

2020年5/6月

Microwave Journal China

微波杂志

基站 测试



horizon
house®

Founded in 1958

mwjournalchina.com



20[〰]
YEARS
of
III-V INNOVATION

Leading Global Communication

**Reduce
iteration**

**Time
to
market**

Easy to use

**WIN
Design
Platform**

**Design
support**

win
SEMICONDUCTORS

WIN Semiconductors Corp.

No.69, Keji 7th Rd., HWA YA Technology Park,
Guishan Dist., Taoyuan City 333, Taiwan (R.O.C.)
TEL: +886-3-397-5999 FAX: +886-3-397-5069

www.winfoundry.com info@winfoundry.com

最可靠、最细、最轻的 内铠装微波射频 测试电缆组件

— 高速、高密度测试、互联



GORE® PHASEFLEX® 微波射频测试电缆组件 - 0N 型电缆



典型应用：PXIe 测试仪

图片来源：Keysight Technologies, Inc.

更多微波射频电缆方案，请访问官网 gore.com.cn/test
联系我们，戈尔上海公司：Tel: 021-51728299; E-mail: info_china@wlgore.com

产品优势：

- 电气性能稳定，确保一致、可重复的测试结果，频率到 50 GHz
- 具有耐压、耐扭、耐打结的坚固结构，使用寿命更长
- 线径更小，重量更轻，柔性更好
- 性能可靠，减少停机，节省测试时间，提高测试效率

典型应用：

- 模块化测试仪表 (PXIe, AXIe)
- 射频开关
- 微波器件的研发与生产测试
- 高速数字测试
- 5G 测试与互联



扫描二维码下载 0N 电缆产品资料

GORE, Together, improving life, PHASEFLEX, 紫色电缆, 和设计是 W. L. Gore & Associates 的注册商标。©2019 W. L. Gore & Associates, Inc.

Together, improving life



ingun®

未来技术
合作伙伴



极限负载下,
保持高
质量信号

+86 21 60 82 55 36-38
info@cn.ingun.com
www.ingun.com

Microwave Journal China 微波杂志

www.mwjjournalchina.com

5/6月 May/Jun 2020

目录 1 Contents 1



06 编辑手记 Editor's Note

充满不确定性的时期

Uncertain Times

Pat Hindle, 《Microwave Journal》总编

08 封面专题 Cover Feature

在 5G 射频生产测试中大幅缩短测试时间和提高设备利用率

Significant Test Time Reduction and Equipment Utilization in 5G RF Production Testing

Sascha Laumann, 罗德与施瓦茨

技术特写 Technical Feature

18 Horus: 全数字相控阵雷达的测试平台

Horus: A Testbed for Fully Digital Phased Array Radars

C. Fulton, R. Palmer, M. Yeary, J. Salazar and H. Sigmarsson等

24 基于弯曲巴伦及AMC的偶极子阵列不易被邻近金属平面影响

Bent Balun Combined and AMC Backed Dipole Array Less Vulnerable to Nearby Metal Planes

Changhyeong Lee, Heejun Park and Sungtek Kahng, Incheon National University

32 深入洞察数字预失真系统设计

Insights Into Digital Predistortion System Design

Paul Turner, Systems4Silicon有限公司

40 面向毫米波产品大规模生产的先进ATE架构

Advancing ATE Strategy For mmWave Mass Market Production

Mark Roos, Roos Instruments

Microwave
Journal China
微波杂志

网站白皮书频道 免费下载

www.mwjjournalchina.com/white_paper.asp

新型吸波材料及其在无线测量暗室中的应用
孔径调谐: 5G智能手机中一项必不可少的技术
专题电子书: 天线与波束赋形的设计与仿真
运用阻抗调谐最大限度地提高5G手机的天线性能
探索可能性, 迈向5G之路
利用5G力量

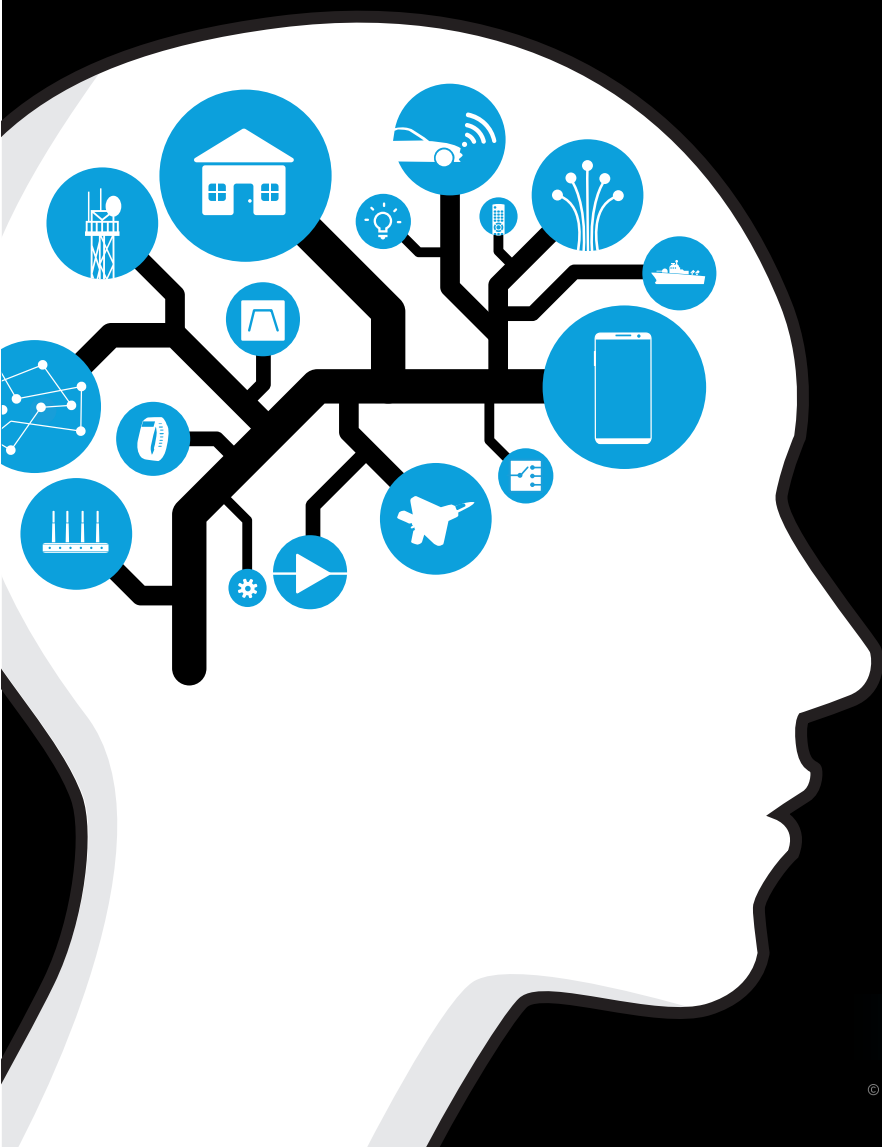
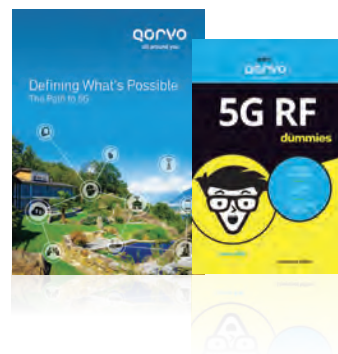
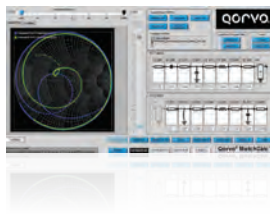


启发您的天赋

查看我们的设计中心



MatchCalc™
RF 设计计算器



从物联网和智能手机到国防应用，
Qorvo 创造美好的互联世界。
探索我们的资源，了解如何实现此目标。

可下载软件

 Qorvo MatchCalc™

GaN 模型

 **Modelithics**® Qorvo GaN 库



视频



电子书



白皮书



博客



设计工具



手册



框图



已发表的文章

QORVO®

cn.qorvo.com/design-hub



67G 高频系列产品

67GHz 高频衰减器/负载/转接头/电缆



1.85-1.85/1.85-2.4
1.85-2.12

- ▶ DC-67GHz, 2W, 1.85mm连接器, 标称衰减量 (1-9, 10, 20dB)
- ▶ 衰减值平坦, 精度高, 低驻波比
- ▶ 可靠性高、重复性好

40/50G 高频系列产品

衰减器/负载/功分器/开关/转接头/电缆



2. 92-40G/2. 4-50G
衰减器/负载系列

40GHz程控衰减器



功分器

同轴开关系列

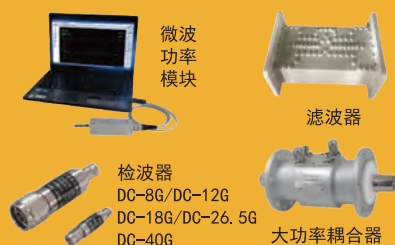
- ▶ DC-50GHz 1-20W, DC-40GHz 1-40W 连接器类型 2.4mm&2.92mm, 标称衰减量 (1-9, 10, 20, 30, 40dB)
- ▶ 同轴开关 1/2 1/4 1/8 DC-40GHz N,SMA

可调衰减器系列产品

6G/8G/28G 0-110dB/1dB可调



微波功率模块/检波器/耦合器/滤波器



微波
功率
模块

滤波器

检波器
DC-8G/DC-12G
DC-18G/DC-26. 5G
DC-40G

大功率耦合器

上海华湘计算机通讯工程有限公司
电话: 021-54451395
网址: www.shx-sh.com
邮箱: shx@shhuaxiang.sina.net

Microwave Journal China 微波杂志

www.mwjjournalchina.com

5/6月 May/Jun 2020

目录 2 Contents 2



46 RF-SOI高效功放可为5G毫米波网络节省数十亿美元

RF SOI can Save \$Billions in 5G mmWave Network Costs with Efficient PA
Joe Madden, *Mobile Experts*; Anirban Bandyopadhyay and Ned Cahoon, *GlobalFoundries*; Harish Krishnaswamy, *MixComm*

特色产品 Product Feature

52 单层电容器有助于通信设备小型化

Single Layer Capacitors Contribute to Miniaturization of Communication Equipment
Toshihiko Honda, *TECDIA*

54 SDR收发器助业余无线电爱好者实现空间通信

SDR Transceivers Enable Amateur Space Communication
Diego Koch, *ADI公司*

56 20GHz合成器实现超低相位噪声和快速切换

20 GHz Synthesizer Delivers Ultra-Low Phase Noise and Fast Switching
Trisynth Technology Inc.

58 用于ISM应用场景的6kW固态微波发生器

6 kW Solid-State Microwave Generator for ISM Applications
RFHIC Corp.

60 应对未来挑战的雷达传感器测试解决方案

Radar Sensor Testing solutions for upcoming challenges
NOFFZ Technologies

技术简讯 Tech Brief

61 自动校准可加快VNA校准速度并减少错误

Automatic Calibration Speeds VNA Calibration, Reduces Errors
Copper Mountain Technologies

61 缝隙波导阵列天线

Slotted Waveguide Array Antenna
Eravant

61 高频芯片均衡器可实现频率增益变化

史密斯英特康

62 新产品 New Products

64 广告索引 Advertisement Index

来自射频工程师的 RF解决方案



最全的射频、微波选型库 ✓

专家级技术支持 ✓

中国现货，可当天发货给国内客户 ✓

应用工程师
为您提供帮助

7天/24
小时支持



凭借着全球最大的可随时发货的现货射频元器件产品选型库，以及能为这些产品提供支持的聪明头脑，Pasternack的应用工程师们随时做好准备为您解决技术难题，并为您所有的射频项目需求提供创造性的解决方案。无论您是正处于设计困境中，还是正在寻找少见难寻的元器件，我们的应用工程师们随时待命，为您服务。更多详情，请致电400 928 5100 或访问www.pasternack.cn。

400 928 5100
sales@pasternack.cn

PE PASTERNAK
工程师的RF来源

充满不确定性的时期

Uncertain Times

Pat Hindle, 《Microwave Journal》总编

当前,我们生活在一个不确定的时期,发生了影响我们日常生活的世界性意外事件。新冠肺炎的突然爆发改变了我们的生活方式,并影响了许多企业。很高兴看到像中国这样的国家正在恢复正常。展会一直是行业不可或缺的一部分,因为我们参加技术会议可以了解最新的设计或测试技术,并与同仁互动以了解其工作。我们围绕行业活动规划营销活动、旅行计划和销售会议。我们中的一些人介绍他们正在做的出色工作,而另一些人则可以听和学。我们最期待追赶上业界朋友和同仁的脚步。但是由于这次疫情,许多活动已被取消或延迟,包括我们的EDI CON China(从5月移至10月),因此希望我们能够在那时相聚。

《微波杂志》的目标是以多种方式提供信息,印刷的和数字的、线下的和线上的。我们的公司Horizon House主办了几个线下展览,包括代表欧洲微波协会举办的欧洲微波周(EuMW)和前面提到的EDI CON China。今年的EuMW计划于9月13至18日在荷兰乌得勒支举行,但可能因旅行限制而推迟。IEEE MTT-S国际微波周(IMS)宣布将在8月举行一次线上活动,因此秋季将是非常繁忙的。Horizon House很高兴地宣布,我们将主办2021-2023年的IEEE MTT-S IMS活动。

去年,我们成功推出了EDI CON Online,并在今年将会议扩展到四天,会议内容涵盖5G/IoT/汽车(10月6日)、PCB/互连设计(10月13日)、信号完整性/功率完整性(10月20日)和雷达/天线(10月27日)。该活动是与我们的姊妹媒体《信号完整性杂志》一起举办的。欲了解更多,请访问:www.edicononline.com。

在这个要保持社交距离的时期,我们已经看到网络直播活动明显增加。使用该工具的公司数量已经大大增加,受众参与度也大大提高了。白皮书和电子书也是如此。我们看到来自行业的高质量内容和来自读者的更多下载。我们正在应对这个不确定的时期,为公司提供机会,通过30分钟的网络直播来展示他们的最新产品,以代替他们为一些已取消的现场活动所计划的发布会。我们网站上长期播放的名为“频率那些事”的视频系列(vidoes.microwavejournal.com)每月继续播出两次,我和Gary Lerude都通过Zoom平台在我们的家中演播。我们还发布了一个新的播客系列(podcasts.microwavejournal.com),其中包括Marki Microwave的专家讨论了他们公司的发展,以及Rohde & Schwarz的专家介绍了最新的5G技术。希望来年有更多新颖的内容。

我还要提醒您,我们杂志有印刷版和数字版两种版本,因此,如果您在公司收到了印刷版但现在不在公司无法使用,则可以随时到我们网站上阅读数字版。最后,希望您保持健康和



主 编: Patrick Hindle

Administration 行政管理

Publisher (US): Carl Sheffres

Editor (US): Patrick Hindle

Technical Editor (US): Gary Lerude

Managing Editor (China): Winson Xing (邢文胜)

Managing Editor (US): Jennifer DiMarco

Multimedia Staff Editors: Barbara Walsh

Traffic Manager (US): Edward Kiessling

Lead Designer & Production Coordinator (US):

Janice Levenson

Corporate Staff

CEO: William M. Bazzzy

President: Ivar Bazzzy

Vice President: Jared Bazzzy

China Offices (中国办事处)

Hong Kong (香港)



ACT International (雅时国际通讯)

香港九龙长沙湾青山道478号百欣大厦13楼B室

Unit B, 13/F, Por Yen Building, No.478 Castle Peak Road,

Cheung Sha Wan, Kowloon, HK

President 总裁

Adonis Mak (麦协林) adonisM@actintl.com.hk

Vice President 副总裁

Mark Mak (麦协和) markM@actintl.com.hk

Editorial Board (编委会)

Deng Jie 邓杰

Feng Keming 冯克明

Gao Jianfeng 高剑锋

Jin Zhi 金智

Liang Guochun 梁国春

Liu Guangyi 刘光毅

Liu Wei 刘伟

Song Junde 宋俊德

Wang Zhancang 王占仓

Wu Ke 吴克

Mainland China (中国大陆)

Shenzhen (深圳)

中国广东省深圳市福田区彩田路彩虹新都海鹰大厦22D

Unit 22D, Caihongxindu Haiying Building,

Caitian Road, Futian CBD, Shenzhen

518033, China.

Tel: 86-755-2598 8571

General Manager 总经理

Michael Tsui (徐旭升) michaelT@actintl.com.hk

Shanghai (上海)

Tel: 86-21-6251 1200

China Sales Director 中国区销售总监

Linda Li (李承珍) lindaL@actintl.com.hk

Sales Manager 销售经理

Hatter Yao (姚丽莹) hatterY@actintl.com.hk

Beijing (北京)

Tel: 86-135 5262 1310

Sales Manager 销售经理

Cecily Bian (边团芳) cecilyB@actintl.com.hk

Wuhan (武汉)

Sales Manager 销售经理

Sky Chen (陈燕) skyC@actintl.com.hk

Tel: 86-137 2373 9991

Executive Editorial Office

685 Canton Street, Norwood, MA 02062

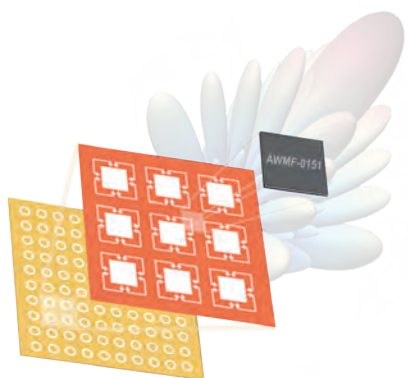
Tel: (781) 769-9750

Fax: (781) 769-5037

e-mail: mwj@mwjournal.com

毫米波系统芯片不再是难题

毫米波有源天线无处不在



Anokiwave 芯片已被大量应用于2019毫米波5G系统布局

- 全球众多主要5G设备制造商的可靠选择
- 支持投资超百亿美元的5G毫米波生态系统
- 快速建立了5G基站和终端用户之间的链接
- 芯片功能覆盖5G和卫星通信的所有毫米波频段

mmW
Silicon ICs

Intelligent Array
IC Solutions

mmW Algorithms
to Antennas

在5G射频生产测试中大幅缩短测试时间和提高设备利用率

Significant Test Time Reduction and Equipment Utilization in 5G RF Production Testing

Sascha Laumann, 罗德与施瓦茨, 德国慕尼黑

随着部署步伐的加快, 5G基站和基础设施制造目前已成为通信技术中最热门的领域之一。通常, 我们所在的竞争行业仍在以传统的指标衡量成功, 例如生产和集成成本、生产率和上市时间等。然而, 随着5G基础设施大规模建设的开始, 能否满足大量的产品交付已逐渐成为成功与否最为关键的因素, 交付瓶颈或可导致惨重的业务损失。问题是, “我们如何在已知的技术和经济条件下加快产品生产?” 这个问题的答案可能不止一种。但针对生产测试, 答案很可能就是: “在给定时间内, 按照规范要求提高正常生产以及成功测试的产品数量。”

自测试工作开始之初, 提升“测试速度”就已经成为行业持续关注的热点课题。产品发

布频率的持续加快、上市周期的缩短以及预算限制都要求从业者对如何改进生产环境中极其重要的基本指标之一提出新的思路, 而这里所说的指标就是测试吞吐量。

测试吞吐量的实质是测试速度的倒数。除了能够表示单个测试的执行速度外, 测试吞吐量还可以体现并行执行多个测试的情况。想要实现更高的吞吐量, 并行操作往往必不可少, 当提升单次测试的速度在技术上无法实现或是成本太高的情形下尤其如此。并行操作的形式有很多种, 它可以是简单的复制, 也可以是独立执行的任务和允许完全异步测试执行的子任务的组合配置。在这种高度并行化的测试环境中, 几乎没有办法去衡量测试速度。但相对而言, 测试吞吐量仍然是一个有效指标, 其重要

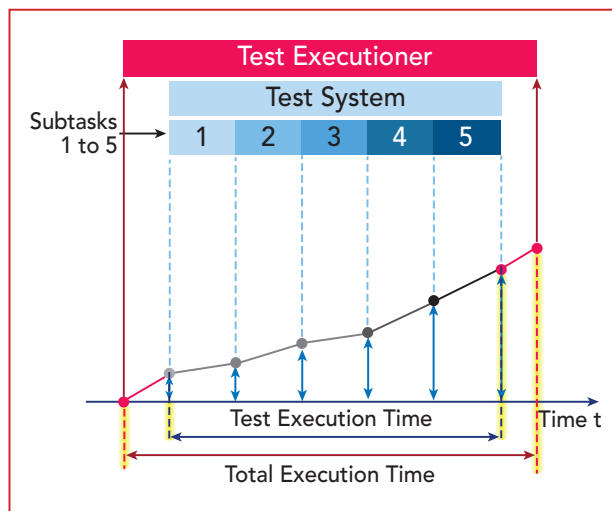


图1: 顺序测试场景。

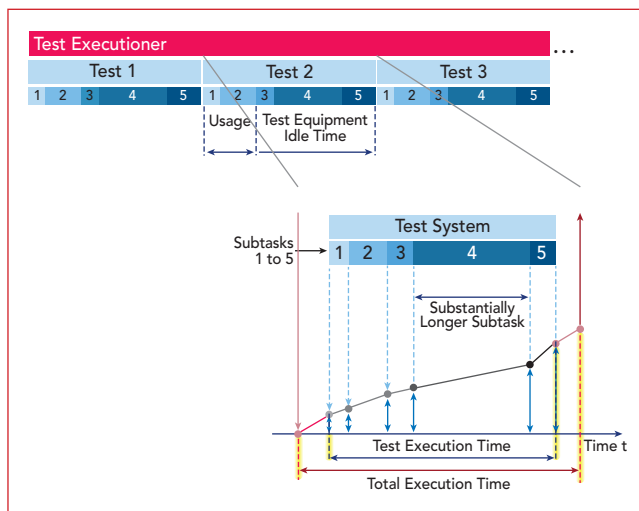


图2: 测试顺序概览。

ZNBT8/20/26/40 多端口矢量网络分析仪

德国品牌德国制造

真正的多端口、高性能、高质量矢量网络分析仪，测量端口间距宽、端口牢固耐用，适用于苛刻的生产和研发测量环境，被国内外著名的5G和军工设备研发和制造单位欣然大量使用。

- ▶ 单台仪表可配置4到24个测试端口，最高测量频率可达40GHz
- ▶ 结合开关矩阵使用最多可配置288个测试端口
- ▶ 5G MIMO 天线、移动终端收发模块，相控阵组件和天线，高速数字通信线缆的理想测试仪表

获取更多信息：www.rohde-schwarz.com/ad/multiport

罗德与施瓦茨（中国）科技有限公司

www.rohde-schwarz.com.cn

免费客户支持热线

800-810-8228 400-650-5896



ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real

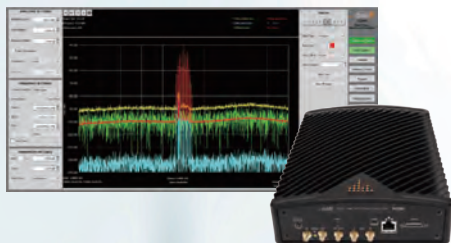


手持式频谱分析仪系列



300M至87GHz | 易用直观的GUI | 电阻式触摸屏
免费电脑软件 | 即开即用 | 电池寿命长 | 轻便价宜

实时频谱分析仪系列



- 9kHz至8GHz、18GHz和27GHz R5750实时频谱分析仪内置GPS功能
- 实时带宽(RTBW)高达100MHz
- 扫描速率28GHz/s

一体式射频测试系统



20GHz S-Series Pro测试台包括: 实时频谱分析仪、矢量网络分析仪、信号发生器、跟踪发生器、可编程衰减器、4通道示波器、射频功率计、和射频功率放大器。适用于研发表征、EMC评价和自动化生产测试。



关注我们

HongKe
虹科

sales@hkaco.com 免费电话: 400-999-3848

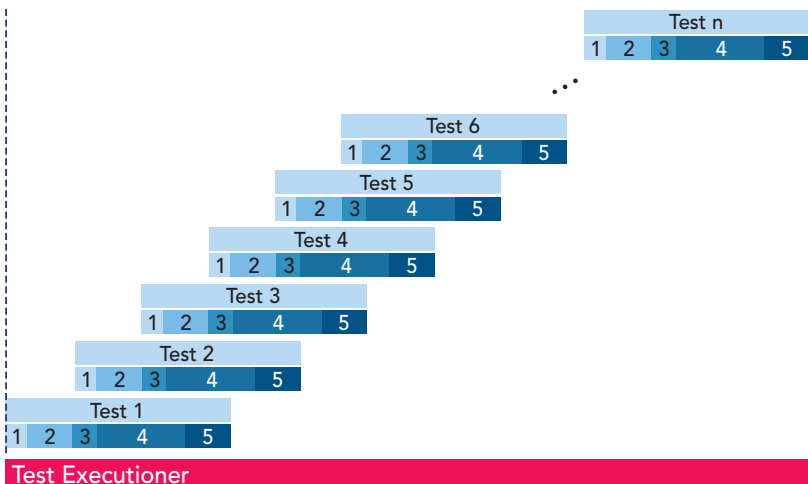


图3: 弱并行测试执行。

性也日益凸显。

测试并行化的实施必须经过深思熟虑; 实现更高的吞吐量, 绝不能以牺牲任何质量指标为代价。异步执行的测试越多, 就需要在确保测试结果的有效性和一致性上投入越多精力。专用于顺序执行的解决方案并不一定适合并行操作。幸运的是, 软件架构领域的技术进步使得测试范式的这种转变成为可能, 并且不会影响到测试质量和重复性。目前, 市场上已有成熟的并行操作解决方案。

问题描述

在新兴的5G基础设施业务背景下, 确保高生产吞吐量对企业成功和保持市场竞争力至关重要。显然, 测试吞吐量只是影响生产吞吐量的众多因素之一, 然而, 相较于其它指标而言, 在特定条件下改进这项指标更为容易, 所需的先决条件也并不多。

通常, 5G生产测试是在产品装配线附近或与之结合执行的。产品组装完成后, 将执行一系列手动或自动测试, 包括射频测试。执行测试后, 系统会根据测试结果判定被测设备(DUT)是否满足测试要求。最后, 系统会对测试的产品进行相应的分类。以上便是顺序和同步测试执行的典型示例, 下一项任务必须在当前任务已结束且结果已知后才能进行。通常情况下, 射频测试对系统整体性能没有太大影响, 但测试数据分析会随着测试条件严格化而更加复杂, 因此, 改善测试吞吐量非常必要。

顺序执行因其简单特点而被广泛应用于各种应用当中, 但它也存在一个潜在的重大发展障碍: 通常无法很

好地进行扩展。在这种情况下, 想要增加吞吐量只有两个选项: 安装一个或更多的生产和测试设备或降低测试的复杂程度。前者无疑会增加成本; 后者则可能导致总产量下降或加大设备在运行中出现故障的概率。

让我们回到5G基础设施制造和测试用例, 3GPP TS38.141规格要求对多项指标进行评估。用于确定某一DUT能否通过测试的常用度量包括: 误差矢量幅度(VEM)、频谱模板(OBUE)/频谱发射模板(SEM)以及邻道泄漏功率比(ACLR)。所有测试在多个频率和输出功率范围内联合执行, 测试的深度和数量取决于产品分类及其规格。

在5G宏蜂窝基站执行典型的生产线测试可能需要耗费几分钟的时间。加快这一进程能够有效提升生产吞吐量。而重复的特性测试可能需要测试场景数小时才能完成。若是对设备生产和测试的复杂过程进行分析, 不难发现其中一些任务或子任务执行得并不理想。因设备所需测试的产品和测试规格而异, 时间主要耗费在测试数据收集或分析上面。显然, 未来的5G FR2测试(以及之后的测试)所提出的更高要求很可能会继续加大分析的复杂性, 从而进一步延长处理所需的时间。

背景

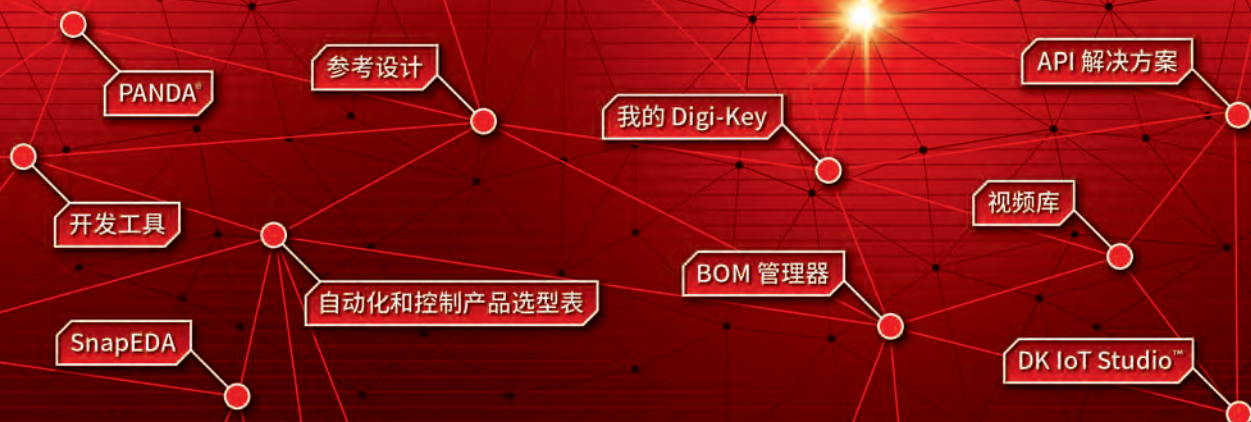
并行化在技术和生产力优化领域并不是一个新概念。在过去的几十年中, 并行处理单元(多核CPU)的数量不断增加, 而且从编程和操作角度可简化对这些资源的访问, 这些进一步推动了并行化的发展。近年来, 随着分布式系统的兴起, 异步和异步操作变得备受关注。它为实现非确定性操作构建了一

880 多万种在线产品 | 1,000 多家行业优秀供应商 | 170 多万种现货产品

- 订单满 ¥300 特快免运费*
- 价格包含关税和增值税
- 订单确定当天美国统一发货



艰难险阻创新路，风雨无阻伴您行。DIGIKEY.CN



得捷电子®

全球选择极为广泛的电子元件库，能够立即发货™

*由顺丰快递送货，所有订单免运费。所有数据由 Digi-Key 提供。Digi-Key 是所有合作供应商授权的正品分销商。新产品每日添加。
Digi-Key 和 Digi-Key Electronics 是在美国和其他国家的注册商标。© 2020 得捷电子 (上海) 有限公司。本公司保留全部版权。
上海客服中心：上海中山西路1055号SOHO中山广场A座504室 邮编 200051

ECIA MEMBER
Supporting The Authorized Channel





RF & Wireless Test Platform:

eCall, NADS, TCUs, Connected Gateways,
Radar Systems, 5G Test

UTP5065RTS

Radar Test System & 5G OTA Test



UTP7033

RF Testplatform Cellular, GNSS & Wireless



UWT

Universal Wireless Tester



sUTP5017

GNSS

sUTP5018

BaseStation



官方微信

info@noffz.com

Tel.: +86(0)158 6232 1094

FAST > FLEXIBLE > FOCUSED

个基础结构，主要应用于通信技术当中。

并行化在技术领域的兴起催生了新的问题解决方法：并行化并不专注于提升单个执行的性能，而是将执行的可扩展性提升到了一个新的水平。纵观当前现有的基于云的技术，我们不难发现，在允许并行处理的框架下实现性能提升将更为简单。

从经济角度来看，并行化的需求也在上升。优化资产（如测试设备）

的使用成本变得愈发重要，在需要巨额投资的情况下尤其如此。投资回报率（ROI）以及总体拥有成本（TCO）等相关指标的重要性也在与日俱增。最后，运营支出（OPEX）等新的业务和成本模型也要求企业进一步降低前期费用。这种情况下，不同的商业解决方案的出现可谓众望所归。而这一切反过来又增加了合格设备使用指标的重要性，该指标的存在让解决方案提供商和他们的客户都更加倾心于基于使用量的业务模型（如计次付费）。

