

融合多种技术： 相控阵综合设计流程

E Pluribus Unum: An Integrated Design Flow for Phased Arrays

作者：Daren McClearnon, 是德科技EEsofEDA, 美国加州圣罗莎

多通道天线阵列是下一代国防和无线通信系统研发的关键，因其具有束流控制和多路输入多路输出（MIMO）体系结构等特点。这种体系结构使电子战（EW）和消费系统能够提供精准、动态分配而且稳健的服务，支持移动商业模式，在几年之前这种模式还是我们无法想象的。对这种新技术的研究开始于研发领域，研究人员在设计工具和验证方法上取得了一系列突破，能够在非商业环境中有效解决相控阵波束赋形方面的挑战。本文介绍了由标准工具组成的套件如何优化设计流程，在射频和数字波束赋形性能方面达到平衡。

物波束赋形（射频、数字和混合）和海量MIMO等多天线技术是5G、卫星通信系统和电子战等领域的主流技术趋势，正是得益于多天线技术，这些系统才能够提供精准、动态分配且稳健的服务。这些技术在系统层面上解决了许多问题，将这些技术结合起来能够提高拥挤频段内每赫兹频率上的比特数，且所受干扰更少。是什么使这些高精尖的技术仅用几年时间就能够从专门的军事应用中走出，广泛应用于低成本、以消费者为导向的高容量平台上？答案是半导体产品的发展遵循着摩尔定律，即成本、尺寸和功率降低的同时，带宽和微波性能仍会得到提高。消费者需求是推动波束赋形和MIMO商业化的关键，催生了我们几年前还无法想象的移动商业模式。

但这些技术在带来好处的同时，其复杂性也带来诸多挑战，尤其是在相控阵设计方面。要应对这些挑战，获得最佳的系统设计，需要一种全新的、自上而下的系统层面上的方法，即从评测波束赋形策略和系统级场景到系统实现，对设计流程进行优化。

相控阵设计挑战

设计相控阵系统时要解决诸多设计流程方面的挑战，既包括技术层面，也包括经济层面。例如，要使系统整体在经济性和服务水平上达到平衡，必须考虑真实模拟的影响、电磁（EM）和数字信号处理（DSP）性能。然而，这样的系统常常难以实现。其中一个挑战是开发一个相控阵需要涉及多个工程学科，而这些学科大部分相互独立。不同

从产品 到解决方案

RF 微波 毫米波

Ducommun (杜克曼)是一个
成立于1849年, 营额七亿美元
员工五千的美国上市公司。

在标准及定制射频微波开关
产品的设计, 测试和制造方面,
Ducommun 积累了45
年的经验



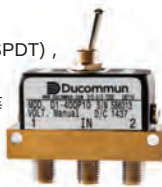
同轴开关

- 频率: DC 到 8 GHz
- 功率: 10 W CW
- 工作温度:
-30°C 到 +70°C
- 低插入损耗
- 高隔离度
- 所有热真空室均可使用



手动控制开关

- 频率: DC - 22 GHz
- 型号: 单刀双掷开关 (SPDT),
双刀双掷开关 (DPDT)、
单刀8掷开关 (SP8T) 等
- 功率: 200 W CW
- 适用于实验室测试



超宽带固态开关

- 频率: 0.05 GHz - 67 GHz
- 型号: 从单刀单掷开关 (SPST)
到单刀8掷开关 (SP8T) 系列
- 低插损
高隔离
- 全固态设计
- 开关速度: 100 纳秒 (典型)



欲了解更多信息,
请联系我们的销售团队
☎ +1 (310) 513-7256
✉ rfsales@ducommun.com
📱 微信号: rfsalesducommun

