

Amkor 5G RF 产品测试服务

Vineet Pancholi, 高级总监, 测试技术, WW 测试服务, [Amkor Technology, Inc.](#)

引言

实施 5G 是快速发展的无线电频率 (RF) 标准 [1]。过去四到六个季度, 人们对在市场中发表的刊物以及推出的产品越来越重视。其中一些比较受欢迎的 RF 生态系统应用包括手机、汽车、物联网 (IoT) 和定位服务, 等等。WiFi 和手机服务都是数据密集型的, 而 IoT, 在有些情况下, 可能只需要有限的数

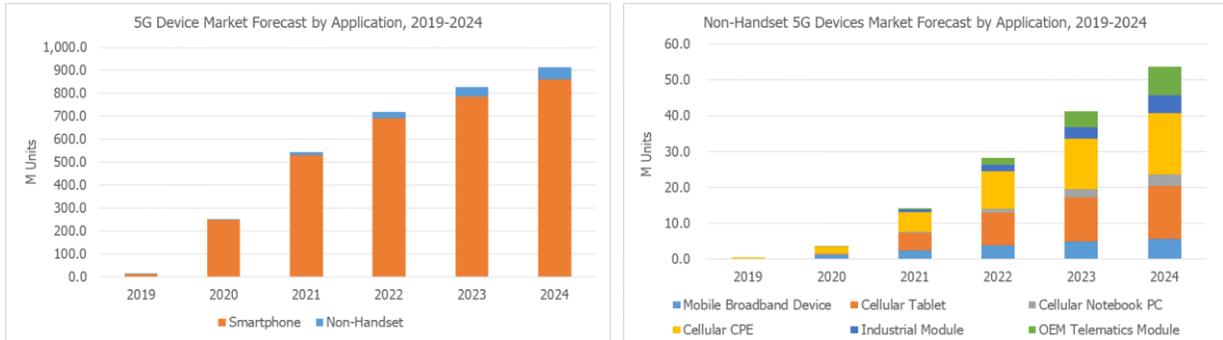


图 1: 5G 产品预计会有强劲成长。资料来源: IoT Business [News](#)。

根据 4G 移动网络的设备数量指标, 对于达成图 1 中的设备数量和采用 5G 标准定义的总体可获取市场规模 (TAM) 的置信水平似乎很高。不少类似的图表显示, 世界各地所开发的符合 5G 规范的产品数量也呈现出与之相当的规模。更大的 5G RF 设备数量将有望大幅提高测试的设备数量。基础设施的开发与部署要在引进此类用户设备之前完成。如图 2 中所示, 典型的手机应用包括, 手机信号基站, 每个基站要在覆盖范围内支持多部用户手机。

