



引言

过去的几十年里，无线电技术标准、相关应用和互联设备得到了爆炸式的发展，对数据带宽和吞吐量的要求越来越高。据统计，45亿因特网用户和迅速发展的物联网(IoT)变革对器件性能要求的年增长速度超过25%¹，这是一个巨大的挑战。当今，随着在家办公日益普及，地面和空间通讯的关键基础设施已投入测试。

目前，关键的无线电频段资源短缺，无法满足需要。这意味着现代通讯网络需要找到更明智的方式以保持数据的流通。一种有效的方式是分隔和重用宝贵的射频频段，最大化其利用率。在过去的几年里，新建的基础设施已开始考虑到未来的需要。

目前因特网流量的增长量超过25% (CAGR)，2020年每月超过200EB(EB=10¹⁸字节或10⁶TB)，2022年预计达到每年4.2 ZB (数据来源: Cisco 2019)

本文将讨论一些未来电子数据交换的核心技术。在软件定义无线电/网络(SDR/SDN)中，软件技术是影响最大的因素。当今，业内普遍认为虚拟系统硬件以及将人工智能引入复杂的操作流程，可实现最高的系统效率、利用率和动态敏捷度。听起来像是科幻小说？事实上，这种技术即将到来。

如今，无线网络已经非常复杂，无法通过使用诸如设计时间服务计划或简单的通用设计等传统的方法优化。

人们需要更智能、更高级的技术：例如认知无线电(CR)——这种无线电能够监测动态网络行为，识别不同应用的需求，自动调整其物理层参数，使网络性能和服务质量(QoS)最大化。在许多情况下，不同的应用共享相同的无线通道和频段，难以同时满足不同的QoS标准。现在使用的基本控制架构无法同时平衡关键的功能参数需求，包括延迟、吞吐量、可靠性和适应力。若是考虑到不同的通讯需求，如低/高数据率、时间关键/非时间关键信号等，则更加难以实现。

软件化是一种可行的解决方案。软件化作为一种相对较新的术语，是指利用算法解决之前由硬件解决的通信问题。为了实现软件化，未来的系统会逐渐虚拟化和数字可控化。

软件化如何影响网络设计和规划？有如下两种情况：

- SDR：通过认知无线电技术，越来越多的应用可使用软件实现调制、纠错甚至载波频率和通道带宽，以满足动态运行的需要。使用波束成型、相控阵天线以及快速载波跳频可进一步增强SDR的性能。
- SDN：控制平面和数据平面的硬件互相解耦，控制集中化，并从具体应用中抽象出基础设计。

¹参考Cisco系统数据



迈向软件化

欧盟地平线2020计划预测了下一代因特网(NGI)的挑战，并在2018年底发布了网络世界2020讨论文档《NGI的智能网络²》。这篇详细的文档讨论了基于软件化的下一代网络建设的多种挑战，特别是SDR和SDN。

这篇文档概述了研究和发展的领域，并介绍了当今网络基础设施的情况。不出所料，今天工程师和大众最熟知的挑战是数据安全和个人隐私。考虑到物理网(IoT)对今天的工业4.0革命的影响，越来越多的设备通过网络互连，服务规划是另一个重要的挑战。

系统越来越复杂，需支持数据量剪切和越来越大的容量，还有各种不同的通讯技术（无线标准、光学互连、卫星通讯）以及众多的用户和服务提供商。难怪现在我们期待新的人工智能和机器学习解决方案能将上述的需求一并满足，这需要同时平衡集中和分散的数据方法，如同步进行云计算、雾计算和边缘计算。

提高射频敏捷度

Teledyne e2v是一家总部在法国格勒诺布尔的公司，专业从事微波技术的研发。早在第一款军用雷达发明的时候，Teledyne e2v就涉足了微波的领域。70多年前，Teledyne e2v已开始设计行波管和闸流管系统。

无线电软件化是什么？

无线电软件化是通过应用算法实现可编程、可重复配置的无线电通信通道或系统。这些无线电可以使软件定义无线电(SDR)，甚至是认知无线电(CR)，即能够识别本地射频环境并设置其物理层参数（载波频率、调制模式等）以最大化频谱容量利用率的无线电。