杜克曼
联系我们

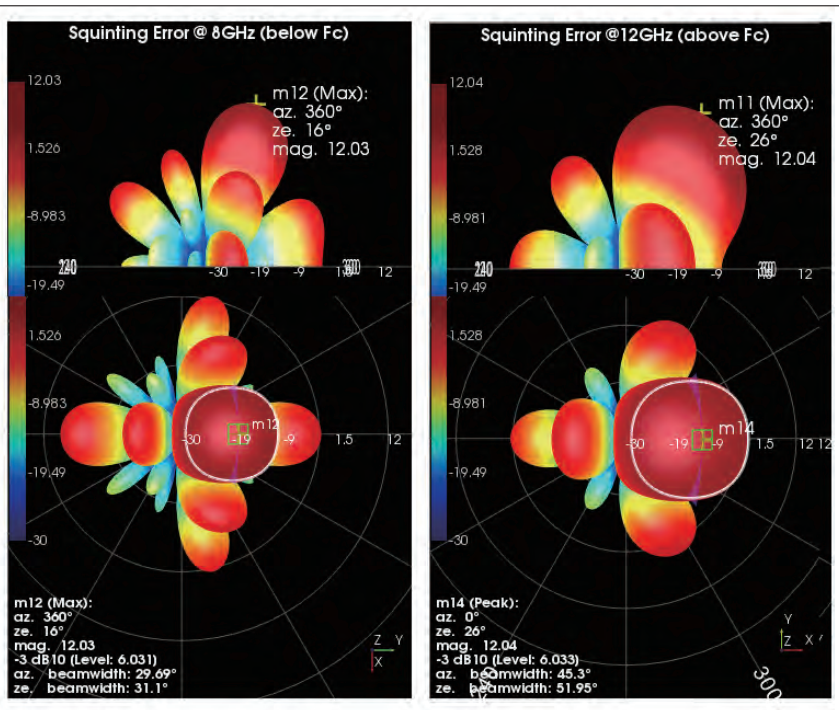


图1. 频率为8GHz (左) 和12GHz (右) 的天线阵列方向图, 显示了波束倾斜效应和旁瓣变化。

的工具套件会用于分析天线和电磁、
射频收发机和歧管 (可以是IC卡、模
块或板卡形式), 也会用于整合射
频、数字与混合波束赋形结构, 这种
整合是对基带ASIC/FPGA和射频体系
结构的跨领域整合。

由于波束宽度和旁瓣电平是测
量阵列性能的典型指标, 因此设计目
标越高, 就越要求相控阵子系统具有
更高的系统级性能。波束赋形旨在将
射频功率集中于特定方向, 减少射频
为获得设定的链路质量而消耗的功率
(例如数据吞吐量)。其次, 这也能
减少对其他用户的干扰, 提高其他用
户的链路质量, 延长电池寿命。在更
高层面上, 阵列潜在的射频损耗会影
响最终的旁瓣电平和波束方向图, 降
低系统级性能。

对于相控阵发射机而言, 来自
非完美赋形波束的旁瓣电平会干扰外
部设备, 或使发射机被对抗措施侦测
到。在雷达系统中, 旁瓣还会导致自

感应多重路径, 即同一个雷达信号从
不同的旁瓣方向抵达雷达系统。这些
多余的传播路径会增大地物反射波,
必须通过复杂的DSP算法去除。射频
阵列性能下降还会误导主波束, 使其
宽度增加或降低其指向性。例如“斜
视”(每次雷达线性调频时出现频
率依赖性波束畸变, 如图1) 和AM-
AM/AM-PM畸变。在军事系统中,
有效辐射功率 (ERP) 的降低不但减
弱了雷达对远方目标的探测能力, 还
降低了探测可能性和有效安全距离。
对通信链路预算而言, 则会影响信噪
比 (SNR) 和覆盖范围。

在相控阵接收机中, 射频阵列
性能不佳可能会增加噪声。还会增加
非预期方向的信号接收, 例如接收来
自旁瓣和错位空值信号, 或者因过
载使波束宽度增大。这些影响降低
了系统灵敏度和范围, 使之更容易
受到干扰, 提高了总误差向量幅度
(EVM)、比特误码率 (BER),

