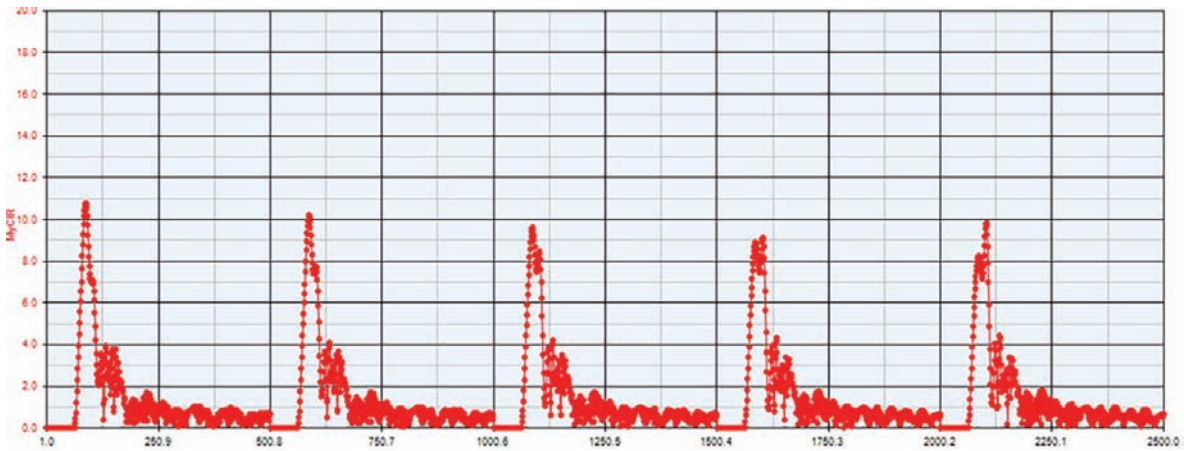


是德科技

定义信道测量系统以表征 5G 空中接口

应用指南



引言

新兴 5G 标准几乎必然无疑地将毫米波 (mmWave) 频率、超宽带和大规模多路输入多路输出 (MIMO) 方法整合在一起, 力求实现其雄心勃勃的性能目标。虽然上述每一点都给发射机和接收机的设计增加了难度, 但是其中最难以捉摸的是用户设备 (UE) 与基站 (eNB) 之间的空中无线电信道。为了全面表征这一信道, 有必要创建信道性能的数学模型, 并通过这些模型来定义 5G 新空中接口标准。

想要实现毫米波系统的成功部署, 对各个信道条件都需要有深刻的理解。目前, 人们正在关注的是在 6 GHz 以下目前使用非常密集的频谱内各种潜在载频上的无线电波传播。关于信道传播的详细表征对于研发可靠的 5G 无线系统设计至关重要。被称为信道探测的技术是理解信道的关键步骤, 由此实现了 5G 预期的数据速率、频谱灵活性和超宽带宽。

目前有许多不同的测量方法, 每种办法都有其优缺点。以既往的研究为起点, 是德科技已经研发出了充分利用最佳属性同时添加新属性的测量系统。推荐的测量解决方案是基于商用现货 (COTS) 的硬件和软件产品, 外加其他通过在板上 FPGA 中执行实时数据处理而加速了 5G 测量的软件。是德科技也提供可确保系统同步和校准的工具, 这些是获得精确且可重复的结果的必要条件。

尤其是, 测量系统能够表征信道性能, 有助于研发新的信道模型。当新模型定义完毕后, 则可使用是德科技的 SystemVue 电子系统级 (ESL) 软件仿真。这样, 熟练的研发者可以快速地实施定制系统并获得卓越的结果。

5G 的概述：期望和机遇

5G 的市场前景是基于一些积极的预测：移动数据需求的空前增加；无线应用的爆炸式多样化；以及互连设备数量的大量增长。此外，如果上述趋势持续发展的话，最终用户对整个网络性能和服务质量（QoS）的期望将很可能发生巨大变化。

这种未来场景有望为移动用户带来重大利好：极速的连接；可靠的连通性；以及即使在拥挤的环境中也能获得的可靠而卓越的 QoS。最终结果是在任何时间和任何地点都能获得最佳的用户体验。

相关技术要求包括的一些数字与当今的 4G 系统相比非常庞大：

- 数据速率增加 100 倍
- 网络容量增加 1000 倍
- 网络密度增加 100 倍
- 能量效率提高 100 倍
- 时延 1 ms
- 五个九的可靠性 (99.999%)

其中，之所以将数据速率增加 100 倍凸显出来，是因为在现今拥挤的射频频谱中，这简直是不可能实现的。这就推动了研究毫米波频率的需求；但是人们对无线电波在该频谱范围内的传播特性认识有限，而这正在激励人们去彻底研究、模拟和理解该信道。

