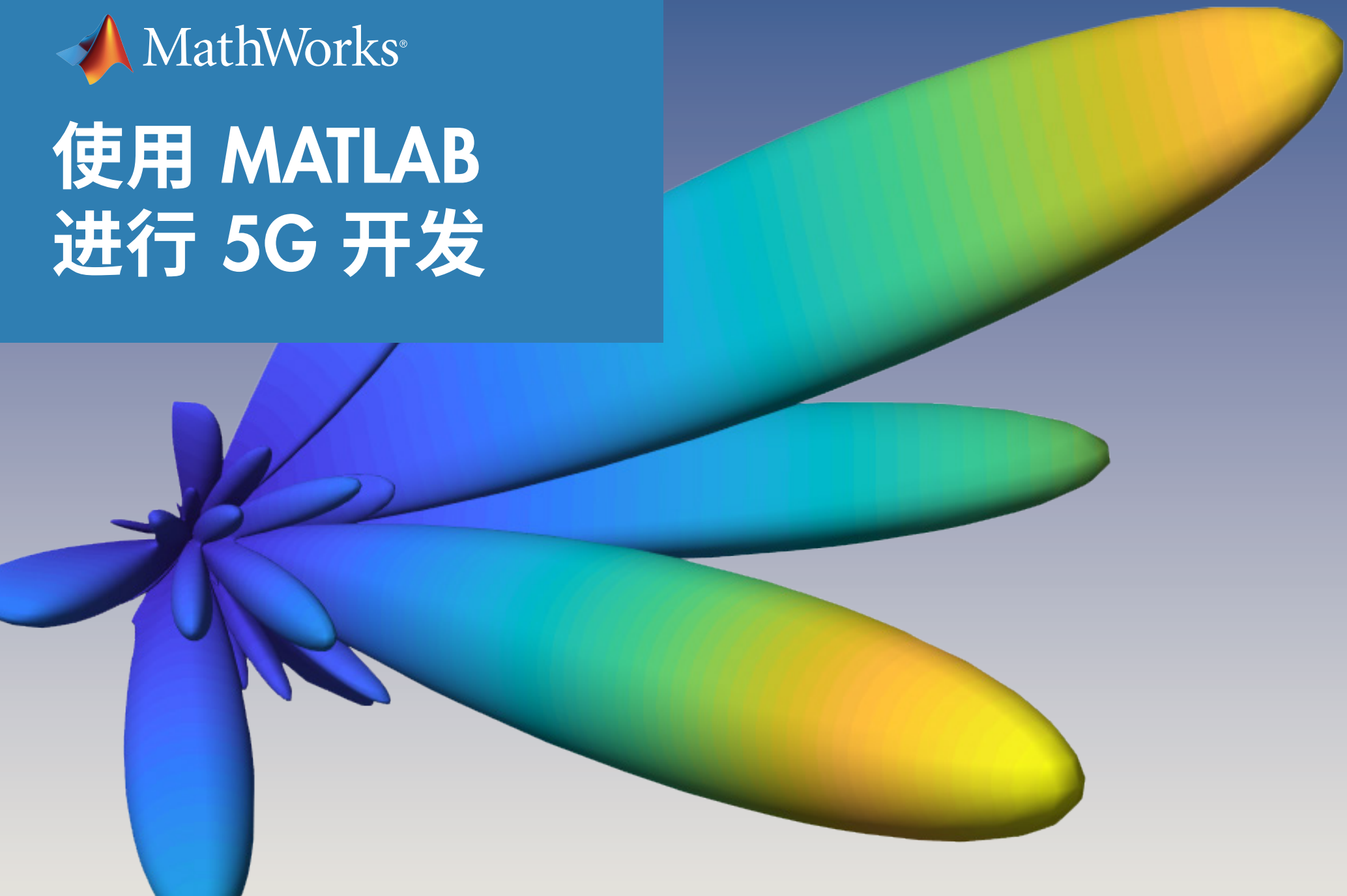




# 使用 MATLAB 进行 5G 开发

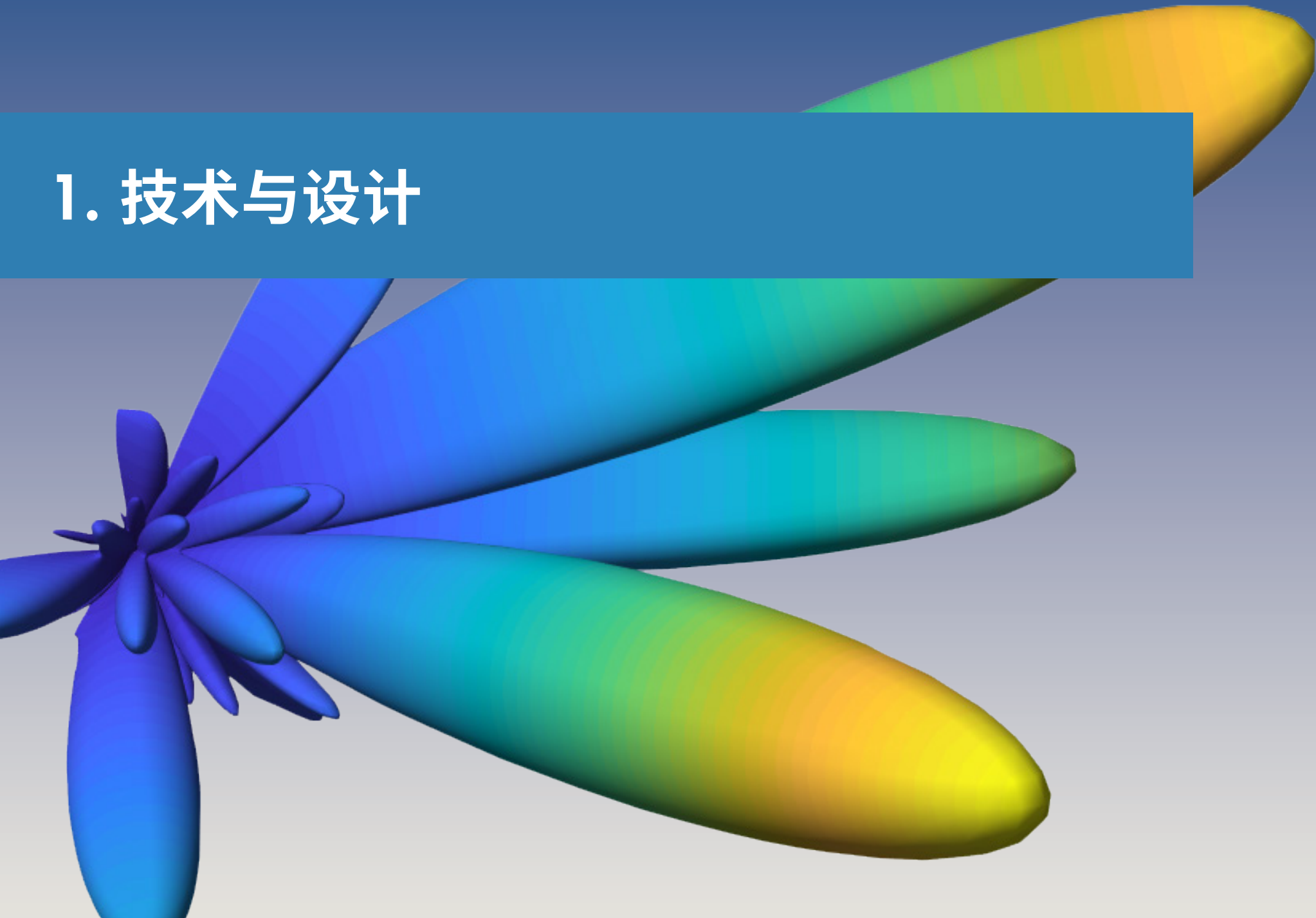


# 使用 MATLAB 进行 5G 开发

1. 技术与设计
2. 新架构和算法
3. 加速原型开发和现场试验
4. 系统验证和测试



# 1. 技术与设计



# 什么是 5G?

5G (第五代无线系统) 是移动通信标准的下一个主要发展阶段。5G 的应用范围最终将涵盖移动宽带服务到下一代汽车和设备联网服务。

最初的 5G New Radio (NR) 规范于 2018 年 6 月完成并在 3GPP Release 15 规范中发布。现在, 网络设备供应商、网络运营商、半导体供应商和设备制造商等各类行业参与者正在开发实施新标准的新产品。

如果您已经熟悉 5G, 可以直接跳转到第 2-4 部分, 其中讨论了使用 [MATLAB®](#) 进行 5G 设计和开发的策略: 新算法设计 (第 2 部分)、加速原型开发和现场试验 (第 3 部分) 和系统验证 (第 4 部分)。

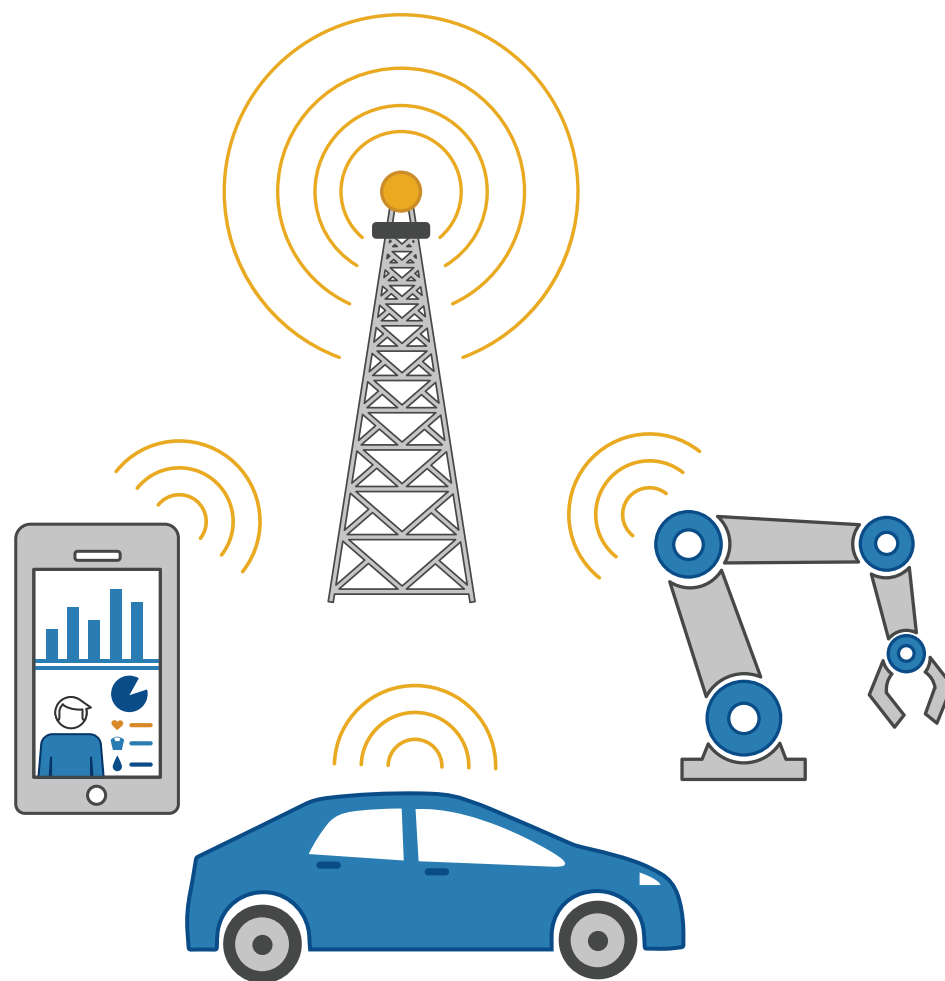


# 什么在推动 5G 发展?

两大趋势正在推动 5G 竞逐: 对可以承载视频及其他富内容服务的无线宽带的需求呈爆炸式增长; 大量智能设备通过互联网进行通信的物联网 (IoT)。为了实现这些目标, 5G 将提供**极高的宽带速度、超低延迟和极其可靠的网络连接**。

5G 网络和设备将需要大不相同的架构、无线接入技术和物理层算法。密集的小型蜂窝网络将作为大型基站的补充, 运用毫米波技术并采用大规模 MIMO 天线阵列。网络设备和用户设备中的处理组件将具有更高的集成度和自适应性。

诸如混合波束形成之类的创新使开发无线系统的旧方式变得捉襟见肘。这些高度整合的技术需要工程领域专业知识和工具做出相应的整合。



# 5G 术语和预期的应用

通过提供比当前 4G 支持的宽带更高的带宽容量, 5G 将实现更高的移动宽带用户密度, 并支持超可靠的设备间通信和大规模机器类通信。

关键 5G 参数	
空中链路延迟	<1 毫秒
端到端延迟 (设备到核心)	<10 毫秒
连接密度	当前 4G LTE 的 100 倍
区域容量密度	1 (Tb/s)/km <sup>2</sup>
系统频谱效率	10 (比特/秒) /赫兹/小区
每个连接的峰值吞吐率 (下行链路)	10 Gb/s
能效	比 LTE 改进 90% 以上

## eMBB — 增强移动宽带

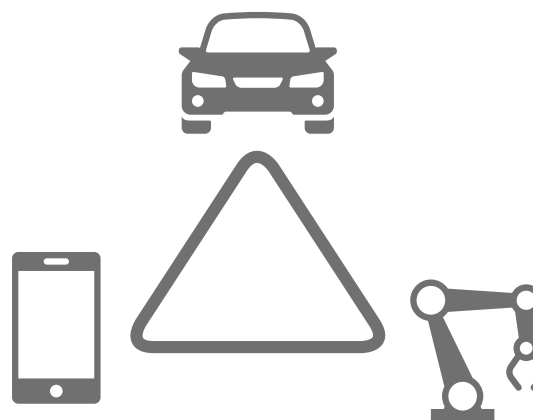
- 提供高容量和超高速移动通信, 面向手机和基础设施、虚拟和增强现实、3D 和超高清视频以及触觉反馈

## URLLC — 超可靠和低延迟

- 面向车辆对车辆 (V2V) 和车辆对基础设施 (V2I) 通信、自动驾驶

## mMTC — 大规模机器类通信

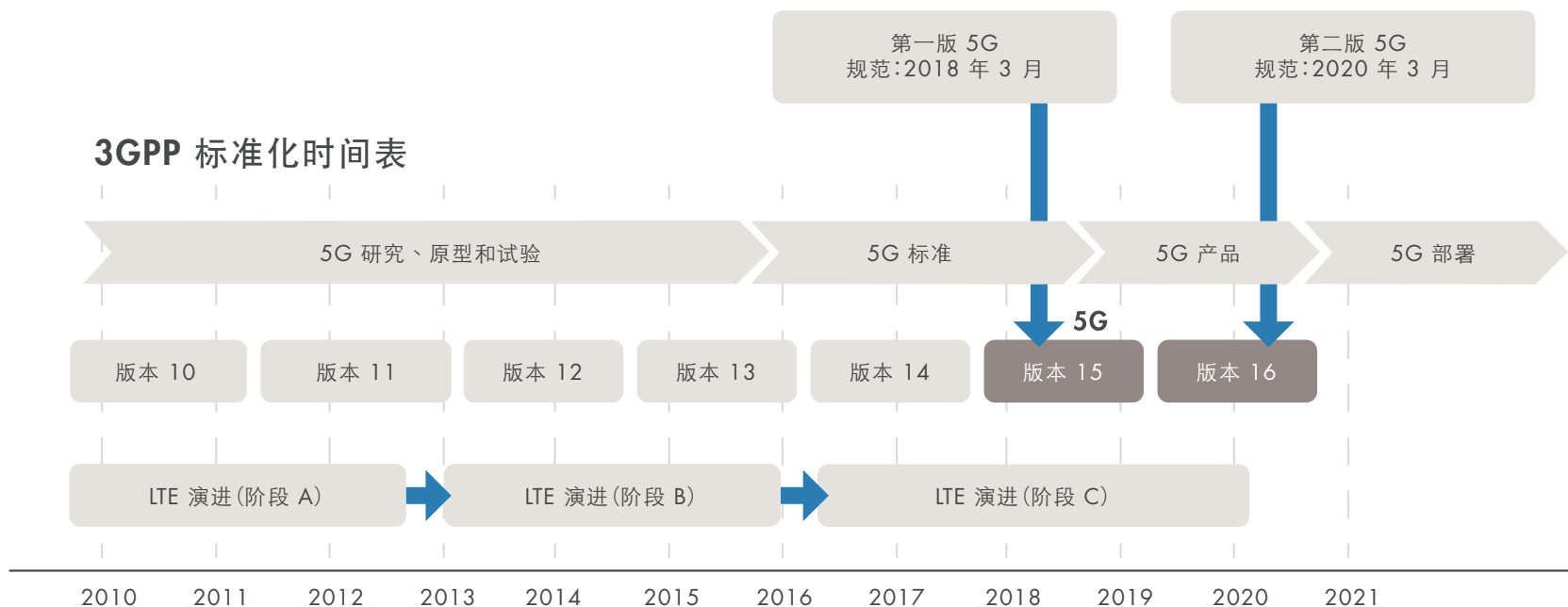
- 面向消费者和工业物联网、工业 4.0 关键任务机器对机器 (MC-M2M)



