

射频前端的发展让 5G 手机成为可能

射频设计的复杂性

十年前，蜂窝设备的射频（RF）设计开始发生根本性的变化，为目前的射频前端，即智能手机中调制解调器和天线之间部分的日益成熟铺平了道路。当时全球正在经历从多种零散的 3G 全球蜂窝技术到统一的 4G 无线标准这一重要过渡阶段，也就是所谓的长期演进(LTE)，迈出了改进蜂窝通信标准以充分利用无线频谱资源漫长旅程中的第一步。

4G LTE 的面世需要一套新的无线技术，以尽可能的利用可用的蜂窝无线频谱，并最高效地使用离散的频谱资源。为了实现这一目标，射频工程师从根本上重塑了射频前端的无线信令和传输架构，增加了载波聚合(Carrier Aggregation)、高阶调制(Higher-Order Modulation)和多入多出(MIMO)天线等主要功能。通过整合更多的无线频谱来整体改善无线连接及性能，移动设备中的射频设计也因此变得相当复杂。

本系列由三部分组成，旨在解密射频前端(RFEE 设计)及技术如何促使 5G 智能手机的面世；探讨为何手机中的射频前端设计变得如此复杂；审视射频前端架构，描述芯片行业如何应对这种复杂性并能持续改善用户体验。

sophistication 射频前端之谜

进入 4G 时代之前，蜂窝无线电设计是一个相当简单的事情。传统的射频前端只需支持屈指可数个不同的无线频率，从而只需要少量的射频元器件和天线来提供下行和上行的功能。但是随着行业开始 4G 的长期演进，射频前端设计必须能够快速扩展，以满足全球各地无线蜂窝应用对频谱增加的需求。

时至今日，在 4G 和 5G 手机中看到支持超过 20 个频段及多个天线的射频前端设计已不罕见。与 3G 相比，4G 起步阶段面对的复杂情况造成了射频前端部分的几何级数式增长。随着行业向 5G 过渡，射频设计的挑战更加复杂，给设备制造商带来了抑制射频复杂性再一次指数级增长的艰巨任务。事实上我们的研究表明，在智能手机的物料(BOM)成本构成上，射频前端部分上升幅度最为显著。而相比射频前端部分成本和复杂度的增长，其他功能区的成本和复杂度仅有小幅增长。

最新的 5G 射频前端设计必须支持新的、更高带宽的 5G 频率，以及越来越多的 LTE 频段组合以应对更高的网络需求。因为大多数 5G 网络推出时使用的是非独立组网 5G；这意味着同时激活两套不同的无线信号，即 5G 和 4G，它们具有不同且独立的射频链接。

5G 标准也助力迎来新的、尚未使用过的 24GHz 以上频谱，通常被称为毫米波频段。这些频段的频宽高达 1GHz，使无线数据传输的峰值速率超过了 7Gbps。但为了实现这种速率，设备设计牺牲了信号覆盖；5G 毫米波的接收和传播在实际应用中更加困难，这也迫使新的无线电技术，如波束成形和波束转向的应用以产生可用的毫米波 5G 连接。

随着 5G 手机中的无线频段和射频元件的数量的增加，设计一个同时支持三代蜂窝无线技术的射频前端变得更加困难。下表说明了随着 3G、4G 和 5G 网络中支持的频段数量的增加，导致射频部分复杂性的失控式增长；对比 11 年前三星 Galaxy 系列的第一代设计，我们可以看到伴随每一次移动网络的迭代而带来支持更多射频频段的需求，以及不断增加的无线带宽对射频前端设计要求的提高。这意味着手机厂商需要着重致力于在控制成本膨胀而产品体积受限的情况下设计出更高性能的射频前端。

	Samsung Galaxy S (2010)	Samsung Galaxy S II (2011)	Samsung Galaxy S10 (2019)
3G	4	4	4
4G	N/A	2	19
5G	N/A	N/A	2

三台设备在每次移动网络迭代支持的无线频段数量

一直以来，射频方面的复杂性及其带来的设计挑战在产品宣传中被隐藏起来不为消费者所知。因为这些复杂性会使产品信息变得模糊不清。智能手机用户不需要也不想了解这种不断增加的复杂性；他们希望无论住在哪里，自己的手机都能随时随地正常工作。

