

相控阵波束成形IC简化天线设计

作者: Keith Benson

摘要

为提高性能,无线通信和雷达系统对天线架构的需求不断增长。只有那些功耗低于传统机械操纵碟形天线的天线才能实现许多新的应用。除了这些要求以外,还需要针对新的威胁或新的用户快速重新定位,传输多个数据流,并以超低的成本,延长工作寿命。有些应用需要抵消输入阻塞信号的作用,降低拦截概率。正在席卷整个行业的相控阵天线设计为这些挑战提供了解决办法。人们开始采用先进的半导体技术解决相控阵天线过去存在的缺点,以最终减小这些解决方案的尺寸、重量和功率。本文将简要介绍现有的天线解决方案以及电控天线的优势所在。在此基础上,本文将介绍半导体技术的发展如何帮助实现改进电控天线SWaP-C这一目标,然后举例说明ADI技术如何做到这一点。

简介

依靠天线发送和接收信号的无线电子系统已经运行了100多年。随着精度、效率和更高级指标变得越来越重要,这些电子系统将继续改进和完善。在过去几年中,碟形天线已被广泛用于发射(Tx)和接收(Rx)信号,其中方向性至关重要,并且经过多年的优化,许多这些系统都能以相对低的成本良好地运行。这些碟形天线拥有一个用于旋转辐射方向的机械臂,它们的确存在一些缺点,包括转向慢、物理尺寸大、长期可靠性差并且只有一个符合要求的辐射图或数据流。因此,工程师们已转向先进的相控阵天线技术来改进这些特性、添加新功能。相控阵天线采用电动转向机制,相比传统机械转向天线具有诸多优点,例如高度低/体积小、更好的长期可靠性、快速转向、多波束等。凭借这些优势,相控阵已经被军事应用、卫星通信和包括车联网在内的5G电信等应用中得到广泛运用。

相控阵技术

相控阵天线是组装在一起的天线元件的集合,其中,每个元件的辐射图均在结构上与相邻天线的辐射图组合形成称为主瓣的有效辐射图。主瓣在期望位置发射辐射能量,而根据设计,天线负责破坏性地干扰无用方向上的信号,形成无效信号和旁瓣。天线阵列设计用于最大化主瓣辐射的能量,同时将旁瓣辐射的能量降低

到可接受的水平。可以通过改变馈入每个天线元件的信号相位来操纵辐射方向。图1展示了如何通过调整每个天线中信号的相位,将有效波束控制在阵列的目标方向上。结果,阵列中的每个天线都具有独立的相位和幅度设置,以形成期望的辐射图。由于没有机械运动部件,所以很容易理解相控阵中波束快速转向的属性。基于IC的半导体相位调整可以在几纳秒内完成,这样我们就可以改变辐射图的方向,针对新的威胁或用户快速做出响应。类似地,我们可以从辐射波束变为有效零点以吸收干扰物的信号,使该物体看起来不可见,隐形飞机即是如此。重新定位辐射图或改变为有效零点,这些变化几乎可以立即完成,因为我们可以使用基于IC的器件而非机械部件,以电气方式改变相位设置。相控阵天线相比机械天线的另一个优势是它能同时辐射多个波束,因而可以跟踪多个目标或管理多个数据流的用户数据。这是通过在基带频率下对多个数据流进行数字信号处理来实现的。

