

RF转换器：一种支持宽带无线电的技术

Daniel E. Fague和Steven Rose
ADI公司

摘要

能够直接合成无线电频率范围内信号的转换器（RF转换器）已经成熟，常规无线电设计将因此发生变革。由于能够数字化并合成高达2 GHz到3 GHz的瞬时信号带宽，RF转换器现在可以兑现提供真正宽带无线电的承诺，无线电设计人员得以大幅简化硬件设计，并很好的支持软件可重复配置的能力，这对于常规无线电设计来说是不可能实现的。本文探讨了RF转换器技术的进步使得这种新型数据采集系统和宽带无线电成为可能，并讨论了软件配置的可行性。

简介

每位无线电设计人员都要面对这样一个设计取舍的问题，即需要权衡信号带宽内的性能与功耗。无线电设计人员如何满足这一约束决定了无线电的尺寸和重量，并从根本上影响无线电的位置，包括建筑物、塔楼、电线杆、地下车辆、包裹、口袋、耳朵或眼镜。每个无线电位置都有一个与其位置相称的可用功率量。例如，建筑物或塔楼上的可用功率很可能高于口袋中的智能手机或耳内的蓝牙耳机提供的功率。所有情况下都存在一个基本事实：无线电需要的功率越小，并且单位功率所能支持的吞吐量越大，则无线电尺寸越小，重量越轻。这个事实影响巨大，多年来一直是通信电子行业中很多创新背后的推动力。

半导体公司将更多的功能和更高的性能集成到相同或更小尺寸的器件中，使用此类器件的设备得以实现更小、更多功能或更轻（某些情况下这三者都能得到实现）的承诺。设备越小、越轻、功能越多则越好，这样就可以把设备放置在以前由于其他约束而不能放的位置。例如，原先需要建筑物，现在由于占地面积减

小，设备可以放在塔楼上；原先放在塔楼上的无线电单元，如果重量足够轻，就可以缩小成放在电线杆上的单元；原先因为较重而需要车辆携带的单元，现在可以放在一个背包中。

当今的环境充斥着各种需要放在建筑物、塔楼、柱子和车辆上的传统装置。出于世界各地人们彼此互联的需求，工程师们利用当时可用的器件设计设备以应对挑战，这才有了我们今天通信无处不在的环境。我们可以随时随地通过多种不同网络（包括移动网络、无线局域网、特设短距离无线网络等）进行通话、发消息、即时通讯、传照片、下载、上传和浏览。所有这些都连接到宽带有线网络，数据由RF电缆传输，最终通过光纤传输。

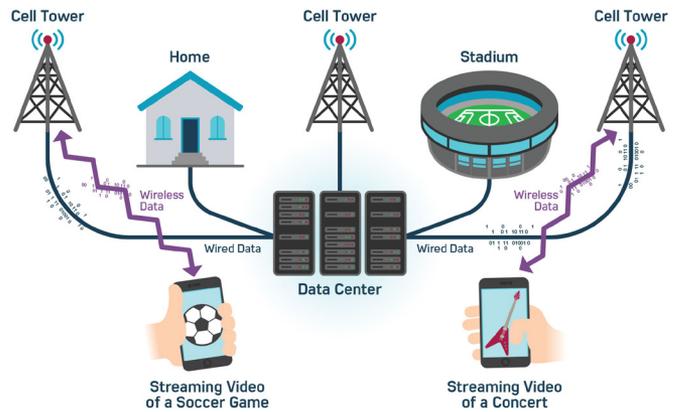


图1. RF转换器支持宽带无线电提供视频流和游戏等需要大量数据的服务。

增强的视频体验

多项研究表明^{1,2}，对数据的需求预计会在未来十年持续增长。其驱动力是人们对数据更丰富的内容的似乎无止境的需求，因而需要更宽的带宽。例如，有线电视和光纤到户运营商通过提供更高速度的连接和更多高清电视频道，不断在家庭宽带服务方面展开竞争。超高清（UHD或4K清晰度）电视需要的容量是高清电视的两倍以上，通道带宽需求超过当今使用的带宽。