# 5G 标准:时间表

3GPP 标准化组织在全球众多参与者和贡献者的帮助下制定了无线 5G 标准。2018 年 6 月最终确定的 3GPP 标准的第 15 版引入了 5G 标准。物理层算法、毫米波技术和大规模 MIMO 架构将与 4G LTE 技术大相径庭。

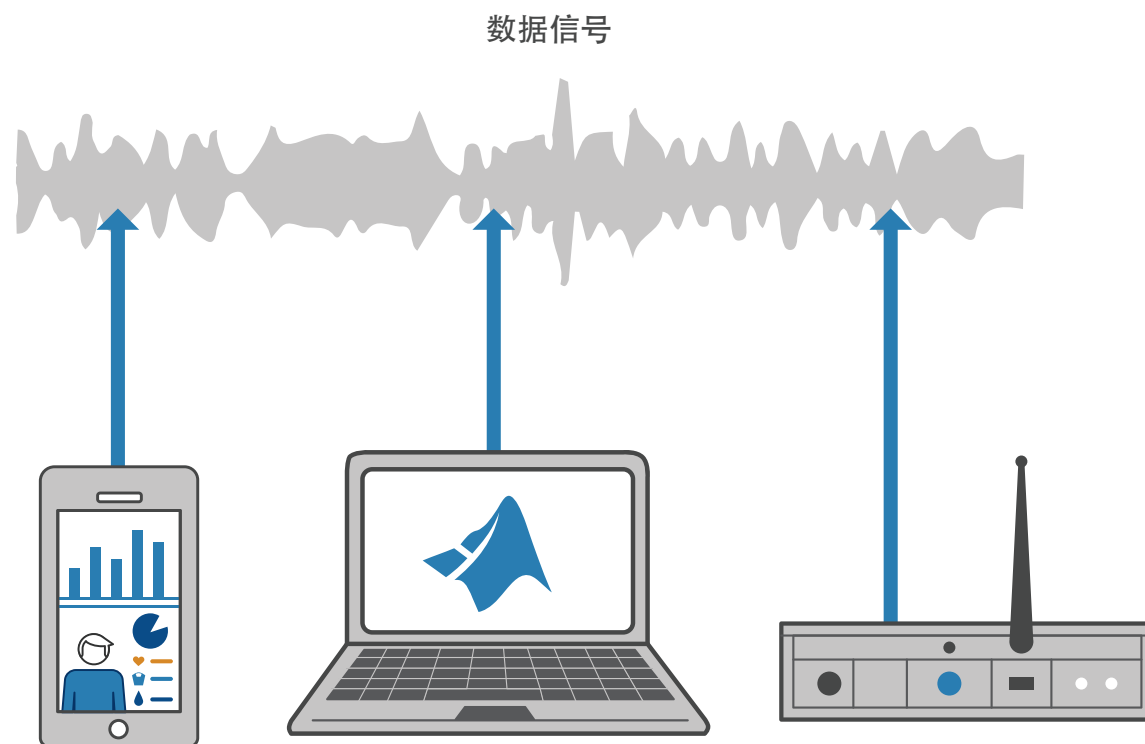
当前 5G 发展着重于实现如下技术: 灵活基带和 RF 技术、混合波束成形和大规模 MIMO 系统, 快速原型和现场试验, 以及验证是否符合新标准规范。



# 5G 的新物理层

5G 物理层将以多种方式背离 4G LTE, 以提高频谱效率和数据速率。其中一个明显特征是有源主动天线和天线阵列数量的大幅跃升, 以及波束成形和毫米波 RF 信号处理的相关问题。新的调制和编码方案、功率和低噪声放大器设计以及信道模型都需要进行开发。

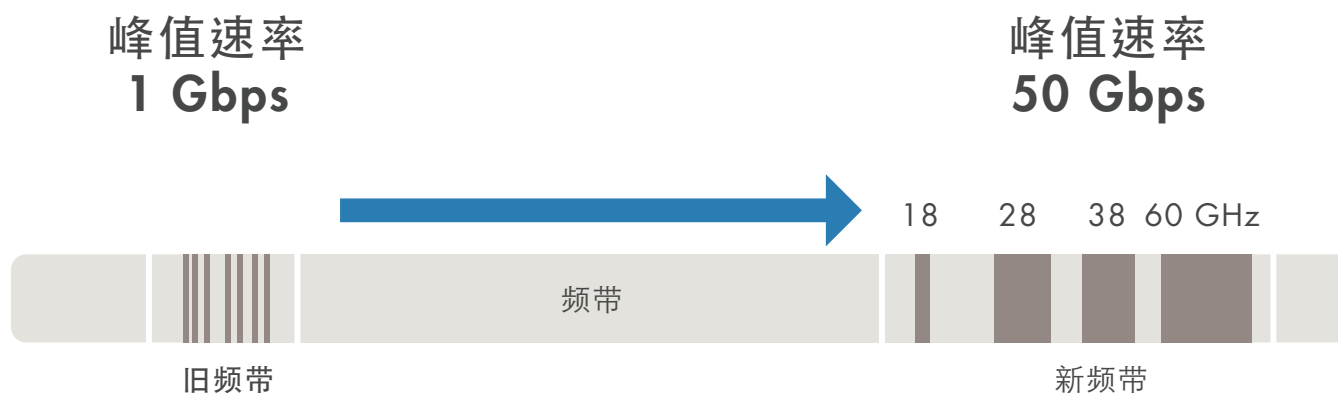
本电子书的第 2-4 部分详细讨论了 5G 设计和开发策略: 新算法设计 (第 2 部分)、快速原型开发 (第 3 部分) 以及系统验证和现场试验 (第 4 部分)。



# 毫米波高频运行

更高的数据速率 (多 Gbps) 推动了对更大带宽系统的需求, 而最高至 6 GHz 频谱中的可用带宽不足以满足这些需求。(作为参考, 当前的蜂窝网络在 3 GHz 以下运行。) 这使下一代无线通信系统的目标运行频带上移到毫米波 (mmWave) 范围。例如, 设备开发商已经与移动网络运营商进行了 5G NR 试验, 证明更高频率传输的可行性。这些试验运行于 3.3 GHz 至 5.0 GHz 的中频带以及 28 GHz 和 39 GHz 的毫米波频带, 证实了跨不同频带的基于 3GPP 统一的 5G NR 设计。

高频率将为固定增益提供更大的可用带宽和更小的天线尺寸, 或为给定天线尺寸提供更高增益。然而, 这增加了基带和 RF 设计中的调制解调器的复杂性。为了研究性能, 我们还需要为 5G 中的新频段建立精确的信道模型。



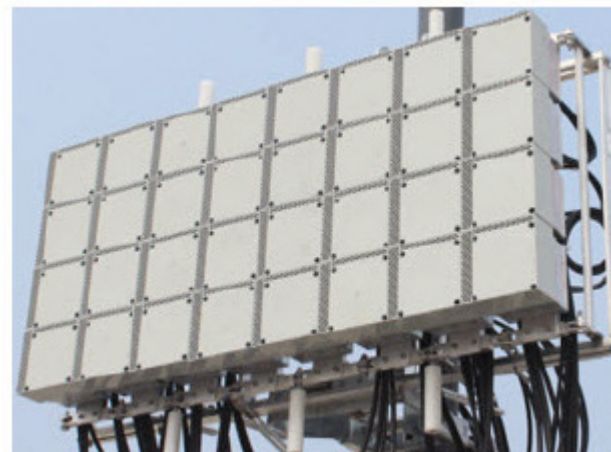
# 大规模 MIMO:更多天线

实现更高频谱效率的另一项关键技术是**大规模 MIMO**。大规模 MIMO 是多用户 MIMO 的一种形式，其基站的天线数量远大于每个信令资源的设备数量。相对于用户设备的庞大基站天线数量导致准正交的信道响应，并且有可能在频谱效率上产生巨大收益。

在将天线数量扩展到数以百计时，设计人员面临如下挑战：

- 传统天线设计工具的**仿真速度**对于大型天线阵列来说过慢。
- 仿真天线耦合**很困难**。
- 需要**混合波束成形**来优化 RF 链的数量。

请参阅第 2 部分以了解有关设计架构和算法的详细信息。

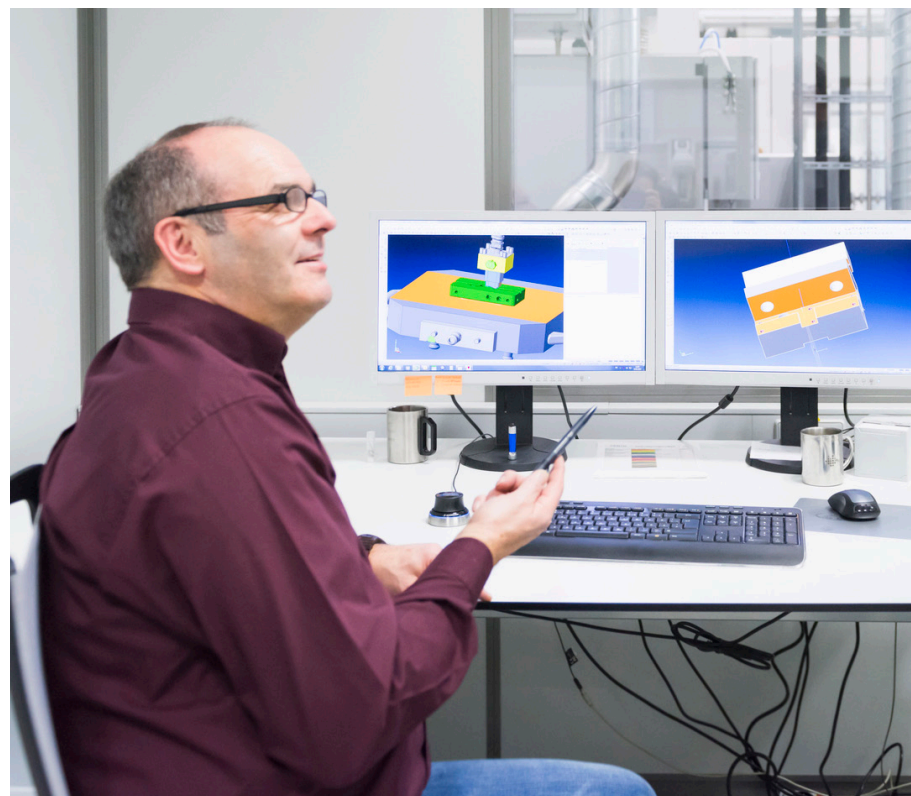


华为 5G 现场试验的大规模 MIMO 天线阵列

# 利用硬件测试平台快速开发 5G 系统原型

从事 5G 设计工作的工程师已经认识到快速设计迭代以及将概念验证原型快速投入现场试验的价值。作为灵活的可重新配置设计平台，硬件测试平台经证明具有可靠性和高效率，适合用于快速设计和验证新概念，以及在预商用现场试验中进行部署。与测试平台衔接的工具和 workflow 必须支持快速设计迭代，和针对新算法或设计变更的快速部署。

在第 3 部分讨论了快速原型开发工作流程。



## 了解更多

**准备更深入地钻研？查看这些资源以深入了解有关 5G 技术开发和设计的更多信息。**

### 观看

[Chalk Talk: 使用 MATLAB 和 Simulink 设计 5G 无线技术 \(32:00\)](#)

### 深入了解

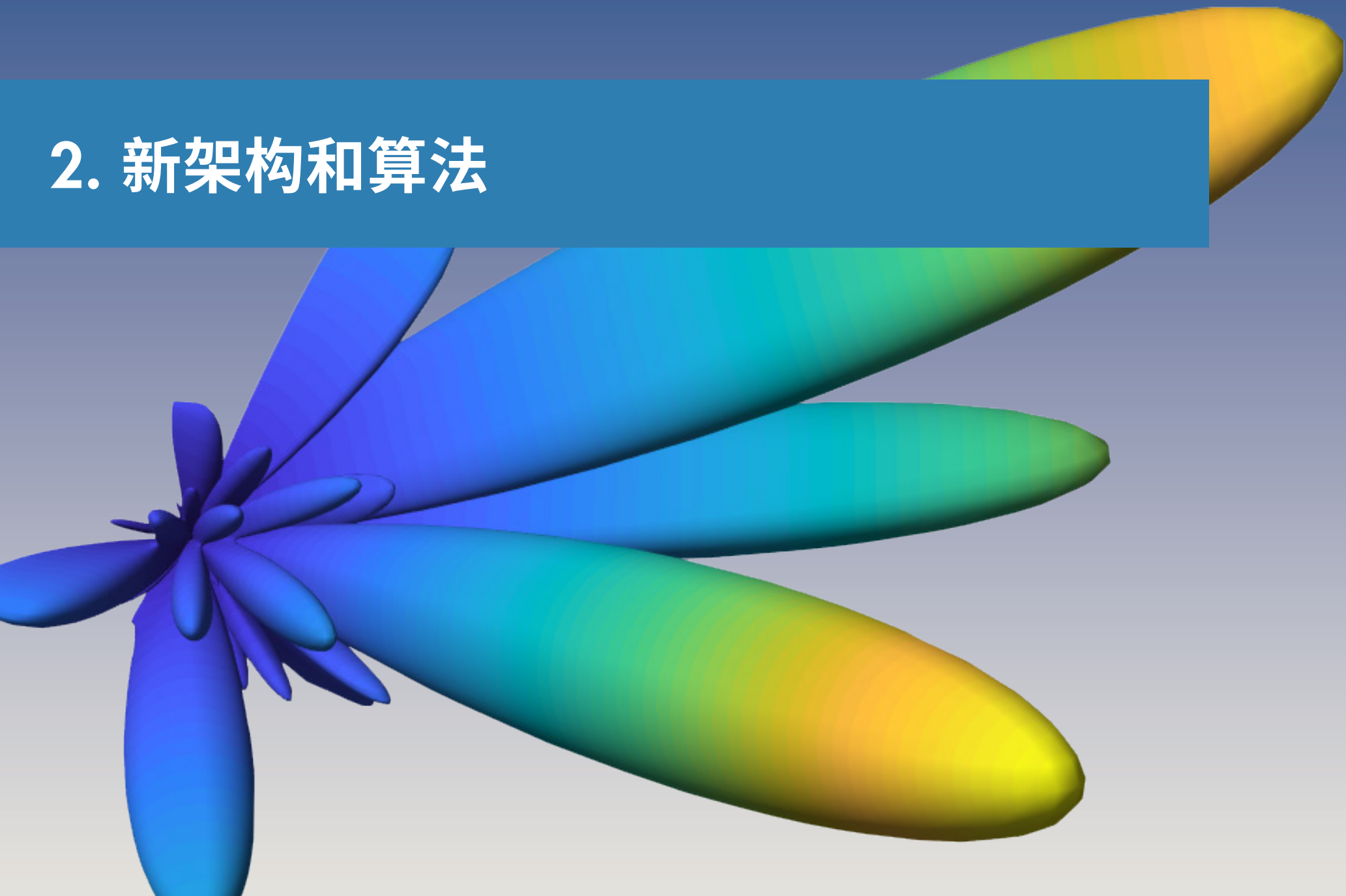
[5G 无线技术开发](#)

### 阅读

[Convida Wireless 行业内参: 促进 5G 无线标准的建立](#)

