



执行摘要

引导射频能量越来越成为一项关键的无线电技术。其原因是在较高的毫米波频率下，自由空间射频衰减增加。如果将这些频率用于增加系统带宽和数据吞吐量，在没有主动转向方法的情况下，跨信道干扰和丢失链路的可能性会增加。

最近，法国 Teledyne e2v 公司和德国 Fraunhofer IIS 研究所之间的一项技术合作评估了四通道数字转向 2.4 GHz 平面天线系统的性能。其中，一对最先进的、支持 GHz 的数模转换器 (EV12DD700) 具有一系列新颖的片上数字波束形成控制功能，提供了数字波束转向控制。这项评估的目的是进一步验证 Teledyne e2v 在微波射频软件化方面的进展。

实验结果与最初的设计假设相吻合。此外，对于特定的波束形成功能，DAC 被证明是高度通用的。DAC 在片内和片间的同步能力是一个重要的特点，可能会在未来几年内加速智能天线部署的发展。

简介

不断增长的对无线电带宽的市场需求需要新的无线电方法和技术。使用波长在毫米范围内的更高频率，着重于减少干扰，并有效利用辐射功率和频谱，是改进当代无线电系统的关键的技术考虑因素。

因此，在大多数关于大规模 MIMO、5G 和卫星通信应用的讨论中出现数字波束形成也就不足为奇了。波束形成描述了从固定天线阵列进行电子射频转向，从而减少跨信道干扰，同时提高整体传输质量、数据吞吐量和连接可靠性。

为了满足日益增长的对更先进的无线电控制的需求，本文提出了一种基于一对最先进的数模转换器 (EV12DD700) 的多通道数字波束形成的方案。所使用的新型数字转换 IC 提供了一些创新的思路，主要集中在简化波束控制系统的设计上。

各向同性辐射体和基本波束形成

理论各向同性辐射体有助于简化天线设计计算，并为测量实际天线的辐射方向图提供参考点。图 1 的极坐标图中的蓝色曲线描述了理想的辐射体。虽然现实中各向同性辐射体并不存在，但这一概念有助于我们理解天线的一般行为。

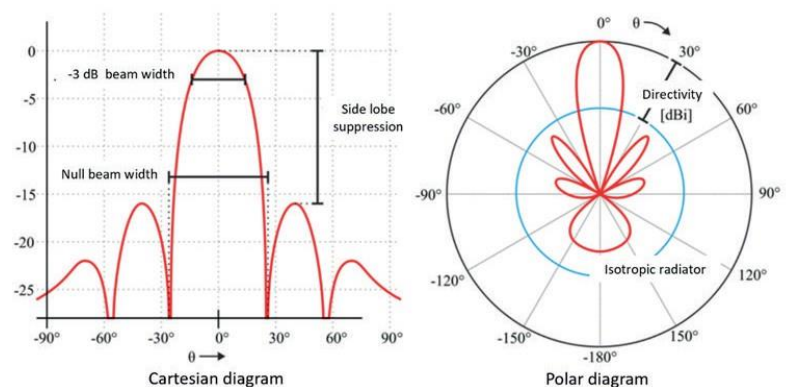


图 1 与各向同性辐射体相比的天线性能因素(蓝线)



各向同性辐射体是一种在三维空间内均匀辐射电磁能量的理想射频点源。与在特定方向上具有峰值和零值的特定辐射模式的实际天线不同，各向同性辐射体没有方向偏差。

电磁波束形成和转向利用了干涉理论物理学的一个关键结论。当两个或两个以上的能量源产生一系列波阵面时，就会出现相长干涉或相消干涉的波形。这种波形在振幅和相位上变化。对这种“叠加”的数学处理表明，当点源之间的间距是激励信号频率波长的整数倍时(假设信号源之间的相干性)，波阵面得到最大的加强。您可以直观地看出，波阵面干扰提供了一种引导和转向射频功率的方法，可用于波束形成系统。

然而，叠加原理忽略了辐射元件之间的电磁耦合，它只是一个近似的原理。天线辐射的更精确的表示方法可以用数值方法确定。

单个阵列元素有许多可能的排列方式，这些排列方式会影响辐射行为。几何分布，元素的数量，以及它们之间的距离都是关键的设计因素。此外，激励信号的幅值和相位也起作用。

在点对点无线电链路上，高指向性是可取的，因为相同输入功率的范围会增加。您可以通过增加物理天线的几何尺寸来实现这一点，但几个元素的组合也会导致有效天线辐射面积的增加。