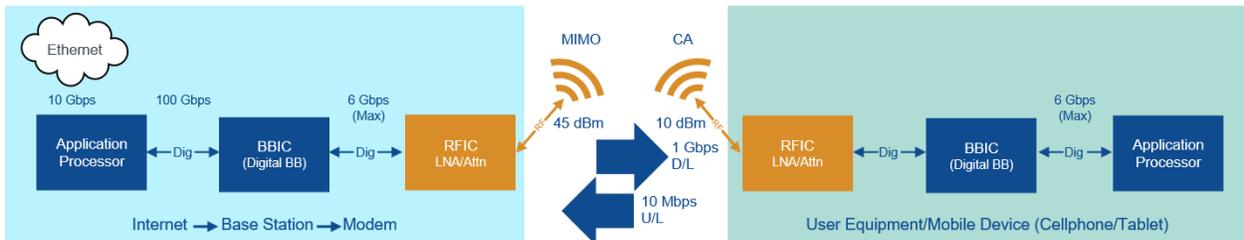


图 2: 双向通信方块图的关键因素包括应用处理器 (AP)、基带集成电路 (IC) 和无线电频率集成电路 (RFIC)。

由于基站所覆盖的范围要支持多台用户设备, RF 功率要求相对于用户设备来说变得更高。基站采用插入式电源, 而用户设备的设计具有较高能源效率, 因为它们是移动的, 使用电池进行供电。鉴于一部普通手机所下载的数据量级是其上传数据量级的数倍, 接收通道的数量通常多于传输通道。协议层所使用的多输入多输出 (MIMO) 和载波聚合 (CA) 等概念 [1] 将提高有效带宽。接收通道将具有多样性 [1] 来改进空间性能。虽然本文不直接关注此类概念, 但它们的产品架构和设计会对测试要求和测试方法产生影响。在住宅/办公室环境中, 基于 WiFi 技术的应用非常普遍。它们的最大 RF 功率有限, 但动态范围并不, 而且它们的带宽一般相对于手机来说更高一些。

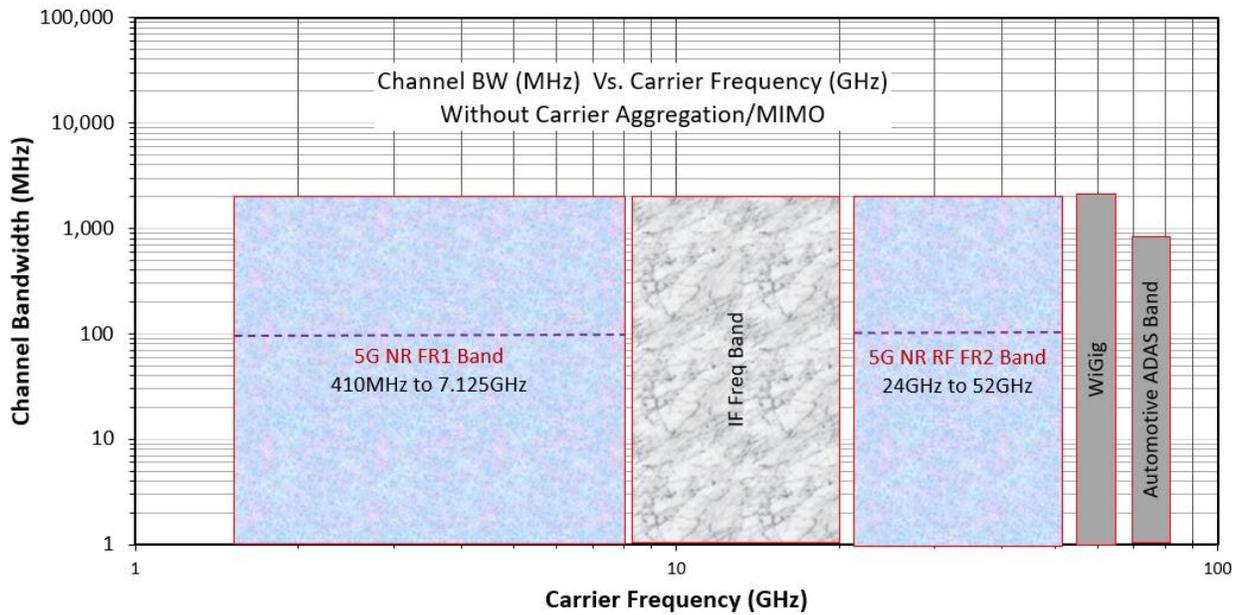


图 3: 基于 3GPP 规范定义 5G 载波频率[1]。

最近推出的 5G 3GPP 标准[1]确定了两个独立载波频率范围内的载波频率。如图 3 所示，FR1 载波频率介于 410 MHz 到 7.125 GHz 之间，而 FR2 载波频率则介于 24 GHz 到 52 GHz 之间。所允许的带宽超过 100 MHz，最高达到 2 GHz。子载波间隔被压缩，因此需要更严格限制相位噪声和增益平稳度。

