



## 摘要

本文阐述了当今宇航产业所面临的市场的变革，这不但可能颠覆当前的商业假设，而且预示着未来太空基础设施的架构和运行方式的重大变化。未来市场和技术发展的方向是更灵活的多任务平台。这些软卫星和现有的卫星不同，它们的操作参数和接口都是软编码的（即主要由软件决定），而不是像今天的硬件那样普遍采用硬连接的方式。这样，运营商将获得更灵活、更敏捷的平台，有助于保护他们的技术投资，并随着时间的推移向他们传递更强的市场反应能力。此外，市场也会受益，因为这些创新有望通过更多的标准化应用、增强的灵活性和可重用的系统降低宇航应用的成本。

软卫星的一个关键组成部分是新一代的宽带数据转换器，这种转换器首次实现直接访问Ka波段，从而消除中频无线电环节，并首次将射频软件化引入了关键频谱波段。实现这种复杂的宽带器件需要详细的工程步骤，包括实验室条件下对两个概念设计的评估结果。结论很清楚：现在是重新评估架构选择和准备设计软卫星的时候了。量产的样品预计在2021年底发布。同时，当前的初始样片使进一步的实验工作得以快速进行。

## “新太空”简介和未来的软卫星愿景

欧盟委员会2019年关于欧洲空间部门未来发展的一份报告<sup>1</sup>指出，新太空业务的发展将给全球范围带来显著的增长机会。这份全面的报告包含新兴的技术发展趋势，并强调了主要的应用、广泛的风险和获取资金的挑战。

新空间趋势的结果之一是高度灵活的卫星即将到来。这些系统（本文称之为软卫星）是一类复杂的软件定义的空间平台。软卫星彻底改造了宇航核心基础设施，尤其是其接口，很大程度上将催生全新的商业模式。对于Teledyne e2v，软卫星是一类将星上软件定义处理能力与敏捷直接访问软无线电（DASRs）相结合的卫星，能够支持多种任务和动态切换操作模式，以适应市场需求和操作环境，如图1中的表格所示。

| Operation Mode | Service / Waveform                                  | Frequency Bands / Plan               |
|----------------|---|--------------------------------------|
| A              | SAR EO  | C and X-Bands<br>Freq. Plan Nb xyz01 |
| B              | Maritime<br>Telecommunication                       | X-Band<br>Freq. Plan Nb xyz02        |
| C              | SAR EO and<br>Telecommunication in Time<br>Division | C and X-Bands<br>Freq. Plan Nb xyz03 |
| D              | Telecommunications                                  | Ka-Band<br>Freq. Plan Nb xyz04       |

图 1 - 利用射频软件化，一个软卫星可提供多种潜在的客户服务

软卫星的两个特点是模块化和直接访问射频硬件，使射频软件化的使用结合了重新配置的能力。这给予了软卫星任务灵活性和多模式操作，同时降低其对未来市场变化的敏感度。

<sup>1</sup> ‘欧洲空间部门的未来’，欧洲投资银行 ©2019



重新配置大大降低了与固定硬件（单一任务）载荷相关的巨大风险。软卫星允许根据需要动态引入新的无线电频率计划，或重新分配每个应答机以满足任务更新的需要。此外，结合电子转向天线（ESA），服务提供商可获得通用的长寿命星载应用。

软卫星可以推动标准化的浪潮，进一步降低总体成本。事实上，这一发展的浪潮可能预示着“卫星作为一种服务”的出现，正如Altas空间行动的CTO最近设想的那样。这可能看起来有些牵强，但这一想法得到了即将上市的新型数据转换器的支持。有史以来第一次，直接在Ka波

段转换将成为现实，允许人们重新思考未来的微波接口和卫星通信基础设施。

本文的其余部分将考虑颠覆性的技术和市场趋势对航天产业的影响，然后介绍Teledyne e2v将如何应对。

根据ITU的2019年宽带状况报告，目前地球轨道上有4980颗卫星，其中15%用于通信。

<sup>2</sup> ‘未来是卫星通讯的服务’，Brad Bode，Altas空间行动的CTO和联合创始人，2020年10月2日

## 市场大趋势：激烈的竞争和永不停止的数据增长影响着空间基础设施的发展前景

在过去的30年里，通信卫星通常被认为是由大企业或政府运营的高度专业化的单一任务平台，例如用作天基基站或数据中继器的GEO高吞吐量卫星（HTS）。今天，大部分的地面数据和通信基础设施依赖于这种卫星网络与地面基础设施形成闭环。我们过去几十年的经济增长在很大程度上要归功于这种传统模式，尽管它现在已显示出不堪重负的迹象。要使天基平台的发展跟上地面商业发展的步伐，仍然面临挑战；技术的快速进步需要数年才能应用于太空，增加了运营商的风险。由硬件而不是软件定义的星载应用容易过时，这是一个使运营商头痛的问题。

最近，传统的太空运营商和他们的客户都在寻找降低运营成本、风险和投资的方法。与此同时，太空经济的创业在过去的5年里蓬勃发展，其中值得注意的私营投资包括：

- 2015年，SpaceX公布了其Starlink项目，计划在低轨（LEO）放置多达30,000颗卫星，向所有人提供低延迟宽带接入服务。
- OneWeb星座项目几乎与Starlink项目同时公布，初期将包含650颗卫星。
- Jeff Bezos于2019年4月宣布，亚马逊Kuiper项目计划在未来10年再次发射3236颗卫星，用于低轨宽带互联网服务。