结果，在支持研发过程的硬件和软件工具中至少有三个创新机遇：设计；仿真；以及校准和验证。

总体解决方案

在任何无线通信体系架构中，无线信道对系统性能有极大的影响。这在毫米波频率下的 5G 中更是如此。由于毫米波信号的波长极短，所以它在大气中传播时能够被快速吸收。在氧气、水和二氧化碳分子的共振频率下衰减格外高。

为了更好地理解无线信道，测量信道、收集关键特征，以及研发可用于仿真和模拟的可靠模型都非常重要。信道探测这种测量方法可以模拟任意无线通信系统的运作。参见图 1，一个发射信号在空中传播，并受到了信道条件的影响，随后到达接收机。通过在接收机上应用信号处理算法，测量系统可以提取无线信道在工程师关注的频率上的特征。

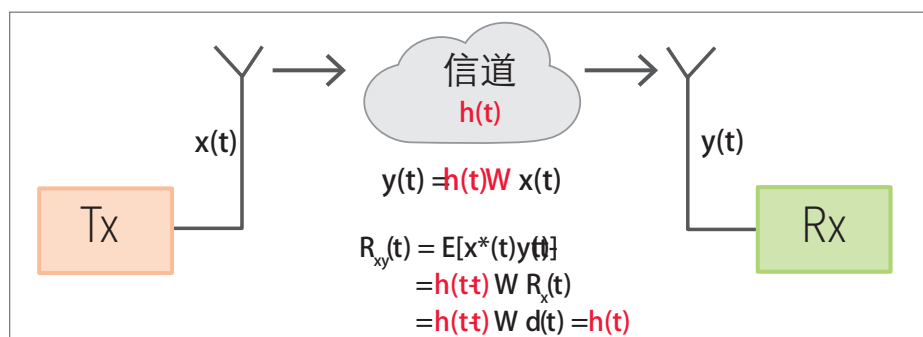


图 1. 通过使用矩阵数学运算求解 $h(t)$ ，可以得到射频无线信道的近似数学模型。

要创建所需的数学模型，就需要估计各种信道参数。从信道脉冲响应（CIR）开始，它包括信道的所有特征。重要的参数包括到达角（AoA）；分离角（AoD）；多普勒频移；以及功率时延分布（PDP），其中包括可估计的绝对路径时延和路径损耗。还有一些必要的统计参数和建模元素：AoA 和 AoD 的角度扩展（AS）；功率角度频谱（PAS）；多普勒频谱；关联矩阵；以及 Rician K 因子，其与衰落有关。多路输入多路输出信道引入了空间信息和关联信息，这些信息给 AoA、AoD、AS 和 PAS 等信道参数估计带来了更多挑战。

5G 的信道探测

全新的 5G 毫米波空中接口设计的技术选择设定了一个底线，要求测量系统满足以下要求：

- 能够处理 10 至 90 GHz 范围和甚至更高的载频
- 能够支持 500 MHz、1 GHz、2 GHz 和甚至更高的带宽
- 能够处理大规模多路输入多路输出天线配置