此外,包括虚拟现实(VR)在内的沉浸式视频,以及具有多维自由度的游戏和3D效果(180°或全景视觉等),全部使用4k超高清电视,每用户需要高达1 Gb的带宽²,这远远超出了简单的4k UHD电视广播和流媒体已然很苛刻的要求。在线游戏需要网络提供对称的数据带宽,因为延迟时间至关重要,这推动了更宽上行传输能力的发展。这种对更宽上行能力的需求反过来又促使设备制造商升级其设计,以实现对称的宽带宽传输。

当今RF转换器强大的功能对于推动传输如此丰富视频内容的进步至关重要。必须能够提供大动态信号的输出,同时要求具有优秀的杂散性能,从而支持使用256-QAM、1024-QAM和4k-QAM等更高阶的调制方案。已安装的同轴电缆设备和分配放大器具有1.2 GHz至1.7 GHz的有限带宽,为了提高每个通道的频谱效率,必须使用上述更高阶的调制方法。前端传输设备的更高性能可延长已安装设备群的使用寿命,缓解资本预算限制,以及支持向多家服务运营商(MSO)提供更长时间窗口来升级其设备和传输系统。

多频段、多模式测试

随着集成的功能越来越多,如今的智能手机与传统手机已相去甚远。许多功能都有与之相关联的无线电,因此,当前的移动设备中可能有五到七个甚至更多的频段。生产智能手机时,每种无线电都必须进行测试,这给多模式通信测试仪制造商带来了新的挑战。尽管测试量随着无线电数量的增加而增加,但仍需要快速测试以降低测试成本。考虑到测试仪的尺寸和成本,为移动设备中的每个无线电构建不同的无线电硬件变得不切实际。随

着更多的频段开放或被提议用于移动服务³,测试移动设备中越来越多的无线电的挑战难度在加大。

RF转换器可以很好地应对这一挑战。无论是发射机还是接收机,RF转换器均能提供常规无线电无法实现的灵活性。宽带RF转换器可以同时捕捉并直接合成每个频段中的信号,从而支持同时测试移动设备中的多个无线电。利用RF DAC和RF ADC内置的通道选择器,多个无线电信号可以在转换器中得到高效处理。例如,图2中显示每个RF DAC有3个子通道处理单元,可以将三个频段不同的信号合路,然后利用数字控制振荡器(NCO)进行数字上变频,再由RF DAC转换为RF信号。

在其他市场领域,例如针对航空航天和防务市场的测试设备,对用于脉冲雷达和军用通信的宽带测试解决方案的需求日益增加。由于需要测试的雷达、电子情报、电子战设备和通信设备的数量与类型众多,测试设备制造商必须制造出一种具有丰富特性组合的灵活仪器⁴。例如,任意波形发生器必须能够创建各种信号,包括线性频率调制脉冲信号、相位相干信号以及各种输出频率和带宽的调制信号。测量设备必须同样强大,以便在测试激励器或发射器时能接收这些信号。RF转换器支持直接RF合成和RF频率下的测量,可以很好地服务于此类应用。在某些情况下,这可以消除上变频或下变频的需求,而在其他情况下,减少变频次数。硬件得以简化,尺寸、重量和功耗要求得以降低。增加通道选择器、内插器、NCO和合成器等数字特性,可在专用低功耗CMOS技术上实现高效信号处理。

