ISSN：2958-2245

2026年 7/8月

Microwave Journal China 微波杂志

射频半导体和软件

RF Semiconductors & Softwares

horizon house®

Founded in 1958

mwjournalchina.com

6天 ■ 三大会议 ■ 一场展览

欧洲微波、射频、无线及
雷达领域首屈一指的盛会

EUROPEAN MICROWAVE WEEK
EXCEL, LONDON
4th-9th OCTOBER 2026
www.eumw.eu
EuMW 2026
RADIATING CHANGE

2026年欧洲微波周

现已开放注册！

与来自全球的工程师、研究人员和行业领袖共同参与为期一周的前沿技术分享、交流互动与深度洞察之旅。

尽早注册，享受早鸟优惠价格，优惠截止至2026年9月4日（含当日）。

展览免费入场，
立即预约您的参观证！

英国伦敦EXCEL中心

2026年10月4日至9日

会议

- 聆听世界级专家的真知灼见
- 参加深度的技术分会和研讨会
- 探索最新的科研进展与工业动态
- 与领先企业和学术机构建立联系

免费展览

- 汇聚300多家国际顶尖展商
- 发现最新的微波、射频和无线技术
- 参与展商主导的演示和讲解活动
- 适合专业人士、学生及创新爱好者参与

立即访问官网注册：

WWW.EUMW.EU



ISM射频 & 微波能量

2.4 GHz 组成模块

灵活、可扩展，高至 6 kW

了解更多

信号发生器/控制器

ISC-2425-25+

主要特性:



- 30 至 +25 dBm (0.1 dB 分辨率)
- 频率范围为 2.4 至 2.5 GHz (1 kHz 分辨率)
- 射频功率控制模式为闭环和前馈控制
- 提供直观清晰的图形用户界面(GUI)和完整 API支持

300W SSPA

ZHL-2425-250X+

主要特性:

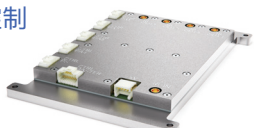


- 300W输出功率
- 支持连续波和脉冲波
- 42 dB 增益
- 60% 效率
- 内置监测和保护功能

4路功分器，支持相位和振幅控制

SPL-2G42G50W4+

主要特性:



- 2.4 至 2.5 GHz
- 最多可通过1个ISC-2425-25+控制器驱动4级放大器
- 精准控制每条信号路径的振幅和相位

敬请期待...

高功率4路合路器

COM-2G42G51K0+

主要特性:



- 1.2 kW功率处理能力 (总端口)
- 0.1 dB 插入损耗
- 0.15 dB 振幅不平衡度
- 1° 相位不平衡度
- 4x N-型至 7/16 DIN连接器

Mini-Circuits®

Microwave Journal China 微波杂志

目录 Contents

26年7/8月 Jul/Aug 26

www.mwjournalchina.com

封面文章 Cover Feature

04 实现宽带相控阵：SOI可调滤波器与异构前端集成

Enabling Wideband Phased Arrays: SOI Tunable Filters and Heterogeneous Front-End Integration

技术特写Technical Feature

14 从Ad Hoc仿真到协调一致的射频设计工作流

From Ad Hoc Simulations to Orchestrated RF Design Workflows

20 Cadence Agentic AI 将如何提升射频设计效率

How Cadence Agentic AI Will Transform RF Design Productivity

产品特写 Product Feature

25 最多支持八通道的入门级示波器

Entry-level Oscilloscopes with up to Eight Channels

27 新一代矢量网络分析仪拓展了测量视野

A Next-Generation VNA Expands Measurement Horizons

产品简报 Product Brief

30 关键任务系统的高性能电磁干扰（EMI）抑制

High Performance EMI Suppression for Mission-Critical Systems

31 新品橱窗 New Products

32 广告索引 Advertising Index

欢迎投稿：

winsonx@actintl.com.hk 15611832959（电话/微信）

Bonray 博瑞集信

让每个人都能用上自主可控的高等级核心芯片

博瑞集信基于特色GaN工艺的大功率无源技术平台



- 已形成覆盖多品类、宽频段、高功率等级的无源产品谱系。
- 平台持续产出 **大功率功分器、耦合器、固定衰减器、滤波器、功率负载** 等多品类无源产品，支持定制开发。
- IPD 的应用范围拓展至百瓦级，为高频系统的大功率无源集成提供兼顾功率、损耗与尺寸的新路径。

大功率耐受
同等芯片尺寸下，功率处理能力实现大幅提升

低插入损耗
高频下介质损耗极低，保障射频信号质量

小型化集成
mm²级芯片面积，替代传统大体积方案

优异一致性
晶圆级制造工艺，批次间偏差小

定制化快速交付
支持定制化开发，量产速度快

快速响应、高效交付 | 提供免费样品试用 | 产品选型指导 | 提供现场技术支撑

博瑞集信（西安）电子科技股份有限公司

BONRAY(XI'AN)INTEGRATED INFORMATION ELECTRONICS TECHNOLOGY CO,LTD.

400-678-6538转810 customer@bonray.com.cn www.bonray.com.cn

陕西省西安市高新区毕原二路3000号硬科技企业社区12号楼

MiCable

通过 ISO9001质量管理体系认证
通过GJB9001C国军标质量管理体系认证

DC~70GHz 16通道(8X2) XMPM 系列

NEW

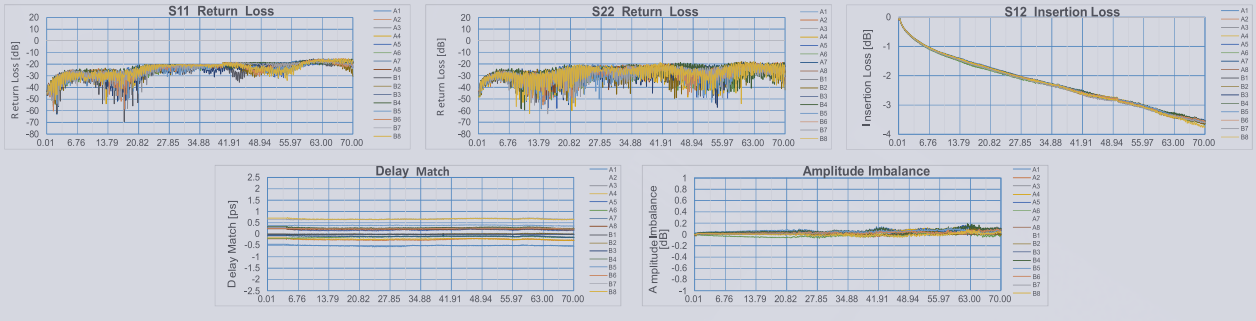
高速集束电缆组件

应用领域： 信号完整性测试 | SerDes 开发与测试 | 差分信号测试 | 自动测试应用

50Ω	>14dB	3.9dB	<±1ps	2.54mm
阻抗	回波损耗	电缆损耗	时延匹配	针脚间距



0.3m 样品测试曲线



迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家

关注微信公众号

福建迈可博电子科技集团股份有限公司
电话：400-918-0388
邮箱：sales@micable.cn
网址：www.micable.cn

经销商：伟博电讯有限公司
电话：400-887-3088
邮箱：sales@mitron.cn
网址：www.mitron.cn

CoverFeature
封面文章

实现宽带相控阵：SOI 可调滤波器与异构前端集成

Steven Fireman OtavaRF, Moorestown, N.J.

现代宽带相控阵系统需要在各平台（包括机载电子战（EW）套件和卫星有效载荷）上具备频谱灵活性、多功能操作以及严格的尺寸、重量、功耗和成本（SWaP-C）性能。直接射频采样架构通过消除中频转换级满足了这些要求。然而，这种架构也带来了抗干扰、抗混叠和通道间一致性方面的挑战。本文探讨了绝缘体上硅（SOI）可调带通滤波器如何应对这些挑战。这些滤波器对于多阵元数字波束成形阵列至关重要。本文还探讨了在异构多芯片前端模块中将 SOI 滤波器与 III-V 功率放大器集成的问题。这种集成使得能够实现紧凑、可拼接的收发模块，在满足严格尺寸和功耗限制的同时，提供宽带灵活性和高等效全向辐射功率（EIRP）。这些技术共同构成了工作频率范围为 2 至 18 GHz 及更高频段的下一代电子扫描阵列的关键。

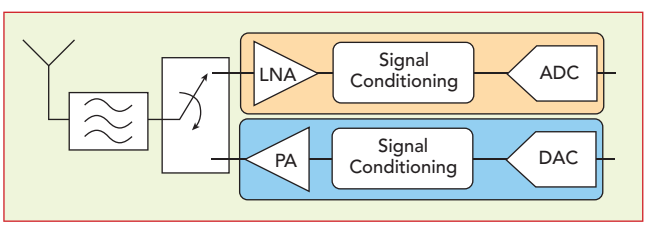


图1：直接采样射频前端架构。

现代相控阵系统架构

如今，越来越多的供应商为相控阵系统提供用于直接射频采样的多通道收发器（见图 1）。这简化了现代波束成形中可扩展的多天线系统的构建。通过去除传统的混频级和组件（如本地振荡器和混频器），射频硬件得以简化。因此，尺寸、重量、功耗和成本均得以降低。更小的占用空间、更低的功耗、更少的发热以及更低的通道成本，对于空间和功耗受限的平台（如机载电子战套件、卫星有效载荷和移动雷达系统）尤为重要。结合使用各种射频前端器件类型可进一步增强这些优势。宽带系统需要精心设计，因为工程师必须同时处理宽频带范围和非常宽的瞬时带宽（通常每个通道达数吉赫兹）。这些大带宽带来了若干挑战，例如：

- 管理来自每秒十亿采样（GSPS）转换器的高数据速率
- 在奈奎斯特区范围内抑制混叠和杂散信号
- 确保精确的多通道相位相干性和确定性延迟
- 在不牺牲带宽的前提下实现有效的抗混叠预选。



热情、好奇心与创造力有什么共同之处?

答案就是: 您

无论您是学生、创客、改装达人、业余爱好者，还是技术高手……都拥有一种同样的创新精神——而正是这种精神，为我们创造了一个更加美好的世界。

只要您能想的到，我们就能帮您做的到，一切尽在 digikey.cn

DigiKey 得捷

we get technical

DigiKey 是所有供应商合作伙伴的授权分销商。每日添加新产品。DigiKey 和 DigiKey Electronics 是 DigiKey Electronics 在美国及其他国家的注册商标。© 2026 得捷电子（上海）有限公司。
上海客服中心:上海市长宁区长宁路1133号长宁来福士广场T1幢办公楼32层3202、3203、3205、3206单元 邮编：200051

ECIA MEMBER Supporting The Authorized Channel 上海工商

灵活的射频系统设计

对于需要实时频谱分析的应用，软件定义无线电（SDR）凭借其卓越的灵活性已成为首选平台。与传统的固定架构无线电不同，SDR 利用可编程软件和高速硬件在数字域中执行调制、解调、滤波和频率转换等核心功能。SDR 支持快速波形更新，兼容多种标准，并能同时运行多个通道，应用范围从手持设备到机载或船载系统。可调滤波在这些系统中至关重要，以适应不断变化的运行环境。

在相控阵系统中，滤波器响应的不匹配会导致幅度和相位误差。这会降低波束成形精度、地理定位精度或多通道相关性。各通道之间的可重复性以及相位 / 幅度一致性同样至关重要，因为它们能直接减少系统校准开销，并确保多阵元阵列或相干接收机链路中性能的可靠性。SOI 可调滤波器可通过精确的数字控制、片上温度补偿、制造过程中的预对准以及闭环校准程序来实现这一点。这些程序可补偿工艺波动或环境漂移，通常能将校准时间从几分钟缩短至几秒，甚至无需频繁重新校准。

干扰源可能位于带外，例如导致压缩或互调失真的强邻道或同址信号；也可能位于带内，包括同道干扰或瞬时带宽内的脉冲威胁。能够动态调整通带位置或实施陷波滤波，是一项重要的缓解策略。通过软件控制来偏移滤波器中心频率、调整带宽或切换至带阻模式，SDR 可以实时抑制威胁。这种方法能够追踪频率敏捷的干扰器或消除窄带干扰源，同时保持所需信号的完整性。

电子战宽带系统

在快速发展的电子战领域，工作于 2 至 18GHz 频率范围的系统已成为现代宽带相控阵硬件开发的基础。这一跨越一个八度（octave-spanning）的宽频带，在良好的传播特性（大气衰减相对较低且天线尺寸合理）与支持高分辨率探测、高数据速率信号处理及强大波形生成能力之间实现了有效的平衡。这些能力支持多种关键的电子战功能，包括电子攻击（干扰和定向能破坏）、电子支援（信号截获、测向和发射源定位）以及电子防护（在保护己方通信和雷达性能的同时，采取反制措施应对威胁）。

展望未来，新一代电子战架构师正越来越多地将系统设计推向更高的毫米波频段，尤其是 18 至 50 GHz 频段。在这些较高频率下工作具有显著优势：

- 由于波长更短，角分辨率更高，从而能够实现更窄的波束角和更精确的波束指向
- 对某些类型干扰和压制的影响更小
- 增强了对超宽带应用的支持，例如合成孔径雷达成像、多波束通信和先进的电子攻击技术。

宽带系统正在不断演进并日益普及。如今，它们不仅覆盖传统的 2 至 18 GHz 频段，还延伸至现代相控阵中的毫米波频段。这种发展趋势源于对更灵活的频率利用和多功能操作的需求。应对先进威胁而对更小、更轻、更高效系统日益增长的需求，同样推动了这一发展。这些系统标志着向更具多功能性、软件定义且数字化赋能的电子战能力迈出的关键一步。随着硬件技术的成熟，宽带与超宽带之间的界限将逐渐模糊。这使得平台能够动态适应充满挑战的作战环境。

SOI可调滤波器特性

在密集的电子环境中（例如电子战中的竞争性电磁频谱），高选择性滤波对于区分间隔极近、频率可能仅相差几兆赫兹的发射源至关重要（见图 2）。传统的固定或开关式滤波器组往往缺乏必要的灵活性或分辨率，无法在不产生串扰或增加校准复杂性的情况下隔离这些信号。这会导致发射源识别或测向的精度下降。高选择性可调滤波器通过在需要时提供陡峭的截

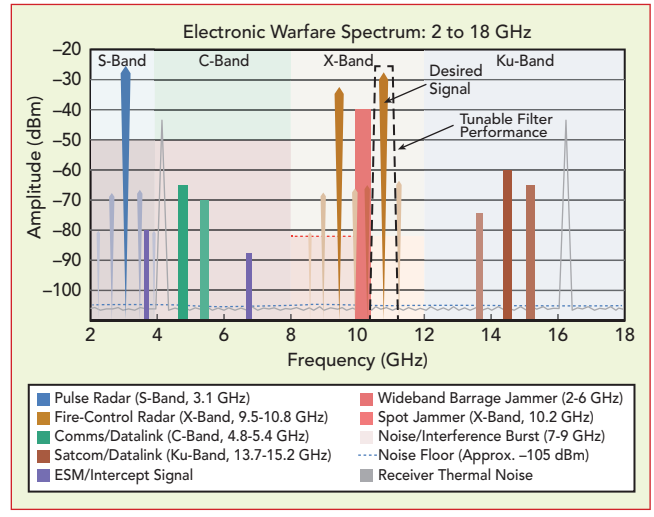


图2：包含所需信号和干扰信号的电子战频谱。

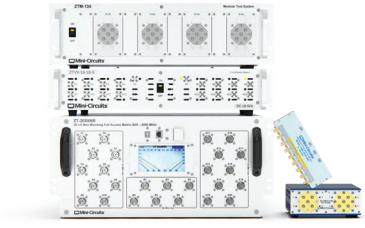


DC 至 65 GHz

射频 & 微波测试解决方案

灵活、可靠、实惠、快速

软件控制的组成模块和射频接口装置



定制化的测试系统



测试配件



信号切换、衰减、分配、信号源
放大、感应、测量等多种功能

了解更多

Mini-Circuits®

止斜率和窄瞬时带宽，以及快速数字重调功能来实时跟踪频率敏捷或跳频威胁，从而解决了这一问题。这提高了系统在繁忙频谱中的性能，能够同时对多个信号进行可靠的检测、分类和定位，同时阻断可能导致接收机过载的强干扰。