这些要求导致一个伞形结构的挑战和五大关键技术挑战，如图 2 所示。

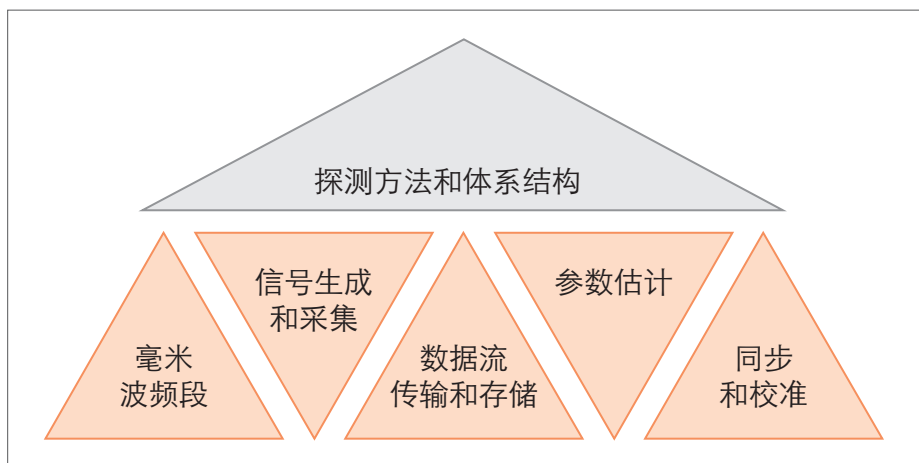


图 2. 这五个技术挑战影响了对定义信道探测测量系统的最有效实施方法和体系结构的整体需要。

从上图的顶部开始，最首要的挑战是为信道探测系统选择一个最有效的实施方法和体系结构。从左至右排列的三角形突出了必须解决的关键技术问题：

- 找到在与毫米波上变频（信号生成）或下变频（信号分析）协同使用时能够提供充足性能的射频和微波（ μW ）测试设备。
- 为信号生成、采集和分析提供所需的带宽。这会影响到模数转换器（ADC）或数模转换器（DAC）技术中必要的时钟速率和位深（例如，动态范围和分辨率）。¹
- 通过存储器来收集和管理大量数据，以支持在高采样率和多信道条件下长时间的探测测量。²
- 在参数估计算法中获取足够精度，以便能够处理多路输入多路输出估计所要求的路径时延分辨率和角度分辨率。
- 能够对所有测量硬件进行精确的同步和校准，以确保精确和可重复的结果。

1. 系统性能也必须达到可处理预期的 5G 多普勒频率，它将高于相似的 3G 和 4G 场景中的频率。
2. 要求的总容量是总测量时间、采样率和信道数量的乘积。

比较不同的探测技术

通常至少有三种不同的基带处理方法用于执行信道探测：滑动相关、扫描频率和宽带相关。其中最容易实施的方法是滑动相关和扫描频率。这两种方法在测量传播损耗方面都很高效，但在测量时变信道时都不太高效且测量速度较慢。此外，滑动相关仅提供了幅度信息。

相比之下，宽带相关更为复杂，但是这是最快速的方法，原因是它能测量整个宽带，同时能够更快地存取 CIP 数据。宽带关联方法也包括所需矢量测量和分析中不可或缺的相位信息。结果，宽带关联从另外两个选择中脱颖而出。

评测多路输入多路输出探测方法

许多探测系统整合了单路输入、单路输出（SISO）测量。多路输入多路输出是 5G 中的关键技术，并且必须列入到信道表征中。具体到多路输入多路输出测量，有三种常见的发射和接收重要信号的方法：发射机端和接收器端均使用开关切换，使用并行发射和接收，或是在发射机端使用开关切换并使用并行接收（图 3）。¹

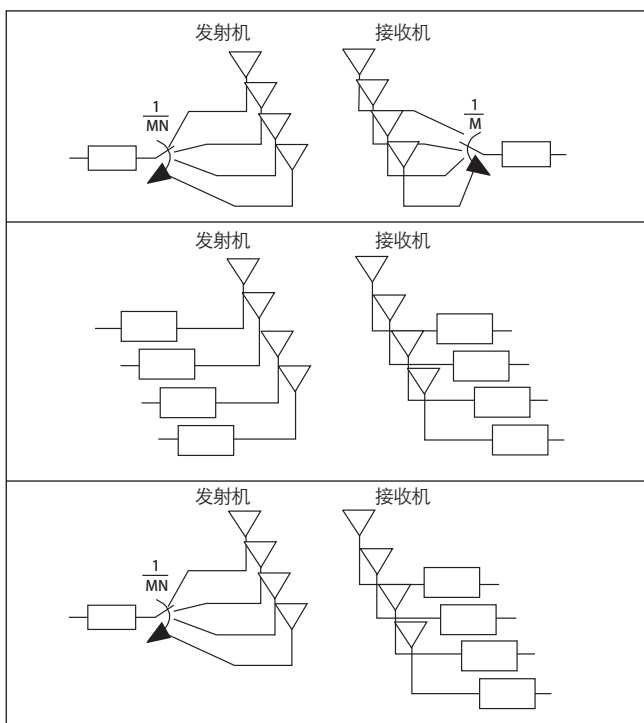


图 3. 这三种方法使得多路输入多路输出测量能够实现：开关切换发射和接收（顶部）、并行发射和接收（中部）和开关切换发射 / 并行接收（底部）。

虽然全并行方法提供了最快速的测量，但是它也导致各发射信道之间产生交叉干扰，这潜在降低了探测测量的性能。这个问题不影响开关切换发射 / 并行接收或全开关切换方法。

相比之下，开关切换发射 / 并行接收比全开关切换技术更快速。开关切换发射 / 并行接收方法具有速度上的优势，而且不会产生交叉干扰，所以这是一个更好的选择。

1. 第四个选择，并行发射和开关切换接收，在接收端失去了太多有效信息。

具体的解决方案

借鉴之前的比较，是德科技的优选方法是使用宽带相关作为基带探测技术，并使用开关切换发射 / 并行接收，以确保对多路输入多路输出数据捕获的测试。这具备三个重要的技术优势：快速的测量速度、多路输入多路输出探测功能和卓越的测试性能（交叉信道干扰最低）。

