

用于复合材料结构检测的时间反演技术

Daniel RICHARD¹, Michael MONETTE², Guy MAES³

¹Technology Manager; Zetec, zNDT Solutions, Québec; Phone: +1 418 263 3693; e-mail: drichard@zetec.com

²Applications Engineer; Zetec, zNDT Solutions, Québec; Phone: +1 418 263 3902; e-mail: mmonette@zetec.com

³Sales Engineer Director UT; Zetec, zNDT Solutions, Québec; Phone: +1 418 263 3675; e-mail: gmaes@zetec.com

摘要

过去的15年来,相控阵技术使得超声检测的面貌焕然一新。这项技术正逐渐成熟且因其高效的检测能力被航空航天、石油天然气、核电及重工等众多行业用于关键性部件的检测。时间反演对于相控阵技术来说是一个较有潜力的应用。该技术来源于对波束参数的实时调整,可对不同探头与检测面不贴合的情况进行补偿。尤其对于碳纤维复合材料CFRP工件的制造检测具有显著效果。

本文将论述先进的相控阵系统是如何应用时反技术从而提高碳纤维复合材料的覆盖及检测能力的。通过实例与常规相控阵技术对比证明时反技术为何在同样结构复杂及探头位置有偏差的情况下检测效果更好。

前言

随着复合材料技术的不断发展,飞机机身结构的材料组成逐渐发生了变化。商用飞机制造企业越来越倾向于使用复合材料(例如CFRP碳纤维复合材料),作为飞机机身结构的组成部分(图1)。CFRP碳纤维复合材料具有质量轻、强度大的优点,通常以几何结构复杂多变的形式出现。

碳纤维复合材料工件复杂多变的几何形状对就其进行无损检测形成了一定的阻碍。目前超声相控阵是其首选的无损检测技术。要快速且获得可靠的检测结果,超声相控阵检测技术(PAUT)需配备专用的相控阵探头,高性能相控阵数据采集系统以及强大的采集、分析软件。