数字可调带通滤波器是现代软件定义无线电（SDR）系统不可或缺的组成部分。它们提供精确的频率控制（支持数百个亚兆赫级设置）、低插入损耗（在宽频带范围内通常为 5 至 7 dB）以及出色的线性度（带内 IIP3 > 40 dBm）。这些滤波器仅需单个芯片即可替代笨重的开关式滤波器组。

这些滤波器采用 SOI 技术制造，可在低成本下实现对滤波器特性的精确控制。SOI 技术具有寄生电容更低、谐振器质量更高等优势。此外，由于基板耦合减弱，它还能实现控制路径与射频路径之间的更好分离，并确保出色的线性度。这带来了严格的工艺控制、极小的温度漂移以及各器件间一致的振幅和相位。因此，滤波器在各通道上表现出稳定的波形、可预测的延迟和可靠的抑制能力，这对相控阵和多通道 SDR 至关重要——在这些应用中，失配会导致性能下降。

在考虑工艺波动的影响时，有几个应用场景值得探讨。在第一种场景中，工艺偏移较小，仅导致滤波器的中心频率及其 3 dB 频率点发生轻微偏移。然而，3 dB 带宽本身基本上保持恒定，如果其宽度足以涵盖应用所需的频率范围，那么工艺波动对滤波器性能的影响对最终用户而言是不可察觉的，见图 3。

在第二种情况下，工艺偏移足够大，以致将滤波器的 3 dB 带宽推到了应用所需频率范围之外。在这种情况下，可调滤波器同时具备粗调和微调功能，允许用户将滤波器的中心频率（进而包括其 3 dB 带宽）重新调整回预期设置。粗调以 30 MHz 为步幅进行中心频率调整，而微调的分辨率可细化至 5 MHz 增量，确保滤波器能够精确地重新调谐至其标称工作点。图 4 和图 5 展示了滤波器在宽带宽和窄带宽模式下的工作情况，两者均在 X 波段调谐范围内进行扫频；粗调和细调步幅在两种模式下均适用。除这些调谐参数外，可调滤波器还可配备可调节的 3 dB 带宽，允许用户实时调整其工作带宽。

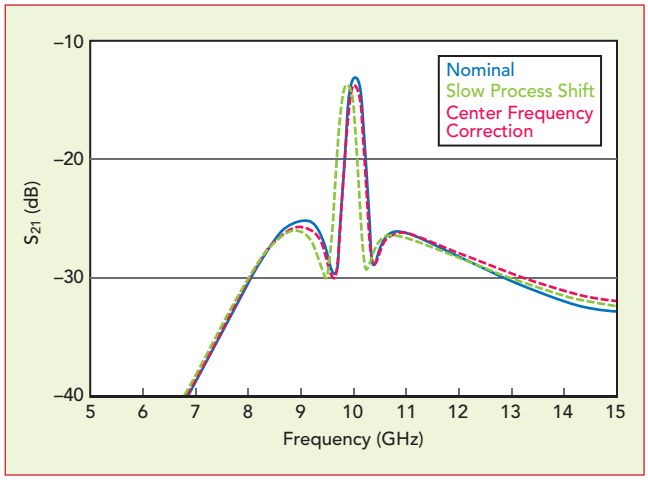


图3：X 波段 SOI 可调滤波器的频率特性曲线。

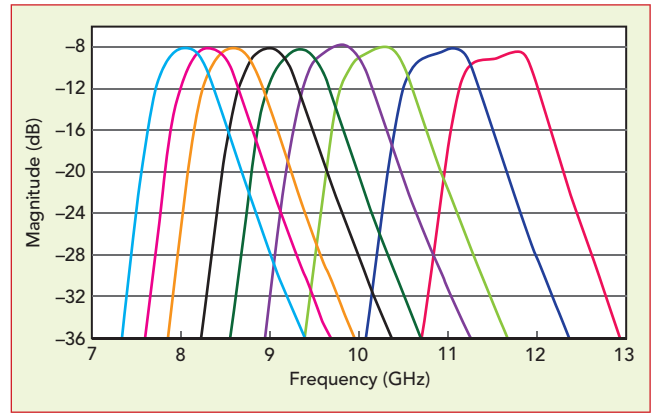


图4：X波段SOI可调滤波器的宽带调谐模式。

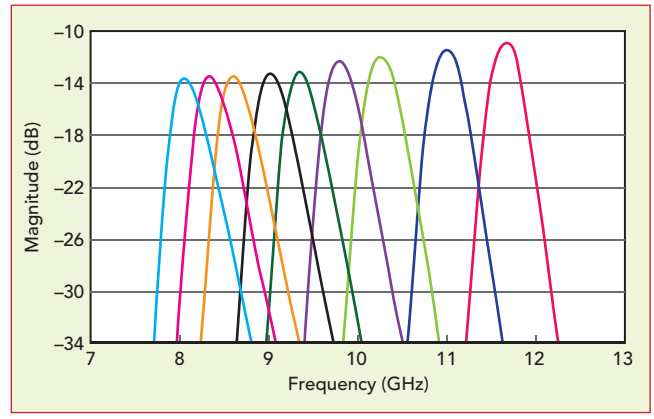


图5：X波段SOI可调滤波器的窄带调谐模式。

与砷化镓（GaAs）变容二极管或 MEMS 等更专业的技术相比，基于 SOI 的可调滤波器以接近商用 CMOS 的成本和集成水平提供了这些优势，同时具有紧凑的倒装芯片尺寸（约 2×2 mm）和低功耗（静态电流通常小于 10 μA）。这些特性使其非常适合受 SWaP-C 限制的平台，包括无人机和手持式电子支援（ESM）设备。总体而言，SOI 可调滤波器是迈向更具

MiCable

通过 ISO9001质量管理体系认证
通过GJB9001C国军标质量管理体系认证

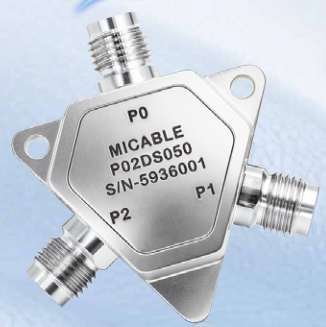
电阻式 2路 功率分配器 & 分离器

新品

工作频率覆盖DC~50GHz　优异的幅相平衡确保高精度功率分配

超低的驻波比最大限度降低测量不确定度

电阻式功率分离器



型 号	P02DS020	P02DS040	P02DS050
工作频段 (GHz)	DC~20	DC~40	DC~50
公共端驻波比 (:1) Max.	1.25	1.35	1.45
分支端等效驻波比 (:1) Max.	1.20	1.30	1.40
插入损耗*(dB) Max.	7.2	8.0	8.5
幅度平衡(dB) Max.	±0.3	±0.4	±0.5
相位平衡(Deg.)Max.	±3	±4	±5
隔离度 (dB) Min.	10	10	10

★包含理论插损6dB

电阻式功率分配器



型 号	P02DD020	P02DD040	P02DD050
工作频段 (GHz)	DC~20	DC~40	DC~50
驻波比 (:1) Max.	1.20	1.25	1.40
插入损耗*(dB) Max.	6.6	7.0	7.5
幅度平衡 (dB) Max.	±0.3	±0.4	±0.5
相位平衡 (Deg.)Max.	±3	±4	±5
隔离度 (dB) Typ.	6.2	6.3	6.4

★包含理论插损6dB

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家

关注微信公众号

福建迈可博电子科技集团股份有限公司
电话:400-918-0388
邮箱:sales@micable.cn
网址:www.micable.cn

经销商:伟博电讯有限公司
电话:400-887-3088
邮箱:sales@mitron.cn
网址:www.mitron.cn

适应性、高性能的软件定义无线电（SDR）和电子战（EW）系统进程中的关键赋能技术。

数据转换器接口处的信号链集成

现代相控阵系统正在子系统和元器件层面直接增加更多先进功能，从而简化了硬件的开发和部署。这种向更高集成度发展的趋势降低了系统架构的复杂性，并加快了系统在实战中的部署进度。在直接射频采样配置中，高速模数转换器（ADC）和数模转换器（DAC）通过极少的中间步骤处理射频信号，其主要创新在于设计一种使用更少元器件的紧凑型解决方案。

在后端采用紧凑型多通道数据转换器的系统中，将分立射频元件紧邻布置的传统方法已不再可行。电路板空间限制、互连复杂度增加、寄生效应加剧以及成本 / 重量负担上升等因素共同构成了重大制约，特别是在对 SWaP-C（尺寸、重量、功耗和成本）要求严格的应用中。在此背景下，对集成式可调射频功能的需求至关重要。接收机路径中的可调带通滤波器或抗混叠滤波器可抑制带外干扰，防止混叠进入奈奎斯特区，并保护模数转换器（ADC）免受饱和或杂散信号的影响。在发射机路径中，重建滤波器可平滑数模转换器（DAC）的输出并衰减成像杂散。这些滤波器必须具备锐利的选择性和高线性度，以在宽瞬时带宽范围内维持动态范围。图 6 展示了一个此类集成射频模块的实现示例，该模块在紧凑型相控阵环境中演示了可调差分滤波功能。

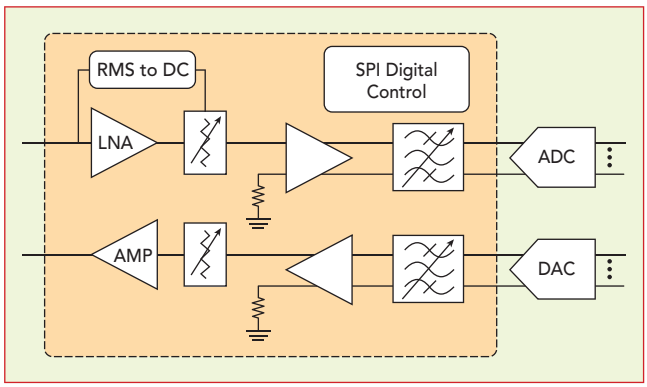


图 6：数据转换器接口模块示意图。

一项关键进步是采用了片上差分电路拓扑，从而消除了对传统上用于将单端射频路径转换为转换器差分接口的大型、昂贵的片外平衡 - 不平衡变压器（balun）的需求。将滤波器设计为差分结构可降低损耗、提高共模抑制比并简化布局，通常需要更少的电路板层数和互连线路。当作为标准化构建模块应用于各阵列单元时，该方法可带来显著的 SWaP-C 优势。该技术支持敏捷频率调谐、高 IIP3（典型值 >40 dBm）和紧凑的芯片尺寸，从而能够在直接射频架构中实现与多通道转换器的共置或直接接口连接。

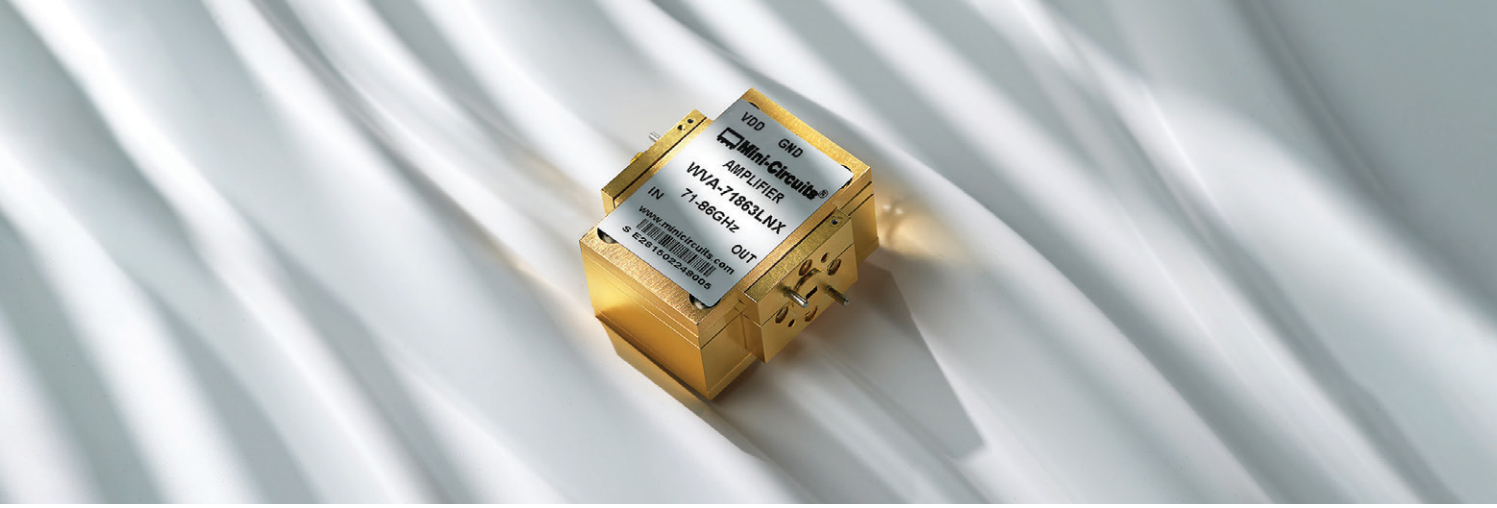
前端硬件实现

在先进的宽带相控阵系统的射频前端中，高度集成的模块现已整合了功率放大器（PA）、低噪声放大器（LNA）、收发（Tx/Rx）开关、可调滤波器以及相位 / 增益控制元件，以实现完整的波束成形功能。这种集成度不仅最大限度地减少了互连损耗、降低了寄生效应，还简化了阵列拼接、校准和热管理。对于需要大瞬时带宽（2 至 18 GHz 系统）或具有大扫描角的物理尺寸较大天线阵列的宽带应用，真实时延（TTD）架构正越来越多地被用于替代或配合传统相移器使用。TTD 通过在整个频带内提供恒定的群延迟，消除了波束偏斜（与频率相关的波束指向误差），从而在宽带工作期间保持波束形状和方向性。这是在竞争频谱中保持高分辨率性能的关键。

要在这些应用中实现最佳的 SWaP-C 性能，通常需要利用多种集成电路技术，而不是依赖单一工艺。混合方案使设计人员能够将高功率、高线性度的功能分配给最合适的材料，同时为低功耗或以控制为主的模块采用经济高效、高度可集成的技术。

例如，氮化镓 / 硅（GaN/Si）技术正在改变发射链的性能，它不仅能提供比纯硅基解决方案更高的输出功率，而且成本低于传统的氮化镓技术。GaN/Si 技术在性能与成本之间取得了平衡，为宽带功率放大器（PA）提供了高功率密度、高效率和高击穿电压，同时利用了大直径（200 毫米）硅晶圆、与 CMOS 兼容的工艺以及较低的基板成本。这些特性使 GaN/Si 非常适合扩展到高密度、高 EIRP 天线阵列，在这些应用中，热和功耗限制至关重要。

除了 GaN/Si 功率放大器外，低成本的 SOI 技术也非常适合用于可调滤波器、收发切换及其他低功耗射频组件。它在紧凑的芯片尺寸下，提供了尖锐的选择



最高至 110 GHz

高频解决方案

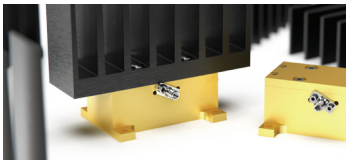
适用于毫米波应用的放大器和模块

波导放大器



- 带宽从 40 至 110 GHz
- 低噪声、高增益和中等功率选择
- WR10, WR12, WR15 & WR15接口
- TRP & TIS的OTA测试的理想之选

带连接器的放大器



- 带宽从50 kHz 至95 GHz
- 2.92, 2.4, 1.85 & 1.0mm 连接器选项
- 增益最高至 45 dB
- 噪声系数低至 1.7 dB
- 功率高达1W

增益可调放大器



- 带宽从18 至 54 GHz
- 增益最高至 50 dB
- 支持精确的17 dB衰减功能，可通过模拟信号或数字信号控制
- 饱和输出功率最高至 +1W
- 带遥测功能的交互式图形用户界面(GUI)

Mini-Circuits®

性、快速的数字调谐、高线性度以及稳定的信道间性能。这些异构前端 IC（采用 GaN/Si 进行功率放大，采用 SOI 进行滤波 / 控制）随后被共同封装或多芯片集成到一个紧凑的模块中（图 7）。该多芯片模块可直接安装在相控阵天线板上，提供了一个具备所有必要功能的完整、自包含的射频模块。这种架构在保持下一代系统所需的宽带灵活性与波束成形精度的同时，大幅缩减了电路板尺寸、组装成本以及整体重量和功耗。