根据IDC在2018年的预测，预计数据年复合增长率（CAGR）为61%，到2025年将产生175ZB（1ZB =  $10^{21}$  字节即1万亿GB）的需求。



不断增长的数据需求对卫星性能的发展有重大的影响。有关这一话题的统计数据令人瞠目结舌。新的5G无线系统和不断增长的物联网应用将加速数据的增长。IDC在2018年的预测<sup>3</sup>显示，其增长的速度令人震惊。IDC预计数据的年复合增长率(CAGR)为61%，到2025年将产生175ZB (1ZB = 10<sup>21</sup>字节即1万亿GB)的需求。

除此以外，由商业驱动的数据增长多是一些更深奥的应用和需求。各国政府正越来越多地为了国防利益而加倍致力于太空计划。一些迹象表明，一场基于高超音速导弹技术的军备竞赛正在加速进行，这引起了几个全球超级大国的兴趣。另外，在这个逐渐变暖的世界上，科学家们正试图更好地监测气候变化的影响，因此他们对更高分辨率的仪器越来越感兴趣，例如用于地球观测的合成孔径雷达。这些快速变化的数据需求要求行业必须做出反应。下一个十年将是各种空间能力快速发展和商业化的成熟时期。值得庆幸的是，通信技术已经基本准备好帮助推动这一迫在眉睫的转变。

3. ‘数字化的世界：从边缘到核心’，IDC ©2018

#### 术语表

##### 新太空

一种包括新的太空投资理念和一系列技术进步的全球趋势，促进了相关的私营公司迅速发展。这一趋势将为未来十年更广泛的太空项目和其发展埋下种子，并加剧太空领域的竞争。

##### 软卫星 (软件卫星)

卫星系统提供星载软件定义处理能力，结合灵活的直接访问软件无线电 (DASR)，能支持多种多模式集成任务 (通信、导航和传感)，并动态切换工作场景以适应市场需求。软卫星的工作任务和无线电接口由加载到卫星上的主动固件定义。虽然目前还没有已知的在轨商用软卫星，但ESA计划在2020年投入运行OPS-SAT，这是一个成熟的软卫星的先驱。

##### 直接访问软件无线电 (DASR)

一种智能软件无线电，其运行特性由算法确定。它在很大程度上不受传统硬件的限制，并可以通过应用新的代码动态重新配置。

## 半导体的技术问题对航天业务的产品供应链的影响

除非您对半导体技术的发展趋势非常了解，否则您现在可能还没意识到芯片行业面临的问题对您未来的产品采购战略的影响。有以下两个关键的因素：

- 在28nm的节点以下，CMOS工艺的最大频率已达极限。因此，最新的节点根本不支持建立高级的高频采样系统。从工艺的角度看，射频软件化是有好处的。

- 开发下一代精细工艺的费用和使用这种工艺制造的产品成本增长迅速，以至于其只能支持大用量的消费类产品。

精细工艺越来越遵循收益递减规律，其不能带来显著的功耗改进，也不能提高晶体管的密度。与此同时，开发和制造成本却急剧增长。



## RF CMOS 的技术瓶颈

过去的20年里，软件定义基带无线电技术的价格一直与遵循摩尔定律的大用量核心CMOS制程的价格下降势头相关。每一个新节点的商业化带来的迭代创新，极大地提升了性能，降低了功耗，并支持越来越多的应用。多年来，这似乎是一种自然法则。然而，最近基础的设备物理学的发展遇到了瓶颈，使创新停滞不前。

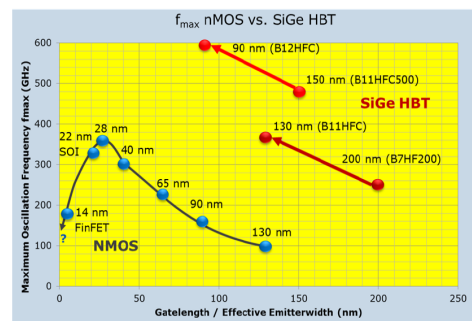
MOSFET半导体的一个关键参数是 $f_{max}$ （最大频率）。 $f_{max}$ 以高频增益的形式体现了原始制程的性能。 $f_{max}$ （图2）是晶体管功率增益降至1时的频率。多年来，随着门电路尺寸的减小， $f_{max}$ 频率逐渐增加。不幸的是，现在频率的提升逐步减缓，甚至发生逆转。在28nm时， $f_{max}$ 的峰值大约是360GHz。随后，在14nm节点中， $f_{max}$ 暴跌至28nm时的一半，即160GHz。频率降低的原因是复杂的。制程寄生电阻和电容的增加，逐渐成为限制性能提高的主导因素。另外，暴跌的阈值电压影响动态范围、驱动能力和噪声电平。那么，当未来的模拟电路受到如此大的阻碍时，行业将如何保持创新的步伐呢？在欧洲，相关的研发已将重点放在如下两个方面：