为什么一定要如此复杂？

为实现网络迭代和用户体验的数量级提升，更多的无线频谱被启用。但一个不可忽视的现实是，射频前端设计不能随着对手机无线需求的增加而同步扩展。因为频谱是一种稀缺资源，政府不得不对射频频谱进行配给，造成了今天大多数蜂窝网络无法满足 5G 的预期需求的局面。毫米波技术是一种解决方案，但它的传播效果并不理想，所以射频设计者不能仅仅依靠它来解决频谱紧张的问题。他们需要在消费级设备上实现前所未有的射频组合支持及构建具有最佳兼容性的蜂窝无线设计。

从 Sub-6GHz 到毫米波，所有可用的频谱必须在最新的射频和天线设计中得到利用和支持。而且由于频谱资源的不一致，频分双工和时分双工的功能都必须集成在一个射频前端设计中。另外，载波聚合通过绑定不同频率的频谱来增加虚拟管道带宽，也提升了对射频前端的要求和复杂程度。

此外，无线局域网和 Wi-Fi 不断演进的功能又增加了一层复杂性，因为蜂窝和 Wi-Fi 信号必须保持分离，否则就会出现大量射频干扰的风险。最新的 Wi-Fi 6E 标准已引入 6GHz 的频谱。因此，射频前端必须有先进的过滤技术以避免射频信号的重叠。

智能手机的射频前端设计因为 5G 带来的射频要求指数级增长而变得如此复杂。如今的消费者可以期待厂商解决所有这些射频挑战，但并不能完全了解这种复杂程度是如何演变过来的。从另一个方面来说，如果要想实现普及 5G 的承诺，射频前端设计的复杂性是无法避免的。

当前 5G 手机射频前端的设计

当前射频设计的挑战表现在许多方面。最新的旗舰设备中的实体天线数量从典型的 3 或 4 根大幅提升到 12 根以上；这还不包括毫米波天线模组。下图标明了当前设计中不断增加的天线数量需求，以及需要额外加入的毫米波天线。

