 与各 UE 物理层各个信道的正常工作^[2-4]。针对大规模 MIMO 设计,为了节约开销,5G 参考信号上最大的变化是取消了公共参考信号 (common reference signal, CRS),将辅助同步、解调、反馈、测量等功能分散到跟踪参考信号 (tracking reference signal, TRS)、解调参考信号 (demodulation reference signal, DMRS)、信道状态信息参考信号 (channel state information reference signal, CSI-RS) 等参考信号中^[5]。此外,5G 信令整体趋向于使用 UE 级的参考信号、UE 级的无线资源控制 (RRC) 信令配置下的下行控制信道 (physical downlink control channel, PDCCH)^[3,6]来实现大规模 MIMO 技术以及调度方面的支持。而在波束管理、波束测量上报、波束恢复方面,由同步信号加广播信道组成的 SSB (synchronization signal and PBCH block) 和 CSI-RS 则起到了关键作用。上述内容主要体现在占用相应的时频资源所引起的开销上,最终会影响链路的峰值速率。

5G 在 MIMO 技术中采用基于预编码的

DMRS 的透传技术,天线的物理端口和 DMRS 的逻辑端口采用一一映射,即 UE 根据预编码后的 DMRS 直接进行检测和解调,MMBS 无需再通知 UE 指定的传输模式^[7-8]。而从层到天线端口的映射取决于具体的预编码或波束成形方法。MMBS 是采用预编码技术还是波束成形技术主要根据上行反馈。而基于闭环传输方案的反馈有两种方式,其中一种为基于 CSI 的反馈,UE 根据 CSI-RS 估计下行信道状态信息并进行反馈,对应预编码的下行 MIMO 策略。另一种为基于信道互易性的反馈,MMBS 根据 UE 天线轮发的探测参考信号 (sounding reference signal, SRS) 进行下行信道的估计,对应波束成形的 MIMO 策略。MMBS 也可以根据上述两种反馈方式,实现 MIMO 混合互操作功能,即通过自适应的方式综合选择合理的下行传输策略实现最优性能的传输^[5]。对于上行传输,支持采用码本和非码本的 MIMO 上行策略进行调度和接收,具体情况也需要参考 UE 的收发能力。针对 MMBS 实际的天线设计,现阶段 MMBS 最多支持 64 物理通道,并允许多个垂直方向上的阵子到通道的映射,例如三合一,最终实现多天线阵子到物理通道的映射。

MMBS 的性能主要体现在数据业务信道的性能上,5G 同样采用 AMC 技术。5G 物理共享信道 (PDSCH/physical uplink shared channel, PUSCH) 支持最大 256QAM 或 64QAM 两种自适应调制方式,信道编码采用低密度奇偶校验码 (low density parity check, LDPC),其中 LDPC 编码的校验矩阵 (parity check matrix, PCM) 及基图 (base map, BG) 参照 3GPP 协议进行设计^[8]。此外,5G 系统具备更为灵活的帧结构,且支持自包含结构设计,可在同一传输时隙中分符号进行上下行的灵活传输^[2]。针对 3GPP 规定的 6 GHz 以下 (frequency 1, FR1) 频段中的 N41 频段和 N78 频段,以下给出外场常用的帧结构配置。

N41 频段对应的 2.6 GHz NR 帧结构需与

Band41 频段 (3D1U) 帧结构同步, 支持 5 ms 单周期帧结构, 如图 1 所示。其中, 上行子帧为全上行, 特殊时隙 (NR 结构中的 slot7 和 slot17) 配置为 6:4:4 (DL:GP:UL)。

N78 对应的 3.5 GHz 的帧结如图 2 所示。其中每 5 ms 里面包含 5 个全下行时隙, 3 个全上行时隙和两个特殊时隙。slot3 和 slot7 为特殊时隙, 配比为 10:2:2。

5G 物理层技术对 MMBS 的性能影响体现在数据信道的物理层速率和谱效上。《ITU-RM.2412 报告: IMT-2020 评估指南》中关于 eMBB 场景下的主要评估技术指标为峰值速率、峰值谱效率、用户体验速率、5%用户频谱效率、平均频谱效率以及用户移动性^[10]。考虑对最大带宽进行评估, 主要评估指标为 100 MHz 系统带宽下单 UE 的 MMBS 峰值速率和 MMBS 在衰落信道下的速率, 其中峰值速率主要通过理论计算的方式获取, 而衰落信道下的性能则需要通过链路级仿真来进行评估。

2.2 理论峰值速率评估方法

为了更好地对 MMBS 进行性能测试, 首先需要确定 MMBS 性能所能达到的极限。关于 MMBS 单用户的信道容量, 根据参考文献[11-12], 可以给出:

$$C = \text{lb det} \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \quad (1)$$

根据不同的信道特性, 容量满足詹森不等式

$$\text{lb}(1 + \rho N_r) \leq C \leq \min(N_t, N_r) \text{lb} \left(1 + \frac{\rho \max(N_t, N_r)}{N_t} \right) \cdot \rho$$