- DOTSEVEN，一个为期三年的研发项目，目标是开发 $f_{max}$ 在700GHz左右的硅锗(SiGe)异质双极型晶体管(HBT)。
- TARANTO的目标是突破新一代BiCMOS技术发展的技术壁垒，以更高的集成度推动异质结双极型晶体管(HBT)的性能提升。

这些项目的发展方向如图2中上部的红色轨迹所示。这其实是放弃了核心数字CMOS技术，重新开发射频模拟电路的替代制程方法。



## CMOS vs. SiGe



RWMI IEEET 20th IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2020, San Antonio, TX, USA AECSS Slide 17

图2 - CMOS和SiGe制程的 $f_{max}$ 的发展，表示门电路尺寸小于28nm时CMOS性能的突然下降  
(参考: 英飞凌, IEEE Radio & Wireless Week Jan. 2020, San Antonio, TX (USA))

## 精细SoC设计的成本增长呼唤未来的替代方案

硅的设计成本增长迅速。根据IBS的一项研究<sup>4</sup>，IC的设计成本已从65nm的2850万美元上升到28nm的5130万美元（翻了一番），而且在小于28nm时成本增长得更快。在软件无线电的设计背景下，这种经济方面的考虑在很大程度上是无关紧要的，因为这些成本已经远远超出了专业市场的承受能力。然而，需要强调的关键一点是，在建造定制系统时，航天产业通常依赖于CMOS的规模和性能收益，这些收益来自于设计ASIC，以实现未来的成本缩减和功率改进。但是，越来越多的专业模拟电路要么依赖于旧的制程节点，要么必须采用最新的BiCMOS工艺的硅锗(SiGe)HBT以实现更高的频率器件。

<sup>4</sup>“高级设计成本(新的CPU, GPU或SoC)的演化”, 国际商业研究 © 2018





因此，由于上文所述的性能挑战，信号路径的创新需逐步放弃定制的ASIC方案。未来的射频信号路径必然将从Bulk CMOS中脱离出，采用一种改进的架构，其中混合信号前端将与最新的现场可编程门阵列(FPGA)提供的强大的信号处理能力相结合。使用FPGA可降低成本并提升性能。

## 软卫星的核心技术发展

为使软卫星的理论成为现实，有哪些必要的核心技术发展？最重要的发展围绕可重复编程处理、信号调制和解调、协议编码和频率生成，包括：

1. GHz的宽带数据转换器(ADC和DAC)的可用性，其信号带宽可达Ka波段(40GHz)，将超过传统模拟RF信号链的性能。这些器件将与星载数字上下变频能力和数字控制一起提高附加值。
2. 支持12Gbps甚至更高数据率的超高速互联和背板技术，包括未来的硅光子技术。
3. 多通道精确时间同步，确保采样点同步并保持系统间的信号相位。
4. 新型高性能、低介电常数的有机基材提高了SiP的增益和频谱特性。

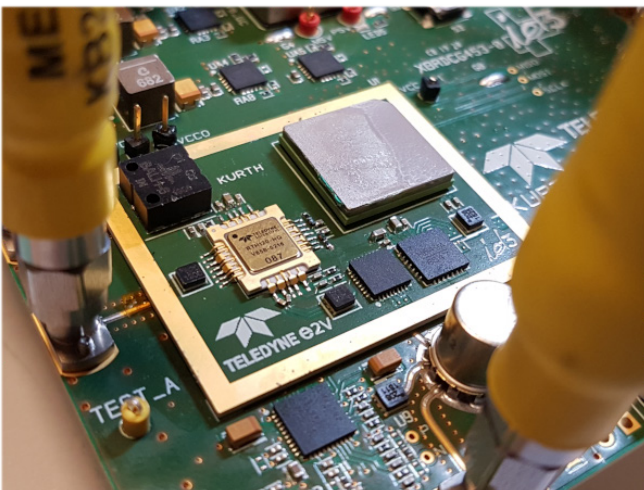


图3 - PS620实验前端板

在这样的背景下，像Teledyne e2v这样的创新公司一直致力于投资制造基础设施，从而将一种新型的小型集成片上系统(SiP)推向市场。SiP注定是射频小型化的下一阶段发展的核心，并成为软卫星设计的主要驱动。

5. 宇航级或同样可靠性的器件。
6. 改进的固态功率放大器。

以上每一项都对研发成熟的航天产业的软卫星有重大影响。由于篇幅所限，本文的其余部分将集中讨论其中最重要的四个方面。

## 设定K波段及更高波段的射频软件化的方向

Teledyne e2v于2019年年中启动了构建完整Ka波段采样系统的基础步骤的实验项目。该项目将一个高度线性的24GHz信号量化器(或跟踪保持放大器THA)连接到一个全新的宽带ADC EV12AQ600，如图3所示。

### 器件的核心参数

#### EV12AQ600 ADC

- 四个12-bit 1.6 GSps ADC核心，支持1、2或4通道时域交织
- 全交织模式下高达6.4 GSps的采样率
- 6.5 GHz输入带宽(-3dB)
- 集成的宽带交叉点开关
- 支持多通道同步的同步链技术