方法

顺序操作

让我们假设以下场景：操作人员需要对DUT进行一系列特定测试以确保其功能正常。如图1所示，我们假设每个单独的测试顺序均包含五个子任务：测试准备和设备设置、激励生成和数据捕获、测试数据检索（传输）、数据处理/分析以及测试结果交付。操作人员可以通过一组不同的测试参数或通过预配另一个DUT来重复测试顺序。

在顺序测试方法中，两个相邻的子任务彼此高度依存，因此，操作人员必须依次执行。例如，在未对测试设备进行有效设置（指示应捕获的数据）之前即启动数据捕获是毫无意义的。同样，在数据成功传输前，我们也无法对测试数据进行分析。

每一个子任务都有其自己的执行时间。在诸多情况下，子任务的执行时间在各个测试顺序中都基本一致，但可能存在一定程度的不确定性和变化（例如：在非确定性数据传输中）。顺序测

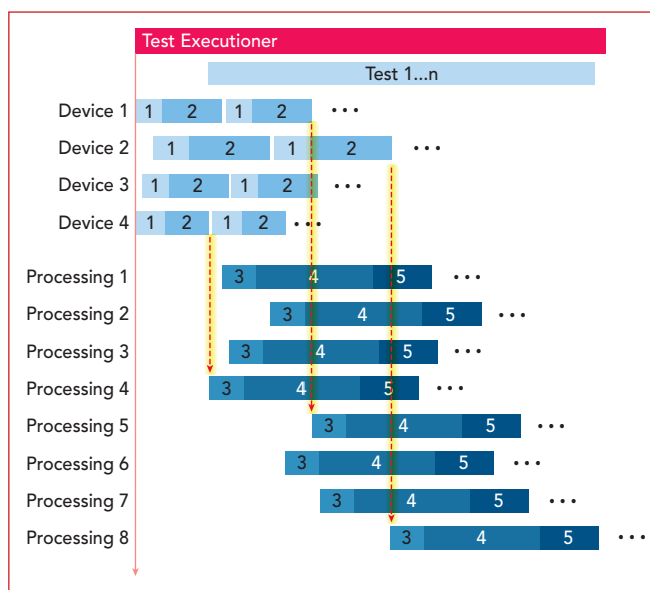


图4：具备解耦子任务的强并行操作。箭头表示任意选择的用于处理传入捕获数据的处理单元。

试的总体测试执行时间为各子任务执行时间的总和。因此，缩短顺序测试总时长的唯一方法就是提升测试顺序中各个子任务的测试速度。一些“高成本”的子任务也许的确存在优化的空间，但在通常情况下，往往会由于技术（如CPU时钟频率）或程序（如处理或解决时间）限制，无法进一步提升执行速度。

从图2中我们可以看到：在完成当前测试子任务后，子任务1和2中使用的测试设备回归到了空闲状态，并且该状态将一直持续，直至开始执行下一测试顺序方变为可运行状态。这意味着，子任务1和2后续测试序列的时间将会决定设备的利用率；时间越短，利用率就越高。得出该结论看似非常有利，然而，在纯顺序操作中，缩短这一时间同样非常困难。

弱并行操作

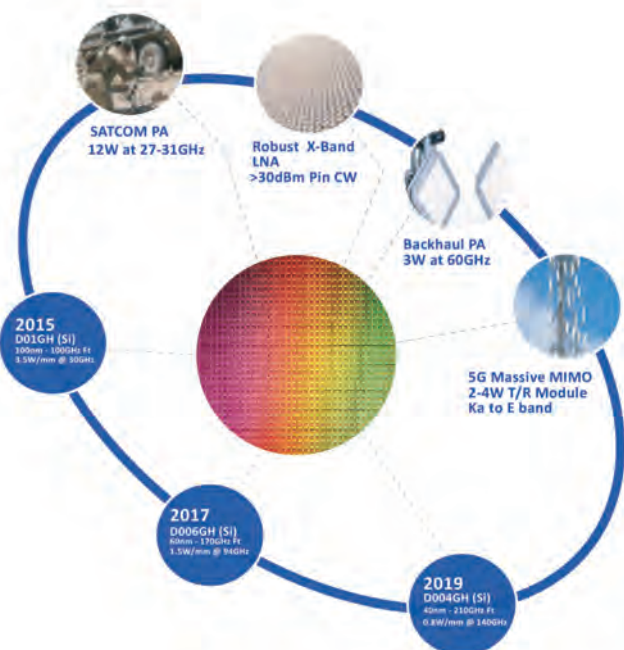
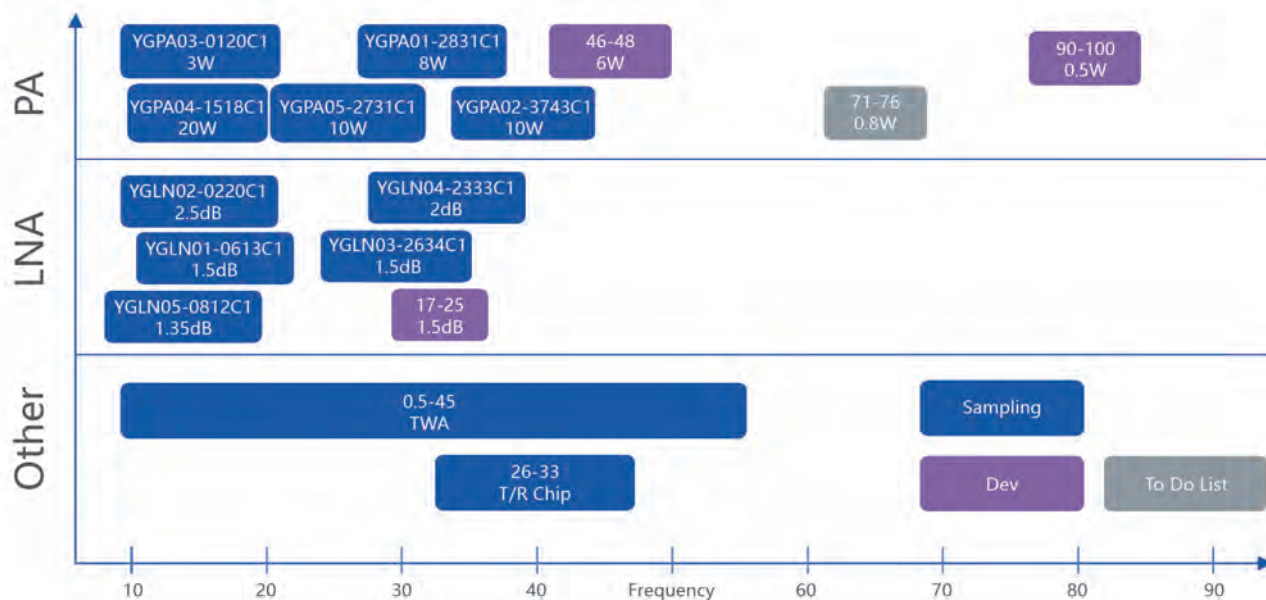
顺序执行的一种替代方法就是考虑并行执行子任务，或尽可能地并行其中一部分子任务。当单个子任务需要耗费很长时间才能完成，而它又能够在一定程度上实现解耦时，弱并行操作将是一种更加有效的替代方法。所有诸如此类的对相邻任务依存度较低的“高成本”子任务可能很适合改用并行操作。

假设完成单个DUT测试需要的五个子任务测试顺序不变。执行子任务4（数据处理和分析）很可能需要耗费大量的时间，而且成本高昂。这在5G NR应用中很常见，因为其生产测试必须满足复杂而严格的3GPP规范。显然，若将子任务4与后续子任务并行执行，吞吐量将大大提高。

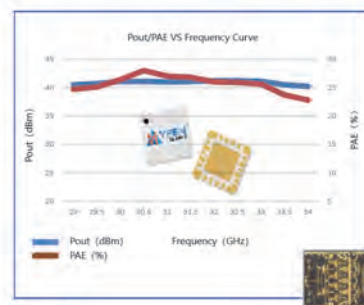
单独处理子任务在大多数情况下都



GaN For mm-Wave Application



YGPA01-3034C1 Ka-band 8W Power Amplifier



GaN process technologies Roadmap





www.mwstore.com



7X24h全天候服务



支持当天发货



微波射频产品一站式采购平台



PCB 连接器



免焊型连接器



GPO/GPPO/G3PO电缆组件



稳相测试电缆

北京微波网超科技有限公司

邮箱: sales@mwstore.com

电话: 010-86484190

地址: 北京市海淀区唐家岭路弘祥1989
产业园G9102

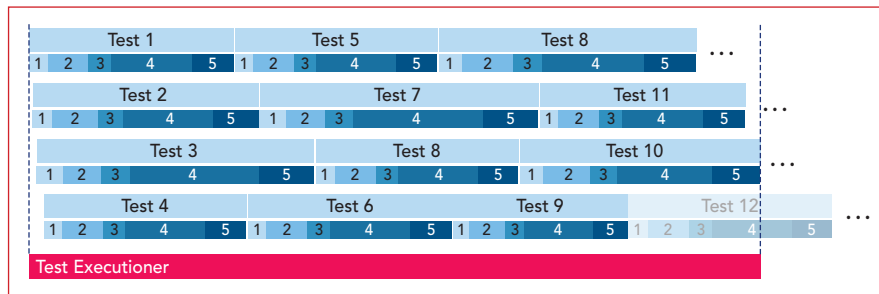


图5: 带有“排序”操作符的强并行操作。

是可操作的。譬如, 测试准备、激励生成和测试数据捕获都与数据分析结果无关, 因此, 对于用于这三项子任务的设备, 完全可以在它们完成各自任务后直接再次启用。操作人员可以根据处理单元的并行能力, 将此流程设置为允许高成本的子任务完全解耦, 从而得以更快地参与到其他任务的执行当中。

在此流程中, 仅部分子任务有条件获得并行执行, 因此, 我们可以称之为弱并行(或不完全并行)执行。如图3所示, 子任务2(捕获)必须等子任务1(准备)完成后方可进行。而子任务2完成后, 子任务3(数据传输)便可执行, 同时, 子任务1也可以即刻参与到下一测试迭代当中。与顺序执行相比, 这种执行方法中测试设备可以即刻重新用于下一测试, 测试设备的空闲时间间隔被降到最低, 甚至不复存在。

强并行操作

在上一示例中, 性能受两方面因素的影响: 可用于并行处理单元的数量以及子任务1和2的执行速度。如今, 提升额外的并行处理能力通过简单的技术改造或升级就能达到, 加速捕获执行则非常困难, 除非捕获过程也可以并行操作。解决这一难题的办法通常就是在设置中增加更多的捕获设备。我们称这种测试执行为强并行(或完全并行)操作, 只有在子任务高度解耦时才能够进行。

如图4所示, 假设所有条件都处于理想情况。总共有4台可独立交付捕获数据的设备, 有8台可并行执行的操作单元用以分析测试数据。

在此情境中, 任意一个在给定时间内“空闲”的处理单元都能够从任意设备处获取可用数据并对其进行处理。下一个可用的单元亦是如此运作, 于是, 便形成了异步操作。此外, 每台设备的捕获时长不尽相同, 因此可能会导致提供的捕获数据存在缓慢或延迟的情况。但由于处理单元对于“数据由哪台设备在何时提供”并无特定要求, 它们只负责处理所有可捕获的数据而无需考虑其

来源, 因此, 捕获数据缓慢或延迟对整体性能并不会产生明显的影响。

异步操作很难以图形的方式展示, 图5给出了一个定性类似的图例, 前文中所提到的处理单元被分配至各个设备的“捕获流”; 通过所执行的测试迭代数不难看出, 与前两种情况相比, 吞吐量已经有了明显提升。但是, 这种操作不能保证来自特定设备的捕获数据由特定的处理单元进行处理。

需要说明的是, 并行数据交付并非适用于所有情形。对单个DUT进行测试时, 很可能会由于射频连接或仪表的复杂性, 无法添加多个捕获设备(例如频谱分析仪)。

试验结果

为了验证并行测试执行的优势, 我们设置了一个在5G应用中经常出现的现实场景, 并在多个测试配置中执行了该测试。设置包含两种模式: 顺序操作和弱并行操作。具体的测试系统由以下部分组成: 信号发生器(R&S SMBV100B)、频谱分析仪(R&S FSVA3000)、以及一个能够并行处理16个数据集的处理平台, 即R&S基于服务器的测试(SBT)单元。我们对SBT进行了配置, 确保每次迭代测试中都会对EVM、ACLR以及SEM指标进行计算。发生器设置保障激励输出功率能够以59个不同功率进行输出。分析仪的设置确保设备能够以I/Q数据文件的形式捕获和传输数据。参与工作的设备通过本地千兆以太网连接, 设备之间不通过任何特殊的硬件相连。为了确保结果的有效性, 我们比对了所有计算的结果。

图6展示了两种场景的定性结果。它证明了顺序操作(图6右侧)的性能的确会受到单个测试步骤执行时间的限制。右下角的图放大显示了前几个测试步骤的执行情况, 清晰地展示了顺序(平缓走势)和并行(陡峭走势)方法之间的差异。执行所有测试步骤所需的时间基本一致, 因此, 没有必要将各个步骤细分为单个子任务。所有59个步骤的测试



COPPER MOUNTAIN[®]
TECHNOLOGIES

CMT矢网给5G提供的5种支持

1. 基于CoblatFX（钴蓝系列）基础矢网扩展覆盖至5G FR2，用经济的方案实现全频段覆盖的5G测试系统
2. 基础矢网可选9GHz或者20GHz的CobaltFX系列
3. CMT对应用和自动测试的卓越支持
4. 同时支持Windows系统和Linux系统
5. 4端口系统为5G提供快速MIMO天馈分析



配合CMT自己的或者第三方的频率扩展模块，可覆盖至330GHz

毫米波频段接口：NMD 1.85mm, WR15, WR12, WR10, WR8, WR6.5, WR5.1, WR4.3和WR3.4



Sainty-Tech Communications Limited

中国（含香港地区）代理商：南京舜特科通信技术有限公司，
025-52635773 / 025-52632557
www.sainty-tech.com/



www.coppermountaintech.com

EXTEND YOUR REACH[®]

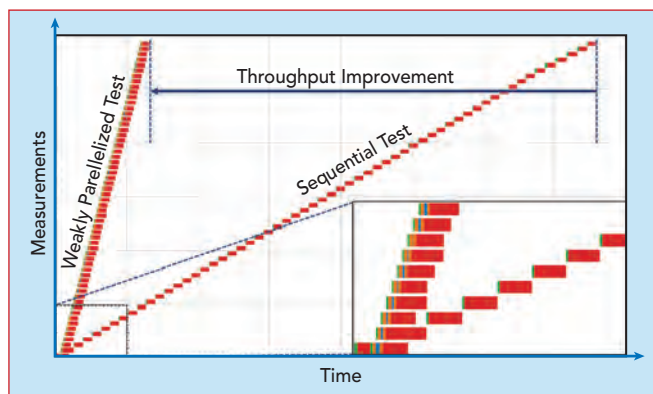


图6: 顺序(右)和弱并行(左)测试执行对比。右下角显示前几个步骤的情形。

时间总和即为单个测试的执行时间。

图6的左半部分显示了使用单个分析仪作为唯一捕获数据源情况下进行的弱并行操作。图6右下角放大的部分显示了并行测试的前10次迭代和顺序测试的前8次迭代。图中清晰展示了每个测试步骤被细分为多个子任务时的执行情况。互相重叠的红色指示条反映了分析任务的并行执行情况。从图中可以看到,单设备操作中,测试准备和数据捕获子任务对系统性能起着决定性的作用。当然,这一结果的必要条件是具备足够快速的数据传输能力以及足够数量的并行处理单元。

图6中的垂直虚线直观显示了两种场景在总测试执行时间上的差异,我们可以从中清楚地看到,第二种场景中的设备性能提升显著,而弱并行设置的执行速度比顺序测试快了将近六倍。对于任何需要加速重复测试执行的场景来说,这无疑说明取得了显著改进。在设备利用率方面,弱并行测试过程中设备的利用率几乎达到了100%。而对于完整的测试顺序,在顺序执行中,这一比率平均不足10%。

图7所示为系统性能概览。在此,系统特意配置了少量并行处理单元,用于运行相同的测试。测试人员按照每个

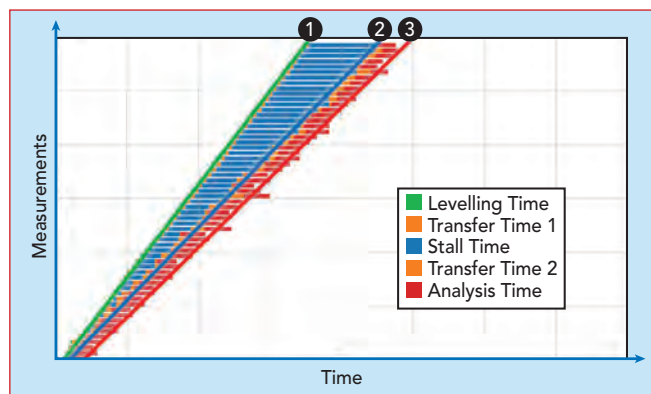


图7: 吞吐量任务细分以及各子任务对整个系统性能的影响。

测试步骤的各个阶段,对系统吞吐量性能数据进行记录。第一阶段(绿色)为执行输入电平的分析仪准备时间;第二阶段(橙色)为数据捕获以及传输至集中缓冲区所需的时间。第三阶段(蓝色)为用作缓冲区的文件服务器。第四阶段为数据传输至处理单元,而第五阶段(红色)则是捕获数据的实际处理。

从图7中可以看出,其中有三个部分会对性能产生影响。

第一个部分:图7中的绿色斜线1,表示数据交付的速度。就这一部分而言,我们可以通过加速数据交付以及在可能的情况下实行数据源并行来改善系统速度。该部分对于系统速度的提升影响明显,然而受限于测试设置以及物理限制,以上操作并不容易执行。

第二部分:斜线1和斜线2之间的区域,它显示了由于缺乏并行处理能力,系统的等待(或缓冲)时间。当系统具备足够可用的处理单元进行处置时,蓝色区域将达到最小。如果基础平台能够支持这种可扩展性,那么该部分将是对系统整体性能贡献最大,同时也是最容易调优的部分。在这一测试用例中,我们特意将SBT设置为支持在单个硬件单元(如服务器)或跨多个单元运行的任意数量的处理单元。

第三部分:斜线2和斜线3之间的红色区域,表示单个处理单元执行分析任务的速度。优化单个单元的处理时间对于整个系统性能的影响相对较小,因此,通常它被认为是一个成本较高的调优因素。

在其他测试中,我们通过对任意数量的捕获设备

进行模拟近似完成了强并行操作,其带来有效结果,即测试中的捕获数据几乎即刻可用。我们可以将后一用例当作一种设置,以用作评估处理平台的最佳性能。在有足够数据捕获设备可用的实际情况中,可以将这一用例的结果当作最佳效果的临界值。图8为强并行测试模拟与其他两种场景的对比。

结论和展望

与预期一致,强并行测试具有最佳的性能表现。由于系统配置了16个并行的处理单元,数据几乎可即时用于处理,所以才有了蓝色部分所显示的缓冲发生区域。通过增加更多的处理单元,整体吞吐时间将进一步降至最小,从而能够有效获得比顺序测试多出10个以上的改善因子。

值得注意的是图7和图8(橙色)中的数据传输部分,尽管在执行所需时长上略有差别,但该部分对系统性能的影响很小。这是使用非确定性传输协议(以太网协议的上层协议TCP)时会出现的典型观察结果,然而,异步非阻塞操作能够支持这种执行模式。

使用通常用于可扩展IT系统的系统组件,我们得以将异步操作付诸实践。借助于近来兴起的基于云的共有和本地系统,可以在超出原本用例的系统设计中使用这种构建模块。在此,所测试的SBT解决方案正是围绕这种可扩展的组件构建的,并且,它是纯本地化部署,对于外部连接没有任何要求。

这种以提高吞吐量为重点的解决方案具备多方面的优势:除了上文中讨论的可以加快整体的测试速度和吞吐量外,并行操作还能够提高设备利用率,实现更高的投资回报。最后,在降低高价值设备前期投资的需求日益增加的情况下,新的基于使用的商业模式将愈发具有市场吸引力。■

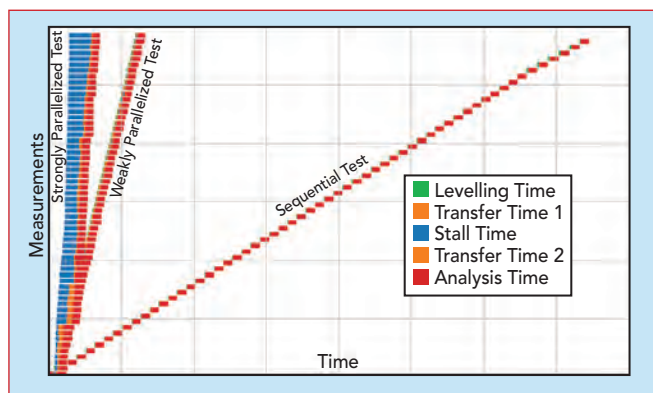
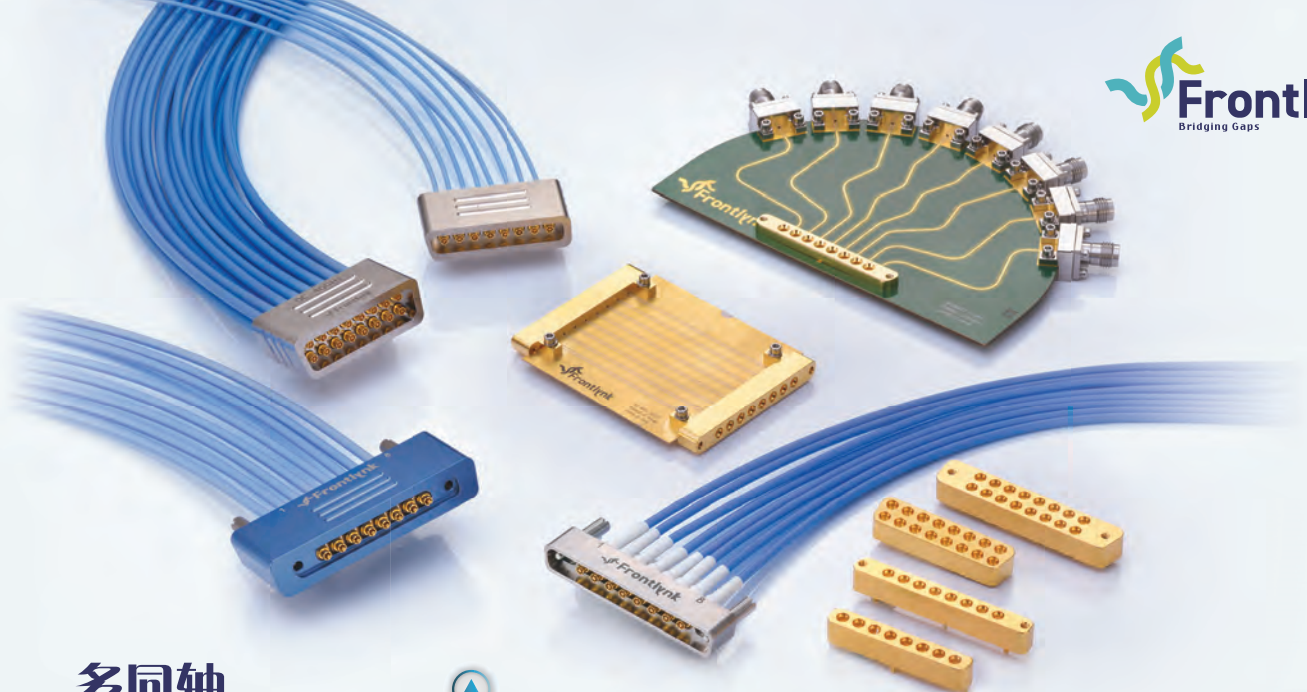


图8: 强并行测试、弱并行测试与顺序测试的性能对比。



多同轴

探测高达67GHz的多同轴

射频、微波同轴连接器和电缆配件



1.0mm系列

高达110GHz的
连接器、转接器
和电缆配件



高达90GHz的1.35mm系列



高达110GHz的测试电缆

1.0mm 连接器

直流至 110GHz, VSWR≤1.2

1.35mm 连接器

直流至 90GHz, VSWR≤1.2

1.85mm 连接器

直流至 67GHz, VSWR≤1.2

2.4mm 连接器

直流至 50GHz, VSWR≤1.2

2.92mm 连接器

直流至 40GHz, VSWR≤1.15

3.5mm 连接器

直流至 34GHz, VSWR≤1.15



Frontlynk Technologies Inc.

www.frontlynk.com

Tel: +886-6-356-2626

Fax: +886-6-356-6268

E-mail: info@frontlynk.com

Horus: 全数字相控阵雷达的测试平台

Horus: A Testbed for Fully Digital Phased Array Radars

C. Fulton, R. Palmer, M. Yeary, J. Salazar and H. Sigmarsson, *University of Oklahoma, Advanced Radar Research Center, Norman, Okla.,*

M. Weber, *University of Oklahoma/National Oceanic and Atmospheric Administration, Norman, Okla.,*

A. Hedden, *Combat Capabilities Development Command, Army Research Laboratory, Adelphi, Md.*

凭借多年的经验，俄克拉荷马大学（OU）的先进雷达研究中心（ARRC）正在建立有史以来第一台移动全数字极化相控阵雷达（PAR）¹，如图1所示。在过去的10至15年间，这一技术已取得了长足的发展，尤其是在模数转换器（ADC）、数模转换器（DAC）、大功率放大器和现场可编程门阵列（FPGA）领域，将雷达系统的重要部分逐渐移至相控阵天线口径面已成为现实。图2描绘了全数字PAR系统的总体架构，其中每个双极化天线单元的每个水平（H）和垂直（V）极化通道都有一个独立的数字接收器和数字发射器。

雷达革命

在过去的15年中，ARRC参与了美国国家多功能相控阵雷达（MPAR）项目，随后又参与了美国国家监视雷达频谱效率（SENER）项目，该项目最初是由美国联邦航空管理局（FAA）、国防部（DoD）、国土安全部（DHS）和国家海洋与大气管理局（NOAA）合作研究的。因此，ARRC正在研究一种可扩展的S波段全数字极化相控阵，以满足天气和远程飞机扫描的需求。该阵列还将支持其他的重要操作，包括MIMO和常规通信。

灵活的波束控制和多功能的实现使得相控阵列成为多任务雷达系统的最佳候选者，因为它提供了高效且具有高成本效益的解决方案。GaAs、SiGe、CMOS和GaN技术的进步提供了可靠的、高集成度的RF器件，这些器件使相控阵天线成为现代遥感和通信技术的

核心。高度集成和高效的器件允许相控阵天线架构中含有多个收发器，与只用模拟波束赋形器的上一代相控阵天线相比，这些器件可以降低相控阵的成本、减小其尺寸和重量，并优化系统功能、提高系统性能，5G当然会使用这样的相控阵技术。采用模拟波束赋形的阵列天然地受限于通过前端波束赋形电子器件的精确设置实现的波束赋形方案。

目前，利用子阵列级的数字波束赋形（DBF）是提高相控阵雷达灵活性的常见方法，NOAA国家重度风暴实验室（NSSL）操作的76个面板的先进技术演示器（ATD）和马萨诸塞州大学（UMass）雷神低功耗雷达（即Skyler）可以证明这一点。然而，向单元级DBF架构的转变将可以实现前所未有的功能。例如澳大利亚的CEA-FAR海军雷达、美国海军的FlexDAR雷达²、以色列Elta的MF-STAR、AFRL的BEEMER（MIMO实验雷达天线单元的基带数字化）以及太空围栏等。另外，每个天线单元的数字化可以使人们对极化进行精确控制，可以控制单纯的H极化或V极化，或同时控制H和V极化倾斜45度，以及LHC、RHC或任意一种极化状态。

数字阵列技术是一个新生的研究方向。作战能力发展司令部陆军研究实验室（CCDC ARL）的重要贡献是开发了用于阵列校准的强大技术。相控阵雷达在拥挤环境中的运行在很大程度上取决于保护雷达的措施以及在动态环境中校准工作的持续。工厂校准对于数字阵列是不够的，因此需要强大的现场校准技术，这些技术在计算效率上也具有优

势。OU和CCDC ARL正在开发基于互耦的校准技术来解决动态校准问题。CCDC ARL正在进行概念验证试验，利用单元级数字阵列实验室测试系统来量化初始算法的性能。展望未来，CCDC ARL将优化这些技术以实现更宽的带宽性能，并将重点放在大型阵列的可扩展性以及实验室测试平台以外的操作环境的适用性。

完整的数字架构

尽管已经证明在PAR上实现双极化具有挑战性，但最近由美国国家科学基金会（NSF）赞助的雷达技术交流研讨会取得了重大进展⁵，例如MIT Lincoln Lab在ATD的S波段控制面板⁶、BCI/LMCO的S波段原型、NCAR的C波段机载相控阵雷达系统、UMass的X波段雷达和OU的S波段圆柱形极化相控阵雷达（CPPAR）演示器⁷。为了提高“聚光”操作的时间分辨率，ARRC在几年前制造出单极化X波段大气成像雷达（AIR），如图1所示。该AIR工作在“泛光”模式，发射20度垂直扇形波束，并利用36个接收阵列进行大规模数字波束赋形。换句话说，雷达测量的距离高度指示器（RHI）可以同时形成，类似于用电磁照相机拍摄照片。这种架构与20度/秒的方位角机械扫描相结合，将允许现有的AIR在大约9秒内收集180°×20度范围内的信息，因此，这也是世界上最高的龙卷风成因观测分辨率⁸。另一具有泛光分辨率的类似系统是大阪大学的X波段PAR。

这些先进的成像监视操作模式需要多个数字化子阵列通道。数字化水平的提高还将使自适应数字波束赋形（ADBF）、时空自适应处理（STAP）甚至是MIMO操作模式成为可能。理想的相控阵架构将具有数字化功能，每个天线单元的发射和接收信号都是可控的，因此也具有宽带宽覆盖能力。由于单元级处理和后续波束赋形都是数字化的，因此可以针对不同的应用场景对其进行重构和优化。单元级的数字化



图1: ARRC的移动全数字极化相控阵雷达发展进程。

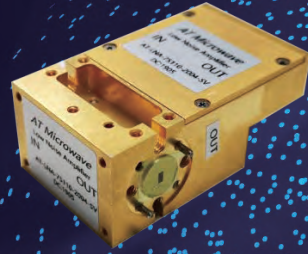


上海鳌太电子科技有限公司

毫米波解决方案 从 U、V、E、W 到 D 波段 40-170GHz

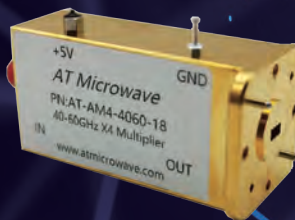
低噪声放大器

Low Noise Amplifier



高功率有源倍频器

High Power Active Multiplier



功率放大器

Power Amplifier



有源倍频器

Active Multiplier



收发模块

TxRx Modules



混频器

Mixer



总经销商:

上海馥莱电子有限公司

上海市普陀区祁连山南路 2888 号耀光国际 A 座 9H

电话: 021-5291 8556

手机: 13764441515 (微信)

邮箱: sales@fulai-elec.com

网站: www.fulai-elec.com



为新的波束处理和波束赋形方案打开了大门，并在大型系统中通过前所未有的动态可调范围提供了最大的灵活性。例如，在给定M个天线单元且单元间噪声不相关情况下，系统的信噪比提高了 $10\log(M)$ 。然而，这伴随着固有的技术风险和实际挑战，如需要处理的数据量以及使用不复杂的收发器。

图3给出了全数字PAR系统的三个例子。图3最左边的图描绘了几种典型的高灵敏度波束和几种低优先级波束，它们是在一个区域内收集重要信息所必需的。图3中间的图片给出了一个时空复用的范例，通过该范例可以从监视区收集多组独立样本；这样可以利用更少的样本收集数据。由于自适应空间滤波可以通过相控阵实现⁴，这极大地证明了在典型的抛物面碟形天线上使用相控阵的正确性。最后，图3的最右图描述了移动演示器将如何利用团队的成像专业知识来实现快速批量扫描⁸。