代表 MIMO 端到端的 SNR, N_t 为发射天线端口数, N_r 为接收天线端口数, 符号 H 为 $N_r \times N_t$ MIMO 信道矩阵。容量是当前 SNR 时信道状态下能达到的最大值, 但考虑 MMBS 数据传输所使用空时频资源以及 AMC 技术, 计算实际情况的物理共享信道理论峰值才能更加准确地反映 MMBS 性能极限。计算理论峰值的主要思路为, 根据 MMBS 所使用的帧结构, 确定用于数据传输的空时频资源所携带的最大 bit 数。根据 MMBS 不同的参数配置和评估场景, 最终确定的 MMBS 理论峰值有所不同。以单用户下行场景为例, 对 5G 通信物理层相应的开销进行假设, 表 1 给出了 N78 频段、100 MHz 带宽、20 ms 内一个可选帧结构所对应的下行有用的资源单元数 (RE) 和开销所需 RE 数的一个假设示例。其中, 可选帧结构为 5 ms 内存在 6 个全下行时隙、2 个特殊时隙、2 个全上行时隙。特殊时隙配比为 5:1:1。然后通过得出最终的有效下行 RE 数计算下行传输所能承载的最大物理层数据 bit 数。

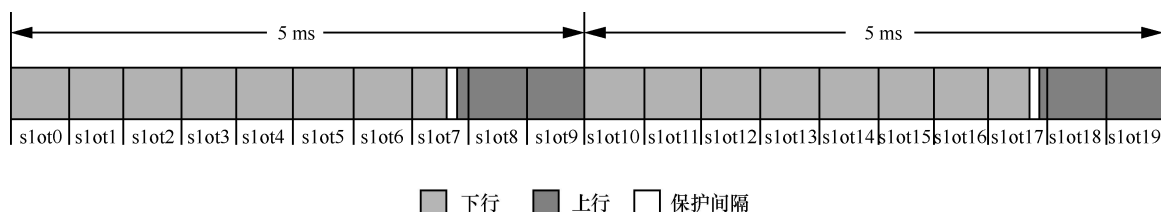


图 1 2.6 GHz 频段帧结构

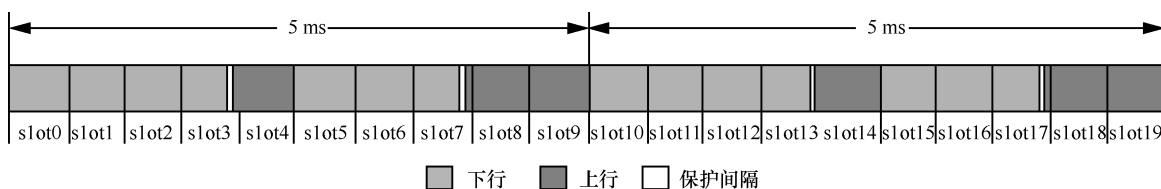


图 2 3.5 GHz 频段帧结构



表 1 频段 N78 可选帧结构中下行每 20 ms 所使用的具体 RE 数

资源名称	RE 数	计算方法
DLRE	1 362 816	$[(273 \text{ RB} \times 12 \text{ RE/symbol} \times 14 \text{ symbol})/\text{slot}] \times 4 \times 6 \text{ slot} + [(273 \text{ RB} \times 12 \text{ RE/symbol} \times 10 \text{ symbol})/\text{slot}] \times 4 \times 2 \text{ slot}$
SSB RE	12 480	$20 \text{ RB} \times 12 \text{ RE/Symbol} \times (13 \text{ symbol}[\text{slot0}] + 13 \text{ symbol}[\text{slot10}] + 13 \text{ symbol}[\text{slot20}] + 13 \text{ symbol}[\text{slot30}])$
PDCCHRE	104 832	$(4 \times 8 \text{ slot} \times 273 \text{ RB}) \times 12 \text{ RE/symbol} \times 1 \text{ symbol}$
PDSCH DMRS RE	104 832	$(4 \times 8 \text{ slot} \times 273 \text{ RB}) \times 12 \text{ RE/RB} \times 1 \text{ symbol}$
CSI-RSRE	1 092	$(20 \text{ ms}/40 \text{ ms period} \times 273 \text{ RB}) \times 8 \text{ RE/RB}$
TRSRE	26 208	$273 \text{ RB} \times (2 \text{ symbol} \times 12 \text{ RE})/\text{RB} \times 4 \text{ slot} \times 20 \text{ ms}/20 \text{ ms period}$
PDSCH RE	1 113 372	DL RE-SSB RE-PDCCH RE-DMRS RE-CSIRS RE-TRS RE