#### RTH120 THA

- 24 GHz输入带宽
- 双THA使输出保持时间可超过半个采样时钟周期
- 全差分设计



最终的PS620原理验证模块包括一个微波THA和一个四核心ADC, 其每个核心支持1.5Gsps采样率, 并集成了6.5GHz模拟输入带宽的宽带交叉点开关。这个ADC的设计可用于核心交织。利用四个核心的时域交织, 可实现超过6Gsps的采样率。将奈奎斯特折叠原理应用到K波段THA并选择合适的采样频率, 可以预计从K波段下变频到EV12AQ600的6GHz的基带将产生良好的结果。这些实验结果在之前的白皮书里有详细的描述<sup>5</sup>。

使用该模块进行测试的目的是确定上述量化器的K波段(18到26.5GHz)直接转换的有效极限。从初始的无杂散动态范围(SFDR)的测试中可以发现三个具体的问题:

- 输入信号的功率对原始THA动态性能有很大影响

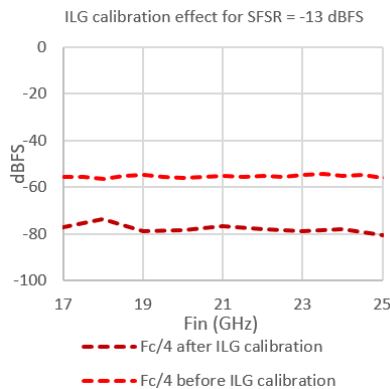


图4 - 高频优化交织的影响

- 工厂校准对ADC高奈奎斯特域交织性能的显著影响
- 在高奈奎斯特域采样时ADC积分非线性(INL)误差的影响

最初的实验报告有一些局限性。最值得注意的是核心交织校准(ILG)。初始的ILG针对基带频率优化。然而, 频谱分析清楚地表明以 $F_c/4$ 为中心的频谱毛刺必然是由于每个核心的交织带来的偏置误差而产生的。

不出所料, 这种偏置在一系列测试频率范围内都有影响。经过反复调整,  $F_c/4$ 的毛刺有了显著的减少(图4)。在K波段工作时, 基于中心21.5GHz的校准产生了令人鼓舞的结果, 在K波段获得了近15dB的增益。

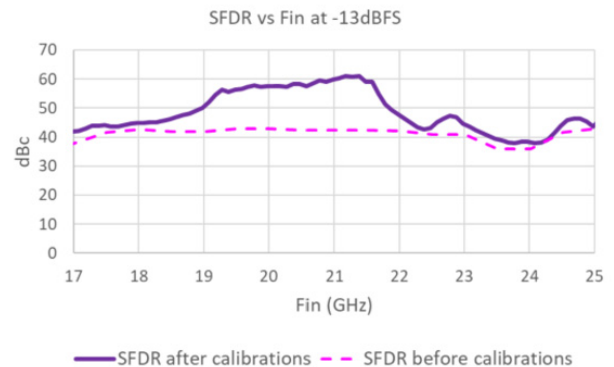


图5 - 初始PC样机的K波段SFDR的实验结果: 校准前和校准后的对比

进一步优化的可能性似乎有限。而另一方面, 转换器的积分非线性(INL)对三次谐波(H3)有明显的影响。与ILG误差一样, 在生产测试时, INL的校准是针对基带操作的。然而, 测试工程师们期待高频校准能实现进一步的性能提升。事实上, 我们确实观察到H3进一步下降了3到5dB。这些综合的结果(图5)有助于Teledyne e2v建立其直接微波访问计划。本文将介绍这一计划。

<sup>5</sup>. 'K波段直接数字化的高级宽带采样方案——扩展射频可能性的边界', Teledyne e2v ©2019.



### 新兴的微波直接访问产品路线图

Teledyne e2v一直致力于Ka波段直接访问。除了PS620的直接访问接收路径的原理验证之外，Teledyne e2v还规划了2次进一步迭代，如图6所示。

在2020年，第一个原理验证样机的能力得到了扩展。第二个的样机PS640通过时域交织一对EV12AQ600 ADC并使用新的微波采样器，使采样率翻倍，并具有30GHz的可用带宽。这是超越K波段的第一步。

| Sofradio Receive Path Variants | Proto 1 PS620                                      | Proto 2 PS640   | Ka-band quantizer                      |
|--------------------------------|--|---|--|
| Architecture                   |  |   |  |
| Device structure               | MPM - using package parts                          | MCM - using flip-chip die                               | MCM - using flip-chip die              |
| Construction                   | PCB  | FC-BGA  | FC-BGA                                 |
| Frequency                      | Ku-band (upto 24 GHz)                              | Ka-band   | Ka-band                                |
| Sampling rate                  | 6 Gsps   | 12 Gsps   | 12 Gsps                                |
| THA/Bandwidth                  | Dual clock RTH120<br>19 to 21.5 GHz                | In-house 1st gen. proto<br>upto 30 GHz                  | In-house 2nd gen. proto<br>upto 40 GHz |
| ADC                            | 1 x AQ600  | 2 x AQ600s<br>time interleaved                          | Enhanced μwave ADC                     |
| Power consumed                 | 8 W  | 14.5 W  | TBD                                    |
| Input signal path              | Differential                                       | Single-ended  | Single-ended                           |
| ENOB                           | 7 bits   | 6.5 bits  | TBD                                    |
| Status                         | Proof of concept with test results available today | Encouraging initial results & α-samples available today | α-samples due Q32021                   |