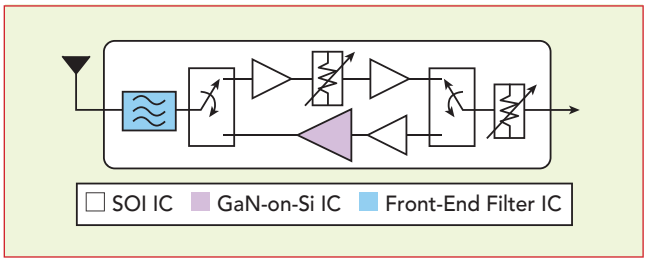


图7：前端多芯片模块示意图

当然，将这些器件集成在一起也面临着诸多挑战。在集成多个集成电路时，需要考虑许多因素，例如它们可以放置得多近、如何从成品封装中散热（是从集成电路顶部还是通过下一级组装件从器件底部散热）、使用何种凸点材料，以及在倒装芯片器件的回流焊过程中这些材料是否兼容等，仅举几例，见图 8。

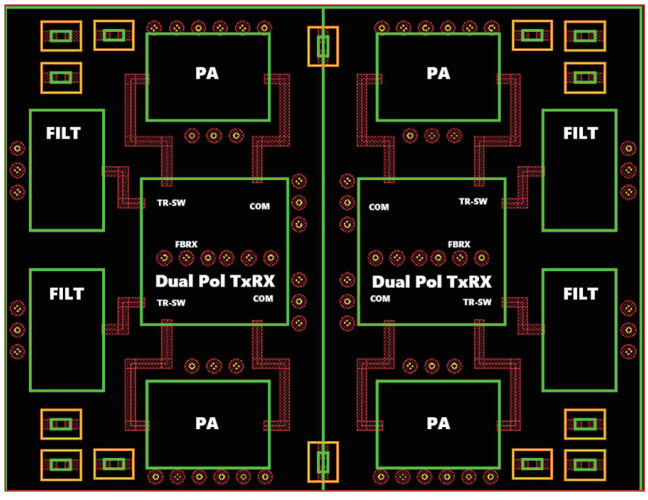


图8：前端多芯片模块布局示例。

这要求设计团队对这些事项进行仔细管理，通常需要经过多次试产来优化组装工艺并确保高良率。管理所有相关材料之间的热膨胀系数（CTE）不匹配，对于设计高可靠性产品以及确保各界面应力得到妥善控制以维持长期功能至关重要。从项目初期就与封装和组装供应商密切合作，是确保项目成功的关键。

结论

随着宽带相控阵系统的持续演进，直接射频采样、基于 SOI 的可调滤波器以及异构前端集成的融合，将推动下一代电磁优势的实现。通过直接采样实现的架构简化，直接解决了从机载电子战套件到卫星有效载荷及多功能天线阵列等平台所面临的超宽瞬时带宽、密集频谱环境以及严格的 SWaP-C 约束等核心挑战。

展望未来，这些技术将加速向多域同步作战的转型。SOI 可调滤波器将日益取代笨重的开关式滤波器组。这一转变使系统在竞争激烈的频谱环境中具备更精细的灵活性：通过快速重调谐，既可抵消频率敏捷的干扰源、剔除窄带干扰源，又可在多吉赫兹的瞬时带宽内维持抗混叠保护，同时保持数字波束成形所必需的相位 / 振幅一致性。

异构集成将发挥更加核心的作用。将高功率、高效率的硅基氮化镓（GaN/Si）功率放大器与用于可调滤波的 SOI 技术相结合，可实现紧凑且可拼接的收发模块（TRM）。更长远的发展趋势指向更深层次的系统级封装（SiP）和 3D 异构集成，可能融合先进的封装技术以实现超低延迟处理。

支撑这些进步的国防技术也与新兴的 6G FR3 生态系统密切相关，其频率范围约为 7 至 24 GHz。为电子战和雷达应用开发的硅基氮化镓功率放大器和 SOI 可调滤波器，与频率范围 3 的前端要求直接契合，这种军民两用融合将加速工艺成熟度，并降低两个市场的成本。这一硬件基础进一步为行业布局集成感知与通信（ISAC）架构奠定了坚实基础。在该架构中，单一宽带前端可同时支持高吞吐量数据通信以及雷达和定位等主动感知功能。最初为多功能电子战平台设计的 SOI 可调滤波器和异构前端模块，完全能够满足 ISAC 对射频前端在线性度、滤波性能和瞬时带宽方面的要求。

通过将传统分立架构与软件定义的数字化智能射频硬件相结合，基于 SOI 技术的可调滤波和异构集成将在未来几十年内继续成为实现空、海、陆、天及网络领域电磁优势的关键。对工艺优化、封装创新和多领域协同设计的持续投入将进一步提升性能，从而推动认知型和多功能射频系统的开发，拓展电子战及相关领域的可能性。■

MiCable

通过 ISO9001质量管理体系认证
通过GJB9001C国军标质量管理体系认证

2~6GHz
大功率表贴式90°电桥

NEW

低驻波/低插损/高隔离　优异的幅度/相位平衡

体积小，高性价比



P/N: Q2M200600

工作频段	GHz	2~6
额定功率	W (Max.)	100
标称相位差	Deg. (Max.)	90
VSWR	:1 (Max.)	1.3
插入损耗*	dB (Max.)	0.27
幅度平衡	dB (Max.)	±1
相位平衡	Deg. (Max.)	±5
隔离度	dB (Min.)	18
尺寸	mm (LxWxH)	5.08x14.22x3.03

*不包含理论耦合分配损耗3dB和耦合幅度不平衡



P/N: Q5M200600

工作频段	GHz	2~6
额定功率	W (Max.)	250
标称相位差	Deg. (Max.)	90
VSWR	:1 (Max.)	1.3
插入损耗*	dB (Max.)	0.25
幅度平衡	dB (Max.)	±1.4
相位平衡	Deg. (Max.)	±5
隔离度	dB (Min.)	17
尺寸	mm (LxWxH)	8.89x14.22x2.35

*不包含理论耦合分配损耗3dB和耦合幅度不平衡

应用:功率放大器、功率合成网络、天线馈电网络、调制器、移相器...

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家

关注微信公众号

福建迈可博电子科技集团股份有限公司
电话:400-918-0388
邮箱:sales@micable.cn
网址:www.micable.cn

经销商:伟博电讯有限公司
电话:400-887-3088
邮箱:sales@mitron.cn
网址:www.mitron.cn

从Ad Hoc仿真到协调一致的射频设计工作流

Jason Boh and Matt Ozalas, Keysight Technologies
Don Dingee, STRATISET

射频电路和系统的复杂性，加上严苛的性能目标，使得仿真变得至关重要。历史上，仿真需要手动配置和运行，工程师需审查结果并决定后续步骤。近年来，基于 Python 的自动化已成为一种极具吸引力的替代方案，提高了效率、可扩展性和可重复性。然而，许多射频工程师并不认为自己是程序员，这使得他们难以将深厚的设计专业知识转化为完全由代码构建的工作流。

一种协调射频仿真的新范式正在兴起。该方法论用可执行的可视化流程图取代了纯粹基于代码的自动化。但这并非将 Python 排除在外，而是该方法涵盖了无代码、低代码和全代码协调，既能满足需求，又能适应个人偏好。将 Python 与可视化流程图相结合，兼顾了两者的优势：人类可以快速理解逻辑，而决策则可交由具有自主决策能力的 AI 处理。

我们将通过射频功率放大器（PA）设计示例和内在节点波形工程技术，演示基于流程图方法的优势。该方法将常见的仿真任务（包括直流内阻（DCIV）、S 参数提取、负载牵引与源牵引分析、谐波平衡（HB）、参数扫描和优化）整合到一个可执行的流程中。最后，我们将探讨人工智能如何通过代理建模、自然语言提示和自主决策融入这一工作流。

射频工作流协调——一种新的流程图范式

与许多软件应用一样，射频仿真器最初采用命令行界面，随后演变为图形用户界面（GUI）。对话框通常直观易用，包含按钮、复选框、下拉菜单和简短文本输入框等功能。虽然学习曲线较短，但 GUI 也存在缺点。例如，要在 Ad Hoc 仿真运行中获得一致的结果，每次都必须以完全相同的方式填写所有字段。可重用的仿真模板虽能提供帮助，但由于它们通常可编辑，因此可追溯性仍难以实现。GUI 的另一个主要局限在于可扩展性：随着电路复杂度和设计变量数量的增加，手动编辑变得不切实际。

脚本编程通过促进可重复性并实现可扩展性，改善了这一状况。许多射频软件工具开始通过各种（有时是专有的）脚本语言增加可编程性。随后，Python 横空出世，发展成为全球最受欢迎的编程语言。一些 EDA 供应商开始围绕 Python 进行工具重构，从而受益于其庞大的开源库生态系统以及更强的代码可移植性和可重用性。

是德科技顺应这一趋势，在其现有软件平台（包括 Advanced Design System (ADS)）中增加了对 Python 的支持。与此同时，公司还致力于研发一款名为 RF Circuit Simulation Professional (Nexus) 的下一代原生 Python 平台，该平台现已发布并向客户开放。Nexus 的设计充分考虑了自动化和人工智能就绪性。[1]

基于 Nexus，是德科技在重塑射频设计工作流方面迈出了新的一步。Nexus Connect 代表了一种新范式，它使个人和组织能够将设计工程流程以流程图的形式呈现出来，类似于使用可视化工具记录测量流程的方式。如图 1 所示，这些流程图由各种操作块（即

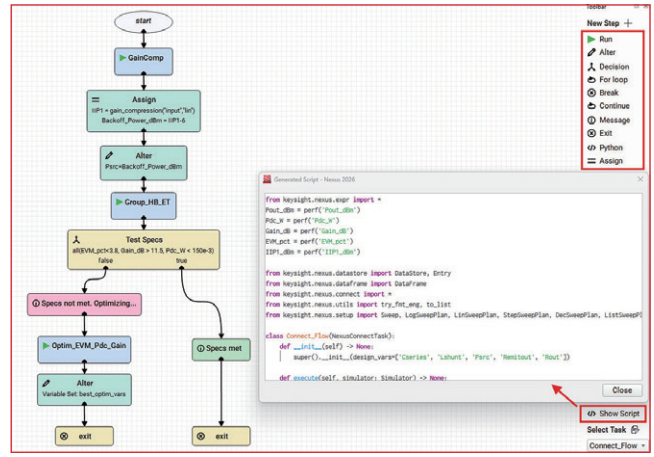


图 1：Nexus Connect 流程图及其相关的 Python 代码。

DC 至 86 GHz

滤波器技术

应用广泛



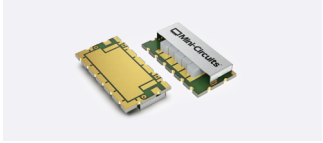
了解更多

腔体



- 通带范围至43.5 GHz
- 阻带范围至 57 GHz
- 带宽窄至1%
- 100+ dB的抑制度

陶瓷谐振器



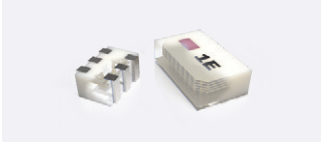
- 分数带宽从 0.5 至 40%
- 优异的功率处理能力，最高至 20W
- 微型SMT封装实现高Q 值

集总L–C



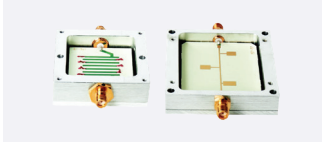
- 广泛的产品选择
- 多种封装选择，包括水洗封装
- 多种滤波器拓扑结构

LTCC



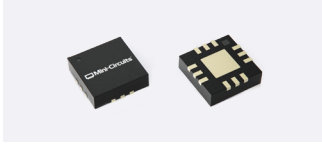
- 体积小，最小封装0202
- 业界最丰富的毫米波 LTCC 滤波器选择
- 专有设计，阻带抑制度高达 100 dB

微带线



- 带连接器设计，分数带宽为 4%至40%
- 最高功率处理能力为 10W
- 平坦的群延迟

MMIC非反射型



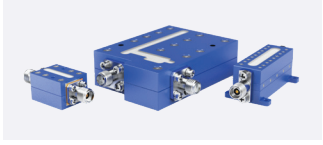
- 专利设计，吸收并内部消除阻带信号
- 与放大器、混频器、倍频器 ADC/DAC等完美搭配使用

矩形波导



- WR–12, WR–15和WR–28接口
- 通带范围高达 87 GHz
- 高阻带抑制，达到40 dB

悬置基片



- 超宽通带，最高可达 26 GHz
- 宽阻带，最高可达 40 GHz
- 高 Q 值

氧化铝薄膜组件



- 通带范围从 DC 至 40 GHz
- 宽通带内实现高抑制
- 微型SMT封装

Mini-Circuits®

“步骤”）组成，其基础是可修改的 Python 代码。流程图可管理任务和决策，使预先规划、协调一致的工作流程能够自动运行并被精确复现。

可视化流程图有助于工程团队捕捉和共享信息。从设计项目启动的那一刻起，工程思路便变得透明，并以电子形式保存下来，而不会像物理白板被擦除时那样丢失。团队成员无论技能水平如何，都不再需要翻阅繁琐的文档或四处寻找同事，而是能够立即查看所选的仿真类型和参数、用于优化的目标，以及根据结果决定后续步骤的标准。流程图还可以作为设计评审的焦点。新设计可以基于可重用的流程图展开。通过改进协调机制和减少工作流程中的阻力所节省的时间，会迅速累积起来。

采用内在节点模型和波形工程的PA设计

最好的说明方式是举一个实际案例。本文重点探讨射频功率放大器（PA）设计，特别是 J 类放大器——其工作原理与 B 类相似，但通过谐波调谐来提高效率。PA 设计的复杂性使其成为讨论工作流协调的理想载体。本讨论将保持高层次的概览，以便所有射频设计师都能理解，而不仅限于 PA 领域的专家。在此示例中，ADS 用于原理图捕获和数据显示，Nexus 用于运行仿真。

关于功率放大器的外在设计方法已有大量论述，部分原因在于这些方法与设计人员测量和表征电路的方式相契合。这种方法将仿真或测量的参考平面设置在物理上可访问的边界处——通常是晶体管端子，即封装引脚或芯片边缘。因此，外在模型或测量数据集本质上包含了器件内部存在的寄生电阻、电容和电感。

相比之下，内在设计方法分析的是器件内部节点而非引脚处的电压和电流。通过更接近内在电流源进行设计，设计师可以直接观察到通常被器件寄生参数掩盖的波形。这种视角能更深入地洞察晶体管的工作原理，并有助于评估功率放大器的关键性能指标。图 2 展示了一个概念性的、非工艺特定的 GaN 晶体管原理图，其中其内在器件节点被明确标出。

通过访问内在节点，功率放大器（PA）设计人员能够基于第一性原理构建电路。采用内在节点方法的挑战在于，需要许多手动步骤来迭代优化设计。[2]

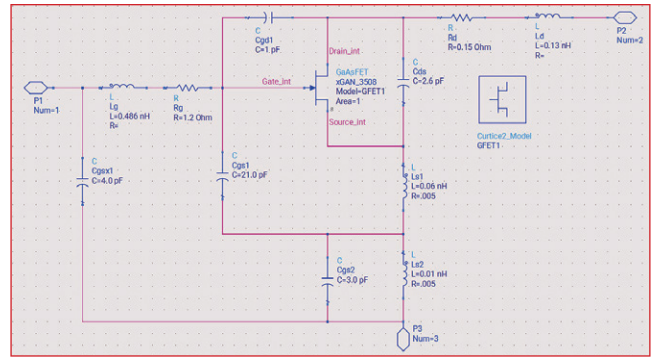


图2：在 ADS 中展示的、带有电流发生器和寄生参数的内建节点 GaN 晶体管模型。

将理想的非线性电压和电流波形叠加在器件的直流电流 - 电压（DCIV）曲线上，以确定器件在该工作状态下可达到的功率和效率。

经过策略性设计的波形可减少时域电压与电流波形之间的重叠，从而将电阻性功耗降至最低。

J 类工作模式通过调整二次谐波负载阻抗来提升电压波形，而更高次谐波则塑造电流波形，理论上可实现 78.5% 的效率，且其谐波阻抗设置比 B 类更为灵活。

随后，利用 FFT 将时域波形转换为频域，从而计算出基频和谐波频率下的阻抗值。

通过将这些阻抗应用回内结晶体管模型中的理想化电流发生器，能量便组织成了我们最初设定的高效波形，从而最大限度地提高了器件的可实现功率效率。

如图 3 所示，ADS 中的功率放大器（PA）设计工作台原理图模拟了一个负载牵引测量系统。[3] 它包括谐波调谐器、偏置网络以及用于 A 波（入射波）和 B 波（反射波）的接收器，从而能够对功率放大器指标进行全面分析。被测器件（DUT）是图 2 所示的 GaN 场效应管（FET）模型。