注：资源块（RB），周期（period），符号（symbol）

根据 3GPP 协议^[3]，可以分别确定 SSB、CSI-RS、TRS、下行数据控制信道（PDCCH）等各种开销对应的资源映射图样，MMBS 可根据需求参照协议配置合理的数据开销用来维持通信所必须的物理层信令流程。根据 20 ms 内有效的下行 RE 数、物理层下行最高阶的调制方式、信道满秩时的最大空间数据流数以及 LDPC 信道编码所能对应的最大码率，MMBS 的下行峰值速率可表示为：

$$R = 50 \times N_{\text{RE}} \times \lg M \times R_i \times C_R \quad (2)$$

其中， N_{RE} 为 20 ms 内下行有效资源 RE 数， M 为调制阶数， R_i 为空间数据流数， C_R 为最大信道编码效率。假设 MMBS 最大支持 256QAM 调制，单用户 PDSCH 最大支持 4 层，最大码率为 $948/1024=0.9258$ ，根据式（2）计算，最终的上述示例的物理层峰值

速率为 1 649.2 Mbit/s。本示例给出了下行峰值速率的评估方法，其他参考信号、同步信号、广播信号等配置在不同的帧结构时的上下行峰值速率可以根据实际开销和传输能力情况，用同样的方法进行计算。

2.3 衰落信道下的仿真评估

峰值速率决定了 MMBS 单用户时能实现的理论速率上限，而在衰落信道下的性能则能够更加全面地反映 MMBS 在不同无线传播环境下的性能。评估 MMBS 在无线衰落信道环境下性能的主要方法为搭建相应的 5G 链路级仿真平台。其中，下行平台能够模拟 MMBS 从发射信号，经过无线信道，再到单 UE 接收的全部过程。通过建立不同的无线信道模型，并通过统计物理层 PDSCH 的吞吐量来实现不同衰落信道下的性能评估。图 3

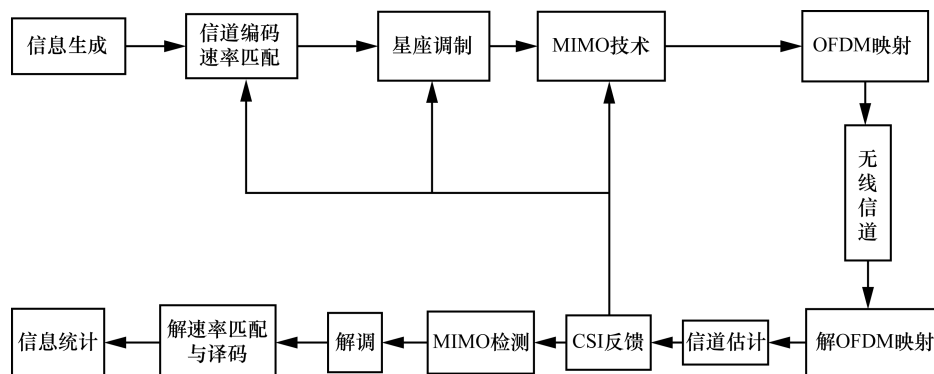


图 3 5G 通信链路级仿真平台下行传输功能框架

为 5G 链路级仿真平台的下行传输功能框架。

整体下行评估过程主要分为以下几个步骤：首先，各个厂商之间需要统一无线信道传输环境，重点为引起信道衰落的小尺度过程。依据 3GPP 协议中基于几何的簇时延线信道模型^[9]，先规定模型场景的参数选定、模型实现中引起随机性变量的设置以及 UE 天线设置。各厂商则依据自身 MMBS 天线阵子的配置，天线阵子与通道的映射来最终确定无线信道模型。确保在相同 MMBS 天线配置下，各厂商模型在同一个发射接收链路上有相同的时域响应。不同的 MMBS 天线配置下，各厂商模型在同一个发射接收链路上应具有相同的多普勒频移特性，相同的交叉极化比特特性，正确的功率时延分布（PDP）特性和空间相关特性。之后，约定各厂商链路级平台 UE 接收的相关算法，信道估计采用基于最小二乘（LS）算法的差值信道估计，MIMO 检测采用最小均方误差（MMSE）算法，LDPC 译码过程采用基于对数的置信传播（log-BP）算法。该过程为了确保不同厂商的链路级平台的接收端具备相同的信号处理能力。最后，各厂商需要依据各自 MMBS 中 5G 技术的实现方法完成整个 5G 单 UE 的链路级仿真平台，关键技术的实现需满足 3GPP 协议的规定^[2]。通过在不同信噪比（SNR）下统计 MMBS 的吞吐量，将各厂商的仿真平均值作为最终的评估参考值，最终的评估标准值根据参考值乘以评估因子来确定。其中，评估因子是考虑了无线系统的硬件限制而对结果进行的折中，限制主要为射频端的非理性特性。评估标准值矩阵可表示为：

$$R_s = \alpha \times R_{\text{ref}} \quad (3)$$

其中， $R_s \in C^{\text{se} \times \text{sn}}$ ，集合 $\text{se} \in \{1, \dots, 5\}$ 代表不同评估场景，集合 $\text{sn} \in \{0, 4, 8, 12, \dots, 32\}$ 代表不同的 SNR。 $R_{\text{ref}} \in C^{\text{se} \times \text{sn}}$ 表示不同评估场景 SNR 下的不同评估参考矩阵，系数 α 为评估因子，考虑实际系统硬件实现的影响以及各个厂商 MMBS 处理算法性能

