

面声波/体声波滤波器市场 新选手提供新方案

SAW/BAW New Market Entrants Offer New Approaches

编者按：随着4G/LTE蜂窝频段数量的增加，移动射频前端的关键器件已从功率放大器转移到了滤波器。当前移动射频前端集成了40多个滤波器，并且这个数量还在增长。人们正使用面声波（SAW）以及最近的体声波（BAW）滤波器技术应对上述挑战。这一增长吸引了新选手进入市场。为此，《微波杂志》汇集了三家公司——Akoustis、OnScale和Resonant——的信息，它们为SAW/BAW市场提供了新的解决方案。

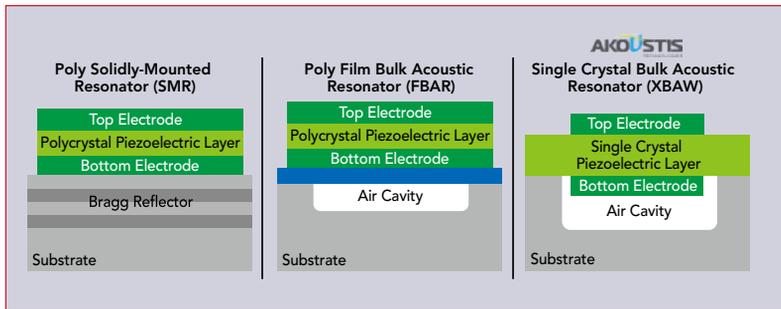


图1: BAW谐振器横截面。

XBAW射频滤波器正向更高频段进军

XBAW RF Filter Blazing Into Higher Frequency Spectrum

Dave Aichele,
Akoustis Technologies,
Huntersville, N.C.

BAW射频滤波器是主要用于智能手机的高性能半导体器件。与SAW和陶瓷滤波器相比，它们满足了高集成度对尺寸的严格要求，并具有卓越的性能，从而延长了电池寿命并减

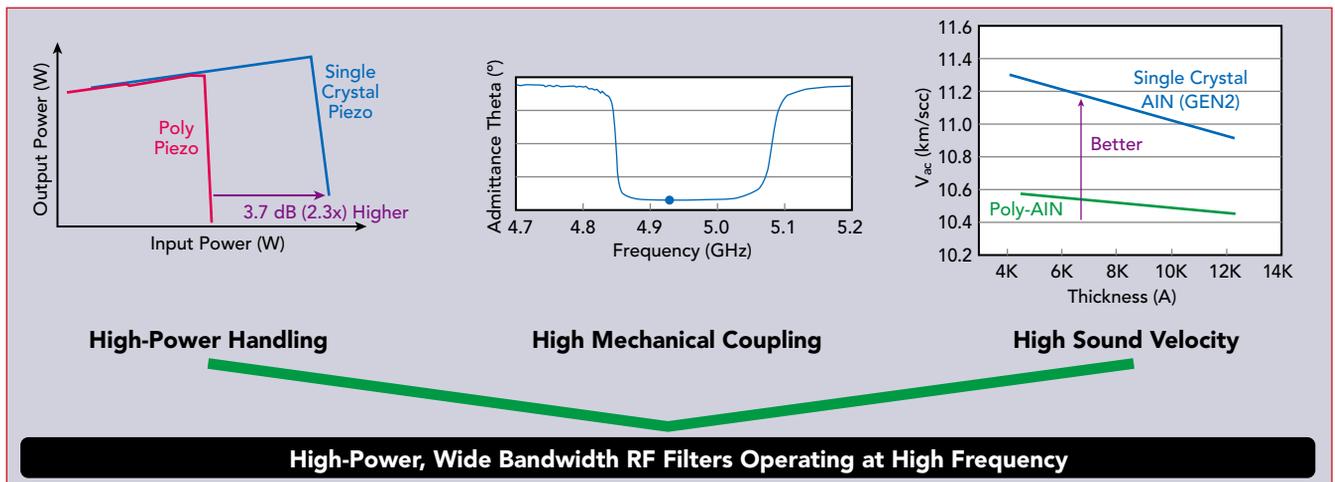


图2: 单晶压电材料的3大优势。

射频开关解决方案 从DC至110GHz

在所有高频测试中您都可以信赖

Ducommun的射频产品。

Ducommun提供高达46GHz

的同轴开关和高达110GHz的

pin二极管全系产品。



DC-46GHz 同轴开关

- 2.4mm, 2.92mm, SMA, TNC, N
- 出色的射频性能
- 内置50Ω端子
- 高功率、真空、热切换



射频开关矩阵

- 图形化用户界面
- USB/RS-232以太网控制接口
- 无NRE (非经常性工程) 费用
- 模块化设计



台式开关

- 可配置开关
- USB、以太网控制接口
- 图形用户界面 (GUI)
- 低成本方案



空间开关

- SPDT、转换、多掷和开关矩阵配置
- 超过30年的空间开关经验



Pin 二极管开关

- SPST至SP8T配置
- 纳秒 (ns) 级开关
- 0.03GHz至110GHz
- 反射式和吸收式



更多信息请联系我们的销售团队：

310-513-7256 或 rfsales@ducommun.com

少了终端用户的掉话次数。这些高性能器件具有低插入损耗和高选择性，可满足高难度FDD、高频TDD 4G / LTE和新兴5G频段苛刻的共存要求。目前的多模多频中高端智能手机使用超过50个滤波器，专家预计5G频段将推动滤波器的使用数量超过70个。