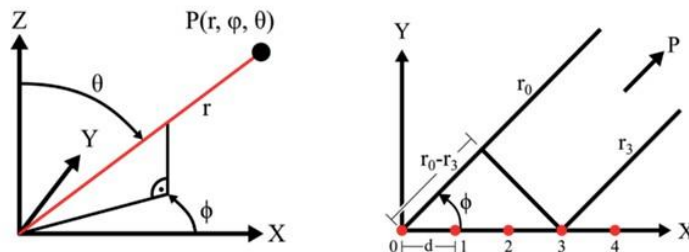


图2 点P的球坐标系(LHS)及点P的远场波阵面(RHS)的路径差

图2中特别标出了叠加。点P在距离辐射体r处可见。在图2(LHS)中，极坐标在三维空间中定位P。在图2(RHS)中，可以识别出一个由五个元素组成的平面阵列，其中P位于远场。根据叠加原理，将多个单独辐射体的场叠加在一起，在电磁波结构重叠处，即相位相同处，得到的远场辐射信号强度最大。这种期望的行为可以部分地通过单个天线元件的巧妙组合或通过控制天线激励信号的电气特性(相位及其幅度)来实现。

由于这项工作主要评估了在数字系统(使用先进的宽带DAC)中控制波束形成的能力，因此我们采用了一种等间距元素的简单平面辐射体布局。很容易推导出由这种阵列排列产生的群因子(增益乘数)。

由此产生的阵列设计及其从CST Microwave Studio (CMS)输出的模拟辐射图如图3所示

和天线相关的定义

各向同性增益定义为在特定方向上辐射的功率与理想各向同性辐射体辐射的功率之比，以分贝(dBi)表示。各向同性增益衡量特定天线定向聚焦辐射能量的能力。

EIRP (有效各向同性辐射功率)是假设的各向同性辐射体在主波束方向上给出的与实际源天线等效的信号强度的辐射功率。

波束宽度是辐射方向图中主瓣的角宽度。它提供了有关天线方向的信息。它是在输出功率下降3db时测量的。

输入阻抗应与传输线的特性阻抗相匹配，以保证有效的功率传输和最小化信号反射。

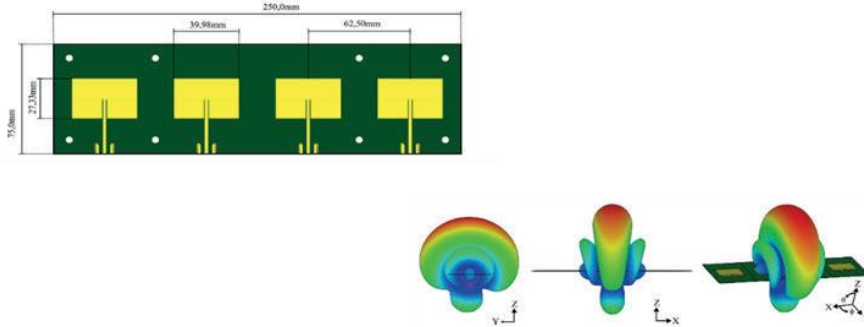


图3 实验 4x1 微带天线与 CMS 模拟的射频场图

一个简单微带贴片阵列的实验结果

具有 n 个相同的单微带元件的平面阵列的总辐射特性表示为群因子与单个辐射体的辐射特性的乘积。在单个元素不具有高指向性的情况下，这种群体特征占主导地位，如图 5 所示。主瓣功率明显高于所示的三个侧瓣。

