

测试方案

# T/R 模块数字化趋势下的 测试方法

---

作者：张勤

是德科技(中国)有限公司

2021.6



T/R 模块也称收发模块，几乎应用于所有的电子系统中。无论是军用雷达系统、卫星通信系统还是地面上常见的无线通信系统，T/R 模块都是最基础的构成，但是也是影响系统性能的主要部分。传统的 T/R 模块以模拟器件为主，包括变频器、放大器、滤波器以及移相器、衰减器等类型。随着电子系统数字化的演进，T/R 模块也从纯粹的模拟方式转向了模拟于数字混合以及高度集成的模式。

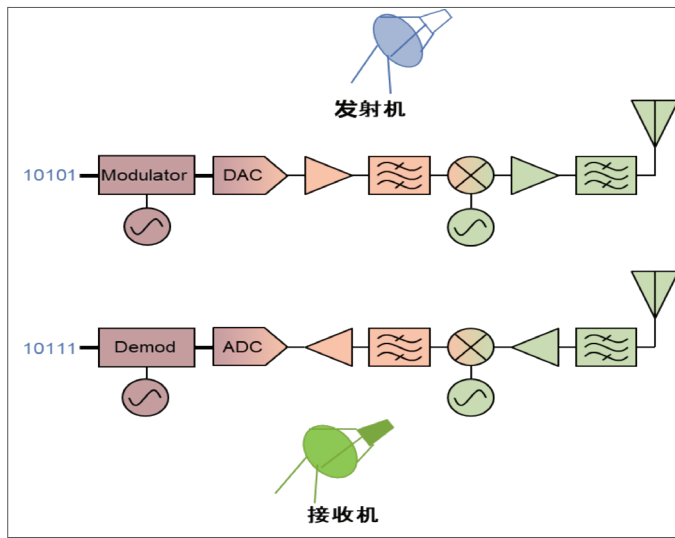


图 1. 转发器框图

对于测试而言，传统上一个收发系统的射频模拟部分和数字基带部分都是分开进行的。发射端的混频器、滤波器和功放，以及接收端的低噪放、混频器滤波器模拟器件的特性可以通过矢量网络分析仪进行测量；数字基带部分可以通过示波器、逻辑分析仪等仪表完成测量；系统的整体收发性能则可以通过信号源以及信号分析仪等设备完成标定。因此过去的测试方法和设备还是泾渭分明的，射频归射频，数字归数字。但是随着系统小型化和功能集成化进一步要求，许多传统的分立射频部件变成了小小的芯片，甚至和数字部分的 ADC 和 DAC 集成为一个片上系统。这对于测试而言无疑也是一个巨大的变革。

以下图中的卫星通信系统链路为例，射频与数字高度集成不仅发生在地面站和地面终端侧，在传统上由模拟转发器主导的卫星载荷侧也在悄然发生转变。随着 5G NTN 等新技术赋予了卫星通信更大的应用场景，数字再生技术也成为了越来越热的话题，进而也强化了数字化 T/R 在卫星应用上的需求。

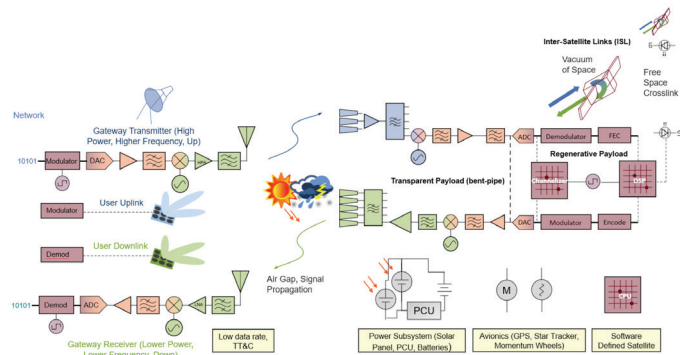


图 2. 卫星通信系统链路

在雷达相控阵领域，数字 T/R 的概念更是起源更早，应用更广泛。数字相控阵具有高集成度、波束控制灵活以及可同时实现多个波束等优点，其基石就是大量高度集成的数字 T/R 组件。无论是通信收发组件，还是雷达收发组件，其基本的测试需求是相通的。