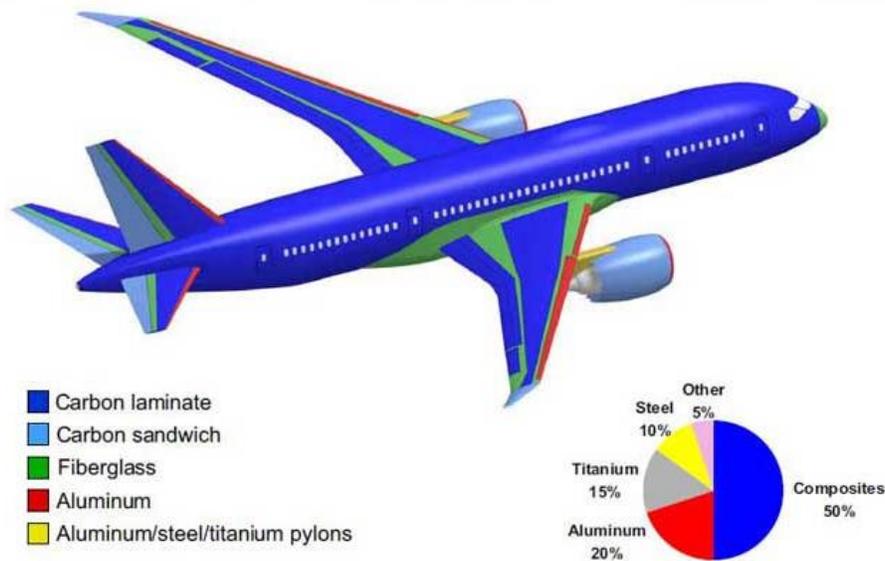


图 1. 飞机机身材料组成结构

标准的超声相控阵技术要求探头与检测面轮廓严格吻合，在工件结构复杂的情况下，通常需结合复杂且昂贵的机械系统同时需做到精确的掌握检测工件的几何结构。

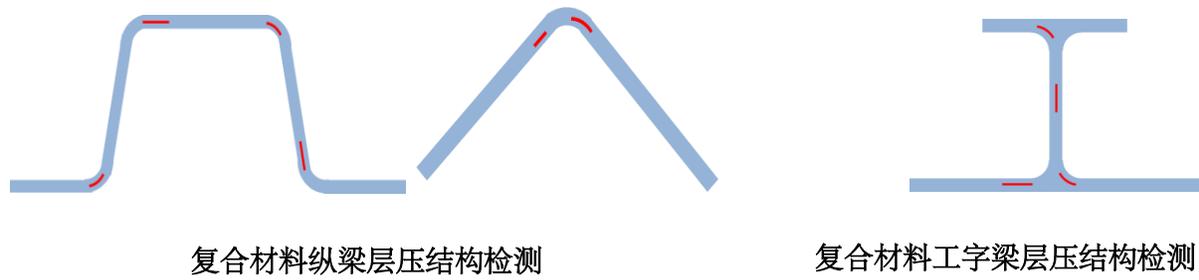
近段时间,Zetec开发出了时间反演技术,这是一种实时自适应的技术,可对结构复杂的工件进行快速且可靠的检测。本文将为大家详细介绍这项技术。

应用挑战

随着航空领域复合材料的使用量的不断上升。包括机身与机翼的不同结构;蒙皮,长桁及翼梁。这些部件都有着不同的结构,且大多数结构复杂,故检测技术需适应这些复杂的结构。

复合材料在制造过程中会产生各种缺陷，因此需对制造过程中碳纤维复合材料中潜在的孔隙、夹杂与分层等缺陷检测出来(图 2)。

这类航空组件的另一检测挑战就是检测速度。大批量的待检工件就意味着需要提高检测速度才能降低检测成本。



复合材料纵梁层压结构检测

复合材料工字梁层压结构检测

图 2. 实际工件及其潜在缺陷案例

解决方案

为克服上述存在的各项, Zetec设计出了一一种高效的复合材料检测方案。该方案基于一维线阵专用相控阵探头, 高端相控阵采集系统以及具有完整特性的软件工具包。此外Zetec的这一解决方案还可与用户的机械控制系统进行集成。