随着过去10年数字电子技术的发展，出现了越来越多的复杂敏捷无线电系统和相关的应用，如即将到来的5G移动无线终端。但是，若不仔细规划、设计网络系统，则难以保证未来通讯系统的流畅度。关键的数据需要在机器和机器(M2M)之间交换，如自动售货机网络以及自动驾驶和交通管理系统等，使得系统对吞吐量和延迟的压力越来越大。

1995年，Teledyne e2v研发了第一代宽带数据转换器，包括模数转换器和数模转换器芯片(ADC和DAC)，为提高射频系统的敏捷度和灵活性做出了巨大贡献。

² [NGI的智能网络](#). 2018年欧洲技术平台网络世界2020



这些器件支持高频模拟射频信号，并将其下变频/上变频至数字域。它们是数字控制射频无线电系统的关键器件，可提高下一代通讯设施的控制灵活性。

本振频率振荡器，带来设置和校准的挑战，并增加成本和设计复杂度。幸运的是，随着半导体器件技术（例如晶体管跃迁和最大频率）的高速发展，用户可大大减少中频模拟混频器的环节和其本振的需求，直接在射频信号频段数字化。支持多奈奎斯特采样的ADC可实现直接射频转换，提供精确的、无需混频器的通道选择（或调节）功能，并支持多种方便数字信号处理器实现的数字解码和解调的模式。

软件化或数字控制的本质

无线电通讯系统将载波频率（通常是一个单音信号）和数据（信息）信号调制（或混合）。ADC采样信号频率，产生连续的数字信号流，然后数字信号处理器（DSP）将有用的信息从信号流中抽取出来。而DAC通常用于发射端，其产生定义的合成射频信号谱，并将信号功率投射于特定的通道。

系统发射端的情况也是类似的。现代的宽带DAC可将信号能量投射在微波频率，允许数字控制，为通讯设施提供可编程性和灵活性。这些智能、灵活的无线电包括动态可调整的物理层，便于处理短时通讯高峰或适配不同的工作模式。