图6 - Teledyne e2v Ka波段软件无线电发展路线图

### 初始完整Ka波段实验样机的结果

图7的SFDR图表明第二个原型设计已经取得了令人鼓舞的结果。这表明，在10Gsps采样时，输入25GHz的信号，3次谐波的毛刺是-57dBFS，考虑到输入电平，大约等效于-51dBc的SFDR。这是非常优秀的结果。与最初的PS620采用的基于标准封装和RF印制电路板的设计不同，PS640采用了一种全新的有机低介电的基材，并使用倒装器

件，在改善RF性能的同时减少了占用的空间。这个33mmx19mm的SiP模块由Teledyne e2v制造，采用0.8mm的球间距互联，包含总计799个节点。另一方面，这个模块的焊球和凸起互联都符合RoHS，以满足未来的生产标准要求。这个6.3mm<sup>2</sup>的微型模块是业内第一款能实现直接Ka波段转换的模块。成品的照片如图8所示。

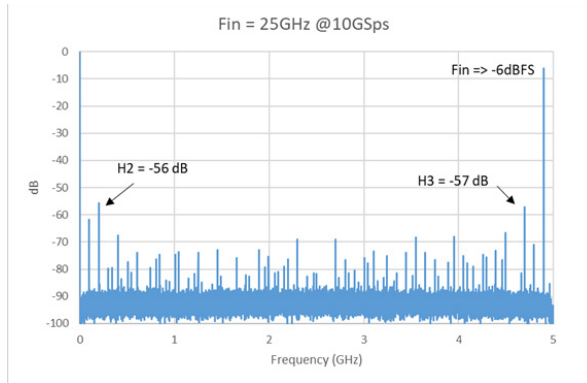


图7 - 输入25GHz连续波形的SFDR

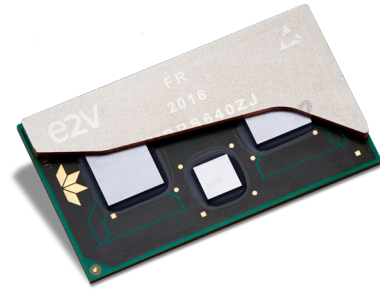


图8 - PS640 多芯片模块 (MCM)

## Ka波段拼图的最后一块

明年年底，计划中的第三阶段的初始样片有望发布。这是一款用于量产的SiP。我们为其花费了36个月或更长的研发时间。它将包括第二代的微波采样器。这个采样器与下一代的ADC核心配对。Teledyne e2v表示，虽然目前还不能透露太多关于完整功能的信息，这款ADC将实现几项重要的功能增强，以改善核心时域交织的性能，并提供一系列数字控制功能以简化其在软件无线电设计中的应用。

Teledyne e2v在最近的研发中放弃了平衡差分模拟信号和时钟线，转而使用单端信号策略。这个重要的架构选择，标志着Ka波段功能应用与之前的应用的差异。这个决定带来了一些重要的优点。通常，宇航级认证的器件较难获取，而找到合适的巴伦则更加困难。此外，这些器件都很昂贵，尺寸也不小。考虑到大多数的微波源都是单端的，这是个明智的决定。

Teledyne e2v的研发团队也在开发对应的发射路径解决方案。一款双路12位电流控制的RF DAC正在研发中，支持合成Ka波段频率产生。实验室测量的器件的典型宽带输出功率谱如图9所示。

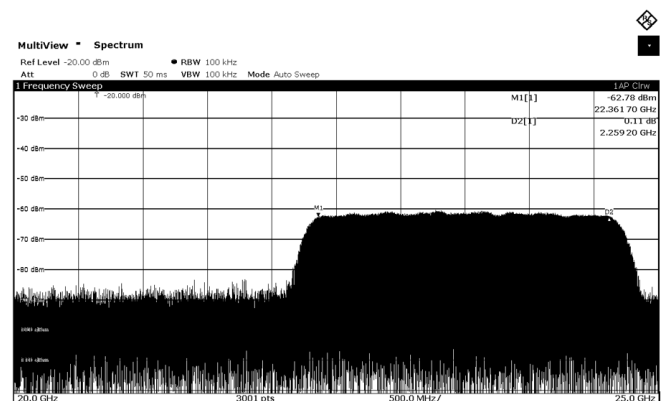


图9 - 2.26 GHz 多音输出功率谱 (Fclk = 20 GSps), 2RF 模式, 4倍插值, ASINC = ON

EV12DD700将包括一系列先进的功能，为发射端带来巨大的灵活性，包括：

- -3 dB 模拟带宽为25 GHz
- 多种输出模式，包括2RF模式，允许灵活的上变频，合成频率支持21GHz及更高的频率
- 数字波束形成
- 可编程反正弦滤波器
- 快速可编程的复杂混频器，支持高度灵活的跳频
- 使用32位NCO的数字上变频
- 通过同步链实现的多器件同步





这款DAC的SFDR优于-55dBc。此外，它还支持包括多模跳频的高灵活性快速跳频功能（通过集成的RTZ、连续和相干模式）。与Teledyne e2v早期的DAC方案相同，该产品