的不一致性，为了统一指标， α 取值为 0.7。图 4 是 N41 频段，64 通道 MMBS 在 CDL-C 和 CDL-D 模型下^[9]，3 km/h、30 km/h、120 km/h 速度时的评估标准值随不同 SNR 值的变化图。不同配置和帧结构下的仿真结果需要进行开销调整和速率折算，上行 PUSCH 速率评估则需要搭建上行链路级仿真平台进行仿真，评估标准可与下行相同。

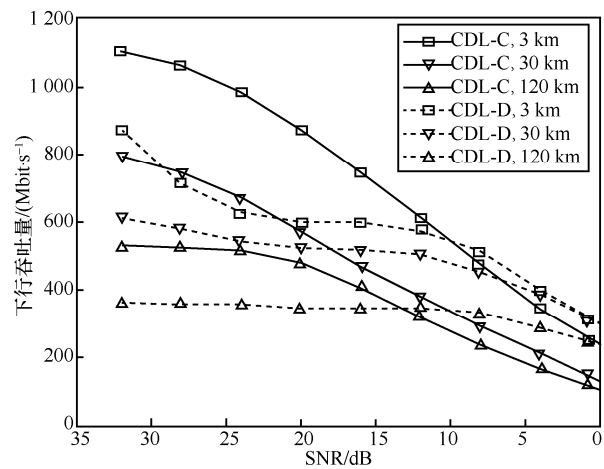


图4 衰落信道下不同 SNR 时 MMBS 的性能参考指标曲线

3 业界常用测试方法简介

当前 5G MMBS 的商用基站都是基于 FR1 频段，其中涉及毫米波技术，通过对 4G 测试技术进行适当演进，针对 FR1 频段的 5G MMBS 产品，目前业界主要有 4 种常用的测试方法，分别为：纯传导的两步（conductive two-stage, CTS）测试方法^[13]、基于无线传导的两步（radiated two-stage, RTS）测试方法^[13]、基于多探头暗室（multi-probe anechoic chamber, MPAC）的多输入多输出空口（MIMO over the air, OTA）测试方法^[14-16]以及基于混响室（reverberation chamber, RC）的 MIMOOTA 测试方法^[17]。

CTS 法采用 AAU 经过信道模拟器直接与 UE 射频通道相连的方式。由于在测试过程中忽略了 AAU 的天线方向图，因此，为了更好地模拟 MMBS 空间散射体间的场特性，两步法需要首先



测出 AAU 每个阵子的天线方向图并代入信道模型中, 最终通过信道模拟器实现无线信道环境。纯传导的两步测试方法的优势在于测试成本主要来源于信道模拟器和导线, 对测试场地的大小没有太大需求。且该方法的技术很成熟, 主要依赖于 AAU 各个阵子天线方向图的获取以及信道模拟器的空间信道建模, 天线方向图可根据动态赋形紧缩场的方法进行测量^[18], 空间信道建模则需要结合 MMBS 的天线方向图模拟 3D 的空间信道环境。该方法的缺点主要是需要连接的导线较多, 测试各阵子的天线方向图的过程相对烦琐, 且对于频分双工 (FDD) 系统而言, 在对上下行性能测试过程中, 由于 AAU 和 UE 的射频通道设计, 在屏蔽天线后的射频链路上会引起相邻频带间的自干扰问题。对于 RTS 法, AAU 和信道模拟器之间基于无线传导的方法, 其余部分则和 CTS 方法基本保持一致。这种方法的优势在于可以省略从 AAU 通道到信道模拟器烦琐的导线连接过程, 不易出错。缺点在于 AAU 到信道模拟器的大规模方阵的等效方法对于 RTS 方法自身而言极具挑战, 很难彻底抑制掉无线链路间的干扰问题, 相比 CTS 方法的性能可能会有所下降。MPAC 的方案主要是将 AAU 置于由吸波材料构成的暗室中, 并通过多探头进行信号的接收, 采用信道模拟器实现无线信道的模拟。该方法的主要优势在于: 在测试 AAU 的过程当中无须预先测试各个通道的天线方向图, 测试过程中就可将 AAU 的天线方向图考虑在内, 并且技术同样成熟。然而, 随着 5G Sub 6 GHz MMBS 的 AAU 的尺寸逐渐变大, 模拟远场特性带来的静区需求也有了新的变化, 这对暗室的尺寸以及测试所需面积都会有很大幅度上的增加, 相比 CTS 和 RTS 而言成本会有很大的提升。其次, 需要考虑的是确保 AAU 到散射体之间的空间特性与实际测试需要的 3D 空间信道模型保持一致, 这需要合理地选择暗室墙上的探头以及在各个探头上设置合理的权重来实现空间相关