固贴式谐振器 (SMR) (图1左侧) 和薄膜体声波谐振器 (FBAR) (图1中间) 是目前BAW射频滤波器中使用的两种主要的谐振器技术，因为它们具有高Q值、高工作频率和良好的功率处理能力。目前，BAW射频滤波器市场由双寡头垄断，其市场占有率超95%，两家公司的核心材料技术均采用物理气相沉积法 (PVD) 溅射多晶压电氮化铝 (AlN) 技术。

固贴式谐振器 (SMR) (图1左侧) 和薄膜体声波谐振器 (FBAR) (图1中间) 是目前BAW射频滤波器中使用的两种主要的谐振器技术，因为它们具有高Q值、高工作频率和良好的功率处理能力。目前，BAW射频滤波器市场由双寡头垄断，其市场占有率超95%，两家公司的核心材料技术均采用物理气相沉积法 (PVD) 溅射多晶压电氮化铝 (AlN) 技术。

单晶片BAW滤波器技术

在以移动射频滤波器为主导的BAW滤波器市场，Akoustis Technologies是估值58亿美元的新兴企业¹，拥有称为XBAW的BAW谐振器工艺专利权。Akoustis将该专利权与集成设计与制造 (IDM) 商业模式相结合，开辟了新的领域并专注于成为第一个面向3 GHz以上应用的BAW滤波器供应商。

Akoustis推出了一种在BAW滤波器中使用高纯度单晶压电AlN材料的新方法 (见图1右侧)。与PVD多晶AlN相比，外延生长的金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 单晶AlN具有更高的固有晶体质量。晶体质量的提升改善了声波速度和压电机械耦合系数。此外，

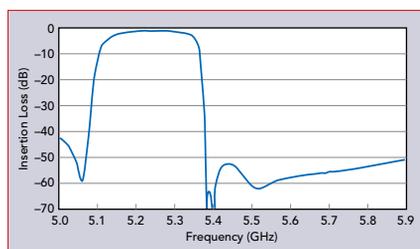


图3: 具有1.2dB插入损耗和50dB衰减的5.2GHz BAW滤波器。

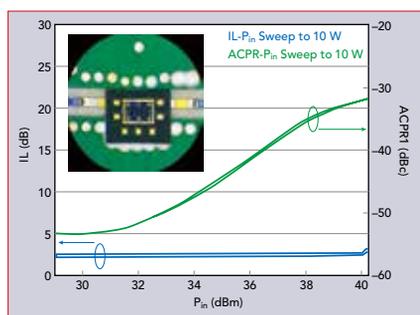


图4: 2.6GHz BAW滤波器——WCDMA临近频道功率比。

单晶AlN的导热率比多晶AlN高2倍。多晶AlN的导热率会随着膜厚度减小而降低，这会导致传统FBAR谐振器的功率容量受到限制，尤其是在较高频率下。在图1所示的所有BAW技术中，谐振频率由材料叠层的厚度和声波的有效传播速度决定。相同厚度的AlN压电材料，较高的传播速度产生较高的工作频率。更高的声波速度、更高的压电系数和更高的导热性，这三个因素使得由单晶外延生长的MOCVD-AlN压电材料构成的XBAW滤波器比基于PVD-AlN的BAW滤波器具有更好的性能 (功率处理能力，插入损耗，带宽和带外抑制)，特别适用于高频和高功率应用 (见图2)。

2017年6月，Akoustis完成了对纽约州卡南代瓜市的一家MEMS工厂的战略收购。通过此次收购以及随后的所有制造工艺的整合，Akoustis现在拥有122,000平方英尺ISO-9001认证的商业化晶圆制造能力，包括150 mm直径晶圆制造100/1000级超净间，和一个负责XBAW滤波器的研究、开发和生产的运营团队。此外，Akoustis正在为MEMS晶圆的加工、封装和组装进行美国国防部 (DoD) 的“可信晶圆厂 (Trusted Foundry)”认证。需要专用滤波器的DoD项目通常需要“可信晶圆厂”认证，Akoustis正致力于成为此类项目的供应商。