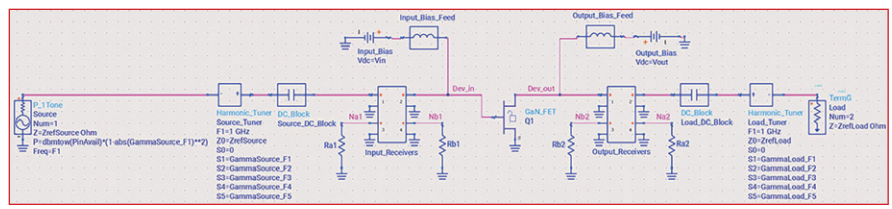


图3：在 ADS 中使用 GaN FET 模型的功率放大器（PA）设计工作台原理图。

一个 Nexus Connect 任务即可捕获完成 J 类放大器设计大部分工作所需的分析序列和任务。图 4 展示了 Nexus Connect 可执行流程图的前几个步骤。

首先，该任务执行 DCIV 扫描，随后针对每个谐波的偏置和目标固有阻抗（Zs）进行负载线计算。

然后，它依次优化每个谐波的外在负载，以达到目标内在 Zs。

接下来，它执行源牵引分析并调整输入功率，以匹配功率和效率。

然后，进行 S 参数分析，包括使用 Winslow 虚拟探针进行的稳定性计算。

最后，通过功率扫描 HB 分析来确认功率放大器的整体性能。

随着流程图执行图的推进，运行块的颜色可能会发生变化（可编程设置），双击一个块可显示仿真或优化结果。图 4 还显示了点击图表时首次负载牵引分析的部分优化结果。

设计人员可以设置顶级参数，例如目标输出功率、alpha（可在不影响功率或效率的情况下重塑电压波形并改变目标阻抗）以及静态（q）点处器件最大输出电流的百分比。使用新的顶级参数重新运行流程图可快速生成更新后的结果（在笔记本电脑上不到一分钟即可完成）。

推导目标固有伽马值需要通过将 q 点与某个拐点连接起来，从 DCIV 扫描数据中构建负载线。首先，简单的 Python 算法和启发式方法根据器件的击穿电压以及截止时的目标输出电流（最大输出电流的一小部分）确定 q 点。然后，针对所有模拟的 Vin 曲线计算拐点，如图 5 所示。

接下来，针对所有拐点 / 静态点组合评估负载线指标，并使用额外的 Python 算法从候选负载线中进行选择。这些算法在沿拐点向下搜索的过程中，会平衡输出功率与效率。（本文不重点探讨算法的具体细节——关键在于所有决策和规则均在执行流程图中得到了正式体现。）图 6 中的蓝色曲线是整流后的负载线（或 α 等于 0.0 时的 IV 摆幅）。当 FET 在 q 点被偏置为 J 类工作时，施加射频信号后，瞬时电流和电压会沿该线摆动。FET 在射频周期的半个周期内不导通电流，从而产生 50% 的占空比。当 α 为 0.0 时，电压波形为纯正弦波。使用 α 值为 1.0 或 -1.0 会使电压波形产生“谐波增强”，将目标固有 γ 值移出史密斯图的实轴，并使 IV 摆幅轨迹向外扩展，远离图中青绿色所示的整流负载线。

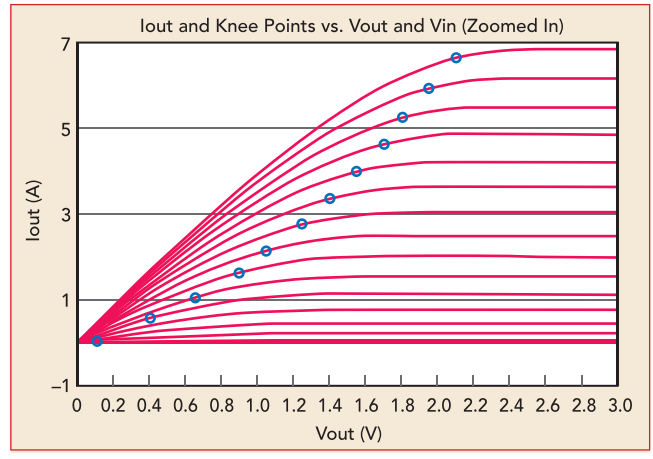


图 5：绘制了包含所有计算所得拐点位置的 DCIV 扫描数据。

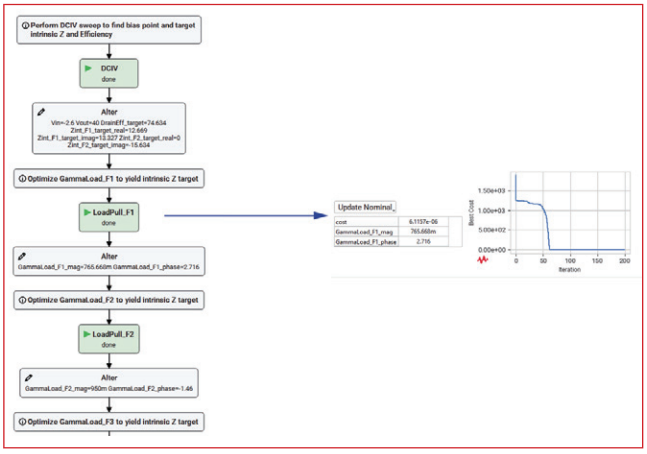


图 4：显示了负载牵引优化结果的 Nexus Connect 任务执行流程图。

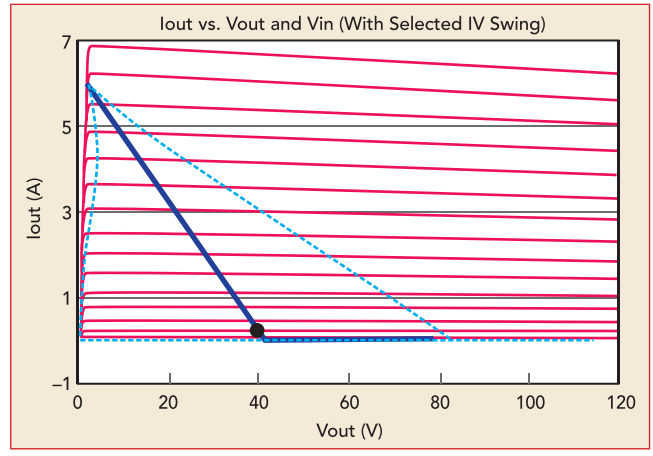


图 6：根据 DC-IV 扫描数据计算得到的 α=0.0（蓝色）、α=1.0（青绿色）及 q 点（黑色）的 IV 摆幅轨迹。

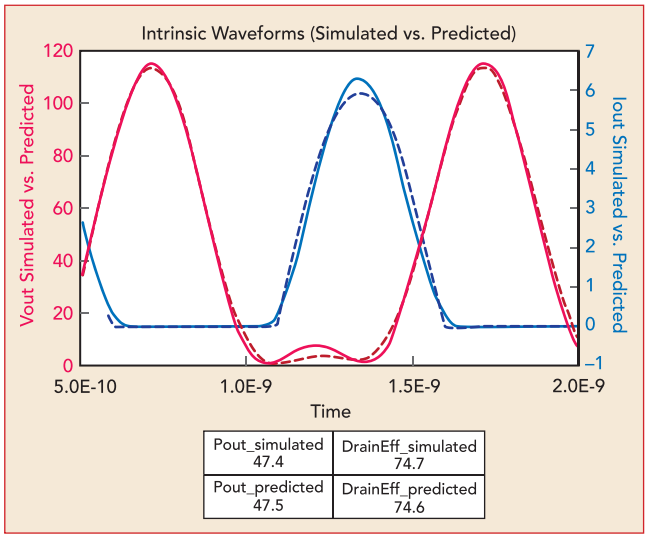


图7：仿真（实线）与预测（虚线）的固有波形、输出功率及效率对比。

一旦 Nexus Connect 任务完成，我们便实现了模拟结果与预测结果在内在电压和电流波形、功率及效率方面的良好匹配，如图 7 所示。

外在伽马值（最终用于匹配网络设计）因器件模型中的寄生参数而与内在伽马值不同。Nexus Connect 任务会依次优化最高至第五次谐波的外在伽马值（见图 8），以最大限度地减少在实现目标内在伽马值过程中的误差。

所示的整个流程——包括仿真、算法和决策——均被整合并执行于单个 Nexus Connect 流程图中。虽然工程师可以通过 Nexus 图形用户界面手动启动相同的步骤，但要从彼此独立、互不关联的分析和任务中重现完全可重复的步骤将非常困难。

应用 AI 进行高级建模、分析和优化

通过捕获工程流程，设计人员可以创建定义明确的接口，供未来的 AI 工具直接利用。在基于 AI 的工作流中，代理是能够自主运行的软件程序，而技能则是定义明确的一组指令，代理或大型语言模型（LLMs）可以调用这些指令来执行特定任务。将工程工作流一步步绘制成图，为工程师提供了高效利用代理和技能的简便方法。例如，一个 AI 代理可以扩展先前的流程，对特定工艺中所有可用的晶体管进行特性分析，并确定 哪些器件在一组要求下表现最佳。该代理或 LLM 可能会使用一个技能，该技能描述了如何设置并运行 DCIV 扫描以及计算 J 类负载线。随着 AI 工具的演进，工程流程的这些部分将逐渐融合，为设计人员提供更强大的能力。

本例中的波形工程协调仅是更广泛的功率放大器（PA）设计流程中的一小部分。先前的流程对器件输出节点所需的外部阻抗进行了表征，以实现教科书中的 J 类波形。其输出可能是一张包含基频和谐波频

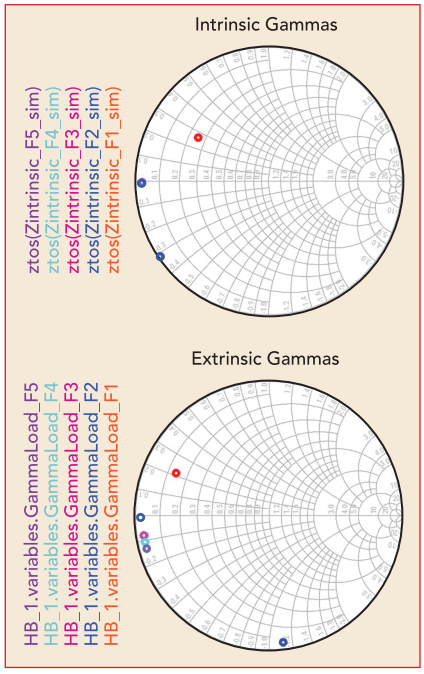


图8：各谐波处的内在和外在 γ 值。

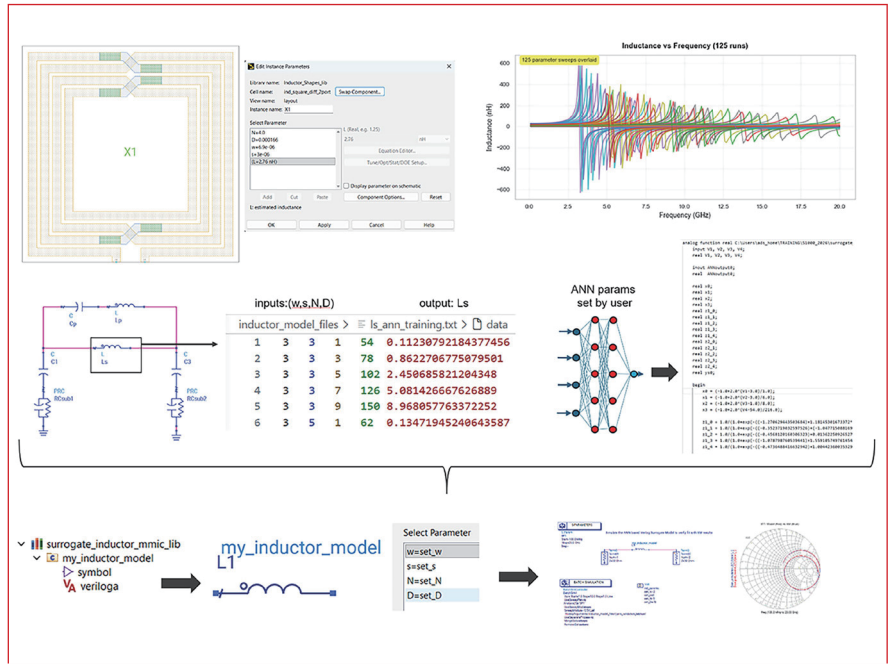


图9：通过 Python 脚本对电感器的 ANN 模型进行了验证，并将其合成到电路中。

率下阻抗值的表格，当这些阻抗值施加到晶体管上时，可实现高效的器件工作。下一步是设计一个匹配网络，将这些阻抗呈现给器件。快速发展的 AI 能力很可能将简化这一过程。例如，基于人工神经网络（ANN）的替代模型可以减少或消除计算密集型的电磁（EM）仿真，甚至能够实现物理结构的实时合成。

代理建模涉及一个前期、有时资源密集型的训练过程，该过程需要进行广泛的特性分析（例如，电磁仿真）。一旦训练完成并经过验证，基于物理结构的仿真和优化将变得极其快速，这使得代理模型成为人工智能辅助或完全自主设计的有力候选方案。近年来，代理建模方法备受关注，因为它们能够合成具有良好频率响应的非传统、类似二维码的物理结构。[4] 最新研究甚至证明了此类结构在谐波匹配功率放大器（PA）方面的潜力，正如本例所示。[5] 需要注意的是，代理建模不仅限于像素化结构；它适用于任何可参数化的物理结构，甚至包括电感器。

为说明这一点，针对 GaN MMIC 工艺中几何形状各异的一组电感器，提取了一个基于人工神经网络（ANN）的代理模型，如图 9 所示。首先，使用是德科技 RFPro 对每组独特的电感器几何参数（如宽度、间距、匝数和直径）进行电磁仿真。接下来，将一个由 11 个元件组成的改良 π 型网络拟合到 EM 数据上。然后，针对 π 型网络中的每个电路元件，使用是德科技专有的 ANN 引擎（在 ADS 中以 Python 函数的形式提供）提取一个独立的 ANN。[6] 该 ANN 生成 Verilog-A 函数，将物理参数（w、s、N、D）与电路元件值（电容器、电感器和电阻器）相关联。结果是一个能够反映物理结果且其输入参数可调或可优化的快速模型。

随后，利用该代理模型快速调整和优化了输出匹配网络，该网络为器件提供了适当的外部阻抗，从而实现了近乎理想的 J 类工作，如图 10 所示。

随着更低层次工程流程的更多细节在 Nexus Connect 中被图示化和捕获，常规任务正日益实现自动化，这使得工程师能够利用 AI 工具专注于更高层次的设计。这一路径还将通向能够增强或取代图形用户界面（GUI）和脚本的自然语言接口。

总而言之，从 Ad Hoc 仿真转向基于流程图的可执行协调机制，使射频设计工作流更具可重复性、可扩展性，并更易于在团队间共享。这种方法使工程师能够更有效地捕捉复杂的设计流程，为自动化提供清晰的接口，并为人工智能加速设计周期奠定基础，同时确保工程师始终掌握控制权。