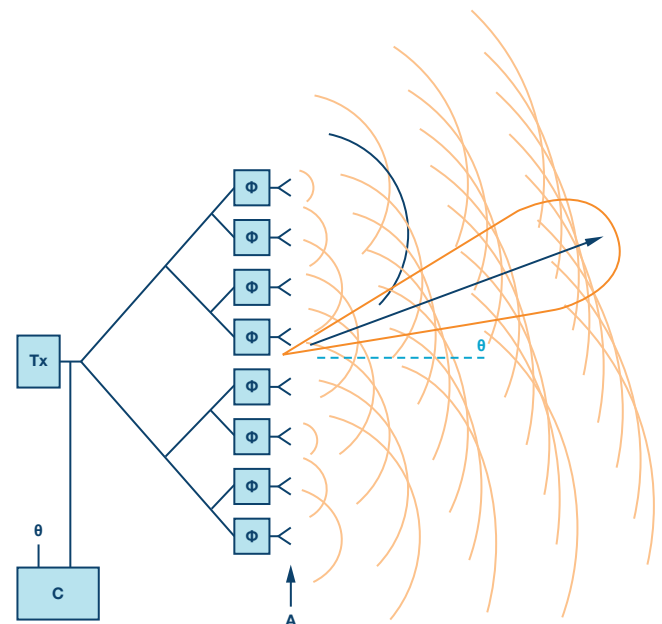


图1. 相控阵元件基础理论图。

该阵列的典型实现方式使用以等间隔行列配置的贴片天线元件，其采用4×4式设计，意味着总共有16个元件。图2所示为一个小型4×4阵列，其中，贴片天线为辐射器。在地面雷达系统中，这种天线阵列可以变得非常大，可能有超过100,000个元件。

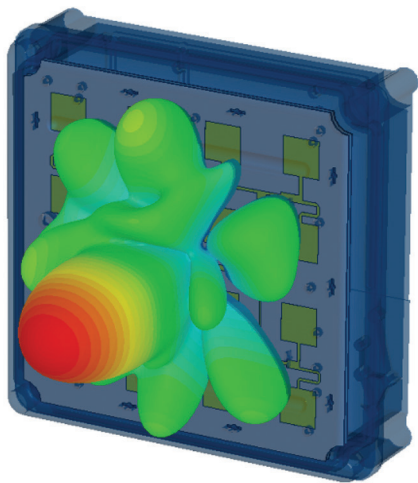


图2. 4×4元件列阵的辐射图展示。

在设计时要考虑阵列大小与每个辐射元件的功率之间的权衡关系，这些元件会影响波束的方向性和有效辐射功率。可以通过考察一些常见的品质因数来预测天线的性能。通常，天线设计人员会考察天线增益、有效各向辐射功率（EIRP）及Gt/Tn。有一些基础等式可用于描述以下等式中所示的这些参数。我们可以看到，天线增益和EIRP与阵列中元件的数量成正比。这可能导致地面雷达应用中常见的大型阵列。

$$\text{天线增益 (Gt)} = \frac{\text{期望方向的辐射强度}}{\text{各向同性天线的辐射强度 (所有角度)}} = 10 \log N + G_e$$

$$EIRP = P_t \times G_t$$

$$\frac{G_t}{T_n} = \frac{\text{天线增益}}{\text{噪声温度}}$$

$$T_n = [\text{噪声系数} - 1] \times \text{温度}$$

$$P_t = 10 \log N + P_e$$

其中

N = 元件数量

Ge = 元件增益

Gt = 线增益

Pt = 发射机总功率

Pe = 每个元件的功率

Tn = 噪声温度

相控阵天线设计的另一个关键方面是天线元件的间隔。一旦我们通过设定元件数量确定了系统目标，物理阵列直径很大程度上取决于每个单元构件的大小限制，其要小于大约二分之一波长，因为这样可以防止栅瓣。栅瓣相当于在无用方向上辐射的能量。这对

进入阵列的电子器件提出了严格的要求，必须做到体积小、功率低、重量轻。半波长间隔在较高频率下对设计特别具有挑战性，因为其中每个单元构件的长度会变小。这推高了更高频率IC的集成度，促使封装解决方案变得更加先进，并且使困难不断增加的散热管理技术得到了简化。

我们构建整个天线时，阵列设计面临许多挑战，包括控制线路由、电源管理、脉冲电路、散热管理、环境考虑因素等。业界有一股庞大的推动力量，促使我们走向体积小、重量轻的低剖面阵列。传统的电路板结构使用小型PCB板，其上的电子元件垂直馈入天线PCB的背面。在过去的20年中，这种方法不断改进，以持续减小电路板的尺寸，从而减小天线的深度。下一代设计从这种板结构转向平板式方法，其中，每个IC都有足够高的集成度，可以简单地安装在天线板的背面，大大减小了天线的深度，使它们能更容易地装入便携应用或机载应用当中。在图3中，左图展示了PCB顶部的金色贴片天线元件，右图显示了PCB底部的天线模拟前端。这只是天线的一个子集，其中，天线一端可能发生频率转换级；同时也是一个分配网络，负责从单个RF输入开始路由到整个阵列。显然，集成度更高的IC显著减少了天线设计中的挑战，并且随着天线变得越来越小，越来越多的电子元件被集成到越来越小的空间中，天线设计需要新的半导体技术来帮助提高解决方案的可行性。