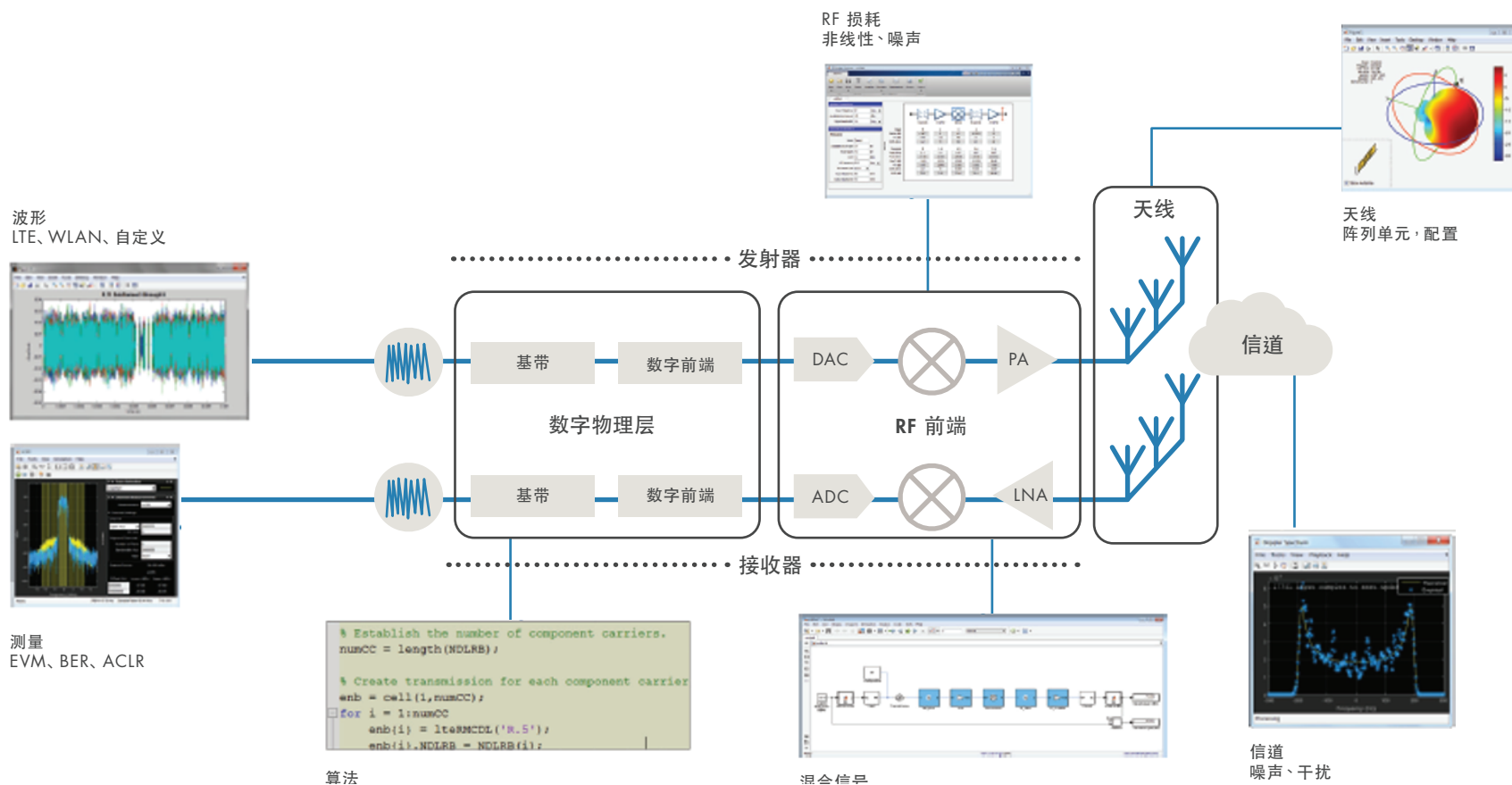


## 2. 新架构和算法



# 面向 5G 的新设计架构和算法

5G 宽带速度的飞跃将通过毫米波 (mmWave) 频率范围内的大规模 MIMO 通信以及更高效地利用频谱的新无线电算法实现。新的设计架构和算法将影响 5G 系统的各个方面: 从天线到 RF 电子再到基带算法。这些子系统的性能耦合地如此紧密, 以至于必须进行**联合**设计和评估。



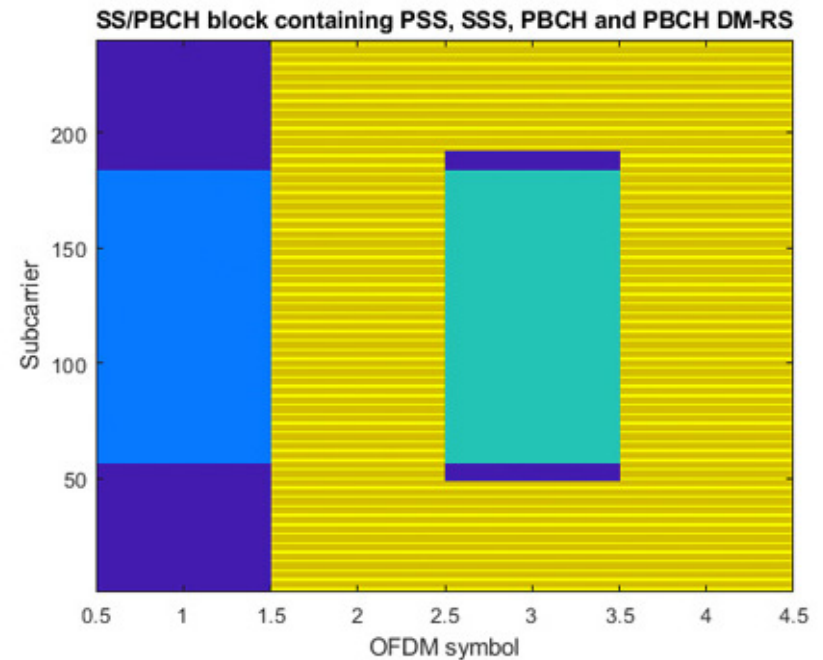
# 新的 5G 物理层算法有利于提高灵活性和频谱效率

5G 无线通信标准将凭借其增强移动宽带 (eMBB) 模式显著提升移动宽带的吞吐量。3GPP LTE Release 15 已实现多项技术和特性的标准化。

3GPP Release 15 中 5G NR 的主要元素包括:

- 更短的时隙持续时间, 与子载波间隔增加相对应, 可增加信号带宽和降低延迟
- 实现更高效的纠错和提高速率的新信道编码方法, 比如用于数据的 LDPC 和用于控制信息的极化码
- 在当前 (<6 GHz) 和毫米波 (>28 GHz) 频率下工作的空间信道模型

这些要素有可能改善带宽、延迟和系统效率, 同时也可能增加设计的复杂度和发布推迟。MATLAB 和 Simulink 中可供使用的新工具让您能够快速描绘 5G NR 的新特性, 在早期阶段处理关键的设计权衡问题。



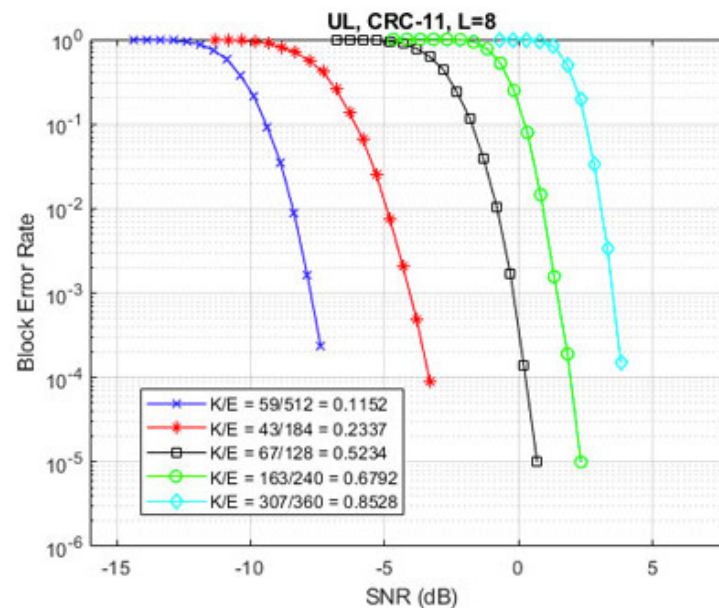
包括主要和辅助同步序列、广播信道和相关 DMRS 的 5G SSB 资源网格的详细视图。

# 新的 5G 物理层算法有利于提高灵活性和频谱效率 (续)

为帮助工程师开发符合 5G 标准的产品,帮助研究人员探索未来 5G 技术,MathWorks 于 2018 年 9 月发布了 *5G Toolbox™*。5G Toolbox 提供:

- 符合 3GPP 5G 标准的 OFDM 波形生成,使用可变的 NR 子载波间隔和帧参数集 (numerology)
- 下行链路信道和信号,包括传输信道和物理信道 (包括 CORESET 支持和传输、物理和控制信道)
- 新编码方案,如用于数据的 LDPC 和用于控制信息的极化码,用于纠错和提高数据速率
- 传播信道模型,包括 3GPP TR 38.901 中指定的抽头延迟线 (TDL) 和簇延迟线 (CDL) 信道模型
- 可自定义的链路级参考设计,使您能够生成 5G 信号,仿真端到端 NR PDSCH 链路吞吐量,执行同步过程,包括在 PBCH 波束扫描情况下的 MIB 解码

5G Toolbox 函数通过开放、可编辑的 MATLAB 代码予以实现,使您能够轻松理解并自定义算法实现。

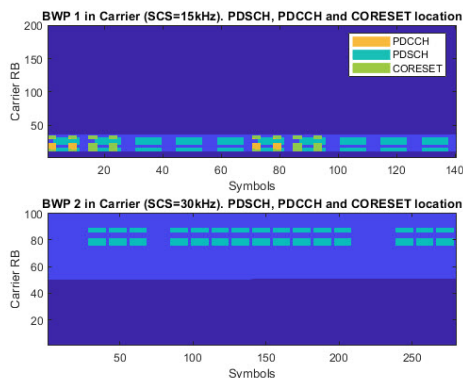
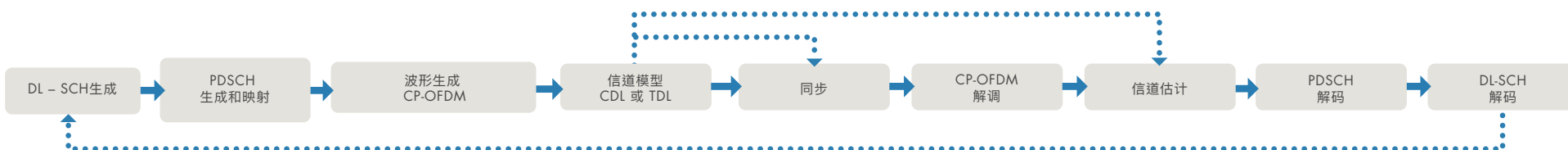


使用极化编码的误块率仿真的结果。

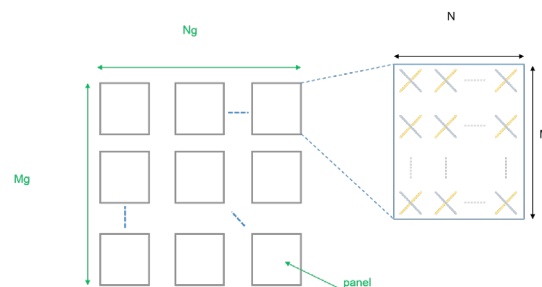
# 新的 5G 物理层算法有利于提高灵活性和频谱效率 (续)

使用 5G Toolbox, 您可以通过仿真端到端系统性能以及真实的 5G 传播信道来衡量不同算法和设计选择对系统性能的影响。

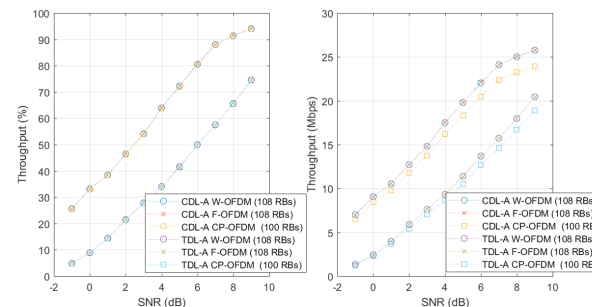
## 5G 波形



5G 资源网格



3GPP 38.901 信道模型



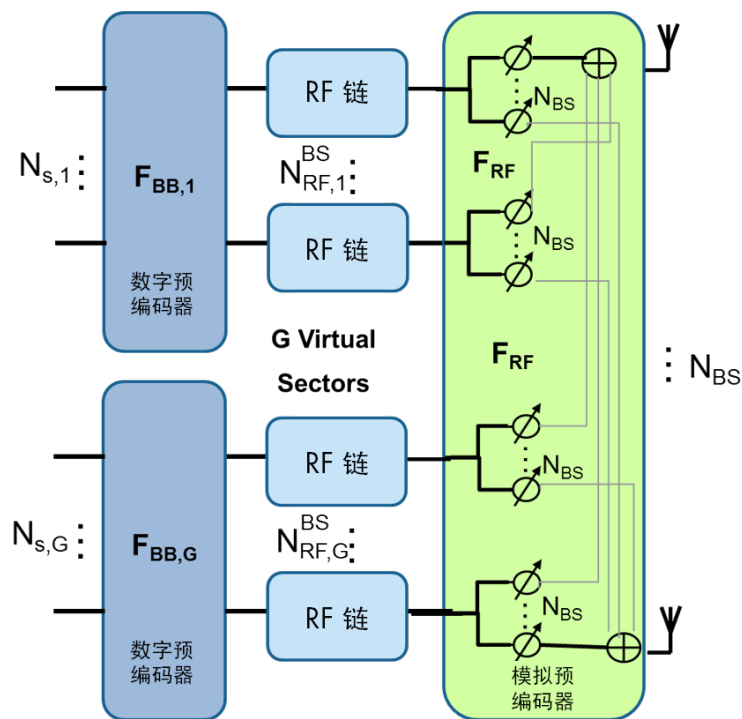
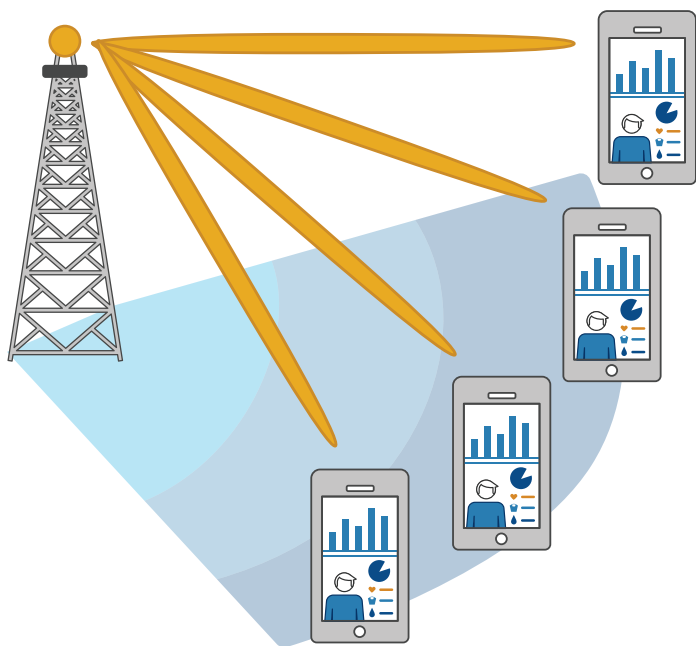
吞吐量测量

使用 5G 下行链路参考模型, 您可以插入自定义算法, 仿真和优化端到端链路性能, 并验证是否符合标准。

# 用于高增益波束成形的大规模 MIMO 阵列

5G 毫米波设计要求在基站 (eNodeB) 部署包含数百个天线单元的大规模 MIMO 天线阵列。由于天线阵列的尺寸与波长成比例减小, 因此毫米波频率的阵列最多可以比微波频率阵列小百倍。