超声相控阵探头

为优化该方案的检测能力,需根据检测工件的几何形状对应挑选探头。大多数情况下波束是垂直于检测面进行检测的。而对于特殊的检测面,可能就需要不同类型的探头结合使用了。

线阵探头可用于平面的检测, 如图3所示, 这种探头通常具有32, 64或128晶片几种类型。

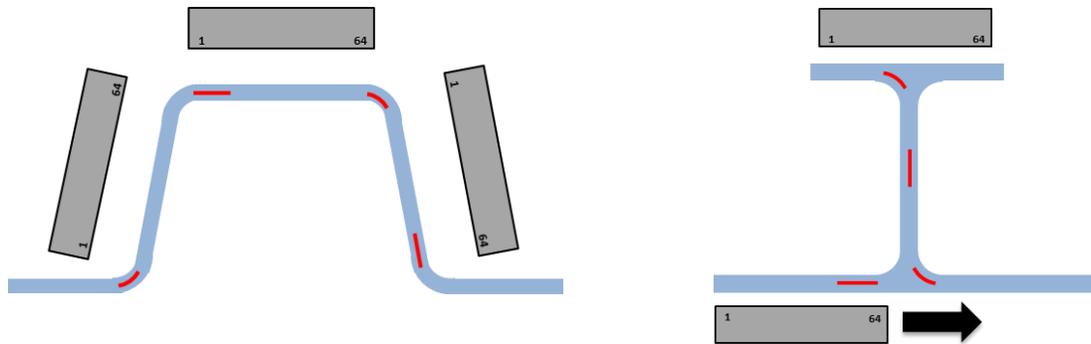


图 3. 使用1D线阵探头进行直段检测

而对于工件的圆弧段,则需要结合弧形线阵探头进行检测,通常分为32或64晶片两种类型(图 4)。

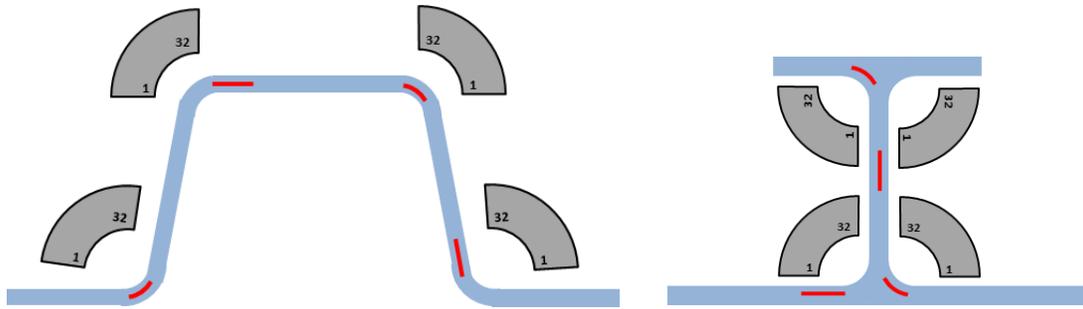


图 4. 使用弧形1D线阵探头进行凸面及凹面检测

UltraVision软件

UltraVision软件支持检测技术开发、超声数据采集、实时成像、数据分析及报告生成等多种功能，该软件适用于众多行业内的不同检测应用。近段时间,时间反演技术已作为一种新的技术手动添加到UltraVision软件的工件包中。

时间反演的概念

时间反演是一种实时自适应的超声检测技术，目的在于消除探头与工件表面轮廓不吻合带来的影响，这个过程称之为“轮廓仿形”；该过程通过计算各个晶片到达工件表面的时间来确定工件的表面状况，一旦轮廓仿形过程完成后，探头各个晶片则会被施加不同的延时进行补偿,进而可实现波束垂直于工件表面入射进行检测。

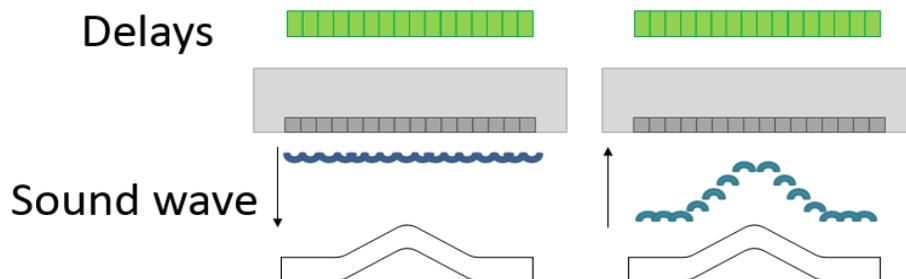


图 5. 工件表面轮廓仿形

该过程分为两步，第一步进行“轮廓仿形”，所有晶片同时激发生成垂直于检测面的波束。波束到达工件表面后,发生反射被探头接收。由于工件表面不平整造成反射回波的波阵面不再像入射时处于水平状态。

而此时，仪器会将波形的变化转换成相应的延时施加到各个晶片上，用*i*表示(如图5)。根据入射时测量出的不同回波时间,软件会计算出晶片*i*对应的延时以补偿由工件进表面造成的差异。方程式(1)和(2)给出了晶片*i*的激发与接收延时的计算过程。

$$E_i = \frac{1}{2} [\text{Max}(t_i) - t_i] \tag{1}$$

$$R_i = [\text{Max}(E_i) - E_i] \tag{2}$$

t_i 表示晶片*i*接收到回波的时间，整个计算过程会重复多次直到回波的波阵面被调整至水平状态(如图6)。

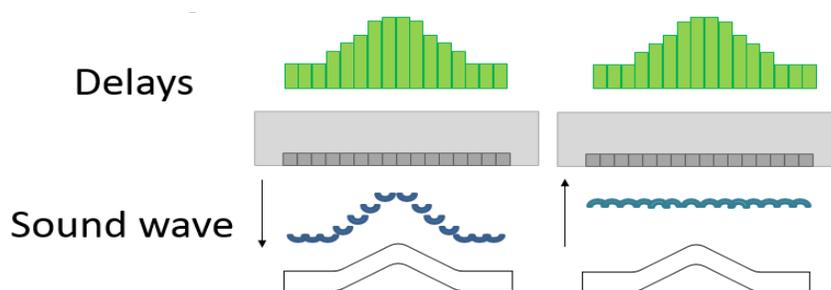


图 6. 使用延时法则适应工件表面轮廓

时反技术的第二步是使用仿形过程中最终计算出的发射-接收延时进行数据采集。而数据采集过程通常采用固定激发孔径以线性扫查的方式进行(如8晶片)。图7为采集原理(左)和实际检测数据(右)。