5G New Radio (NR) 调制方案

5G NR 信号调制方案有两种——正交频分复用 (CP-OFDM) 和离散傅里叶变换扩展正交频分复用 (DFT-S-OFDM) [1]。

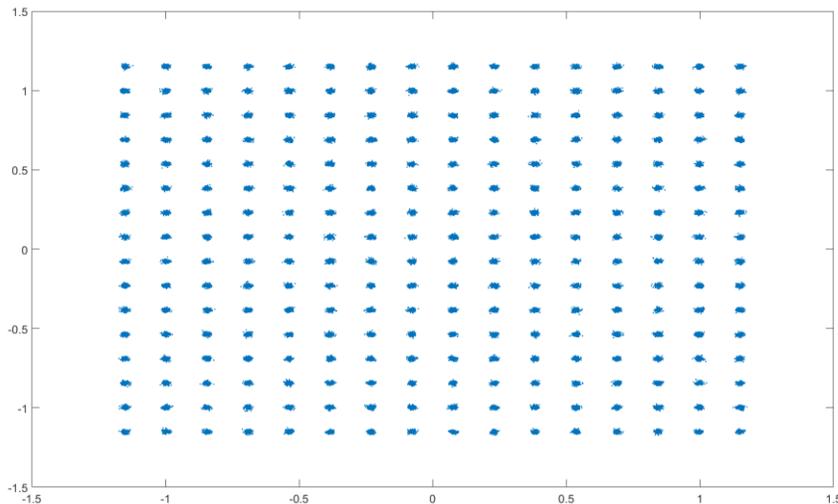


图 4: Advantest V93K 上捕捉到的正交调幅 (256-QAM) 5G NR 星座图。

适用于下行链路 (D/L) 的 CP-OFDM，具有正交相移键控 (QPSK)、16-QAM、64-QAM 和 256-QAM。它的频谱效率高，兼容 MIMO 和 4G LTE 定义。DFT-S-OFDM 适用于上行链路 (U/L)，具有 $\pi/2$ -二进制移相键控法 (BPSK)、16-QAM、64-QAM 和 256-QAM。相对于 CP-OFDM，它的实施更加复杂，资源分配较不灵活，而

且不与 MIMO 搭配使用。5G NR 的五种子载波间隔均介于 15 kHz 到 240 kHz 之间。图 4 显示的是 256-QAM 图表。

5G RF 产品和 RFIC

当代直接和外差式转换器架构 [2] 都具有数字基带 I/O。数字基带将数据馈入到数字-模拟转换器 (DAC)，从而产生模拟同相和正交 (I/Q) 波形。这些波形，在与本机振荡器 (LO) 信号混合时，会向上转换数据，以产生传输至接收器 (Rx) 的调制中频 (IF) 或 RF 信号。信号在同轴屏蔽线缆或空中传输。在传输前，尤其当通过空中传输，信号需要被放大。此外，接收器可能要在为向下转换提供信号前放大接收到的信号。向下转换信号被馈入到模拟-数字转换器 (ADC)，从而将信号转换成数字基带，供应用处理器进行处理。图 5 即显示这些步骤。