图 4 展示了基本体系结构。在左边，发射机端包括单信道宽带信号发生器和毫米波开关。在右边，接收机端使用宽带多信道接收机来执行并行信号采集。宽带多信道接收机能够用高性能数字化仪或宽带矢量信号分析仪来实现。

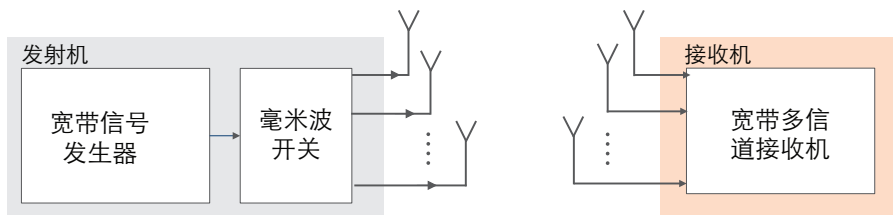


图 4. 此结构图说明了开关切换发射 / 并行接收体系结构的基本实施。

图 5 显示了信道探测系统更详细的结构。宽带信号发生器包括宽带任意波形发生器（AWG）和毫米波矢量信号发生器（VSG）。AWG 提供了用于调制 VSG 输出的同相和正交（I/Q）信号，毫米波开关按顺序将 VSG 输出路由至发射天线。在接收机端，多信道下变频器将接收到的信号转换为多信道数字化仪的中频带宽。

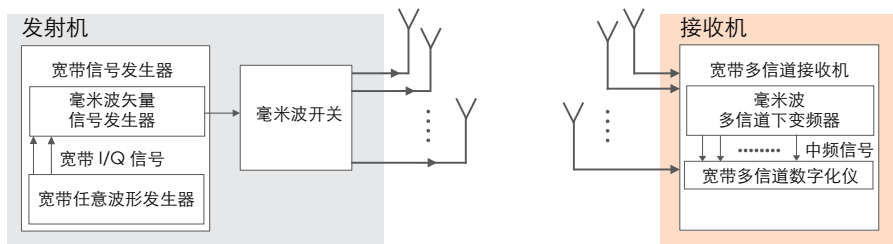


图 5. 为了更好地管理成本、最大限度提高可用性并确保可支持性，推荐的解决方案使用 COTS 仪器来实施推荐的体系结构。

描绘硬件单元

图 6 展示了推荐的测试和测量硬件单元。为了确保时基一致，各子系统均连接 10 MHz 铷频标（例如 TaiFuTe HJ5418B 铷钟）。

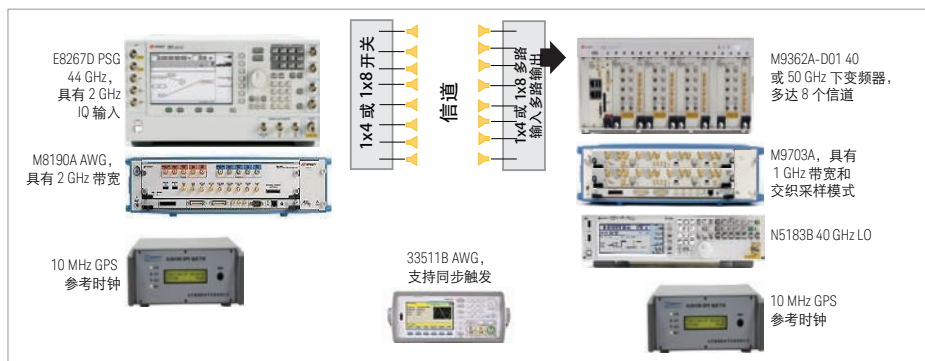


图 6. 发射机子系统在左边，接收机子系统在右边。

表 1 提供了发射机和接收机子系统中主要硬件单元的功能描述。以这些必要单元作为起点，您可以根据需要修改测试平台，以满足您的特殊需求：信道数、载频、分析带宽等等。

¹ 如欲了解关于数据存储和数据流传输的更多信息，请参见侧边栏。

估计数据存储和数据流传输需要

因为探测测量的持续时间可能非常长，所以可能需要对原始 I/Q 或 CIR 数据进行精简、存储或数据流传输。您可以使用以下方程来计算所需的数据容量：

$$N_{cap} = T_s \times F_s \times N_{Rx}$$

- T_s 是探测测量的总时间
- F_s 是采样率
- N_{Rx} 是并行接收信号的信道数量
- N_{cap} 是总捕获数据量（单位为样本）

在 5G 信道探测中， F_s 必须足够大以便捕获超宽带宽， N_{Rx} 很大是因为使用了大规模多路输入多路输出配置。举一个简单的例子，比如 1 GHz 采样率和 8 个接收机信道：每秒测量所需的容量是 8 GSa ($1 \text{ s} \times 1 \text{ GHz} \times 8 \text{ 信道}$)。如果每个样本包括四个字节—I 数据两个，Q 数据两个—则需要 32 GB 的存储量。