性的一致。虽然该研究领域已存在较多的研究成果^[19], 但整体而言, MMBS 侧的 MIMO OTA 方法在建造成本和 3D 空间一致性的算法上都存在着很大的挑战。最后对于基于 RC 的方案而言, 与前 3 种方案的主要不同在于 RC 本身会进行无线信道的模拟, 这将很大程度上降低信道模拟器带来的成本, 不过建立 RC 同样需要一定的空间和建造成本, 而且为了精确模拟无线信道环境, RC 的结构设计方法技术含量很高^[17]。目前基于 RC 的方案对于无线信道的建模控制能力要远弱于前 3 种方法。

4 基于 3D 空间信道建模的分步传导测试方法

考虑 MMBS 现阶段的物理天线通道数相对有限, 实现传导测试还不算困难。在测试基于 TDD 的 MMBS 的上行、下行性能时, 也无需考虑 BS 和 UE 侧发射链路对接收链路的自干扰问题。此外, 实际测试需求存在跨地域性, 需要对测试系统进行灵活安装和拆卸, 且测试场地大都存在尺寸上的限制。因此, 可以使用分步传导法对 MMBS 进行测试。不过考虑实际 MMBS 的特性, 还需要重点考虑两个问题, 并对该方法进行改良, 才能实现对 MMBS 性能的准确测试: 其一, 如何得到信道建模所需的 MMBS 天线方向图; 其二, 如何进行 3D 的空间信道模拟。对于如何实现通过分步法实现 3D 空间信道建模, 会在后续具体描述该过程。这里首先对 5G MMBS 测试系统进行简介, 系统包括待测 MMBS、测试 UE、调相网络、信道模拟器以及导线若干。这里给出 3 种设备组合方法来实现传导分步测试方法, 所需相应设备列表见表 2。

该测试方法可以对 MMBS 中的 5G 关键技术进行性能测试, 测试系统具备上下行双向测试能力, 所支持的测试内容可由表 3 给出。依据本节介绍的测试系统, 目前已对多家厂商的 MMBS 进行了相关性能指标的测试, 测试重点在于单用户

表 2 测试系统不同设备组合搭配所需设备列表

名称	设备种类
组合 1	64 通道待测 MMBS, 4 通道测试 UE, Keysight Propsim F64 2 台
组合 2	64 通道待测 MMBS, 4 通道测试 UE, Topyong 调相网络 1 台, Spirentvertex 2 台
组合 3	64 通道待测 MMBS, 4 通道测试 UE, Topyong 调相网络 1 台, Keysight Propsim F64 1 台

表 3 测试系统测试能力总述

测试用例	指标	能力
帧结构与导频设计测试	调度时隙、CSI-RS 资源、SRS 资源、物理层吞吐量	支持
自适应调制编码测试	MCS、CQI、译码迭代次数、物理层吞吐量	支持
MIMO 技术测试	CSI-RS 资源、SRS 资源、RI、PMI、物理层吞吐量	支持
HARQ 技术测试	CRC 校验情况、物理层吞吐量、HARQ 进程、L2 层信令	支持
BWP	SSB 中心频点、UE 能力上报、RRC 信令、物理层吞吐量	支持
单用户峰值测试	物理层吞吐量	支持
多用户峰值测试	物理层吞吐量	支持, 需额外拓展 UE 数量
波束跟踪测试	SSBRI、CRI、物理层吞吐量	支持
单用户衰落信道测试	物理层吞吐量	支持
多用户衰落信道测试	物理层吞吐量	支持, 需额外拓展 UE 数量

下行峰值性能测试和衰落信道下的下行性能测试。

4.1 基于几何的 3D 空间信道建模

基于几何的 3D 空间信道建模是整个测试方法的基础, 将建立好的信道模型置入信道模拟器中即可实现 MMBS 到 UE 之间的信道模拟, 进而实现最终的测试。基于几何的 3D 信道建模主要包括每个发射接收链路、每个簇、每个径上关于天线增益、天线极化、空间相关性、多普勒频移的模拟以及各个簇之间的功率时延分布 (PDP) 模拟。

关于天线增益, 考虑主要测试 MMBS 的性能, UE 天线方向图可以假设为全向天线, 0° 和 90° 的交叉极化。对于 MMBS, 可通过紧缩场法测试出每个阵子或通道所对应的天线方向图^[18], 再将方向图代入各个通道对应的 3D 空间信道模型中, 通过传导的方式即可实现 MMBS 的测试过程。或者通过测试出 64 通道所有阵子的天线方向图并以其

作为目标, 建模各个阵子的天线方向图来对测试出的整体方向图进行拟合, 将拟合好的方向图代入每个阵子的 3D 模型中, 最终实现 MMBS 天线增益的模拟。

每个链路上各簇各径的天线极化、空间相关性、多普勒频移以及各簇之间 PDP 的模拟可以参考协议中的簇时延线模型 (CDL) 进行模拟^[9], 考虑到 NLOS 情况下, 信道的时域响应可表示为:

$$H_{u,s}^{\text{NLOS}}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{P_n}{M}} \begin{bmatrix} F_{\text{rx},u,\theta}(\theta_{n,m}, \text{ZOA}, \varphi_{\text{LOS}, \text{AOA}}) \\ F_{\text{rx},u,\varphi}(\theta_{n,m}, \text{ZOA}, \varphi_{\text{LOS}, \text{AOA}}) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{k_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\varphi}) \\ \sqrt{k_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\varphi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\varphi\varphi}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{\text{tx},u,\theta}(\theta_{n,m}, \text{ZOA}, \varphi_{n,m}, \text{AOA}) \\ F_{\text{tx},u,\varphi}(\theta_{n,m}, \text{ZOA}, \varphi_{n,m}, \text{AOA}) \end{bmatrix} \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{tx},n,m}^T \bar{d}_{\text{tx},u}}{\lambda_0}\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{tx},n,m}^T \bar{d}_{\text{tx},u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{tx},n,m}^T \bar{v}}{\lambda_0} t\right) \quad (4)$$