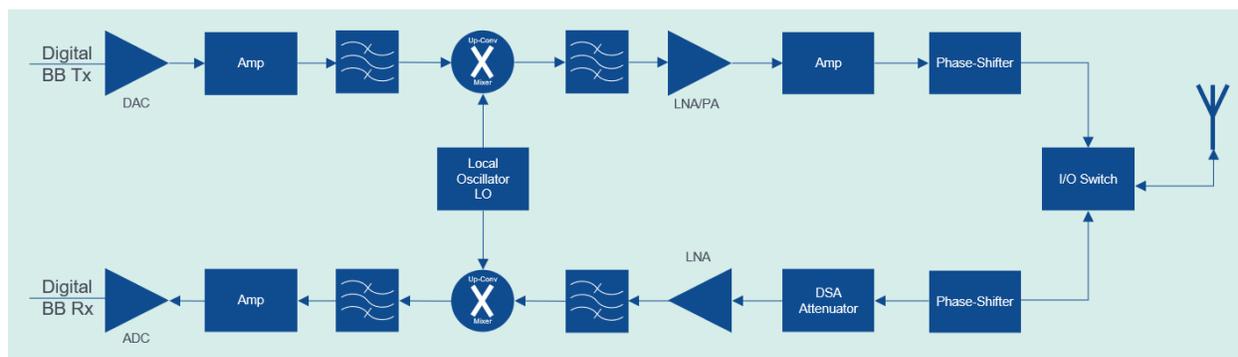


图 5: 简化版发射器 (Tx) 和 Rx RF 链块。

集成器件制造商 (IDM) 客户会对各种 RF 产品使用封装与测试服务。其中包括，但不限于收发器、低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA)、数字步进衰减器 (DSA)，滤波器和混合器等。根据目标应用，RF 输入和输出通道的数量可能各不相同。带宽、相位噪声、互调失真 (IMD)、相位和幅度分辨率/精度以及其他测试要求可能也不一样。

针对生产测试的被测器件 (DUT) 发射器特性规格包括发射功率和 RF 光频放射率 (占用带宽、带外发射、邻道泄漏比 (ACLR) 和 IMD)。针对生产测试的 DUT 接收器特性规格包括，接收灵敏度、最大输入电平、邻道选择性、阻塞、乱真信号响应和 IMD [1]。

采用 5G RF 子系统的自动化测试设备 (ATE) 测试器及工具

Advantest、Teradyne、National Instruments 和 Cohu 最近都对外发布了关于自身成熟的 ATE 产品的升级途径。Amkor 采用 ATE 的 RF 子系统硬件及软件仪器基础设施来对客户工厂中的产品进行测试。

ATE 供应商一般会为客户测试应用开发构建通用型仪器资源超集合配置。在任意波形产生器 (AWG)、数字转换器 (DGT)、LO、滤波器、放大器、音调组合器、发射信号分配器、接收信号切换器的数量，以及它们的宽带宽和动态工作范围之间需要进行权衡，针对每个客户的每种新 5G RF 应用都必须考虑到这一点。因仪器设计而产生的特定应用频率及振幅的相位噪声会直接影响误差矢量幅度 (EVM) 测试。 -110 dBc/Hz 的相位噪声 (偏差 100 kHz 和 -10 dB 或更理想) 在连续波 (CW) 频率的 5G 范围内是可被接受的 (具有代表性的)。在典型的宽带客户产品应用中，有必要对频率和幅度进行切换。切换时间将影响总体测试列表执行时间。切换时间最短的测试器在生产测试中的效率最高。图 6 是 ATE 方块图。