在任意扫查位置,为获得精确有效的检测数据,即使工件表面是不断变化的上述两个步骤仍为实时进行。

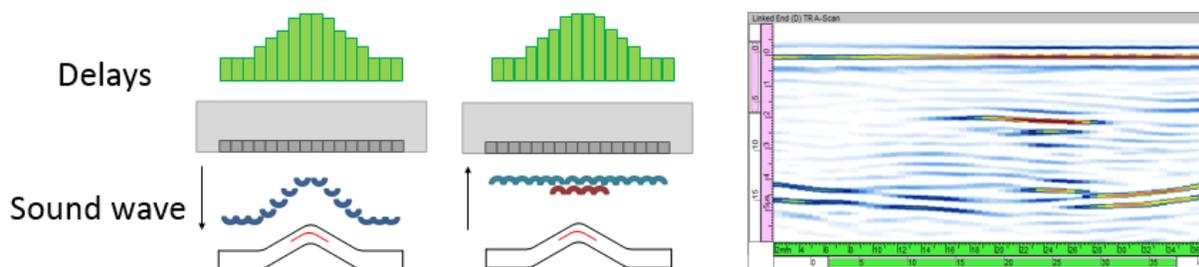


图 7. 通过延时补偿进行数据采集

值得一提的是整个过程均是实时进行的且与采用相似聚焦法则组及超声设置的标准相控阵对比，二者的扫查速度相近。

高端的超声相控阵系统

Zetec可提供不同类型且均支持时间反演技术的超声相控阵系统;如ZIRCON®、QuartZ®及TOPAZ32®。所有设备均支持电池供电及32/128通道配置。有效孔径可达32晶片,最大可支持128晶片的探头,因此设备可适应不同的检测环境。此外,多个设备可连接到同一台控制电脑上,驱动多个探头同时进行检测。(图 8)。

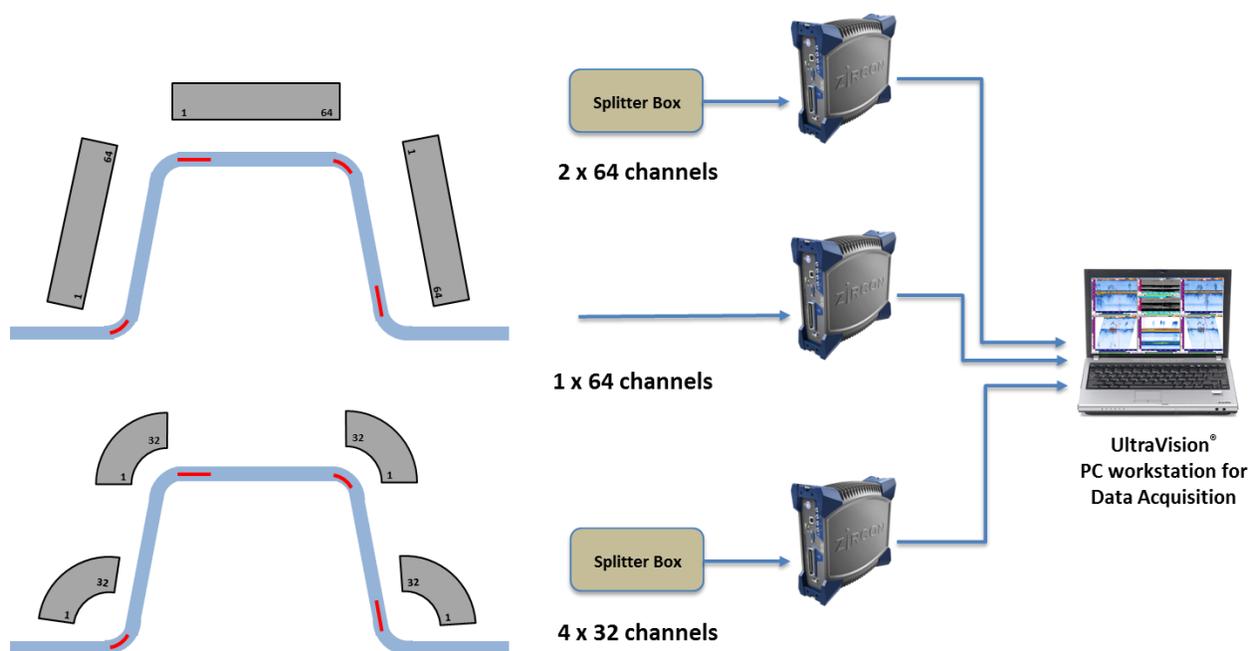


图 8. 用于典型纵梁检测的完整时间反演检测方案

案例分析

为了验证时反技术的检测能力，以下给出了一个相关的检测案例。基于这个目的让一家复合材料供应商制做了以下一块CFRP试块(如图9)。该试块具有典型复合材料相似的材料衰减特性，同时试块内加工了多个铜片以模拟真实缺陷。嵌入铜片的尺寸为3 x 10 mm及30 x 10 mm，且位于不同的位置与深度。