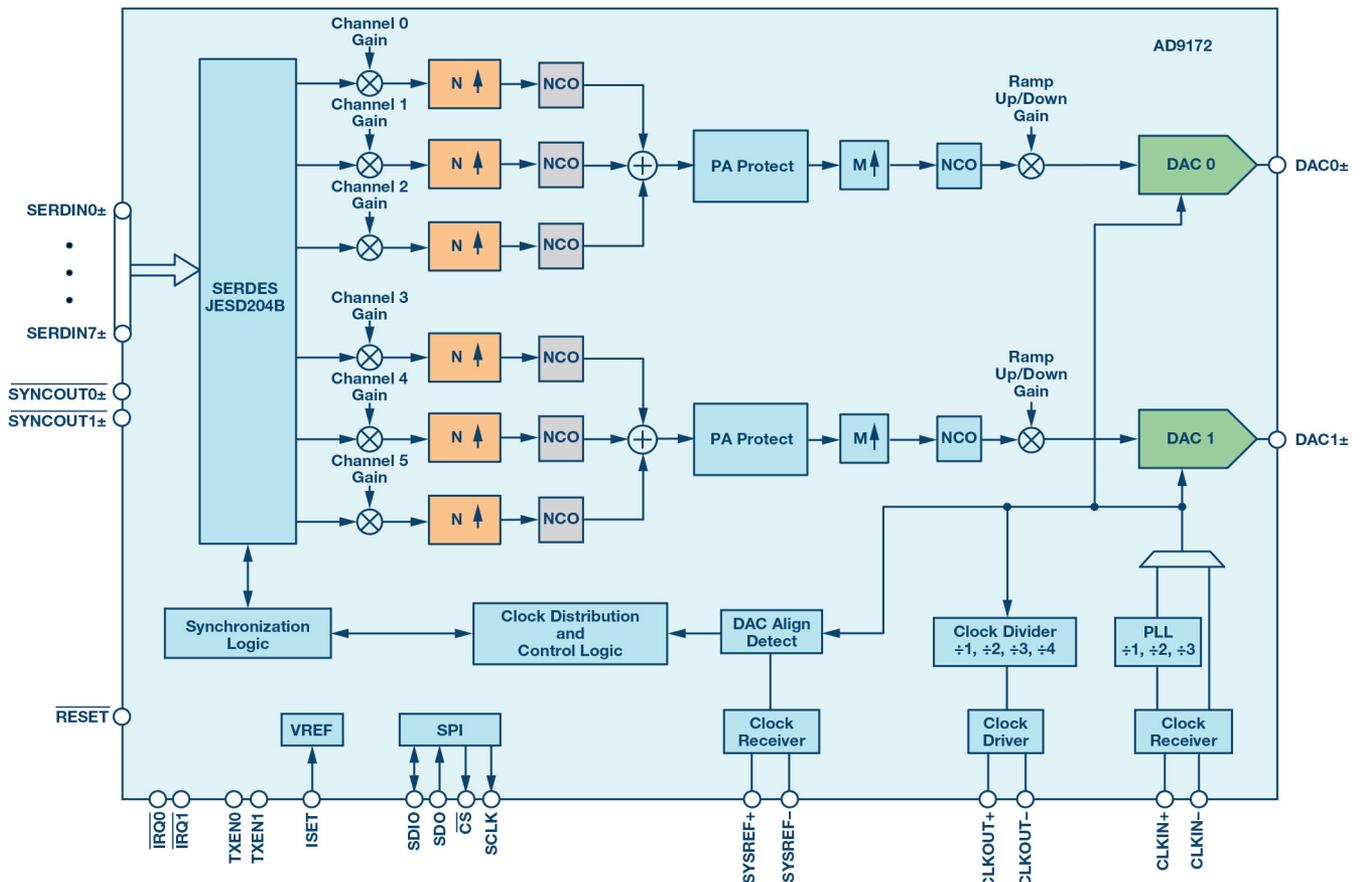


图2 带通道选择器的RF DAC示例。

软件定义无线电

RF转换器是软件定义无线电的关键因素之一。RF转换器能够直接合成和捕获几个GHz 带宽内的无线电频率,以数字方式实现上变频或下变频功能,这样整个上变频或下变频级都不再需要,无线电架构得以简化。去掉模拟变频级和相关混频器、LO合成器、滤波器,可减小无线电的尺寸、重量和功耗(SWaP),使无线电能够适应更多的应用场景,并可使用更小的电源供电。这种技术使得无线电小巧轻便,足以手持、车载或安装在飞机、直升机、无人机(UAV)等各种机载资产中。