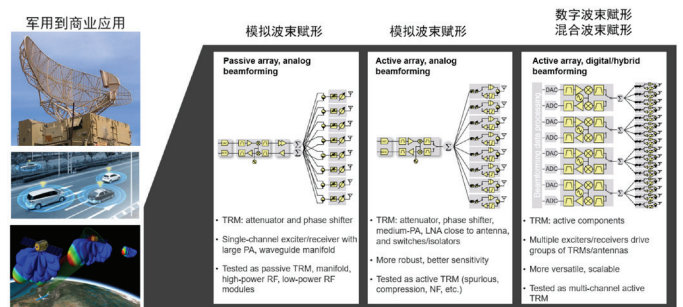


图 3. 相控阵技术实现方式

对于一个集成了低噪放、变频器和 ADC 的接收模块而言，工程师无法利用熟悉的矢量网络分析仪对它的噪声系数、增益和群时延等参数进行测量；对一个集成了 DAC、变频器和功放的发射模块而言，工程师同样无法直接利用射频仪器对它的增益、压缩等特性直接进行测量。然而这些参数指标，即便对于数字化的 T/R 而言，其重要性和模拟 T/R 是一样的，因此有必要引入数字化的测试方案。

数字发射模块集成了 DAC 和射频模块，一般通过数字激励并经过射频输出。因此从测试的角度，在硬件上需要为待测件提供标准的数字接口，在软件方面则需要提供和传统射频测试相通的测量算法。Keysight 拥有横跨射频到数字域的完整产品线，可以为上述测试需求提供完整解决方案。针对数字发射模块的测试，可以采用信号产生软件 + 数字接口卡 + 射频信号分析仪的方式进行，系统中包含：

1. 自定义信号产生软件：负责测试所需的激励信号。
2. 数字接口板卡：负责将软件产生的激励信号波形文件转化为物理上的数字信号与待测数字发射模块的数字输入端相连
3. 信号分析仪：负责对数字发射模块的射频输出信号进行频谱、功率以及调制分析。
4. 信号分析软件：测量算法实现。

该系统能够支持的测试项包括：针对通信及卫星应用领域的宽带数字调制下的 EVM 测试；宽带群时延测试；宽带幅频、相频响应；邻道泄露 ACP；噪声功率比 NPR；射频输出杂散等；针对雷达脉冲领域的脉冲幅度、频率、时间域分析；通道间相位特性分析等。

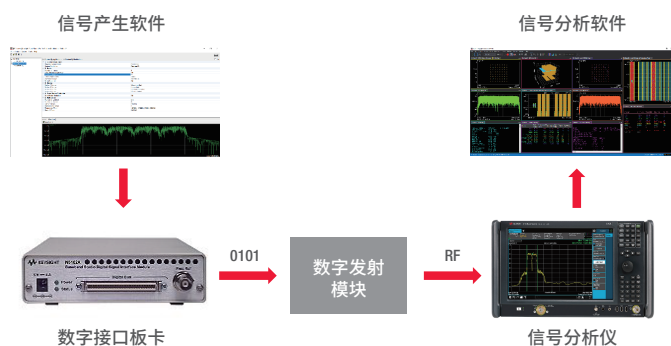


图 4. 数字发射模块测试

数字接收模块一般包括射频前端和 ADC 部分。和传统射频到射频的测试方法相比，主要区别是如何获取 ADC 的数字输出端信号并进行相应的测量计算。同样得益于 Keysight 完整的产品体系，我们可以采用射频信号源 + 逻辑分析仪 + 矢量信号分析软件的方式组成一个射频与数字结合的整体测试方案：

1. 自定义信号分析软件：负责产生测试激励信号给微波矢量信号源
2. 微波矢量信号源：负责产生射频激励信号送给数字接收模块
3. 逻辑分析仪：负责对数字接收模块的数字输出信号进行采集分析
4. 信号分析软件：负责对逻辑分析仪采集到的信号执行测量算法。