表 1. 发射机和接收机子系统使用 COTS 硬件来实施信道探测系统。

	说明	功能
发射机子系统	矢量信号发生器	使用差分 I/Q 输入生成频率高达 44 GHz 的宽带信号，其频率在 20 GHz 时输出功率为 +23 dBm，在 40 GHz 时输出功率为 +13 dBm。差分外部 I/Q 输入支持的调制带宽高达 2 GHz。可用的上变频器可转换超过 44 GHz 的频率。
	任意波形发生器	双信道任意波形发生器在高达 2 GHz 的带宽上使用基带 I/Q 调制信号驱动矢量信号发生器的调制输入
	固态开关	通过各个发射天线提供顺序的串行输出
接收机子系统	PXIe 四路下变频器	连接到接收机天线，并对高达 50 GHz 的毫米波信号执行相位相干转换，使其下变频为基带信号，以实现数字化。
	PXI 混合放大器 / 衰减器	提供四个中频信号调理信道
	AXIe 12 位高速数字化仪 / 宽带数字接收机	对每个模块的 8 个信道进行高速、高分辨率、相位相干测量。模块上的 FPGA 执行即时 CIR 计算。
	AXIe 2、5 或 14 插槽机箱	可以在发射机和接收机机箱中安装高速数字化仪和 AWG 模块；同时分别提供高达 16、40 或 104 个接收机信道的系统基础。
	PXIe 18 插槽机箱	可以安装下变频器和信号调理模块以及嵌入式控制器。具备充足功率，可以支持四个四路下变频器和四个放大器模块。
	PXIe 高性能嵌入式控制器	内置于 PXIe 机箱并控制接收机系统中的 PXIe 和 AXIe 机箱
	MXG X 系列微波模拟信号发生器	通过为下变频器提供低相位噪声 LO 信号来确保相位相干性。高输出功率确保一个 MXG 可以使用分路器为多个下变频器提供输入
	能够生成任意波形的波形发生器	提供同步触发器

1. 如欲获取关于型号和必要元件的完整信息，请参见《5G 信道探测参考解决方案》手册 (5992-0983CHCN)。

概括介绍了必要的软件单元

图 7 显示了表征新信道时用到的数据分析步骤的典型流程图。它展示了关键单元间的关系和数据流，并且建模总结了每个区块执行的一些主要功能。

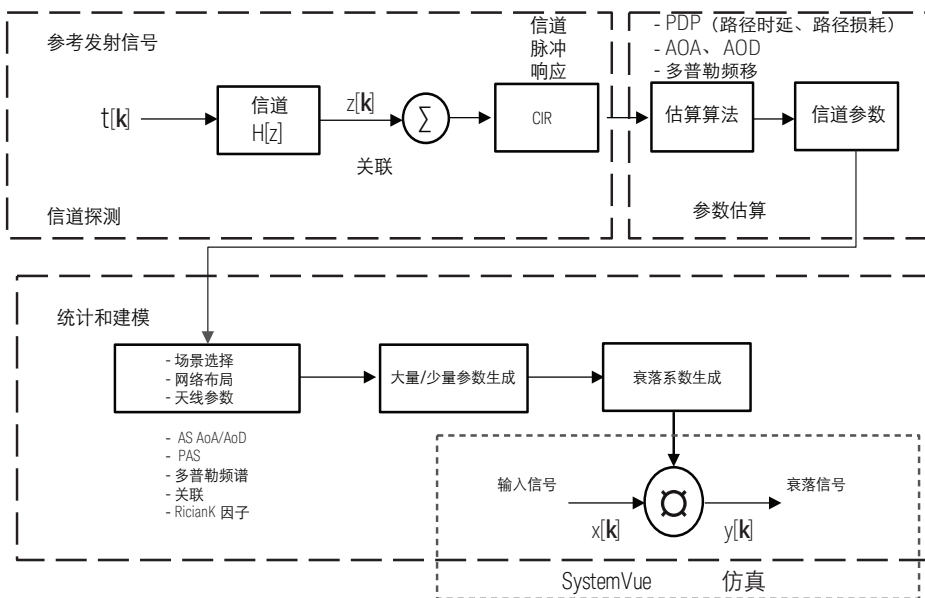


图 7. 软件单元对提供必要的功能和能力至关重要，包括信道探测、参数估计、统计和建模以及仿真等功能。

具体到信道探测（图 7，上右），参考解决方案使用是德科技快速入门工具包。它包括的配置和校准工具可简化和加速复杂的信道探测分析过程。

在必要数据收集方面，M9703A 数字化仪内置的 FPGA 提供了即时关联和计算 CIR 数据所必需的实时数据处理功能（图 7，上左）。这种系统内数据精简使得数据流传输和存储更易管理。数据流传输的要求取决于多路输入多路输出阵列大小、采样率和 CIR 数据量。