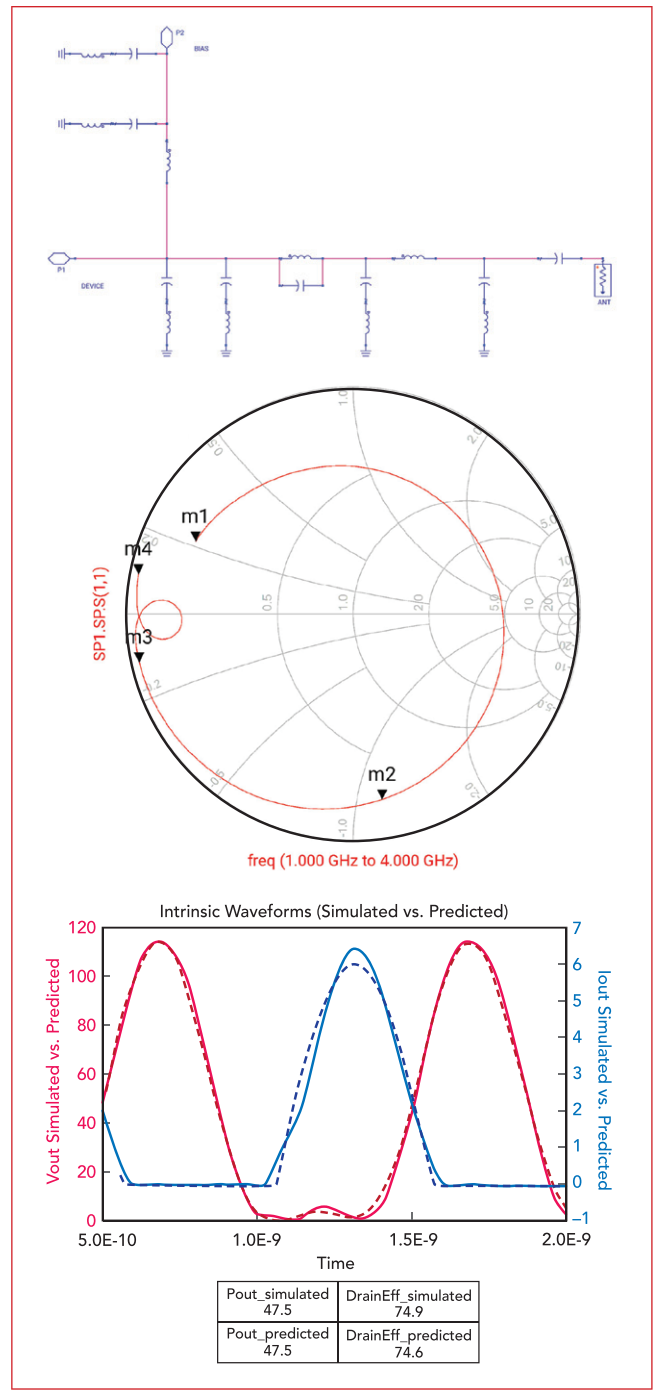


图10：利用电感器代理模型，将输出匹配网络调谐至 J 类外在目标。

参考文献

见 https://www.microwavejournal.com/articles/45946

Cadence Agentic AI 将如何提升射频设计效率

David Vye, Product Management Director, Cadence

关于射频设计中人工智能的大部分讨论，都集中在工具是否有一天能直接根据文本提示合成放大器、滤波器或天线。这种可能性目前仍停留在推测阶段。眼前的机遇则更为务实：利用人工智能减少那些消耗资深工程师时间的重复性工作，包括设置、优化、迁移和结果分析。对于面临更紧迫进度和专家资源有限的射频团队而言，短期价值最有可能体现在这一方面。

从这个角度来看，核心问题不在于 AI 能否生成符合最先进性能目标的合理射频器件，而在于它能否提升开发此类器件的工作流中的执行效率。对于射频设计师而言，真正的益处在于将 AI 与强大的计算软件以及已用于将电路设计意图转化为物理实现的 IC/ 封装协同设计工作流相结合。在此背景下，AI 有助于减少在仿真、优化、布局、电磁分析（EM）和封装集成等环节中权衡取舍所需的手动工作量。这正是代理式 AI 不可或缺之处——在加速开发的同时，确保设计决策基于经过验证的工作流程、代工厂批准的 PDK、仿真模型以及设计中的电磁分析。参见图 1。

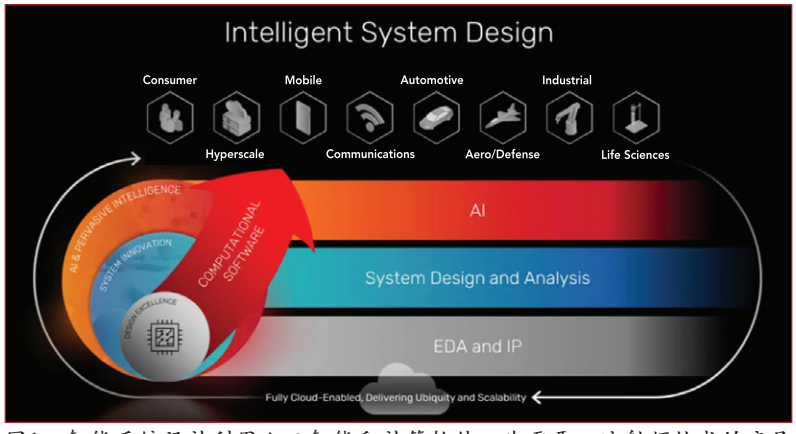


图 1：智能系统设计利用人工智能和计算软件，为需要一流射频技术的产品开发提供支持。

整个射频设计团队的生产力提升

“专家参与”至关重要，因为即使项目进度不断压缩，射频和定制模拟项目仍然高度依赖于数量相对较少但经验极其丰富的设计师群体。工程判断力依然至关重要。代理式 AI 将这种判断力扩展到整个团队。通过从数据、IP 和既定工具流程中提取有用的设计背景信息，代理式 AI 使任何经验水平的工程师都能应用经过验证的 RF 方法论，不再仅限于资深工程师。曾经需要深厚专业知识的工作流程，如今在整个组织中都能轻松应用，不仅减少了人工负担，还确保了最佳实践的更一致应用。

借助 Cadence AI 技术栈实现代理式 AI

当前工程领域中的许多 AI 演示都侧重于生成文本、脚本或广泛设计建议的大型语言模型。这些功能固然有用，但射频设计更重视具有物理意义的模型、可信的仿真、多目标优化以及始终基于代工厂批准工艺的工作流程。Cadence 正将其 AI 努力融入到已用于创建和验证量产射频设计的计算软件中。

这一区别至关重要。通用型 AI 模型虽能提出行动建议，但其本质上并不理解非线性器件行为、电磁耦合、受布局影响的性能，以及决定射频设计能否成功制造

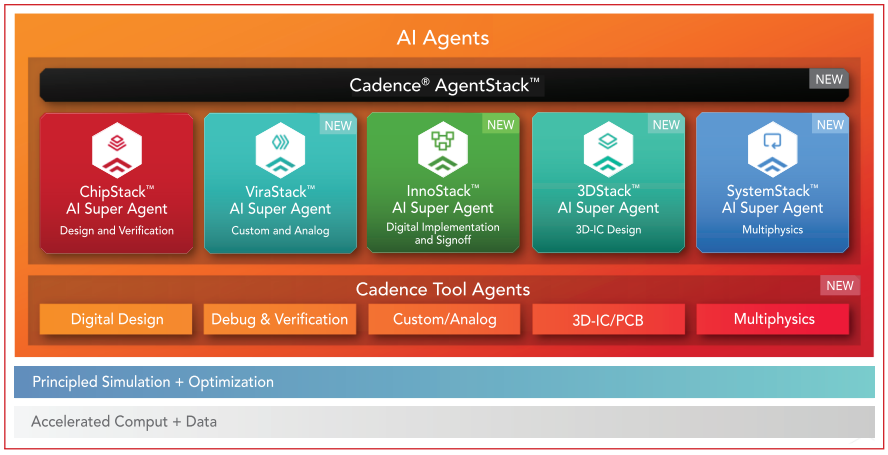


图2：Cadence AI 超级代理协调不同工程领域间的 RF 三维集成电路（3D-IC）设计，支持系统开发向左移。

的各种约束条件。Cadence 的方法将基于语言的交互与领域特定的设计引擎及工作流基础设施相结合，从而能够融入设计专业知识。

Cadence 最近推出了 AgentStack，作为覆盖芯片、3D-IC 和系统设计的 AI 超级代理的协调层（见图 2）。对于在系统层面与多学科工程团队协作的 RF 团队而言，该架构能够协调专用代理、共享设计知识，并将自然语言请求与协调这些工作流及设计 / 分析任务的工具相链接。

知识共享并不一定能确保将正确的知识应用于更棘手的问题。语言模型可能会生成一个看似合理的测试平台或工作流建议，但其中是否包含合成实用（物理上可实现）射频设计所需的知识？ Cadence 的方法基于两个概念：心智模型（见图 3），它捕获规格说明、先前设计以及其他基于上下文的意图结构化表示；以及 AI 代理技能，它定义了 AI 代理如何与底层工具交互以完成特定任务。心智模型与代理技能相结合，确保 AI 推理既基于正确的设计上下文，又基于正确的工具执行——从而将高层次的意图与物理上具有实际意义的结果联系起来。

驱动 Cadence 代理式 AI 能力的基础是 JedAI 平台。该平台无缝集成大型语言模型（LLMs），并利用云、混合及本地基础设施的加速计算能力。通过抽象化模型访问、数据协调和计算后端，Cadence 的 AI 超级代理能够高效扩展、安全执行并提供一致的性能——将 AI 更紧密地融入实际设计工作流，同时避免将客户锁定在单一模型或部署环境中。

将代理式人工智能应用于模拟与射频设计

定制模拟和射频设计仍高度依赖人工操作，因为设计进展取决于在电路行为、布局效应、验证设置和工艺约束之间反复权衡取舍。集成于 Virtuoso Studio 平台的 ViraStack AI 超级代理，旨在通过支持原理图创建、测试台开发、电路优化和设计迁移，为定制模拟 IC 设计师减轻部分负担。对于拥有大量经过验证的 IP 库的企业而言，更具吸引力的意义在于，能够重用历史设计知识，从而减少从一个项目或工艺节点到下一个项目或工艺节点时所需的手动转换工作。

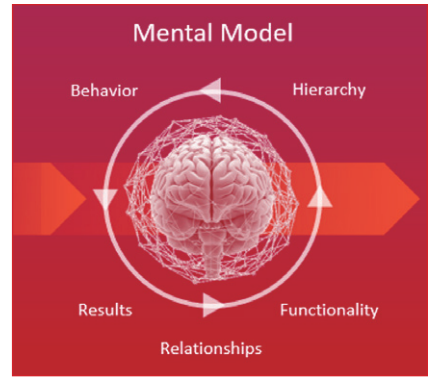


图3：心智模型汇总设计数据以指导超级代理。

Cadence 人工智能战略

Cadence 将其 AI 路线图划分为五个发展阶段，这与定义自动驾驶汽车开发阶段所采用的等级体系相似。对于射频（RF）设计师而言，每个阶段都能消除不同类型的手动工作，同时将工程决策权掌握在用户手中。参见图 4。

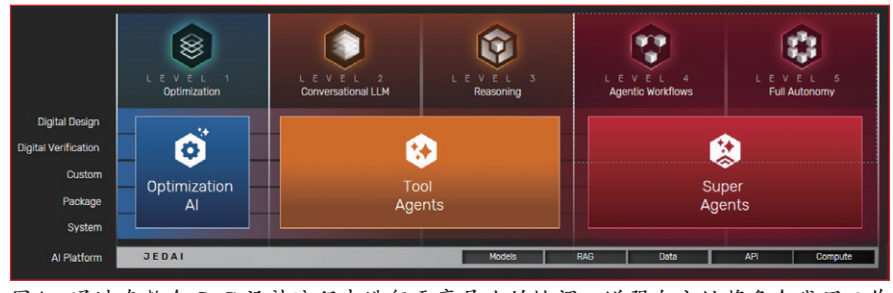


图4：通过在整个 SoC 设计流程中进行更高层次的协调，增强自主性将多个代理工作流串联起来。

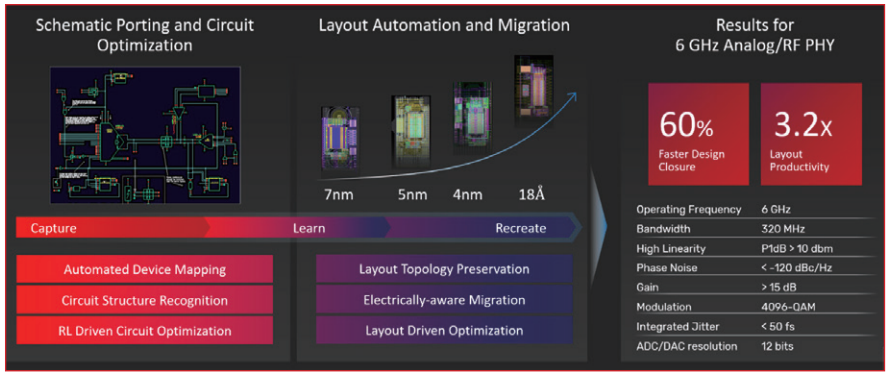


图5：工作流中基于 AI/ML 的优化（第 1 级演示），用于支持设计节点迁移。

第 1 级：优化 AI 将人工智能和机器学习（ML）直接嵌入优化引擎及周边设计流程中，例如电路优化、布局迁移和良率提升

第 2 级：对话式 AI 通过自然语言提供对文档、工具知识以及引导式用户交互的访问

第 3 级：具备上下文感知能力的推理代理，可将自然语言请求转换为跨工具的操作

第 4 级：代理工作流支持由 AI 超级代理协调的多步骤工作流，该代理管理执行特定设计任务的专用子代理

第 5 级：自主性提升通过更高级别的协调，将这些能力连接到更广泛的设计流程中。

第1级：优化型 AI 带来最直接的射频效益

在射频和模拟设计中，AI 最直接的价值源于优化和分析，而非完全自主。优化和设计综合功能早已是射频设计工具的标配，其出现早于近期基于人工智能的进展。例如，Microwave Office 软件集成了由人工智能驱动的搜索与优化功能，该功能可探索庞大的设计空间，以识别并排序最佳匹配网络解决方案，同时确定电路拓扑、元件参数及灵敏度信息。该方法支持任意用户定义的约束条件和优化目标，使设计人员能够直接根据系统或电路级性能目标来定义问题。

通过将超高速仿真与高效的搜索引擎相结合——该引擎每秒可评估超过 1000 万次仿真和成本函数——该功能可直接应用于基于仿真负载牵引数据（包括谐波负载牵引结果）的匹配网络综合。其结果是在大信号器件特性分析与优化后的、可实现的阻抗匹配网络之间建立起切实可行的联系。通过对话式人工智能，用户可从第 2 级开始使用自然语言访问此类任务。

Cadence 已开始应用 AI 和 ML 来自动化设置、探索庞大的设计空间，并针对性能和良率对设计进行重新调整。在工艺迁移工作中，这些方法还能通过帮助设计在新的工艺假设下收敛，从而减少人工返工。如图 5 所示，这是 AI 与工程产出直接关联的实际应用。

大规模波形分析

AI 辅助优化的一个实际应用是波形分析。随着仿真数据集的持续增长，人工审查波形变得越来越困难。与仅靠人工检查相比，机器学习辅助的波形分析提供了一种更快捷的实用方法，能够识别异常、分类行为并隔离可能的失效模式。参见图 6。

通过从波形数据中提取特征并应用分类和聚类方法，这些工具可以减少设计人员在筛选海量结果集上花费的时间。更大的好处不仅在于速度，还在于能够识别出那些需要工程师关注、否则可能会淹没在海量仿真数据中的情况。

射频设计需要能够理解物理实现的人工智能

在射频设计中，物理互连（传输线）是一种可通过调谐来影响电

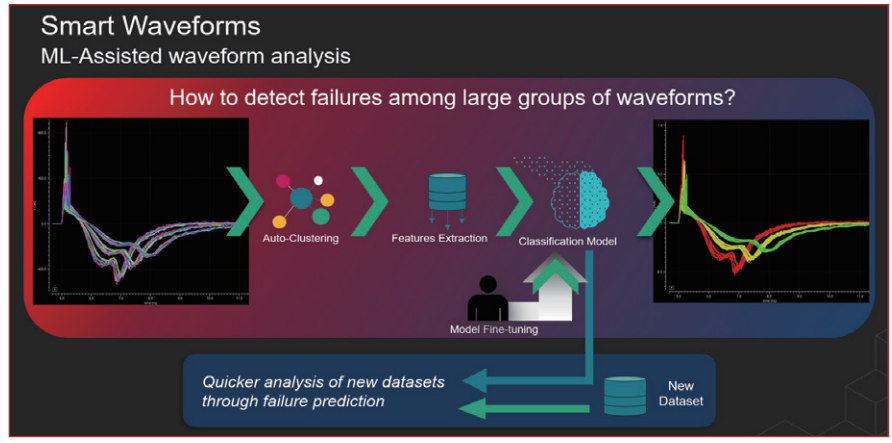


图6：第1级优化在设计节点迁移中发挥关键作用

气行为的设计元素，而不仅仅是需要后期校正的寄生效应。传输线、几何结构和电磁相互作用从一开始就是设计不可或缺的组成部分。将人工智能与射频设计平台相结合在此领域具有显著优势，因为这些平台已经以反映实际射频实践的方式，将原理图、布局、电磁分析和优化有机地结合在一起。参见图 7。