BAW滤波器市场

Akoustis是唯一一家BAW滤波器单一业务公司，公司业务针对移动高频段4G/LTE和新兴5G应用。这是迄今为止最大的市场，由滤波器相关厂商组成，涉及手机OEM和ODM、射频前端 (RFFE) 模块制造商 (有一些采用自主BAW滤波器技术) 和收发器制造商。5G增强型移动宽带 (eMBB) 功能需要更高频率和更宽带宽，这将对现有的SAW和多晶BAW滤波器技术产生不利影响。单晶BAW技术将开发更高性能、更宽带宽的BAW滤波器，适用于工作频率为2.6至5 GHz，带宽在200至900 MHz的5G n41、n77、n78和n79频段 (或子频段)。

除移动市场外，还有另外两个市场可以使用单晶BAW技术。随着Wi-Fi基础设施的复杂性不断增加，包括802.11ac多用户MIMO (MU-MIMO) 在内的先进Wi-Fi CPE架构正在经历更快的发展，推动了对小型化器件的需求。预计这种趋势将持续下去，特别是下一代三频路由器中802.11ax标准的确定和实施，其将同时工作在2.4、5.2和5.6 GHz。超窄带5.2 GHz BAW滤波器在160

MHz范围内提供1.2 dB低插入损耗，覆盖U-NII-1和U-NII-2A频段，在345 MHz范围内具有52 dB的典型衰减，以满足与U-NII-2C和U-NII-3频段共存的严格抑制要求（见图3）。现有的介质谐振器（DR）滤波器尺寸要大23倍，需要屏蔽罩解决干扰带来的隔离问题。

基础设施市场正在研究全维度MIMO或大规模 MIMO架构，这些架构使用大规模天线阵列，每个阵列单元都有自己的收发器，可以提供更高的频谱效率。这些新的基站系统可能是新兴5G的主要解决方案，也是4.5G和4.9G LTE网络中传统宏小区BTS的替代方案。FD-MIMO架构支持FDD和TDD频段，并在工作频率为2至5 GHz的32T32R至64T64R配置中提供1至4 W的平均功率。这些大规模阵列系统将需要一种替代的滤波器技术，实现尺寸/重量的减轻，并且实现大批量表面贴装。传统上，宏单元式腔体滤波器尺寸较大并且通常需要手动组装，因此对于FD-MIMO系统而言并不理想。多晶BAW滤波器用于微微蜂窝和微蜂窝BTS，但可能无法实现1 W以上的功率处理能力。高功率单晶技术为开发5G FD-MIMO系统的主要BTS OEM们提供了非常有潜力的范例。Akoustis展示了安装在标准层压板上的BAW 滤波器芯片，能够在2.6 GHz处理> 10 W的平均功率（见图4）。这种功率处理能力为BAW滤波器的设计提供了充足的功率余量空间，可提供半导体价格水平的小尺寸表面贴装器件。

总结

Akoustis Technologies是数十亿射频滤波器市场的新成员，并通过单晶压电材料的科学创新开辟了自己的道路，为3至6 GHz频段提供高性能BAW 滤波器，用于新兴5G移动、Wi-Fi和基础设施应用。除了这些最大的市场，Akoustis还在关注其他市场，如汽车C-V2X（或DSRC）以及用于L、S、C和X波段相控阵雷达和通信系统的军用IF / RF滤波器。

为用于5G的下一代射频滤波器的设计赋能

Enabling Design of Next-Generation RF Filters for 5G

Gerry Harvey,
OnScale,
Cupertino, Calif.



图5：谐振时的SAW滤波器三维全波仿真模型。

虽然4G LTE和LTE-Advanced技术仍在全球部署，但下一代无线通信承诺在吞吐量、延迟和可扩展性方面实现巨大升级。到2025年，新兴的无线5G市场预计将达到2500亿美元的总价值²。SAW滤波器和BAW滤波器已经用于4G设备，并将争夺新兴的5G市场。5G手机所需的滤波器数量将大幅增加，其中4G型号已采用40多个滤波器。这使得5G制造商有责任快速进行滤波器的创新设计，以占据不断增长的市场份额。这些创新具有“赢家通吃”的前景，例如FBAR滤波器引入了一个全新的产品，占据了很大一部分4G/LTE市场。

SAW/BAW的设计

为了帮助推动这一新的创新，OnScale开发了一个支持云

的仿真平台，该平台针对压电器件（如SAW和BAW）的多物理场分析进行了优化。这一平台可以降低这类产品成本、风险和上市时间。

由于器件的复杂性和尺寸，SAW/BAW滤波器的优化是一项具有挑战性的任务。OnScale的仿真平台非常适合这类问题，其采用高效的有限元分析方法（FEA）并在云端进行无缝链接。图5显示了一个SAW滤波器的3维模型，它具有100对交