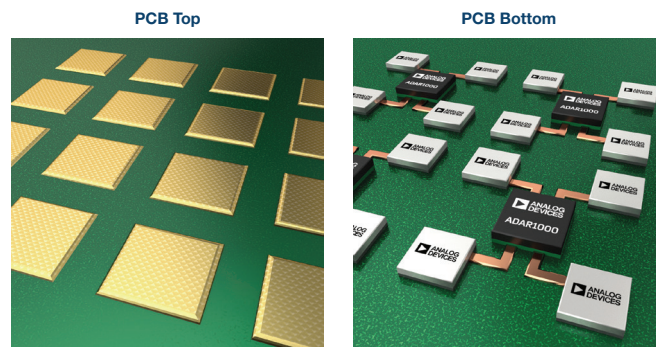


图3. 平板阵列，图中所示为PCB顶部的天线贴片，IC则位于天线PCB的背面。

数字波束合成与模拟波束合成

过去几年设计的大多数相控阵天线都使用了模拟波束成形技术，其中的相位调整是在RF或IF频率下进行的，并且整个天线都采用一组数据转换器。人们越来越关注数字波束成形，其中，每个天线元件都有一组数据转换器，并且相位调整是在FPGA或某些数据转换器中以数字方式完成的。数字波束成形有许多好处，从轻松传输多条波束的能力，甚至还能即刻改变波束的数量。这种卓越的灵活性在许多应用中都具有极强的吸引力，并且对其普及化也起着推动作用。数据转换器的不断改进降低了功耗并且扩展到了更高的频率，L波段和S波段的RF采样使这项技术可以用于雷达系统。在考虑模拟与数字波束成形两个选项时，需要考虑多种因素，但分析通常取决于所需波束数量、功耗和成本目标。数字波束成形方法因每个元件搭配一个数据转换器，所以其功耗通常较高，但是在形成多个波束方面，却极其灵活、便利。数据转换器还需要更高的动态范围，因为拒绝阻塞的波束成形只能在数字化之后完成。模拟波束成形可以支持多个波束，但每个波束需要额外的相位调整通道。例如，

为了形成100波束的系统，需要将1波束系统的RF移相器的数量乘以100，因此数据转换器与相位调整IC的成本考虑因素可能根据波束的数量而改变。类似地，对于可以利用无源移相器的模拟波束成形方法，其功耗通常较低，但随着波束数量的增加，如果需要额外的增益级来驱动分配网络，则功耗也将增加。常见的折衷方案是混合式波束成形方法，其中有模拟波束成形子阵列，随后是子阵列信号的一些数字组合。这是业内日益热门的一个领域，并将在未来几年继续发展壮大。

半导体技术

标准脉冲雷达系统发射可以从物体上反射的信号，雷达等待返回脉冲以映射天线的视场。在过去几年中，这种天线前端解决方案会采用分立式元件，此类元件很可能采用砷化镓技术。用作这些相控阵天线构建模块的IC元件如图4所示。它们包括一个用于调整每个天线元件相位（最终控制天线）的移相器、一个可以使波束逐渐变细的衰减器、一个用于传输信号的功率放大器和一个用于接收信号的低噪声放大器，另有一个用于在发射与接收之间切换的开关。在过去的实施方案中，这些IC中的每一个都可能放在5mm×5mm的封装中，更先进的解决方案则可能用集成式单片单通道GaAs IC来实现该功能。