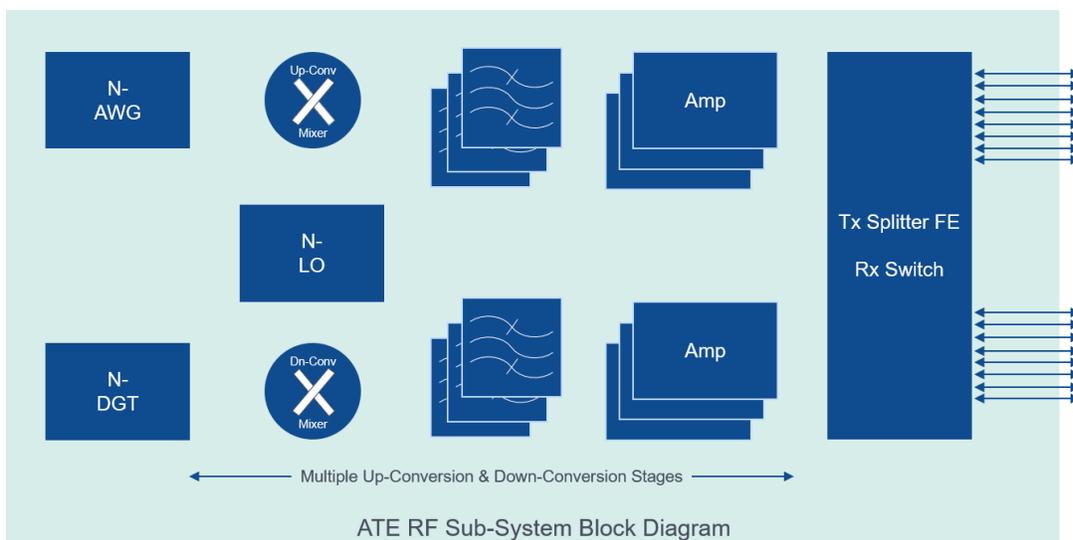


图 6：简化版 ATE 方块图。

自定义工具（探针板和/或搭载基板）的开发势在必行，以便帮助将测试器资源发送到器件引脚或凸块。针对晶圆探针服务，探针板供应商可提供探针技术。而对于高于 50 GHz 的 5G RF 载波频率，其挑战包括阻抗匹配，以及引脚间和站点间信号隔离。搭载基板、插座和插头技术提供商则能够为封装部件提供探针服务。对 5G RF 载波频率来说，其挑战类似于针对探针所描述的挑战。此类频率的插入损耗（S-参数 S21）可接受电平一般不高于 -10 dB，该频率范围的回波损耗（S11）则通常优于 -10 dB。典型应用的引脚间隔离在频率范围内的可接受电平优于 45 dB。

供应商会保证测试头信号传递接口的 RF 性能及精度规格。测试器供应商开发与提供校准系统（硬件和软件），来校正、验证与诊断记录规格内的性能。RF 仪器的精度规格对温度波动较为敏感。在大多数情况下，温度在 $\pm 5^\circ\text{C}$ （或更小）范围以内的变化将触发仪器执行自校准程序。功率、信号（数字、模拟/RF）和时钟要求将校准平面从测试头移动到器件引脚。此路径包括探针板或搭载基板上的迹线。我们能够提供采用去嵌入技术以及回路或定制开发的短路、开路、负载、穿透（SOLT）结构所具有的优点，帮助为被测器件实现所需的 RF 信号精度。开发适用于大部分情形的自定义校准标准需要付出额外的努力，但凭借内部封装设计，方法总是存在。一般来说，黄金回路 DUT 技术足以取得所需的精度。

封装-测试贴装

我们的封装与测试部门紧密合作，以便在生产测试后进行 5G RF 工程开发。其好处在于，可在相同工厂提供完整的封装及测试一站式解决方案。提供封装内天线和封装上天线（AiP/AoP）SiP 的 5G 封装率先由 Amkor 在 2018 年 7 月投入生产，并于 2019 年在新闻稿中对外宣布[3]。

借助于最近在组装与封装技术的发展，RFIC（如 5G 收发器和 RF 前端（RFFE）器件）可能将天线嵌入到封装中。同样，系统级封装（SiP）器件也在 IC 封装中集成了相关元件，如处理器、存储器、RFIC 周边，以及包括功率放大器、低噪声放大器、相控阵和天线结构等在内的离散元件[4]。天线是前端关键元件的一部分，要求针对运作的特定频带进行调试。目前设计的 5G NR FR2 合规性客户产品具有基于特定运作频带调试的性能，具体见 3GPP 规范中的定义[1]。数据密集型应用可能批准在封装内封装多个无线电器件，因此需要根据运作频宽调试的多个电线元件。

对过去或现在的 RF 器件所进行的全部生产测试都和导电性有关。以 DUT 为起点或终点的 RF I/O 都在缆线和屏蔽印刷电路板（PCB）微迹线到测试器的 RF 装置之间以电气方式连接阻抗控制路径。如上所述，所有开发 5G RF 测试解决方案的 ATE 供应商都会采用导电性 RF 同轴互连。为实现对嵌入天线的封装开展大规模生产测试，相关测试法需要能以最低及受控制的信号损耗发射或接收 RF 能量的互连。天线传输理

论[7]要最大限度降低发射器和接收器之间的空间隔离。此种隔离取决于载波频率。RF I/O 通道的数量和多站点测试要求使生产测试变得更复杂。测试选项目前正处于探索阶段，包括：贴片和喇叭天线、波束赋形 IC (BFIC)、嵌入式定向耦合器和波导管等。以上解决方案均不适合大规模生产，而且也无法被扩展以应对天线数量的增加。其重要的原因是测试器接口分选机的物理空间要求。