对于未来任意的多任务雷达来说，多种功能的同时实现是在给定的时间轴上满足任务要求的唯一途径，因此通过数字化实现先进的波束赋形的灵活性至关重要。另外，该方法可以通过软件升级而不是昂贵的硬件改造来实现数字PAR整个生命周期内的其他任务，从而节省了大量运营和维护成本。下一部分将对在ARRC正在设计和制造的S波段双极化PAR的开发进行概述，该S波段双极化PAR将实现这些目标。这个系统我们称为Horus，它的每个极化、每个天线单元都有一个数字化收发器，它将成为一种有价值的研究工具，用来评价该方法的优点与挑战。

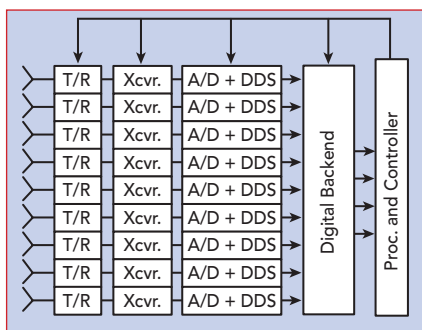


图2：每个天线单元的独立数字接收器和数字发射器。

Horus雷达的设计理念

ARRC目前正在开发一种移动S波段双极化相控阵系统。该系统具有全数字架构，由1024个双极化天线单元组成，分为25个8*8面板（其中16个装有电子器件），如图4所示。每个面板装有八个“OctoBlade”，几乎所有的雷达电子器件都位于其中。每个OctoBlade都经过精心设计，来激励面板中的高性能天线阵列的8单元列，并在主平面上实现几乎理想的极化状态。主平面由每边都带有PCB的金属冷却板（传热导管）组成，以容纳总共16个基于GaN的前端（每个单元、每个极化>10W），其中八个来自模拟器件的双通道数字收发器、四个用于处理的前端FPGA和两个用于控制的FPGA。天线子系统及其相关的电子器件装配情况可以归为以下三种主要架构之一：共形贴片装配、面板装配（带有滑出式OctoBlade）或者由电缆分隔的独立结构（如图4）。带有滑出式OctoBlade的设计所需的维护成本最低，因为这些电子器件易于热插拔。对于需要有数十年使用寿命的地基系统来说，

这一便捷功能非常完美。

通常，大型阵列的性能取决于阵列后方的数字互联结构。目前正在使用的是传统的分层拓扑结构，但它们的一些特性如可伸缩性、灵活性、带宽等受到了限制。例如，有些阵列采用网状拓扑结构。使用网状拓扑结构时，中心通道的负担很大。这通常会导致网络中心区域的拥堵。针对这种情况的解决方案是在网状网络中添加路由器或使用环状拓扑，这种环状拓扑在对边的路由器上具有对称性，从而可以在资源少量增加的情况下减轻不必要的拥堵。但仍有许多问题悬而未决，我们认为其中的三个主要问题是：数据传输机制（即RapidIO、千兆以太网等）、部分波束赋形的程度以及数据路径拓扑（即层次结构等）。平衡好这些问题将使阵列规模可以方便地被扩展，以满足各种任务。

Horus的普通雷达，是通过RapidIO网络馈入面板背面来完成数字波束赋形的。这将使一个概念上的多功能PAR系统的波束-带宽积成为可能（如在适当动态范围内的200MHz波束）。分层波束赋形器减少了分层结构每个级别的数据流数量，并在此过程中执行了部分加权和汇总。脉冲式波束赋形器也是类似，但不再是在给定的阶段进行数据汇总，而是沿一系列节点或者单元发送数据，部分波束数据在此过程中被汇总，以产生用于后续处理阶段的输出。作者所知道的几乎每个中等大小的数字阵列都在使用某种形式的分层/脉冲处理来实现数字前端。重要的是，与模拟阵列不同，采用分层/脉冲波束赋形可以在数字域中将波束数量与信号带宽进行权衡，使固定的整体波束-带宽积在前端处理链的每

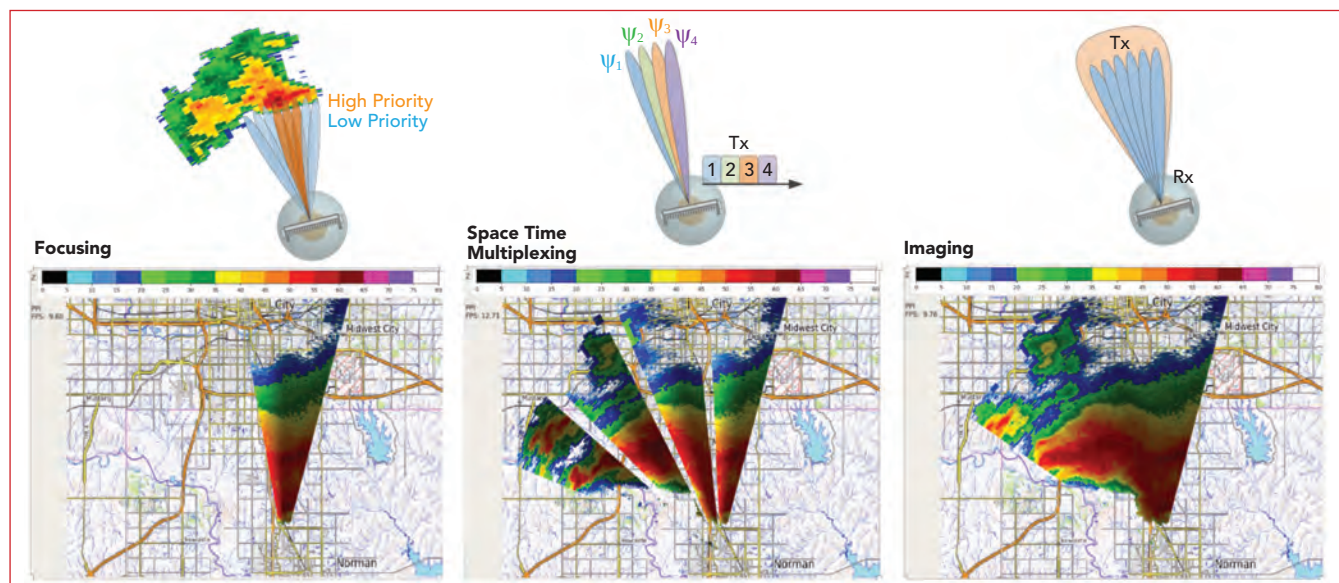


图3：雷达模式的三个例子，说明了全数字阵列的功效。

一个点大致保持恒定。

对于多层次结构，互连成本与单元数量M的对数成正比，而数据和前端处理则与M大致成线性比例关系。两者均与整个系统的带宽成比例。这些类型的考虑因素在校准、波束赋形及自适应的权衡中对任意前端DBF架构的设计具有指导意义。最终，RapidIO可以支持任意网络架构，如折叠环形可以减少延迟并提高可靠性，这些将在未来进行探索。

图5给出了移动演示器的实验室测量结果⁹。这款全数字有源双极化相控阵天线旨在完全控制每个天线单元的发射和接收信号。与WSR-88D抛物面天线相比，ARRC项目的天线设计着重于实现相同的功能或改进性能。鉴于气象任务在目标识别方面比飞机监视任务对极化的要求更高，这些设计规范至关重要。双极化雷达既需要低交叉极化电平（低于-40dB），也需要良好匹配的模式（低于0.1dB），才能成功确定所扫描大气层的极化变量。

通常，当天线的交叉极化水平增加时，极化变量中的所有偏差都会增加。在8*8阵列的设计过程中研究了天线单元中的多个要素，这些要素包括：边缘衍射抑制；中心频率为2.8GHz的带宽超过10%；端口间隔离约为-50dB；方位角 $\pm 60^\circ$ 扫描范围内，俯仰角 $\pm 10^\circ$ 扫描范围内，交叉极化水平低于-45dB，同极化失配低于0.1dB。仔细校准后，对于方位角 $\pm 60^\circ$ 扫描范围内，俯仰角 $\pm 10^\circ$ 扫描范围内，可获得至少-10dB的有源反射系数。因此，这为Horus设计了一种新型的具有电磁耦合的堆叠十字微带贴片辐射器，图5中最左图就是这些辐射器的一个8*8面板。辐射器和馈电网络被分成两个不同的部分，以防止它们在制造后弯曲。辐射器由两个导电层及一个由RT/Duroid 5880LZ和RO4450F粘合成的天线罩。

随着对珍贵频谱需求的不断增长，现代和下一代雷达面临在复杂、动态环境中运行的挑战。例如，对能够适用和应对整个频谱新干扰源的弹性系统的需求是贯穿陆军现代化战略的一个主题。因此，为了减弱干扰，将静态和频率可重构的小型化滤波器集成到天线面板的研究和天线设计研究正在同步开展。这些滤波器基于容性负载和介质集成波导（SIW）谐振器，这些负载和谐振器已完全集成于馈电网络。静态滤波器提供了额外的带外抑制，可重构滤波器用于带内干扰抑制¹⁰。

项目状态及未来研发计划

本文提供了一个项目的简述，该项目在每个天线单元上实现数字化以提高

相控阵的灵活性（即每个单元的H和V极化的Tx和Rx都是数字化的），为现代雷达挑战提供解决方案。以下列表简要概述了Horus系统的发展潜力：

- 先进的口径和波形灵敏度，可同时执行许多不同的任务/目标；
- MIMO雷达——多个发射和接收天线；
- 频谱敏感的有源相控阵；
- 具有更高级别分辨率和更宽的覆盖范围的先进DBF，功能包含自适应波束赋形、干扰改善和杂波抑制；

- 阵列成像——减小尺寸和成本的高效系统；
- 精确的极化控制：单纯H极化、单纯V极化、H和V极化同时倾斜45度、LHC、RHC、或者任意极化状态；
- 使用互耦方法进行原位阵列校准。■

致谢

作者感谢ARRC的工作人员为Horus的设计和制造所做出的奉献。本文的资助来源于俄克拉荷马大学、美国海军研



EPX microwave inc.

“一站式微波同轴开关超市，满足对微波开关有特殊要求的你”

- 超宽频率: DC~52GHz
- 特大功率: 2500 CW
- 超低三阶互调: -165dBc
- 一体化设计开关矩阵，减少电缆连接，提升矩阵的各项微波指标。



现货供应各类型常用开关，请联络国内独家代理商



億兆微波有限公司
EPX Microwave Limited

億兆微波有限公司
香港黃竹坑黃竹坑道39號
偉晉中心1期22樓
電話：(852) 28950907
電郵：sales@epxmicrowave.com

国内独家代理商：



深圳市安盛特科技有限公司
深圳市福田區彩田南路
中深花園大廈A座1512樓
電話：(86) 0755-82924546
電郵：alex_zhou@santo-tech.com

www.epxmicrowave.com

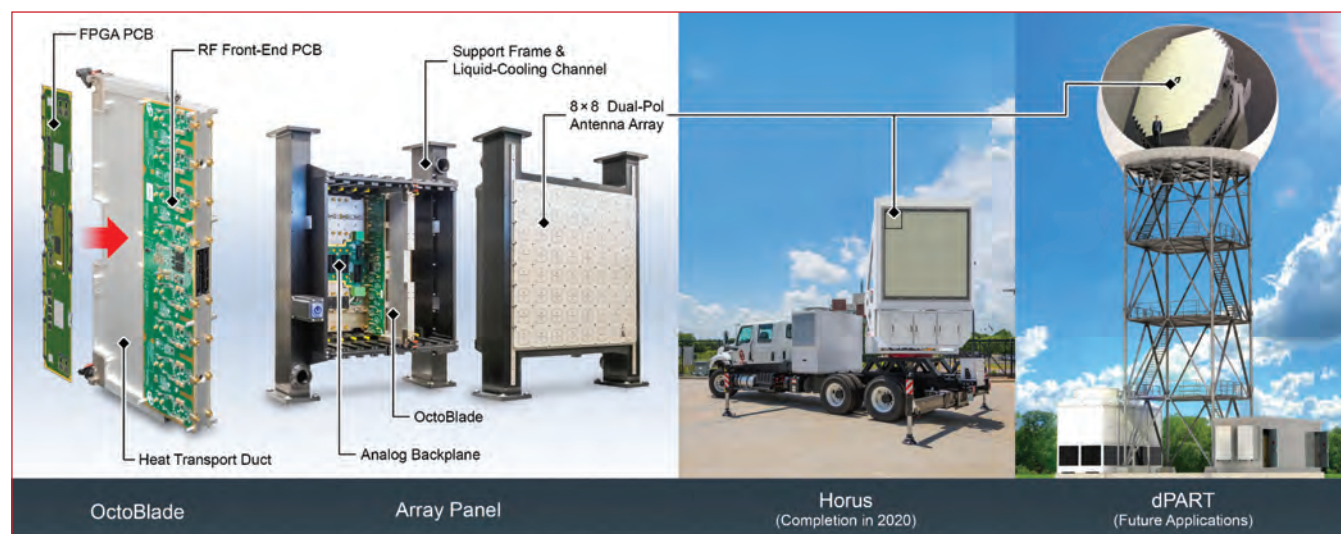


图4: 电子器件和8*8双极化面板 (左图); 拥有一个阵列面板的Horus车 (中图); 未来利用多面板的应用场景和可伸缩架构 (右图)。

究局 (资助号N00014-18-1-2896)、美国商务部NOAA-俄克拉荷马大学合作协议 (资助号NA11OAR4320072)、NOAA/海洋与大气研究办公室及美国陆军研究局 (资助号W911NF-19-1-0046)。作者还要感谢Boonleng Cheong在图片方面的帮助。本报告中包含的观点、意见和/或发现仅是作者的观点, 不一定代表美国政府的观点, 也不应解释为美国政府的正式立场、政策或决定, 除非有其他文档的认定。

参考文献

1. R. Palmer, C. Fulton, J. Salazar, H. Sigmarsson and M.

- Yeary, "The Horus Radar - An All Digital Polarimetric Phased Array Radar for Multi-Mission Surveillance," American Meteorological Society Annual Meeting, 2019.
2. M. Peck, "Raytheon Takes FlexDAR Contract," May 2014, <http://archive.c4isrnet.com/article/20140505/C4ISRNET08/305050001/Raytheon-takes-FlexDAR-contract>.
3. C. Fulton, M. Yeary, D. Thompson, J. Lake and A. Mitchell, "Digital Phased Arrays: Challenges and Opportunities," Proceedings of the IEEE 104, No. 3, 2016, pp. 487-503.
4. C. Curtis, M. Yeary and J. Lake, "Adaptive Beamforming to Mitigate Ground Clutter on the National Weather Radar Testbed Phased Array Radar," IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, Vol. 54, No. 3, March 2016, pp. 1282-1291.
5. H. Bluestein et al, "Radar in Atmospheric Sciences and Related Research: Current Systems, Emerging Technology, and Future Needs," Bulletin of the American Meteorological Society 95, No. 12, 2014, pp. 1850-1861.
6. K. Hondl and M. Weber, "NOAA's Meteorological Phased Array Radar Research Program," IEEE Symposium on Phased Array Systems and Technology, October, 2019.

7. G. Zhang, R. Doviak, D. Zmi, R. Palmer, L. Lei and Y. Al-Rashid, "Polarimetric Phased-Array Radar for Weather Measurement: A Planar or Cylindrical Configuration?" Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 28, No. 1, 2011, pp. 63-73.
8. B. Isom, R. Palmer, R. Kelley, J. Meier, D. Bodine, M. Yeary, B. Cheong, Y. Zhang, T. Y. Yu and M. Biggerstaff, "The Atmospheric Imaging Radar: Simultaneous Volumetric Observations Using A Phased Array Weather Radar," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 30, No. 4, April 2013, pp. 655-675.
9. J. Diaz, J. Salazar-Cerreno Jorge Ortiz, N. Aboserwal, R. Lebron, C. Fulton and R. Palmer, "A Cross-Stacked Radiating Antenna with Enhanced Scanning Performance for Digital Beamforming Multifunction Phased-Array Radars," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 66, No. 10, 2018, pp. 5258-5267.
10. S. Saeedi and H. H. Sigmarsson, "Miniaturized Evanescent-Mode Cavity SIW Bandpass Filter with Spurious Suppression," 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 234-236.

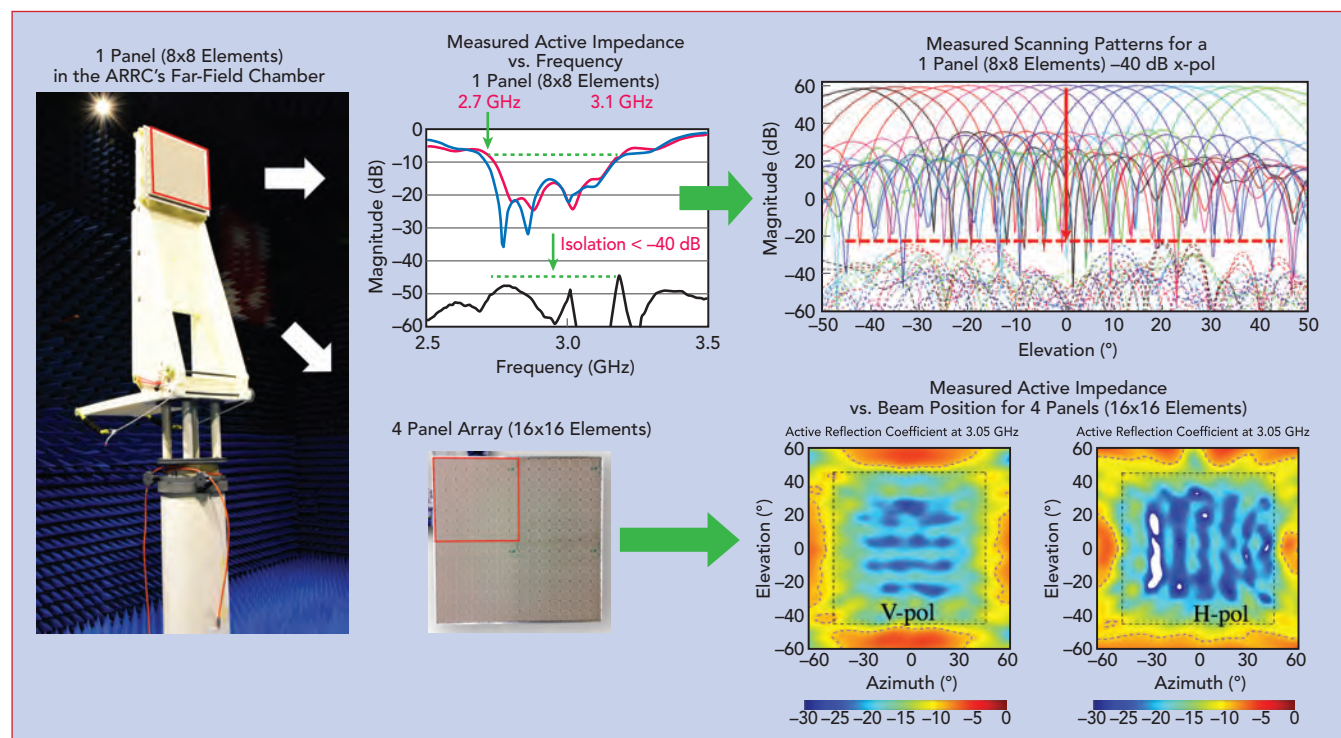


图5: 实验装置及各种参数测量。

固态功率放大器

Solid State Power Amplifier



高频宽带、高功率、高增益



输出驻波保护、过温保护、输入过驱保护



USB接口、以太网接口



上位机远程控制



自动校准偏置电流



6-18GHz, 100-300W



0.5-6GHz, 50W



0.7-2.7GHz, 160W



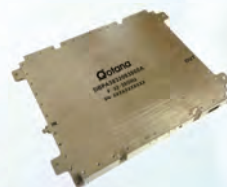
2-6GHz, 100W



18-47GHz, 5W

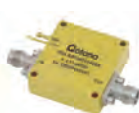


27-34GHz, 20W



32-38GHz, 10W

频率(GHz)	最大功率(W)	增益(dB)
0.5-6	50	42
0.7-3	160	55
2-6	100	48
6-18	300	60
18-47	5	35
27-34	20	50
32-38	10	40



低噪声放大器

频率达到54GHz
低噪声系数
小型化 超宽带



固态开关

频率达到50GHz
高速切换 低损耗
高隔离度 小型化



数控/压控衰减器

频率达到50GHz
低损耗 高精度
宽动态衰减范围 小型化



数控/压控移相器

频率达到40GHz
低插入损耗
低相位误差



滤波器

高通低通带通滤波器
带阻滤波器
频率达到50GHz
高抑制 低损耗 小型化



功分器

频率达到67GHz
低损耗 高隔离度
小型化



耦合器

频率达到70GHz
高定向性
大功率 低驻波



隔离器

频率达到40GHz
低损耗
高隔离度 高功率



扫一扫关注我



成都玖信科技有限公司

电邮sales@qotana.com 承诺24小时内答复

地址:成都市武侯区武兴路86号兆信国际 电话:028-85559890

网址:www.qotana.com

电子信箱:sales@qotana.com

基于弯曲巴伦及AMC的偶极子阵列不易被邻近金属平面影响

Bent Balun Combined and AMC Backed Dipole Array Less Vulnerable to Nearby Metal Planes

Changhyeong Lee, Heejun Park and Sungtek Kahng,
Incheon National University, Incheon, South Korea

一种用于波束赋形的新型印刷偶极子阵列天线可降低附近金属平面对自己的负面影响。通过在每个印刷偶极子元件下放置一块较薄的人工磁导体 (AMC) 可以实现这一点。每个偶极子均由一个紧凑型弯曲巴伦馈电。该巴伦可连接到Butler矩阵馈电网络。对基于AMC的偶极子阵列的辐射测量结果表明, 其在恶劣环境中脆弱性较低。

移动通信设备通常采用单极或倒L型天线。为了能在射频平台的有限空间内安装线天线, 通常都会采取将辐射元件向金属面或湿表面或皮肤 (对于可穿戴设备的场景) 弯折至平行的做法。这些情况下, 天线的输入阻抗匹配会受到影响, 从而导致回波损耗降低以及辐射特性变差。这是因为处在理想电导体 (PEC) 附近时, 线辐射器产生的电磁场会变成导波, 而非放射波。¹为了充分发挥手机中线天线的功能, 采用平面倒F型天线 (PIFA) 可避免这一问题²; 而改变金属平面的边界条件则是另一种方法。

采用电磁带隙 (EBG) 结构可减轻偶极子位于PEC或人体组织附近时产生的问题。³⁻⁸ F. Yang等人³将一个偶极子放置于一对4×3周期性蘑菇形结构的边缘。8GHz下, 搭载有PEC的蘑菇形EBG能

够降低 S_{11} 并实现全方位覆盖。Abkenar和Rezaei^{4,5}大面积使用装有PEC的7×7蘑菇形结构来产生11至14GHz的表面波阻带。他们实现了宽带EBG, 但天线特性并无明显提升。根据Kim等人的研究⁶, 辐射元件可以和EBG组件处在一个平面上, 沿着弯曲的短路传输线以及叉指间隙放置7、8个单元。Shahvarpour等人⁷计算了实现AMC效果的PEC多层介质的高度, 并发现在24GHz运行时辐射效率可

提高40%。Soh等人⁹对Ayad等⁸设计的贴片进行了改进, 以制造凹槽。用开槽贴片或弯折线来替代直偶极, 可激励厚且宽的AMC。¹⁰⁻¹¹然而, 迄今为止的各项研究中, 含AMC的天线还不曾具备波束赋形及控制特性。

本文中, 我们提出了一种基于薄型AMC的印刷偶极子阵列, 该阵列连接一个Butler矩阵进行波束赋形, 同时适用于恶劣环境 (如靠近金属平面或会产生损

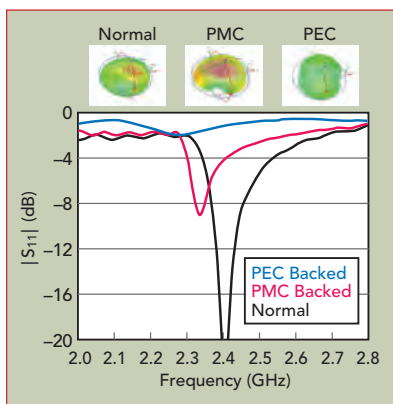


图1: 正常、PEC和PMC边界对偶极子 $|S_{11}|$ 的影响。

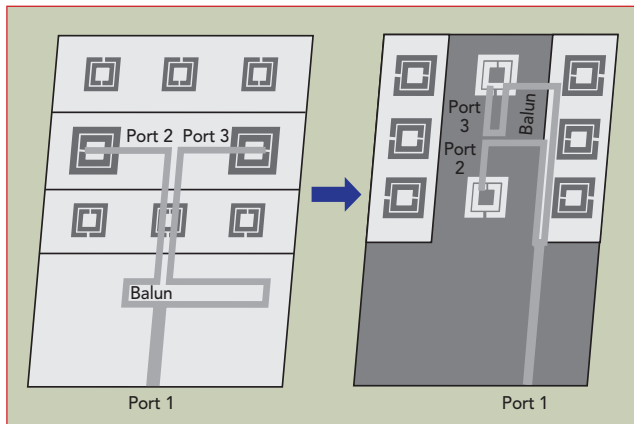


图2: 基于AMC的偶极子的传统设计 (a) 及由弯曲巴伦馈电 (b) 的比较。

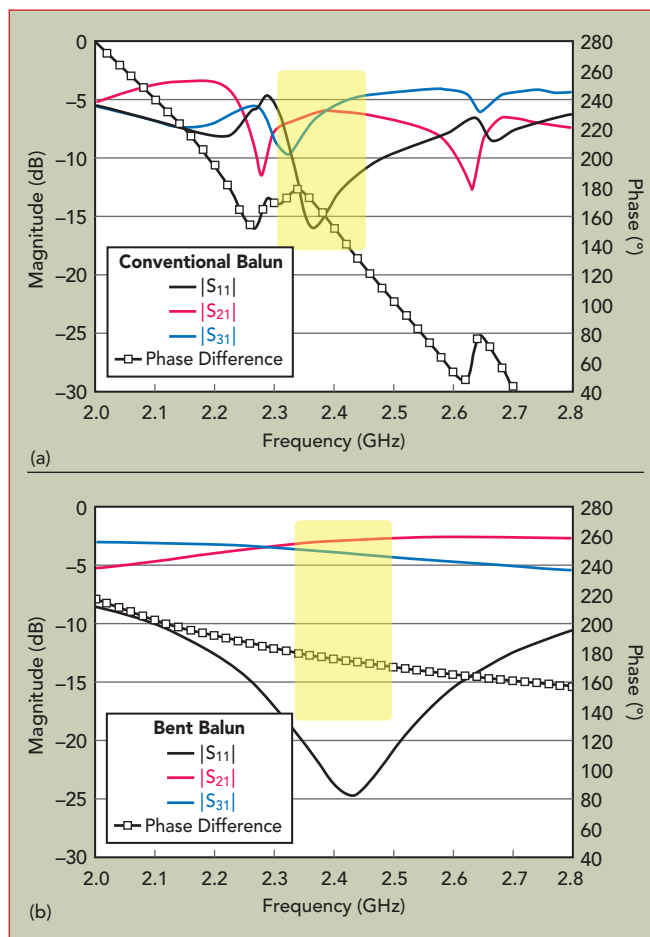


图3: 传统巴伦 (a) 及弯曲巴伦 (b) 结构的S参数与频率。



130款不同的数字化仪



名称: M2p.59xx
类型: PCIe x4 with 16-bit
速度: 5 kS/s to 125 MS/s
通道: 1 to 8



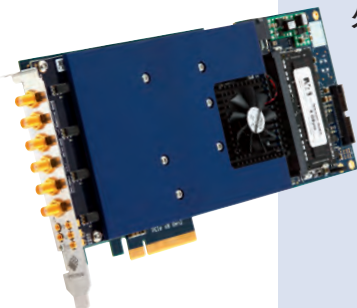
名称: M4x.44xx
类型: PXIe x4 with 14/16-bit
速度: 130 MS/s to 500 MS/s
通道: 1 to 4



名称: M4i.44xx
类型: PCIe x8 with 14/16-bit
速度: 180 MS/s to 500 MS/s
通道: 1 to 4



名称: M4x.22xx
类型: PXIe x4 with 8-bit
速度: 1.25 GS/s to 5 GS/s
通道: 1 to 4



名称: M4i.22xx
类型: PCIe x8 with 8-bit
速度: 1.25 GS/s to 5 GS/s
通道: 1 to 4



名称: DN2.xxx
类型: LXI-Ethernet with 8 to 16-bit
速度: 5 kS/s to 5 GS/s
通道: 2 to 16



名称: DN6.xxx
类型: LXI-Ethernet with 8 to 16-bit
速度: 5 kS/s to 5 GS/s
通道: 12 to 48



30年
SPECTRUM
INSTRUMENTATION

完美适配 – 模块化设计的解决方案

耗的软性表面等)。为了把此方案应用于可穿戴波束赋形设备,我们将2.4GHz设置为工作频率。和其他加了AMC的天线相比,本结构的整体尺寸较小。它具备四个波束,即使位于PEC表面附近时也几乎不发生变化。本方法已经由全波仿真、还有 S_{11} 及远场分布的测量结果得到了验证。

基于AMC的偶极子元件和阵列

为了说明AMC的优势,我们针对三种不同的边界条件,对一块FR-4基板上的偶极天线进行了实验。基板厚度为1mm,相对介电常数4.3,切向损耗为0.02。图1显示:“常规”(基板无附加物)情况下在2.4GHz处呈锐谐振,且具有全向辐射分布;装载PEC后, S_{11} 及远场辐射分布都显著降低;通过用PMC来替换偶极天线的底部边界,可改善其位于PEC附近时的 S_{11} 曲线及辐射分布。为了用PMC来实现AMC,我们必须制造一个可在目标频段上工作的AMC。

Khattak和S. Kahng¹²提出了一种基于薄型AMC的偶极子,即使在非常靠近人体皮肤表面的情况下,也能实现良好的阻抗匹配、足够的天线增益以及较低的比吸收率。我们采用了这种方案作为阵列天线的基础;但对于平面阵列应用来说,这种几何形状并不合适,因为它是利用同轴电缆进行馈电的。为了能对偶极子进行馈电,我们需要一个传输线巴伦。该巴伦具有同相和异相(180度)通路,必须仔细进行配置,以避免影响位于天线下方的AMC的预期特性。

图2对比了直角巴伦的形态和常规设计。如果阵列元件横向对齐,那么印刷偶极子应当垂直于阵列的轴,所以常规布局就不合适了(图2a)。我们采用电磁(EM)仿真器进行最优化来确定设计。如图3所示,该结构将输入射频能量平均分配给目标频率下具有180度相位差的两条通路。与传统的巴伦不同,弯曲架构可为天线单元馈电,同时对AMC影响达到最小。

图4进一步展示了该结构的细节。直角巴伦位于金属带延伸的接地平面上,对印刷偶极子进行馈电。互补开口谐振环位于1mm厚的FR-4基板上,巴伦经过其旁边而不交叠,从而不造成干扰。该设计比传统巴伦更复杂,因为主通路和耦合通路的90度弯曲使得阻抗匹配变得困难。两条馈线之间为避免螺旋相交而留的小间隙也会影响阻抗匹配。2.4GHz谐振时的几何参数有 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 、 l_6 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 、 l_{sub} 、 w_{sub} 、 l_{tot} 、 w_{tot} 、 gap 、 w_1 以及 w_2 ,分别等于10、15、18、24、