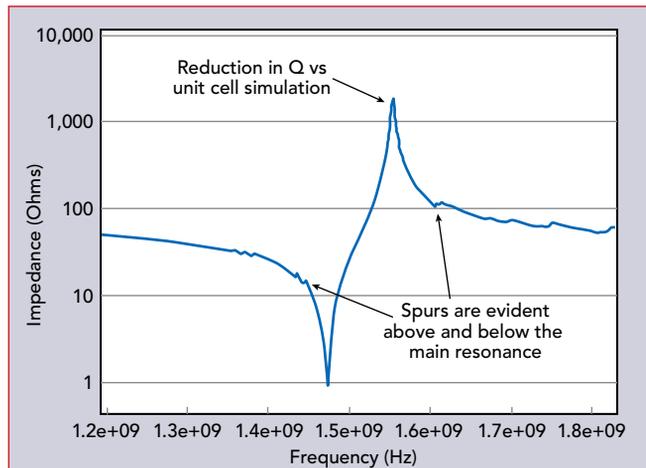


图6：三维全波优化后的SAW滤波器阻抗曲线。

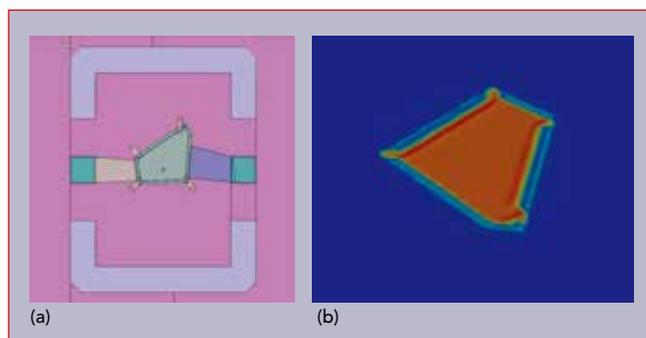


图7：导入的GDSII模型和五边形FBAR滤波器的仿真。

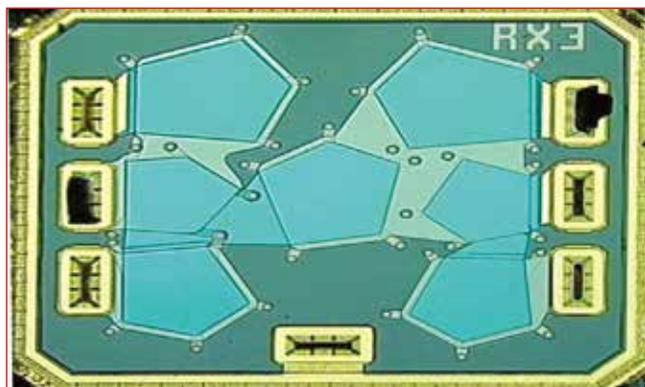


图8：采用多个五边形谐振器的FBAR芯片照片³。

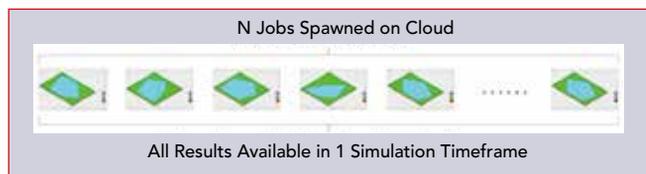


图9：云端并行求解。

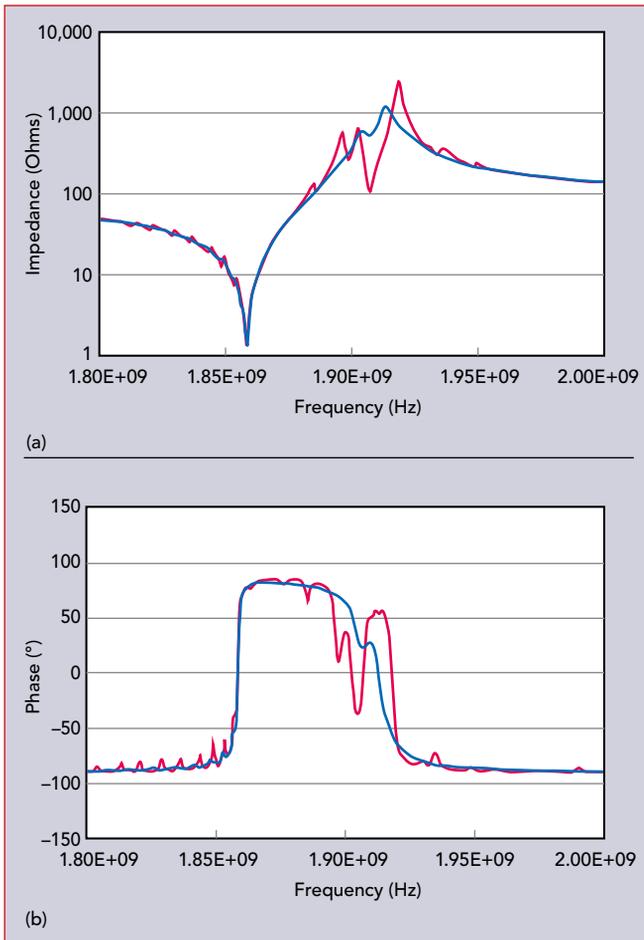


图10: 简单的方形设计 (红色) 和优化后的五边形设计 (蓝色) 对比。

又结构和20个栅指。放大部分显示在给定时间步长下表面波速度的仿真结果。整个模型可以在几个小时内运行完毕,这是一项壮举,即使是市场上最强大的传统求解器通常也无法做到。

该设计的优化过程通过云平台完成,云平台上可以同时为数百个这种模型的仿真,以分析特定参数的变化对设计的影响。其中一次迭代获得了最佳点,此时Q值最大,滤波器的阻抗毛刺最小。图6显示了本例中所选设计滤波器的阻抗与频率的关系。

FBAR设计实例

与表面硅和体硅滤波器不同,FBAR滤波器在谐振频率为100 MHz至10 GHz的腔体上使用压电薄膜。根据性能要求,可以使用各种不同的形状和尺寸,早期设计采用方形结构,更先进的设计采用五边形结构。图7a是从GDSII文件导入OnScale的五边形FBAR谐振器的结构。瞬时表面速度的仿真结果如图7b所示。

设计人员面临的主要挑战是确保滤波器不产生较强的破坏通带性能的横向

谐振。图8所示结构具有非平行边的谐振器,与具有平行边的谐振器相比,可以实现较弱的横向谐振。然而,凭经验优化这些形状是昂贵且耗时的。理想情况下,工程师会使用三维全波仿真进行优化,但由于传统FEM工具需要巨大的计算资源和时间,这种方法并不切实际。云计算解决了这一问题,为这些复杂的电子-机械系统提供了快速分析,并为工程师开辟了全新的解决途径。