IDM 一直在构建设计结构，以促成收发器上的回路卓越设计 (DfX)，从而帮助简化并使生产测试设备要求更具经济性。虽然在封装中嵌入天线有助于微型化与整体集成，但它也降低了为全新的 5G NR 载波频率运作频带最终调试应用性能时的灵活性。公司持续与供应商及客户合作，努力克服生产测试的无线 (OTA) 测试挑战。

附加值主张

概括地说，生产测试的运行模式主要分为两种。第一种是客户完全控制测试内容，包括托运指定的 5G RF 测试设备和聘请 Amkor 执行生产测试流程。第二种测试模式由客户针对生产测试提出工程服务请求。在这种情况下，我们的测试开发团队会与客户紧密合作，满足每个客户的自定义测试开发工程 (TDE) 需求。增值型 TDE 服务的示例包括但不限于：

- 选择匹配而且支持 5G 的测试器，
- 选择匹配的探针和/或分选机，
- 设计匹配的 5G 测试工具（探针板、搭载基板）以实现合理的测试器资源分配，尤其针对多站点生产测试，
- 基于客户的功能性测试规格制定生产测试计划、测试模式和测试波形，并且对其进行调试排错，
- 产品认证，
- 产品特性测试程序，
- 成品率优化、低成品率故障分析和产品设计反馈。（故障分析可能采用 X 光或分层等方法，来确定制造与封装缺陷的根本原因。），
- 自定义后端流程，对制成品进行高效处理。

RF 测试开发工程团队在为新旧 RF 技术开发测试解决方案和测试内容方面具有丰富的经验，并且会继续加强自身的专业技能来克服本文中所述的 5G 测试挑战。该团队积极参与为 FR1 和 FR2 RF 频谱的基站和移动 5G RF 产品构建解决方案并提出相关建议。这些测试解决方案采用本文中所述的符合 SGPP 标准的 ATE 硬件和软件测试工具。

内部生产测试流程经过多年的发展，允许对 5G RF 生产测试实施制造设计 (DFM) 规则。收集、分析和保留 5G RF 生产测试的制造测试结果对测试方法、流程和内容的逐步改进至关重要。在特定情况下，测试工程师会向 IC 设计和制造流程工程师提供宝贵的反馈意见。成熟的 5G RF 测试结果统计箱限制适用于多站点的全部测试设备，可帮助找出与设备相关的系统性错误故障，并对这些因素进行排除。这样做将确保测试设备利用的最优化，并且提高总体生产吞吐量。

很大一部分客户对产品都有重要的上市时间 (TTM) 目标，而且对知识产权 (IP) 的侵犯和安全性十分敏感。我们有完善的系统和流程来处理这些客户关心的问题。

Amkor 生产测试部门一直在为未来几年将会出现的大量 5G 产品的测试做准备。这其中包括预计要在用户设备（移动设备）大幅成长前建设完成的 5G 基站和基础设施。

总结

5G RF 生产测试业务的规模可观，而且发展迅速。我们的生产测试团队始终会和组装封装、ATE 供应商和客户密切合作，确保提供全方位的 5G RF 生产测试服务，以满足并且克服所有测试功能及产能挑战。

© 2021, Amkor Technology, Inc. 保留所有权利。

参考资料

1. [3GPP](#) TS 38.101-1 V16.1.0 (2019-09)
2. Wide Band RF Architecture options - Peter Delos, [Analog Devices](#)
3. Amkor Device Packages - <https://amkor.com/packaging/>
4. Antenna In Package/Antenna On Package - <https://c44f5d406df450f4a66b-1b94a87d576253d9446df0a9ca62e142.ssl.cf2.rackcdn.com/2019/08/AiP-AoP-TS116.pdf>
5. Amkor Antenna in Package - [Article](#)
6. [Amkor Packages - Press Release 2019](#)
7. [Fresnel Far Field Region](#) or [Antenna Theory](#)