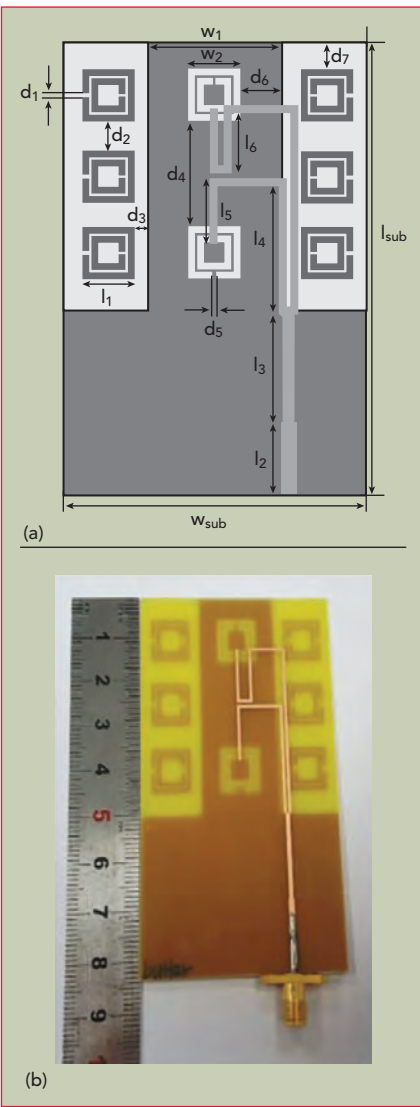


图4: 基于AMC的巴伦偶极子设计图(a)及天线成品(b)。

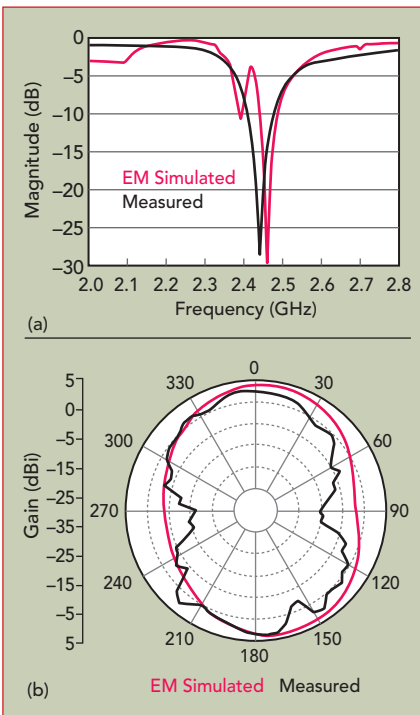


图5: 元天线的 $|S_{11}|$ (a) 和E面远场图(b)。

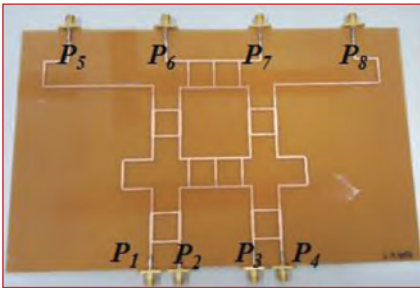


图6: 用于波束赋形的Butler矩阵成品图。

表1					
Butler 矩阵输入端口功率分布及相位关系的测量结果					
Relationship		Port 5	Port 6	Port 7	Port 8
Port 1	Mag (dB)	-8.39	-9.32	-8.15	-9.47
	Phase (°)	42.6	104	145	-166
Port 2	Mag (dB)	-8.19	-8.29	-9.33	-8.9
	Phase (°)	-32	-170	40.8	-73.1
Port 3	Mag (dB)	-8.75	-9.15	-8.32	-8.29
	Phase (°)	-74.7	40.7	-166	-30.7
Port 4	Mag (dB)	-9.02	-8.12	-9.88	-8.37
	Phase (°)	-163	150	111	43.5

12、12.2、1、15、2.5、20、1、5、17.5、83.2、50、240、265、65、20和10mm。具备这样结构尺寸的元天线的性能如图5所示。

尽管巴伦存在不连续性,但在目标

谐振频率2.4GHz上阻抗仍能匹配。EM仿真和实测结果非常吻合。天线增益接近2.5dBi,同时具有适合阵列合成的宽波束。不过辐射方向图的测量与仿真结果略有出入。



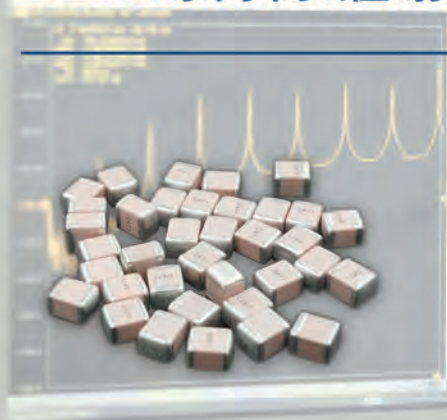
Dalicap

DALICAP TECH. CORPORATION
达利凯普科技有限公司

大连达利凯普科技有限公司

射频微波瓷介电容器专业制造商

DLC70系列 高Q值 射频微波多层瓷介电容器



产品特点:

- ✓ 高Q值
- ✓ 高射频功率
- ✓ 超低ESR/ESL
- ✓ 低噪声
- ✓ 高可靠性

尺寸:

0402,0603,0505,0805,
0710,1111,2225,3838,
6040,7575,130130

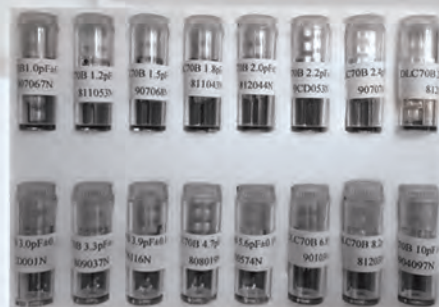
定制电容产品

- ✓ 定制电容组件包括轴向带、微带电容、功率组件电容;
- ✓ 不光可以安装常规的平面上,也可以在曲面上进行安装;
- ✓ 1111及以上尺寸产品可提供引线类型;
- ✓ 适合无磁应用



我们可以提供

- ✓ 极好的产品性能
- ✓ 快速的交货期
- ✓ 支持定制产品
- ✓ 工具箱



www.dalicap.com



dalicap@dalicap.com.cn



+86-411-87632359

Butler矩阵及天线阵列设计

Butler矩阵是一种波束赋形网络，常用于波束赋形天线。¹³ 它可以通过混合分支线耦合器、交叉网络以及移相器来实现波束赋形（图6）。表1列出了每个输入端口功率分布及相位关系的测量结果。由于FR-4基板有耗散，损耗超过了理想值；但每条通路的损耗特性是一致的，同时相位关系接近于理想Butler矩阵的情况。¹⁴ 通过在横向上重复放置单个天线单元构成一个阵列，在目标频段测得其回波损耗小于10dB（图7）。

测量结果

图8展示了集成天线阵列在良性（正常）环境下的远场辐射分布以及仿真和实测的阵列方向图。FR-4基板的耗散和不规

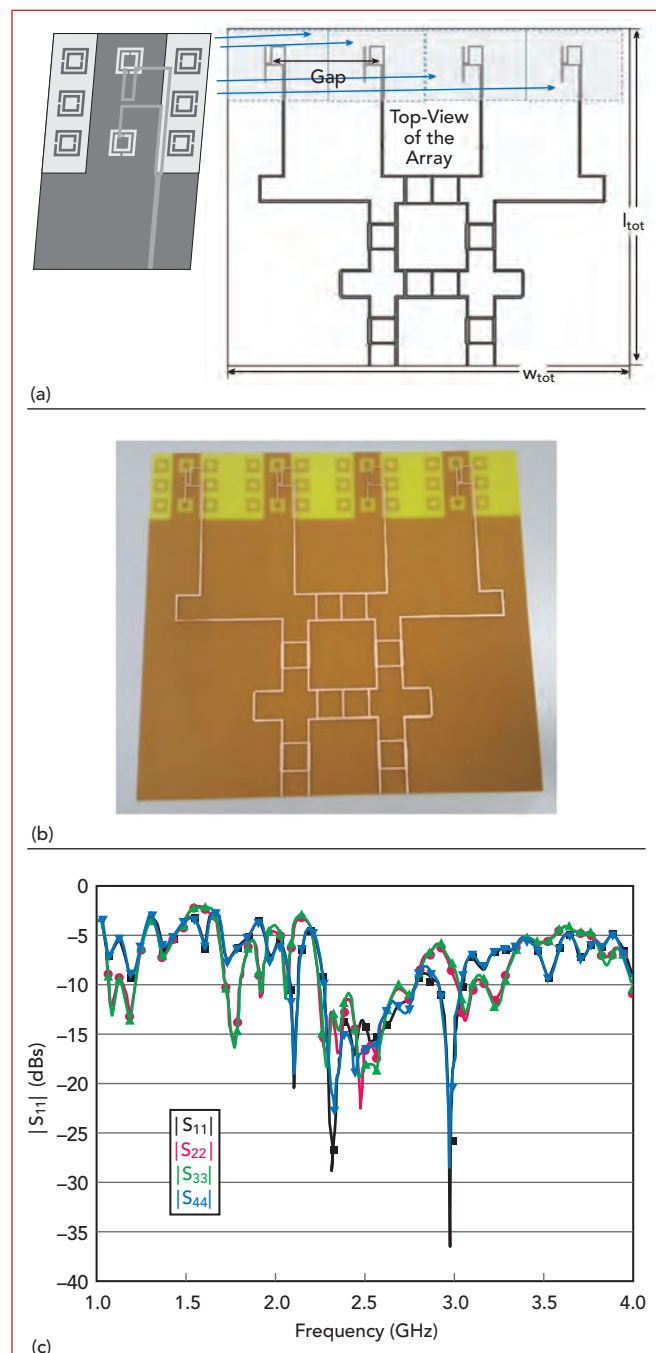


图7：基于AMC的偶极子阵列天线和Butler矩阵布局（a）、成品（b）及回波损耗测量结果（c）。

则性造成了一定的差异。

如图9a所示，金属平面的位置紧邻装有AMC的偶极子天线。图9b为良性环境下四个不同波束，与图8c中的类似。但是，不使用AMC的偶极阵列（图9c）的测量结果截然不同，强烈影响了波束的方向性，同时还伴随有宽频带上的阻抗失配（ $|S_{11}| > -4\text{dB}$ ）。

小结

本文提出了一种新型扁平化波束赋形天线元件，采用了基于薄型AMC的偶极子和新型巴伦，对恶劣边界条件敏感度低。每四个上述元件搭配一个Butler矩阵来生成四个定向波束，而引入紧邻的金属平面几乎不会对其产生影响。■

致谢

本课题获仁川大学2015研究基金支持。感谢哈尔滨工业大学吴群教授在研究过程中相当于共同作者级别的协作建议。

参考文献

1. D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1989.
2. C. Picher, J. Anguera, A. Andujar, C. Puente and S. Kahng, "Analysis of the Human Head Interaction in Handset Antennas with Slotted Ground Planes," IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol. 54, No. 2, July 2012, pp. 35-36.
3. F. Yang, V. Demir, D. A. Elsherbeni and A. Z. Elsherbeni "Enhancement of Printed

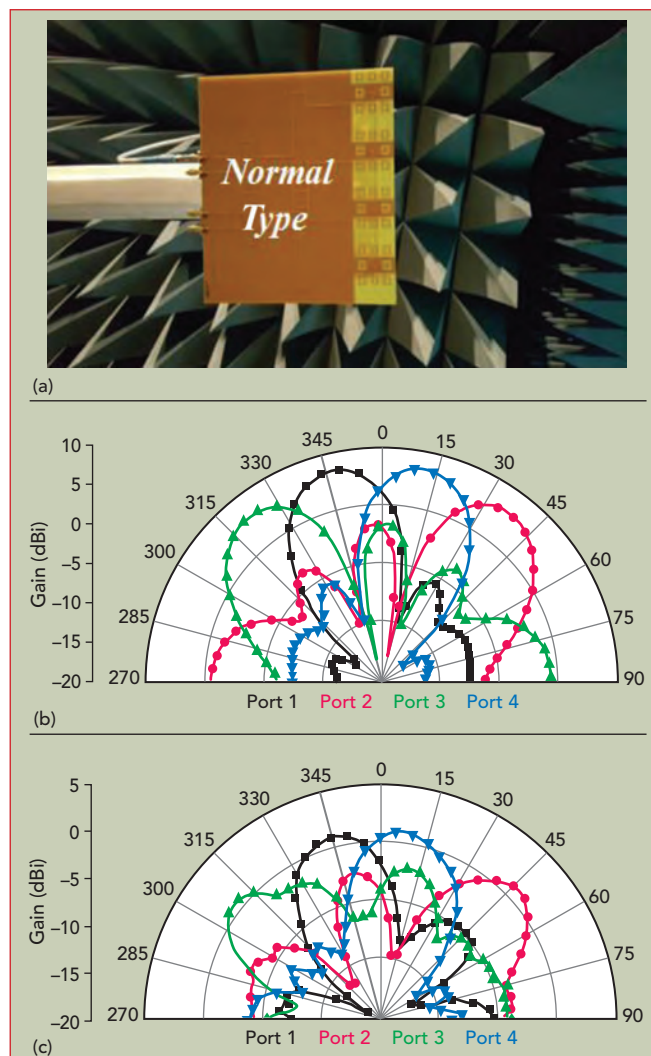


图8：基于AMC的偶极子阵列天线测量装置（a）以及远场分布图的仿真（b）和实测（c）结果。

微型 宽带 变压器 & 巴伦!



业界**最齐全**的产品选择!

- ▶ DC ~ 24 GHz
- ▶ 在非常宽的频带内具有极佳的性能一致性
- ▶ 提供MMIC, LTCC及绕线设计等各种不同的选择, 超过300多个型号常备现货!

 满足RoHS要求

Mini-Circuits...我们重新定义价值所在!

 **Mini-Circuits®**
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址: 福建省福州市349信箱 邮编: 350003
全国免费服务热线: 400-887-3088 传真: 0591-87870011
E-mail: sales@mitron.cn 网址: www.mitron.cn



IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

Dipole Antennas Characteristics Using Semi- EBG Ground Plane,” Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 20, No. 8, 2006, pp. 993–1006.

4. M. R. Abkenar and P. Rezaei, “Design of a Novel EBG Structure and its Application for Improving Performance of a Low Profile Antenna,” Proceedings of the 19th Iranian Conference on Electrical Engineering, May, 2011.
5. M. R. Abkenar and P. Rezaei, “EBG Structures Properties and Their Applications to Improve Radiation of a Low Profile Antenna,” Journal of Information Systems and Telecommunication, Vol. 1, No. 4, October-December 2013, pp. 251–259.
6. S.H. Kim, D. J. Kim, J. Y. Lee, B. H. Shin and J. H. Jang, “Dual-Band Printed Monopole Antenna with 1-D EBG Ground Plane,” Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, September 2011.
7. M. A. Shahvarpour and C. Caloz, “Radiation Efficiency Enhancement of a Horizontal Dipole on an Electrically Thick Substrate by a PMC Ground Plane,” URSI International Symposium on Antennas and Propagation Proceedings, August 2011. H. Ayad, A. Khalil, M. Fadlallah, F. Dagijimana and J. Jomaah, “Compact Low Profile Antenna Based on MSRR-AMC Reflector,” Proceedings of the 5th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communication, October 2013.
8. P. J. Soh, S. Yan and G. A. E. Vandenbosch, “SAR Mitigation of Textile Antenna via an Artificial Magnetic Conductor (AMC) Plane,” Proceedings of the 1st URSI Atlantic Radio Science Conference, May 2015.
9. M. Abu, M. K. A. Rahim, M. K. Suaidi, I. M. Ibrahim and N. M. Nor, “The Performance Comparison of Printed Dipole Antenna with Two Different Structures of AMC Ground Plane,” IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings, December 2011.
10. R. C. Hadarig, M. E. De Cos and F. Las-Heras, “UHF Dipole-AMC Combination for RFID Applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 12, August 2013, pp. 1041–1044.

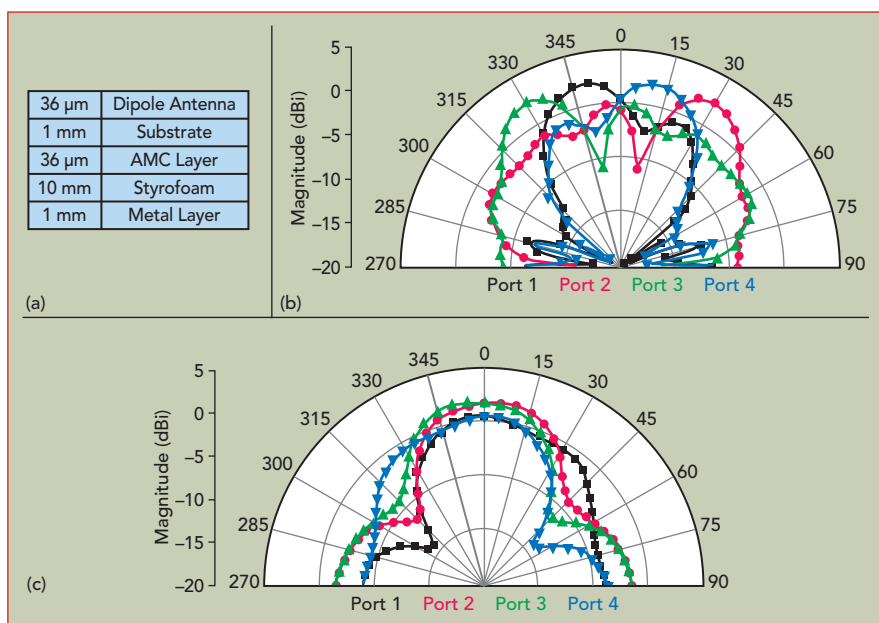


图9：用来测定阵列对附近金属平面灵敏度的配置参数 (a)、四个定向波束的分布图 (b) 以及不使用AMC的阵列 (c)。

11. M. K. Khattak, and S. Kahng, “A Novel Dipole Antenna Backed by a Thin and Small-Area AMC for Good Impedance Match and Low SAR on Human Tissue,” Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 30, No. 12, July 2016, pp. 1591–1602.
12. S. Yamamoto, S. Hirokawa and M. Ando, “A Beam Switching Slot Array with a 4-Way Butler Matrix

Installed in a Single Layer Post-Wall Waveguide,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 2002.

13. J. Butler and R. Lowe, “Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas,” Electronic Design, Vol. 9, April 1961, pp. 170–173.



Ducommun

射频开关解决方案 从直流到110GHz



30MHz至110GHz PIN二极管

- 单刀单掷、单刀双掷
- 单刀4掷、单刀6掷、单刀8掷
- 宽带、窄带
- 高功率



DC至46GHz同轴开关

- 单刀双掷、转换
- 单刀3掷–单刀10掷
- 非端接和端接
- 50 Ω 和75 Ω 阻抗



Ducommun供应开关矩阵解决方案!

www.ducommun.com/engineeredolutions/rfproducts

欲获取更多信息, 请联系我们的销售团队: 001-310-513-7233或 rfsales@ducommun.com

用于 WiFi 6E 测试的 高精度巴特勒矩阵

- 单个型号支持全部 WiFi 6E 频段
- 同时针对所有 WiFi 6E 频段进行优化
- 优异的相位精度、幅度平衡、幅度平坦度
- 低驻波比、低插损、高隔离度、高功率容量

2.4~7.25GHz



型 号		工作频段 (GHz)	驻波比 Max. (:1)	插入损耗* Max. (dB)	幅度平衡 Max. (dB)	幅度平坦度 Max. (dB)	相位精度 Max. (Deg)	隔离度 Min. (dB)
4x4	SA-06-51	2.4~2.5	1.4	7.3	±0.5	±0.3	±4	14
		5.18~5.83	1.5	7.7	±0.6	±0.4	±5	13
		5.9~7.25	1.5	7.8	±0.7	±0.5	±6	13
8x8	SA-06-52	2.4~2.5	1.5	11.2	±0.6	±0.4	±8	13
		5.18~5.83	1.5	11.6	±0.8	±0.5	±10	12
		5.9~7.25	1.55	11.8	±0.9	±0.7	±12	12

* 包含理论插损

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家



福州迈可博电子科技股份有限公司
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

深入洞察数字预失真系统设计

Insights Into Digital Predistortion System Design

Paul Turner,
Systems4Silicon有限公司, 英国布里斯托尔

本文提供了成功实现数字预失真 (DPD) 系统工程设计所需的深入见解, 揭穿了一些常见的误解, 并提供了真实的DPD性能示例。

近年来用于功放线性化的DPD技术性能进步在很大程度上是受到移动通信领域的需求驱动, 尤其是每一代通信标准中对更高功率效率、更高频谱效率和更高数据吞吐量持续不断的追求。3G、4G和5G等标准所采用的复杂调制方式所需要的传输线性度大大超过功率放大器单独所能提供的水平。这要求线性化技术必须能够满足相关标准规定的频谱发射和调制误差要求中对带外和带内失真水平的严格规定。

由于5G中的许多应用实例都要求很

高的调制带宽, 这类应用实例往往会导致功率放大器 (PA) 所表现出的非线性程度和复杂性增加, 这使得DPD技术在其中具有很高的实用性, 也使重点转到在功率放大器的设计中确保其非线性度在线性化器的校正能力范围内。此外, 尽管5G的调制方式频谱效率高, 但其提供的数据速率极高, 使其在传输中相对于先前的标准会大量耗能。许多无线基础设施站点的供电能力有限, 而且这些供电网络还要继续为现有的2G/3G/4G基础设施供电, 更不用说功耗所带来的环境问题。这些因素使得DPD提升5G发射机功率效率进而相应的节省资金和运营成本的能力更显重要。

移动通信行业开创的最新一代DPD解决方案现在正越来越多地应用到其他领域, 包括广播、卫星和私有移动通信等。因为它们也相继采用更复杂的线性调制技术来追求更高的频谱效率。

DPD工作原理

图1显示了一个简化的DPD系统架构。前向信号通路包括无线物理层 (PHY)、DPD、数模转换、RF上变频和目标PA, 而反馈 (或称观察) 通

路则包括RF下变频和模数转换。

用基本术语来说, DPD通过增大输入波形来补偿PA对波形的压缩。图2显示了典型的放大器压缩特性, 从中可以看出, 在该特性下, 电平为 P_{in} 的输入信号会受到1dB的输出压缩 (P_{1dB})。为了补偿压缩特性的影响需要将输入信号增大3dB, 这时输出功率就正好等于线性特性下 $P_{out (lin)}$ 所提供的功率。

图3展示了如果在当前基础上, 额外再增加0.5dB线性输出时 (即达到 $P_{out (lin)} + 0.5$) 将面临的情形。这个新的工作点需要额外增大3.5dB输入, 也就是总的输入信号增大6.5dB, 此时输出功率将恢复到线性特性所提供的功率。但是现在驱动电平增加到PA饱和点 (该点处PA的输出特性具有接近零或等于零的斜率), 并且进一步增大输入信号也不会增加输出功率。这展示了预失真器设计中的一个重要概念, 即所需的输入信号增大大量, 通常随驱动电平呈指数增长。而一般情况下并不希望PA在处于饱和或接近饱和的情况下工作。饱和状态工作对于预失真器自适应算法来说是很可能会出问题的, 并且较高的信号增大量会消耗数字系统动态范围, 从而提高相关的本底噪声。

预失真器设计中可能最常见的问题就是如何确定校正 (正向) 路径带宽。图4a显示了双音测试下PA非线性输出频谱, 仅可见三阶和五阶互调失真项 (IMD3和IMD5)。虽然非线性预失真理论不在本文的讨论范围之内, 但该理论表明要完全校正互调失真, 实际上需要如图4b所示的只含奇数阶项的无穷级数构成的校正信号¹。当然, 在任何实际系统中都没有无限的校正带宽, 因此必然需要折衷。实际上, 高于某个阶数的校正项只能带

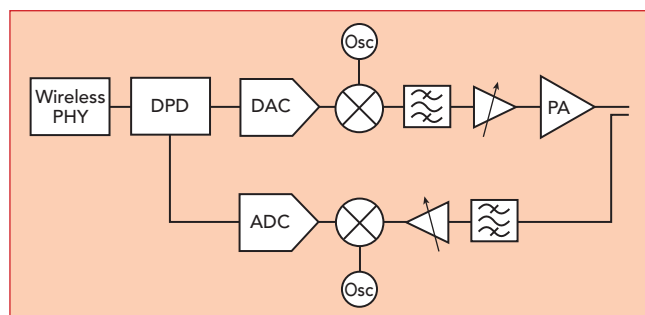


图1: 带有DPD的PA的架构。

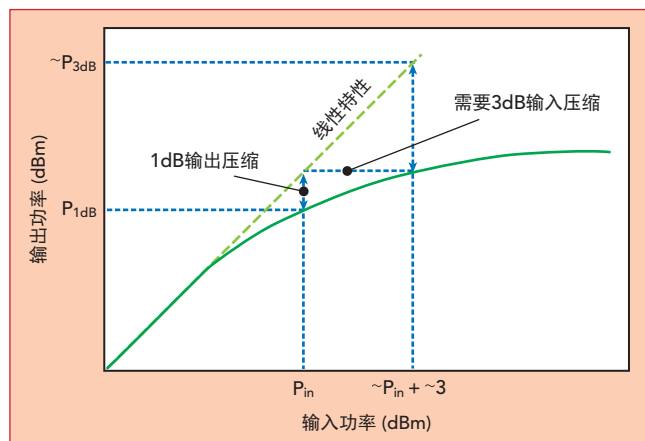


图2: PA的输入输出功率曲线, 输入 P_{in} 时PA达到1dB压缩点。

机箱式 功率放大器



20~6000MHz

25W 50W 100W

- ▶ 高增益：高达58dB
- ▶ 优异的定向性：40dB (典型值)
- ▶ 内置过温保护

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003
全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011
E-mail: sales@mitron.cn 网址: www.mitron.cn



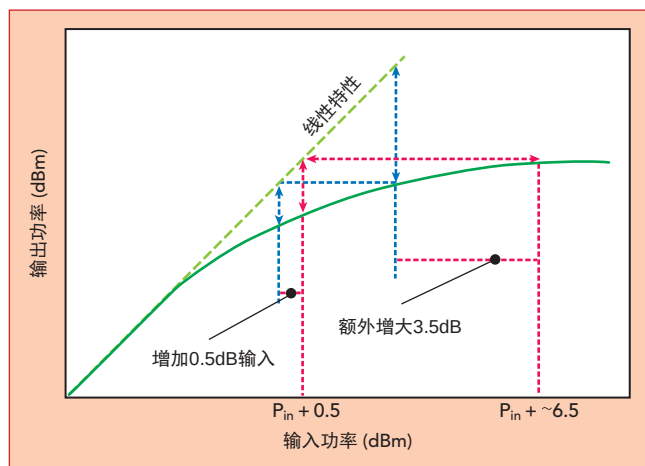


图3: PA的输入输出功率曲线, 展示了输入 $P_{in}+0.5$ dB时的情形。

来微不足道的性能提升。

图5a给出了用于宽带传输的无线线性化功率放大器输出频谱。对PA输入波形校正项级数进行截断后的影响是在输出中引入残留失真“凸点”(图5b)。选取最佳的校正带宽可将这种残余失真的程度降低, 直到其处在指标规范加适当余量范围内的程度。

基带校正带宽相对复合调制带宽的倍数会因为应用和性能要求的不同而有较大变化, 但通常为4到5倍(例如5倍时, 它可包含所有五阶预失真乘积项)。发射机的数字和模拟前向信号通道都必须保持此带宽, 才能如实地在PA输入端口实现所需的校正信号。因此对于100MHz调制带宽的系统, 则根据校正带宽使用4至5倍的准则, 从基带预失真器到PA输入端口都需要支持400至500MHz带宽。

尽管仿真在确定给定方案所需的校正带宽方面有一定的作用, 但由于该问题具有非线性半实物(硬件在环)的本质, 因此唯一能可靠确定带宽的方法是在DPD控制回路中加入PA硬件进行实验评估。对于哪种校正带宽可以达到所需的频谱发射和调制误差水平, 该方法可给出明确的答案。幸运的是, 通常可以使用现成的信号处理和无线收发机评估板来实现这一目标, 而无需承担系统原型开发的成本。

图6展示了最新一代数字预失真器可达到的性能水平。混合模式信号(4G加上2G多载波)的总瞬时带宽为40MHz。它展示了在当前成本控制的驱动下, 向共享无线基础设施方向的发展, 也展示了对任何数字预失真系统都极具挑战性的复合信号用例。Doherty功放的平均输出功率为46dBm, 图中曲线显示了启用和未启用线性化时的性能。对于这个应用情形, 三阶互调失真的性

能相比高度非线性的起点提高了30dB。值得一提的是, DPD对4G信号在线性化之前, 还明显起到对放大器增益斜率的带内均衡作用, 这是支持DPD的系统的附带好处之一。

图6显示了预失真器对带外频谱发射的作用, 而图7则显示了线性化同时带来的带内失真改善。该图显示了线性化前后64QAM载波的发射星座图。预失真器消

除了PA引入的AM-AM和AM-PM失真, 而这些失真会增加调制误差, 如图7a所示。对于该示例调制误差比提高了约6dB。

虽然DPD提高了功耗效率, 但与校正引擎、自适应处理、前向路径和反馈路径增加的带宽等相关的线性化子系统当然也会消耗额外的功率。根据传输标准、目标技术和所追求的性能水平不同, 预失真系统所消耗的功率会有很大差异。对于宽带4G/5G应用来说, 非常粗略的估计大约是3W。对于诸如小基站和MIMO等较低发射功率的应用, 应具体确定该数字以确认预失真可以带来净效率的提升(假设DPD没受到诸如频谱发射合规性等其他强制要求的影响)。

反馈路径

预失真器设计中不可避免的情况是: 反馈路径的线性度决定了可用性能的上限。由于反馈路径在控制环路内, 因此预失真器会产生一个受反馈路径非线性度影响的校正信号, 进而将其影响传递到发射输出信号上。在硬件设计阶段需要特别注意反馈路径的线性度, 包括数据转换器的线性度, 以确保不影响性能。与常规接收机设计相比, 反馈接收机信号通路的线性度比SNR(信噪比)更为重要。

类似的考虑适用于任何线性反馈路径上的失真。例如增益和相位的浮动, 如果没解决好, 它们就很可能叠加到发射信号通路上。反馈信号通路的数字线性均衡可用于减轻这种影响, 尽管单独地表征反馈接收机的响应可能很棘手。

常见的误解是反馈路径带宽应等于前向路径校正带宽。实际上反馈信号通路的设计要求是应覆盖足够的失真阶数, 以达到能构建前向通路校正信号的程度就够, 因此该反馈信号通路带宽可以小于前向通路。图8显示了两个具有相同瞬时带宽的波形。图8a中的图像包括两个窄带载波, 很明显三阶和五阶交调失真项出现在离散位置上。为了捕获五阶交调(IMD5)的信息, 反馈路径必须是瞬时带宽的5倍。在这种情况下, 反馈带宽必须等于前向通路的带宽。

现在考虑图8b中显示的一个类似噪声的宽带载波, 其失真产物是分散的, 会落在调制带宽之内和之外。如果反馈带宽小于调制带宽的5倍, 它仍然将捕获一定比例的IMD5(以及更高阶的失真项)。对于这种情况, 使用小于前向通