我们通过构建一个五边形结构的FBAR三维模型验证这一功能,模型使用遗传算法优化滤波器,以实现最小化的横向谐振为优化目标。遗传算法模拟自然选择过程,以指导候选设计的连续群体朝向

全局最优。每个设计群体在云上并行仿真,如图9所示。

该模型运行了52代,共进行了3,640个设计。共运行了68个小时,仅使用了8.67 GB的内存。仿真工具连接到MATLAB的全局优化工具箱,该工具箱允许在运行期间跟踪各种参数,包括当前最佳设计。发现最佳设计的边缘相对

于基板成一定角度,避免了强烈反射,而最差的设计有三个边缘与基板平行,从而导致了横向波模式。

结果可以在图10中看到,其中最好的五边形设计显示与方形器件相比纹波显著减少,方形结构器件是训练的起点。值得注意的是,3,640个设计中的每一个都是在三维模型中进行的,利用传统求解器这项研究在同一计算资源下完成这项仿真将需要近一年的时间。上述结果表明,使用OnScale求解器通过基于云的CAE可以实现设计类型的进一步优化。

总结

尽管缺乏标准,5G仍然承诺为移动电话提供更快的数据速率,并将成为自动驾驶汽车和物联网的推动者。在3 GHz以上频段,从4G到5G数据速率可以获得数量级的提升。但是,传统CAE工具无法完成三维模型仿真,这是进行优化设计和缩短这些高复杂结构产品上市时间的关键步骤。OnScale的云求解器开创了并行分析的可能性,从而降低了原型设计成本并加快了上市时间。

5G射频滤波器设计工具: 无限综合网络

Infinite Synthesized Networks Deliver RF Filter Design Tools for 5G



4G/LTE是面向高速移动设备服务的单一技术,而5G则是一系列技术,旨在服务于从超宽带固定无线通信到低数据速率物联网应用的不同场景。向这种新网络技术的过渡将导致滤波器和RFFE复杂性的显著提升。