该系统能够支持的测试项包括：通信及卫星系统模块的宽带 EVM 测试；宽带群时延测试；宽带幅频、相频响应、噪声系数等；多通道体制下通道间幅相一致性测量等。

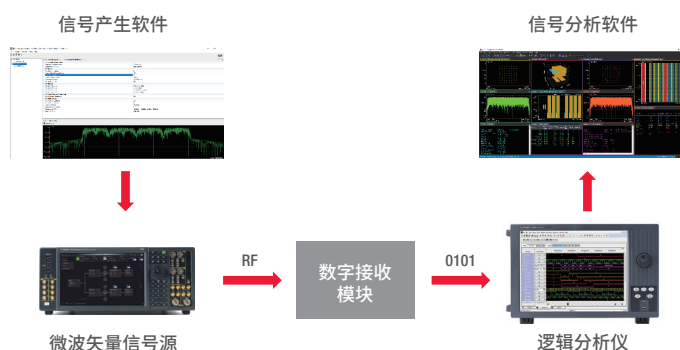


图 5. 数字收发器接收端测试

数字发射和接收模块大多最终会作为一个整体进行使用，因此最后一般还需要进行整体测试。整体测试的时候系统又变成了射频输入和射频输出的工作方式，因此可以沿用传统的射频仪器进行测试：

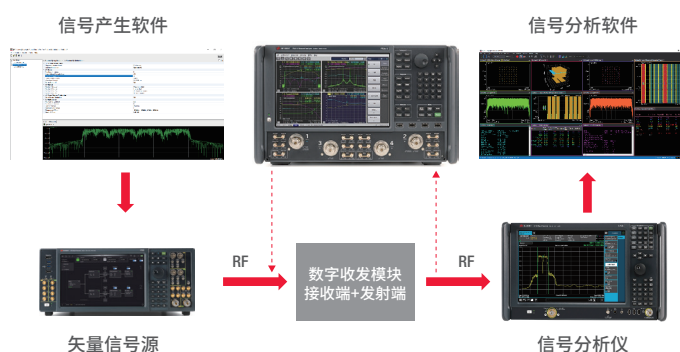


图 6. 数字收发模块整体测试

上述针对数字 T/R 的测试方案的本质在于将经典的测量方法和算法从传统所依赖的射频仪器硬件中独立出来，再结合与待测件匹配的接口进行激励和响应提取，最终在以软件为主体的平台上进行测试测量。作为一种有别于传统的测量方法，我们也设计了验证平台对一些测试结果进行比对，比如接收通道群时延，噪声系数等，结果是能够相互印证的。我们同时也选取了业界常用的数字收发芯片进行测试，测试结果符合预期。

随着芯片集成度的进一步提升以及系统带宽、数字接口速率的进一步提高，很多时候甚至无法将数字测试接口和待测件进行快速适配，这往往成为阻碍测试的一个瓶颈。但是数字 T/R 待测件本身强大的数字处理能力同时又为测试提供了一种可能，利用待测件本身的数字文件输入输出功能，我们可以将以软件为主体的测量算法与之结合起来，构成一个适配能力极强的数字 T/R 测试平台。以数字接收机为例，我们可以利用射频信号源作为测试激励信号，利用待测件将响应信号以波形方式导出并送入信号分析软件进行测量和表征。同理，对于数字发射机的测试我们也可以将测量激励信号以波形方式注入待测发射机，同时在射频输出端利用射频分析仪进行参数测量。所以从这个角度看，射频数字化既给测试测量带来了挑战，也带来了革新和融合。

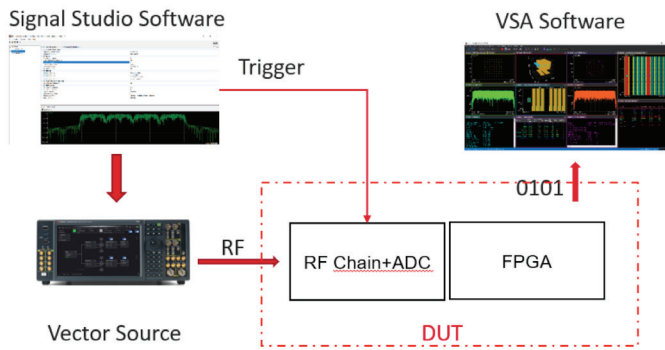


图 7. 宽带数字收发芯片接收端测试

如欲了解更多信息，请访问：[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如欲获得完整的产品列表，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