AWR 设计环境和新推出的 Virtuoso Studio RF 平台均支持统一的数据模型、原理图与布局的并行交互、集成式全波电磁分析以及参数化优化。在人工智能时代，这两个平台的架构特性变得愈发重要，因为它们为智能代理工作流提供了所需的互联基础。借助 Cadence JedAI 和超级代理基础设施，这些专用的射频设计平台提供了从实现到验证的射频产品开发全阶段所需的功能。

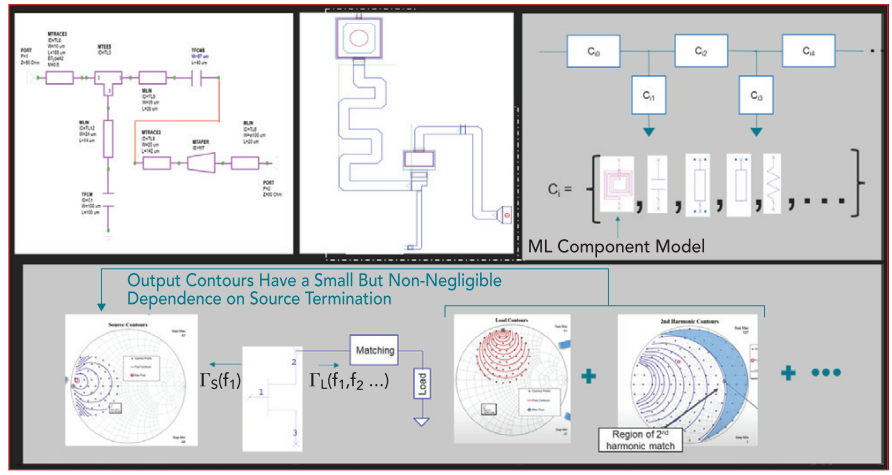


图7：优化和综合工具根据仿真数据和用户定义的设计目标生成网络

第2级：对话式AI降低工作阻力

对话式人工智能还能减少与复杂射频设计工具相关的日常操作摩擦。工程师无需在菜单、文档或旧项目文件中进行搜索，而是可以通过自然语言提出问题，并在设计环境中获得基于上下文的指导，参见图 8。

通过自然语言，用户可以请求测试平台设置、图形配置、脚本迁移以及设计环境的一般性指导。对于经验丰富的用户而言，其优势在于效率。对于经验较少的用户而言，其优势在于无需离开应用程序或翻阅大量用户参考资料，即可获取专业知识。自然语言界面使工程师能够就 AWR 技术提出问题，并从 Cadence AWR 文档中获得准确答案，这些答案还可辅以公司专有的设计参考资料。

第3级：推理代理协助执行设计任务

在第 3 级，智能代理将推理能力与上下文感知能力相结合，直接在工具内执行任务。它们能够针对用户请求，根据 Virtuoso 平台或 AWR 设计环境中原理图、布局或测试台的当前状态采取直接相关的行动，从而执行那些以往需要设计人员手动操作的任务。

这些任务在概念上大多并不困难，但往往因需要协调执行多个细微步骤而显得繁琐且耗时——这些步骤通常由具备相应工具知识的工程师在工作流中完成。第三级智能代理会执行这些步骤，在用户的指导下支持一系列的设计和仿真任务。

第4级：引领未来自主射频设计流程（第 5 级）的智能工作流

当人工智能能够协调设计流程中的多个步骤，而非仅协助完成单个任务时，生产力提升幅度将最大。

超级代理旨在支持贯穿设置、迁移、优化、电路分析、电磁分析及相关活动的这种互联执行。其优势不仅在于单个命令的自动化，更在于跨工具和抽象层级的协调——这始终是射频开发中时间损耗的根源。

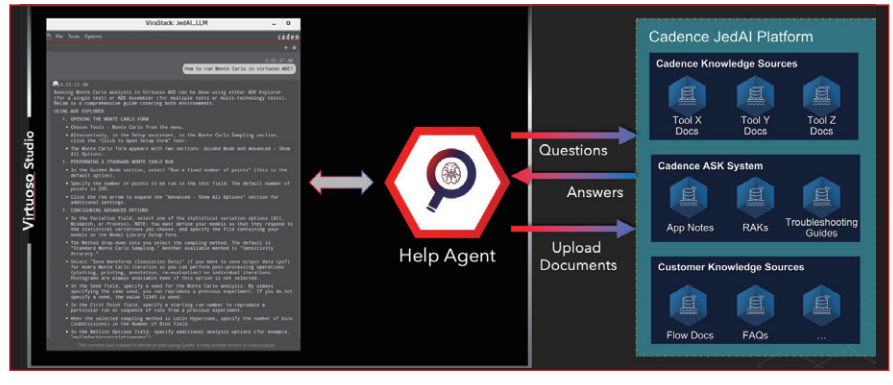


图8：第2级对话式大语言模型（LLM）通过自然语言接口提供文档信息访问。

以开发MMIC功率放大器（PA）涉及的多个步骤为例。通过在Virtuoso Studio RF平台或Microwave Office软件中使用任务代理，一种基于代理的工作流能够协调原本需要手动完成的步骤——包括设计输入、器件选型与特性分析（含负载牵引和稳定性分析）、测试台搭建、匹配网络设计、优化以及电磁验证——从而支持MMIC功率放大器的开发。在此设计流程中，Cadence RF超级代理将引导设计人员使用代工厂认证的PDK和测试台模板进行设计创建，随后推动早期研究工作，例如器件选型与尺寸确定、稳定性检查以及源/负载牵引特性分析，以确定匹配所需的阻抗目标。

在此基础上，该代理可生成并迭代匹配网络候选方案，针对所需的功率放大器指标运行多目标优化循环；同时，可直接从布局调用按需全波电磁提取（平面或3D有限元法），将设计中的电磁分析数据（S参数）嵌入电路仿真中，从而提高精度。实际上，“代理式”的价值并不会取代功率放大器设计人员的意图。尽管如此，它仍能自动化重复性的设置、执行和迭代步骤——在确保工作流基于代工厂验证的PDK结构的同时，加速从非线性特性分析到经电磁验证的实现这一过程。

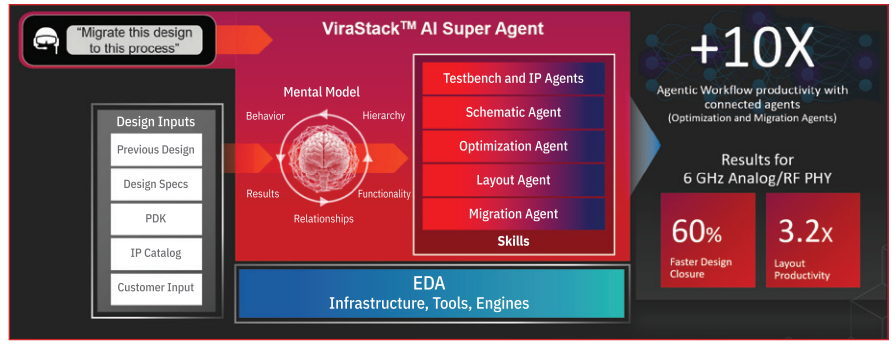


图9：ViraStack AI超级代理协调各专门代理的活动，在6GHz模拟/射频PHY设计的节点迁移中达成超过10倍的效率提升。

通过将共享的设计上下文与领域特定的执行相结合，这种方法有助于企业跨团队更一致地应用专家级方法。这在许多射频团队中尤为重要，因为在这些团队中，少数资深设计师往往掌握着不成比例的大部分工具设置和第一手设计知识。

已验证的影响

在已验证的6 GHz模拟/射频PHY迁移流程中，Cadence将人工智能驱动的优化、对话式辅助、推理代理和代理式工作流协调相结合，从而加速了迁移、优化、布局和验证各阶段的执行。参见图9。

- 设计收敛速度提升60%
- 基于代理的工作流生产力提升超过10倍
- 在迁移、优化、布局和验证任务之间实现协调执行。

总结

对于射频设计师而言，AI最具说服力的承诺并非从零开始的完全自动化设计，而是加快那些依赖真实工程判断的工作：设置、探索、迁移、优化、结果分析以及跨工具协调。Cadence之所以引人注目，是因为它正通过在量产中已发挥重要作用的计算软件和工作流基础设施来推进AI应用，其中包括值得信赖的仿真和优化引擎、集成电磁分析、统一的数据模型，以及与实现紧密关联的设计环境。随着智能工作流日趋成熟，这一基础将使采用AI的企业能够更快地交付更优质的产品，并有助于应对行业内射频专业人才短缺这一日益严峻的挑战。■

上接第29页

较大的空间间隔，同时动态范围和相位稳定性的劣化程度极小。对于可重构智能表面等新兴应用而言，这种架构尤为宝贵，因为在这些应用中，传统的单静态或伪双静态方法已难以满足需求。通过克服与电缆损耗和相位不稳定性相关的限制，Tensor平台实现了以往使用传统矢量网络分析仪（VNA）无法进行的新类别的测量。

新功能和性能的完整列表可谓不胜枚举。简而言之，Tensor VNA融合了高性能、卓越的灵活性和智能自动化。其先进的功能重新定义了测量效率，并拓展了射频和微波测试的边界。人工智能与真正的双静态测量能力的融合，标志着矢量网络分析领域迈出了重要一步。

参考文献

见 https://www.microwavejournal.com/articles/45819

最多支持八通道的入门级示波器



罗德与施瓦茨，www.rohde-schwarz.com

罗德与施瓦茨通过推出紧凑型四通道和八通道 MXO 3 示波器，扩展了其新一代 MXO 示波器产品组合，以小巧机身带来强大功能。MXO 3 采用了罗德与施瓦茨最初在 MXO 4 及 MXO 5/5C 系列仪器中开创的先进 MXO 技术，并将其融入紧凑的外形设计中，使工程师能够更全面地观察被测设备（DUT）的信号。

快速洞察

所有 MXO 3 型号均标配高达 99% 的实时捕获率，使用户能够即时观察到更丰富的信号细节和罕见的信号事件。与其他 MXO 型号一样，这些示波器利用罗德与施瓦茨开发的尖端 MXO-EP ASIC 技术，在多个维度上实现了速度与性能的提升。凭借每秒 450 万次波形采集速率，MXO 3 让用户能够即时检测到更多的信号细节并捕获罕见事件。

该系列示波器还具备每秒 60 万次触发事件的速率，并支持区域触发，为在时域中隔离事件（包括数学域和频域中的复杂信号）提供了灵活的解决方案。此外，MXO 3 每秒可执行 5 万次快速傅立叶变换（FFT），从而为电磁干扰（EMI）和谐波测试等应用提供更快速、更全面的分析能力。图 1 展示了 MXO 3 通过硬件处理 FFT 生成频谱显示的示例，揭示了频域中的细节，包括动态信号变化。凭借每秒 60 万次数学运算的能力，MXO 3 允许用户准确分析功率等信号，这类信号需要精确计算电压与电流的乘积。



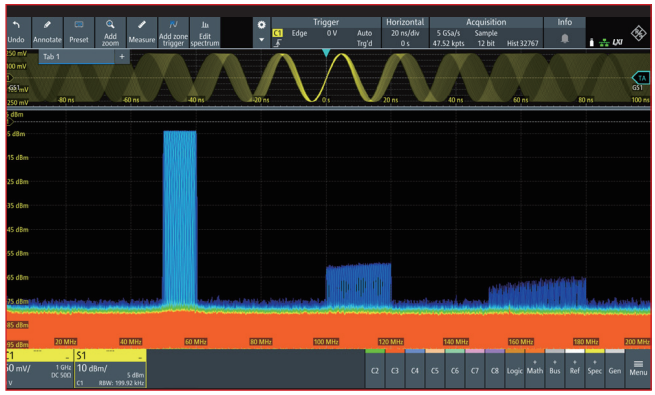


图1：MXO 3 的频谱显示。

精度

所有 MXO 3 型号均采用先进技术设计，以确保精确的测量隔离，并提供用户可信赖的测量结果。在所有采样率下，硬件均实现了 12 位垂直分辨率，用户即使在较大信号中也能观察到微小的信号变化。与传统的 8 位示波器相比，其分辨率提高了 16 倍。为了进一步提高精度，MXO 3 配备了 HD 模式，可揭示通常被噪声掩盖的信号细节（图 2）。该模式既能降低噪声，又能提供高达 18 位的垂直分辨率。与其他示波器不同，HD 模式在全采样率下运行，且通过硬件实现，确保了精度的同时不牺牲速度。

MXO 3 还提供宽偏移量范围，使用户能够采用最灵敏的垂直刻度设置，在最大限度降低测量系统噪声的同时捕获更多信号。在 50Ω 和 1MΩ 输入通道上，MXO 3 均可在 1mV/div 刻度下提供 ±3V 的偏移量，在同类产品中表现卓越。

紧凑型设计

无论是四通道还是八通道的 MXO 3 示波器，均采用紧凑便携的设计，可轻松安置于任何场所，包括空间狭窄的工作台。其小巧的占地面积为工程工作空间留出了更多发挥创意的空间。设备重量仅约 4 公斤，用户可根据需要轻松将 MXO 3 移动至新的测量位置。该仪器仅需 5U 的机架高度，确保空间利用率最大化。

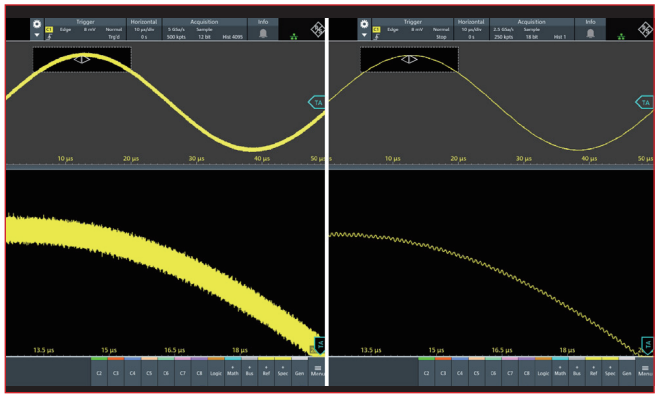


图2：HD 模式揭示了通常会被噪声掩盖的信号细节。

示波器是高度依赖视觉的工具，用户需要花费大量时间与仪器显示屏进行交互。MXO 3 系列配备 11.6 英寸全高清电容式触摸屏，并搭配直观的用户界面，从而提升用户体验。此外，该仪器紧凑的尺寸、业界领先的低噪音水平以及符合视频电子标准协会（VESA）标准的安装方式，使其成为工程环境的绝佳选择。

型号配置

MXO 3 系列示波器提供四通道和八通道两种型号，带宽选项包括 100MHz、200MHz、350MHz、500MHz 和 1GHz。对于有更高要求的用户，提供了多种升级选项。这些选项包括：配备混合信号示波器（MSO）选项的 16 个集成数字通道、50MHz 任意波形发生器、针对多种行业标准总线的协议解码和触发选项，以及用于扩展仪器功能的频率响应分析仪。

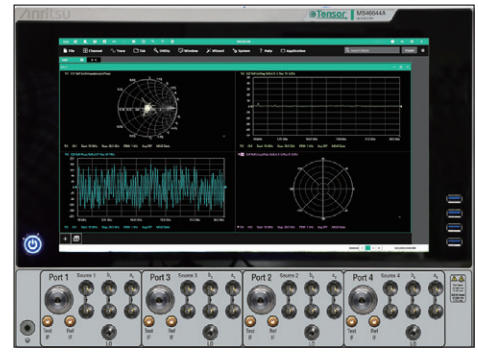
适用应用

MXO 3 是一款多功能台式仪器，集成了示波器、信号发生器和电源等多种传统设备。它可处理通用测量任务，分析时域和频域信号及其相关性——这对嵌入式系统测试、控制回路分析（包括波德图）以及逻辑 / 协议调试至关重要。