其中, N 为簇的总个数, M 为子径个数, P_n 为个簇的功率, $k_{n,m}$ 为各子径的交叉极化比系数, $\Phi_{n,m}^{\theta\theta}, \Phi_{n,m}^{\theta\varphi}, \Phi_{n,m}^{\varphi\theta}, \Phi_{n,m}^{\varphi\varphi}$ 为不同极化方向上各子径上的初始随机相位。 λ_0 代表电磁波波长。 $F_{\text{rx},u,\theta}$ 和 $F_{\text{rx},u,\varphi}$ 分别为 UE 天线在垂直和水平维 NLOS 径来波方向上的接收天线方向增幅。 $F_{\text{tx},u,\theta}$ 和 $F_{\text{tx},u,\varphi}$ 分别为 MMBS 每个发射链路天线在垂直和水平维 NLOS 径离开方向上的发射天线方向增幅。 $\theta_{n,m}$ 和 $\varphi_{n,m}$ 分别表示每个径在水平和垂直维上离开 (AOD, ZOD) 和到来 (AOA, ZOA) 的角度。 $\hat{r}_{\text{rx},n,m}$ 为 NLOS 径的来波方向向量, $\bar{d}_{\text{rx},u}$ 为 UE 天线阵子到参考零点的坐标向量。 $\hat{r}_{\text{tx},n,m}$ 为 NLOS 径的波离开方向向量, $\bar{d}_{\text{tx},u}$ 为 MMBS 天线阵子到参考零点的坐标向量。 $\bar{v}$ 代表速度向量。对于存在 LOS 径的模型而言, 其 LOS 径的时域响应可表示为:

$$H_{u,s}^{\text{LOS}}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{rx},u,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \\ F_{\text{rx},u,\varphi}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{\text{tx},u,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \\ F_{\text{tx},u,\varphi}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \end{bmatrix} \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{d_{3D}}{\lambda_0}\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{rx},\text{LOS}}^T \bar{d}_{\text{rx},u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{tx},\text{LOS}}^T \bar{d}_{\text{tx},u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{\text{rx},\text{LOS}}^T \bar{v}}{\lambda_0} t\right) \quad (5)$$

其中, θ_{LOS} 和 φ_{LOS} 分别表示 LOS 径在水平和垂直维上离开 (AOD, ZOD) 和到来 (AOA, ZOA) 的角度。 $\hat{r}_{\text{tx},\text{LOS}}$ 为 LOS 径的离开方向向量, $\hat{r}_{\text{rx},\text{LOS}}$ 为 LOS 径的来波方向向量。 d_{3D} 为 LOS 径的距离系数, 用来确定 LOS 经初始相位。根据莱斯因子 K , 带 LOS 径的完整模型时域冲击响应可表示为:

$$H_{u,s}(\tau, t) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} H_{u,s}^{\text{NLOS}}(t) \delta(\tau - \tau_n) + \sqrt{\frac{K}{K+1}} H_{u,s}^{\text{LOS}}(t) \delta(\tau - \tau_1) \quad (6)$$

4.2 峰值测试方法

基于传导的峰值测试方法可以描述为, 在

MMBS 物理通道和 UE 通道之间, 通过修改幅度和相位建立一个可以正交地分辨 MIMO 多流复用特性的直通不变信道, 将该信道的 I/Q 复数数据放入信道模拟器或调相网络中, 最终实现 MMBS 基带峰值的测试。该方法可以测试基带上的性能, 但无法体现 MMBS 阵子天线增益的影响。本文提出的分步测试方法可以解决这个问题, 通过第 4.1 节给出的方法确定模型中 MMBS 的天线增益, 然后模拟 MMBS 天线阵子到散射体的空间传播过程, 选择空间间距适中且增益较强的 2 个波束方向作为模拟方向。最后根据每个方向上的两个交叉极化波束特性以及 UE 天线阵子间极化特性的影响, 可生成一个考虑 MMBS 天线增益的 4 流 MIMO 信道 H_{peak} 。这里给出峰值测试的 2 种连线图, 图 5 是基于单台调相网络的测试方法, 可对 64 通道的 MMBS 进行峰值测试。图 6 是基于 2 台信道模拟器的测试方法, 每台信道模拟器输出的 4 路需要分别做 2 合 1 操作来实现 64×4 的信道模拟, 信道模拟器使用能够支持 32×4 的 Keysight PropSim F64 仪表。两种连接方式加仪表组合均可实现峰值的测试, 如果单从峰值测试这一项进行考虑, 第一种方式的测试成本低, 操作简单, 测试结果稳定。但如果需要用第二种连线方式进行衰落信道性能的测试, 则可以采用第二种方式一起完成峰值和衰落信道性能的两项测试, 无须更换设备。实际测试过程中, 将第 2.2 节中介绍的峰值计算结果的 90% 作为实际测试指标要求。