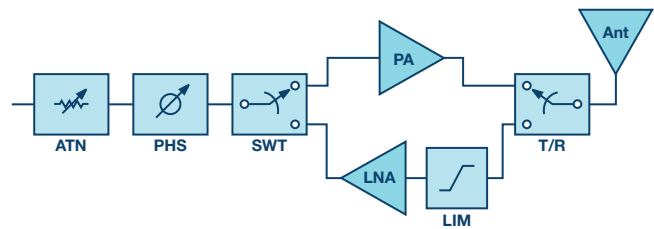


图4. 相控阵天线的典型RF前端示例。

相控阵天线近年来的普及离不开半导体技术的推动。SiGe BiCMOS、SOI（绝缘体上硅）和体CMOS中的高级节点将用于控制阵列中转向的组合数字电路以及用于实现相位和幅度调整的RF信号路径集成到单个IC当中。如今，我们已经可以实现多通道波束成形IC，此类IC可在4通道配置中调整增益和相位，最多可支持32个通道，可用于毫米波设计。在一些低功耗示例中，基于硅的IC有可能为上述

所有功能提供单片解决方案。在高功率应用中，基于氮化镓的功率放大器显著提高了功率密度，以适应相控阵天线单元构件的需求，传统上这些天线基本上由基于行波管（TWT）的功率放大器或基于较低功率GaAs的功率放大器伺服。在机载应用中，我们看到了平板架构日益盛行的趋势，因为其同时具有GaN技术的功率附加效率（PAE）优势。GaN还使大型地基雷达能够从由TWT驱动的碟形天线转向基于相控阵的天线技术。我们目前能使用单片GaN IC，这类IC能提供超过100瓦的功率，PAE超过50%。将这种PAE水平与雷达应用的低占空比相结合，可以确定天线阵列的尺寸、重量和成本。在GaN的纯功率能力以外，与现有GaAs IC解决方案相比的额外好处是尺寸减小了。将X波段的6 W至8 W GaAs功率放大器与基于GaN的解决方案进行比较可将占位面积减少50%或以上。在将这些电子器件装配到相控阵天线的单元构件中时，这种占位面积的减小有着显著的意义。

ADI公司的模拟相控阵IC

ADI公司开发了集成模拟波束成形IC，其可以支持雷达、卫星通信、5G通信等一系列应用。ADAR1000 X-/Ku波段波束成形IC是一款4通道器件，覆盖频段为8 GHz至16 GHz，工作于时分双工（TDD）模式，其发射器和接收器集成在一个IC当中。该器件是X波段雷达应用以及Ku波段卫星通信的理想选择，在这类应用中，IC可以配置为仅以收发器模式或仅接收器模式运行。这款4通道IC采用7 mm×7 mm QFN表贴封装，可轻松集成到平板阵列当中，在发射模式下功耗仅为240 mW/通道，在接收模式下功耗仅为160 mW/通道。收发器和接收器通道直接可用，在外部设计上可以与ADI公司提供的前端模块（FEM）配合使用。图5显示了具有全360°相位覆盖的增益和相位控制，可以实现小于2.8°的相位步长和优于31 dB的增益控制。ADAR1000集成片上存储器，可存储多达121个波束状态，其中一个状态包含整个IC的所有相位和增益设置。发射器提供大约19 dB的增益和15 dBm的饱和功率，其中接收增益约为14 dB。另一个关键指标是增益控制的相位变化，其在20 dB范围内约为3°。同样，在整个360°相位覆盖范围内，相位控制的增益变化约为0.25 dB，缓解了校准难题。