在较小的面积内拥有大量天线单元使实现高波束成形增益变得切实可行。具有高度方向性的波束有助于抵消较高工作频率下增加的路径损耗, 因为波束将功率控制在特定方向上。



同一组中的 UE 使用具有相同仰角的波束 (左) 和混合波束成形阵列架构 (右)。

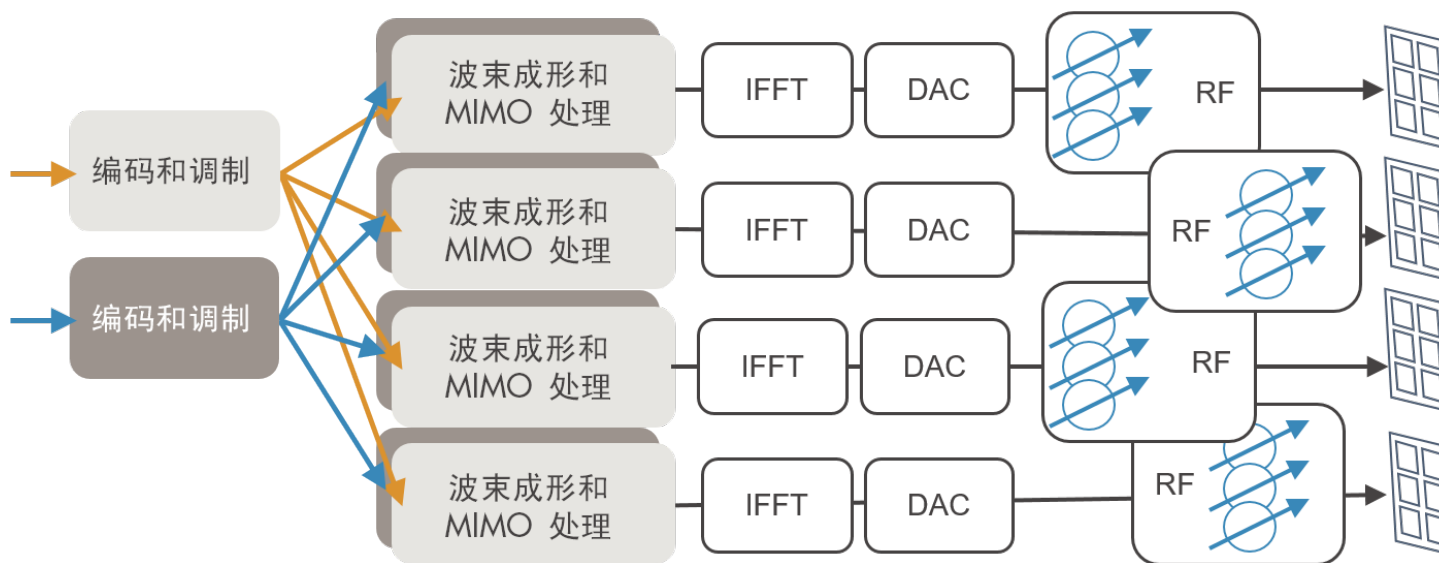
# 大规模 MIMO 的行为级仿真

典型的阵列设计包括阵列几何结构、单元间距、单元的晶格结构、单元锥削和耦合效应等参数。通过调节设计参数，可以实现阵列的行和列的锥削，从而减小旁瓣电平。

因此，实现最佳设计需要天线阵列和波束成形算法的组合模型，以便模拟它们的相互作用和对系统性能的影响。这对当前的 3G 和 4G 设计工

具造成了压力，这些设计工具通常将天线设计与系统架构和信号处理算法分离。典型的 MIMO 仿真时间也通常比 3G 和 4G 仿真长 10 倍。

天线阵列系统的行为级仿真可以解决这些难题。在行为级别进行仿真会缩短仿真时间。这使工程师能够试验不同的阵列架构和算法，仿真阵列和相关算法的性能，并迭代地调整参数以减轻天线耦合的影响。



大规模 MIMO 天线阵列设计需要仿真天线、RF 和数字子系统之间的相互作用。

# 优化天线增益和信道容量之间的取舍

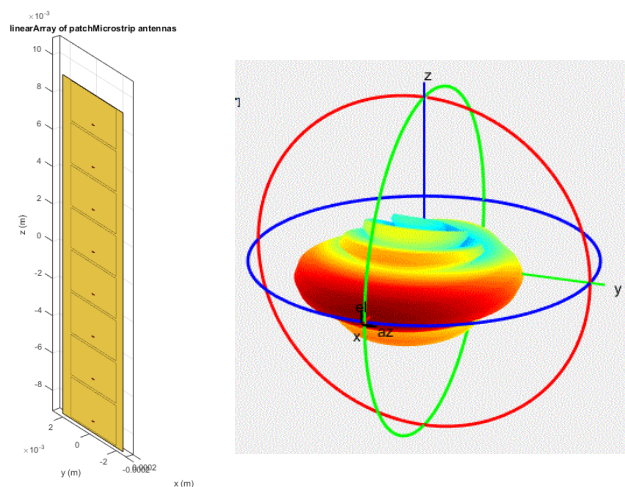
作为设计过程的一部分，用较窄的波束实现较大的天线增益必须与如下事实相平衡：MIMO 系统基于散射环境，其也依赖于较宽的波束方向图来最大化信道容量。

这是需要评估的关键权衡之一，可以通过行为仿真迭代地完成。

下图显示了如何利用面向 MIMO 阵列设计任务的 *Phased Array System Toolbox™* 和 *Antenna Toolbox™* 来开发和可视化行为仿真。

## 配置初始阵列

使用全向余弦阵元等天线阵元模型，并使用通过电磁 (EM) 工具计算得出或在实验室中测量得出的方向图快速过渡到更准确的分析。可视化阵列性能特征，如下图所示的辐射方向图。

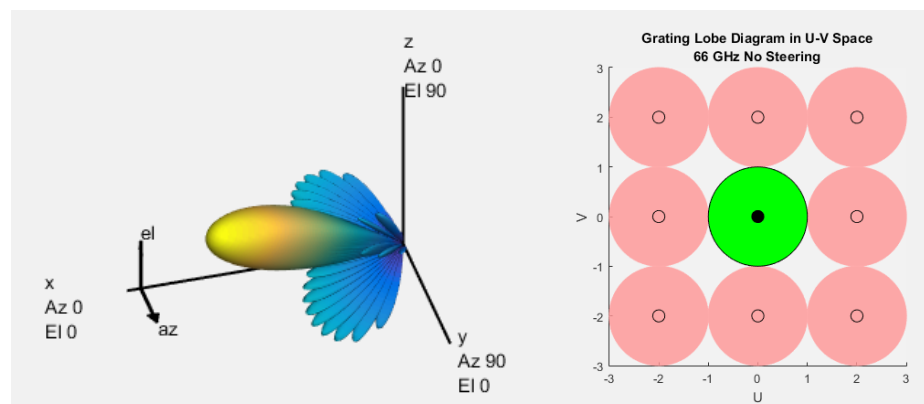


8x1 ULA 子阵列和相应的辐射方向图

## 使用设计参数进行交互实验

改变阵列大小、阵列几何结构、单元间距和锥削。可视化生成的几何结构、2D 和 3D 方向性以及栅瓣图。

此例显示了 66 GHz 64x64 单元设计 (使用 Antenna Toolbox 设计) 的波束方向图和栅瓣图。



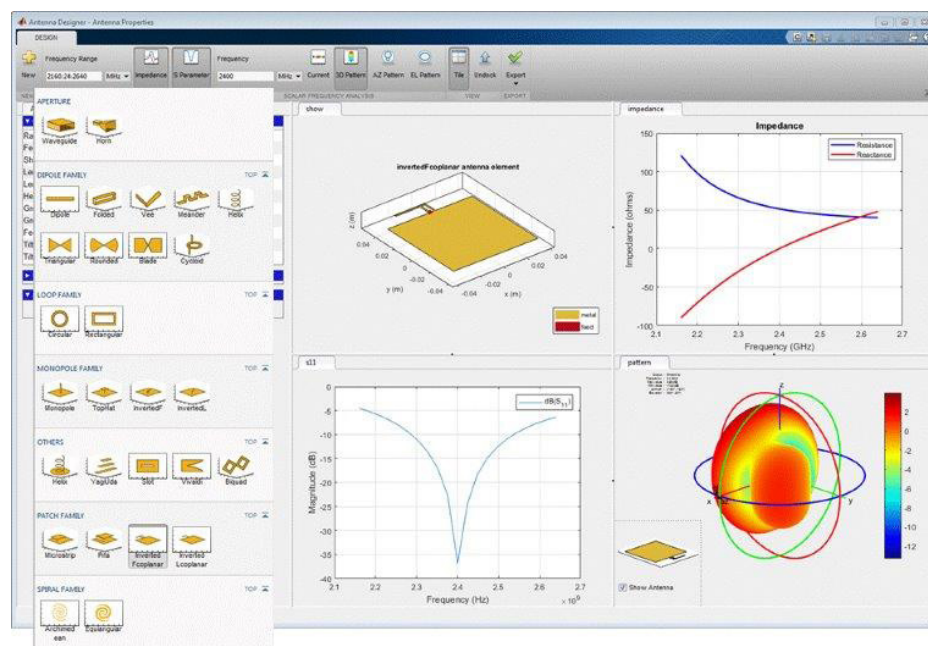
66 GHz 64x64 单元设计的波束方向图和栅瓣图

# 设计天线阵列单元

然后可以添加包含相应的自由空间方向图的天线元件详细设计，以提高天线阵列模型的逼真度。

右图显示了使用 Antenna Toolbox 中的全波 EM 解算器生成的单元方向图。该工具箱使用矩量法 (MoM) 算法计算端口属性 (如阻抗)、表面属性 (如电流和电荷分布) 以及电场属性 (如近场和远场辐射方向图)。

您可以使用 Antenna Toolbox 以 2D 和 3D 形式可视化天线的几何结构和分析结果。也可将天线和阵列模型集成到无线系统中，并使用阻抗分析方法设计匹配网络。该工具箱还提供用于仿真波束成形算法的辐射方向图。

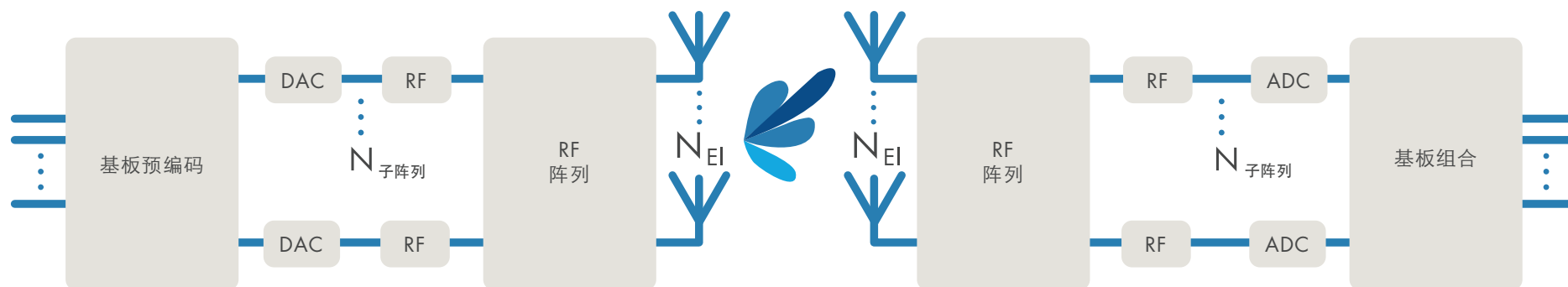


天线设计器应用程序提供了用于天线选择、设计和分析的交互式工具。

# 混合波束成形

虽然较小的波长能够在小外形尺寸中实现大规模 MIMO, 但与毫米波频率相关的信号路径和传播难题也会增加。为了实现更好的波束成形控制和灵活性, 理想的做法是对每个天线阵列单元实施独立的加权控制, 其中每个单元具有专用的发/收 (T/R) 模块。但由于成本、空间和功率的限制, 这种做法通常不切实际。

混合波束成形是一种在数字和 RF 域之间划分波束成形的技术, 以降低与 RF 信号链数量相关的成本。混合波束成形将多个阵列单元组合成子阵列模块, 并有一个 T/R 模块专用于阵列中的子阵列。



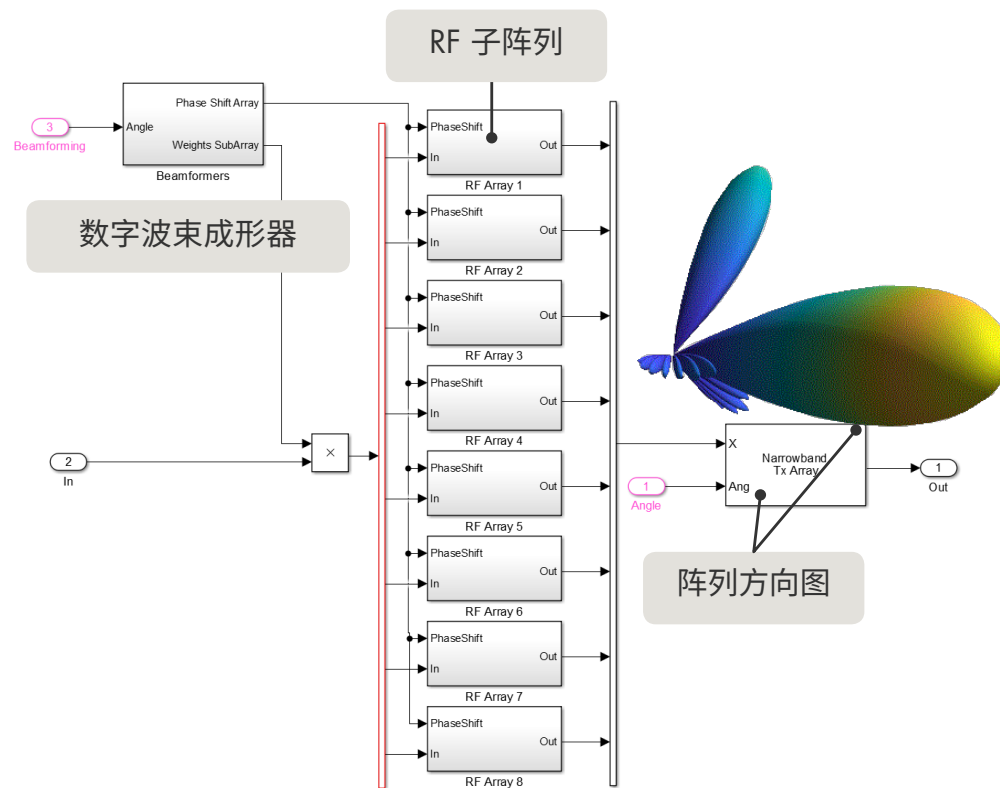
混合波束成形架构

# 混合波束成形 (续)

混合波束成形设计中的一个关键难题是在满足所需性能参数的同时符合实施成本限制。Simulink® 能够对 RF 域和数字域组件进行统一的多域建模和仿真。RF Blockset™ 中的电路包络仿真可确保混合系统的快速仿真。

在 Simulink 中，可以评估阵元数量和预编码参数值，以确保在一系列转向角范围内达到系统性能要求。在 MATLAB® 中可以计算数字和 RF 波束成形权重并纳入 Simulink 模型中。

该图显示了多域模型的一部分，其中包含数字波束成形权重，用于形成馈送到 RF 子阵列的信号，并应用了相移。得到的混合权重可产生所需的阵列方向图。



MATLAB 中的混合波束成形设计

有关详细讨论，请参阅白皮书大规模 MIMO 相控阵系统的混合波束成形。该白皮书使用 64x64 单元、66 GHz 毫米波示例，并演示了天线阵列建模和数字与 RF 域之间的波束成形划分。

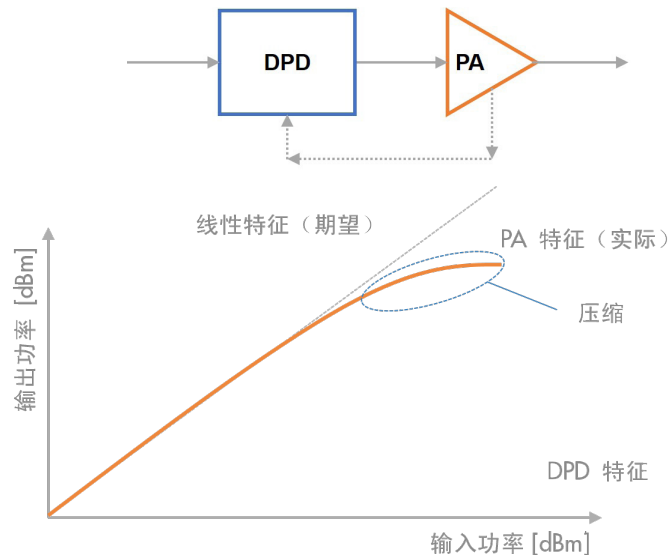
# 功率放大器建模和线性化

功率放大器 (PA) 的线性度是每个发射器的关键规格。约束功率放大器于高线性区域工作根本不是可行的商业解决方案，特别是在更高的频率和更大的带宽上。为此，使用数字预失真 (DPD) 技术来提高发射器的效率，同时限制频谱增生和信道间干扰。

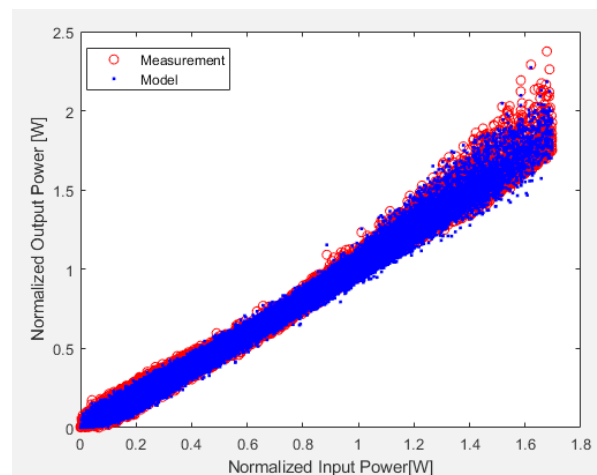
开发高质量 DPD 算法具有挑战性，因为它需要深入理解功率放大器和相邻子系统 (如天线) 引入的效应。由于功率放大器是非线性的，并且受有限记忆效应的影响，功率放大器的特征在很大程度上取决于驱动信号