在当代的外差式无线电设计中，需使用一个或几个中频环节将信号能量向上或向下投射于无线电频谱中，并转换到转换器的基带频率范围。这些中频需要混合电路和

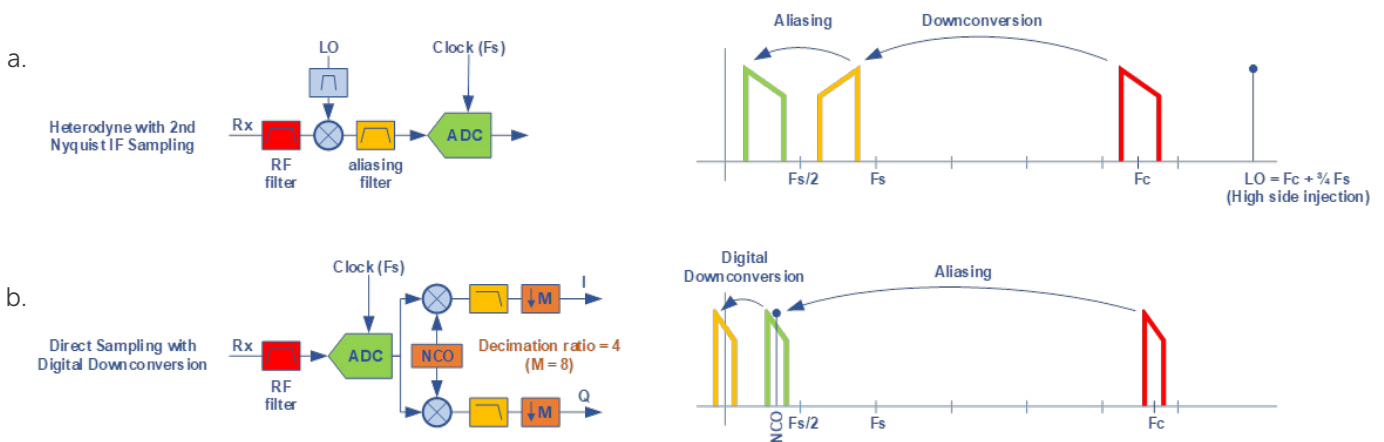


图 1 - 简化的接收端信号链路
 a) 传统的单级外差式无线电，需下混频器 b) 利用ADC内部采样信号混叠的直接转换系统



利用数学增强现代通讯系统的敏捷度和灵活性

多年来，采样定理、傅里叶变换和卷积等数学理论对通讯系统的发展做出了很大贡献。当在无线电系统中应用数据转换器时，用户将得到更多的便利。

而在直接射频处理架构中（图1b），ADC利用信号混叠直接实现第一级下变频。在ADC之后的下变频使用DSP内部的不同的数字控制振荡器锁定到特定的载波信号。

图1中可明显看出转换器和数字信号处理对接收路径的影响。当代的外差式设计（图1a）需要使用一个模拟下混频器，将接收的信号转换到ADC的第二奈奎斯特域。

最终，这种先进的数字方法应用于高灵活性的接收系统中，用于处理多个通道，并由数字域变量定义（图2）。这是一种简单的优化认知无线电的方案。

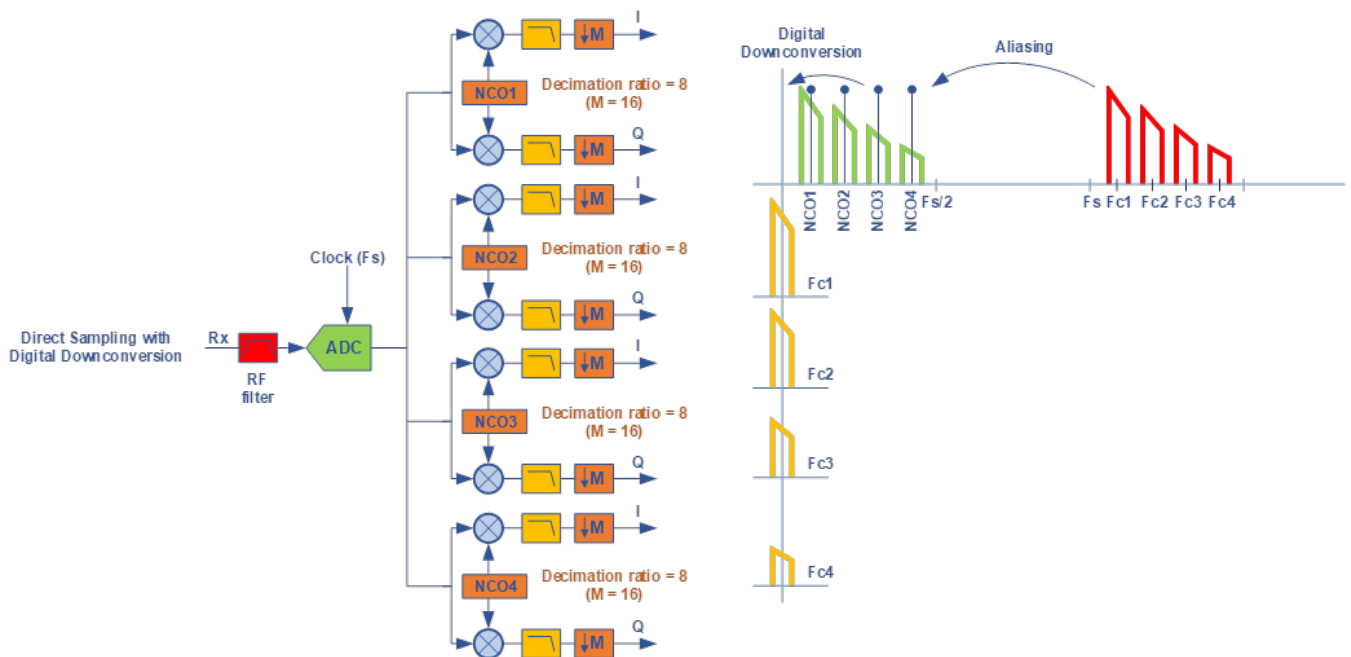


图 2 - 在增强型SDR中，数字控制振荡器可调节任何数量的独立通道

接收端射频欠采样

在采样系统里，奈奎斯特-香农采样定理规定了模拟数字转换器以采样率 $2B$ 采样最大带宽为 B 的信号时，可在数字域还原原始的信号。通过使用带通滤波器，则有可

能使用欠采样直接将超过带宽限制的高奈奎斯特域的射频信号下变频至其基带频谱范围（图2）。欠采样需使用ADC前端的采样保持放大器（TH）。



TH的作用类似于可“折叠”射频信号的频率转换器，在下面的例子里将20到22.5GHz的信号转换到ADC的基带（第一奈奎斯特域，即0到2.5GHz）。这去除了中频生成的环节（如本振和中频），极大地简化了模拟信号路径的设计（图3）。