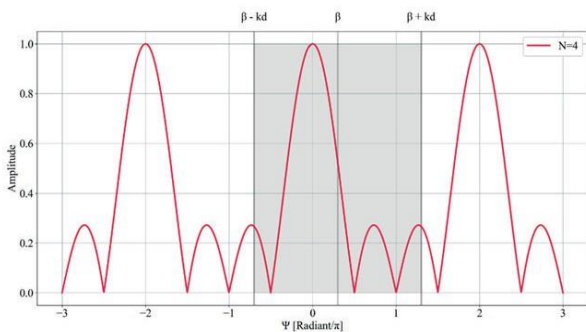


图4 4x1 贴片天线的主波束和旁瓣特性

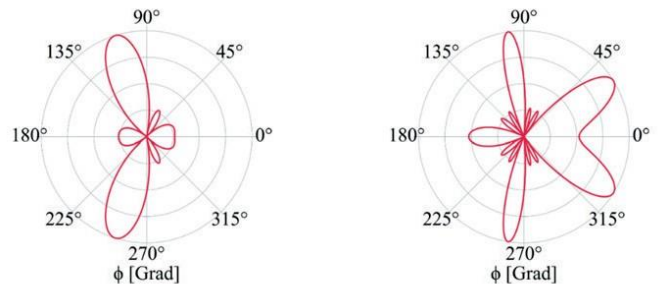


图5 $\lambda/2$ (LHS) & λ (RHS) 单元间距下波束的极坐标图和天线的侧瓣

图 5 中的两个极坐标图显示了不同的单元间距对主波束和旁瓣形成的影响。在图 5 中，左侧是半波长间隔，右侧是整数波长间隔。在这种情况下，半波间隔是更好的选择，它能提供更少和衰减更大的侧瓣。

逐渐衰减

当侧瓣出现高度衰减时，方向转向效果最好：这降低了与其他载波干扰的可能性。抑制不需要的侧瓣的一种简单方法是逐渐衰减。将输入信号幅度分布调整到线性阵列可以产生期望的、高度衰减的旁瓣。两个著名的波瓣分布特性分别是道尔夫-切比雪夫，它使所有的侧瓣达到相同的振幅，以及泰勒，它产生可调的侧瓣阻尼，这在部署大型阵列时特别有用。

系统级考虑

传统的波束形成方法往往由模拟信号控制。在模拟波束形成中，信号被单独的信号移相器移相。模拟移相器使用变容二极管或微带线。另外，将信号适当地与混合耦合器组合，以创建一系列可选择的波束。



数字信号处理的最新进展意味着 GHz 信号可以完全在数字领域进行处理。因此，驱动每个天线的信号参数的权重可以不同，并由系统计算确定。这种方法具有显著的设计和性能优势。例如：

- 无论频率如何，信号都可以进行位移
- 即使在高带宽下也可以实现波束形成
- 此外，数字波束形成器可以利用多径传播，并根据动态和直接信道测量确定信道参数权重

数字波束形成提供的另一个灵活性是简单无线电重新配置的可能性，只需要修改数字处理，而硬件无需变动。这是射频软件化带来的主要好处之一。

多通道同步

当工作在超高时钟频率(即 GHz)时，系统如何确保所有信号在精确的同一时刻采样？“同步链”是 EV12DD700 采用的简单有效的方法。

Teledyne e2v 的同步链是一种新型的同步解决方案，可以轻松跨大量通道进行菊花链同步。同步信号源由信号处理主芯片提供——通常是 FPGA。同步信号是一次脉冲，而不是精确时钟，因此在印刷电路中配置它是一件轻而易举的事情。每个来自设备的同步信号都基于单个设备的延迟重新同步。该方法需要初始设置校准，但一旦执行，无论链中的设备数量如何，所有设备都将具有确定的相位对齐特性。

25GHz 宽带 DAC 创造了新的毫米波波束形成选项

这款数模转换器(DAC)源于欧洲 INTERSTELLAR¹ 项目，型号是 EV12DD700，它是一款 Ka 波段双核转换器，具有 25GHz 的 3dB 带宽。转换器具有可切换的 8 位或 12 位分辨率和 12Gsp/s 的转换率。通过三种输出模式(NRZ、RF 和 2RF)，可以将输出信号功率优化到特定的奈奎斯特区，如图 6 的特性曲线所示。RF 和 2RF 模式将有效输出功率扩展到 6 至 26 GHz 的范围内。它采用低开销、免 license 的 ESStream 协议，实现了高速串行通道接口(HSSL)，用于用户数据传输。ESStream 可保证低链路延迟、DC 平衡、最大数据运行长度和确定的链路同步。