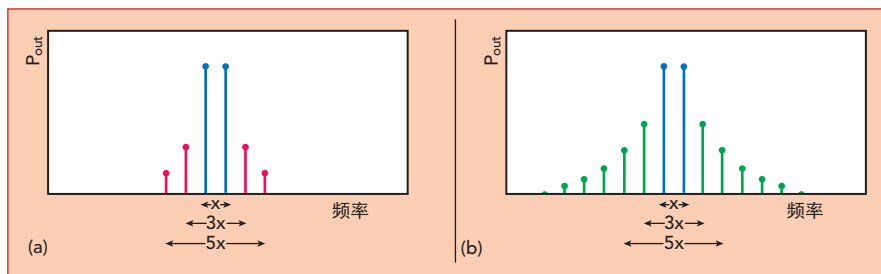


图4: 无线线性化时PA的双音测试输出频谱 (a) 以及对应的输入修正信号 (b)。

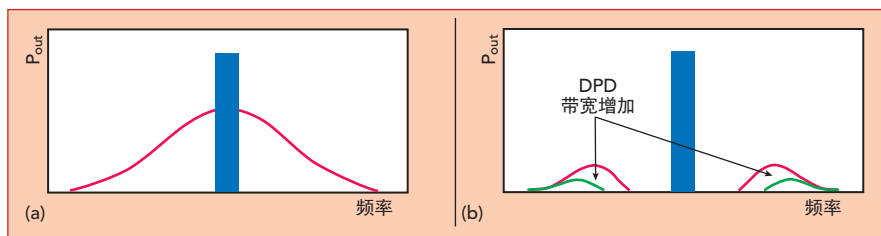


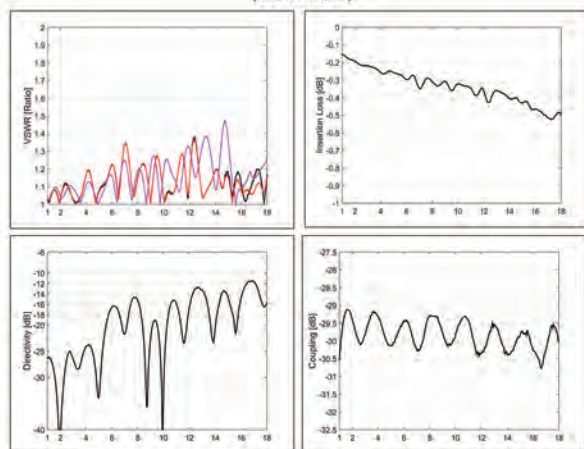
图5: 无线线性化PA的输出频谱 (a) 和有线线性化时PA的输出频谱, 显示了更大的校正带宽对频谱的改进作用 (b)。

1~18GHz 大功率定向耦合器

- 超高功率容量: 400W CW
- 优异的耦合度、平坦度、方向性, 显著提高信号采集精度
- 满足国军标 (GJB-150) 环境标准
- 低驻波、低插损, 丰富的连接器封装类型
- 提供多自由度工程定制
- 20~40dB 标称耦合度任意定制



—— 耦合器测试曲线 ——
(D30H010180)



工作频段 (GHz)	型号	耦合度 Max.(dB)	主线驻波 Max.(:1)	耦合端驻波 Max.(dB)	插入损耗* Max.(dB)	平坦度 Max.(dB)	方向性 Min.(dB)
1-18	D20H010180	20±1.2	1.5	1.6	0.8	±1	10
	D30H010180	30±1.2	1.5	1.6	0.8	±1	10
	D40H010180	40±1.2	1.5	1.6	0.8	±1	10
2-6	D20H020060	20±0.8	1.3	1.4	0.4	±0.5	15
	D30H020060	30±0.8	1.3	1.4	0.4	±0.5	15
	D40H020060	40±0.8	1.3	1.4	0.4	±0.5	15
2-8	D20H020080	20±0.8	1.4	1.4	0.4	±0.5	14
	D30H020080	30±0.8	1.4	1.4	0.4	±0.5	14
	D40H020080	40±0.8	1.4	1.4	0.4	±0.5	14
2-18	D20H020180	20±1.0	1.5	1.6	0.6	±0.8	10
	D30H020180	30±1.0	1.5	1.6	0.6	±0.8	10
	D40H020180	40±1.0	1.5	1.6	0.6	±0.8	10
6-18	D20H060180	20±1.0	1.5	1.6	0.5	±0.7	10
	D30H060180	30±1.0	1.5	1.6	0.5	±0.7	10
	D40H060180	40±1.0	1.5	1.6	0.5	±0.7	10

*包含理论耦合损耗

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家



福州迈可博电子科技股份有限公司
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

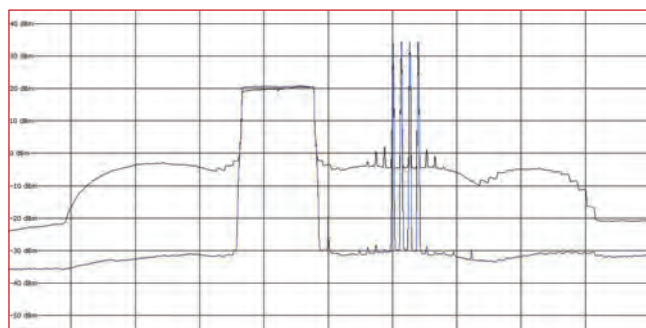


图6：4G和多载波2G信号驱动下，开启和关闭DPD线性化时Doherty功放的输出频谱。频率范围841.6到1001.6MHz。平均输出功率：46dBm。

道的反馈带宽是可能的。在实践中，应根据试验来设计反馈路径带宽，因为受限带宽可以减少算法收敛时间，这可能是也可能不是设计考虑因素之一。

性能优化

为了从数字预失真器获得最佳性能，必须考虑和解决硬件缺陷和非理想情况（不仅是PA的非线性），否则它们会降低校正水平。模拟信号正向和反馈通路上增益和相位斜率不平坦度、本地振荡器相位噪声、直接转换增益和相位不平衡度、载波泄漏、PA增益浮动和控

性。

值得特别注意的是放大器的记忆效应，也就是PA输出是当前输入信号及其过去历史信号的函数。记忆效应的来源多样，包括²：

- 在整个调制带宽内，增益随频率变化。
- 晶体管电源变化（例如，漏极电路在调制频率下的非理想响应）。
- 热效应：器件结温变化会改变调制包络频率下的非线性特性。
- 电荷陷阱效应。所有的半导体材料和界面都倾向于捕获并随后在晶

制环路时序变化都会降低性能。更复杂的DPD解决方案会结合多个子系统来纠正这当中大多数（如果不是全部）的非理想特性。确实，预失真器设计成败的最大挑战之一就是协调这些校正子系统的工作，以避免它们之间的不利相互作用，并使主要的非线性校正引擎仅作用于PA的非线

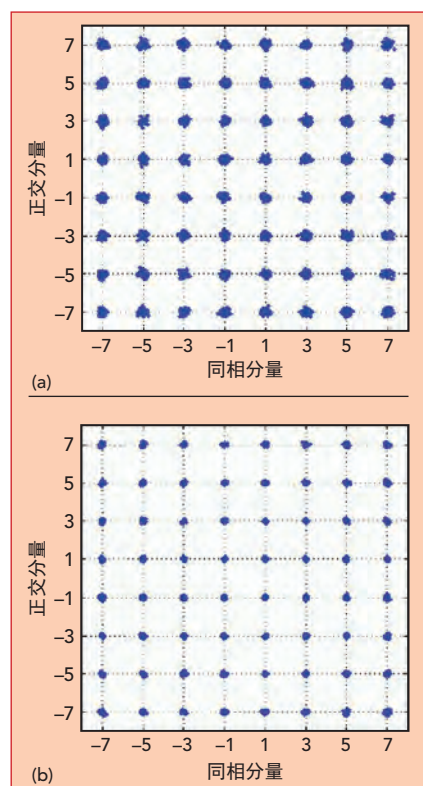


图7：64QAM调制的星座图，在线性化前（MER=33.1dB）（a）和线性化后（MER=39dB）的对比。

smiths interconnect

史密斯英特康推出新款板级陶瓷基厚膜射频滤波器——小身材提供卓越性能



随着科技的日益发展，用于无线通讯系统的射频元器件市场正急速扩张。史密斯英特康最新发布的Planar X系列射频滤波器解决方案利用现有的厚膜处理技术设计应用于要求高可靠性的严苛环境中的各类介电基板设计，提供了一种经济高效的解决方案。

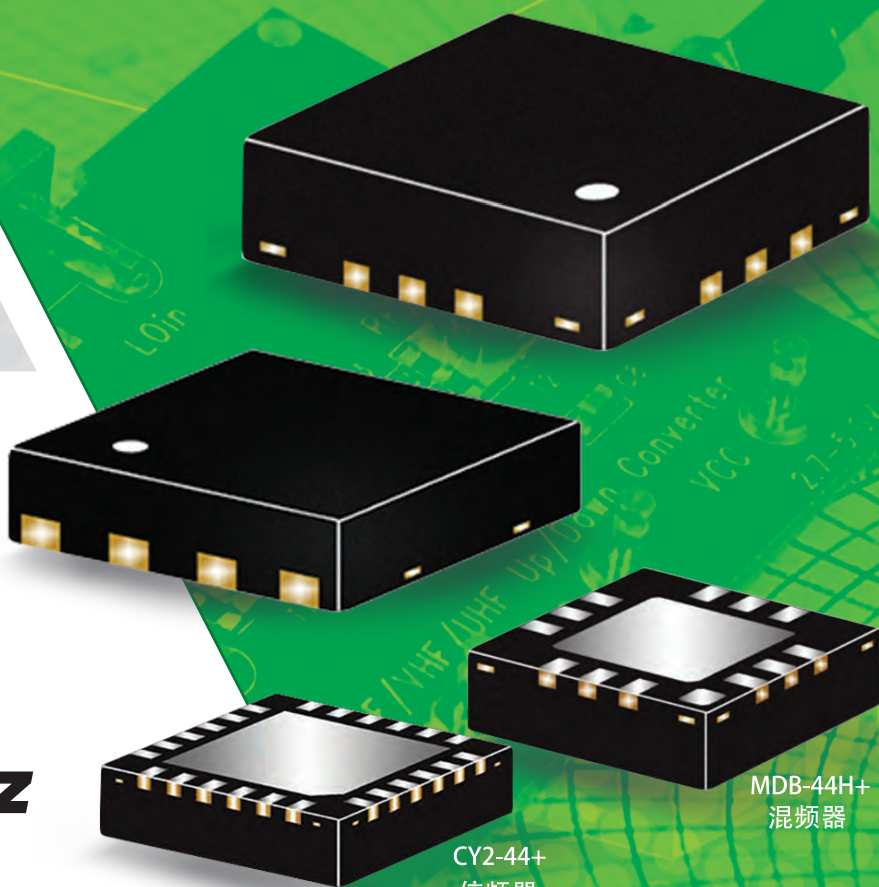
Planar X系列射频滤波器解决方案具备带通、带阻、低通和高达18GHz（Ku波段）的高通配置。该产品体积小，重量轻，以及可表面贴装的性能优势使其能够满足大规模贴片封装应用，是卫星通讯、雷达和广播行业应用的理想选择。

- 封装面积小——可减少PCB封装面积
- 重量轻——可降低航空航天关键应用中的整体系统重量
- 极佳的抑制特性——可提供卓越的射频性能
- 可表面贴装——是贴片封装应用的理想选择
- 采用坚固耐用的材料——适用于严苛应用环境
- 频率高达18GHz——适用于广泛的应用领域



联系我们：
www.smithsinterconnect.cn
asiainfo@smithsconnectors.com

MMIC混频器 & 倍频器



高达 **40 GHz**

- ▶ 完美适配5G系统的频率变换
- ▶ 低变频损耗和优异的谐波抑制
- ▶ 可提供 3×3mm QFN封装及裸芯片

MDB-44H+
混频器

CY2-44+
倍频器

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

 **Mini-Circuits®**
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国
总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003
全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011
E-mail: sales@mitron.cn 网址: www.mitron.cn



更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

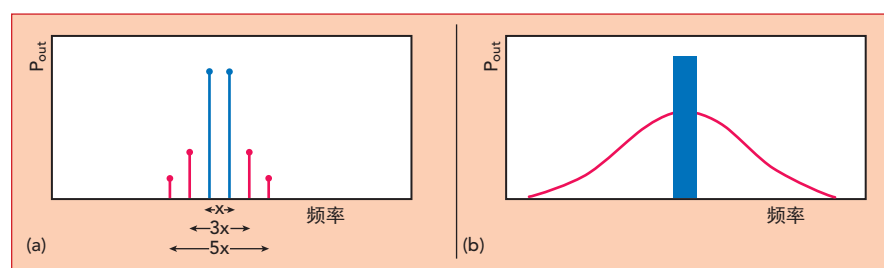


图8：双音 (a) 和宽带 (b) 情况下的交调失真频谱。

晶体管沟道内发射电荷（空穴和电子），从而导致电流的变化不仅取决于瞬时器件电压，还取决于电压信号的历史情况。与5G相关的是用于宽带发射的GaAs晶体管的日益普及。与传统的LDMOS相比，GaAs和GaIn等化合物半导体对电荷陷阱的敏感性更高。

如果硬件中出现的记忆效应超过DPD的校正能力，则线性化性能将大大降低。这正是可扩展（基于FPGA）DPD的一个优势，因为它可以通过增加校正引擎的复杂性以适应PA的记忆深度。但是这确实会消耗额外的信号处理资源，因此在可行的情况下，设计PA来最大程度地降低记忆效应是首选方法。

图9展示了预失真器形式的校正子系统的工作效果，该校正子系统具有自动抑制直接变频发射机中的模拟正交调制（AQM）增益和相位不平衡度导致的载波镜像信号的能力。显然，校正算法对AQM的本振（LO）泄漏具有较高的抑制能力。最好的DPD系统具有对前向和观察通路相关的载波镜像和LO泄漏独立校正的能力，从而防止将观察通路校正信号强加到发送通路的输出信号上。

在将辅助数字校正引擎放置在前向通路中时需要格外小心，因为系统的非

线性意味着校正可能并不能简单叠加。例如上述旨在解决AQM缺陷的补偿器应位于预失真器之后，而不是之前，以确保补偿后的校正信号不受非线性影响。

最新一代的设计精巧的预失真器可以通过反馈路径形成的控制环路提供线性化以外的系统优势。除了线性均衡、载波镜像和LO抑制等上述示例外，DPD还可以集成对PA增益随温度变化进行补偿的功能。此外，在诸如波束成形或MIMO之类的多发射机应用中，还可以设置在每个发射链相关联的预失真器之间切换的公共反馈路径，从而实现信道之间的增益和相位对准。

峰值因数降低

像DPD一样，峰值因数降低（CFR）也可以提高PA效率。因此在这里值得简要概述。CFR改变输入信号以降低其峰均功率比（PAPR），从而以提高带内调制误差（仍然在系统要求范围内）为代价换来信号峰值功率电平降低。由于功率放大器的峰值功率处理能力是固定的，因此峰均比值降低意味着可以在更高的平均功率水平下工作，从而提高功放效率。CFR不可避免的需要了解底层的传输标准和载波配置。

CFR的功能在图10中进行了展示，其中显示了仿真得出的64QAM卫星承载系统中CFR配置为以10⁻⁵的概率

提供5dB PAPR时的互补累积分布函数（CCDF）。当代系统中采用的类似噪声的线性调制信号具有很高的PAPR，而CFR可以为其提供超过5dB的峰值降低，从而能显著提高效率。

相比之下，DPD则是通过提供一定程度的PA线性度来提高效率，否则线性度的要求将使得PA在大幅功率回退下使用或指标过度提高，从而对功放晶体管的尺寸和成本产生不利影响。与CFR相比，DPD更无需关心底层的调制方式，并且可以在不了解特定传输标准的情况下从所施加的复合信号的特性中得出校正信号。CFR和DPD是独立但又互补的技术，可以一起使用或单独使用。

总结

很重要的是要认识到一个事实，DPD系统设计是预失真器（还有CFR，如果使用了的话）、射频平台以及尤其重要的PA之间的协同设计工作。虽然最新一代的DPD能纠正复杂的非线性和硬件缺陷，但它消耗的数字资源（FPGA或ASIC存储器、寄存器和乘法器）也可能代价高昂。因此设计中希望将PA特性（例如记忆效应）保持在预失真器的校正能力范围内。也应避免PA在最大预期信号驱动电平处出现饱和，因为预失真器内的信号增大无法补偿饱和情况下的非线性。采用线性功率放大器不是必要的，但功放应设计为能处理输入峰值功率。如果采用了CFR技术，则它将决定该峰值功率大小。将该技术应用于专门被设计为可线性化（即考虑了DPD系统设计）的功率放大器而不是任意一款放大器时，可获得最佳效果。■

参考文献

1. S. Cripps, "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design," Artech House, 2002, pp. 153-162.
2. J. Vuolevi and T. Rahkonen, "Distortion in RF Amplifiers," Artech House, 2003, pp. 43-68.

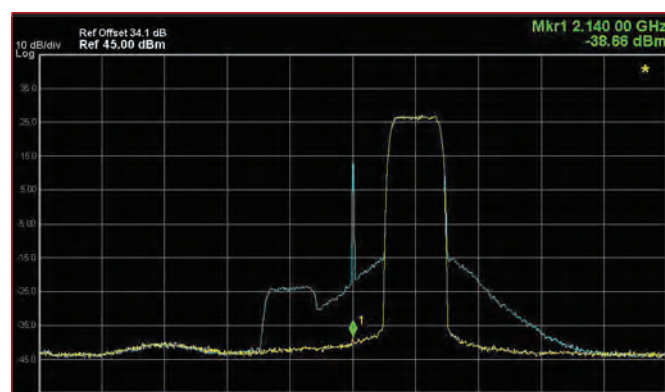
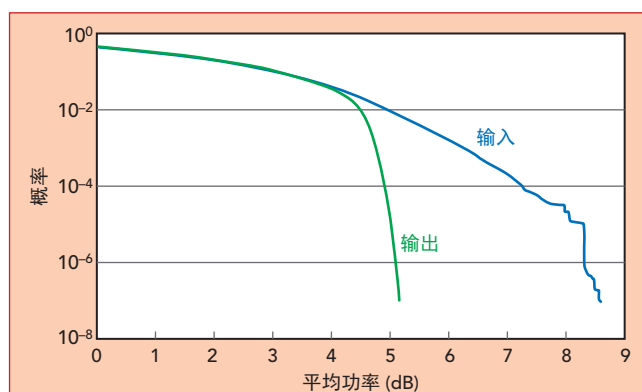


图9：DPD对载波镜像和本振泄漏的抑制。


 图10：CCDF图显示出64QAM信号（输入）采用CFR后（输出），在10⁻⁵概率处达到了5dB的PAPR值。

可编程衰减器

新
40GHz

现在高达**40GHz**!

- ▶ 衰减范围高达120dB
- ▶ 步进小至0.25dB
- ▶ 单通道和多通道型号可选
- ▶ USB,以太网,RS232和SPI控制选项

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.

Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址: 福建省福州市349信箱 邮编: 350003
全国免费服务热线: 400-887-3088 传真: 0591-87870011
E-mail: sales@mitron.cn 网址: www.mitron.cn



更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

面向毫米波产品大规模生产的先进ATE架构

Advancing ATE Strategy For mmWave Mass Market Production

Mark Roos,
Roos Instruments, Santa Clara, Calif.

自动化测试和测量 (ATE) 领域正在迅速变化和发展, 超越了传统台式和大多数现有 ATE 系统的能力。现代蜂窝结构 (5G)、物联网 (IoT) 设备和最新的功能密集的片上系统/系统级封装 (SoC/SiP) 所需的性能、测试速度和频率千差万别, 因此有必要采用不同的方法。这就要充分利用模块化配置, 它占地面积小、资本支出低、校准精确、器件连接损耗低、测量精度高。模块化结构可以提供能适应未来的功能, 使 ATE 系统能在较少升级的情况下提供更快的速度和更高的准确度。然而, 并不是所有模块化 ATE 系统都相同。在毫米波频率下, 测试系统的配置需要深入了解 ATE 系统之间的不同功能以及它们通常替换的台式仪器。

在过去几年中, 毫米波设备的自动化测试受到越来越复杂的标准、方法和需求的制约。随着第五代蜂窝移动 (5G)、物联网 (IoT) 和片上系统 (SoC) 技术的不断进步, 这一趋势可能会加剧。目前的毫米波自动化测试依赖专用测试 (台式) 仪器或用户针对某类型器件、标准或规范集定制设计/开发的 ATE。

这是一个技术快速发展、标准不断变化、主流应用使用微波高频段和毫米波频段的时代 (图1)。通用台式仪器或定制/专用 ATE 系统不太可能满足新的需求。因此, 选择生产测试设备的工程团队必须注意当前和未来的需求。不能因为复杂配置和优化的需求, 冒险购买可能很快过时或价值递减的属于固定资产的设备。目前, 需要模块化测试系统能够很好地覆盖毫米波频段, 支持多域同步测试, 具有基于软件的可配置性, 并且能够适应现代蜂窝、Wi-Fi、

物联网和其他新兴技术的标准变化。

趋势与挑战

导致毫米波产品测试需求增长的新兴设备趋势是: 大量设备以更高的频率 (接近 100GHz) 工作, 带宽达到几百 MHz 到 GHz, 更复杂和可配置的射频设备具有多个射频集成电路, 以及需要同时和同步混合域 (功率、射频、模拟和数字) 测量和信号生成的测试场景。最初的 5G 用户设备 (UE) 和客户前端设备能够在所有 4G 频段、新的 5G sub-6GHz 频段 (FR1) 和新的 5G 毫米波频段 (FR2) 中工作, 在美国, 这些频段还包括 50GHz 以上的频率 (见表1)。这些设备通常由高度集成和紧密组装的数字、射频、模拟和电源设备组成, 其设计和操作取决于未来几年标准的变化。

5G 以及毫米波 Wi-Fi (802.11ad) 驱动测试

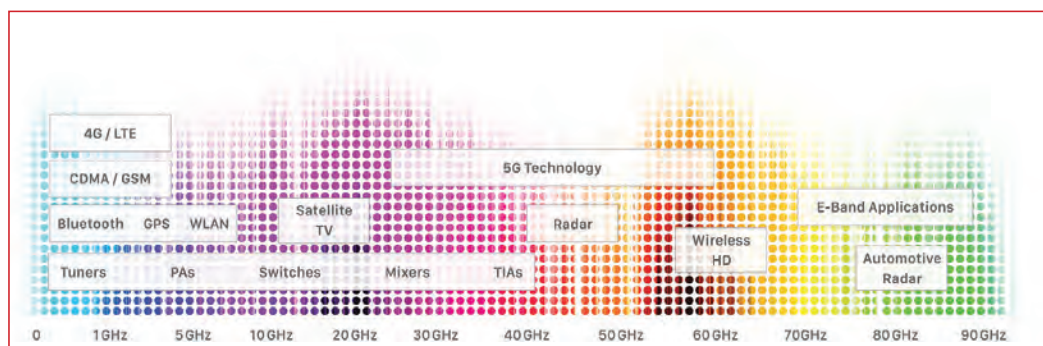


图1: 频谱应用划分。

‘顶尖’的工艺技术 带给您性能卓越的半柔电缆组件

特点

- 接头防扭设计，安装时不易损坏
- 超精密加工组装，极低驻波比
1.25:1@18GHz; 1.30:1@26.5GHz
1.35:1@40GHz; 1.40:1@50GHz
- .047, .086和.141各种规格
- SMA弯头频率可达26.5GHz

DC~50GHz

应用

- 替代半刚电缆组件
- 各种模块/设备间的射频连接
- 各种商用军用无线电接收发射设备

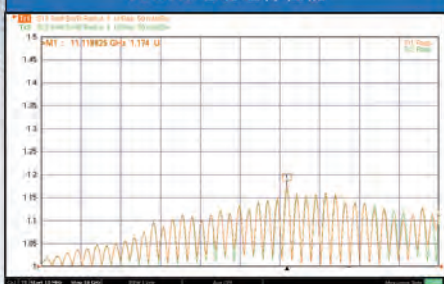
可选连接器

.047"	SMA (26.5GHz), 2.92mm (40GHz), SMP(40GHz), SSMP(40GHz), MCX(12GHz)
.086"	SMA (26.5GHz), 2.92mm (40GHz), 2.4mm (50GHz), SMP(40GHz)
.141"	SMA (26.5GHz), N (18GHz)

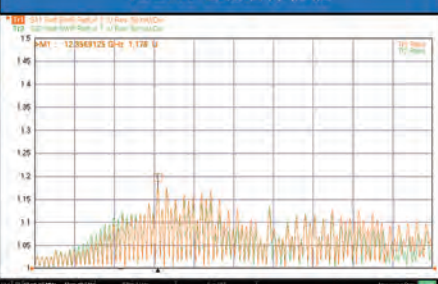
1天~1周内发货

现货销售

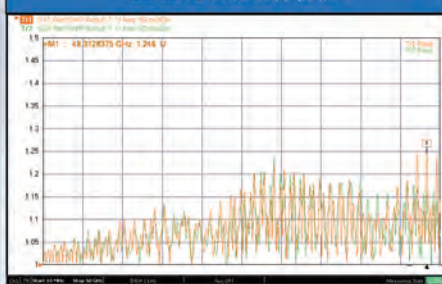
18GHz电缆组件性能



40GHz电缆组件性能



50GHz电缆组件性能



迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家



福州迈可博电子科技股份有限公司
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

表 1 5G 参数		
	Frequency Range 1 (FR1)	Frequency Range 2 (FR2)
Known As	Sub-6 GHz	mmWave
Frequency Range (U.S.)	450 MHz to 6 GHz	24.25 to 52.6 GHz
Duplex Mode	FDD, TDD	TDD
Subcarrier Spacing	15, 30, 60 kHz	60, 120 kHz
Bandwidth	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 MHz	50, 100, 200, 400 MHz
MIMO	Downlink: 8 x 8; Uplink: 4 x 4	Downlink: 2 x 2; Uplink: 2 x 2
MIMO Method	Spatial Multiplexing for Higher Throughput	Beamforming for Better SNR
Radio Frame Duration	10 ms	
Subframe Duration	1 ms	
Modulation	$\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	$\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Access	Downlink: CP-OFDM, Uplink: CP-OFDM, DFT-s-OFDM	
Carrier Aggregation	16 Carriers Maximum	
Channel Coding	Polar, LDPC Codes	

复杂度和其他功能的提升，如多输入多输出（MIMO）、波束赋形和载波聚合（CA）导致天线系统能够产生几乎无限数量的测试用例和频带组合（3GPP R15 版包含了600多个载波聚合组合）²。这对研发表征、质量和验证测试提出了挑战，因为在一个面对激烈竞争而不断压低利润的行业中，没有太大的空间进行长时间和复杂的测试。为了防止早期5G产品和服务受到负面影响，电信业和UE制造商还必须意识到市场对设备故障的低容忍，这突显了需要进行严格的测试和表征。

Wi-Fi（802.11ad、802.11ax）和5G挑战

最新的高吞吐量和高度复杂的SoC/SiP采用了各种类型的内置自测试和测试序列自动化，以帮助芯片级测试和制造验证。在某些情况下，这些测试速度很快，有些测试在数百微秒内完成。为了使射频测试设备跟上步伐，设备的配置时间必须与这些窗口相匹配或超过这些窗口。多域测试，以及直接电路测试和空口测试（OTA）必须与同步测试设备同时进行。例如，具有Wi-Fi、蓝牙、3G/4G/5G FR1蜂窝式和近场通信模块的蜂窝式手机可能需要OTA和直流探针来测试系统间干扰，这是由新的CA技术（其可以同时使用多个蜂窝频带）组合而成的。

宽动态范围和频率范围的OTA测试对于描述和验证MIMO/波束赋形天线系统也是必不可少的。在必须检查每个天线单元的情况下，需要高动态范围来确定每个单元的性能，特别是当某些单元可能表现出比其有缺陷的相邻单元更高的信号功率水平时。如果不直接测试每个天线单元，就不可能发现有缺陷的单元。对于即将到来的64×64 MIMO 5G基站天线系统，由于所需时间、成本和设

置复杂性，该测试可能并不可行。为了测试大量的系统，测试的可重复性和优化对于5G UE和基站既经济又可靠地运行至关重要。

产品测试新时代

此前，毫米波领域一直由政府 and 军方主导，用于雷达和卫星通信，并提供少量商业回传产品。毫米波产品历来成本高、体积小，可以使用传统的台式设备进行手动测试（图2a）。高容量和低成本的消费市场传统上保持在6 GHz以下。ATE系统在低于6 GHz的范围内发展，以满足消费者产品快速、低成本的测试需求。现在，毫米波正进入批量生产阶段，快速低成本测试的需求不断增长，并且这些测试需要达到之前无法实现的高精度。

产线ATE系统通常也提供对测试设备射频组件的更精细控制，这之前只有一些台式设备提供这种控制并且通常需要定制化的配置。由于毫米波测试的严格要求，需要引入新的方案，主流测试和测量设备制造商主要集中在大尺寸一体化台式仪器或高度集成和有限的现场便携式测试仪器上，经常忽略或不能发现新的方案。

因此，越来越多的测试设备制造商开始制造模块化的测试设备平台，这些平台的组件可以通过多种方式配置，以满足独特的测试需求（图2b）。这些测试侧重于6 GHz以下的技术，以满足有低成本和可配置要求的研发、专业化和生产测试场景。通用模块化测试仪器通常需要定制配置和编程来构建可行的平台，并且通常不能提供与传统台式仪器

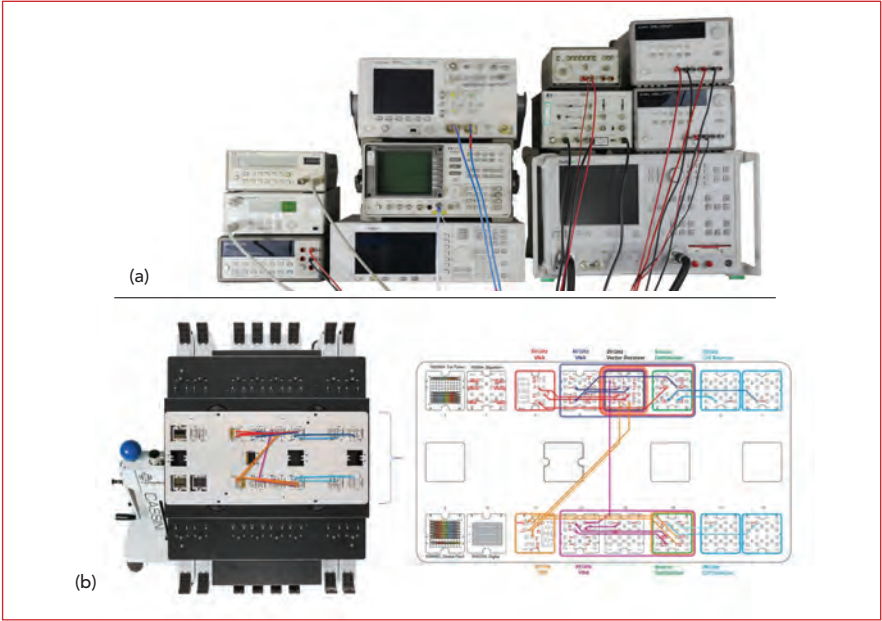


图2：传统台式测试系统（a）和模块化生产测试系统（b）。

无源器件



现在！
频率高达

65 GHz

转接头 • 衰减器 • 耦合器

隔直器 • 功分器 • 负载

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

 **Mini-Circuits®**
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.

Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址：福建省福州市349信箱

全国免费服务热线：400-887-3088

E-mail: sales@mitron.cn

邮编：350003

传真：0591-87870011

网址：www.mitron.cn



更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

IFIRF MICROWAVE COMPONENTS

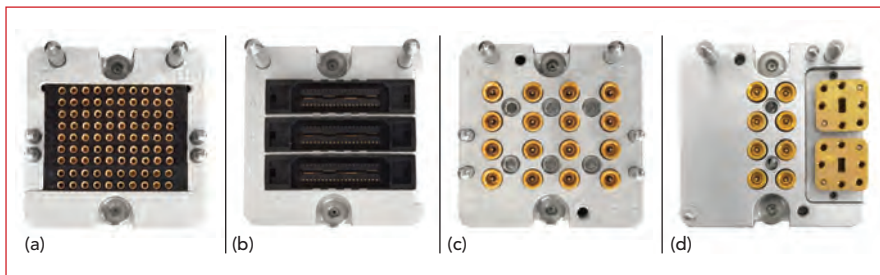


图3: 模块化接口混合域电源 (a)、数字 (b)、射频/模拟 (c) 和毫米波 (d)。

相同的性能和可靠性水平。

毫米波模块化ATE特性

射频测试经常遇到与频率相关的现象,其中一些成为毫米波频率下设计测试系统的主要挑战。没有考虑到这些因素的测试系统可能不太准确,甚至可能在高于几GHz时产生误导性或不一致的结果。其中一些现象驱动着机械/电气(物理)测试系统的设计,而另一些则影响着测试系统的架构。