具有多种输出编码模式，可根据所需的频谱合成信号带宽修改输出的功率特性。2RF模式的输出功率峰值跨越了Ka波段（如图10中的绿色虚线所示）。

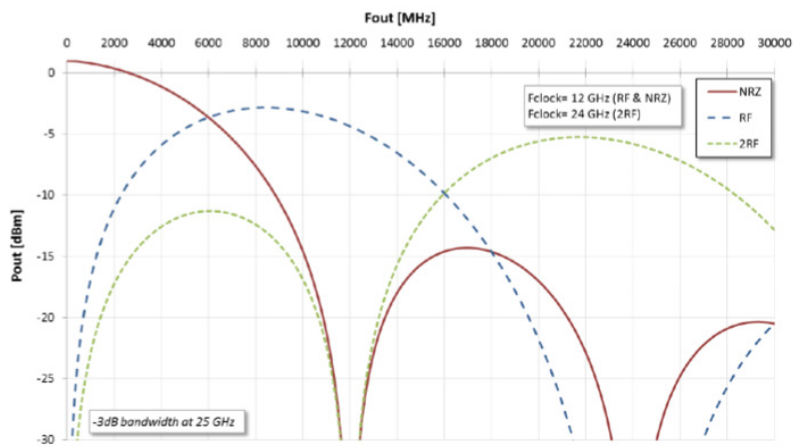


图 10 - 未来的双通道DAC EV12DD700的三种输出特性模拟

## 管理高速数据

当使用现代的数据转换器时，管理高速串行数据流是一个挑战。Teledyne e2v的产品采用一种名为ESIstream（高效串行接口）的开源12Gbps链接技术。这种串行协议的设计开销很小，并可为一系列的FPGA（如Xilinx Kintex Ultrascale和Virtex 7, Intel Arria 10）提供简单的无需许可证的IP。

ESIstream协议提供了87.5%的数据效率，其基于一个使用线性反馈移位寄存器(LFSR)扰频器的14b/16b编码器。我们增加了1个差异校验位确保直流平衡传输，和额外的切换位使能同步监视。链路通过使用独立的同步信号(SYNC)和简单的接收端SYNC触发计数器，支持多器件同步和确定性延迟（图11）。计数器在用户定义的时间从ESIstream接收IP的输出缓冲释放数据，以确保确定的链路延迟。

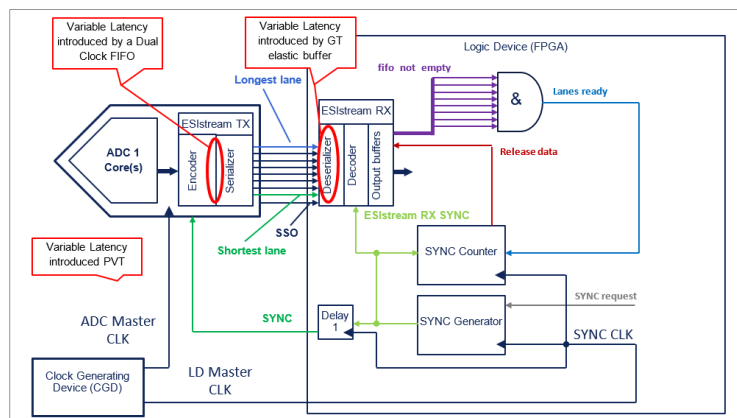


图 11 - ESIstream协议支持的单个ADC确定性延迟的原理



### 关键时序和采样同步问题

今天，许多无线电应用都使用波束形成来提高系统性能。波束形成利用信号干扰对信号功率进行空间定向。这种系统需要同步采样，即所有通道都在同一时刻精确采样。这样，信号空间（或相位）信息可在天线阵列中得以保持。尽管存在一些不利因素，如复杂度增加，但这种设计仍有一些可取的优点：

- 更高的通道信噪比 (SNR) 可提高无线电链路的余量，从而增加信号范围 (或降低所需的发射功率)
- 由于干扰能量来自特定的方向，波束形成算法可使用信号归零来限制或减少干扰

然而，工作在GHz频率，无论是在IC器件或是板级，信号的传递时间都是重要的因素。印制电路板 (PCB) 的走线行为类似于传输线，信号走线的长度是否匹配对保持相位信息至关重要。与166ps的时钟周期相比（对于6GHz的时钟），1厘米的走线长度将增加60至75ps的信号传输时间。因此，板子走线会显著影响设计，这也是为什么印制电路板的布线是微波系统设计是否成功的一个关键要素。

此外，我们还需考虑另一个数字域的重要的因素。亚稳态是数字系统中的一种不确定的状态。随着时钟频率的增加，出现亚稳态事件干扰系统时序的可能性越来越大。使用适当的同步策略可以对抗亚稳态的影响，即Teledyne e2v使用的同步链功能。一般来说，很难通过其他方法保证亚稳态的状态下的确定性操作。JEDEC JESD204B sub-class 1的方法难以正常工作，给设计师们留下了糟糕的印象。Teledyne e2v提供了一种健壮的、适应力强的同步方案——使用同步信号为每个器件重新对齐主时钟。

确定性同步是通过一对事件驱动的差分电信号实现的，即同步和同步输出 (SYNC和SYNC0)。在它们之间，这些信号确保目标器件的时序重置，所有数字子系统都正确锁定到这个主参考时钟。此外，同步还可以扩展到大型多通道系统中的多个设备。