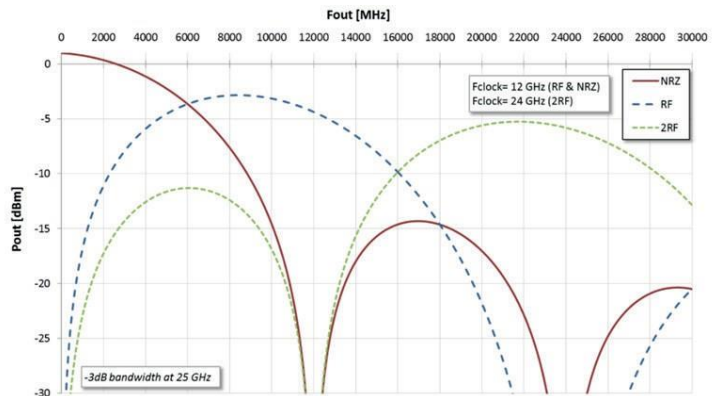


图6 4个奈奎斯特区的DAC输出特性

此外，这款 DAC 对于波束形成非常有用，因为它提供了几个强大的数字信号处理功能：

- 数字上变频(DUC)
- 跳频
- 直接数字合成(DDS)

¹ INTERSTELLAR 是 2016 年启动的一个项目。这是欧盟“地平线 2020”赞助计划的一部分，旨在加强欧洲在空间应用数字数据转换器领域的竞争力。



此外，这款 DAC 提供了一个数字巴特勒矩阵——一个可以在数字域中为单个信号路径调整信号幅度和相位的功能模块。这个功能模块是实现数字波束形成的核心。另一个关键的系统级特性是同步(SYNC)链，在图 7 中用红色标记。该特性可确保在整个大规模多通道系统中保持信道相位同步(见侧栏)。波束转向要求相对信号相位的误差尽可能小，因而这对于波束转向应用非常有用。

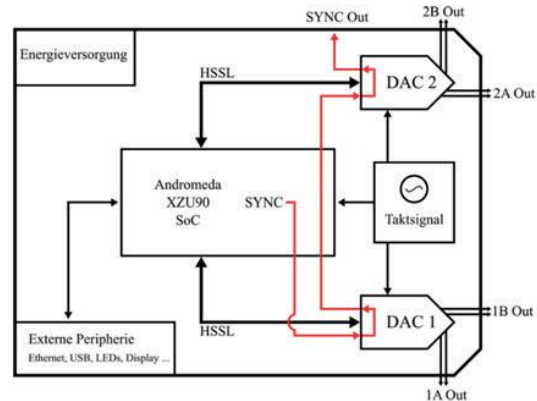


图 7 数字波束形成器的评估系统和框图

实验波束形成系统——通信和接口

Andromeda 片上系统(SoC)软件通过串行外设接口(SPI)与一对宽带 DAC 通信。后端软件也可以通过 HSSL 链接访问通用输入/输出(GPIO)引脚。这提供了 FPGA 和其他外设之间的直接数据通信。主时钟提供 DAC 的采样时钟和 DSP 时钟。SoC 提供所有重要的同步信号。与电路板的通信是通过后端软件进行的，后端软件提供了一个应用程序接口来处理命令和参数，将它们转换为电路板和设备特定的配置。

特别的 DAC 波束形成特点

EV12DD700 双 DAC 包含复杂的数字上变频器(DUC)和直接数字采样(DDS)功能。DUC 实现的信号处理路径包括:

- 4 x 插值环节 (x1, x4, x8 和 x16)
- 波束形成的 1x 增益和延迟环节
- 1x SINC 补偿
- 跳频表

跳频、增益和相位、插值滤波和 SINC 补偿模块都是通过 SPI 控制的。

复杂数值振荡器(NCO)具有 32 位频率分辨率。该模块还提供直接数字合成(DDS)模式，产生连续波或啁啾模式——两者都是用户可选择的。波束形成控制包括-8.5 到 7.5 采样的可编程延迟级，7 位分数延迟分辨率和±12.5%范围的可编程增益级，10 位分辨率。为了补偿产生的输出脉冲形状，反 SINC 滤波器提供了两个可编程系数。