互连、探针、匹配和损耗

在毫米波频率下,金属的导电性随频率的升高而降低,绝缘体的介电损耗增加。此外,毫米波信号较小的波长会与几何结构相互作用,而在较低频率下几乎没有影响。例如,1 GHz时,空气中四分之一波长为75毫米,而80 GHz时,空气中四分之一波长小于1毫米;因此,在较低频率下能正常工作的连接器不能应用到毫米波。

这些现象揭示了毫米波通过传输线的插入损耗更大、连接器中的衰减更大、互连的匹配性更差、传输线之间的连接对失调的容忍度更低。这就是为什么在许多情况下,波导互连对于毫米波应用是必要的,因为与同轴传输形式相比,波导中的损耗和失配要少得多。通过将ATE系统尽可能靠近被测设备(DUT)来尽可能缩短传输线长度也很重要。

对于毫米波频率,最后几厘米的微带/带状传输线通常与集成电路板一起使用。波导虽然在电气方面优越,但也有其自身的机械问题。它是刚性的,连接器物理尺寸较大。例如,通常在60至90 GHz之间使用的UG387/u法兰的直径接近20 mm。某些设备在单个组件上可以有多达24个毫米波端口。在连接面板放置24个波

导端口是不可能的。一些制造商正在创建自定义的小型法兰接口,以解决法兰问题。人们开发了薄壁可共形的波导专利技术,以尽量减少布线的挑战,且不牺牲高频性能。图2b给出了一个具有可配置混合信号接口的模块化测试系统。图3是混合信号连接器的特写图。

基于矢量的毫米波精确校准技术

在较高频率下出现的与频率相关的性能退化也会影响测试系统架构和校准。测试精度取决于确保校准平面延伸至DUT平面,即互连和相关寄生的影响是测试环境的一部分^{3,4}。

在生产中,测试仪器和被测设备之间总是有硬件接口。这可能与电缆或波导一样简单,也可能包括多个有源器件。为了精确测量,硬件必须进行校准。在较低的频率下,通常只根据仪器接口进行校准是可以接受的。然而,在毫米波频率下,如果不校准被测件,很难获得可接受的测试结果。这需要在片或夹具测试标准,通常是开路/短路/负载和矢量测量系统,以有效地从测试环境中去嵌并获得测试结果。

除了单独的仪器校准外,毫米波ATE还必须包含接口层的矢量校准以及将校准层组合成整体校准的能力。一些毫米波ATE系统提供多达三个矢量校准层。仪器、接口和探针卡(或器件接口板)有自己的校准,由系统控制器协调。

模块化仪表

夹具固定是大多数ATE系统的主要

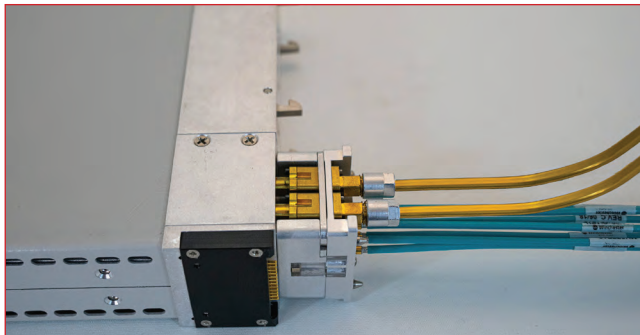


图4: 模块化盲插接口和夹具。

设计考虑因素,在毫米波频率下更为关键。在许多情况下,连接测试设备和器件的夹具和探针卡必须为每个器件单独设计。这限制了可重用性并带来可靠性和测试问题,因为需要为每个DUT设计新的探针卡。基于毫米波性能设计的模块化设备接口卡和标准化模块化夹具为高灵敏度测量提供了更好的测试系统硬件重用性以及更高的可靠性和重复性(图4)。此外,校准更容易,因为模块化设备接口可以包含在校准过程中,而无需额外的自定义校准。因此,可以对夹具和探针卡执行额外的矢量误差校准,使得系统范围的矢量误差校准能够向下到器件范围。

毫米波频率下的其他重要考虑因素包括控制能力、软件支持和测试系统优化功能。对于由台式仪器制成的机架和堆栈系统,用户可使用的灵活性和可编程性可能非常有限,即使是相对较小的变化,也可能需要与ATE制造商进行交涉。在其他情况下,完全通用的硬件和软件配置会让用户从头开始编写ATE系统测试例程。一种更现代化和用户友好的方法是提供功能广泛的图形用户界面,允许用户灵活控制,同时尽可能减少设计复杂性和用户错误的可能性。对于这些系统来说,允许自定义编程实现附加功能和自定义以满足最新标准和一致性测试也是有益的。

结论

毫米波测试正从实验室走向主流生产线。测试行业现在面临着生产环境以及高度敏感和严格的毫米波测试需求带来的挑战。模块化ATE可能是唯一能够经济地提供生产级毫米波和混合域测试的系统解决方案。随着频率的上升,5G将是ATE的最大市场之一。它迫使ATE行业在实现5G的进程中迎接测试挑战;ATE行业大部分公司将第一次涉猎高于26 GHz的频段。■

参考文献

1. M. Roos and R. Hayward, "mmWave RFIC Probing Systems for Engineering and Production Test," IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop, June 2009. Web. https://www.swtest.org/swtw_library/2009proc/PDF/S06_02_Roos_SWTW2009.pdf.
2. J. Sherry, "Testing of High Frequency 5G Applications and Why Simulation is Critical to Success," TestConX, March 2019. Web. https://bitsworkshop.org/premium/wp-content/uploads/2019/TestConX20191ap2_3478.pdf.
3. J. Mroczkowski, "WLCSP xWave for High Frequency Wafer Probe Applications," IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop, June 2018. Web. www.swtest.org/swtw_library/2018proc/PDF/S04_02_Mroczkowski_SWTW2018.pdf
4. J. Mroczkowski and N. Falco, "Solution for mmWave Wafer Probe Applications and Field Results," TestConX, March 2019. Web. https://bitsworkshop.org/premium/wp-content/uploads/2019/TestConX20191ap1_2290.pdf.



Superbend C29S

微波/毫米波超小弯曲电缆组件



Up to 50GHz

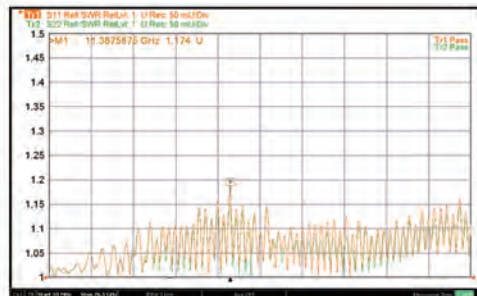


与弯头结构比较

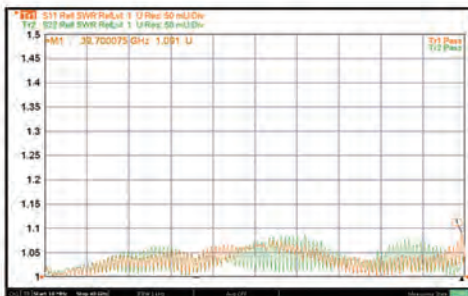
- ★ 可选连接器: SMA Male (26.5GHz)
2.92mm Male (40GHz)
2.4mm Male (50GHz)

超小弯曲

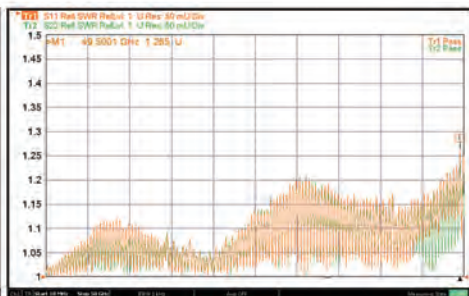
直头替代弯头, 性能更优, 成本更低, 安装空间更小



26.5GHz



40GHz



50GHz

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家



福州迈可博电子科技股份有限公司
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

RF-SOI高效功放可为5G毫米波网络节省数十亿美元

RF SOI can Save \$Billions in 5G mmWave Network Costs with Efficient PA

Joe Madden, *Mobile Experts*;

Anirban Bandyopadhyay and Ned Cahoon, *GlobalFoundries*;

Harish Krishnaswamy, *MixComm*

5G毫米波网络是移动运营商高度优先发展的项目，因为消费者对数据需求的快速增长将很快超过6GHz以下的网络容量，它迫使美国的运营商充分利用更困难的毫米波频段¹。事实上，运营商在高密度城市数据流量的驱动下，2019年已经部署了超过85000个5G毫米波无线单元，因为没有其它更好的方法来增加巨大的容量。

然而，5G毫米波网络的建设到目前为止仍是一条坎坷的道路。运营商发现，频率超过20GHz时信号的传输性能表现不理想。系统在视线条件下工作正常，但在非视线情况下信号出现了不稳定。在目前的现场部署中，上行链路是一个明显的限制。即使在2G、3G和4G系统中，情况也是如此，上行链路的链路预算通常比下行链路的低2-3dB。然而，这一次在5G毫米波现场试验中显示，两个链路预算之间的差异超过了15dB。因为5G网络需要一个闭环的信道估测，所以上下行都是必要的。但结果却是现场性能表现不够稳定。

毫米波的另一个主要挑战是沿传播路径产生的高衰减。障碍物、枝叶、雨水甚至手持设备都会增加约30dB或更多的衰减。而相控阵天线通过空间功率合成可以部分地克服这一限制，即把信号聚集到狭窄的定向波束中，并将天线阵列扩展到更宽的区域。相控阵的优点使它成为5G毫米波部署的基础，但是系统需要留有足够余量，因为信道中的任何微小变化都很容易使路径损耗增加10dB。

今天的5G毫米波网络受到射频功率和散热的限制。早期的用户设备和用户前置设备（CPE）的上行链路等效全向辐射功率（EIRP）太弱，无法提供必要的链路预算裕度。同时，还有一些设备在测试过程中由于过热而关闭²。

毫米波的成功显然取决于能否成功解决以下几个关键挑战：1）一定范围内的成本控制；2）热电功率预算；3）模块成本。本文着重讨论这些挑战，并比较了RF-SOI与其他半导体技

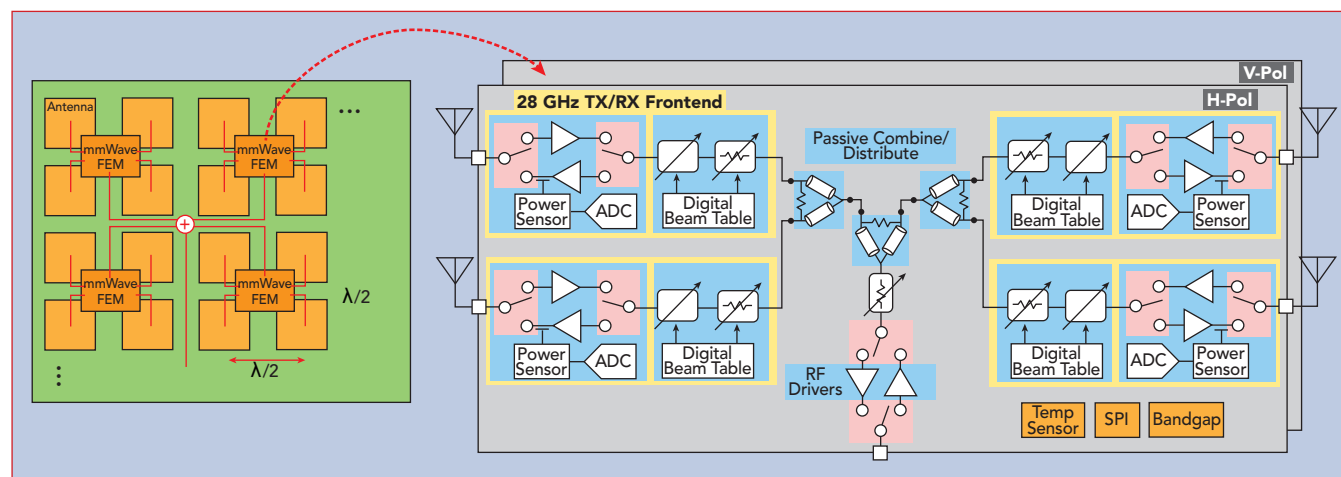


图1：波束赋形前端模块（FEM），2x2双极化平铺结构的大规模毫米波相控阵。

LTCC 滤波器



业内**最多**的选择！

- ▶ **300**多种型号，常备现货！
- ▶ 封装小至0202
- ▶ 抑制高达52dB
- ▶ 陡峭的裙边带抑制



0202 0402 0603 0805 1206 1210

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国
总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003
全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011
E-mail: sales@mitron.cn 网址：www.mitron.cn



更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

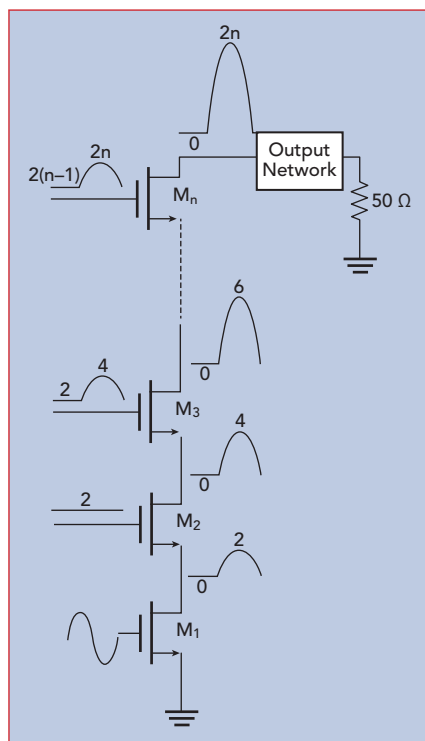


图2: RF-SOI堆叠(串联)式FET功放概念。

术,展示了基于RF-SOI的毫米波相控阵系统如何为未来的5G毫米波基础设施提供最佳解决方案。

相控阵的基本结构和关键指标

相控阵天线由多个天线单元组成,每个单元都通过相移来控制波束(图1)。相移可以发生在射频(图1)或数字域中。要得到最佳波束形状,相控阵天线单元的间距(网格间距)通常为半个波长。对于毫米波而言,芯片内部和PCB的线路损耗非常高,所以尽量减少芯片到天线的线路损耗就显得非常重要。据此原理,毫米波的前端组件(LNA、PA、开关)需要尽量靠近每个天线单元。当频率为28GHz时,其 $\lambda/2$ 为5.4mm,39GHz时则为3.9mm。由于网格间距的限制及集成电路/天线单元共址的需要而产生了散热问题。第一代解决方案由于功放(PA)的低效率加剧了这种情况。在发射效率低至5%至10%的情况下,前端功耗的绝大部分在网格间产生热量,而不是用于射频信号。因此,提高发射路径的线性效率对于下一代设计至关重要。

相控阵天线的阵列增益与阵元数(N)成正比。在发送(Tx)端,阵列增益和每个单元附加功率的组合导致输出功率相比单个单元以 N^2 增加。相控阵的这一基本特性使得半导体性能和满足系统要求所需的阵列尺寸之间能够进行平衡。特别是为了达到相同的系统EIRP

目标,每个单元输出功率的 N^2 下降使得硅技术成为除最高功率应用场所外所有应用中最吸引人的选项。

最低要求是要有足够好的晶体管性能(f_T 和 f_{max})。设计人员需要晶体管截止频率和工作频率之间至少有5倍、最好是10倍的比率,以便在毫米波载波频率下获得可接受的增益和电路裕度。这意味着在39GHz的5G频段上,200GHz的 f_T 和 f_{max} 是可接受的最低要求,而400GHz应该是首选。由于毫米波的高损耗,解决有源和无源器件的寄生是关键。使金属/介质堆栈中的损耗最小化是非常重要的,因为晶体管必须在金属顶层上驱动传输线,以提高功率合成网络的效率。厚的金属和介质堆栈对于减小这种损耗非常重要。基材的损耗也很重要;匹配网络的质量因数和传输线插入损耗会随着衬底电阻率的增加而提高。在接收(Rx)端,晶体管的 NF_{min} 对于低噪声电路很重要;在发送(Tx)端,击穿电压和安全工作区对于功放中高效的功率产生和天线开关中的功率处理都至关重要。

半导体技术: 射频SOI、CMOS和GaN

在RF-SOI技术中,CMOS晶体管是建立在由埋在硅衬底上的氧化物层隔离的顶层硅上。氧化物隔离降低了FET(场效应管)结衬底的电容,提高了FET的性能。结果是采用SOI技术的晶体管的 f_T 和 f_{max} 比相应的采用节点平面式CMOS技术的晶体管的 f_T 和 f_{max} 都高。

例如,GlobalFoundries(GF)公司在生产中有一个45纳米RF SOI,该SOI已针对毫米波性能进行了优化。NFET和PFET的 f_T/f_{max} 分别为290/330GHz和245/300GHz。金属/介质堆栈针对毫米波性能进行了优化,为低损耗传输线、组

合网络和高Q无源器件提供单层或双层超厚铜层。基于RF-SOI的解决方案具有优越的前端性能和45nm的逻辑密度,典型的集成应用包括用于4单元和8单元波束赋形器的PA、LNA、移相器和合成器前端,还可以包括毫米波的上/下变频器和RF收发器。45nm的逻辑密度使高速SPI接口能与包含数千条目的大型波束表集成,从而为高移动性应用提供灵

活的波束赋形。

RF-SOI技术的一个独特优势就是能够对衬底进行工程设计,以提高RF性能。高电阻率(>1K ohm-cm)衬底降低了信号在衬底的损耗,改善了传输线损耗和匹配网络的Q值。更高Q值的输入匹配网络可以获得较低的LNA噪声系数(NF)。此外,在衬底氧化物层下面设有高捕捉层(Trap Rich layer)的工程基板减少了寄生传导,否则它会降低开关谐波和线性度。RF-SOI晶体管之间被周围的氧化物完全隔离。由于FET是电隔离的,并且没有像CMOS那样的公共衬底节点,FET可以串联(堆叠)连接并偏置,使得电压均匀地分布在串联的每个FET上(图2)。串联连接克服了先进节点CMOS的低电压击穿限制,因为串联的击穿电压是堆叠中各个晶体管的 BV_{ds} 之和。这对前端电路的性能有很大的好处,从而提高了功率放大器的输出功率和效率,改善了天线开关的插入损耗和功率容量。45nm工艺的RF-SOI功放可以在28GHz下输出20-23dBm的峰值功率,效率也高(>40%),这与先进节点CMOS中的解决方案形成鲜明对比,先进节点FET的低击穿电压导致较低的功率输出和效率。RF-SOI功放的高效率对于降低5G阵列的热耗散和解决5G阵列的关键技术挑战之一都具有重要意义。

使用5G NR调制,功放要承受2倍电源电压的峰值射频电压。准确评估5G复杂波形下晶体管的退化过程,对于保证5G基础设施的高可靠性和满足使用寿命的要求具有重要意义。当前最好的评估工具是PDK,因为PDK软件天衣无缝地把可靠性模型与电路设计及仿真集成在一起了。

5G毫米波基站要达到的目标是60至65dBm的EIRP。图3展示了Tx相控阵要达到65dBm EIRP所需的单元数量,作

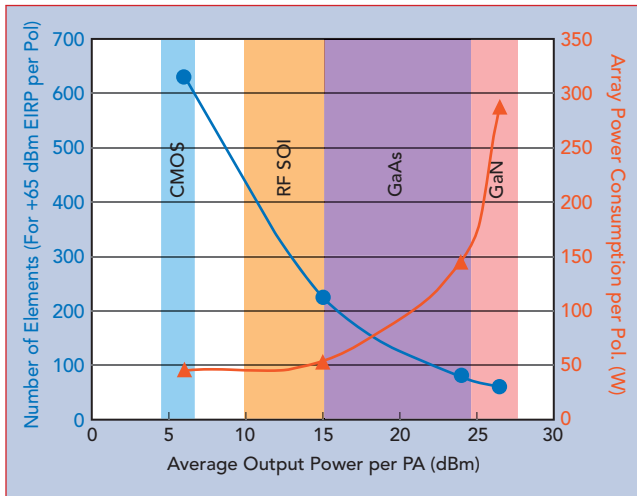


图3: 5G 28GHz基础网相控阵Tx端的半导体技术方案比较。

毫米波

MMIC

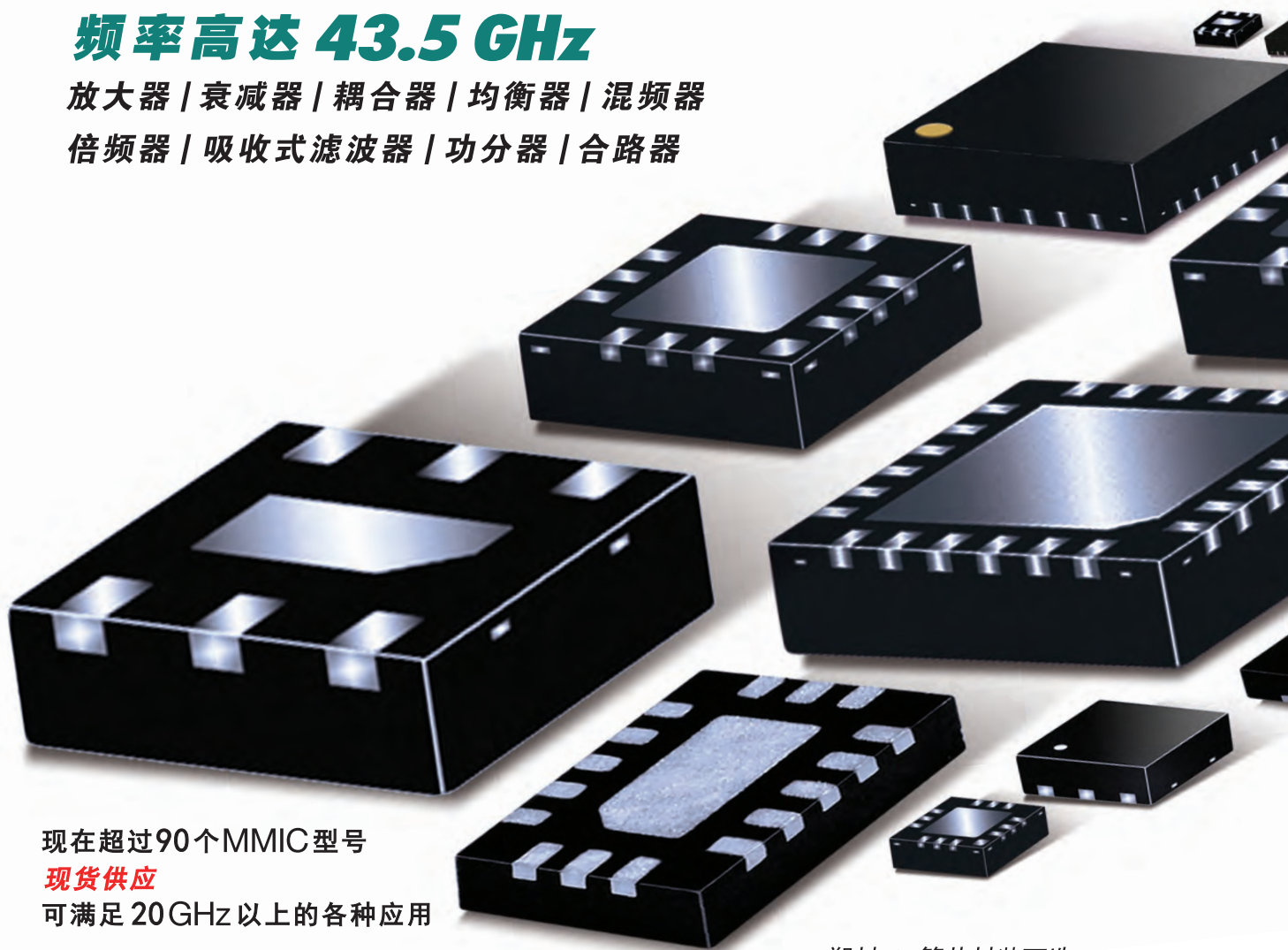
产品

多倍频带宽

频率高达 43.5 GHz

放大器 | 衰减器 | 耦合器 | 均衡器 | 混频器

倍频器 | 吸收式滤波器 | 功分器 | 合路器



现在超过90个MMIC型号

现货供应

可满足 20 GHz 以上的各种应用

塑封 & 管芯封装可选

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

www.minicircuits.com

P.O.Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003

(718) 934-4500 sales@minicircuits.com



Mitron Inc.

Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址：福建省福州市349信箱

全国免费服务热线：400-887-3088

E-mail: sales@mitron.cn

邮编：350003

传真：0591-87870011

网址：www.mitron.cn



更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

为每个功放单元的平均调制输出功率和相关的Tx阵列总功耗的函数。这一数据是利用不同技术实现的功放输出功率和效率的公开信息以及阵列“管道”（即功放驱动器或波束赋形电路等）中的功耗因素编制的。图3中可以看出，在每个功放输出功率的低端（对应于CMOS解决方案），阵列单元的数目变得非常大，超过500个单元，同时也增加了实现的复杂性和成本。相反，在每个功放输出功率的高端（对应于GaN），所需的阵元数量变得非常少，低至32个单元，这会增加阵列的总功耗，因为 N^2 阵列增益很小，也就意味着EIRP是通过原始输出功率产生的。而RF-SOI-CMOS则处于复杂度相对于直流功率的“最佳点”，因为可以根据每个功放输出功率对阵列中256个单元的尺寸进行管理，得到较低的总Tx阵列功耗。

其实，三种技术方案各自都在一定范围里具有优势。CMOS最适合于非常大的阵列，因为当单个放大器的功率很低时，它的成本是比较低的。RF-SOI处于成本、功率效率和输出功率相对平衡的“中间地带”，适用于CPE和城市移动基础网。GaN则在链路不受点到点回程等上行链路限制的情况下，应用在更高的频带（ $\geq 60\text{GHz}$ ），GaN放大器的高功率使得用较少单元的阵列就能保持较大的点到点传输距离。由于毫米波移动网络需要覆盖各种地形和满足各种容量的需求，很明显，所有这三种解决方案都有自己的用武之地：CMOS相控阵非常适合与大量接入点下连，例如在有大量移动用户的体育场中，因为它无需穿透建筑墙壁或窗户。GaN非常适合于长距离传输网络，具有较宽的波束和较少的转向要求。RF-SOI似乎最适合城市环境中的固定无线CPE和移动基础网络。

射频SOI毫米波前端模块设计面临的挑战

RF-SOI具有卓越的Tx和Rx性能以及数字集成能力，在电路设计和系统架构方面仍有巨大的创新机会，这两个方面都正在被诸如MixComm（在一些项目上与GF有合作）等公司积极探索之中。在Tx端，在保持长期可靠性的前提下，从堆叠SOI CMOS功放中获取最佳输出功率和效率的电路方法至关重要。甚至比峰值效率更重要的是调制下的平均效率，5G NR波形通常指示从1dB压缩点回退约8dB，为了在Tx端实现所需的3% EVM。除了功放电路设计外，整体前端模块（FEM）架构也会对系统的平均效率产生重大影响，所以认真严谨的系统架构设计及规划也至关重要。

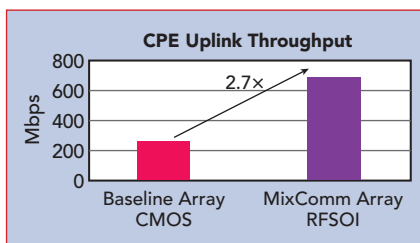


图4：基于基本CMOS的CPE阵列和基于MixComm GF 45nm RF-SOI的CPE阵列的上行链路吞吐率中值比较。

数字预失真（DPD）可以用来从功放中获得更好的性能，但实践中这个过程是非常复杂的，由于流程和温度的变化，大规模阵列的功放之间将产生系统性和随机性的变化，还会引起波幅在波束赋形中逐渐变窄。因此，开发出新的阵列DPD算法和对DPD友好的功放架构才能使Tx的性能得到进一步提高。

对于大规模MIMO阵列，使用DPD是可能的，但它必须是一种“轻度”的DPD算法，其消耗的直流功率比功放中储存的更少。对于每路功放为低功率的巨大阵列，DPD可能并不值得使用，但是对于小阵列，在较高的RF功率下，DPD就可能成为一个重要的因素。这里一个很大的可能性是在多个RF路径之间共享DPD算法及其自适应引擎，本质上就是定期地更新DPD算法，而不是连续地更新，以节省用于单路功放的成本和功率。这种方法虽然牺牲了线性化水平，但却提高了更为重要的效率。

对于大规模相控阵列，其振幅和相位的不匹配是由工艺、温度和封装接口在单个FEM芯片通道之间以及芯片之间的变化引起的。用于补偿这些不匹配而内置的自测试和校准措施对于实现稳定和精确的大规模阵列非常重要。这些技术的实现需要一个自校准阵列，它能适应现场条件和制造工艺的变化，从而达到优化至关重要的射频前端的性能。

RF-SOI如何应对运营商的挑战

发射机输出功率应该是无线电信号传输中最基本的指标，而更高的输出功率可以用来改善毫米波链路的几乎每个方面。如更高的输出功率增加了射程，这意味着可以覆盖更大的小区半径，因此可以部署较少的基站，从而减少运营商的成本支出。或者，对于相同的小区半径，它可以在小区边缘实现更高的传输速率，从而提高服务质量。每个功放更高的输出功率可以通过波束赋形算法实现“宽波束”，而不是传统很窄的“铅笔波束”，从而提高在高移动性场景中信号的稳定性。每个功放更高的输出功率也可以用来降低材料成本，因为

实现相同的EIRP需要更小的阵列。更小的阵列还具有自然的波束展宽和相关的稳定性。图4比较了基于基本CMOS的CPE阵列和具有同等天线数量的基于DPD 45nm RF-SOI的CPE阵列的上行链路吞吐率中值。图中可以看出，每个功放具有更高的输出功率可以显著提高链路预算，并使吞吐量提高了约2.7倍。

毫米波放大器的改进会带来什么影响？

三大挑战将决定毫米波能否成功：移动网络成本、热/功率预算和材料成本。经过前面我们对半导体基本原理的详细回顾表明，RF-SOI在所有这些领域都具有优势。

- 更高的发射机功率对运营商的财务状况有着巨大的影响。在CPE中增加3dB的EIRP可以节省20%的网络建设成本，因为它允许基站部署在更远的距离，并且还提供了更高的频谱效率。这在网络层面上节省了数十亿美元，加上还有更大容量的好处。
- 目前市场上几乎所有的射频器件都受到其热特性的限制。功放效率的提高直接影响到实际的EIRP。与其他技术相比，RF-SOI在热性能方面处于“最佳位置”，可以在功率、线性度和效率方面进行折衷，远远优于目前许多CPE中使用的CMOS。
- 基于RF-SOI的射频器件可以在不使用数百个阵列单元的情况下实现高发射功率。RF-SOI工艺允许集成PA、LNA和上/下变频器，保持材料低成本和简化供应链。

总体而言，很明显，目前5G运营商面临的最大问题是上行链路功率不足。简单地将CPE升级为使用RF-SOI工艺的放大器可以将上行链路EIRP提高3dB或更多，从而提高网络的覆盖范围和容量。其他产品，如gNodeB阵列和手机，也可以通过类似的方式受益。■

参考文献

1. Industry Voices—Madden: Operators will need mmWave spectrum for 5G capacity, Fierce Wireless, <https://www.fiercewireless.com/wireless/industryvoices-madden-operators-will-needmmWave-spectrum-for-5g-capacity>.
2. We Tested 5G Across America. It's Crazy Fast—and a Hot Mess, WSJ, <https://www.wsj.com/articles/all-thereasons-not-to-buy-a-5g-phone-rightnow-11563467389>.