其功能延伸至电力电子领域，支持高压、大电流及光电隔离探头，并具备 HD 模式噪声抑制和八通道型号。在电力转换方面，MXO 3 的八个通道和 18 位 HD 模式为电机驱动器和逆变器等复杂系统提供了关键的可视化能力，从而能够进行精确的效率测量和优化。

此外，它通过多通道同步观测和高达 500Mpts 的深度存储，简化了电源序列分析，支持更长的记录时长，并能对微小信号事件进行精确分析。该仪器具备 3V 偏移量和高灵敏度（1mV/div），非常适合测量电源纹波和噪声。此外，其快速频谱分析能力使其成为快速识别 EMI 问题和噪声源的绝佳工具。■

新一代矢量网络分析仪拓展了测量视野



Alexander Chenakin, Jon Marteens, Navneet Kataria and Aaron Miller,
Anritsu Company

矢量网络分析仪（VNA）是射频 / 微波行业不可或缺的一部分[1,2]，并在研发、信号完整性、航空航天与国防及其他应用领域持续保持强劲增长，年均增长率超过 6%。[3] 它们被广泛用于表征各种无源、有源或频率转换器件，例如混频器。现代矢量网络分析仪越来越多地融入先进技术，以实现更快、更准确且更自动化的测量，同时将用户干预降至最低。安立（Anritsu）的 Tensor™ 矢量网络分析仪（图 1）代表了该领域的一项重大进步。它引入了人工智能（AI）功能、高速测量性能以及增强的架构灵活性。主要特点包括：

- 全球首创的 AI 辅助测量设置与优化
- 高速数据采集与传输
- 每个端口配备专用信号源，提升灵活性
- 对多个信号源和接收器的独立控制
- 真正的双向静态测量能力。

应用领域

Tensor 完全符合现代新一代平台的定义，支持多个行业的广泛应用。

信号完整性。信号完整性是增长最快的细分市场之一。Tensor 可对高速数字系统和数据服务器基础设施进行精确的多端口测量。在印刷电路板上测试连接现代高速设备（如专用于数据服务器的 CPU 和 GPU）、电气互连、背板以及服务器电缆的更多铜走线，是必须使用矢量网络分析仪（VNA）来确保信号完整性的典型应用场景。Tensor 的可扩展架构（通过开关矩阵支持 8 至 128 个端口）结合专有的自动化软件，可实现高精度、可重复且高效的测量，并具备出色的动态范围。

航空航天与国防。随着卫星、相控阵和雷达前端等射频系统的复杂性不断提高，对单个组件进行精确表征变得至关重要。即使是很微小的性能偏差，也可能影响系统功能。有源器件、混频器、高动态范围滤波器和相移器等器件，都需要进行快速、准确的测试。Tensor VNA 每个端口均配备专用信号源，无需外部信号发生器即可同时测试多个器件。多信号源控制等高级功能可实现灵活的频率配置，显著提升了测试效率和能力。

研发。研发领域始终是矢量网络分析仪（VNA）的主要市场，该领域对灵活性

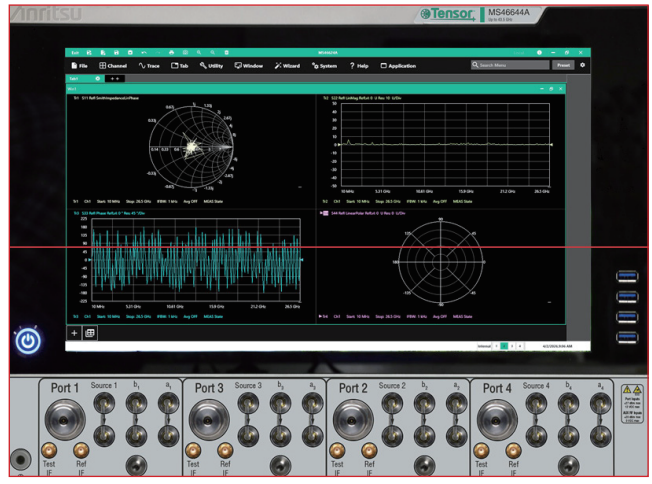


图 1：Tensor™ 矢量网络分析仪。

要求极高。Tensor VNA（如同瑞士军刀）不仅具备纯粹的 VNA 核心功能，还可作为多输出（配备四个独立信号源）且高度可重构的信号发生器使用，具有出色的频谱纯度和切换速度。这减少了对额外昂贵仪器的需求，并简化了复杂的测试设置。

性能与功能

矢量网络分析领域的进步主要分为两类：传统性能指标的改进以及新功能的引入。Tensor 平台同时满足这两方面需求。第一类中的一个重点是射频电源和功率处理能力。这两方面对于功率器件的测量都至关重要；而当测试场景（例如空中测试、有损夹具等）受信噪比（SNR）限制时，前者甚至对无源测量也具有重要意义。在这种受信噪比限制的情况下，当被测设备（DUT）或传输路径损耗较高时，更高的信号源功率可提供更大的余量，使其高于仪器的噪声底限。Tensor 仪器的各端口输出功率在所有频率下均超过 15 dBm，且仅需极少的硬件选项即可实现；通常在选择常规硬件选项时也能达到该范围。当矢量网络分析仪（VNA）为频率转换型被测设备（DUT）提供本振（LO）时，该源功率同样具有重要价值（其重要性取决于器件工艺）。在相位噪声（较上一代提升约 20 dB）和谐波含量方面，信号源的频谱纯度也得到了提升。当将信号源用作毫米波测量（此时乘法系数可能很高）的混频器本振（LO）时，以及用于改善一般曲线噪声时，频谱纯度的提升将大有裨益。

通过采用新型耦合器设计（可处理超过 5 W 的功率）、新型接收端步进衰减器（重复性得到提升）以及高线性度接收机，功率处理能力得以提升。的接收端步进衰减器并非机电式，因此校准后可进行切换，且无需因重复性误差而重新校准——这在早期仪器中曾是常见问题。对于高功率处理能力，另一个重要方面是端口匹配，其在线性范围内可处理高达 20 dBm 以上的入射功率（同样，可通过内部或外部衰减器进一步提升该阈值）。相比前几代产品，更优的接收机噪声系数有助于在所有配置下降低系统噪声底。结合更高的信号源功率，这通常可使系统动态范围扩大 15 dB（具体取决于频率范围和配置）。

速度通常是一项至关重要的传统指标，1 MHz 中频带宽的测量速度（在高采点数下）比上一代仪器快约 5 倍。测量速度是一个多方面的指标，在连续波（CW）和少量频率扫描测量方面也取得了显著改进（10 到 20 倍）。后一种速度优势对于某些生产和空中测量尤为宝贵，此类测量中单次测量的频率点数可能不高，但所需的测量次数却很大。远程数据传输速度也有所提高（相对于上一代产品约提高了 5 倍），这在较长的测量周期以及需要高点数的测试中尤为重要。

功能上的改进有助于简化测量设置，使数据的分析或解释更加便捷，或支持执行不同的测量或校准操作。该仪器系列的功能改进主要分为以下几类：

- 无需测试套件即可进行毫米波测量（2 端口和 4 端口）（但需选配该选项）。启用此选项后，所有射频（RF）和本振（LO）驱动及控制功能均集成到矢量网络分析仪（VNA）机箱中，因此几乎可以使用任何现有模块（安立公司产品可达 220 GHz，其他厂商产品可达 1 THz 以上）进行带宽限定的毫米波测量。更高的信号源频谱纯度有助于提升更高毫米波频率下的性能，而更灵活的功率控制则简化了设置流程。
- 向导功能可简化特定被测设备（DUT）类别的设置和校准（例如图 2 所示的放大器和混频器）。这些工具会引导用户完成必要的被测设备参数输入、测量选择和校准步骤，然后设置所需的通道和曲线，以便在最常见的情景下获

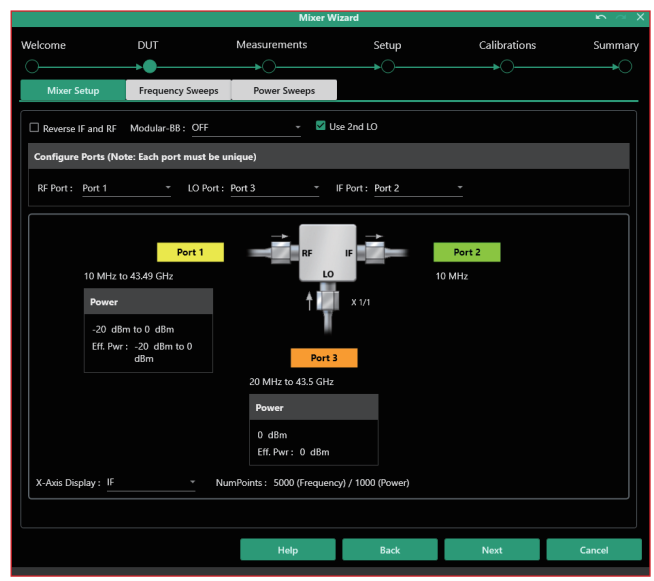


图2：混频器配置向导

得合理的测量结果。当然，所有测量也可以手动配置，以获得最大的灵活性并覆盖更复杂的测试场景。

- 可通过向导配置的放大器测量项目：小信号 S 参数、稳定性指标、增益压缩（包括 AM/AM 和 AM/PM）、互调失真水平和截点以及谐波。
- 向导可配置的混频器测量项目：S 参数（匹配与隔离度）、转换比及转换相位、转换增益压缩以及本振灵敏度。
- 提供动态双本振（LO）配置选项，可将内部本振重新路由至不同接收机，以支持更高级的混频器校准、不同频段上的多重测量，以及复杂被测设备（DUT）中的噪声优化。不仅每个本振均可用于所有接收机，而且每个本振还可根据需要重定向至不同的接收机。
- 更灵活的用户界面，数据可使用多达 512 个测量通道组织成最多 4,096 条曲线。通过显示窗口和标签页系统管理界面布局，可实现对结果的快速、全面解读。与前几代产品相比，这种方法提供了显著更高的可配置性。
- 单个通道最多可包含 1,000,000 个测量点，而在任何一种仪器设置中，总测量点数最多可达 3,000,000 个。虽然这个数字看似庞大，但它确实允许将一次大型校准应用于多个频率范围子集，而无需进行插值，同时仍能保持频率分辨率；它还支持在兼具高分辨率和宽无混叠范围的情况下进行时域和群延迟分析；并允许在一次连续扫描集中执行非常复杂的多属性测量。

Tensor 仪器提供双端口和四端口两种配置，并配备多种硬件选项，包括直接访问环路、接收端和源端步进衰减器、第二个内部本振（仅限四端口仪器）、外部自动电平控制（ALC）、外部中频（IF）输入和输出，以及带状毫米波支持。图 3 展示了其中部分配置的示意图。软件选项包括时域处理、增益压缩、多种混频器测量选项、毫米波支持等。

人工智能

Tensor VNA 引入了人工智能辅助的测量工作流，使用户能够通过自然语言交互配置复杂的测量任务。

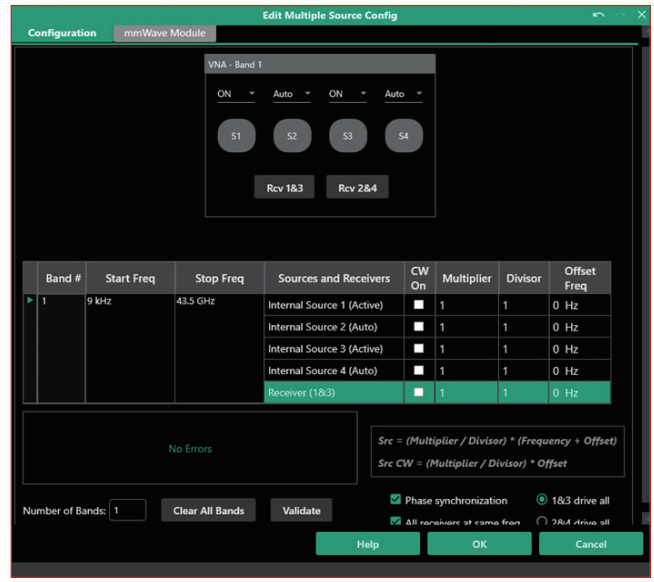


图3：源配置向导。

“嘿，Tensor，你能帮我设置混频器测量吗？”只需说这句话，系统就会显示所有设置细节，包括框图、推荐的连接方式和设置参数。一旦提供足够的信息，系统就会自动配置测量、执行必要的校准并进行测试。这大大缩短了设置时间，最大限度地减少了用户错误，并为高级射频仪器的易用性树立了新标准。值得注意的是，AI 引擎是 Tensor 的内置功能，这意味着它无需任何互联网连接即可运行——这对某些应用而言是一个重要的优势。

双静态测量

双静态测量概念源于雷达系统。传统的单静态雷达使用同一根天线发送和接收信号，就像大喊一声并听到自己的回声一样。相比之下，双静态雷达采用两根独立的天线；因此，一台设备发送信号，另一台独立的设备接收反射信号。这种方法具有某些优势，例如能更好地探测隐形目标。受雷达系统启发，Tensor VNA 通过采用经光纤链路同步的分布式收发器模块，采用了这种方法。[4] 如图 4 所示，远程收发器模块连接至 Tensor VNA。这种架构使测量参考平面之间能够保持

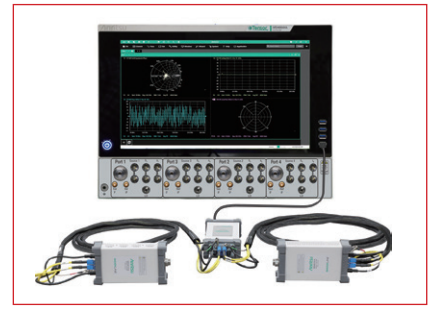


图4 双静态测量设置。

下转第24页

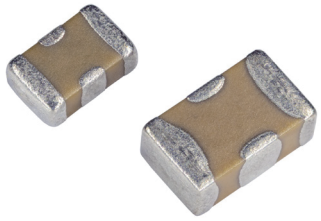
关键任务系统的高性能电磁干扰（EMI）抑制

Johanson Dielectrics，www.johansondielectrics.com

在无刷直流（BLDC）电机系统中，尤其是直流 - 直流（DC-DC）转换器开关模块内，EMI 滤波器至关重要，因为高频开关噪声可能会在整个系统中传播。Johanson 采用轻量化的表面贴装（SMD）陶瓷结构，使其在保持高电气性能的同时，成为对空间和重量要求严格的设计的理想选择。

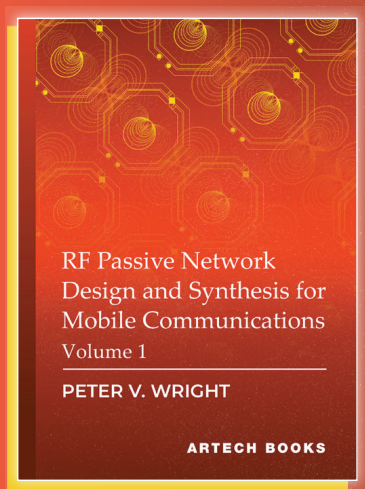
Johanson 多功能 EMI 滤波器提供了一体化解决方案，可在宽频范围内衰减不需要的电磁干扰，同时允许直流和所需信号不受影响地通过。这些滤波器支持单端和差分两种配置，在 100 KHz 至 20 GHz 范围内提供有效的衰减，抑制水平高达 60 dB——使设计人员能够从源头解决传导和辐射发射问题。超低的等效串联电感（ESL），加上无直流压降和无电流限制的特点，确保了滤波性能，同时不会牺牲系统的效率或可靠性。

此外，直流有刷电机是电磁干扰（EMI）的主要来源，其换向、电刷电弧及快速开关电流会产生宽带噪声。在军事、航空航天、国防和工业电子等关键任务应用中，此类噪声可能危及系统稳定性、降低



信号完整性，并导致合规性测试失败。因此，确保可预测且强大的电磁干扰抑制至关重要。

通过用单个 EMI 滤波器取代多达七个分立元件和共模扼流圈，设计人员可以减少受布局影响的变异性，并最大限度地减少与多个焊点相关的潜在故障点。这种集成提高了可重复性，并确保长期符合严格的 EMC 标准。■