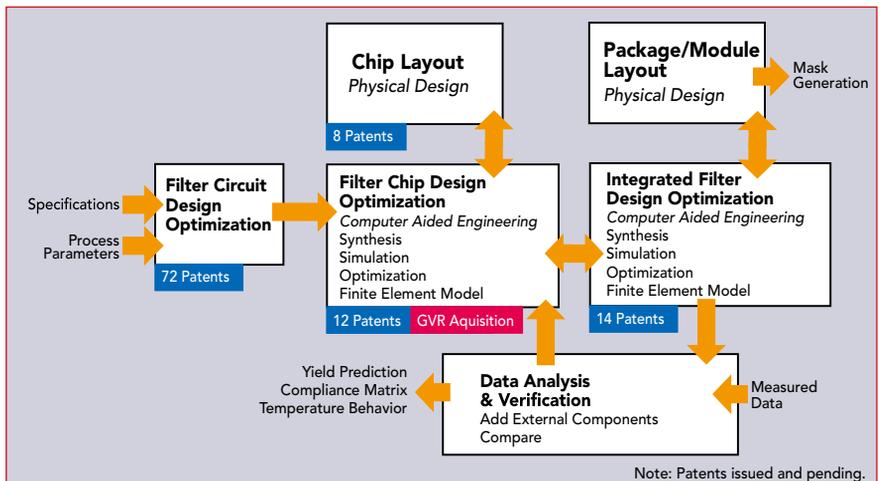


图11: ISN从原始设计到掩膜过程图解。

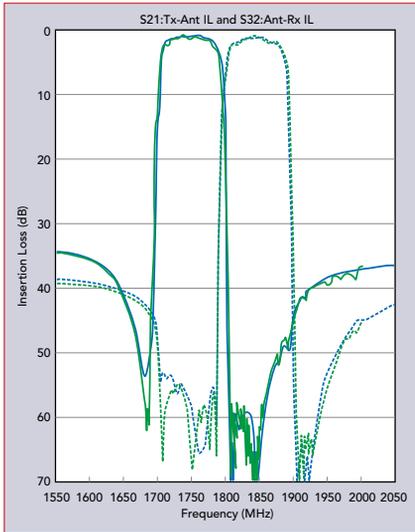


图12: 双工器性能测量结果 (蓝色) 和仿真结果 (绿色)。

5G器件在移动设备的环境包括更高复杂度、更多器件（特别是滤波器）、更多性能需求、更小尺寸和更低成本，以及蜂窝和Wi-Fi网络之间的双连接。这将需要更多带宽，也将需要更高频率的器件、更多的载波聚合 (CA)、更复杂的MIMO天线、新的自适应波形以及更优的干扰抑制。

所有无线产品的5G RFFE设计将受成本、功率效率和移动设备内可用空间的驱动。对5G滤波器的需求将包括复杂的多路复用功能、集成度的提高、更多的滤波器以及处理比当前更高频率的能力。

RESONANT无限综合网络

为了满足这些需求，Resonant开发了一种称为无限综合网络 (ISN) 的全面滤波器电子设计自动化 (EDA) 平台。Resonant的ISN平台具有以下功能：

- 现代滤波器理论。
- 有限元建模，包括电磁学和声学。
- 全新的优化算法。
- 提供代工和封装/后端产业链。

ISN最初专注于设计声波滤波器，这是RFFE的关键模块。ISN专门用于解决设计工程师面临的许多5G挑战：速度、灵活性和降低系统成本的工具。截至2018年8月，已有10多家公司声明使用ISN生产了60多种器件。

图11是使用ISN从设计到掩膜的流程示意图。测试证明，ISN的模型非常精确，反映了滤波器结构的物理细节，与加工出来的滤波器的测量性能不仅在损耗和隔离度方面相匹配，而且在功率处理能力和线性度方面也很一致。因此，ISN是一个功能强大的平台，可快