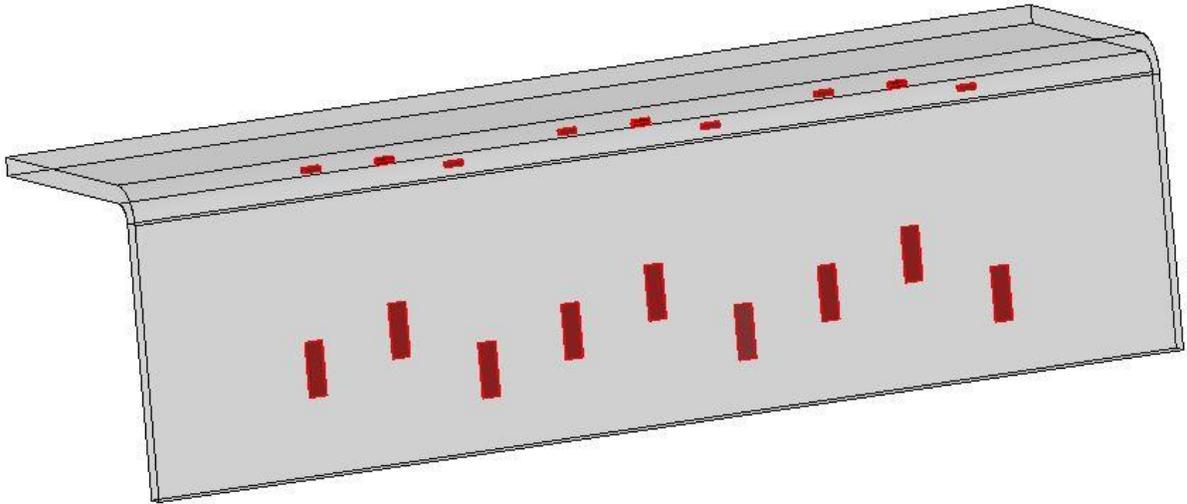


图 9. CFRP碳纤维复合材料试块,为Zetec专门设计

这种结构的工件需使用两种探头分三次进行扫查。直段使用1D线阵探头进行检测,而弧形段需使用1D弧形线阵探头。所有检测均采用水浸的方式进行。

直段检测

对于直段检测使用LM 5MHz探头,该探头具有64晶片,晶片中心间距为0.6 mm而晶片宽度为10.0 mm,探头激发孔径选择8个晶片。

该案例选择手动扫查进行,同时尽量保持探头与检测面良好的吻合度与角度。所以理论上,标准相控阵与时反技术数据应该差别不大。然而,在图10的幅值C扫中呈现出了不同的结果:尽管操作人员试图保持良好的检测状况,标准相控阵的底波幅值对此非常敏感;实际上,在水浸检测中探头与检测面存在轻微的偏差或者角度变化都可能造成底波幅值有明显的偏差。稳定的底波信号对于小孔隙的检测而言非常重要。另一方面,时反数据在整个工件厚度上呈现稳定的底波幅值变化。

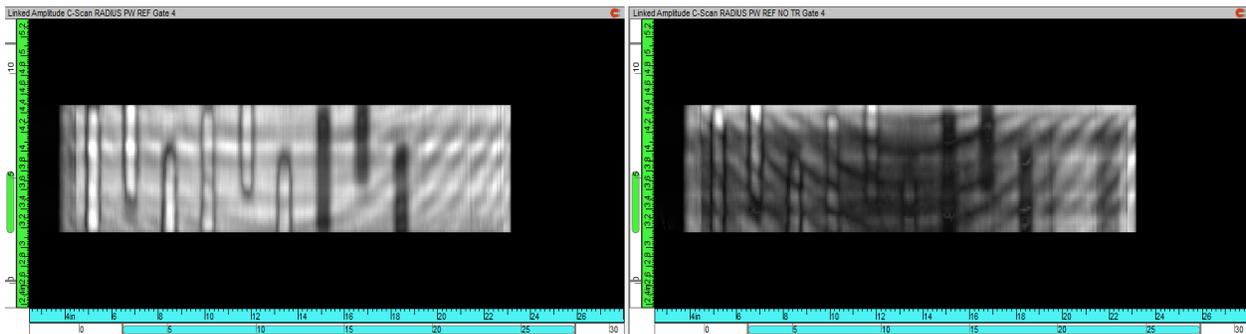


图 10. 直段幅值C扫: 时反结果(左); 标准相控阵结果(右)