除了实现更好的跨平台通信之外,利用RF转换器构建的无线电硬件还有支持多功能、多模式和多频段的潜力。RF转换器现在能够达到较低的雷达频段,在不久的将来会达到较高的频段,因此单台设备既可用于雷达也可用作战术通信链路的概念有望变成现实。这样一种设备在现场维修、升级、采购程序和成本方面具有明显的优势。

直接合成和捕获雷达频率的能力使得RF转换器非常适合相控阵雷达系统。直接RF转换器合成和捕获可减少非常多的常规无线电硬件,使单个信号链更小更轻。如此便能将很多这种无线电整合在一个更小的空间中。适合船载的阵列或地面相控阵,以及用于信号情报操作的较小阵列和单元,可以实现更小的SWaP。

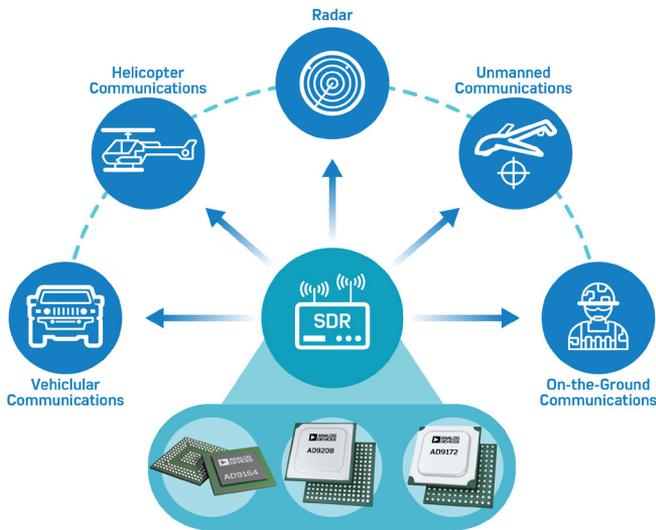


图3. RF转换器驱动的软件定义无线电支持跨平台互连通信。

RF转换器背后的技术

RF转换器得以成功的关键技术进步之一是持续微缩的细线CMOS工艺。随着基本CMOS晶体管的栅极长度和特征尺寸变小,数字门电路变得更快、更小且功耗更低⁶。这使得具有合理功耗和面积的RF转换器可以将大量数字信号处理功能集成到芯片上。容纳数字通道选择器、调制器和软件可编程滤波器,对于构建高效灵活的无线电非常重要。这种更高效的DSP也为利用数字处理来

帮助纠正转换器中的模拟缺陷打开了大门。在模拟方面,每个新节点都提供速度更快的晶体管,其单位面积的匹配性能也更好。这些改进对于实现速度更快的高精度转换器至关重要。

单靠工艺技术进步是不够的,还有一些重要的架构改进使得RF转换器成为可能。RF DAC的首选架构是电流导引DAC架构。此类DAC的性能取决于构成DAC的电流源的匹配。未经校准的电流源匹配与电流源面积的平方根成正比⁷。单位面积的匹配随着技术节点的升级而改善。但是,对于高分辨率转换器而言,即便是最先进的节点且随机失配足够低,其电流源也会非常大。这种大电流源会使转换器变大,更糟糕的是,大电流源的寄生电容会降低DAC的高频性能。更有吸引力的解决方案是校准较小电流源以达到所需的匹配水平。这样可以显著降低来自电流源的附加寄生效应,实现所需的线性度性能而不损害高频性能。如果正确执行,这种校准可以在整个温度范围内保持高度稳定,并且校准可以一次完成。稳定的一次性校准意味着不需要在后台定期运行校准,从而节省运行功耗,并减轻因后台运行校准而产生杂散产物的问题。⁸

