

结合两种技术的优势： 实时延迟与移相器

Bilgin Kiziltas, 现场应用工程师

摘要

本文概述两种电子波束成形技术的优点和缺点：移相器(PS)和实时延迟(TTD)。人们认为，可以在混合波束成形架构中组合使用这两种方法，以提供更好的SWaP-C和复杂程度相对较低的系统设计。

简介

电子扫描阵列(ESA)使用PS或TTD或两者的组合，在阵列的转向角限值内使汇聚波束指向目标方向。用于实现锥形波束的可调衰减器也可以被视为波束成形元件。本文探讨在相同的ESA中，在何处以及如何使用TTD和PS分层方法可以帮助消除一些相控阵设计挑战。

利用基本公式探索可能的使用场景

瞬时带宽(IBW)可以定义为无需调谐，即可保持在基于系统要求设定的目标性能指标内的频段。

TTD在该频率范围内具有恒定的相位斜率；因此，使用TTD，而非使用PS的ESA实施方案不会出现波束斜视效应。所以，对于高IBW应用，基于TTD的ESA更加方便。

PS在其工作频率范围内具有恒定的相位；因此，在整个系统中，特定的移相器设置会导致在不同的频率下产生不同的波束转向角。所以，与基于TTD的阵列相比，基于PS的阵列的IBM范围可能更窄一些。

这种现象被称为波束斜视，可以使用公式1计算，其中 $\Delta\theta$ 表示峰值斜视角， θ_0 表示最大波束角， f_0 表示载波频率， f 表示瞬时信号频率。

$$\Delta\theta = \sin^{-1}\left(\frac{f_0}{f} \times \sin\theta_0\right) - \theta_0 \quad (1)$$

使用公式1，我们可以计算出在最坏情况下，即低频率边缘（载波频率为3 GHz，瞬时信号频率为2.9 GHz）下， $\pm 30^\circ$ 波束转向角系统的 $\Delta\theta$ 约为 1.15° ，信号频率为3 GHz，IBW为100 MHz。在最坏情况下，将波束转向角调节到 $\pm 60^\circ$ ，将IBW调节到200 MHz，会导致约 8.11° 的波束斜视。很明显，即使在雷达应用中，TTD也是更合适的选择。可以说，相比TTD，PS的设计简单和成本优势使其适用于更广泛的市场，所以ESA主要采用移相器。

如果TTD能够符合系统要求，那么在相同的信号链中使用PS合理吗？

为了验证，我们对一个 32×32 （正方形）的ESA进行试验，其天线元件之间的栅距(d)为 $d = \lambda/2$ ，工作频率范围为8 GHz至12 GHz，扫描角度为 $\pm 60^\circ$ ，且假定所有场景（图4）都符合EIRP标准。

在本例中，根据公式2中给出的均匀线性阵列的半功率波束宽度近似公式，方位角和仰角对应的系统波束宽度分别为 $\cong 3.17^\circ$ （视轴， $\theta = 0^\circ$ ）和 $\cong 6.35^\circ$ （最大扫描角， $\theta = 60^\circ$ ），其中N表示一个轴上的元素数， θ_B 表示同一轴上的波束宽度（单位为度）。

$$\theta_B = \frac{50.764 \lambda}{Nd \cos \theta} \quad (2)$$

当每个天线元件都使用6位5.6°LSB PS时，根据公式3可以计算得出，该阵列的一维最大波束角分辨率 θ_{RES_MAX} 约为 $\cong 0.056^\circ$ 。

$$\theta_{RES_MAX} = \sin^{-1}\left(\frac{\Phi_{LSB}}{\pi} \times \frac{2}{N}\right) \quad (3)$$

根据用于时移和相移转换的方程4，在12 GHz时，要获得 0.056° 波束角分辨率，需要使用一个约1.3 ps LSB TTD来代替5.6°LSB PS。

$$T = \frac{\Delta\Phi}{2\pi f} \quad (4)$$

即使在很小的扫描角度下，波束宽度值也远大于波束角分辨率，将PS与TTD串联可以补偿波束角分辨率，但会产生额外的波束斜视，也会降低系统的波束角分辨率。实际上，使用分辨率更高的TTD是为了实现更低的量化旁瓣水平(QSL)，而不是为了实现更高的波束角分辨率。随着频率升高，相比根据所需的相位分辨率设计PS，根据所需的时间分辨率设计TTD来满足目标QSL标准相对更加困难；因此，可以将PS和TTD组合使用，不但可以达到目标QSL标准，而且仍然可以保持合理的波束斜视水平。