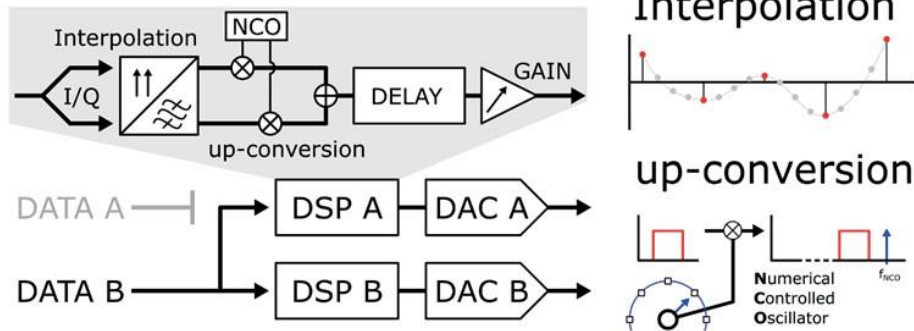


图8 DAC 插值和上变频功能

这款 DAC 的 25GHz 的带宽会产生很高的数据吞吐量。这款 DAC 配备了上变频和可调插值功能，以缓解这种潜在的数据瓶颈。用户可以使用三个阶段的插值。通过上采样和数字滤波，每个阶段的数据采样率可以加倍。采用四级法罗滤波器，确保滤波器延迟与上变频各级的插值系数相匹配。插值器的复合传递函数如图 9 所示。图 9 的下半部分显示了通带特性的扩展。

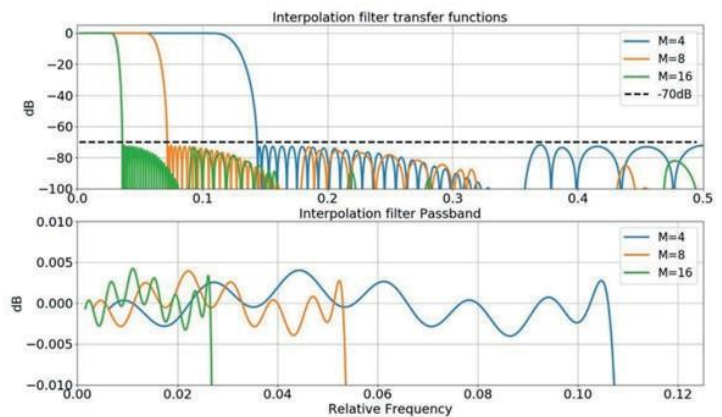


图9 70dB 插值滤波(x4, x8 and x16)和扩展通带

输出信号由数字模式文件指定给 DAC。这些文件包含每个样本的信号幅度数据。由于两个通道的波形模式是相同的，数据只需要传输到一个核心，传输数据吞吐量减半。还要注意的，简单的测试波形(正弦波、方波或三角波)可以通过指定频率、幅度和其他信号参数的 DDS 模块直接在板载 DAC 上生成。

实际的波束形成操作

在系统启动和同步后，每个 DAC 准备通过串行数据通道(HSSL)接收数字数据。在波束形成模式下，核心 B 的数据被送到两个核心。使用波束形成的基本要求是插值电平的选择。这样可停用一些串行通道。这非常有用，因为停用数据通道减少了系统的能量消耗。

DAC 的配置是通过 SPI 寄存器建立的。每个 DAC 核心的信号幅度和延迟设置寄存器有四个副本，允许存储四个单独的信号配置文件。当使能时，这些预加载的“区域”可以通过触发事件在 DAC 中快速切换，实现快速波束跳变。区域之间的切换既可以是相位连续的，也可以是相位不连续的。

板载数控振荡器(NCO)可实现数字上变频。NCO 生成正弦波函数。为此，NCO 使用了查找表和 CORDIC(坐标旋转数字计算机)算法的组合。对于每个时钟信号，都将一个设定的相位值添加到片上相位累加器中。高位直接来自查找表，低位则来源于 CORDIC。这样，DAC 提供了核心数字功能来控制射频域的波束转向。



实验结果

该图显示了初始模拟和测试结果之间的比较。主波束宽度为 26 度，旁瓣衰减为 -13 dB。测量的旁瓣定位和信号零点与仿真结果吻合良好。在高角度观测到的信号噪声特别值得注意，这是由反射引起的。