产生的数据也可用于后期处理时估计其他信道参数。对于所获得信号的详细后期处理分析，可使用 SystemVue 平台中的不同模型来提取信道参数（图 7，上右）。Keysight 89600 VSA 软件也可用于进行信号解调和矢量信号分析。这些工具可以帮助您虚拟地探索当今最复杂信号的各个层面，并且最终利用从中获得的洞见来创建更好的信道模型。

配置 SystemVue 可提供三大必要性能：信号创建、参数提取和信道仿真。例如，信道探测信号本身就是该系统的关键方面。无论您是已经有了信道激励，还是想要用新的变量进行试验，SystemVue 都可为您提供必要的工具来创建 I/Q 信号并将它们下载到 AWG。¹

SystemVue 也可使用空间交替广义期望最大化 (SAGE) 算法（可选）来执行定制信道参数提取。最近的创新已经使 SAGE 法更适用于多路输入多路输出系统。

一旦信道建模完成，您就可以使用 SystemVue 5G 基带验证程序库 (W1906EP) 来执行新信道模型的链路级仿真，包括多路输入多路输出信道的扩展方案（图 7，下右）。综合的仿真环境使您能够使用硬件在环算法来研究、实施和验证系统特性，以便经由 FPGA 的实时协同验证来验证和加速算法。

1. 您也可以使用 Keysight Signal Studio 定制调制软件 (N7608B) 或波形生成器软件 (M9099) 来创建和下载信道探测信号。

确保测量精度

为了获得精确的结果，需要进行系统同步与校准。信道探测系统必须能够测量和表征自身的相位和幅度减损，并对以下误差进行补偿：

- 信道间相位误差
- 天线的幅度和相位误差
- I/Q 失配误差
- 频谱平坦度误差

参考解决方案包括可覆盖以下测量的校准：

- 系统脉冲响应
- I/Q 失衡
- 多信道幅度和相位偏移
- 功率电平
- 使用来自用户或天线制造商的天线方向图数据进行天线校准

发射机和接收机子系统的正确同步能够确保在测量关键参数（例如绝对时延）时可获得精确结果。这就是为什么推荐配置包括两个 10 MHz 铷钟和一个触发源（例如 33511B 波形发生器）的原因。这些器件配合工作，在发射机端开始信号生成并在接收机端协调信号采集。所包含的 I/O 管理软件工具简化了仪器控制层级，确保实现所要求的计时和同步。

信道参数估计

信道参数估计算法可分为 3 类：

- 基于波束赋形的算法
- 基于子空间的算法
- 基于最大似然率（ML）的算法

基于波束赋形的算法简单但估计性能低。基于子空间的算法具有较好的性能，但是该算法可估计的最大路径数量少于接收天线的数量，因此这些算法不适用于更复杂的信道场景。

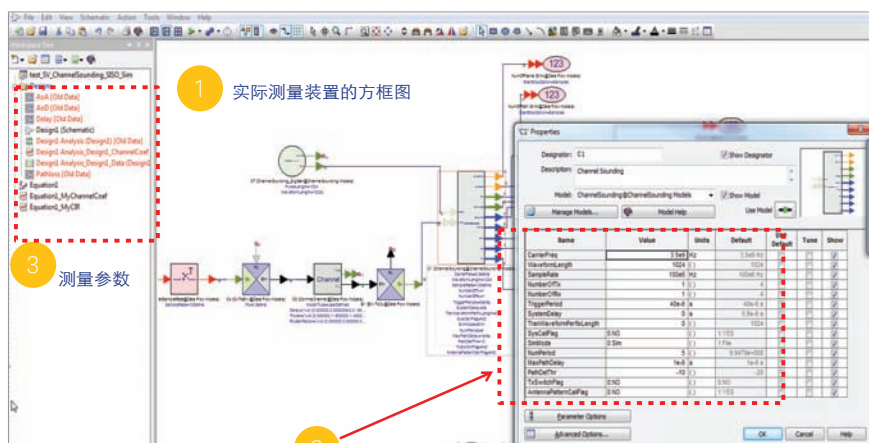
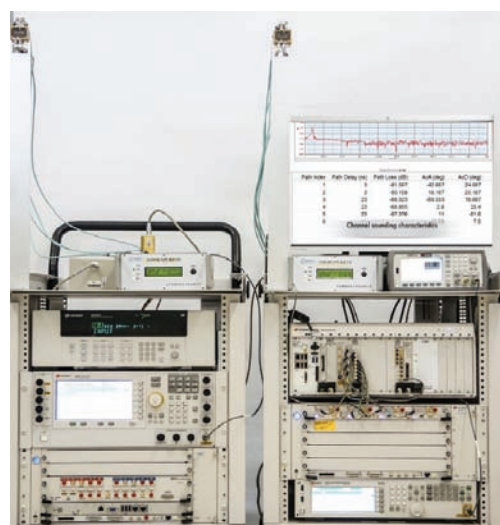
基于最大似然率的算法（例如 SAGE）已经被工程师所接受并广泛应用，这是因为它有着一流的估算精度，能够使用参数联合估计器对多个信道参数进行估算，而且它的最大估计路径数量不受天线阵列单元数量的限制。