的类型。例如，PA 的行为取决于驱动信号的带宽、其频谱占用以及峰值平均功率比 (PAPR)。

由于这种复杂性，通常在实验室中开发 DPD 算法，并使用允许将算法与实际 PA 一起测试的快速原型平台。虽然这种方法对于验证和微调算法很有用，但在实际 PA 尚不可用或者探索算法 DPD 设计空间时，这种方法很难应用。



使用数字预失真的放大器线性化的概念表示

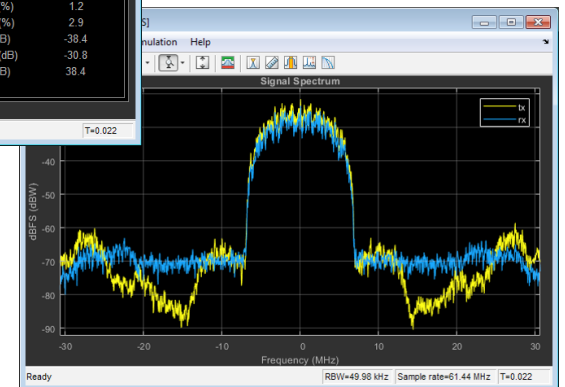
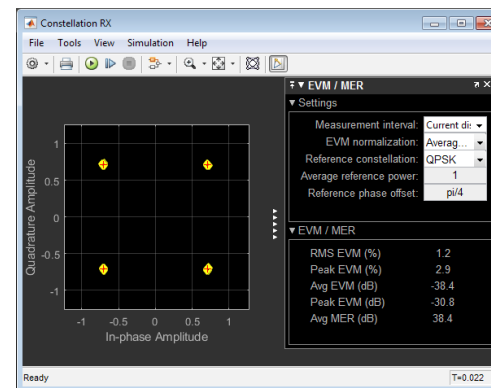
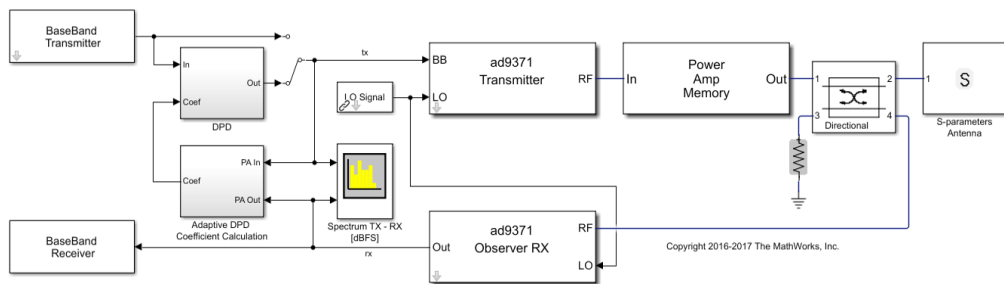


通过 MATLAB 使用测量数据鉴定并在 RF Blockset 中使用电路包络仿真的功率放大器记忆多项式模型示例

# 功率放大器建模和线性化 (续)

出于这些原因,建议在实验原型开发和测试之前,使用基于模型的方法探索和开发 DPD 算法。但是,这只有在功率放大器的优质模型可用时才可行。RF Blockset 提供了不同抽象级别的功率放大器模型,包括广义记忆多项式模型 (Volterra 级数的简便推导)。使用功率放大器输入/输出特征来识别行为模型,这些特征来自使用 IC 设计工具进行的电路级仿真或来自实际测量。设计人员可以利用所提供的识别路线或使用自己的过程来计算级数系数。在几秒钟内,用户就可以尝试使用不同的多项式阶数和记忆深度。

识别模型后,就可以在系统仿真环境中与实际(且符合标准)的基带信号、用于低功率 RF 发射器和观察者接收器的模型、用 S 参数表示的天线终端以及各种自适应 DPD 算法一起使用。通过这种方法,设计人员可以更快速地进行创新,并在考虑分散性和非线性效应的同时验证新的想法,而这些效应在实验室中难以重现和理解。



使用功率放大器和自适应 DPD 算法的闭环收发器模型。经过实验室验证的 AD9371 模型包含现实效应。功率放大器的 Volterra 级数模型包含非线性和记忆效应。环路仿真包括低功率和高功率效应、定时和信号带宽上的频率选择性。自适应 DPD 算法提高了信号带宽内的器件线性度。

显示频谱分析 (右下) 和接收的星座 (左上) 的图形

# 了解更多

**准备更深入地钻研? 查看这些资源以深入了解有关 5G 系统的新架构和算法的更多信息。**

## 观看

[什么是 5G Toolbox? \(2:06\)](#)

[5G 无线通信的空间多路复用和混合波束成形 \(28:35\)](#)

[使用 MATLAB 对射频功率放大器进行建模并借助 DPD 增加无线发射器线性度 \(25:11\)](#)

## 深入了解

[5G 无线技术开发](#)

[波束成形](#)

[RF 系统](#)

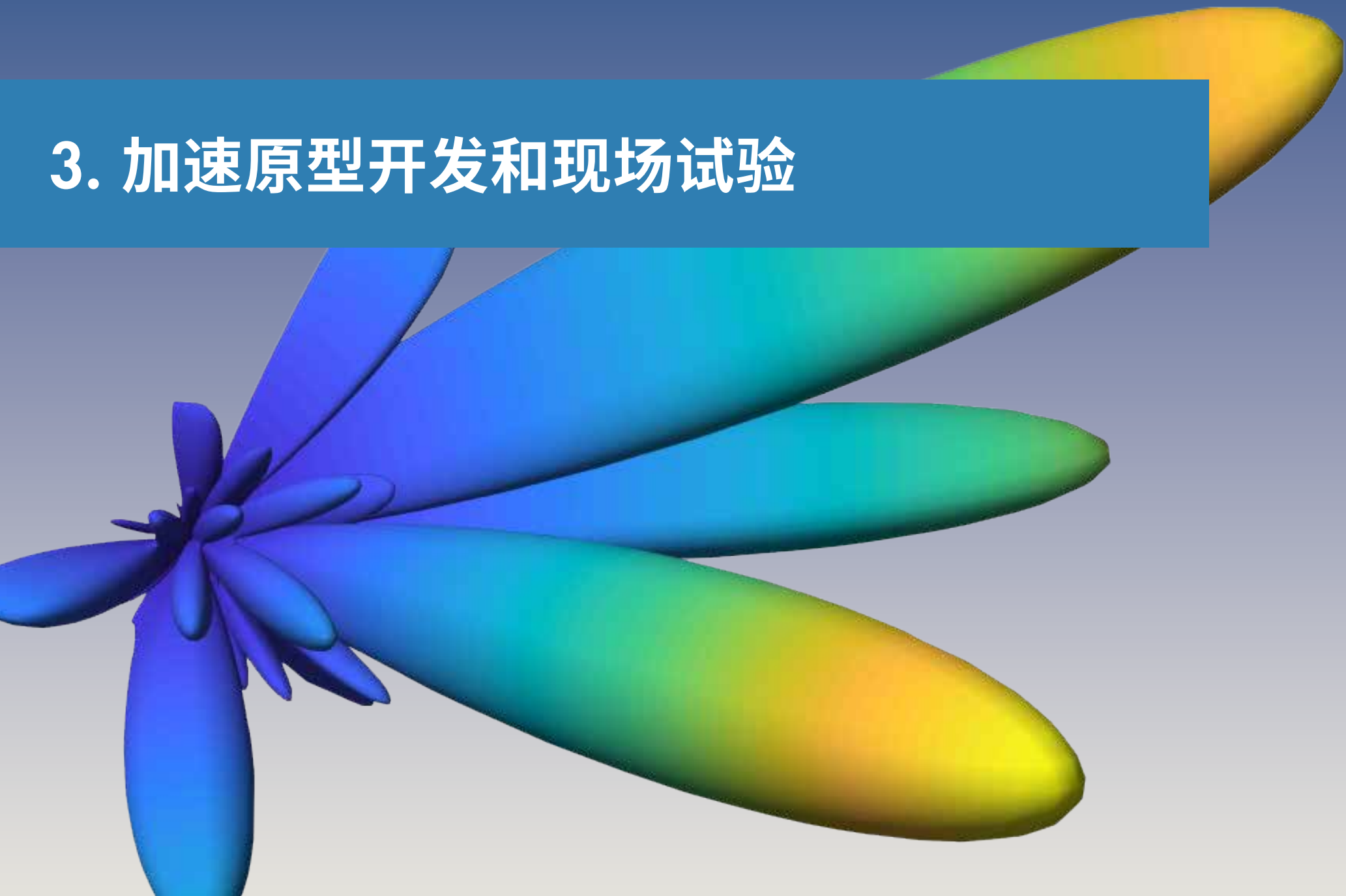
[信道建模](#)

[大规模 MIMO](#)

[华为公司开发用于无线通信的射频系统](#)



### 3. 加速原型开发和现场试验



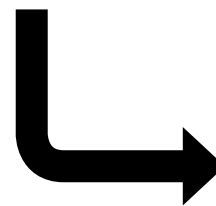
# 加速原型开发和 5G 现场试验

为了评估新的 5G 算法和架构的性能，工程师需要开发概念验证原型，并让新设计做好现场试验的准备。通常，使用具有嵌入式处理器的 FPGA 硬件针对设计的某些部分构建原型。这些平台通常被称为硬件测试平台，它们支持在现场快速开发原型以及测试新技术和设计变更。

在没有外部协助的情况下，典型的研发团队可能很难实现基于 FPGA 的无线电原型和测试平台。研发工程师具有深厚的信号处理和通信算法开发专业知识，但在硬件实现方面的经验相对较少。这种经验差距由于工具和工作流程的不足而加剧。虽然研发工程师通常使用像 *MATLAB* 这样的高级语言，但硬件工程师使用他们自己的设计工具和硬件描述语言 (HDL)。

领先企业转而使用 *MATLAB* 和 *Simulink* 进行基于模型的设计，以弥合这些差距，并让研发工程师能够将新的 5G 算法和设计变更快速移植到基于 FPGA 的测试平台。

算法和  
模型



在基于 FPGA 的硬件上为 5G 现场试验快速开发新算法的原型。  
(征得华为公司许可的图像)

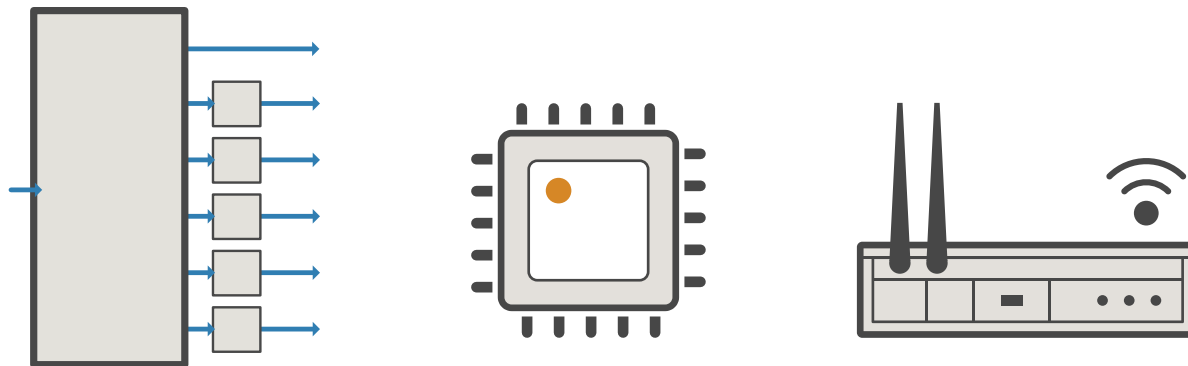
# 使用基于模型的设计进行快速原型开发

许多无线工程师依靠 MATLAB 开发和仿真物理层通信算法。通过利用 MATLAB 和 Simulink 进行基于模型的设计,无线工程师能够在 FPGA 或 SoC (片上系统) 原型开发平台上使用通用模型进行仿真和实现。他们不再需要维护同一设计的不同表示,并且可以使用 MATLAB 代码作为参考和测试平台来验证硬件设计。

使用基于模型的设计,研发和系统工程师可以在没有硬件专家协助的情况下开发和调试算法的硬件原型。他们可以根据需求变化快速更新原型。无需将抽象算法交给硬件团队来解释和实现,他们可以交付高效、经过充分验证的 VHDL® 或 Verilog® 实现。

利用基于模型的设计,5G 研发团队可以:

- 在 MATLAB 中探索算法和开发符合标准的参考和测试平台
- 在 Simulink 中使用定点算法模块开发硬件精确的模型
- 以原型上的 FPGA 结构和处理器为目标,将模型划分为多个子系统
- 自动生成独立于目标或针对目标优化的 HDL 和 C 代码
- 在 SDR 和其他 FPGA 或 SoC 硬件上自动建立原型
- 将生成的代码集成到完整的无线电平台设计中并进行测试

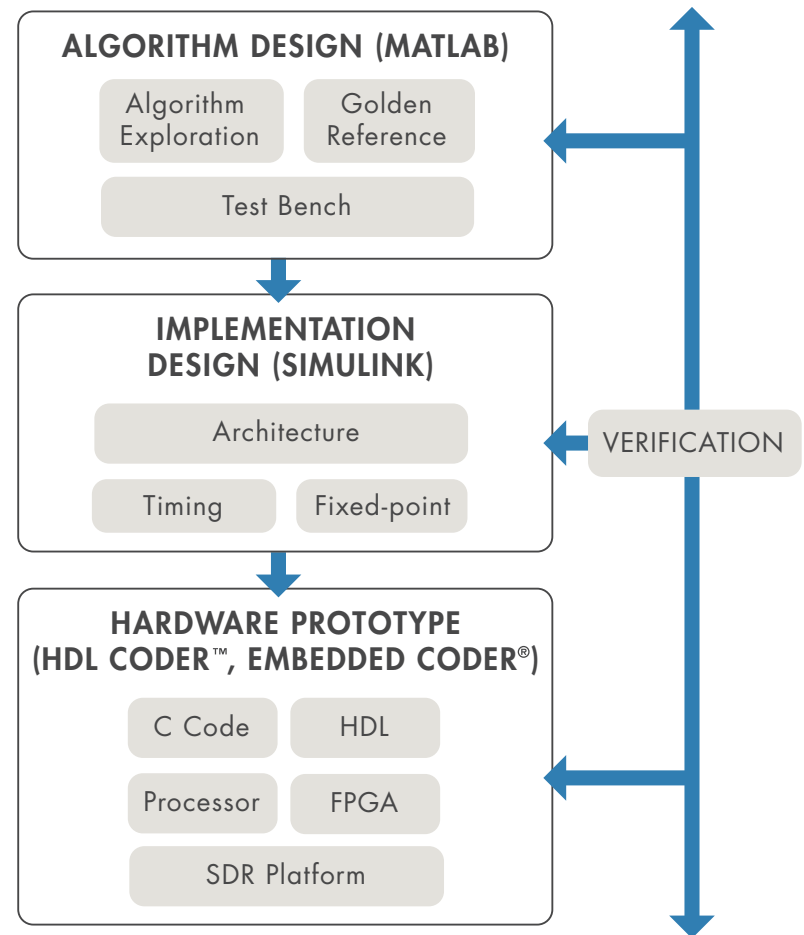


# 使用基于模型的设计进行快速原型开发 (续)

此过程会生成经全面验证的算法实现，运行从 Simulink 模型自动生成的 C 和 HDL 代码。商用软件无线电 (SDR) 框架的支持包可进一步自动化集成到收发信号的实时无线电应用之中。

要将经过验证的算法部署到定制硬件测试平台上，您可以使用标准 FPGA 开发工具将生成的代码与其他自定义接口和外部 IP 内核集成。

需要更改时，您可以快速修改算法模型，在仿真中进行验证，重新生成代码（通常只需几分钟），将代码集成到 FPGA 开发环境中，并将其合成到 FPGA 实现中。生成的代码条理清晰、可读性强且功能准确。