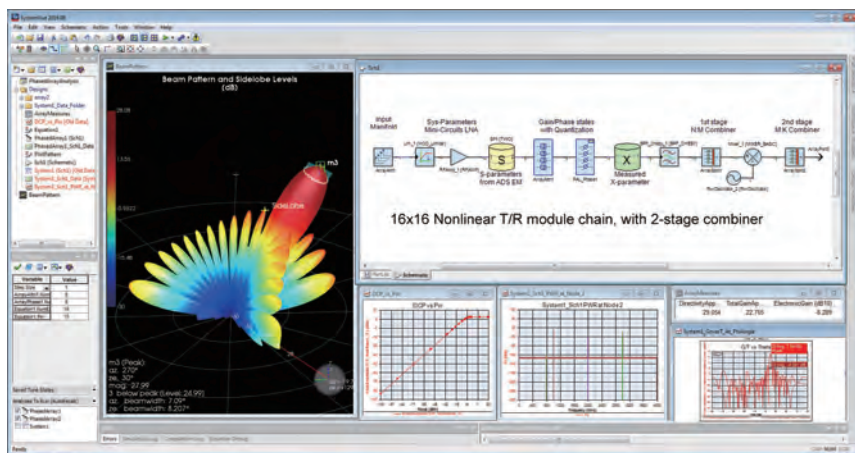


图2. 对T/R模块的G/T分析, 显示了旁瓣和指向性。

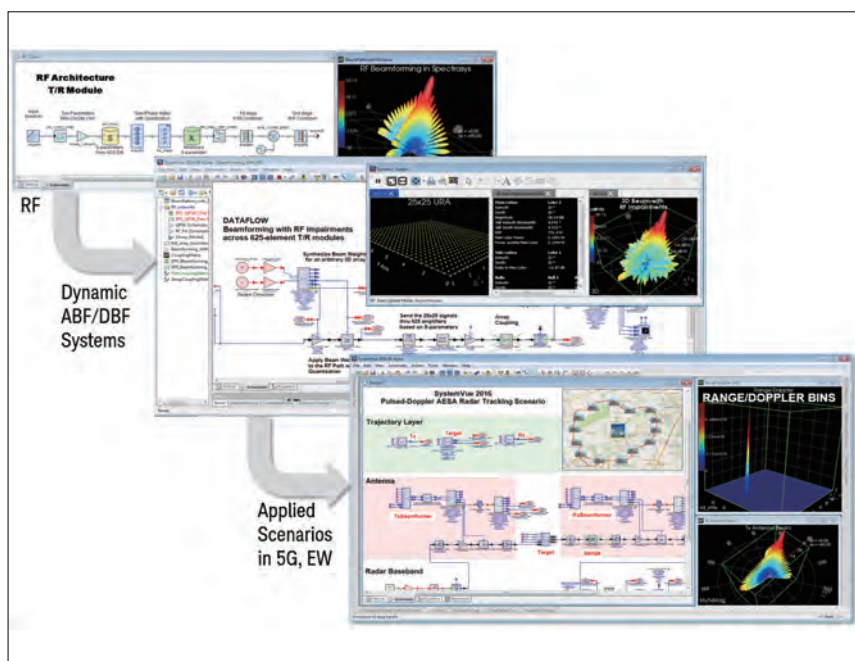


图3. 使用多平台执行的从射频元件到最终使用场景的系统分析。

降低了吞吐量（或探测能力）。增益/温度法（G/T）是常用的接收机阵列测量方法，即在接收弧角范围内，将多个潜在降低性能指标整合为一个复合品质因数（类似SNR）（见图2）。可通过编程将阵列设定为在某一方向处于“监听”状态，但实际效果如何呢？

尽管MIMO技术与波束赋形有关，但与串扰和相关性的形成仍有细微差别。根据其体系结构，这些

技术可能同时用于同一平台。MIMO提高了高密度移动环境中的通信链路稳健性，同时可改善频谱效率。由于MIMO需要逐一寻找每条“信息流”的信号路径，数模和模数转换器（DAC和ADC）的成本及功率、专用信号处理过程都会显著增加阵列子系统的规模、重量和功率（SWaP）。从功能而言，相比于分析多功能阵列中来自多个用户的各数据流，分析来自单个用户的多个数

据流（MIMO）需要在更高的系统层面上评测阵列及其不利因素。

在混合波束赋形（HBF）和由多个单功能子阵列构成的复合阵列中，自身干扰的可能性有所上升。HBF在5G开发社区颇为流行，因其能够在模拟波束赋形（ABF）和数字波束赋形（DBF）之间在成本效益上达到平衡。在HBF中仍有多个与众不同的基带信号，但这些信号在射频波束赋形层面上驱动子阵列组；这些子阵列以传输载波频率执行相移。分隔这些功能可以较低的成本和功率从射频ASIC、ADC和DAC中获取指向性（波束赋形）和吞吐量（MIMO）。

最后需要关注的问题是，物理上不完整的阵列能否以其微波或毫米波载波频率在其传播环境中以预期带宽正常工作。直到最近，要通过一组互不相关的仿真工具来解决这个问题还是很困难的，只能依赖硬件样机制作。各个工程团队有自己已经成型的工具链和方法论，难以跨学科整合。对系统层面应用逆向注释工程也非常困难。