检查试验结果

图 8 显示了能够进行 4x4 多路输入多路输出信道探测的系统的示范实施。左边推车上的 是发射机子系统，右边的是接收机子系统。

通过实施数字化仪 (M9703A) 中的嵌入式 FPGA 的实时关联处理，产生的压缩数据可 存入板载内存。捕获的 CIR 信号可通过 PCIe 总线进行实时传输。

图 9 显示了来自 SystemVue 5G 验证程序库的示例屏幕，通过该屏幕可以指定 CIR 数据 捕获的仪器配置和信道参数估计的后期处理。使用这些工具和图中的系统产生的信道参 数估计结果，如图 10 所示。



2 在对测量参数——CIR/AoA/AoD/多普勒频率/路径时延/路径损耗 进行后期处理 前设置选项

图 8. 该示范实施显示了在 28 GHz 载频和 1 GHz 分析 带宽情况下的 4x4 多路输入多路输出测量。这可扩展到 44 GHz 载频和 1 GHz 带宽下的 8x8 多路输入多路输出。

图 9. SystemVue 信道参数 - 估计功能允许提取关键参数，例如路径损耗、路径时延分布、AoD 和 AoA。

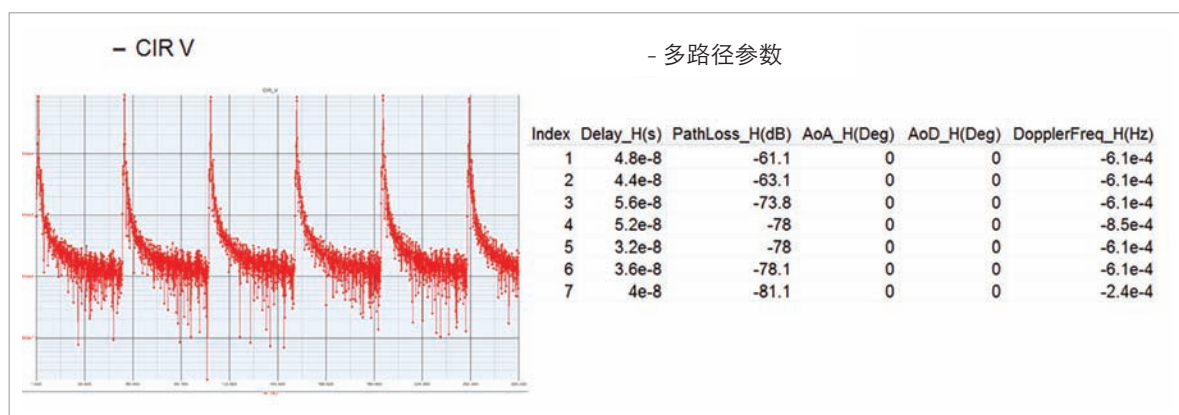


图 10. 该测量显示多路径信道的信道脉冲响应和信道提取。

最后需要注意的一点是，可使用毫米波上变频器和下变频器，例如 Virginia Diodes 公司的 N9029AV15（覆盖 50 至 75 GHz），将示范系统扩展至更高的频率。¹

1. 还有其他频段可供使用，具体取决于应用。

结论

新兴 5G 标准将整合多种出色的技术，力求实现其雄心勃勃的性能目标。发射机和接收机的设计面对许多难题，但是其中最难以捉摸是毫米波载波上的空中无线信道。为了全面地表征和理解这些未知挑战，有必要构建数学模型，通过模型来定义新的空中接口标准。

是德科技的参考解决方案使用宽带关联作为基带探测技术，并使用开关切换发送 / 并行接收确保多路输入多路输出数据的捕获。这有三大优势：快速的测量速度、多路输入多路输出探测功能和卓越的测量性能。