使用基于模型的设计进行 5G 算法的快速原型开发

# 案例研究:开发 LTE OFDM 调制器和检测器

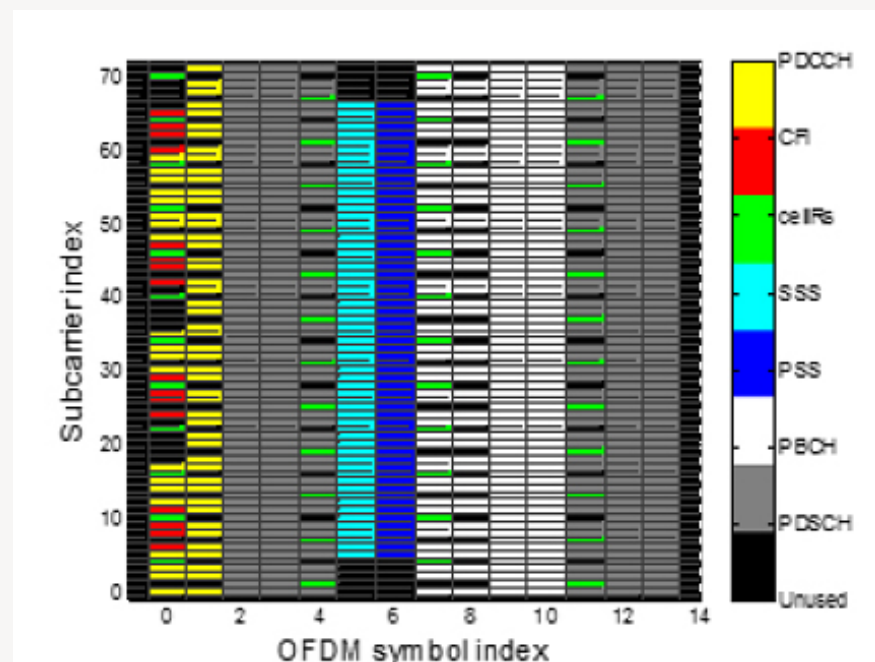
本示例说明了如何在符合 LTE 标准的 OFDM 调制器和检测器背景下应用基于模型的设计。此设计需要峰值检测算法,以解码符合 LTE 标准的信号并在硬件中高效执行。

此过程从 MATLAB 和 LTE System Toolbox 开始探索算法选项,以生成符合标准的参考波形和测试平台。

如这里所示,可视化 LTE 资源网格有助于验证波形是否正确构建并符合标准。

下图显示了将 LTE 小区搜索检测算法转换为 HDL 代码(可直接用于 FPGA 原型开发或实现)的步骤:

- MATLAB 中的行为级黄金参考
- Simulink 中的硬件精确模型
- 从 Simulink 模型自动生成的 HDL 代码

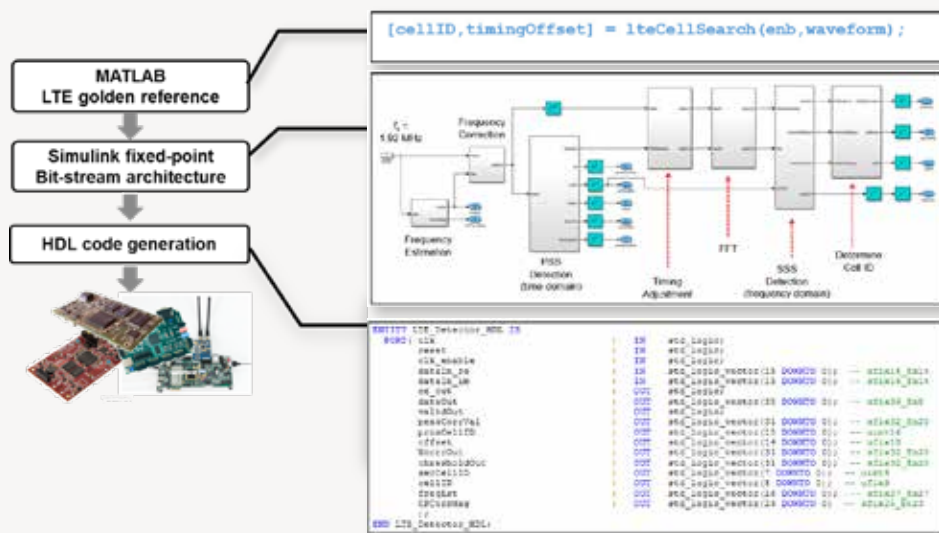


表示符合标准的波形的 LTE 资源网格

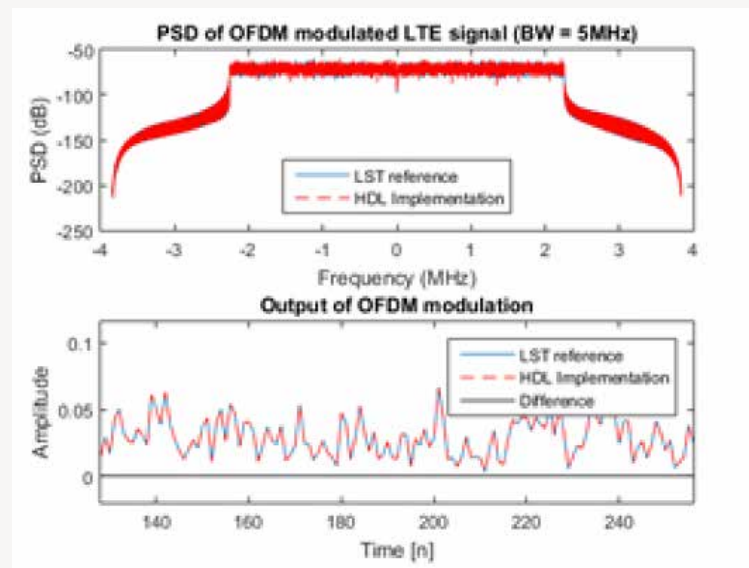
# 案例研究:开发 LTE OFDM 调制器和检测器 (续)

检测器执行频率估计和校正、PSS 检测、定时调整、FFT 和 SSS 检测，以确定检测到的小区组的 LTE 小区标识。使用符合 LTE 标准的波形验证了该模型，它在仿真以及 Xilinx® Zynq® SDR 上运行的空中传输测试中都成功检测到小区标识。

在 MATLAB 中可以将仿真和硬件测试的输出与参考算法进行比较并可视化，如下所示。



用于 LTE 小区搜索的 MATLAB 参考代码 (顶部)，以及用于设计和生成该算法的 HDL 实现的工作流程 (底部)



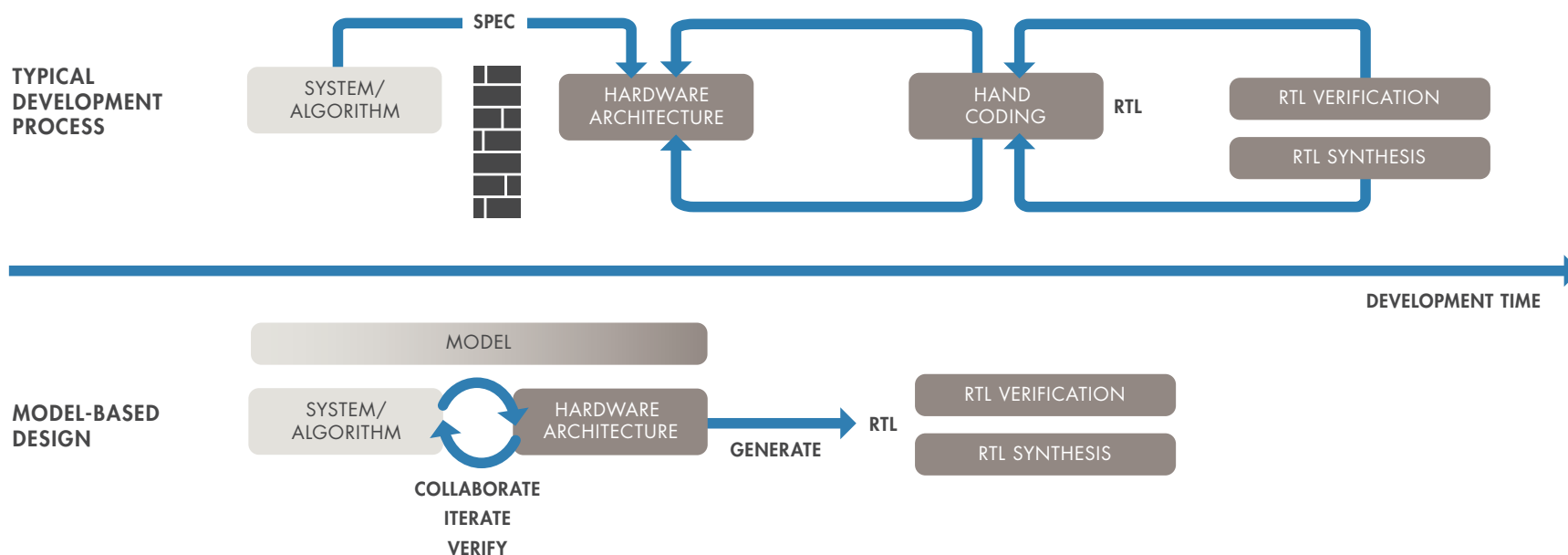
验证 OFDM 调制的 HDL 实现

要了解更多信息，请下载示例：[构建符合 LTE 标准的 OFDM 调制器和检测器](#)，以使用 [HDL Coder™](#) 实现，并使用 [LTE System Toolbox](#) 验证 HDL 实现模型。

# FPGA 和 ASIC 上的 HDL 实现

基于模型设计并不止于原型的建立。无线工程师正在成功地使用 MATLAB 和 Simulink 与自动 HDL 生成，以此来生成符合生产 FPGA 和 ASIC 设计的性能、尺寸和功率要求的算法实现。针对用于多速率滤波、峰均比抑制、数字预失真和基带处理的算法，迭代工作流程支持快速开发和验证其高效硬件实现。

该模型生成独立于硬件的 HDL 代码，可用于任何 FPGA 或 ASIC。可以通过修改模型、在 Simulink 中验证结果以及重新生成 HDL 代码，针对其他架构执行优化。HDL Coder 与 SoC 和 FPGA 设计集成，以提供针对目标优化的实现。这可以加速 SoC 和 FPGA 设计开发，使团队能够在数天或数周，而非数月内完成这项工作。



使用基于模型的设计来加速 FPGA 和 ASIC 上的算法实现

# 谁在使用此工作流程进行 5G 原型开发? (续)

## 华为:加速 5G 原型开发

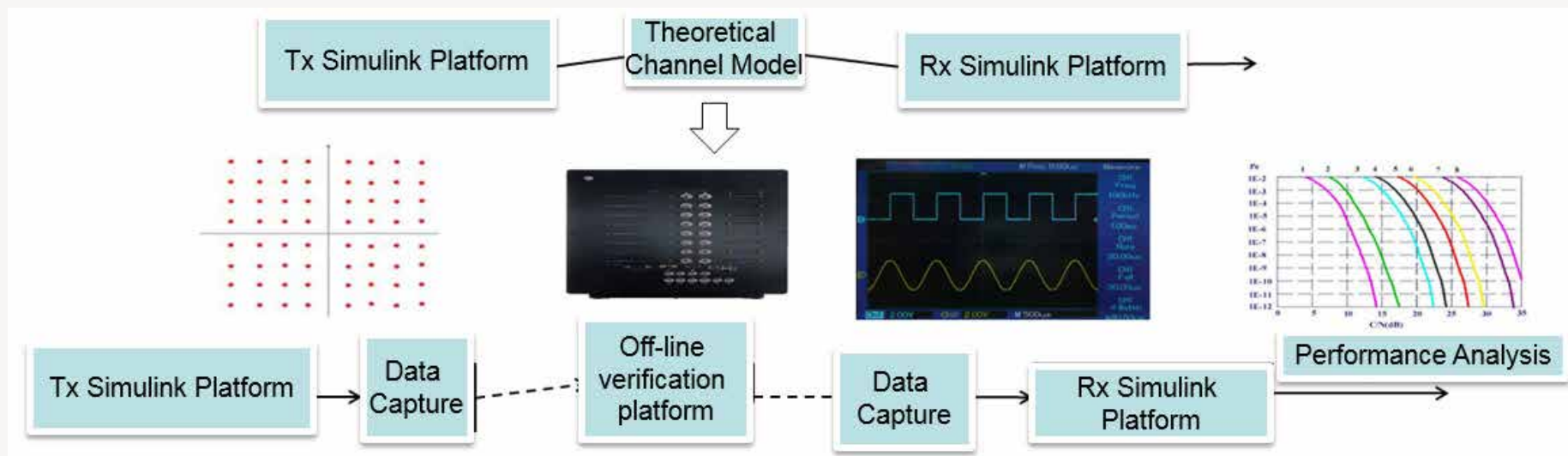
华为的算法架构与设计总监 Kevin Law 就有关使用 MATLAB 和 Simulink 加速 5G 原型开发的 5G 开发工作流程提供了内部人士观点。

有关华为工程师在 5G 研发中如何使用 MATLAB 和 Simulink 的详细信息, 请参阅用户案例:

华为的 5G 研发: 行家看点 — 利用 MATLAB 和 Simulink 加速从理论到工程实践的过渡

“当我们进行 5G 原型设计和开发时, 从 MATLAB 自动生成 HDL 代码以进行硬件验证。当我们在现场测试中评估算法时, 我们可以非常高效地查看整个系统的性能和状态, 并找出任何潜在的问题。”

— Kevin Law, 华为算法架构与设计总监



使用 Simulink 进行超高速算法仿真和离线验证

# 谁在使用此工作流程进行 5G 原型开发? (续)

## 爱立信:部署 5G 硬件测试平台

为了在硬件测试平台上完成和部署全面的概念验证,爱立信的一个开发小组将使用 MATLAB 和 Simulink 开发的算法与其他系统组件集成在标准的 FPGA 开发环境中。具体来说,他们将使用 HDL Coder 从 Simulink 自动生成的 HDL 代码与手动编码的自定义接口以及来自 FPGA 供应商的用于软核、DMA 和物理接口等组件的 IP 内核集成在一起。需要更改时,工程师会在 Simulink 中做出更改,重新生成代码(通常只需几分钟),将代码集成到 FPGA 开发环境中,然后将其合成到 FPGA 实现中。爱立信工程师指出,生成的代码条理清晰、可读性强且功能准确。

有关爱立信如何使用硬件测试平台进行快速硬件原型开发以及使用 MATLAB 和 Simulink 自动生成 HDL 代码的详细信息,请观看视频:  
[使用 HDL Coder 设计无线电测试平台 \(22:44\)](#)



“当出现新的设计思路导致需要新设计时,我们使用 HDL Coder 能够证明改变是可以接受的,并且在不到一个星期的时间内就可以得到有效的演示。”

— Tomas Andersson, 爱立信

## 了解更多

**准备更深入地钻研? 查看这些资源以深入了解有关加速 5G 原型开发和现场试验的更多信息。**

**高通公司:** [连接系统和 HDL 世界 – 快速 RTL 生成 \(会议记录\)](#)

**华为:** [使用 Simulink 的系统级 ASIC 算法仿真平台 \(会议记录\)](#)

### 观看

[LTE 设计的 FPGA 实现 \(41:53\)](#)