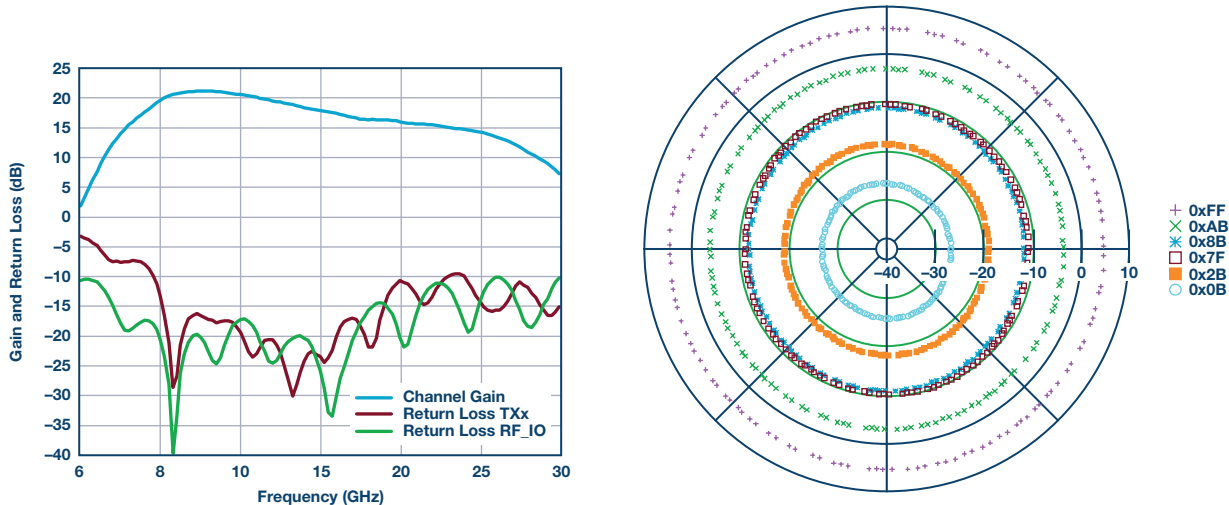


图5. ADAR1000 Tx增益/回波损耗和相位/增益控制，频率 = 11.5 GHz。

该波束成形IC专为模拟相控阵应用或混合阵列架构而开发，混合阵列架构将一些数字波束成形技术与模拟波束成形技术结合了起来。ADI公司提供从天线到位的完整解决方案，包括数据转换器、频率转换、模拟波束成形IC以及前端模块。组合芯片组使ADI公司能够将多种功能组合起来并对IC进行适当优化，从而轻松地为客户实现天线设计。

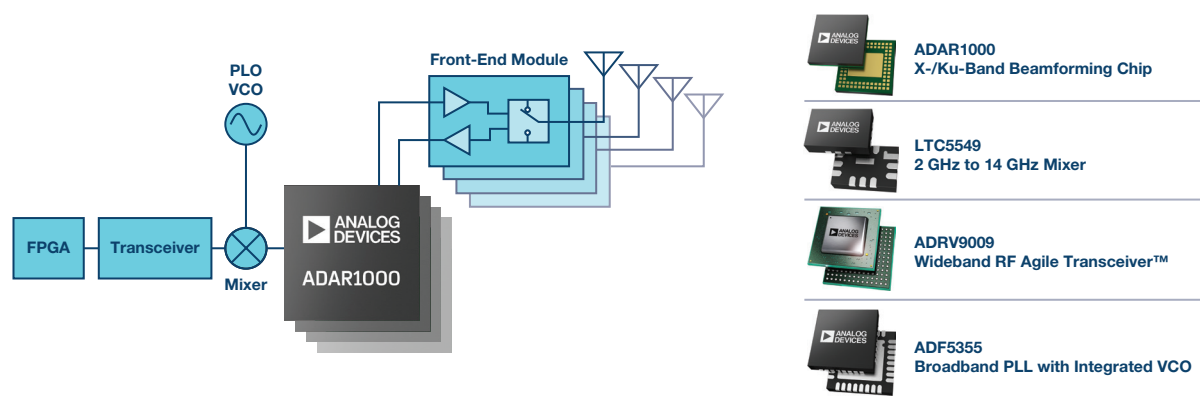


图6. 访问analog.com/phasedarray, 了解有关ADI相控阵产品的更多信息。

Keith Benson [keith.benson@analog.com] 于2002年毕业于马萨诸塞大学安姆斯特分校，获电气工程学士学位，2004年毕业于加州大学圣塔芭芭拉分校，获电气工程硕士学位。他之前就职于Hittite Microwave，主攻RF无线电子的IC设计。然后转向IC设计工程师团队管理，主要负责无线通信链路。2014年，ADI公司收购了Hittite Microwave，Keith成为ADI公司RF/微波放大器和相控阵IC的产品线总监。Keith目前拥有3项新颖放大器技术方面的美国专利。



Keith Benson

该作者的其他文章

GaN打破壁垒—RF功率放大器的带宽越来越宽、功率越来越高：
第51卷，第3期