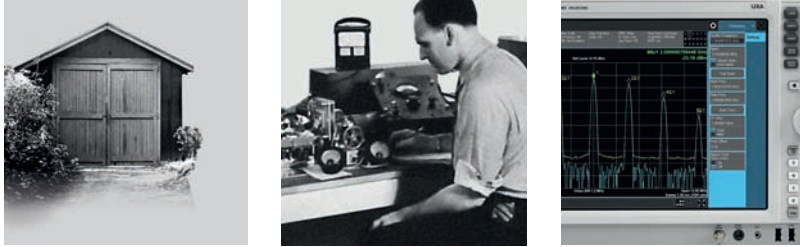
通过使用 COTS 硬件和软件单元外加特定应用工具，参考解决方案能够快速和精确地表征信道性能，以协助新信道模型的研发。一旦创建，这些新模型就可以在 SystemVue 中进行仿真，并使用硬件在环验证算法进行验证。这使您可以用更短时间进行更多的探索，加深对信道的理解，并且最终建立可提供最佳用户体验的 5G 生态系统。

相关信息

- 手册：5G 信道探测参考解决方案，5992-0983CHCN
- 手册：SystemVue 电子系统级 (ESL) 设计软件，5992-0106CHCN
- 技术资料：W1906BEL 5G 基带探测程序库，5992-0218CHCN
- 手册：89600 VSA 软件，5990-6553CHCN
- 手册：用 Signal Studio 软件简化信号生成，5989-6448CHCN
- 技术概述：M9099 波形生成器软件，5991-3153CHCN
- 技术资料：E8267D PSG 矢量信号发生器，5989-0697CHCN
- 技术资料：MXG X 系列信号发生器，5991-3131CHCN
- 技术资料：33500B 系列波形发生器，5991-0692CHCN
- 技术资料：M8190A 任意波形发生器，5990-7516CHCN
- 技术概述：85331B/85332B 固态开关，5989-4960CHCN
- 技术资料：M9362AD01 PXIe 四路下变频器，5990-6624CHCN
- 技术资料：M9352A PXI 混合放大器 / 衰减器，5990-9964CHCN
- 技术资料：M9703A AXIe 高速数字化仪 / 宽带数字接收机，5990-8507CHCN
- 技术资料：M9502A 和 M9505A AXIe 机箱，5990-6584CHCN
- 技术资料：M9514A 和 M9521A AXIe 14- 插槽机箱和系统模块，5991-3908CHCN
- 技术资料：M9037A PXIe 嵌入式控制器，5991-3661CHCN

从惠普到安捷伦再到是德科技

传承 75 年创新史，我们始终帮助您开启测试测量新视野。我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。1939 年成立的惠普公司起源于电子测量，是德科技将这一业务传承至今，并将继续发扬光大。



1939

未来

myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息！



3 年保修
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



是德科技保证方案
www.keysight.com/find/AssurancePlans
5 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



www.keysight.com/go/quality
是德科技公司
DEKRA 认证 ISO 9001:2008
质量管理体系

Keysight Infoline

Keysight Infoline
www.keysight.com/find/service
是德科技的洞察力帮助您实现最卓越的信息管理。免费访问您的是德科技设备公司报告和电子图书馆。

是德科技渠道合作伙伴
www.keysight.com/find/channelpartners
黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

www.keysight.com/find/5G

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线
热线电话: 800-810-0189、400-810-0189
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863
电子邮件: tm_asia@keysight.com

是德科技(中国)有限公司
北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦
电话: 86 010 64396888
传真: 86 010 64390156
邮编: 100102

是德科技(成都)有限公司
成都市高新区南部园区天府四街 116 号
电话: 86 28 83108888
传真: 86 28 85330931
邮编: 610041

是德科技香港有限公司
香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼
电话: 852 31977777
传真: 852 25069233

上海分公司
上海市虹口区四川北路 1350 号
利通广场 19 楼
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200080

深圳分公司
深圳市福田区福华一路 6 号
免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元
电话: 86 755 83079588
传真: 86 755 82763181
邮编: 518048

广州分公司
广州市天河区黄埔大道西 76 号
富力盈隆广场 1307 室
电话: 86 20 38390680
传真: 86 20 38390712
邮编: 510623

西安办事处
西安市碑林区南关正街 88 号
长安国际大厦 D 座 501
电话: 86 29 88861357
传真: 86 29 88861355
邮编: 710068

南京办事处
南京市鼓楼区汉中路 2 号
金陵饭店亚太商务楼 8 层
电话: 86 25 66102588
传真: 86 25 66102641
邮编: 210005

苏州办事处
苏州市工业园区苏华路一号
世纪金融大厦 1611 室
电话: 86 512 62532023
传真: 86 512 62887307
邮编: 215021

武汉办事处
武汉市武昌区中南路 99 号
武汉保利广场 18 楼 A 座
电话: 86 27 87119188
传真: 86 27 87119177
邮编: 430071

上海MSD办事处
上海市虹口区欧阳路 196 号
26 号楼一楼 J+H 单元
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200083