### 下载代码

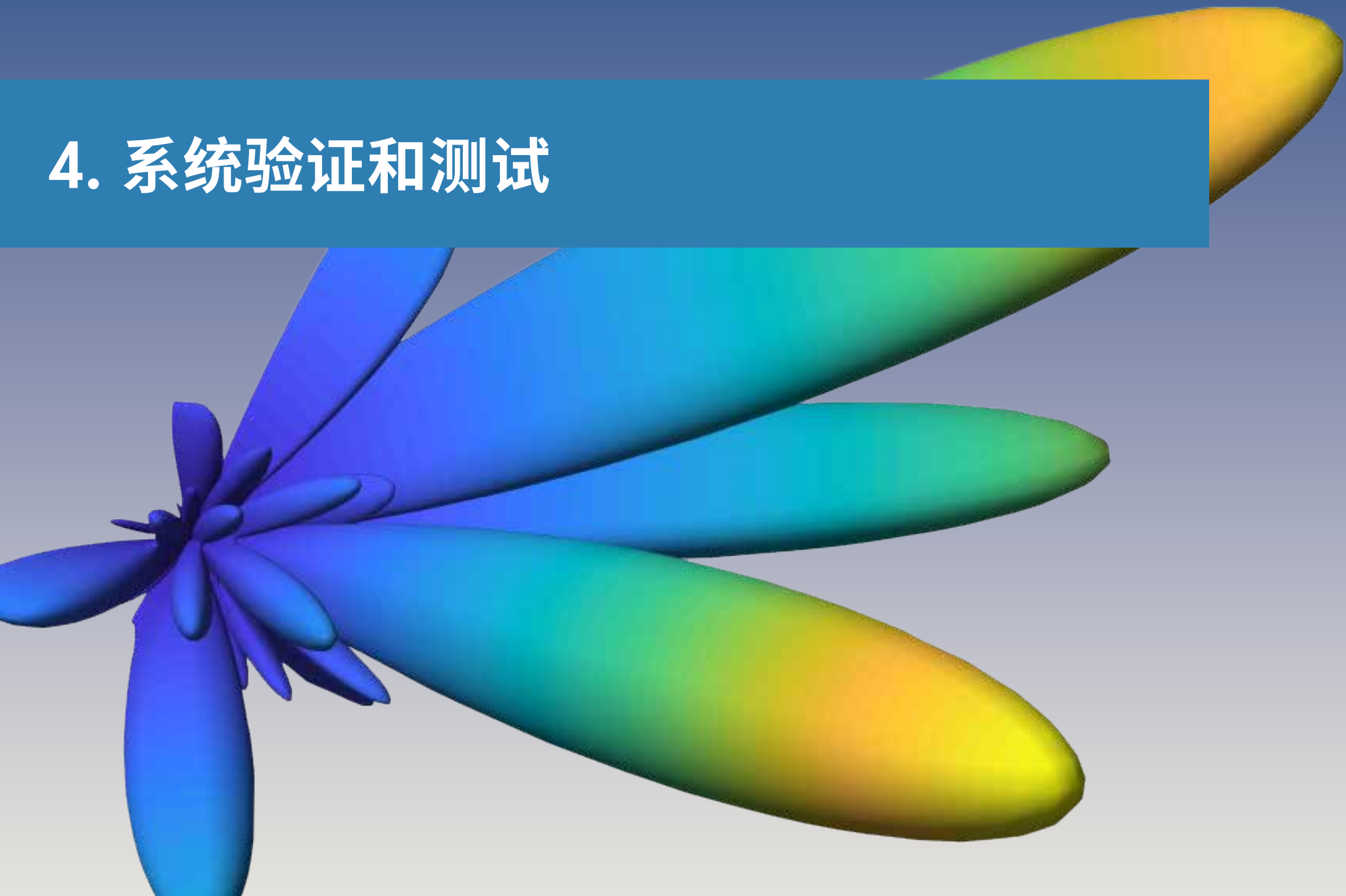
[LTE OFDM 调制器和检测器的 HDL 实现](#)

### 深入了解

[HDL 代码生成和验证](#)

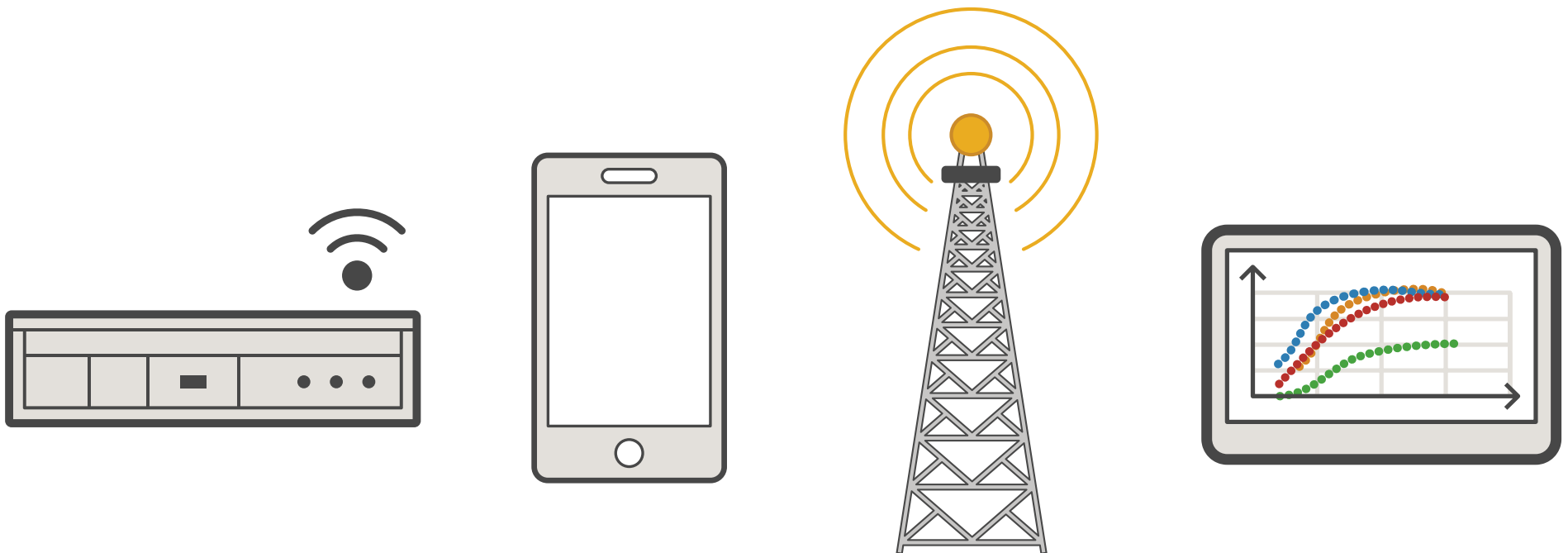


## 4. 系统验证和测试



# 5G 系统验证和测试

在完成基带、RF 和天线阵列设计后，必须在实验室以及现场（在现实条件下）验证系统设计是否产生令人满意的结果。为此，工程师需要使用接口来处理现场 5G 信号和波形，以测试和测量设备。



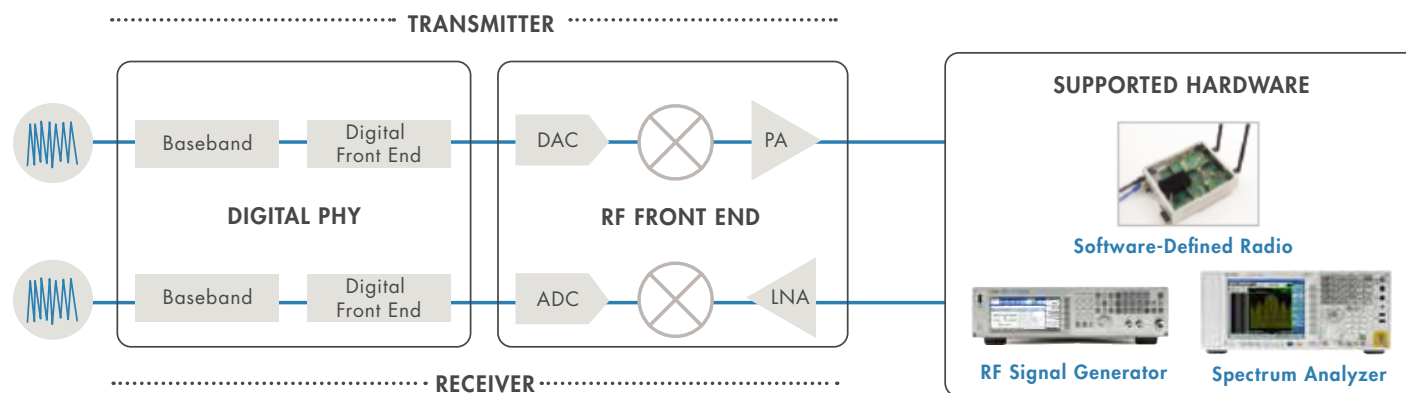
# 5G 现场信号发生和接收

通过连接到软件无线电 (SDR) 和 RF 仪器硬件, 您可以在实验室或现场的现实条件下使用 *MATLAB*® 和 *Simulink*® 执行空中测试, 以验证仿真中的 5G 设计。在仿真阶段使用的测试平台、信号发生器、示波器和测量可以重用于硬件测试。这种方法不再需要在不同的软件环境中重新创建测试, 缩短了测试开发时间, 并减少了错误。

您可以采集现场 5G 或 LTE 信号, 以用于分析以及与基带仿真结果进行比较。算法设计人员可以使用采集到的信号来测试其算法, 而 RF 团队可以使用该配置验证其 RF 设计。[下载演示现场 LTE 信号生成和采集功能的示例。](#)

在现场测试过程中, 快速修改测试参数和测试脚本以适应不同测试场景的能力很重要。使用 *MATLAB* 可以灵活地自定义测试, 诊断和调试在限制更多的软件环境中难以解决的细微问题, 以及测试和测量仪器通常提供的加密波形。

*MATLAB* 和 *Simulink* 支持一系列可用的 SDR 硬件以及来自 Keysight、Rohde & Schwarz、National Instruments 和 Anritsu 等 RF 仪器供应商的 RF 信号发生器和频谱分析仪。有适用于 Xilinx Zynq 和 FPGA Radios; USRP® N、X 和 E 系列无线电; PlutoSDR 以及 RTL-SDR 的 SDR 支持包。凭借这些选项, 您可以选择最适合您的需求和预算的硬件。



*MATLAB* 和 *Simulink* 支持使用一系列可用的 SDR 和 RF 仪器硬件进行空中传输 (OTA) 测试, 从而简化 OTA 测试与仿真结果的比较。

# 通过软件无线电生成 5G 现场信号

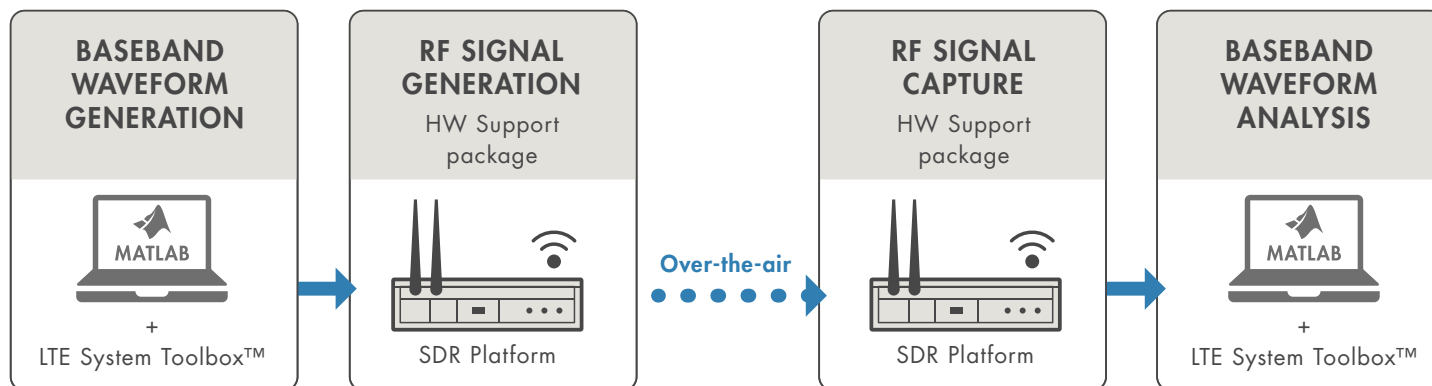
软件无线电 (SDR) 是一种无线设备, 包括具有 FPGA 的可配置 RF 前端或用于执行数字功能的可编程 SoC。商用 SDR 硬件可以在不同的频率下工作, 发送和接收符合标准的定制信号, 以测试基带算法和 RF 前端设计。

您可以将 MATLAB 和 Simulink 以及 SDR 硬件作为经济实惠的实时平台使用, 处理一系列无线工程任务, 包括:

- 利用现场 RF 信号进行空中传输实验室测试和现场测试
- 采集信号用于测试后分析
- 使用自定义无线电功能进行快速验证



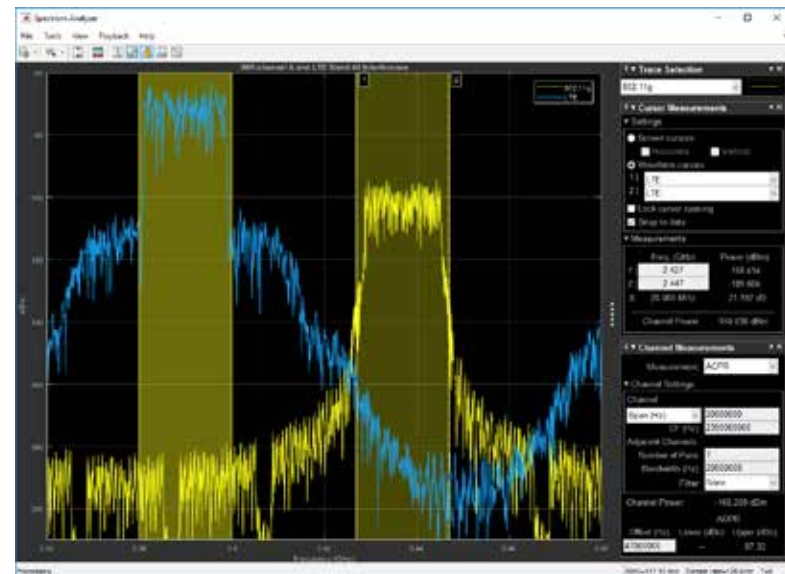
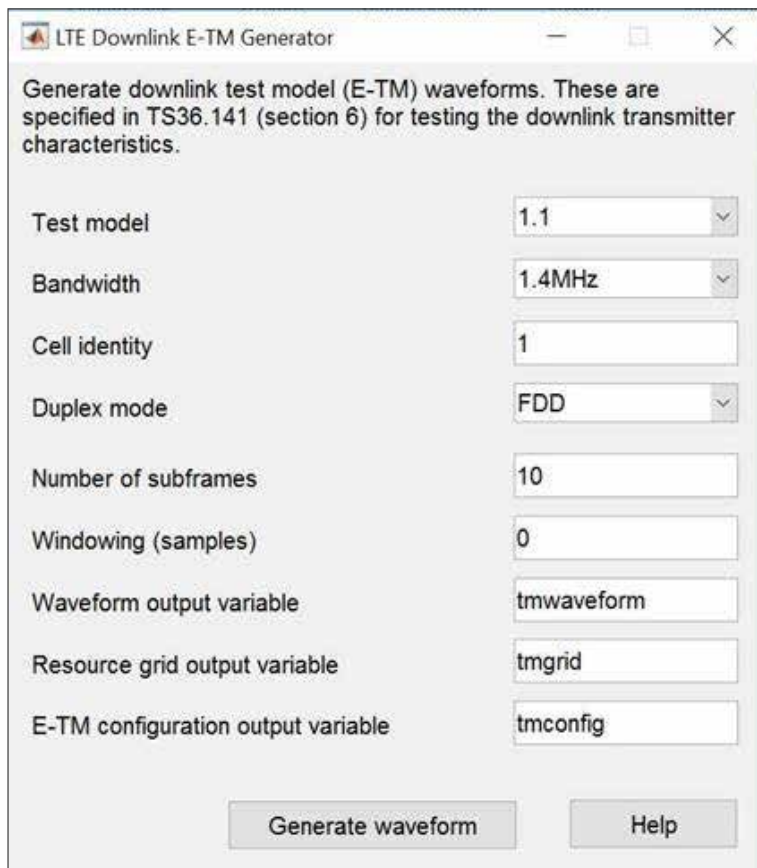
包含 RF 前端和 FPGA 板的典型 SDR 设备



MATLAB 和 LTE System Toolbox 以及支持的 SDR。这为现场信号生成和采集提供了灵活、具有成本效益的环境。

# 通过软件无线电生成 5G 现场信号 (续)

使用交互式应用程序或几行 MATLAB 代码, 您可以调整 SDR 硬件以生成涵盖广泛可能性的基带信号: 候选 5G 信号、符合 4G LTE 标准的信号或完全自定义的信号。