图 3 - 接收端2.5 GHz带宽信号（载波频率21.25GHz）的TH欠采样（ $f_s = 5 \text{ GHz}$ ）

这是实现数字控制无线电设计的基本步骤，在先前的介绍6 Gsps ADC EV12AQ600的文章³里有详细描述。这款ADC的宽带TH支持K波段信号的欠采样。

例如，EV12DS480 TxDAC可延展信号功率直到26.5GHz，并以8.5Gsps的采样率采样。

ADC欠采样和DAC多奈奎斯特域频率合成是射频数字控制的两个关键要素，也是Teledyne e2v进一步增强下一代无线电设计的目标。

KA波段创新的动力

欧盟地平线2020计划推动的星际元器件工程，其目标是开发新的宽带数据转换器以简化射频信号链路并推进Ka波段直接转换技术的发展。在这样的愿景下，元器件需实现更高的系统集成度，即增加射频通道密度、减少功耗、增加带宽和提高动态性能，同时促进欧洲宇航业务的发展。我们预计这个工程将影响深远，包括增强通讯基础设施和地球观测能力等。

发射端多奈奎斯特域频率合成

在发射端，传统的外差式无线电的发射DAC通常在第一奈奎斯特域（ NZ_1 ）输出信号功率，并通过低通滤波器滤除混叠信号功率。如果发射DAC(TxDAC)可提供足够大的带宽，能将信号功率延展到更高的奈奎斯特域呢？如图4所示，这时，可使用带通滤波器选择目标信号频段。

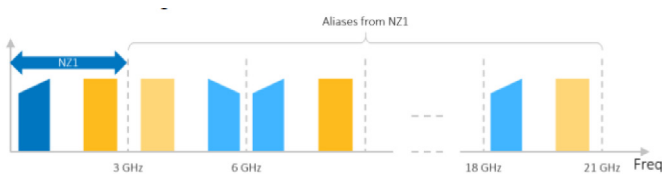


图 4 - 在 NZ_1 产生的合成射频信号，并混叠到更高的奈奎斯特域（ $f_s = 6 \text{ GHz}$ ）

星际工程也推动Teledyne e2v研发新的数据转换器。Teledyne e2v正与星际工程密切合作，计划研发一款全新的模拟前端(AFE)样片。这款AFE能大幅扩展微波频率采样带宽，实现最先进的微波直接数字下变频和频率合成。

样片的目标电性能

- 高性能模拟采样器，输入带宽高达Ka波段
- Ka波段较高的无杂散动态范围 (SFDR)
- 单端输入的信号路径（无需巴伦）
- 高编码效率，ESIstream串行数字接口
- 强大的时钟管理，包括同步链功能，可在波束成型应用中实现简单的相位对齐多通道系统

³ Teledyne e2v白皮书，2019年12月: [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](#)

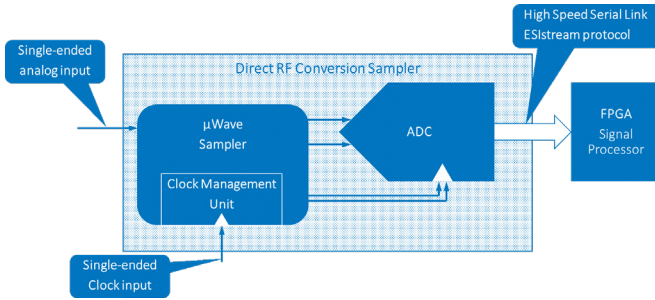


图 5 - 直接射频转换采样器的样片

Teledyne e2v计划研发的直接射频转换采样器（图5）预计-3dB模拟输入带宽高达微波Ka波段（即在26.5到40GHz之间）。除了无与伦比的带宽，这款样片还将包括一些独特的功能，便于简单地应用于实际的系统中。这些功能包括：