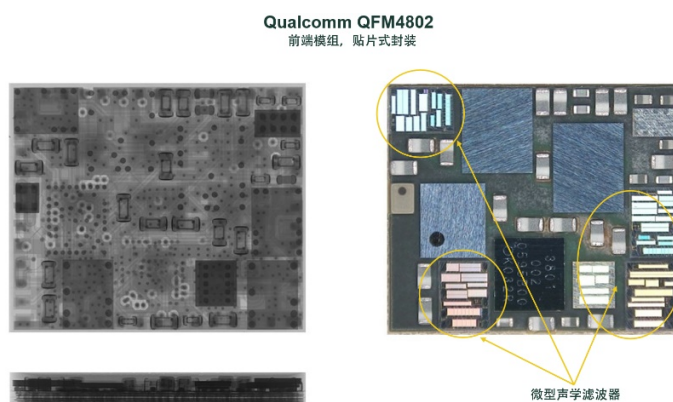


左图：Realme GT 中对应中框位置上的一组 Sub-6GHz 柔性基板天线。

右图：三星 Galaxy A42 中发现的包含两个毫米波天线模组的阵列。

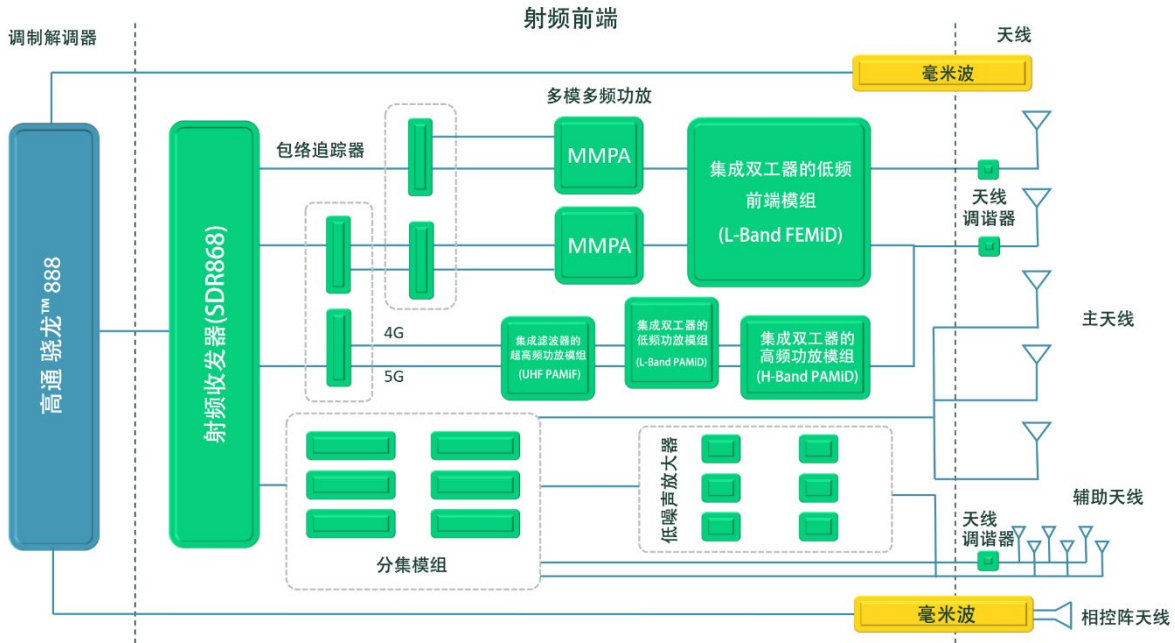
从 4G 发展到 5G，需要更多的天线来支持 4x4 MIMO 天线，并覆盖 Sub-6GHz 下从 600MHz 到 7GHz 的各个频率。天线调谐器的使用有助于将现有天线重新用于多个频率以减少实体天线的数量，即使这样帮助很大，但 5G 的非独立组网需要数以万计的载波聚合组合，而毫米波频谱的特殊性需要多个无线电链。这无疑增加了射频前端的元器件数量、成本和复杂程度。在 5G 智能手机中，很难逃避 5G 射频前端设计中不断增长和演进的需求；业界能做的最好的事情就是管控这种复杂性。

在智能手机中的射频前端应对射频需求的指数级增长的同时，射频前端部分也被要求减少在设备中的空间占用。换句话说，射频前端处在进退两难的境地，需要尽量平衡这两个相互矛盾的需求。那么，5G 的射频前端如何在提升性能的同时保持结构紧凑？答案是通过电子集成技术。下图是一个作为接收信号的射频接收路径或链接的前端模组图片。在 5G 智能手机中印刷电路板的空间非常有限，模组有助于缩小印刷电路板上电子元器件的尺寸。



一款模块化的射频前端元器件；封装尺寸为 6.5 毫米 x 5.4 毫米

射频前端始于天线，途径射频收发器，结束于调制解调器。除此之外还有很多射频技术应用在天线和调制解调器之间。下图简化说明了一部最新 5G 手机设计中的各种射频元器件。对于这些元器件的供应商来说，5G 提供了一个扩大市场的黄金机会，因为射频前端内容的增长与射频复杂性的提升成正比。



三星 Galaxy S21 的 5G 射频前端的简化示意图。绿色方框表示射频元器件；橙色表示毫米波天线模组，其中包含收发器、电源管理和相控阵天线。

例如，射频滤波器的市场预计会在 5G 射频前端市场中经历最高的增长率，因为支持更多的无线频率意味着需要过滤更多的无线频率。博通、Qorvo、Skyworks Solutions、村田和高通等射频元器件制造商都将从这一增长市场中获益。

然而，能在 5G 手机中提供这些射频前端元器件只是一方面，而提供解决方案来应对射频设计的复杂性并使系统可靠运行则完全是另外一回事。为了满足这一新兴的市场需求，传统的芯片制造商高通公司已经将射频元器件和技术方案组合在一起，为智能手机制造商提供一个成熟的调制解调器到天线的射频解决方案。这种新颖的策略为终端生态系统带来了巨大的价值，因为并非所有手机制造商都愿意投入大量的射频工程资源来设计自己的射频前端。

本文探讨了自 4G LTE 诞生以来，射频前端设计复杂程度的演变，以及驱使这种复杂性背后的原因。在本系列的下两篇文章中，我们将继续揭开这一领域的关键技术，并着重描述随着 5G 技术成熟为射频元器件制造商带来的新机遇。