还有一个帮助超高速转换器达到性能指标的架构选择,那就是用于导引DAC电流的开关架构选择。传统的双开关结构(图4)在以非常高的速度运行时存在几个缺点^{9,10}。驱动到双路开关的数据可以在一个到多个时钟周期内保持不变,因此尾节点的建立时间依赖于数据。如果时钟速率足够慢,使得此节点可以在一个时钟周期内建立,那么这不成问题。但在非常高的速率下,此节点在一个时钟周期内无法完全建立,依赖于数据的建立时间将会导致DAC输出失真。如果使用四路开关(图5),数据信号就会全部归零。这导致尾节点电压与数据输入无关,从而缓解上述问题。四路开关还允许DAC数据在时钟的两个边沿上更新。利用此特性可有效使DAC采样速率加倍,而时钟频率无需倍增¹¹。

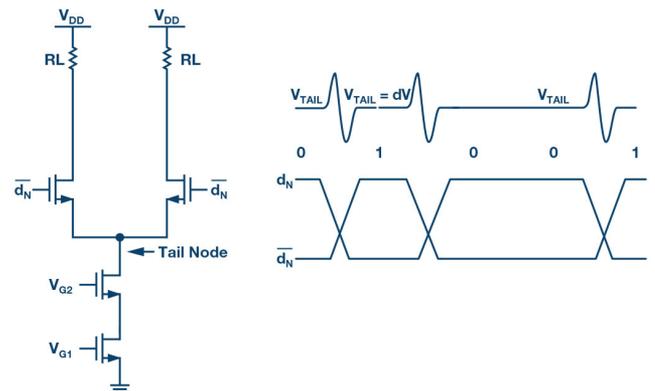


图4. 双开关DAC单元示例。

采用精心设计的电流源校准算法和四开关电流导引单元,结合当今的细线CMOS工艺,可以设计出具有出色动态范围的高速采样DAC。这样就能在很宽的频率范围内合成高质量信号。当这种宽带DAC与辅助DSP相结合时,它变成一个非常灵活的高性能无线电发射器,经过配置可为本文前面提到的所有不同应用提供信号。

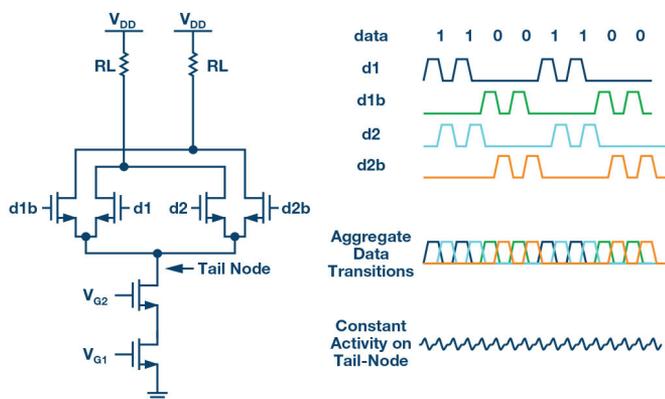


图5. 四开关DAC单元示例。

未来无线电

当今的RF转换器已经促使无线电架构设计发生了根本性的改变，而在未来，它将引发更大的改变。随着工艺技术的不断进步和RF转换器设计的进一步优化，RF转换器对无线电功耗和尺寸的影响将继续缩小。这些技术进步来的正是时候，有力地推动了新一代无线电，例如新兴5G无线基站应用（如大规模MIMO），以及大规模相控阵雷达和波束合成应用。深亚微米光刻技术将使得更多数字电路能够放置在RF转换器芯片上，从而集成需要大量计算的关键功能，如数字预失真 (DPD)¹³和削峰 (CFR) 算法等，这有助于提高功率放大器效率并显著减少系统整体功耗。这种集成将减轻对高功耗FPGA逻辑的压力，并将相关功能转移到功耗较低的专用逻辑中。其他可能性包括将RF转换器及其数字引擎与RF、微波或毫米波模拟器件集成在一起，进一步缩小尺寸并简化无线电设计，为无线电设计提供比特到天线的系统级方法。由于有了RF转换器，各种各样的机遇迸发出来。RF转换器是助力世界超越一切可能™的技术。