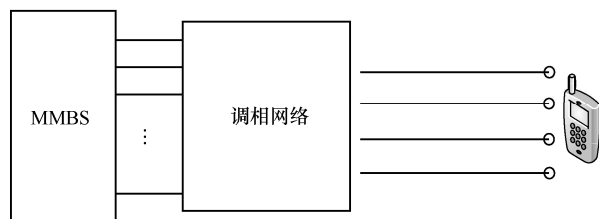


图 5 单用户峰值测试连接方式 1

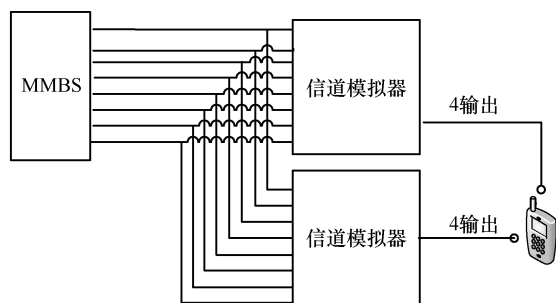


图6 单用户峰值测试连接方式2

4.3 衰落信道测试方法

将第4.1节中基于3D空间信道模型的整体时域信道数据 H_{CDL} ，通过适当的信道特征提取和信道拆分的方式放入两台级联的信道模拟器中，根据图6的连线方式，并在信道模拟器中同步修改大尺度衰落值和SNR值，即可实现所需衰落信道下的测试。针对MMBS到UE无线信道的特征，为了节约由信道模拟器带来的成本，给出另一种基于调相网络的信道降维测试方法，即将MMBS到散射体之间的慢变空间信道 H_{D} 放入调相网络中，将散射体到UE的快变空间信道 H_{A} 放入模拟信道器中，实现了MMBS 64物理通道到16通道的信道降维。最终总的信道矩阵 $\hat{H}_{\text{CDL}}$ 可以表示为：

$$\hat{H}'_{\text{CDL}} = H_{\text{D}} * H_{\text{A}} \quad (7)$$

其中，*符号表示卷积运算。并要求 H_{CDL} 和 $\hat{H}'_{\text{CDL}}$ 在每个收发链路上应有相同的多普勒频移特性、PDP特性、交叉极化特性。考虑调相网络处只有16路输出，这种方法会牺牲一些簇和径带来的角度拓展的影响，两种方案具备相近的空间相关性。图7中信道模拟器使用Spirent Vertex仪表，图8中的信道模拟器使用Keysight Prosim F64仪表。

基于2台信道模拟器的测试方法的优势在于：由于端口足够多，可以很大程度上模拟5G大规模MIMO技术下各场景无线信道环境，实现精准信道模型还原。主要挑战在于实现两台仪表间共同模拟一个信道所带来的一致性问题，如实现精准同步、相同的数值归一化等。而且2台多端口（32入4出，组合1）信道模拟器价格十分昂贵。基于调相加信道模拟的方法的主要优势在于可以很大程度上节约一部分多端口信道模拟器所产生的成本，信道模拟器的部分可以使用较少端口的信道模拟器或信道模拟器组合