CIOE

中国国际光电博览会
CHINA INTERNATIONAL
OPTOELECTRONIC
EXPO

第22届 中国国际光电博览会

聚焦信息通信技术 创新与应用发展



信息通信展

Information and Communication Expo

预计

160,000M² 展出面积

85,000+ 专业观众

3,000+ 参展企业

同期展会联动



激光技术及智能制造展
Lasers Technology & Intelligent Manufacturing Expo



精密光学展
镜头及摄像模组展
Precision Optics, Lens & Camera Module Expo



红外技术及应用展
Infrared Applications Expo



光电传感展
Optoelectronic Sensor Expo



光电子创新展
Photonics Innovation Expo



扫码即刻
登记免费参观

2020.9.9-11

深圳国际会展中心(宝安新馆)

WWW.CIOE.CN

单层电容器有助于通信设备小型化

Single Layer Capacitors Contribute to Miniaturization of Communication Equipment

Toshihiko Honda, TECDIA首席技术顾问

TECDIA专注于开发用于微波及光通信领域的引线键合单层电容器（SLC）。TECDIA的SLC具有一系列不同介电常数的产品：10、40、90、130、280、1600、2800、16000、30000、50000，并且每种都有自己的特性。在这些介电材料中，由GBBL（晶粒边界阻挡层）结构（图1）构造的产品具有极高的介电常数：16000、30000和50000，有助于设备和器件的小型化。该结构由绝缘性晶粒与导电陶瓷之间的阻隔来确保超高介电常数，并通过三个阶段的烧结工艺来制成。结果我们成功地做到了常规高介电常数材料无法实现的温度稳定的同时，维持了高介电常数。

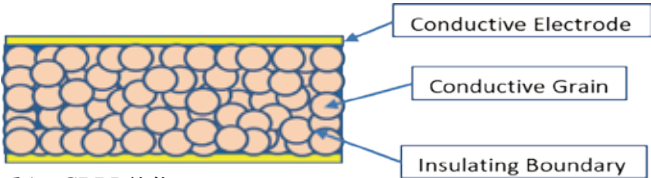


图1：GBBL结构。

我司分别选取了介电常数为280、2800、16000、30000和50000的材料，制作了容量分别为100pF和1000pF的SLC。

对于280的材料，尺寸为1.95 × 1.95 mm（100pF）和6.2 × 6.2 mm（1000pF），厚均为0.1mm。尽管能减小尺寸但封装时操作困难且易断裂，因此将厚度0.1mm设为下限。

其中，280材料具有较高Q值和良好温度特性，因此它是理想的介电材料，通常用于低容值应用。作为去耦用途且容值1000pF的电容，虽然可以计算出它，但是实际尺寸太大无法实现。在封装尺寸无问题前提下，280材料对于100pF的

表1 各种介电材料100pF SLC比较表				
介电常数	尺寸(mm)	厚度(mm)	谐振频率(GHz)	ESL(pH)
280 (295)	1.95 x 1.95	0.1	3.16	25
2800 (3000)	0.62 x 0.62	0.1	3.08	27
16000	0.33 x 0.33	0.15	2.31	48
30000 (33000)	0.23 x 0.23	0.15	2.12	56
50000	0.185 x 0.185 *	0.15	1.99	64

※：在我们公司，100pF的尺寸超出了介电常数50,000材料的规格。

表2 各种介电材料1000pF SLC比较表				
介电常数	尺寸(mm)	厚度(mm)	谐振频率(GHz)	ESL(pH)
280 (295)	6.2 x 6.2 *	0.1	0.99	26
2800 (3000)	1.94 x 1.94	0.1	0.99	26
16000	1.03 x 1.03	0.15	0.80	40
30000 (33000)	0.72 x 0.72	0.15	0.79	41
50000	0.585 x 0.585 *	0.15	0.78	42

※：在我们公司1000pF的尺寸超出了介电常数280材料的规格。

SLC也可适用。

对于100pF，使用每种介电常数的材料时，SLC尺寸和自谐振频率如表1所示。对于介电常数为16000或更大的电介质产品，其厚为0.15mm的是我们的标准产品。对于1000pF，如表2所示。表中电介质的介电常数中，括号中的值是我们标准电介质的实际介电常数。另外，ESL值是从上述谐振频率的计算结果得出的值。

此处，应当注意，当然介电常数低的介电材料具有高Q和作为电容器的良好品质，且作为去耦功能使用的话，即使介电常数高也能保证高谐振频率。与其他公司制造的MLCC相比，对于100pF产品的1.2GHz小型产品（0.4 × 0.2 × 0.2 mm）和1000pF产品的360MHz小型产品而言，这是一个足够高的值。

下转第57页

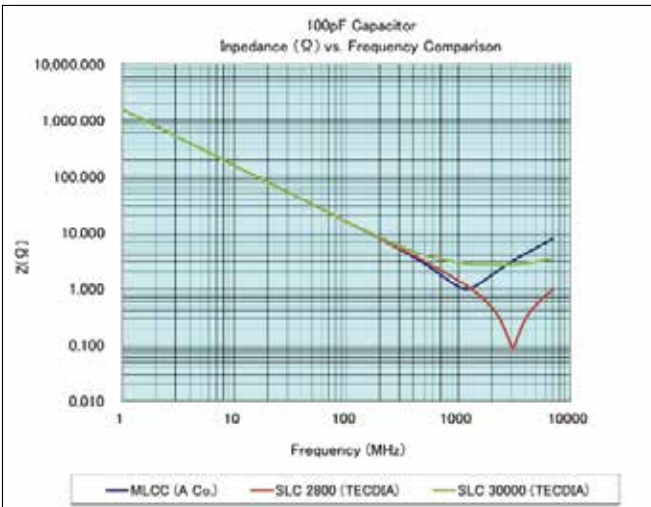


图2：100pF MLCC与SLC的阻抗特性。

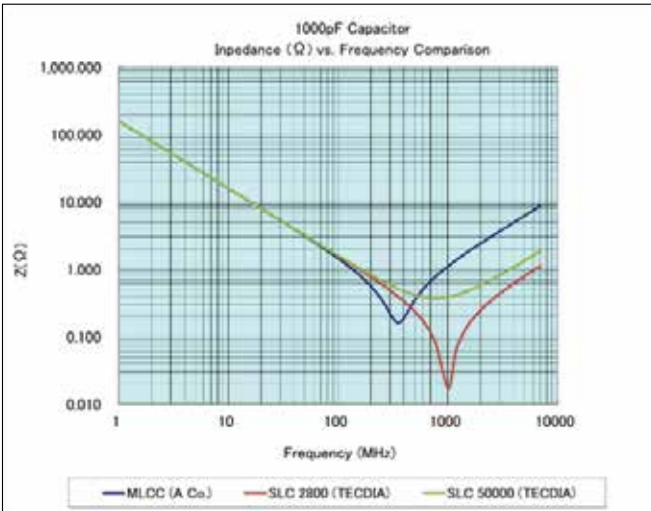
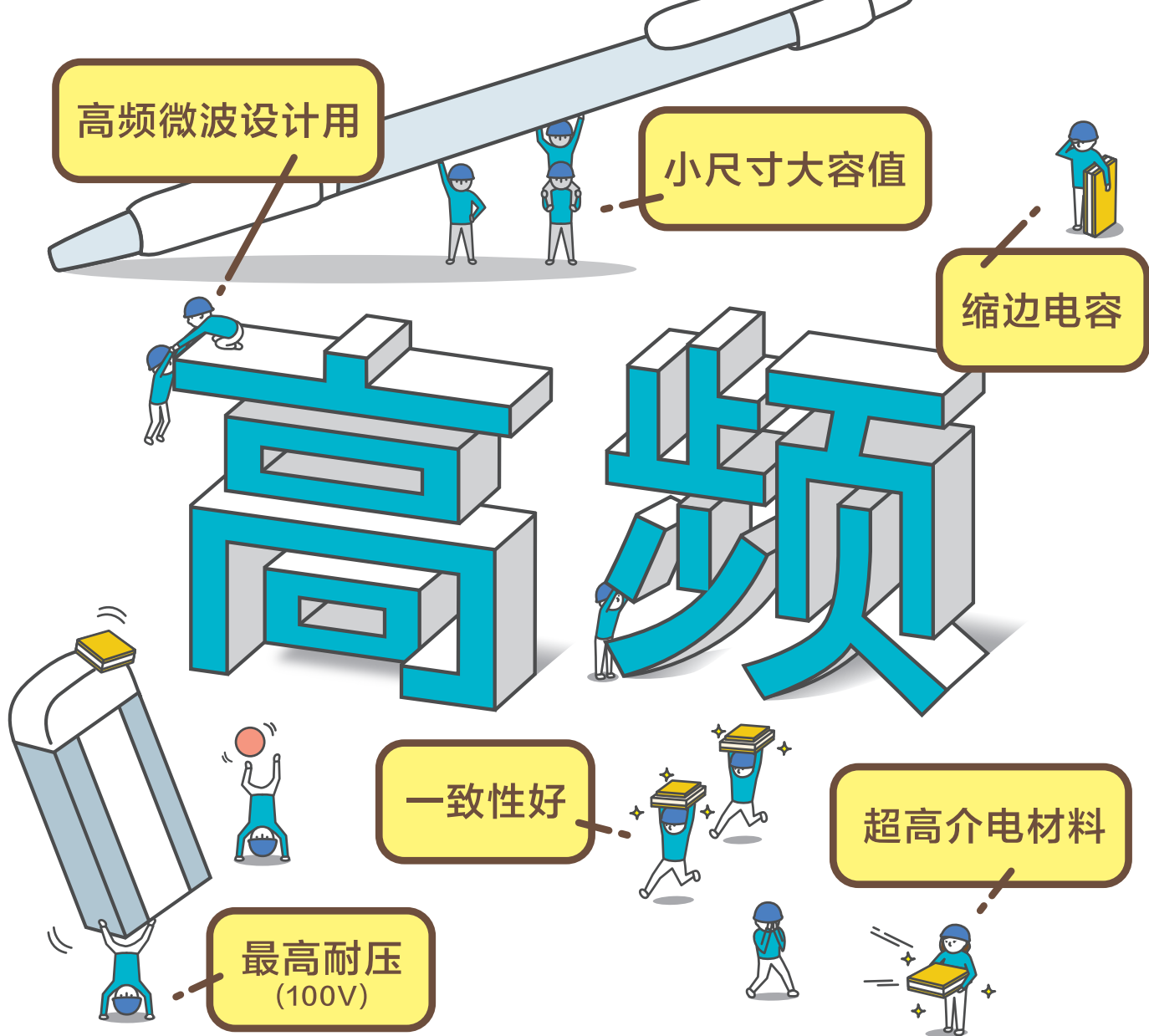
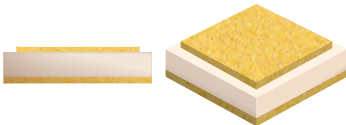
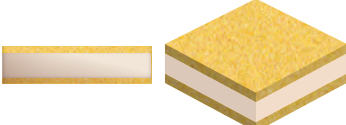


图3：1000pF MLCC与SLC的阻抗特性。



高介电常数单层陶瓷电容

因为TECDIA拥有多种类介电材料，所以能根据客户不同的需求提供最适合的产品。芯片保持小尺寸的基础上，使用介电常数16000、30000及50000的高介电材料，有助于通信设备的小型化。

		
	A型	C型
表面	留边	无留边
反面	无留边	无留边



SDR收发器助业余无线电爱好者实现空间通信

SDR Transceivers Enable Amateur Space Communication

Diego Koch, ADI公司应用工程师

业余无线电爱好者最近获得了另一种提供全球不间断无线电覆盖的方法。现在,通过新的地球同步卫星,只需单跳就能可靠地覆盖地球三分之一的地区。因为接收频率与从电离层反射的无线电信号的频率不同,为了与卫星取得联系,必须使用专用设备。新的软件定义无线电(SDR)针对无线电收发应用具备多种优势,例如灵活的重新配置功能和快速观察整个目标频段的能力等。

卫星

卡塔尔卫星公司Es'hailSat在2018年发射的Es'hail-2通信卫星一直处于中非上空的地球静止同步轨道上,工作高度为36,000公里。

Es'hailSat与全球非盈利组织业余无线电爱好者卫星公司(AMSAT)合作,为面向业余无线电爱好者的全国性非盈利组织卡塔尔业余无线电协会(QARS)启动了一项新技术开发工作。通过这一合作,Es'hail-2卫星可以配备两个专用转

发器,从而实现了在可视区域内连接业余无线电用户的单跳实时同步通信。

从地球上,地球同步轨道卫星的位置是不变的。虽然天线不必移动就能连接它们,但在自由空间功率损耗、天线指向精度和延迟方面,36,000公里的遥远距离提出了新的挑战——从一个地面发射机到卫星,再返回到另一个地面发射机,大约需要250毫秒。

访问Es'hail-2

业余无线电爱好者以前的通信过程是通过模拟下变频器和上变频器来实现的,它们将接收和传送的信号转换到收发机工作的业余无线电频段。卫星使用的上行和下行频率有时超出了收发机的能力。Es'hail-2有两个转发器:一个用于窄带传输,一个用于宽带传输。在本节中,我们将讨论窄带转发器。因为在这个转发器上,可用带宽只有250kHz,为了容纳多个通道,需要使用适当的调制技术。最常用的模拟调制类型是连续波(CW))或单边带(SSB)。

上行链路在右侧圆极化的2.4GHz处,下行链路在水平或垂直极化的10.45GHz处。业余无线电爱好者作为持牌无线电操作员有权在2.4GHz频段(2300 MHz至2310 MHz和2390 MHz至2450 MHz)使用足够功率和高增益天线进行卫星通信。

创新的SDR方法

随着SDR各种变体的引入而带来的变化也影响了业余无线电领域。SDR的一个优点是,其性能不会随着时间的推移而下降,另一个优点是原本需要使用昂贵的模拟无线电器件(如混频器或滤波器)才能获得的性能,可以通过替换其他元件(如模数转换器(ADC)和DSP)等更加经济有效的方式来获得相同的性能。将多个模块(如镜像抑制混频器、振荡器和ADC)集成在同一个硅器件中使得新接收机架构变得可行。例如,AD9363/AD9364(图1)射频捷变收发器将所有射频前端、混合

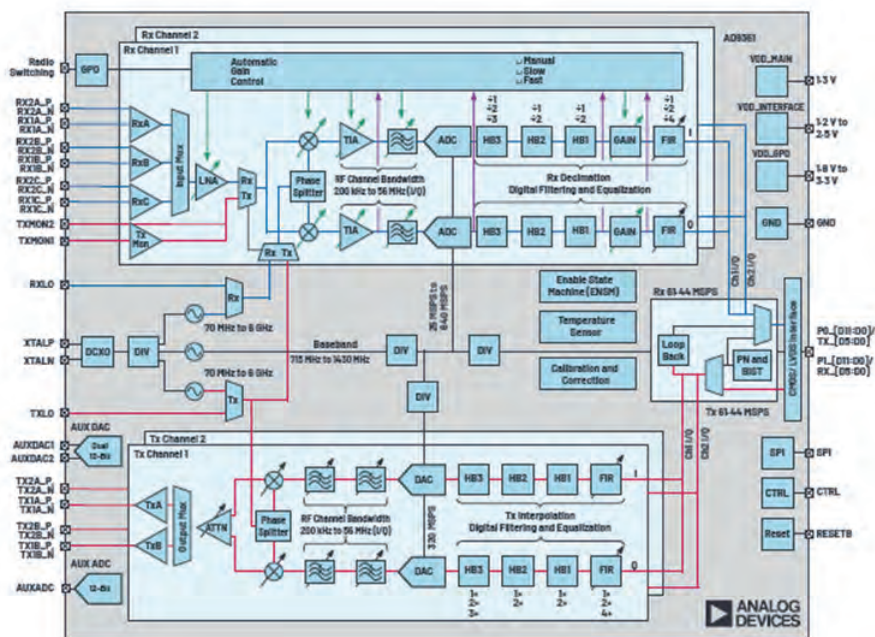


图1: ADI的AD9363收发器。



图2: 使用AD9363收发器的ADALM-PLUTO。

信号和数字模块组合在一个器件中,同时用于接收和传输。当与管理数据流的FPGA配对后,构建一个完整基站所需的元素就只剩下天线、功率放大器和计算机上运行的软件算法。

SDR卫星电台

众所周知,业余无线电爱好者喜欢构建自己的硬件和重新利用现有设备来满足自己的需求。对于接收天线和下变频器,最实惠的替代方案是商用卫星电

视的普通卫星天线和低噪声模块(LNB)。LNB包含波导和下变频器,将10.45GHz信号下变频为小于1GHz,这属于SDR的可接收频段范围。CW(几十Hz)或SSB(小于3kHz)等的窄带调制类型要求高度稳定的本地振荡器,以避免连续重调,而这在广播电视(几MHz)等使用

的宽带调制类型中不那么重要。由于上行频率在WLAN 2.4GHz频段范围内,持牌操作员可以重新利用现有的WLAN设备,如功率放大器和高增益天线。ADALM-PLUTO的输出功率大约为5dBm,不足以驱动输出功率为几瓦的功率放大器。基于ADL5606 20dB功率放大器并由LTM8045 SEPIC微型模块转换器供电的CN-0417参考设计可产生足够的功率增益来克服这一限制。图3显示如

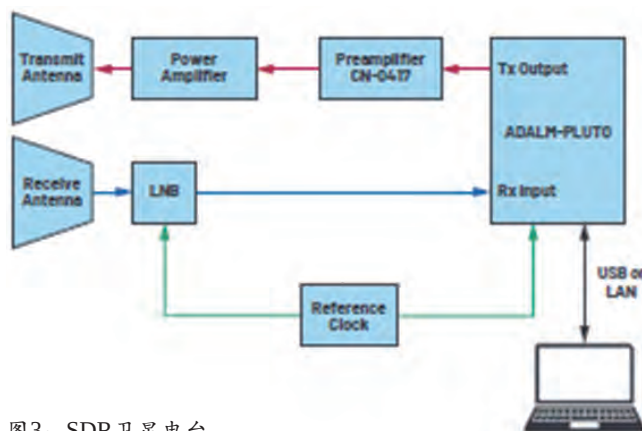


图3: SDR卫星电台。

何布置通信站。也可以在现场快速部署通信站,以支持紧急通信。

总结

综上所述,我们目睹了无线电通信向SDR技术的转变。通过将多个模拟和混合信号块集成在一个器件中,可实现这一转变。直接优势在于经济高效、更高的可靠性和可重构性。■

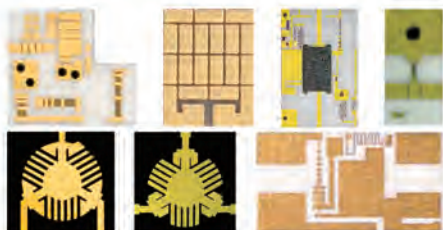
薄膜陶瓷基板及薄膜元器件制造商

- 高标准自动化生产线,工艺能力齐全
- 设计、制造一体
- 支持定制,微电子电镀及蒸发镀膜能力开放
- 快速反应,典型交付周期2-3周



薄膜元器件

- 金属膜系: Ti、TiW、TaN、Au、NiCr、Cu、Pt、Ni、AuSn等。
- 典型产品: 氮化铝热沉、激光Submount、薄膜电阻、芯片电容、衰减器、滤波器、功分器、隔离器、环形器等。



薄膜陶瓷基板

- 即烧/抛光99.6%氧化铝、抛光氮化铝
- 最大尺寸203.2mm,最小厚度0.127mm



生瓷带及配套钨浆

- 99.6氧化铝生瓷带
- 氮化铝生瓷带
- 配套钨浆



四川六方钰成电子科技有限公司
Hexagold Electronic Technology Co., Ltd

地址: 四川省绵竹高新区南通路七号B3厂房

网址: www.hexagold.net

电话: 0838-66888801

13398482528 (朱经理) 19150636605 (梁经理)





20GHz合成器实现超低相位噪声和快速切换

20 GHz Synthesizer Delivers Ultra-Low Phase Noise and Fast Switching

Trisynth Technology Inc., www.trisynthtechnology.com

随着微波和毫米波技术的迅速发展，人们对于微波信号的产生提出了更高要求。未来的系统，从高速模数转换器和数模转换器（ADC和DAC）到雷达和基础研究应用，都需要信号具有更好的频率稳定性和频谱纯度，以及亚微秒级的信号频率切换速度。利用台式微波频率合成器可以简化此类系统的设计，该合成器能够将常规性能指标推向理论极限。Trisynth Technology开发的新型100kHz至20GHz频率合成器解决了这一挑战，它可以提供超低相位噪声，其出色的频谱纯度和频率组合的灵活性都是之前商业仪器无法提供的。

最好的商用合成器的指标是在10GHz载波偏移10kHz时相位噪声为-130dBc/Hz，而Trisynth的SAPSINT-200则比行业标准提高了20dB，其相位噪声在10GHz载波偏移10kHz时达到了超低的150dBc/Hz。相位噪声的这一显著进步可以利用X波段频率基准和高Q值蓝宝石谐振器来实现，该谐振器锁定在10MHz OCXO的高稳定性，在0摄氏度到50摄氏度工作温度范围内，频率稳定性优于 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 。尽管基于蓝宝石的振荡器的低噪声特点已为人们所熟知，但只有少数系统能够在不使用低温方法的情况下，在很短的启动时间内保证蓝宝石振荡器的频率稳定性。SAPSINT-200使用了一种全新的方法，通过高分辨率ADC和专用FPGA不断测量蓝宝石振荡器的频率和相位，形成相应的线性FM信号，以数位的方式将蓝宝石振荡器锁相至10MHz参考频率。该系统能在打开电源后几分钟之内稳定下来。

熟悉低噪声频率合成的工程师意识到，低噪声参考不足以建立一个合成器，合成核心带宽必须足以扩展到一个倍频程。将没有显著噪声衰减的参考特征转移到其他频率并非易事。

尽管如此，SAPSINT-200仍能做到这一点，在主频带中，从6.1875至12.375GHz的所有频率都具有始终如一的出色的相位噪声性能（图1）。

除了标准合成器输出可用的频率范围外，SAPSINT-200还提供从组合的9.9GHz参考频率衍生出的信号输出： $f/2$ 即4.95GHz， $f/4$ 即2.475GHz， $f/8$ 即1.2375GHz和 $f/16$ 即618.75MHz。这些频率具有更低的相位噪声，可与“黄金”相位噪声标准相提并论，可用于为ADC或DAC计时的应用。

增强的杂散性能

SAPSINT-200精心解决了频谱中不需要的合成杂散辐射。他们已经开发出一种结合FPGA和高速DAC的专用DDS，可以同时使用硬件和软件来抑制非谐波杂散，其水平远低于-90dBc。SAPSINT是完全直接的合成器，没有VCO、YTO或者PPL，仅仅是直接的频率相加、相乘和相除。来自相加、相乘、相除之外的所有杂散都会通过多通道开关滤波器组，在这里它们被阻挡至非常低的水平。这是通过使用具有非常陡峭的边缘性能的九阶硬件滤波器实现的，同时需要多个开关隔离为信号指定传输路线。从概念上说，DDS可以在信号周围500MHz频带内实现低杂散，而可切换滤波器组可以在带宽之外实现低杂散。图2显示了合成器输出端10GHz CW附近的宽带频谱。

快速切换速率

SAPSINT-200的直接合成构架使得频率切换时只有很短的驻留时间。切换速度仅受宽带开关和内部接口的数据上传

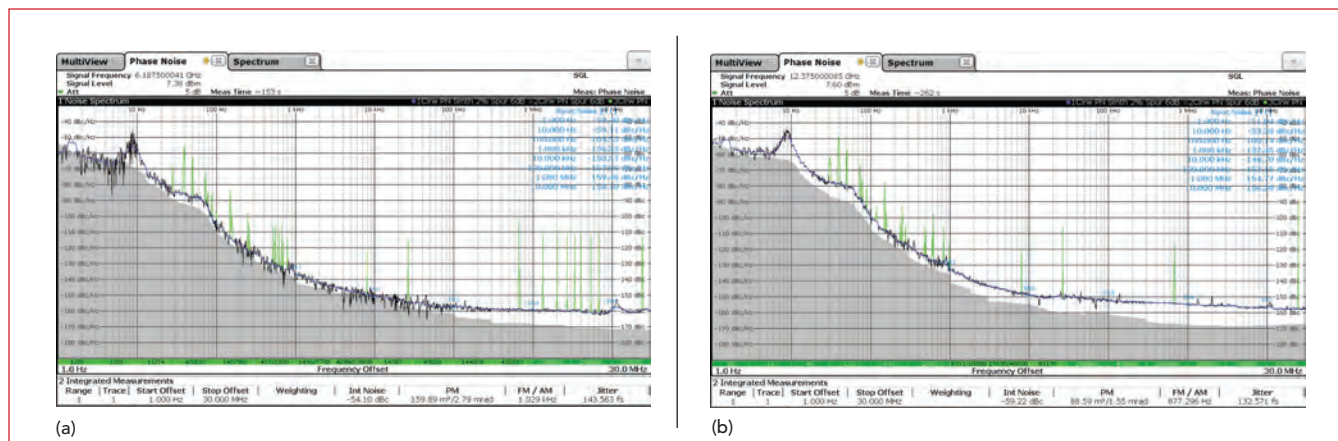


图1：在主频段两端测试得到的相位噪声：（a）6.1875GHz，（b）12.375GHz。

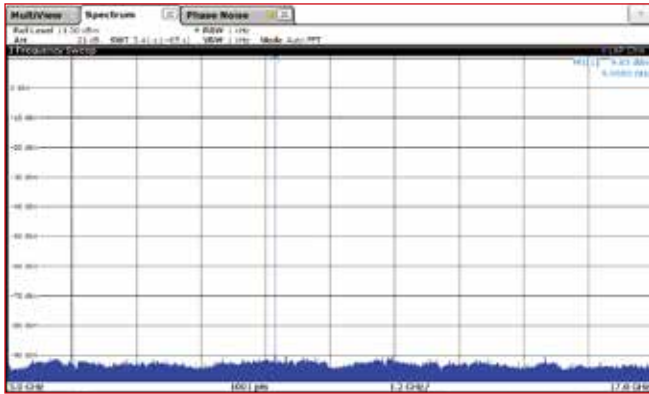


图2: 10GHz合成信号周围的宽带频谱, 从5GHz到17GHz的杂散辐射保持在-90dBm以下。

速率的限制。硬件滤波器的带宽通常为500MHz, 对仪器的开关速度的影响可以忽略不计。在主频率倍频范围内(即6.1875至12.375GHz), 列表模式下任何两个频率点的切换速度均在200ns之内, 并在100kHz至20GHz的指定频率范围内保持在亚微秒以内。合成器的最小频率步进为 1×10^{-6} Hz。

选项和升级

SAPSYNT-200支持扩展频率范围和添加功能, 并且可以随着微波技术的发展而进行性能升级。例如可以对合成器进行改进, 使其工作在从锁模激光器产生的光频率中提取的9GHz到10GHz光子时基。在这种情况下, 包括DDS时钟在内的所有内部核心频率都将从无噪声的基准中再生, 仅有其有源组件的热噪声限制了合成器的特性。

SAPSYNT-200直接频率合成器为相位噪声和频率捷变树立了新标准, 这是一项安全的投资, 因为在未来几年内, 它将是最低噪声和最快的频率合成器之一。■

以下内容上接第52页TECDIA所著文章

图2和图3显示了A公司的100pF和1000pF MLCC以及我司相同电容值SLC的阻抗特性。

由我们的2800材料制成的电容器具有较高的谐振频率和较高的Q, 因此具有非常好的高频特性。30000或50000材料具有较低的Q, 谐振频率也良好。此情况下, ESR用作阻尼电阻器, 在高频电路中, 具有防止电路谐振的效果, 因此对于除需要高Q电容器的电路以外的应用而言, 它也是有效的。A公司的MLCC的尺寸较小, 0.4×0.2 mm, 与我们的SLC相比, 其谐

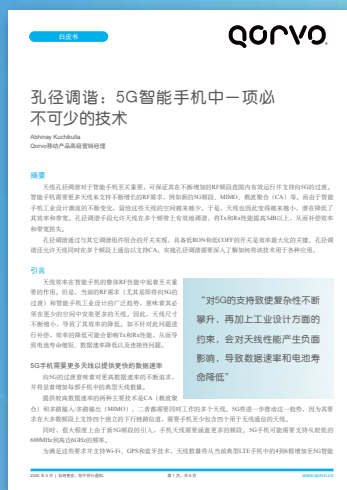
振频率低(ESL大), 特别是对于100pF产品, 显示的结果是其Q值并不是那么高。

这次, 我主要介绍了使用SLC进行去耦的情况。最后, 在使用SLC去耦时, 给大家做如下总结:

- 1) 在去耦频率和低阻抗频率之间, 选择接近谐振频率的电容器。
- 2) 在高去耦频率有效范围内, 选择ESL低的电容器。■

Microwave
Journal China
微波杂志

网站白皮书频道
免费下载



www.mwjjournalchina.com/white_paper.asp



用于ISM应用场景的 6kW固态微波发生器

6 kW Solid-State Microwave Generator for ISM Applications

RFHC Corp., www.rfhic.com

R FHC的6kW固态微波发生器可为2.4GHz工业、科学和医学（ISM）应用场景提供优异的性能，例如用于人造钻石生长的CVD反应器，用于半导体膜的PVD薄膜沉积设备以及用于工业食品加工的干燥/灭菌过程。

紧凑、轻巧的RIU256K0-40T发生器使用GaN功率放大器（PA），工作频率为2.4至2.5GHz，由四个1.6kW的GaN功率放大器和一个独立的框架式固态功率放大器（SSPA）组成（图1）。该SSPA支持CW和脉冲工作方式，并可根据应用场景的需求进行定制。RIU256K0-40T的可调功率范围为额定输出的5%至100%，它利用RFHC的技术在低功率和高功率水平下均可实现很高的系统效率（图2）。

发生器中的每个GaN PA均使用RFHC的高性能SiC基GaN晶体管技术，该技术可提供宽带宽、高效率、高击穿电压，并可减小系统整体尺寸。RIU256K0-40T使用200W晶体管（1E24200P），其在50V偏置下具有230W的饱和输出功率和74%的漏极效率，完全匹配的晶体管在两个RF端口上均集成了DC隔离电容器，以简化SSPA集成。

SSPA与管子

许多历史上的射频能量应用都使用真空管或磁控管作为核心射频发生器。这样的系统在控制频率、功率和相位方面具有明显缺点。RIU256K0-40T包含RFHC的驱动和控制模块，

可精确设置输出频率和功率，并且与磁控管相比，该发生器可提供纯净的信号，噪声和杂散辐射都很低（图3）。另一个优点是无需任何预热时间即可产生全部功率。

管子的寿命很短，通常小于6000小时，这会使机器停止并增加工作成本。RIU256K0-40T的使用寿命在50000到100000小时之间，具体取决于工作条件，这样节省了大量的成本。与磁控管和其他使用单个供电源的管基系统不同，RIU256K0-40T结合了四个坚固的GaN SSPA，如果其中一个PA发生故障，系统也可以正常降低功率运行。管基系统需要发生器内部有高压电源，这些电源容易产生电弧。SSPA则工作在50V的安全电压下。

RIU256K0-40T使用水冷却来消除大型金属散热器的热量，并减小了发生器尺寸。通过水冷却，SSPA可以与管基系统的现有冷却设备兼容，从而为客户减少了安装和运行成本。该系统具有多个传感器，可检测水流量、SSPA温度和VSWR。如果发生异常操作，系统将自动关闭并警告用户，确保发生器不会损坏。RIU256K0-40T具有LCD触摸屏和滚轮，可以完全访问系统控件、传感器和警报器；还可以使用笔记本电脑或远程PC进行全面监视和控制。远程控制方式可选择PLC、CAN或蓝牙。