总之，对相控阵进行体系结构设计和验证的工具数量繁多，需要大量研究和大幅改进。由于存在这些挑战，一种前瞻性、系统层面的设计流程可以大幅减少重复次数，降低对硬件验证、室内/室外天线范围和飞行时间的需求。

除了这些设计流程方面的挑战，还要考虑一些不那么明显的设计流程风险：在某些环境中，知识产权（IP）更集中于人而不是工具上。保存并重复使用设计经验和项目知识产权需要战略考量。控制研发“间接”成本等合同未约定的事项、技术转让、部署时间和对高技术的要求等加

大了技术人员对跨学科成熟模型工程 (MBE) 的需求。

应对挑战

是德科技等公司推出的电子设计自动化 (EDA) 工具链正不断扩展, 以期覆盖应用了相控阵和波束赋形技术的系统。这些扩展工具链有助于解决使用散乱的设计流程时出现的各种问题:

选择合适的抽象程度。选择合适的仿真抽象程度往往是困难的, 尤其在射频设计流程中。如果模型对于速度的设计过于理想化, 仿真往往不够准确。这会导致过多的硬件验证和过高的成本。另一方面, 如果包含了过多的物理细节, 仿真规模过大, 速度过慢, 难以验证“测试方案”中有实际意义的部分, 也难于扩展到超过100个阵元的阵列。幸运的是, 现在有了折中方案。通过主动信令、波束赋形算法、非线性射频T/R模块和EM求解程序物理设计细节, 行为建模技术可以在多用户5G和雷达系统场景之间实现仿真维度平衡。对“10的多少次幂”的阵元进行组合之类的问题进行智能选择, 能使流程可以扩展到数千个阵元并进行整合, 同时保持必要的精度。

扩大规模。一旦选定了合适的抽象程度, 下一步就要将其应用到更大的阵列中 (>1000个阵元)。尽管体系结构研究中常常用到电子表格, 但它们丢失了太多灵活性, 也没有考虑噪声、非线性、X参数[®]、元件变更和统计、频率依赖性、失配和其他因素。阵列分析可以“强行引入”电路级工具, 这固然会提高可用性和速度, 但代价高昂。事实上可以使用中等程度的建模, 这样可通过简单的使用模型在数秒内对非线性、多阶段阵