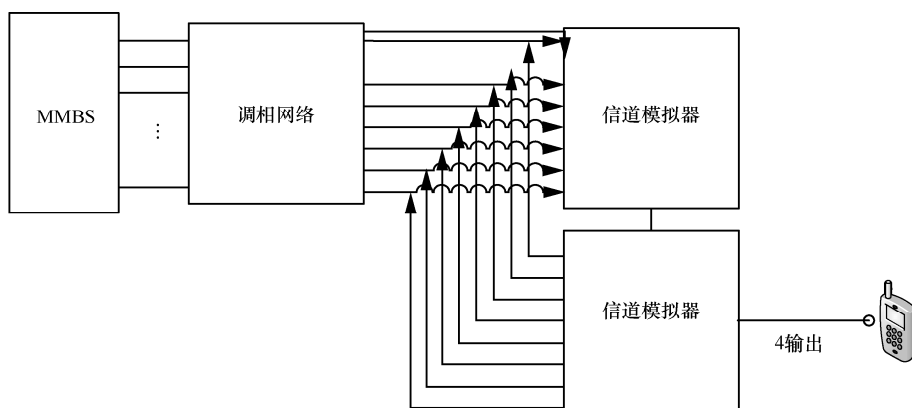


图7 基于信道模拟器的衰落信道传导测试设备连接

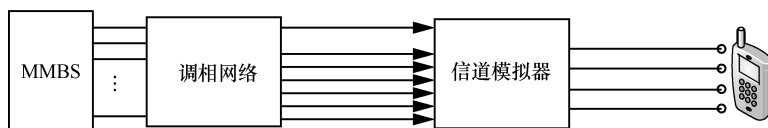


图8 基于调相加信道模拟器的衰落信道传导测试设备连接



(16入4出,组合2、组合3)来实现,且无需额外的合路射频器件。主要挑战在于由于降维后的端口数减少,更难完整模拟无线信道环境,在非视距(NLOS)且各个簇能量主次不明显的情况下会有少许的信道信息损失。经容量仿真和实际测试,两种测试方法对同一测试环境的测试偏差在10%以内。实际测试结果会根据不同MMBS的参数配置以及无线信道环境的变化展现出不同的特性。以下给出一个典型的测试例,综合当前已测的多家MMBS的常用参数,在工作N41频段,采用协议规定的CDL-C模型下,拥有3 km/h移动速度的UE在32 dB的SNR时,实测速率范围在1 150~1 660 Mbit/s,在0 dB的SNR时,实测速率范围在230~320 Mbit/s。

5 结束语

在5G全球商用化的大背景下,本文通过分析5G MMBS中的关键技术给出了性能评估的主要方法,其中包括理论峰值速率的计算以及衰落信道下的速率评估。针对5G MMBS的实际测试,通过分析当前主流的测试方法,本文给出了一套基于3D空间信道建模的分步传导测试方案,其中包括峰值测试方法和衰落信道下的测试方法。两种测试方法可以基于级联信道模拟器或者基于调相网络级联信道模拟器进行测试。上述方案可以对现有的商用5G MMBS进行5G技术的端到端性能测试。对于大规模天线技术而言,多用户下的性能更能体现其优势。未来的主要研究方向为多用户的5G MMBS性能测试方法和大规模天线多用户无线信道建模技术。

参考文献:

- [1] MEHLFÜHRER C, WRULICH M, IKUNO J C, et al. Simulating the long term evolution physical layer[C]//Proceedings of IEEE 17th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1471-1478.
- [2] 3GPP. Physical channels and modulation: TS38.211 v15.2.0 [S]. 2018.
- [3] 3GPP. Physical layer procedures for control: TS38.213 v15.2.0[S]. 2018.
- [4] 3GPP. Physical layer procedures for data: TS38.214 v15.2.0 [S]. 2018.
- [5] 童辉. 5G新空口设计: 如何从LTE拓展与创新以及对未来技术发展趋势的展望[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 1-14.
TONG H. 5G new radio design: why/how to extend/innovate from LTE, and future trends[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 1-14.
- [6] 3GPP. Radio resource control(RRC) protocol specification: TS38.331 v15.6.0 [S]. 2019.
- [7] 刘晓峰, 孙韶辉, 杜忠达, 等. 5G无线系统设计与国际标准[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
LIU X F, SUN S H, DU Z D, et al. 5G wireless system design and international standard[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2019.
- [8] 3GPP. Multiplexing and channel coding: TS38.212 v15.2.0 [S]. 2018.
- [9] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR38.901 v15.0.0 [R]. 2018.
- [10] ITU. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020: M.2412-0[R]. 2017.
- [11] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
- [12] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [13] 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.
- [14] FAN W, SUN F, NIELSEN J O, et al. Probe selection in multi-probe OTA setups[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(13): 1-13.
- [15] REED D, RODRIGUEZ-HERRERA A, BORSATO R. Measuring massive MIMO array systems using over the air techniques[C]// Proceedings of IEEE 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 3663-3667.
- [16] ZHANG X, QIAO S, PENG M, et al. Probe selection for over-the-air test in 5G base stations with massive multiple-input multiple-output[J]. China Communications, 2019, 16(7): 1-12.
- [17] KILDAL P S, CHEN X, ORLENIUS C, et al. Characterization of reverberation chambers for OTA measurements of wireless devices: physical formulations of channel matrix and new uncertainty formula[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(8): 3875-3891.
- [18] 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.
REN Y X, ZHANG X, WEI G M, et al. Research and applica-

- tions on dynamic beamforming compact range[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(8): 17-21
- [19] FAN W, CARTON I, KYOSTI P, et al. A step toward 5G in 2020: low-cost OTA performance evaluation of massive MIMO base stations[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016, 59(1): 38-47.

[作者简介]



刘晓龙 (1988-), 男, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师, 主要研究方向为大规模天线技术、全双工无线技术、自适应调制编码技术以及无线产品的性能测试与标准化。



魏贵明 (1970-), 男, 中国信息通信研究院技术与标准研究所无线与移动研究部主任, 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技术与标准研究所主任工程师, 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。



任宇鑫 (1987-), 男, 中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师, 主要研究方向为射频 OTA 测试系统和测试方法。



江甲沫 (1985-), 男, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师, 主要研究方向为 4G/5G/B5G 通信系统的标准化、关键技术研究 and 仿真评估。