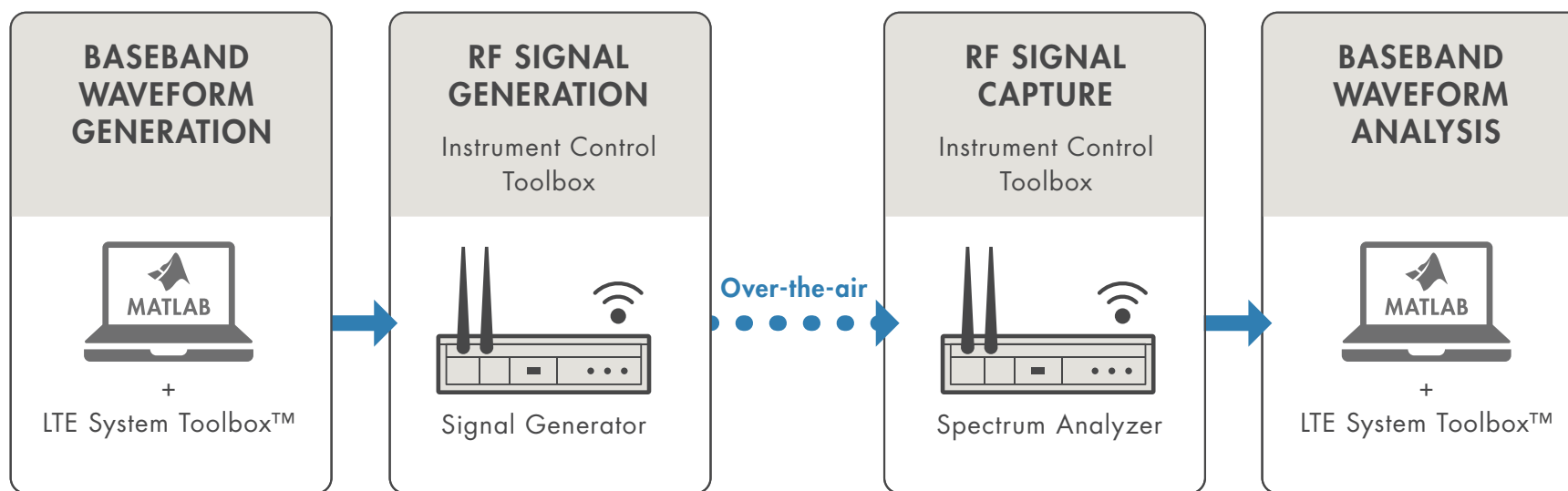


LTE 下行链路测试模型 (E-TM) 波形的生成 (左) 和分析 (右)

# 使用 RF 仪器生成和采集现场 5G 信号

生成现场信号的第二种方法是使用商用测试仪器。这些仪器具有精确校准的 RF 特性，因此适合用于精确的实验室、现场或生产测试。然而，5G 实验和现场试验所需的软件灵活性和分析功能通常超出了这些仪器的能力范围。通过使用 MATLAB 和 *Instrument Control Toolbox™* 可以克服这些限制，它们支持 VISA、TCP/IP、SPI、USB 和 GPIB 等接口和标准，支持来自不同制造商的设备以及各种仪器类型，例如 *信号发生器* 和 *矢量信号分析仪*。

要发射信号，您可以生成 5G 基带信号，将其下载到信号发生器，配置和控制基带信号中的参数，然后将 IQ 波形上变频为 RF 并向空中发射。在接收端，您可以将 IQ 数据获取到 PC 中进行分析，执行可视化和分析，以可编程的方式配置采集参数，以及在硬件中将 RF 信号下变频到基带。



通过 MATLAB 以及测试和测量仪器进行空中传输测试

# 分析大规模现场试验数据集

网络设备供应商和无线运营商一直在进行公共现场试验，以论证他们的 5G 技术，并在现实环境中描绘其运行特性。

在 5G 现场试验中，动态测量和监测了许多参数，如参考信号接收功率 (RSRP) 和参考信号接收质量 (RSRQ)。通过采集信号和遍历大范围参数来记录系统性能。

进行测量后，设计人员可以从数据中提取有用和有实际价值的结果。与 4G 系统相比，由于高数据速率以及需要采集和分析大规模 MIMO 辐射方向图，5G 现场测试会采集海量数据。

现场试验系统需要一个测试和分析系统，能够支持可扩展的数据采集、数据处理、分析和结果共享。



华为的东京现场试验

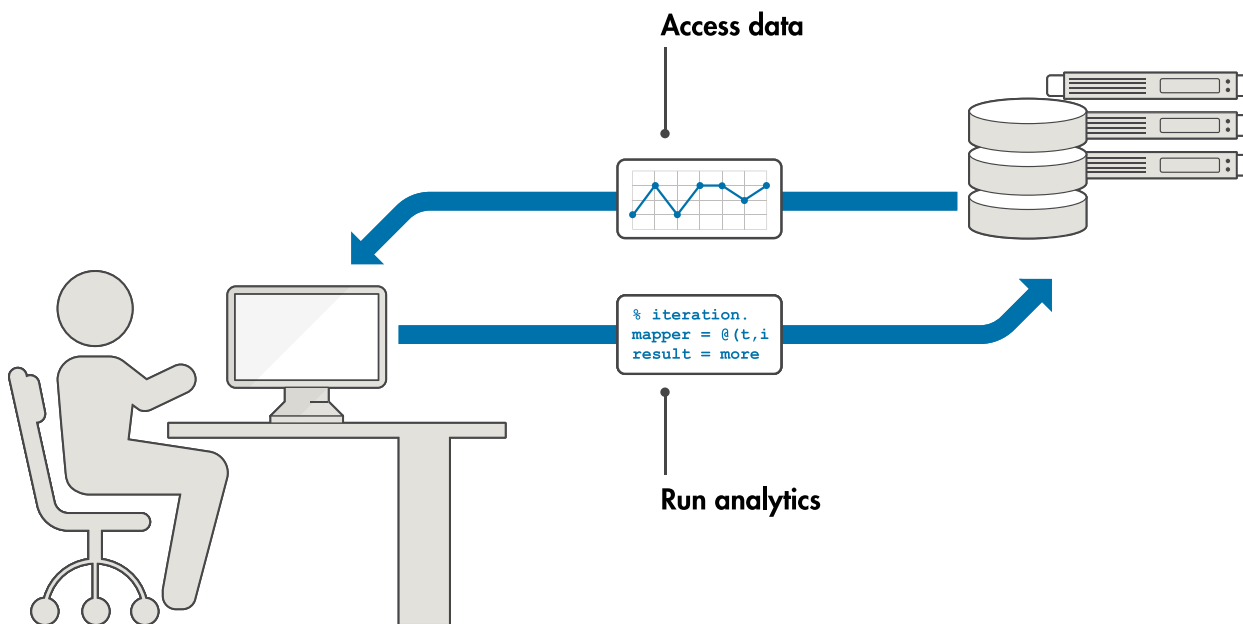
# 测试数据采集和分析

执行现场测试的测试工程师经常使用商用测试仪器。但是，5G 现场试验分析的需求远远超出了简单测量。

现场试验分析软件必须能够直接从测试仪器导入数据或导入以各种格式存储的数据。数据表示所采集的信号、名称和时间戳，以及配置信息，

如天线模式文件。拥有可以访问来自不同设备供应商的各种数据的通用环境或工具会带来很大帮助。

对于非常大的数据集，团队可以使用计算集群或云存储，从单个工作站扩展到计算集群，来处理大数据集。

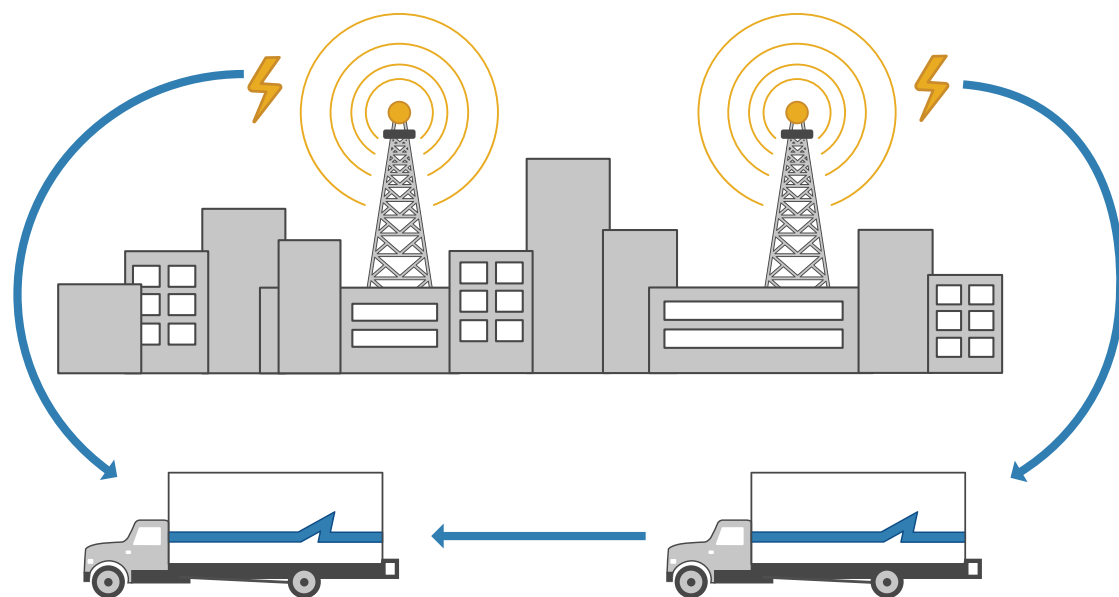


使用 MATLAB 采集、处理和分析存储在本地或云中的现场测试数据。

# 数据处理和可视化

测试工程师可能想要存储采集的原始数据，或者在分析后将结果显示给管理人员、合作伙伴或客户。

例如，一个团队可能希望在地图上显示小区切换点，确定信号与干扰加噪声比 (SINR) 是否令人满意，以及 RSRP 如何变化。在执行此任务时，可能需要快速生成标准波形，并多次重复测试过程。



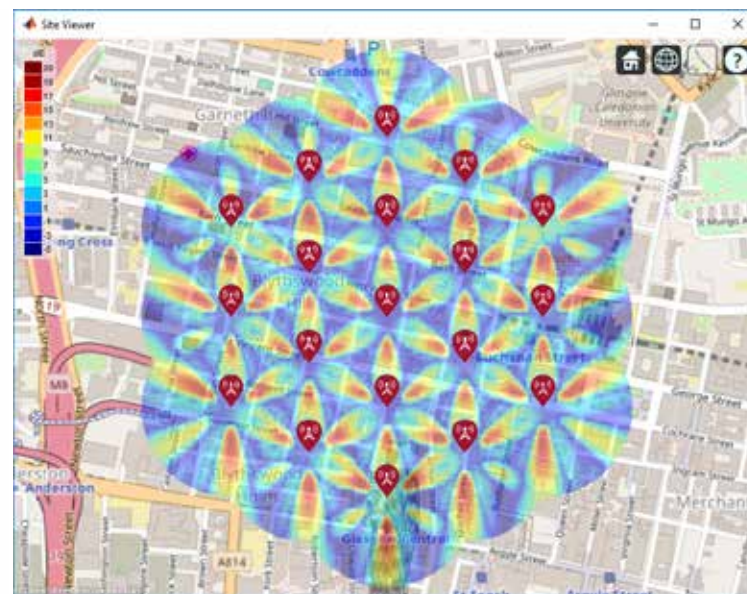
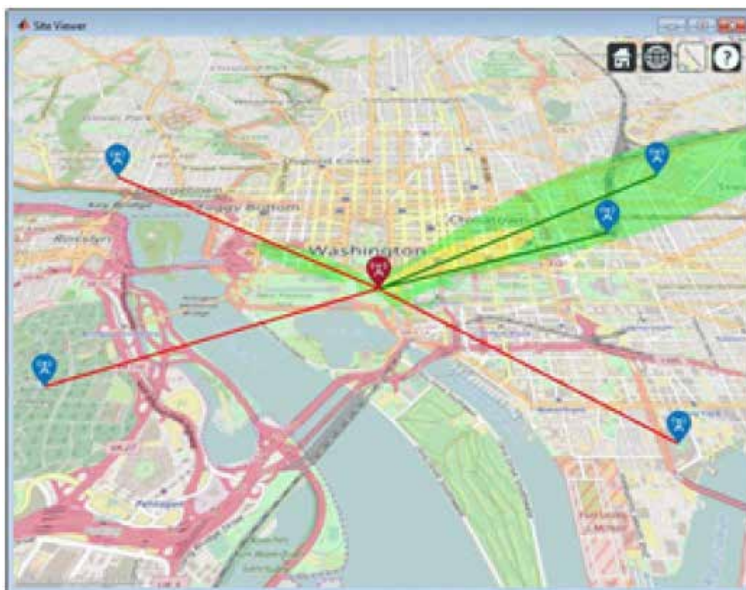
分析信号是否符合标准，以及切换点和小区 ID 号

# 在地图上可视化 5G 现场测试结果

可视化在现场测试中很重要。测试工程师需要将采集到的信号以及性能和参数数据叠加到地图显示上。3D 和伪 3D 表示需要地图上的纬度和经度。

对于车辆间通信和基站覆盖分析等 5G 应用，工程师需要直接访问带有经纬度和建筑物位置信息的地图数据。

如果实施得当，这种可视化架构使工程师能够在现实场景中全面地可视化系统性能，并展示结果以便为网络规划决策提供信息。

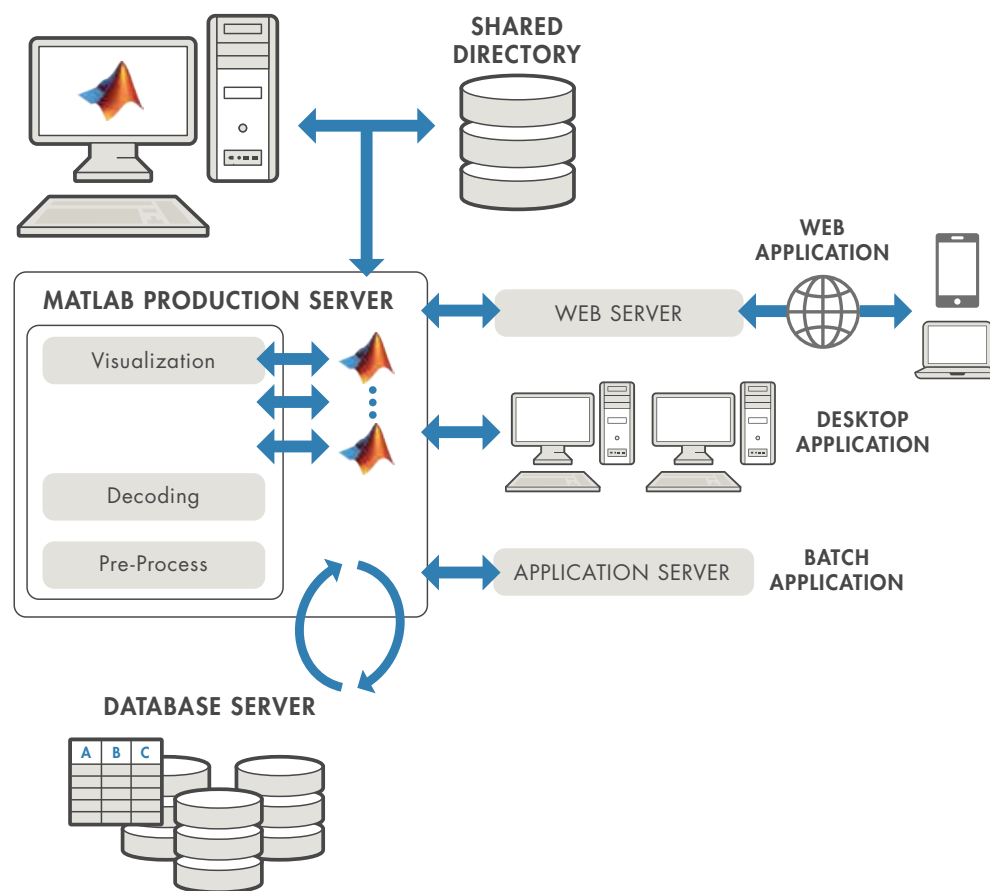


在街道地图上可视化蜂窝信号覆盖 (左) 和 5G 市区宏单元 SINR (右)。

# 分析和结果共享

为了进行大规模数据后期处理和集中管理，系统架构师可以将其 5G 现场测试软件作为应用程序部署在企业系统上。可以将这些应用程序托管在专用服务器或云上，这样系统架构师就可以远程检查测试数据并集中管理系统更新。使用 MATLAB 应用程序部署工具，开发团队可以充分利用以前的工作成果，团队中的每个人（系统架构师和开发人员、现场工程师以及管理团队）都可以远程查看，验证性能和分析结果。

您可以使用 *MATLAB Production Server™* 实现企业应用程序，它允许将自定义算法、测试和分析整合到在专用服务器或云上运行的 Web、数据库和生产型企业应用程序中。查看[此部署过程的示例](#)。该 5G 现场测试工作流程已经被蜂窝服务提供商和主要供应商所采用，能够充分满足 5G 现场试验的需求。



5G 现场试验的 IT 架构

## 了解更多

**准备更深入地钻研? 查看这些资源以深入了解有关 5G 系统验证和测试的更多信息。**

### 观看

[MATLAB 中用于仿真和测试平台的无线标准波形生成 \(31:03\)](#)

### 学习

[使用实时信号和测试与测量设备验证 LTE 设计](#)

### 深入了解

[设计和测试 LTE 系统](#)