参考文献

- 1 “5G无线电接入”。Ericsson, 2016年4月。
- 2 “关于未来典型无线电应用的消费者调查报告”。华为无线X实验室。
- 3 “调查通知FCC 17-104”。美国联邦通信委员会, 2017年8月。
- 4 John Hansen。“雷达、电子战和电子情报测试”。Agilent Technologies, 2012年8月。
- 5 Henry S. Kenyon, “新无线电和波形将军用通信转移至天空”。Signal, 2013年10月。
- 6 William Holt。“摩尔定律：前进之路”。2016 IEEE国际固态电路会议, IEEE, 2016。
- 7 A.C.J.Duimajier, Anton Welbers和Marcel Pelgrom, “MOS晶体管特性匹配”。IEEE固态电路杂志, IEEE, 第24卷第5期, 1989年10月。
- 8 Haiyan Zhu, Wenhua Yang, Gil Engel和Yong-Bin Kim。“双参数校准技术跟踪电流源不匹配引起的温度变化”。IEEE电路与系统论文集—II: 简报, IEEE, 第64卷第4期, 2017年4月。
- 9 “用于信号处理的恒定切换”。美国专利US6842132 B2, 2005年1月。
- 10 Sungkyung Park, Gyudong Kim, Sin-Chong Park和Wonchan Kim。“基于差分四开关的数模转换器”。IEEE固态电路杂志, IEEE, 第37卷第10期, 2002年10月。
- 11 Gil Engel, Shawn Kuo和Steve Rose。“14位3 GHz/6 GHz电流导引RF DAC, 采用0.18 μm CMOS, 2.9 GHz时提供66 dB ACLR”。2012 IEEE国际固态电路会议, IEEE, 2012。
- 12 Daniel Fague。“最新RF DAC拓宽软件无线电的应用视野”。《模拟对话》, 第50卷第7期, 2016年7月。
- 13 Patrick Pratt和Frank Kearney。“超宽带数字预失真(DPD): 在电缆分配系统中实现带来的优势(功率和性能)和挑战”。《模拟对话》, 第51卷第07期, 2017年7月。

作者简介

Daniel E. Fague是ADI公司高速产品部的系统应用工程总监。他于1989年获得贡萨格大学电子工程学士学位 (BSEE), 并于1991年获得加州大学戴维斯分校电子工程硕士学位 (MSEE)。他于1995年加入ADI公司无线手机部门, 主要进行GSM、EDGE、CDMA和蓝牙手机无线电架构设计 (包括直接变频无线电)。此前, 他在美国国家半导体公司工作了5年, 从事DECT和PHS的无线电架构设计。自2011年加入高速产品部门以来, Dan一直从事RF转换器的开发。他拥有7项专利, 发表过30多篇文章和论文。联系方式: daniel.fague@analog.com。

Steven C. Rose是ADI公司高速产品部的设计工程师。他于1999年获得密歇根大学电子工程学士学位 (BSEE), 并于2002年获得加州大学伯克利分校电子工程硕士学位 (MSEE)。他于2002年加入ADI公司高速转换产品部门, 主要从事有线电视接收器射频构建模块的设计。自2009年以来, Steve一直专注于RF DAC的设计。联系方式: steven.rose@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区, ANALOG DEVICES 中文技术论坛

与ADI技术专家互动。

提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答, 或参与讨论。

请访问 ezchina.analog.com

全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区西小口路 66 号
中关村东升科技园
B-6 号楼 A 座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA16522sc-0-3/18

analog.com/cn