模块设计

RIU256K0-40T是一个独立的框架安装式系

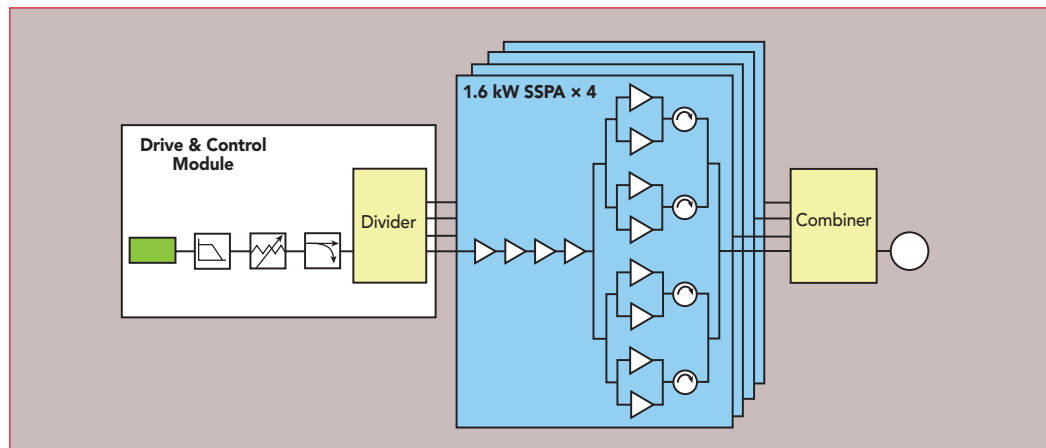


图1: SSPA前端。

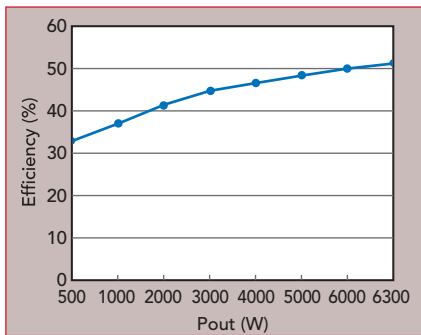


图2: 系统效率与输出功率。

统, 分为两部分:

- 具有隔离器的SSPA前端, 宽42.4cm, 长74.7cm, 高25.6cm, 重41kg。
- 电源, 宽48.3cm, 长43.2cm, 高17.7cm, 重29kg。电源使用三相380V交流电, 为GaN晶体管产生50V的偏置电压。该电源包含六个3kW整流器模块, 用于分担负载, 可以热插拔及n+1冗余, 这意味着如果其中一个电源模块出现故障, SSPA将继续运行。只需替换故障模块, 而无需更换整个发生器。

利用RFHIC的四路波导合路器将四个1.6kW的SSPA组合在一起, 可产生6kW的CW输出。从2.4GHz到2.5GHz,

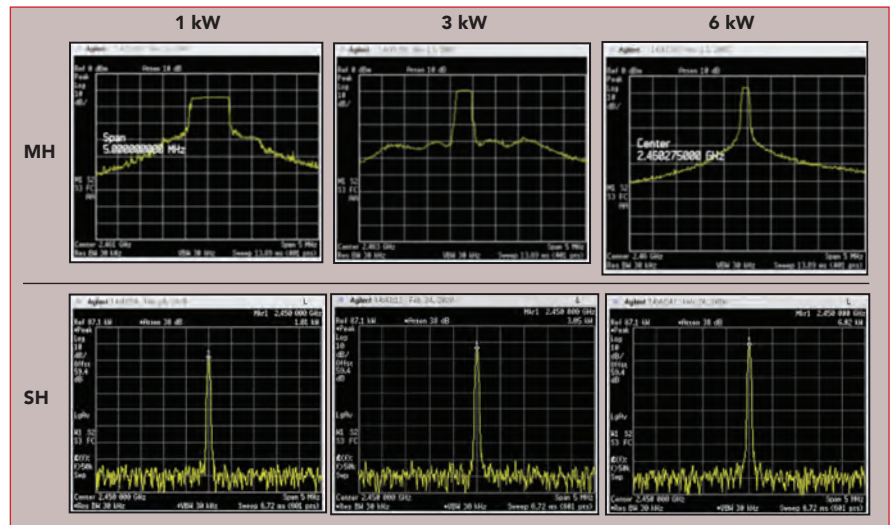


图3: SSPA前端和磁控管前端的信号纯度对比。

WR340合路器的最大插入损耗为0.1dB, VSWR为1.1:1, 端口之间的不平衡度小于3度。该发生器具有可扩展性, 用户可以添加RFHIC的现成商用功率放大器, 而无需手动实现相位同步。这种灵活性最大程度地提高了放大器的利用率, 减少了资本支出, 缩短了开发时间。

RFHIC表示, 它是全球第一家也是

唯一一家拥有从GaN晶体管和功率放大器到完整系统、从现成商业产品到定制模块和输出功率达数兆瓦的子系统的公司。RFHIC的强大能力确保了低成本和高品质的产品, 并提供快速的交付周期和售后服务。■



INTRODUCING eBOOK COLLECTIONS FOR INDIVIDUAL USERS

欢迎按您的专业领域订购电子书合集

现在面向个人读者推出优惠价: \$449/£310起

您可以在一个地方轻松找到您的项目所需的专著。
可在几分钟而不是几小时内就找到基本的事实、定理和实际示例。

合集包括:

通讯网络工程 (75本) • 天线与电磁学 (65本) • 移动/卫星通信与GNSS (114本) • 微波工程 (92本) • 国防工程 (105本) • 计算与安全 (72本) • 电源和传感器 (67本) • 全集 (包括以上所有和相关领域的其他专著)

访问 www.ArtechHouse.com 立即订购

应对未来挑战的雷达传感器测试解决方案

Radar Sensor Testing solutions for upcoming challenges

NOFFZ Technologies, www.noffz.com

NOFFZ开发的UTP 5065 RTS雷达测试系统(图1)是一种紧凑型测试方案,可应用于生产终端测试。UTP 5065除传感器校准外,还可以根据客户要求如下测量:EIRP,角度关联信号分析,信号故障,噪声测量(SNR),功能测试,PIN测试,波形分析,脉冲宽度,占用带宽,中心频率,时域信号分析,RAMP分析。

UTP 5065装配有高精度多轴DUT定位的机构装置。雷达传感器在水平(方位角)和垂直面(仰角)都可以围绕传感器波束中心旋转(图2),波束中心也被用于天线特性测量。另一个线性运动机构将DUT对准测试位置并执行输送和返回操作。DUT的测量和校准是在一个暗室(图3)中进行,这极大地减少了来自外部的辐射,也避免了暗室内部的多次反射。



图1: UTP 5065 RTS 测试系统。

在校准过程中,将在方位(水平)和仰角(垂直)极化方向测量RX/TX天线特性(图4)。该校准测试允许DUT在运动方向、相对距离、大小和相对速度等方面尽可能精确地对障碍物追踪和

分类。

目标模拟

UTP 5065中集成了频宽为4GHz的目标模拟器。它能够完成在单个目标和目标速度可变条件下的信号延迟处理和在不同距离条件下进行目标调节合成。

喇叭天线将侦测到的雷达辐射信号转换成数字或模拟的光信号。通过数字延迟得到所需的延迟信号,相当于模拟目标距离。改变发射功率可修改目标大小或雷达散射截面(RCS)。使用带有本振频率的RF混频器对输出频率微调,相对速度也将发生变化。“多普勒频移”表示目标的相对移动速度。

不同独立目标可在同一方向或相对角度来进行模拟。目标的发射天线可以以不同角度在暗室中布置。这样做的优点是传感器可以在距离目标模拟器较远、不同目标参数的紧凑测试环境中进行。

传感器验证测试

雷达传感器测试系统还可应用于验证性测试。验证性测试的要求与生产终端测试有很大的不同,因此许多相关设计必须在开始得到考虑。在验证性测试中,需要对传感器的特性进行测试,并考虑产品使用时的极限值。所以需要实现不同测试参数的模拟和测试环境的变化,特别是:

- 用环境箱取代标准设备中待测产品载入部分,实现在加热条件下进行测试;
- 单个或多个目标模拟;
- 部署一个或多个角反射器或真实目标障碍物;
- 目标障碍物的机械运动;
- 干扰信号注入;
- 在方位角和仰角方向进行传感器双轴移动;
- 在目标方向上线性微调修改和调整相对距离;
- 增加额外的暗室模块来延长目标距离;
- 集成材料探头装置,用以鉴别不同材料属性(如塑料、金属喷涂等)或分析天线罩性能。

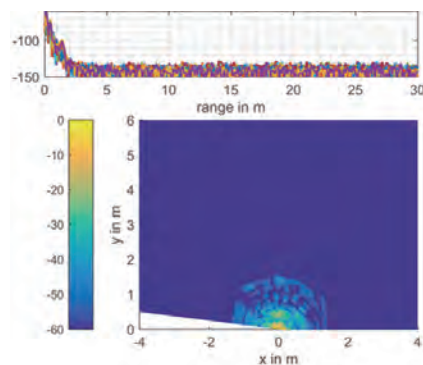


图3: UTP 5065微波暗室测量。

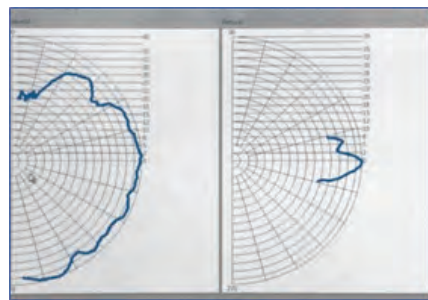


图4: UTP 5065天线特性。

应用领域

通常UTP 5065测试系统可用于天线、收发接收模块等,频率范围覆盖868MHz到80GHz+,但汽车雷达传感器是主要应用领域。

UTP 5065测试系统在OTA领域中也应用于RFID、车载多媒体娱乐系统、Wi-Fi、4G、5G或其他ISM频段测试。

UTP 5065 RTS关键指标

- 垂直占地面积仅0.8 m × 1.5 m;
- 在方位角和仰角方向上进行高精度双轴相对运动;
- 传感器放置兼容手动和自动操作;
- 正面或背面都支持手动或自动放置;
- 自动化生产中支持将多个UTP 5065并排部署成一个测试组;
- 高度紧凑的DUT夹具设计可极大地减少微波暗室内部的反射;
- 方便与外部自动化设备连接(如机械手、拾取和放置多轴处理模块);
- 微波暗室反射特性分析。■

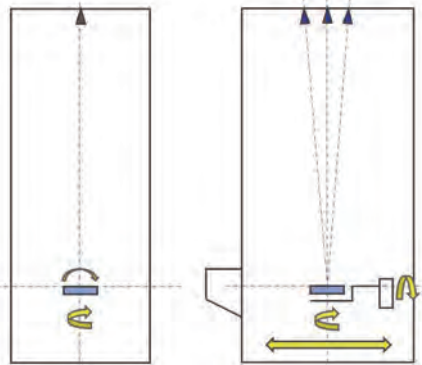


图2: UTP 5065 RTS三轴运动示意图。



自动校准可加快VNA校准速度并减少错误

Automatic Calibration Speeds VNA Calibration, Reduces Errors

Copper Mountain Technologies, www.coppermountaintech.com

Copper Mountain Technologies (CMT) 发布了一项自动校准模块 (ACM)，以加快矢量网络分析仪 (VNA) 的校准速度，尽量减少人为误差，同时减少VNA和RF电缆的磨损。ACM2506最大限度减少了校准VNA所需的步骤。对于一个完整的两端口校准，使用机械标准的传统校准程序需要七次连接，相比之下ACM的每一个端口只需与VNA连接一次。

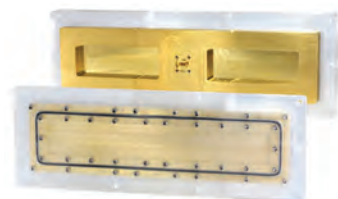
ACM2506的工作范围覆盖20kHz到6.5GHz，通过USB全自动控制和供电。

CMT VNA具有内置功能，可使用ACM一键式自动校准。该模块逐个切换到校准所需的阻抗状态，并利用在每种状态下测得的S参数计算校准系数，这些S参数被存储在存储器中。

ACM包括一个20dB的内嵌衰减器，该衰减器在出厂时就已标定，可用于模拟被测设备 (DUT)。校准后，ACM将DUT工厂数据下载到内存中，并将其与衰减器测得的S参数进行比较，

以验证校准。该存储器还可存储多达三个用户的标定数据，在设置时包括转接器和夹具。ACM2506的两个50欧姆端口可以安装N型或3.5mm连接器。

热补偿可以在64°F到82°F的整个工作温度范围内提高校准精度。每个模块的温度相关性已在工厂进行了测量，相关数据保存在设备存储器中，因此在使用中，该软件可以补偿环境温度的变化。■



缝隙波导阵列天线

Slotted Waveguide Array Antenna

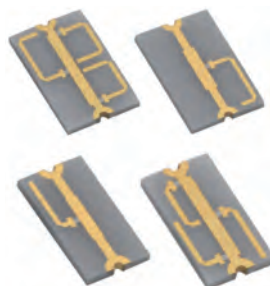
Eravant, formerly SAGE Millimeter, www.eravant.com

缝隙天线是偶极子天线的互补形式，其缝隙长为 $\lambda/2$ ，宽度远小于一个波长。天线传播基于谐振辐射器的巴比涅原理。偶极子和缝隙天线的最重要的区别在于在一个方向上的场分量呈现互换分布。由于水平方向上垂直电场的存在，缝隙阵列可以分布在移动物体的表面，而不引入很大的空气阻力和风负载。对于相同尺寸的缝隙波导天线和其他平面天线，缝隙波导天线具有更高的效率。缝隙馈电形式的多样性、不易受天气影响以及机械稳定性使得缝隙天线非常适合军事和国防应用。

针对雷达和通讯系统，Eravant (前身为SAGE Millimeter) 开发了一种工作于35GHz、带宽为500MHz的缝隙波导阵列天线，其型号为SAW-3533532716-28-L2-WR。其带宽还可以通过增加缝隙宽度来提高，但随之会引起交叉极化增强，因此需要权衡取舍。SAW-3533532716-28-L2-WR缝隙阵列支持线极化、垂直极化信号，这些信号具有高口径效率及低驻波表现。该天线增益可达27dBi。E面半功率波束宽度为16度，H面半功率宽度为2度。LEXAN聚碳酸酯天线罩使该天线适用于户外场景。它的重量

为1磅，体积很小，仅为11.84英寸×3.85英寸，厚度仅为0.93英寸，易于安装，并使整个结构的动态负载降至最低。标准WR28波导法兰 (UG-599/U) 中用于O形圈的凹槽将连接接口压紧密封。将天线和T/R双工器、双通道I/O接收器和振荡器集成在一起，是一套完整的封装，可以应用于许多系统，例如交通管理、执法、通信和军事监视。

Eravant提供的缝隙阵列天线范围为WR90至WR10，并采用MIL-F-3922指定的标准法兰作为微波连接器接口。■



史密斯英特康推出最新CEX系列高频表面贴装芯片均衡器。该系列是一种完全无源的解决方案，具备多种斜率和频带选项。该系列包含了正斜率线性增益均衡器，能够帮助射频工程师获得更高的

高频芯片均衡器可实现频率增益变化

史密斯英特康, www.smithsinterconnect.cn

频率补偿精度。CEX系列旨在为客户提供可配置的设计方案。凭借最高可达4dB的斜率，该设计方案可满足最大40GHz的各类频率需求，允许客户针对特定的频率范围和斜率选择其所需的解决方案。

- 可配置的设计方案，针对频率增益变化提供更优化的解决方案
- 多种斜率选项 (1-4dB) 和极佳的斜率线性 ($\pm 0.25\text{dB}$ 或更高)

- 典型电压驻波比最大为1.5:1，且插入损耗低，最高仅为1-1.25dB
- 频率高达40GHz，支持各类市场应用
- 采用经验证的薄膜和厚膜技术，可提供经济高效、便于使用的表面贴装解决方案，实现小尺寸、轻重量及低功耗
- 电气和热性能均已通过模拟分析和实际测试，以确保产品资质合格。■

5W、400MHz低通滤波器

Mini-Circuits的VLFG-400+是紧凑型同轴低通滤波器，非常适合接收器和宽带UHF/VHF无线电中的谐波抑制。它在DC到400MHz的典型通带损耗低至1dB，超过400MHz后损耗逐渐上升，至520MHz的截止频率时为3dB。通带VSWR也很低，通常为1.30:1。在800至2500MHz之间的阻带抑制通常为31dB，在2500至4500MHz之间通常为23dB。该紧凑型滤波器具有坚固的一体式结构，带有SMA公头和SMA母头连接器。符合RoHS要求的该低通滤波器的长度为36.32毫米，宽度为10.41毫米，在-55至+100度的工作温度范围内可处理高达5W的输入功率。



1至50MHz双向耦合器

Mini-Circuits的ZABDC50-51HP+是一种1至50MHz高功率双向耦合器，在一个小封装中通常可处理高达100W（30MHz以下）和50W（50MHz以下）的功率。它的标称耦合在1至30MHz范围内通常为 49.5 ± 1 dB，在30至50MHz范围内为 51.5 ± 1.5 dB。典型的方向性是：从1到30MHz为30dB，从30到50MHz为20dB。主线插入损耗（包括耦合损耗）从1到30MHz通常为0.02dB，从30到50MHz为0.06dB。该50Ω双向耦合器符合RoHS要求，封装在金属外壳中，输入和输出端口带有N型连接器，正向和反向耦合端口带有SMA连接器。它非常适合商用和军用HF无线电和测试装置，尺寸为 $50.80 \times 50.80 \times 24.13$ 毫米，工作温度范围为-55至+75℃。



40-60GHz有源倍频器

上海鳌太电子科技有限公司发布了一款全频段U波段有源倍频器。该倍频器输入10-15GHz，驱动功率为+8dBm，输出频率为40-60GHz，输出功率达+18dBm。采用先进工艺的砷化镓芯片，输入和输出都有放大器，保证了较低驱动功率下，有较高的功率输出。输入端采用SMA接头，输出端采用标准WR-19波导接口。采用+5V单一供电，简化了客户的供电系统。该倍频器可用于测试测量、雷达通信及ROF（光纤承载射频）等领域。



20GHz监测接收机（光口）

Signal Hound公司发布了便携式实时频谱仪及监测接收机SM200C，其频率范围为100 kHz~20 GHz，具有160 MHz的瞬时带宽，110 dB的动态范围，在30 kHz，RBW（使用Nuttall窗）具有1THz/s的扫频速度以及足够低的相位噪声，对EVM的测量贡献不到0.1%，可以媲美市场上最昂贵的频谱分析仪。SM200C基于万兆网口，通过SFP收发模块连接光纤进行通信，这样既可以实现远距离控制，又可以实现160MHz带宽IQ数据实时流盘。SM200C长宽26cm和18.3cm，厚度5.5cm（工作温度扩展型号厚度为7cm），重量在4.2kg内，不管是实验室信号分析仪应用还是频谱监测部署都极具优势。



14GHz和18GHz单端口矢网

美国Copper Mountain（铜山科技）公司推出覆盖14GHz和18GHz的单端口矢网R140和R180。实验室级的测量精度、极快的扫描速度可以给5G、Wi-Fi天线设计和生产提供极高性价比的矢量网络分析仪方案，并且R系列矢网都只有手掌大小，丰富的控制协议非常易于集成，也可极大地提高生产测试效率。R系列单端口矢网最快速度可达100μs每点，最多可设置10万个扫描点数，并标配时域分析功能，多台R系列矢网还可实现传输（S21）的幅度测量。



亚太赫兹超宽带信号分析

罗德与施瓦茨公司成功演示了D波段140GHz下的数千兆比特数据传输，为太赫兹频段的研究铺平了道路。该套演示装置包括一台配有R&S FSW-B8001选件的高端信号和频谱分析仪，支持高达8.3GHz的内部分析带宽。在这套测试装置中，宽带基带信号通过上变频器R&S TC RSE上变频到所选的140GHz频率。全球领先的模拟信号发生器R&S SMA100B为上变频器提供本振信号。上变频器连接喇叭天线后，实现空间信号传输，发射信号在远端通过另一个喇叭天线接收并进行下变频。R&S FSW-B8001可以分析信号并进行信号质量测试，例如误差矢量幅度测试，以评估传输性能。



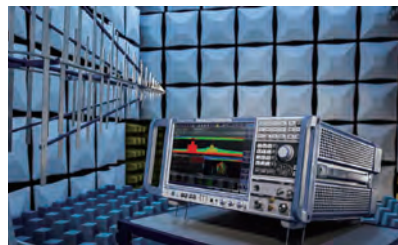
5G基站测试解决方案

罗德与施瓦茨公司不断扩展其针对5G基站以及相关的大规模多人多出（MIMO）天线阵列和放大器的测试解决方案组合。亮点包括专用于5G FR2前端模块的OTA测试解决方案，还有速度得到优化的针对5G基站的测试解决方案。两者都是生产测试的理想选择。还有一个新的、创新的测试解决方案，使开发人员可以在FR1频率范围进行高达4x4 MIMO跨信道测量。



EMI测试接收机增加省时功能

罗德与施瓦茨公司R&S ESW EMI测试接收机集成了作为标准配置的快速时域扫描功能。两倍带宽的快速时域扫描功能提高了测量速度。并且新增R&S ESW-K58 Multi CISPR



APD功能选件。它能精确地显示干扰对数字通信系统的影响。R&S ESW具有卓越的射频特性，测量范围从1Hz至44GHz。ESW的高动态范围和测量精度满足电磁干扰一致性测试的最高要求，并满足所有相关的电磁干扰标准的最严苛的认证测量要求，如CISPR、EN、MIL-STD-461、DO-160和FCC。

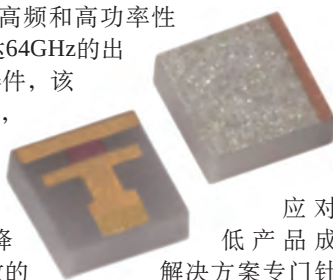
双通道Ku波段隔离分配器

史密斯英特康的SpaceNXT™ MWC系列是一款高可靠的双通道Ku波段隔离分配器，专为MEO/GEO卫星和深空探测器等各类航空航天应用而设计。SpaceNXT MWC无需客户再进行产品测试，精简和优化了客户的采购流程。该系列适用于公认标准的测试序列，从而进一步简化技术规范 and 定义过程，帮助客户在最有限的时间内完成项目、降低成本。SpaceNXT MWC工作频率为10.7至12.8 GHz。MWC系列专为提供商用卫星上行链路（也可提供下行链路）而设计，尤其重视实现相位稳定的输出幅度特性。



高频片式负载

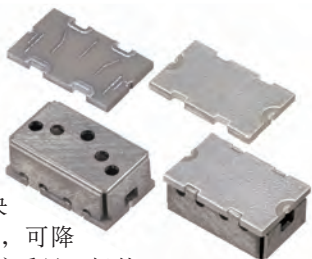
史密斯英特康最新CTX高频可引线接合片式负载系列经优化可在小封装体积中集成高频和高功率性能。最新CTX系列可提供高达64GHz的出色带宽性能。相较于传统元器件，该系列产品信号覆盖范围更广，同时可为多个频带范围和应用提供最佳回波损耗。客户仅使用单个芯片就可满足多种实际应用的需求，大大降低产品成本。CTX系列提供的经济高效的解决方案专门针对L频段到V频段的高频片式负载产品需求。其功率级别可根据感兴趣频段做调整，并且能够高效地支持多种应用。



应对
低产品成本

板级陶瓷基厚膜射频滤波器

史密斯英特康的Planar X系列射频滤波器具备带通、带阻、低通和高达18GHz（Ku波段）的高通配置。该产品可表面贴装。借助Planar X系列，史密斯英特康将现有的厚膜处理技术应用于要求高可靠性的严苛环境中的各类介电基板设计，提供了一种经济高效的解决方案：结构紧凑小巧，重量轻，可降低航空航天关键应用的整体系统质量；极佳的抑制特性，可提供卓越的射频性能；采用坚固耐用的材料，适用于严苛环境应用。



5G毫米波OTA测试方案

Microwave Vision Group (MVG) 推出用于5G毫米波OTA测试的全新解决方案StarWave。StarWave结合了智能机械定位器和平面波发生器，可在紧凑的系统中创建精确、直接的远场条件，能同时测试多个不同的频段，从而提升测试效率并缩短5G设备的上市时间。StarWave由一个或几个（最多七个）以90度角被固定在一个垂直并转动的圆盘上的平面波发生器组成。圆盘前侧有一个安装在方位角定位器上的电磁透明桅杆，用于支撑和转动测试中的设备。StarWave围绕被测设备或天线转动这些平面波发生器，进行仰角平面测量。被测设备/天线可以在桅杆上旋转方位角，进行方位角平面测量。



入门级示波器提供专业级测量性能

是德科技发布四款全新的双通道InfiniiVision 1000 X系列示波器。这四款示波器具有50MHz至200MHz带宽，以合理的价格提供专业级测量和功能，包括针对5种硬件串行协议的标准解码功能，以及通过局域网（LAN）和USB实现的远程连接功能。InfiniiVision 1000 X使用了与更高性能的InfiniiVision示波器相同的用户界面和测量技术。直观的前面板可提供15种语言版本，简单易用，且内置丰富功能，可以帮助客户快速了解示波器的功能和选件（包括复杂分析选件的设置技巧），并提高整体测试效率。



支持110GHz宽带分析的示波器

是德科技推出一款经济高效的单通道示波器UXR0051AP，旨在加速开发新一代的毫米波通信、卫星通信和雷达应用。该产品具有110GHz的频率范围和5GHz标准分析带宽，能够快速灵活地执行宽带测量分析。是德科技的UXR系列示波器可以选配毫米波宽带分析选件，从而将时域信号分析、频谱分析和数字解调功能综合到一台仪器中，实现了出色的信号完整性和丰富的功能。



5G核心网测试解决方案

是德科技推出LoadCore 5G核心网（5GC）测试软件。该软件可以仿真复杂的真实用户模型，使移动运营商和网络设备制造商能够验证5GC承载语音和数据通信业务的性能及可靠性。它是是德科技综合测试解决方案产品组合中的一个组件，该产品组合支持对互联生态系统持续验证从RAN边缘到云端的网络性能。LoadCore支持用户执行网络容量测试、测量设备的数据吞吐量以及对各种最终用户特性和移动通信场景进行建模。



Wi-Fi 6E芯片组

安森美半导体的QCS-AX2芯片组系列已提供样品，支持基于增强的Wi-Fi 6E标准的6 GHz频段。新产品的的设计采用高性能、灵活的架构，以最大化6 GHz频段的使用，优化用于高吞吐量Wi-Fi应用，如密集环境和偏远地区的接入点、网关和格形网方案。QCS-AX2系列基于集成的基带和射频架构，支持关键的Wi-Fi 6E特性，如正交频分多址、多用户多输入多输出、160 MHz通道以及SmartScan通道选择。



Advertiser	广告客户	网址	页码
Anokiwave		www.anokiwave.com	7
ARTECH HOUSE		ArtechHouse.com	59
CIOE 2020		www.cioe.cn	51
Dalicap	达利凯普	www.dalicap.com	27
Digi-Key Electronics		www.digikey.com.cn	11
Ducommun		www.ducommun.com	30
EPX Microwave, Inc.,		www.epxmicrowave.com	21
EDI CON China 2020	电子设计创新大会	www.mwjournlchina.com/edicon	BC
EDI CON Online		www.edicononline.com	IBC
Fulai	馥莱	www.fulai-elec.com	19
Frontlynk		www.frontlynk.com	17
Gwave Technology	谷波互连	www.mwstore.com	14
Hexagold	六方钰成	www.hexagold.net	55
虹科电子		www.hkaco.com	10
INGUN	英冈	www.ingun.com	2
Mini-Circuits		www.minicircuits.com	29, 33, 37, 39, 43, 47, 49
伟博电讯		www.mitron.cn	31, 35, 41, 45
Noffz		noffz.com	12
Pasternack		www.pasternack.cn	5
Qorvo		cn.qorvo.com/wi-fi	3
Qotana Technologies Co., Ltd.	成都玖信科技	www.qotana.com	23
Rohde & Schwarz	罗德与施瓦茨	www.rohde-schwarz.com.cn	9
Sainty-Tech	南京舜特科	www.coppermountaintech.com	15
Shanghai Huaxiang	上海华湘	www.shx-sh.com	4
Smiths Interconnect		www.smithsinterconnect.cn	36
Spectrum Instrumentation		www.spectrum-instrumentation.com	25
TECDIA	科钻	www.tecdia.com.cn	53
Win Semiconductors Corp.		www.winfoundry.com	IFC
W.L. Gore		gore.com.cn/test	1
益丰电子		www.yifengelectronics.com	13

行政及销售人员 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

US Head Office (美国总部)

Horizon House
685 Canton Street Norwood, MA 02062
Tel: (800) 966-8526

China Office (中国办事处)

ACT International (雅时国际商讯)
13/F Unit B Por Yen Building
478 Castle Peak Road, Kln., Hong Kong
Tel: (852) 28386298

Publisher 出版人

Carl Sheffres, csheffres@mwjournal.com
Tel: (781) 769-9750

Editor 编辑

Patrick Hindle, phindle@mwjournal.com

Technical Editor 技术编辑

Gary Lerude, glerude@mwjournal.com

Associate Publisher 副出版人

Adonis Mak (麦协林), adonism@actintl.com.hk
Tel: (852) 28386298

China Editor 中国区编辑

Winson Xing (邢文胜), winsonx@actintl.com.hk

销售人员 Sales Offices

Hong Kong, Taiwan (香港、台湾)

Mark Mak (麦协和), markm@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

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
Hatter Yao (姚丽莹), hattery@actintl.com.hk
Tel: 86 139 1771 3422

Shenzhen (深圳)

Tel: 86 755 2598 8571
Jenny Li (李文娟), jennyl@actintl.com.hk
Tel: 86 137 2881 3915
Gavin Hua (华北平), gavin@actintl.com.hk
Tel: 86 139 2526 6434

Beijing (北京)

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

Wuhan (武汉)

Sky Chen (陈燕), skyc@actintl.com.hk
Tel: 86 137 2373 9991

Singapore (新加坡)

Mark Mak (麦协和), markm@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

North America (北美)

Eastern Reg. Sales Mgr.
Michael Hallman, mhallman@mwjournal.com

Northeast Reg. Sales Mgr.
Jaime Leger, jleger@mwjournal.com

Western Reg. Sales Mgr.
Brian Landy, blandy@mwjournal.com
Tel: 831 426 4143

Europe (欧洲)

International Sales Mgr.
Richard Vaughan, rvaughan@horizonhouse.com
Tel: 44 207 596 8742

Germany (德国)

Brigitte Beranek, bberanek@horizonhouse.com
Tel: 49 7125 407 31 18

Israel (以色列)

Dan Aronovic, aronovic@actcom.co.il
Tel: 972 50 799 1121/ 972 9 899 5813

Korea (韩国)

Young-Seoh Chinn, yschinn@horizonhouse.com
Tel: 82 2 481 3411

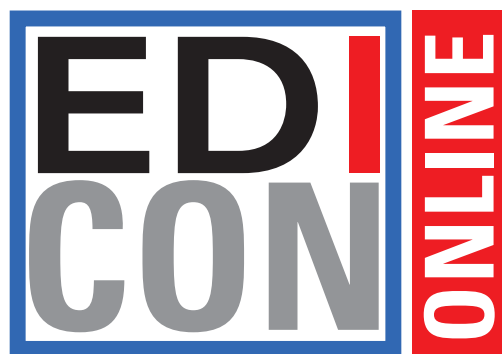
Japan (日本)

Katsuhiko Ishii, amskatsu@dream.com
Tel: 81 90 2551 1996/ 81 3 5691 3335

请添加到
您的
日程表中



4场免费的专题研讨会：



10月6日

5G/物联网/
汽车

10月13日

电路板/
互连设计

10月20日

信号完整性/
电源完整性

10月27日

雷达/天线

白金赞助商：



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

ROHDE & SCHWARZ
Make ideas real



samtec

WWW.EDICONONLINE.COM

注册已经开始了

EDI
CON

2020

Electronic Design Innovation Conference

电子设计创新大会

2020年秋季

国家会议中心，北京，中国

- ▶ 5G/先进通信
- ▶ 毫米波技术
- ▶ 放大器设计
- ▶ 电磁兼容/电磁干扰
- ▶ 低功耗射频和物联网
- ▶ 前端设计
- ▶ 电源完整性
- ▶ 雷达和国防
- ▶ 射频和微波设计
- ▶ 信号完整性
- ▶ 仿真和建模
- ▶ 测试和测量

访问www.mwjjournalchina.com/edicon注册参会

Microwave
Journal China
微波杂志

网站白皮书频道
免费下载



www.mwjjournalchina.com/white_paper.asp