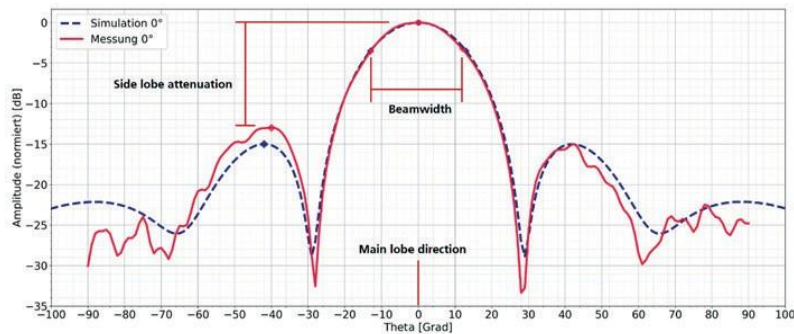


图 10 初始测试数据（红色）和模拟（蓝色）的比较

我们对振幅衰减进行了评估。实验结果表明，可以进一步实现 -3 dB 的旁瓣衰减，如图 11 所示

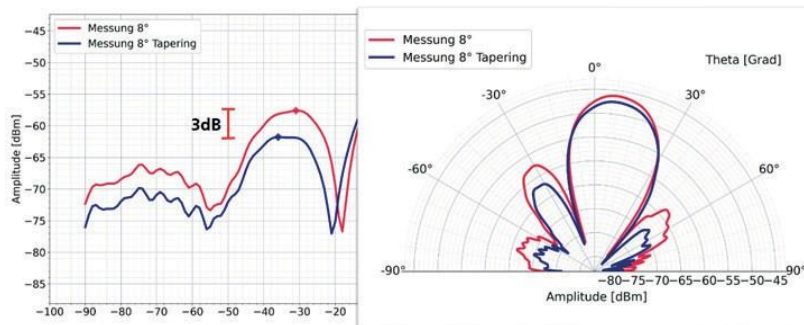


图 11 由逐渐衰减产生的 3 dB 旁瓣抑制

结论

该项目表明，EV12DD700 提供了用于实现一个简单的平面微带天线的射频波束转向的所有必要的控制功能。该项目集中于模拟一个简单的四元微带阵列的预期性能并建立一个数字控制系统。该项目的实际实现利用了 Teledyne e2v 的 EV12DD700 双 25GHz DAC——一款可提供全套可编程波束形成功能的器件。

射频测量有助于确定模型性能和测量性能之间的差异。实验出现了几个改进的方面。总体而言，理论和实践结果吻合良好。逐渐衰减的旁瓣效果很好。此外，DAC 的相位和信号幅度控制的粒度是非常理想的。测试时需仔细匹配电缆长度，以确保跨通道的关键信号相位匹配。DAC 的嵌入式相位控制在这里也有帮助。

一个值得注意的系统优势来自 DAC 的同步链。这个实验虽然只有两个器件同步，但菊花链的优势得到了充分的体现。毫无疑问，这将在未来的大型阵列部署中更加引人注目。

最后值得强调的是，这款 DAC 具有 25 GHz 带宽和 12 Gsps 采样率，在 2RF 模式下很容易将有用的 RF 功率投射到 Ka 频段。芯片上的数字波束形成功能在这样的频率上同样适用。这些功能标志着微波射频软件化和智能宽带微波天线时代的到来。



参考文献

- Performanz von integriertem und kombiniertem Beamforming mittels Digital-Analog-Umsetzern by Jan Raab - Performance of integrated and combined beamforming using digital-to-analog converters by Jan Raab, 22/9/22 in collaboration with Fraunhofer IIS, Erlangen, Germany.
- EV12DD700 Dual channel Ka-band capable 12 GSps DAC Datasheet



更多信息，请联系：

Nicolas Chantier

Teledyne e2v Semiconductors
市场总监

信号和数字处理解决方案

nicolas.chantier@teledyne.com



更多信息，请联系：

Christof Schlund

Fraunhofer 集成电路研究所
射频电路组组长

通信系统部门

[*christof.schlund@iis.fraunhofer.de](mailto:christof.schlund@iis.fraunhofer.de)