同步链的优点有：

- 相对简单——无需额外的时钟，而在系统的生命周期内多个并行通道的同步是有保证的
- 只需训练一次，即可实现系统同步
- 即使环境条件（如P，V或T）变化，时序参数保持不变

同步链提供了一个稳定的跨系统同步源。

### 新型高性能封装和互联方法

封装技术是微波系统设计的“魔法”之一。对于任何半导体，封装提供了健壮的机械特性。它使半导体裸片和邻近的环境隔离，有利于散热，在多数情况下，支持复杂设计中大量的互连节点。

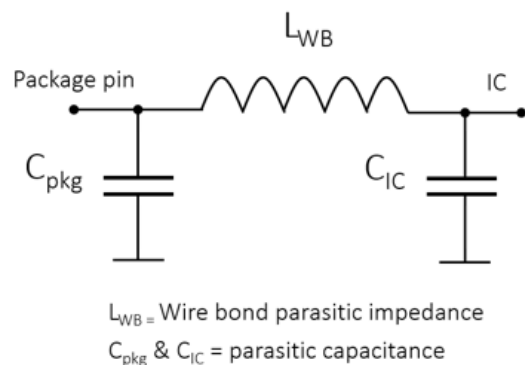


图 12 - 封装管脚和IC连接的集总模型



对于微波IC而言，实现最佳的性能还有一个关键的要素，这个要素与封装的寄生效应有关。寄生效应是由封装产生的非理想化的电路元器件，和每个封装的材料特性有关。在微波频率下，典型的明显寄生效应包括管脚和裸片的引线特性，以及印制电路板和封装连接处的材料不连续性。当检查IC连接时，通常使用图12所示的集总模型简化互联的电气特性。

这张图说明了寄生效应引起的不同阻抗，并强调了随着频率的提高进行阻抗匹配的必要性。因此，封装的材料的选择起着关键的作用。传统上，许多微波IC使用LTCC(低温共烧陶瓷)作为基板材料。而在Ka波段，则需要使用更快的有机基板。

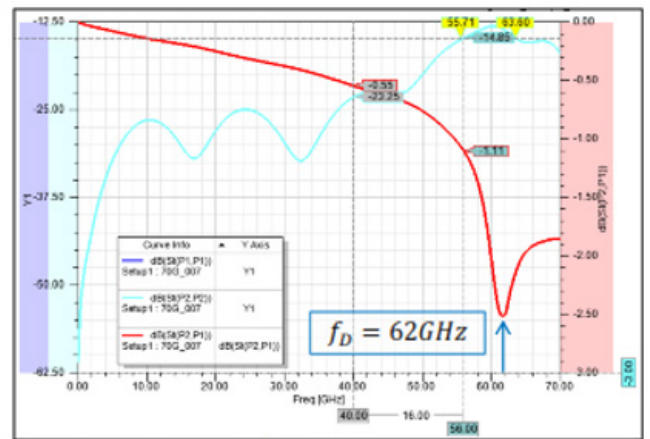
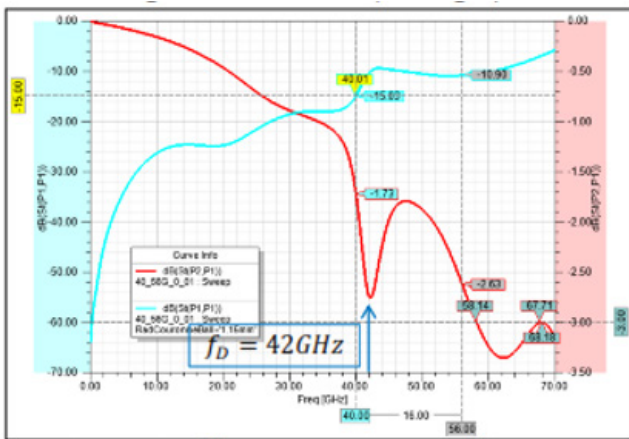


图 13 - 陶瓷（左侧）和有机（右侧）基板的频率特性表明使用有机材料的必要性

产品开发流程包括详细的封装带状线设计的有限元分析。高频结构模拟 (HFSS) 模拟电路板-封装-硅片接口的电磁特性，优化器件的电性能。在这个分析中，可以看到曲线由PCB（左下），到焊球（PCB和封装的接口），再

到IC基材，最后通过凸起（即封装和倒装IC的接口）到硅片。接着，针对高达65GHz的频率的HF信号连接器进行实验特性的验证。



## 展望分布式软件无线电设计的未来

从前面讨论的技术瓶颈可以看出引入新的架构的必要性。今天，最先进的Ka波段直接访问量化器体现了当前设计的发展方向，如图14所示。图中，射频数据采集器件和FPGA的信号处理配合工作。每个器件都针对独立的任务选择了最优的制程工艺。可以看出，由此产生的密集型SiP，推动了小型化的发展，并降低了成本，减小了器件封装。

互联的实施协议。这将允许实现一种全分布式的未来无线电架构（图15），其中超宽带数字转换器与天线位于同一位置，并利用光纤将数字数据传输到中央处理单元。这一举措不仅简化了复杂的波束形成算法，还带来了额外的设计自由度并减轻了重量。此外，一些令人烦恼的电子问题，如信号失真、噪声和串扰，都将得以改进。