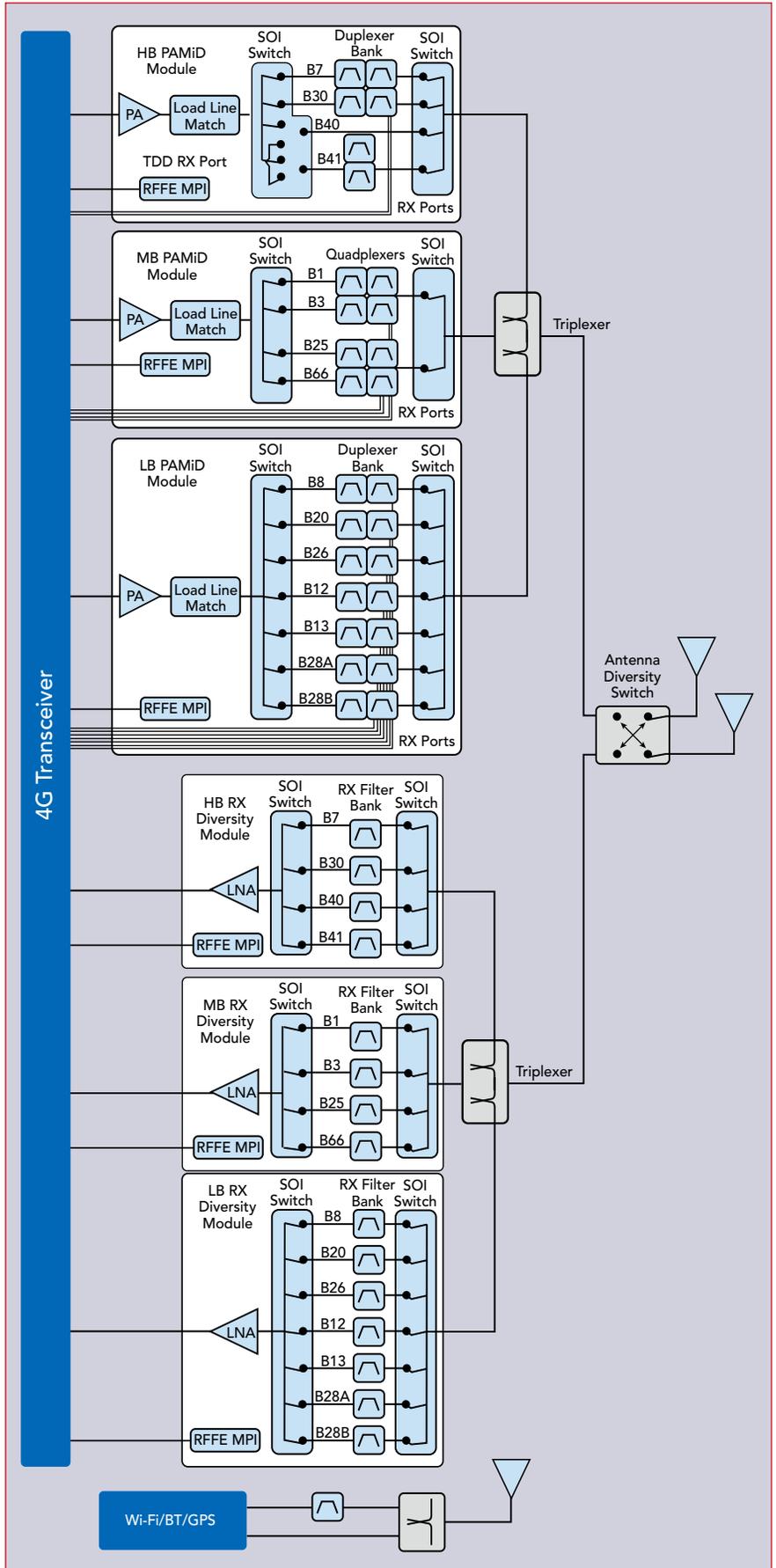


图13: 目前最顶级的射频前端架构。

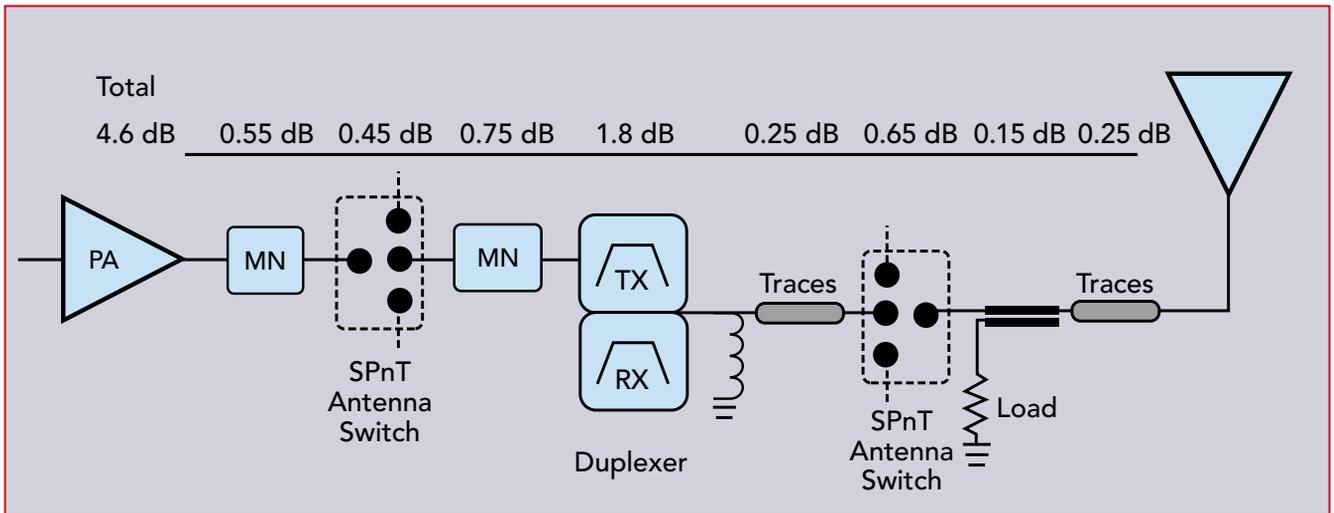


图14: Tx链路器件损耗估计。

速、高效且高成本效益地进行扩展滤波器设计，以满足新兴的5G需求。

传统的声波滤波器设计使用梯形结构和经验模型（链接到特定的晶圆制造商）。这通常会导致滤波器的迭代过程涉及多个代工厂程序，并且可能需要数月或更长时间。ISN平台使滤波器设计团队能够创建优于传统滤波器的新结构，实现占用面积更小、技术成本更低。如图12所示，Band 3双工器ISN模型的仿真结果和实际测量数据非常接近。