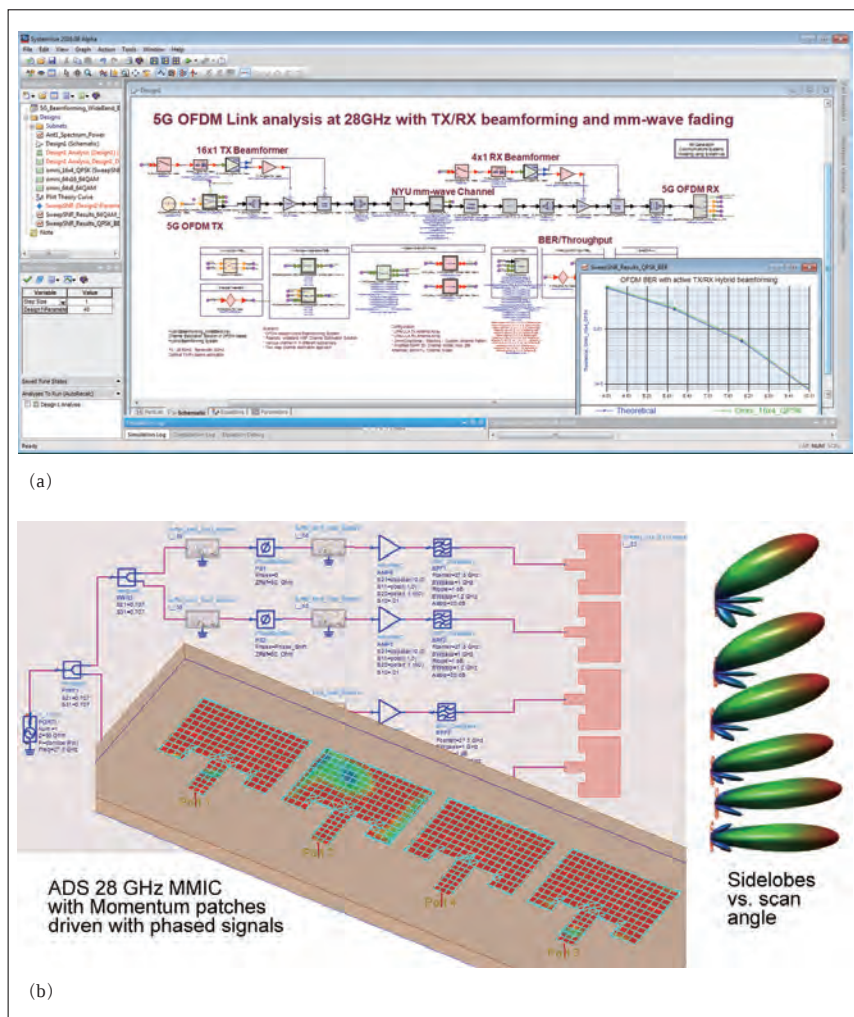


图4. 对28GHz 5G OFDM链路 (a) 和Momentum建模的4x1接收阵列进行链路分析 (b)。

列建模, 还能保持“预测”精度 (即可以告诉您未知情况的仿真)。

验证渲染波束 (带有真实射频的基带)。能继续前一阶段, 保持带有真实基带波束赋形算法的射频阵列模型准确性的能力非常重要, 因为这对于验证三维阵列配置、扫描角度、窗口锥、子阵列分区、工作频率和其他条件下阵列波束的完整性不可或缺。如果实际设计流程无法提供一定程度的射频精度, MATLAB算法本身无法保证设计迭代。反之, 如果没有复杂的算法特性和基带校准, 静态射频模型体现的优点也仅适用于阵列子系统。两个领域必须紧密合作才能预测

整个子系统的性能, 降低原型设计和测试成本。

处理动态系统级场景。无论5G、电子战还是新兴的卫星平台, 阵列子系统的设计目的都是提供一定程度的系统性能。阵列子系统必须通过动态场景下真实格式信号和接收机处理验证, 保证其符合现行标准, 能在特定条件下与其他设备互用, 符合其他的最低性能标准。大部分组织只有等硬件原型设计完成后才能进行这种验证, 一般来说验证需要评测室内和室外测试范围、飞行时间和其他昂贵设备。这会导致只有到试生产阶段才能发现并解决体系结构流程方面的

问题。互相联系、自上而下、系统级的设计流程能在更严格的测试之前发现并快速解决“可预防”的错误；只在最后阶段才需要昂贵的设备。以满足客户预期性能为前提，将“草案”与“最终设计”相联系的思路认为可将这一步纳入研发阶段，使其成为软件化、以仿真为基础的测试方案的一部分。

最后一点拥有较大的经济优势。然而，要认识统一相控阵工作流程的优势，下列三大功能是必需的：

- 交换设计信息——从MBE的角度看，一个团队应在一个学科内自上而下工作，例如将波束赋形算法从浮点应用到工作中的FPGA或ASIC。从系统的角度来看，跨学科保持这种MBE方式需要增加不常见的工具。人成为设计流程的桥梁，常用文字处理软件和电子表格代替设计文件；但是，这样做需要进行解释，这会增加流程中的风险。当低级别技术（或材料）改变时，直接交换设计信息可以加快交叉验证速度，使工程上的改变更快地应用于系统体系结构。设计信息格式包括MATLAB模型、系统C/C++、VHDL和Verilog、S和X参数、Sys参数、3DEM远场方向图文件和波形文件。
- 用于正式交叉验证的外部脚本和自动化环境——是德科技SystemVue等环境可用于模拟有实际意义的基带射频联合验证场景。通过外部应用程序对这些场景实现自动化，对自动验证结果执行定期回归利用，例如用于夜间构建。从第一天起就能对项目连续执行交叉验证的能力可以提高透明度，实现更好的项目管

理，降低项目风险。

- 与测试整合——最后，设计仿真是有用的，但它与实际的整合、变更和结果仍有出入。在实际原型设计和仪器特性的支持下，将EDA直接与宽带多通道测试和测量相结合的能力，

意味着这一设计思想可在封闭建模环路一以贯之，从草案应用到硬件。将仿真与软件定义的通用测量平台相结合，可以更早进行体系结构验证，执行灵活的验证策略，降低项目成本，提高测试设备利用率。