- 单端模拟输入信号路径，简化印制板电路设计和布线
- 无需使用昂贵的、大体积的HF巴伦，可帮助用户：
 - 直接从微波数字采样
 - 减少模拟信号采样器的信号失真
- 独特的微波采样器和低抖动时钟管理
- 在模拟前端 (AFE) 的输出端，这款器件没有使用LVDS，而是使用许可证免费的ESStream高速串行接口系统，与市场上大多数的FPGA兼容（包括Xilinx的KU60系列）。

星际工程也促进了下一代TxDAC的发展。EV12DD700拥有超过K波段的多奈奎斯特域的射频性能。这款器件有多种用户定义的输出数据模式，包括一种特殊的“双射频”模式，与现有的DAC产品EV12DS480相比，极大地提升了信号输出的能力。这款最新的转换器的采样率超过8Gsp/s，可灵活应用于各种数字控制系统。

模块化全敏捷度微波SDR简化设计

输入信号路径简化

减少复杂微波射频系统的串扰并降低EMI敏感度无疑是一个巨大的设计挑战。因此，大多数的高端数据转换器的信号和时钟输入使用差分平衡信号。这一方案非常有效，几乎成了今天的设计标准。但是，差分电路设计的缺点有以下两个方面：

- ADC的输入通常都是单端源，比如通过同轴电缆传递到接收端的射频天线信号。为了处理这种单端信号，需在每个输入端（微波采样器和ADC）增加一个巴伦并平衡系统阻抗。这些巴伦需占用PCB面积，并相当昂贵，特别是应用于Ka波段的设计时。
- 处理差分设计中的高速时钟边沿需精确匹配PCB走线的长度，这极大地增加了设计的难度。而使用单端输入可减少或消除接收机中这些环节累积的信号相位误差。

增强的紧凑数据互联

过去十年，数据互联系统中的数据转换器得到了快速的发展。越来越多的器件放弃了多路差分串行LVDS数据线配合独立的数据时钟的方案，转向使用集成了时钟的超高速接收机的串行链路。典型的接口包括JESD204的多代协议和许可证免费的ESStream，这两种接口都支持超过12Gbps的数据率。

使用串行协议，可以更方便地使用光纤物理层替代铜线，并进一步提高通道密度。在这些应用中，抽值和插值技术可帮助减少数据传输的线缆数量。



通过采样时钟精度保持信号相位信息

随着采样时钟频率的提高，必须保证整个系统中采样边沿的确定性，特别是对于波束成型微波无线电系统。信号采样相位精度非常重要，因为它决定了整个系统（例如高精度合成孔径EO雷达）的空间测量精确度。

Teledyne e2v独特的同步链技术^{4,5}通过使用相对低速的脉冲沿将任意数量的转换器锁定到相同的高精度采样时钟，成功解决了这一由同步信号的亚稳态引起的挑战。现在，用户可以实现多个通道的并联，无需烦恼如何保证多个分布式射频系统（用于相控阵和MIMO应用等）的相位对齐。

总结——高密度模块和天线更接近

这个项目的目的是显著扩展采样带宽，提高宽带产品系列的性能，以满足星际项目和市场的需要。将直接转换技术应用于微波Ka波段确实非常重要并且极具挑战。

之前的研究工作已经成功证明K波段直接转换的可行性。需要指出，这一技术同样可用于高可靠性的宇航应用，这些应用通常需较高的总剂量防辐射性能。

Teledyne e2v正着手解决所有的技术问题，预计在不远的将来推出高灵活性数据转换器片上系统 (SiP) 模块。这些模块包含多输入/多输出的ADC/DAC、微波采样器和相关的时钟管理电路，集成度很高，可放在离天线更近的地方。这样，超宽带CR将成为现实，高敏捷度无线电基础设施（至少其物理层）的挑战将得到解决。SDR将变成灵活SDN系统中的一个至关重要的部分。

虽然目前这一项目的核心技术细节还无法透露，我们期待在2020年的最后一个季度发布更多的信息。同时，客户若有紧急的问题，或想进一步了解这个项目，可直接联系Teledyne e2v。若客户同意签署保密协议，我们可以提供更多的信息。

⁴Teledyne e2v技术笔记，2019年3月：[同步链，简化GHz数据转换器的多通道通道同步](#)

⁵Teledyne e2v 视频：[7分钟学懂同步多个ADC](#)



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



更多信息，请联系：

Jane Rohou

营销传播经理

jane.rohou@teledyne.com