ISN在基础材料物理学方面的基础，可以同时优化大量设计并从中筛选，使设计不受传统声波滤波器设计技术的限制。因此，在设计投入批量生产之前，使用ISN的设计人员可以构建宽通带和高功率的多工器并预测产量。

利用ISN，可以同时数千种产品开发并筛选得到最终设计，使其达到最佳性能。同时，利用滤波器设计工程师的专业知识，可以实现越来越多的复杂设计。

对5G射频前端的影响

ISN可用于开发用于4G/LTE和其他无线网络的射频滤波器，但对于需要设计工具的高性能、小尺寸和复杂通带设计优势的5G设计更为重要。

4G/LTE移动智能手机RFFE目前最先进的技术将频谱分为低频段（698至960 MHz）、中频段（1710至2200 MHz）和高频段（2400至3800 MHz）频率，通过隔离射频器件，最大限度地减少串扰，并优化整个功率放大器—滤波器—开关链路（见图13）。虽然器件的集成设计是必然趋势，但5G复杂性的日益提升限制了开发这种复杂RF子系统的数量。

所有具有无线功能的5G产品的

RFFE将受成本、功率效率和设备内可用空间的驱动。因此，它们需要体积小、效率高、能够大批量生产，以满足快速增长的全球市场需求。特别是为物联网设备提供商业化经济型的定制器件，RFFE中的器件数量要降到最低，并且产量必须从当前水平急剧增加以降低单位成本。在当前环境中，大多数物联网设备都是使用最初为批量化手机生产而开发的低成本器件。

随着我们迈向5G，RFFE的复杂性不断增加。例如，除了主天线模块之外，分集天线还可以提供链路健壮性，增加下行链路数据速率。设计人员越来越多地使用接收分集模块来处理分集链路，包括接收（Rx）滤波器和开关（以及越来越多地采用LNA）。要求更高5G数据速率的无线运营商将推动更多载波聚合，从而产生更多潜在干扰。因此，RFFE设计的未来发展方向将是降低复杂性、降低成本、同时提高性能。

5G滤波器需求

滤波器数量的增长以及越来越苛刻的性能要求使射频滤波成为RFFE的关键难点。5G滤波器的基本要求包括由CA驱动的复杂多路复用以及提高集成度并保持RFFE的高性能。尽可能提高上行链路的PA效率和下行链路的接收器灵敏度将需要优化整个射频链路。随着复杂性的增加，理解射频链路和器件之间的任何相互作用至关重要。

隔离、损耗和功率处理能力的要求不断对滤波器性能提出新的挑战。射频链路中的滤波器是损耗的主要原因，这对于总Tx效率（并且最终用于PA和电池寿命的电流消耗）以及Rx路径中的总噪声系数（并且最终用于SNR和数据率）非常关键。图14给出了Tx路径中每个器

件的损耗估计。

针对高速数据传输进行了优化的LTE比诸如CDMA的3G协议提出了高得多的功率要求。因此，隔离度和泄漏到Rx链路的最小能量要求提高，反之亦然。高功率用户设备（HPUE）只会进一步加剧这种情况，后者使用更大的Tx功率来改善小区边缘覆盖率。此外，逐渐变小的滤波器的功率耐久性成为主要问题。

对于5G，大于6 GHz的频率将需要使用不同于当前移动设备中的声波滤波器技术。需要取得重大进展以减小尺寸和成本。用于移动宽带的5G RFFE将非常复杂，滤波器设计的目标是简化设计过程和RFFE本身。

推动5G RFFE的创新主要包括低损耗三工器（以尽可能减少天线数量）、多模多频段PA和多频带滤波器（以减少滤波器和开关的数量），所有这些都需作为一个完整的系统进行优化，以减少匹配器件。

总结

射频复杂度预计将在5G器件中显著增长，现在是滤波器设计工具的最好时机，能够以更少时间和更低资本设计更好、更复杂器件的工具将会凸显其优势。ISN提供了这些需求，它可以设计具有复杂功能的高精度、高集成度和高可制造性滤波器。■

参考文献

1. "RF Front-Ends for Mobile Devices 2018," Mobile Experts Inc., 2018.
2. "5G Wireless Market Worth \$250 Billion by 2025: \$6 Billion Spend Forecast on R&D for 2015–2020," PR Newswire, March 2016.
3. R. Ruby, "A Decade of FBAR Success and What Is Needed for Another Successful Decade," 2011 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2011, pp. 365–369.