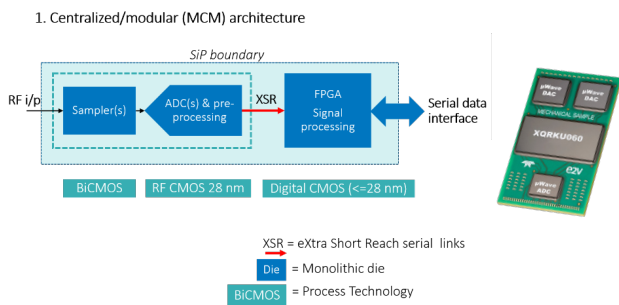


图 14 - 模块化Ka波段量化器和右侧的Teledyne e2v的射频前端SiP方案的例子

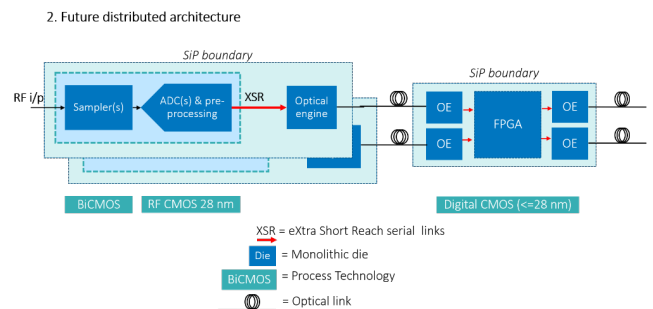


图 15 - 未来的分布式架构利用硅光子技术减轻重量并提高架构的灵活性

即将到来的硅光子技术预示着一一种增强的设计范式，将适合一种更基本的、系统兼容的用于卫星无线电架构的数字方法。光学互联系统已经经由光学网络工作论坛<sup>6</sup>的工作标准化，已经建立了一项涵盖6Gbps到56Gbps的串行

<sup>6</sup>OIF-CEI-56G 项目, 源: OIF 2015年9月

## 您准备好迎接软卫星了吗？

本文介绍了软卫星。软卫星是通用软件定义的宇航平台，代表着在未来十年从单一任务、高成本的传统卫星向本质上更复杂的应用的转变。推动这一转变的是前沿数据转换器和信号处理半导体的出现。

软卫星将用于物理层接口的软件无线电和多任务OTA可重新配置的载荷结合起来。考虑到目前的市场力量，这种转变是非常显然的。幸运的是，这种需求得到了新兴的商业和技术上可行的直接访问Ka波段软件无线电的支持，其核心技术是新型的宽带数据转换器。





综上所述，Teledyne e2v制定了涵盖接收端和发射端的战略发展规划。在未来的一年至18个月的时间里，这项工作的成果将会显现。同时，Teledyne e2v已经提供了最先进的现场演示，为其计划的商业和技术可行性提供了可靠的证明。

更高性能数字处理的要求。值得庆幸的是，处理器正在快速地发展，以帮助解决具有挑战性的地面设备的问题，例如随着人工智能(AI)的快速发展，自动驾驶解决方案的开发者面临的关键图像识别和传感器数据融合的挑战。

#### 通往软卫星之路的在轨应用

ESA的OPS-SAT是一颗7kg的3U立方体卫星。它的轨道高度为515km，被称为“太空软件实验室”，使用软件定义无线电和双核ARM cortex A9。这颗卫星的设计者表示，它将用于革命性的控制系统和软件的在轨演示，因为在成熟的卫星上验证的风险太大。超过100家欧洲公司和机构签署了该平台的实验项目计划。

软卫星的另一个要素的发展则更为顺利。固态放大器技术的发展提高了效率并降低了SWaP(尺寸、重量和功耗)。包括Advantech和Tesat在内的几家公司正在开发这些解决方案，并转向新的氮化镓(GaN)器件。

帮助实现软卫星的研究需要行业内的众多努力。令作者感到鼓舞的是，今天，软卫星概念的许多要素正在进行任务测试。其中一个值得注意的项目是欧洲航天局于2019年12月发射的OPS-SAT卫星。其他并行的行业发展为软卫星的清晰愿景添加了实质性的内容，这也提出了对

太空项目依然充满风险，然而创新的机会正在迅速增长。因此，现在是评估RF软件化技术和软卫星概念将如何重塑您的开发计划的好时机。当今，真正的风险是，行动缓慢的企业将被动作迅速的企业超越。软卫星范式的早期应用者很有可能享受相当大的市场优势。现在是采用直接访问Ka波段技术的时候了。



更多信息，请联系：

**Romain Pilard,**  
应用工程师，  
信号处理解决方案  
[romain.pilard@teledyne.com](mailto:romain.pilard@teledyne.com)



更多信息，请联系：

**Stéphane Breysse,**  
应用工程师，  
信号处理解决方案  
[stephane.breysse@teledyne.com](mailto:stephane.breysse@teledyne.com)



更多信息，请联系：

**Nicolas Chantier,**  
市场总监  
信号和数据处理解决方案  
[nicolas.chantier@teledyne.com](mailto:nicolas.chantier@teledyne.com)



更多信息，请联系：

**Jane Rohou,**  
营销传播经理  
[jane.rohou@teledyne.com](mailto:jane.rohou@teledyne.com)