移动通信射频无源网络设计与综合-第1卷

作者： Peter V. Wright
ISBN 13: 978-1-68569-089-2
ePub: 978-1-68569-090-8
出版日期： 2025年9月
学科领域： 微波和射频工程
装订/页数： 精装/800页
价格： $164 / £144; E-Book: $122 / £102

《移动通信射频无源网络设计与综合》第1卷为微波和射频工程师提供了全面的设计参考，填补了文献中的一项关键空白，提供了用于移动射频前端设计中的无源网络元件的详细的分析设计方程。这本指南汇集了射频领域资深专家彼得·赖特数十年的经验，重点关注实际应用的适用性，强调直观的设计权衡和强大的参数化建模技术。这些方法使工程师能够在投入时间进行复杂的电磁仿真之前，探索创新架构并优化性能。

深入了解独特的网络拓扑结构，在评估高性能射频元件(如耦合器、组合器、分路器及无源匹配网络)方面具备无与伦比的详尽知识。借助Excel这类广泛可用的工具，其分析方法能够快速迭代，并深入洞察射频电路的行为。本书拥有超过650个图解、750个方程式以及丰富的实用注释，教会读者如何建模寄生效应、设计高效的集总元件网络，以及合成能够满足现实工作条件下严苛性能指标的元件。

这本著作对于从事移动通信模块、功率放大器及集成无源网络工作的电路设计师、微波工程师和射频工程师而言，是不可多得的参考资料。书中提供了基础理论与实用策略，旨在解决当前最棘手的射频难题，如设计紧凑型功率放大器模块以及开发下一代移动架构。它有助于专业人士进行寄生效应建模、合成元件并优化性能，从而在设计过程中节省大量时间和资源。

ARTECH HOUSE
BOSTON | LONDON

了解更多信息，请访问：
https://us.artechhouse.com/
https://uk.artechhouse.com/

900至930MHz功率分配器/合路器

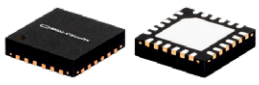
Mini-Circuits 的 COM-G90G9316K+ 是一款八路、0/180 度功率分配器 / 合路器，在 900 至 930MHz 频段内，作为分配器或合路器使用时，最高可处理 20kW 的连续波（CW）功率。该产品在 9dB 分路损耗之上具有 0.1dB 的典型插入损耗，典型幅度不平衡为 ±0.1dB，典型相位不平衡为 ±1 度。这款 50Ω 非隔离差分功率合路器在 WR975 波导合路端口处具有 1.10:1 的典型驻波比（VSWR），并配备八个 7/16 DIN 母头连接器。



www.minicircuits.com

MMIC I/Q混频器

Mini-Circuits 的 SMIQ-134H+ 是一款无源同相 / 正交（I/Q）混频器，可将 10 至 30 GHz 的射频（RF）和本振（LO）信号转换为直流至 7 GHz 的中频（IF）信号。在 +18 dBm 本振功率下工作时，其转换损耗为 7.5 dB，并具有至少 38 dB 的本振 - 射频隔离度。这款 50Ω GaAs HBT MMIC 混频器非常适合 5G 以及电子战（EW）和雷达系统，采用 24 引脚、QFN 型 4 × 4 mm 表面贴装封装。



www.minicircuits.com

18~40GHz 5W GaN 功率放大器

迈可博® 推出的 MPA-180400S37-H 是一款自带风扇和散热器的高增益固态功率放大器，工作频率 18~40GHz，基于高可靠和高效率的 GaN 技术设计，饱和功率 ≥ 37dBm，P1dB 输出功率 35 dBm，增益约 44dB@Pin=-5dBm，增益平坦度 ±1dB@Pin=0dBm，谐波抑制 −25 dBc，杂波抑制 −70 dBc，输入驻波比 1.5:1，负载驻波比 ≤3:1，内置 DC-DC 模块，具备工作电流和工作温度检测电路，能够可靠地适应连续波、脉冲、宽瞬时带宽信号、高阶调制信号等多种不同信号模式。



www.micable.cn

0.01~67GHz 超宽带双向耦合器

迈可博® 推出的 10MHz-67GHz 超宽带双向耦合器，耦合度 13dB@1-67GHz，小于 56dB@0.01-1GHz，全频段损耗低于 2.8dB，实测小于 2.0dB，同时也具备优异的驻波性能和 15dB 方向性，采用防止微波泄漏的全屏蔽结构设计，屏蔽效能达到约 100dB，是超宽射频测试系统、超宽带微波毫米波仪表的最佳选择。



www.micable.cn

C波段 内匹配功率放大器

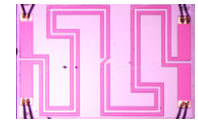
博瑞集信推出 3 款 C 波段高效率内匹配功率放大器 BRGF052100PJG、BRGF052050PJG、BRGF060050PJG，工作频率覆盖 4GHz~6GHz，可实现 50W、100W 饱和功率输出，功率附加效率 PAE ＞ 50%。其中 100W 内匹配功率放大器 BRGF052100PJG：工作频率：4.3GHz ~ 5.2GHz；供电条件：+28V，静态电流 500mA；输出功率：100W；功率附加效率：＞ 50.5%。该系列产品均采用金属气密封装，具有高效率、高可靠性、小体积等优势；输入、输出端口已完成内部 50Ω 阻抗匹配，便于适配使。



www.bonray.com.cn

GaN IPD大功率无源产品

博瑞集信基于特色 GaN 工艺的大功率无源技术平台，已形成覆盖多品类宽频段、高功率等级的无源产品谱系，将 IPD 的应用范围从常规功率拓展至百瓦级大功率场景，为高频系统的大功率无源集成提供了兼顾功率、损耗与尺寸的新路径。系列样品展示：耦合器：DC~18GHz，插损 ＜ 0.6dB，耐受功率 100W；功分器：0.5GHz~5GHz，插损 ＜ 1.4dB，耐受功率 30W；功率负载：DC~20GHz，耐受功率 125W；固定衰减器：DC~40GHz，衰减平坦度 +0.3，耐受功率 20W。



www.bonray.com.cn

四通道真16位示波器

Pico Technology 的 PicoScope 5000E 系列示波器是紧凑型 USB-C 示波器。此系列专为满足测量灵敏的、低幅度信号及能在模拟、数字及混合信号调试之间快速切换的需求而打造。PicoScope 5000E 系列提供真正的 16 位分辨率，带宽高达 200 MHz，采样率 2.5 GS/s，采集存储 1 GS。PicoScope 5000E Plus 系列型号还增加了可切换的 8 位高速模式，带宽高达 500 MHz，采样率 5 GS/s，深度存储 2 GS，使工程师在单台便携仪器中同时拥有高分辨率精密示波器与更快速的 500 MHz 调试示波器的优势。



www.picotech.com

Microwave Journal China 微波杂志

广告索引 Advertising Index

广告客户 Advertiser	页码
Artech	30
Bonray / 博瑞集信	2
Digi-Key	5
EuMW 2026 / 欧洲微波周	COV4, COV2
Huiming Technology / 华兴汇明	25
Mini-Circuits	1, 7, 11, 15
伟博电讯	3, 9, 13, COV3

投放广告

免费订阅

欢迎投稿

技术文章、应用笔记、案例分析、产品特写、新品发布、
市场/行业/产业分析、新闻分析、新闻发布……
winsonx@actintl.com.hk；15611832959（电话/微信）
www.mwjournalchina.com/submission_guide.asp

欢迎投稿

销售代表 Sales Representatives

Shanghai (上海)
Tel: 86 21 62511200

Sales Director-China (中国区销售总监)
Linda Li (李承珍) lindal@actintl.com.hk Tel: 86 136 7154 0807

Shenzhen (深圳)
Linda Li (李承珍) lindal@actintl.com.hk Tel: 86 136 7154 0807

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳) cecilyb@actintl.com.hk Tel: 86 135 5262 1310

Hong Kong (香港特区)
销售副总裁
Floyd Chun (秦泽峰) floydc@actintl.com.hk Tel: 86 137 2429 8335

Taiwan, Singapore (台湾省、新加坡)
Simon Lee (李若龙) Simonlee@actintl.com.hk Tel: +852 28386298

国际销售代表：www.microwavejournal.com/salesoffices

职员 Staff

US Office
685 Canton Street Norwood, MA 02062
Tel: +800-966-8526
mwj@mwjournal.com

Publisher: Carl Sheffres
Editorial Director: Patrick Hindle
Editor: Eric Higham
Managing Editor (US): Jennifer DiMarco
Copy Editor: Kelley Roche
Multimedia Staff Editor: Barbara Walsh
Director of Production & Distribution: Ed Kiessling
Art Director: Janice Levenson
Graphic Designer: Ann Pierce

Corporate Staff
CEO: William M. Bazzy
President: Ivar Bazzy
Vice President: Jared Bazzy

China Offices (中国办事处)

ACT International (雅时国际商讯)
Hong Kong (香港)
Unit B, 13/F, Por Yen Building, No.478 Castle Peak Road, Cheung Sha Wan, Kowloon, HK
香港九龙长沙湾青山道478号百欣大厦13楼B室

Shenzhen (深圳)
Room 2306, Tongxin Building,
No. 5020, Binhe Avenue, Futian District,
Shenzhen 518033, China.
中国深圳市福田区滨河大道5020号同心大厦2306
Tel: 86-755-25988572 / 25988567

President (总裁):
Adonis Mak (麦协林)
adonism@actintl.com.hk

Associate Publisher and Managing Editor (中国编辑兼副社长):
Winson Xing (邢文胜)
winsonx@actintl.com.hk

Deputy General Manager (副总经理):
Floyd Chun (秦泽峰)
floydc@actintl.com.hk

Editorial Advisory Board (编辑顾问委员会)
Alex Chen 陈炯丞，稜研科技亚太区业务发展经理
Chen Junhua 陈俊华，岸达科技天馈及应用技术总监
Felix Xing 邢晓航，能讯半导体市场总监
Feng Keming 冯克明，航天科工二院科技委总师
Gao Jianfeng 高剑锋，凯川电子总经理
Gordon Liang 梁国春，贝孚德董事长/总裁
Jin Zhi 金智，中国科学院微电子研究所研究员
Justin Wang 王占仓，新拓尼克研发经理
Liu Guangyi 刘光毅，中国移动研究院首席专家
Liu Wei 刘伟，迈可博董事长/CEO
Xue Quan 薛泉，华南理工大学教授/IEEE Fellow
You Jia 尤嘉，鼎阳科技现场应用支持经理

MiCable

通过 ISO9001质量管理体系认证
通过GJB9001C国军标质量管理体系认证

专为北斗/GPS导航系统设计

RFoF微波光子模块

噪声系数低至6dB，
最小检测信号 -168dB/Hz

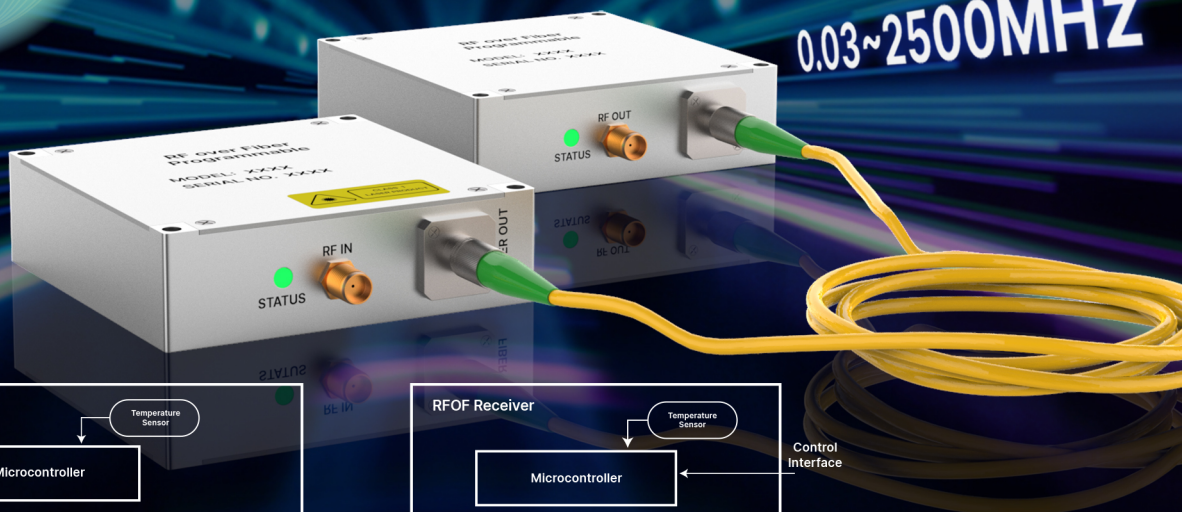
内置低噪声及增益放大器，
具备链路增益控制功能

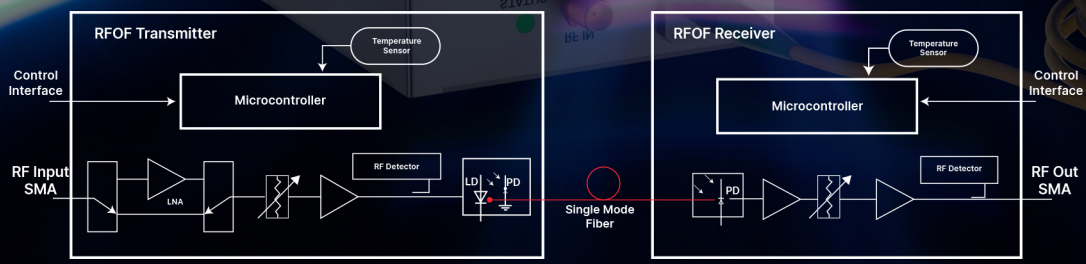
射频与光纤互转技术
全新一代
性能卓越提升

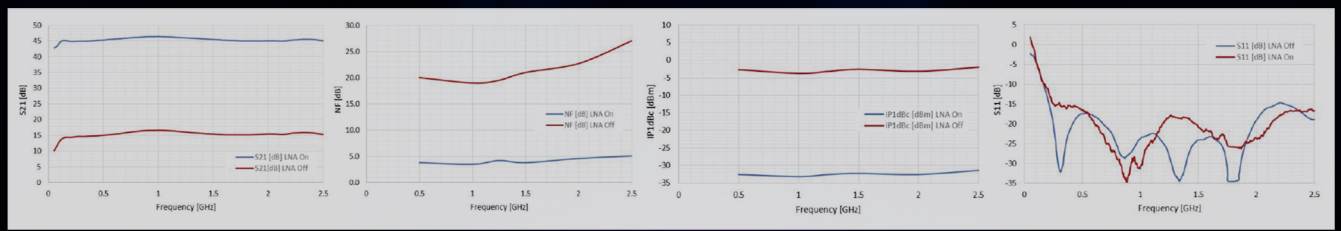
内置温度补偿，
全链路增益温度变化小于±1dB

内置Bias-T，可便于为
有源接收天线供电

0.03~2500MHz







关注微信公众号

福建迈可博电子科技集团股份有限公司
电话：400-918-0388
邮箱：sales@micable.cn
网址：www.micable.cn

经销商：伟博电讯有限公司
电话：400-887-3088
邮箱：sales@mitron.cn
网址：www.mitron.cn

欧洲首屈一指的微波、射 频、
无线和雷达行业活动

EUROPEAN MICROWAVE WEEK
EXCEL, LONDON
4th-9th OCTOBER 2026
www.eumw.eu

欧洲微波周2026

欧洲微波展

英国伦敦 EXCEL

2026年10月6-8日

- 10,000 平米展览
- 5,000 与会者
- 1,700 - 2,000 会议代表
- 300多家国际参展商
（包括亚洲和美国以及欧洲）

有意参展?

请联系销售代表:

Richard Vaughan,
国际销售经理
rvaughan@horizonhouse.co.uk

Gaston Traboulsi, 法国
gtraboulsi@horizonhouse.com

Mike Hallman, 美国
mhallman@horizonhouse.com

Victoria and Norbert Hufmann,
德国、奥地利和瑞士
victoria@hufmann.info
norbert@hufmann.info

Katsuhiro Ishii, 日本
amskatsu@dream.com

Jaeho Chinn, 韩国
inter11@jesmedia.com

电话: +44(0) 20 7596 8742　官网: WWW.EUMW.EU