在同一个ESA中同时采用PS和TTD是为了在设计具有交叉极化能力的系统时，可以减轻波束斜视。交叉极化是通过在天线元件的V端和H端之间设置90°相移来产生的。在要求的交叉极化带宽内，使两端之间的相移尽可能接近90°有助于实现出色的交叉极化隔离，以保证良好运行。基于PS的ESA在频率范围内保持恒定相位，所以具有宽带交叉极化能力（图1），基于TTD的ESA则不同，只有在单个频率下，两端之间才能达到90°（图2）。图3所示的架构可用于使用交叉极化，同时消除波束斜视。

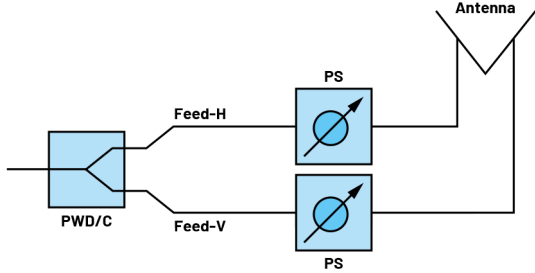


图1. 天线元件的V和H端使用移相器时的无非斜视宽带交叉极化。

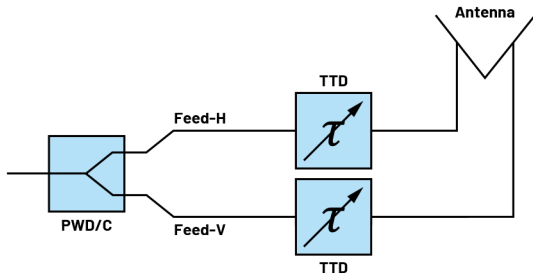


图2. 天线元件的V和H端使用实时延迟时的无斜视窄带交叉极化。

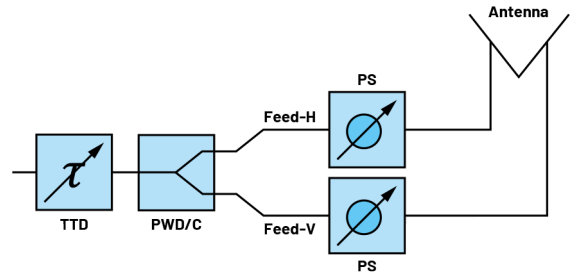


图3. 天线元件的V和H端的通用leg和移相器的实时延迟可以优化波束斜视，并实现宽带交叉极化能力。

TTD覆盖范围由最低工作频率下，整个阵列中相距最远的两个元件之间的最大延迟 Δt_{MAX} 决定。根据公式5，图4所示的阵列示例的TTD覆盖约2.45 ns。

$$\Delta t_{MAX} = \frac{Nd\sqrt{2}\sin\theta_{MAX}}{c} \quad (5)$$

在不需要交叉极化时，是否能使用TTD取代天线元件中的PS，需要考虑几点。这种覆盖意味着很高的损耗，且很难适应天线间距。在给定的覆盖范围内，使用6位相位PS的分辨率会带来一些设计挑战，且会导致TTD中设置多个延迟级。

如果分辨率保持不变，通过减少覆盖范围来消除这些缺陷，那么在超过该覆盖范围时（使用公式4计算等效相位），则会归零，然而波束斜视特性会消失。

这种快速分析表明，即使在不需要交叉极化时，在每个天线元件中使用PS，然后在子阵列的通用leg中使用TTD，这种结构非常有效。图4中的TTD还是需要相同的覆盖范围，但现在它们用于匹配子阵列之间相对较大的时间延迟，因此其分辨率要求相对于每个天线元件中的TTD有所放宽。