更快、更安静、更小的 信号源 QUICKSYN 合成器

用美国国家仪器的QuickSyn合成器更高效地设计更小的信号源。QuickSyn合成器使用的革命性的相位精确提取技术能够实现快如闪电的切换、非常低的寄生和相位噪声性能、宽的频率范围和小的占位面积。

ni-microwavecomponents.com/quicksyn

**NATIONAL
INSTRUMENTS**



QuickSyn Lite Synthesizer

© 2016 National Instruments 版权所有。

只有能够将多个领域的工具和参考知识产权引入同一个开放流程的设计流程才有可能获得上述益处。例如是德科技的SystemVue，它不但具有相控阵设计专用软件，还可作为联合验证背板。下面的案例揭示了实际工作中如何将模型为基础的统一设计方法应用于相控阵。

电子战阵列

考虑一个基本的电子战场景，一道中央单站雷达波束以“追踪”模式跟踪雷达截面（RCS）目标，例如一架沿某一路径绕城市飞行的飞行器，要使用纬度、经度、高度等定位参数。随着RCS目标移动，发射机和接收机阵列也随之移动方向。两个阵列均为配有Taylor锥的25x25均匀矩阵，其复合权重通过自适应算法在系统层面上动态调整。阵列既可以是纯行为的，也可以引入在射频仿真域中建模的T/R模块链的某些效应。图3中，在系统层面上显示距离-多普勒接收器，同时显示波束质量。

在射频阵列中，可对阵元X参数做出解释，该参数可以是ADS设计值，也可为测量值。还可解释噪声、非线性、失配和频率响应，以及量化相位、时延或幅度状态的使用。以真实的电磁仿真为基础，将阵元与辐射阵元的实际远场方向图相结合，其结果可以引入最终的工作波束方向图。随着阵列扫描角度增大，扫描损耗和栅瓣会降低系统性能。如果故障排除需要最高的准确度，可将关键射频部件直接与ADS电路包络/Ptolemy仿真器进行联合仿真，不过对于大型阵列，全面的联合仿真不太现实。对基带而言，如果FPGA算法正在接受联

合验证，关键算法可以与HDL仿真器联合仿真，也可以直接与某一仪器进行联合仿真，HDL仿真器是一款运行于回路硬件（HIL）的Xilinx Virtex 7 FPGA板。要考虑大气衰落和地形影响，可通过脚本将SystemVue与Analytical Graphics公司（AGI）出品的STK软件相连。这可以在提供准确、完全编码的雷达信号的同时，提供距离时延、多普勒频移和传播损耗等关键时变参数。

通过这个验证背板，可以进行相控阵设计并将设计用于有实际意义的脚本场景中，验证一系列条件、统计变异或对抗措施。按照这种方式，整个组织可以将文件和知识产权放入一个通用工具和整个测试阶段的交叉验证中。

5G阵列

这个类5G场景由一个宽带28GHz MIMO OFDM链路组成，该链路位于基站4x4阵列（即eNodeB）和用户设备（UE）的4x1阵列之间。使用混合波束赋形技术，对波束进行动态控制（见图4）。根据纽约大学的5G研究，链路通过3D MIMO衰落模型发生衰落。发射机和接收机参考设计提供灵活的OFDM框架和资源映射；这些设计超出了LTE-A范围，包括接收机同步和对数据负载的解调。这个复合BER/吞吐量示例中包含了阵列效应、波束赋形精度和符合行业标准的衰落模型。随着加入的UE和干扰越来越多，可以评测自适应波束赋形算法、调制和编码策略、以及射频体系结构。本场景以实际的射频为基础建模，进行系统级的研究具有很高的灵活性，可以通过系统体

系结构评测需要多大的阵列、需要的性能和企业风险。

总结

相控阵子系统设计中存在的设计挑战远不止单个射频元件设计的技术性能问题。通过审视子系统性能，可以直接评测基带和射频上的总体性能裕量，帮助设计师在保证实际性能的前提下在各项性能之间达到平衡。关键在于将电路仿真器、波束赋形和DSP算法、天线方向图、系统场景、FPGA实现与测试设备整合到以模型为基础的统一设计流程之中。通过使用SystemVue这样的电子系统级平台，可以实现这一目标。通过这类平台生成的标准工具套件相互联系，有助于显著优化设计流程。增加相控阵波束赋形专用软件会带来强大功能，开启跨功能的测量分析视野。■

5G应用笔记：

更多内容请访问：<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1448EN.pdf>