将相控阵分为子阵列可以降低系统的成本和复杂性，但会导致更高的扫描损耗，且会降低波束转向分辨率。通过提供更宽的波束宽度，子阵列的波束宽度更宽，对波束斜视效应的耐受性会更高。从子阵列的大小这点来看，波束斜视和波束宽度目标显然是重要的考量因素。

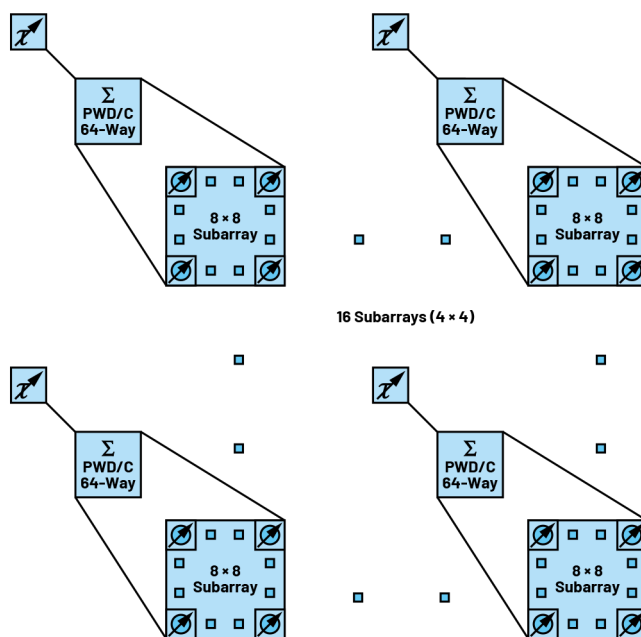


图4. 1024 (32 × 32)元件阵列分为16个子阵列，每个子阵列由8 × 8个元件组成。

结论

在每个天线元件中采用实时延迟是为了实现无宽带斜视操作，每个天线元件的V和H端使用移相器，则是为了实现宽带交叉极化操作。

如果不需要交叉极化，且目标是实现完全无斜视操作，则应采用基于TTD的设计。随着频率增大，增加PS有助于满足QSLI目标，但会影响无斜视操作。

如果需要交叉极化，那么天线的每个极化端都应连接完全一样的单个PS，且在工作带宽上实现严格的90°相移。在PS的通用leg上增加TTD有助于消除波束斜视。

无论是否需要交叉极化，在子阵列结构中，在天线元件中使用PS，然后在子阵列的通用leg中使用TTD，这会是一种经济高效的解决方案。注意，可以在数字域中实现TTD功能，所有数字设计都可以消除TTD和PS，但这会导致系统成本升高。

在深入研究ESA设计面临的无数挑战之前，了解单独使用TTD或PS与将二者组合使用之间的差异是规划系统级波束成形架构的一个重要部分，该架构具有更好的SWaP-C，可以满足系统要求。

ADI公司提供丰富的解决方案、平台和产品组合，适用于各种应用中的所有模拟、数字和混合波束成形ESA，且能够为整个信号链提供定制功率解决方案。

参考资料

Peter Delos、Bob Broughton和Jon Kraft，“相控阵天线方向图——第1部分：线性阵列波束特性和阵列因子。”《模拟对话》，第54卷第2期，2020年5月。

Peter Delos、Bob Broughton和Jon Kraft，“相控阵天线方向图——第2部分：栅瓣和波束斜视。”《模拟对话》，第54卷第2期，2020年6月。

Peter Delos、Bob Broughton和Jon Kraft，“相控阵天线方向图——第3部分：旁瓣和变窄。”《模拟对话》，第54卷第3期，2020年7月。

George W. Stimson、Hugh D. Griffiths、Chris J. Baker和Dave Adamy。机载雷达简介。第3版。SciTech Publishing，2014年。

作者简介

Bilgin Kiziltas于2019年加入ADI公司，担任现场应用工程师。他于2010年获得伊斯坦布尔技术大学电子工程学士学位，并于2013年获得中东科技大学电子工程系（RF、微波、雷达和天线课程）硕士学位。在加入ADI之前，他在Aselsan雷达和电子战事业部的相控阵部门担任了9年的RF设计工程师。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，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ez.analog.com/cn



如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。请访问ez.analog.com/cn。

©2022 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

TA23928sc-6/22



请访问analog.com/cn