弧形段检测

工件的弧形段应使用1D线阵弧形探头, 频率选择3.5 MHz, 晶片数为64。晶片中心间距为0.65 mm 且宽度为8.0 mm。同样, 激发孔径选择8个晶片。

一开始,探头会被安装在一个两轴机械装置上以保证检测面的吻合和探头角度不发生太大变化。然后会有意将探头移动约3mm,来验证时反技术对探头发生偏移时的补偿能力(图11)。

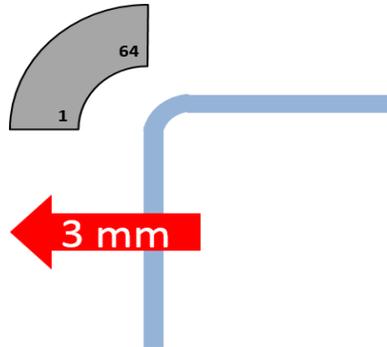


图 11. 探头与检测面不吻合

图 12表明时反技术在整個扫查线上具有良好的检测结果,所有9个缺陷均在C扫内清晰的显现出来。而标准相控阵则无法完全的检测出所有的缺陷。

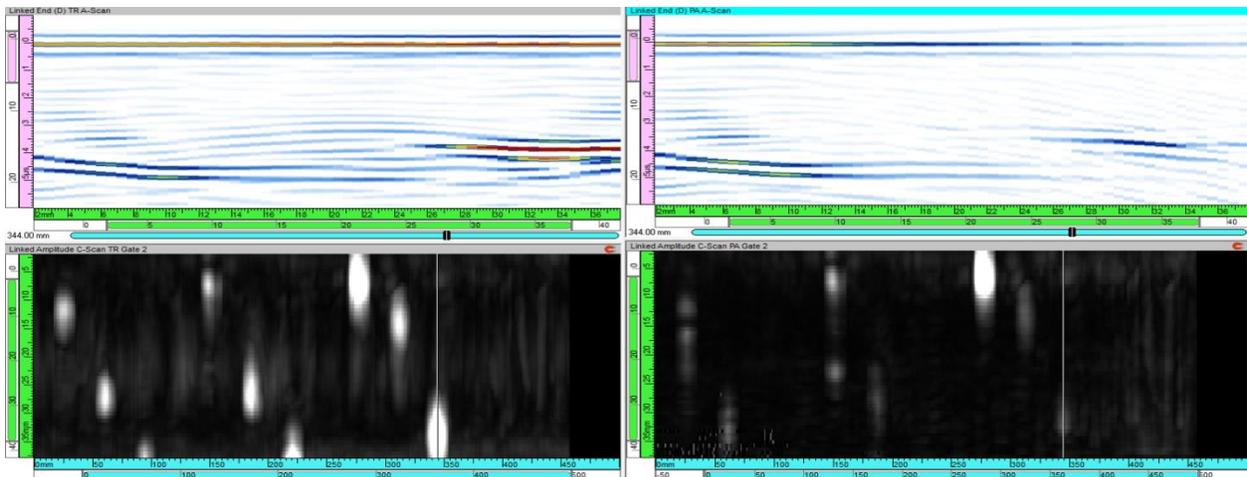


图 12. 弧形1D线阵探头时反技术的幅值C扫与D扫结果(左); 标准相控阵检测结果(右)

对于第二次实验, 探头将会与工件较好的吻合, 然后通过旋转探头支架改变波束的入射角度。

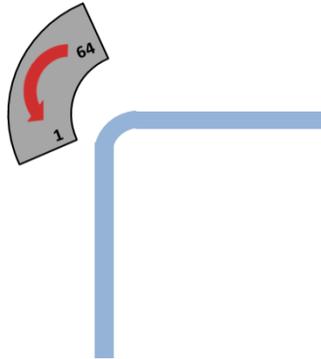


图 13. 探头转动

改变探头的方向, 标准相控阵数据则完全失效: 图14(右)发现探头未接收到任何有效信号。在同样情况下, 在同样的检测序列中, 时反技术可对探头的方向变化进行补偿, 从而能够将缺陷完全检测出来图14 (左)。

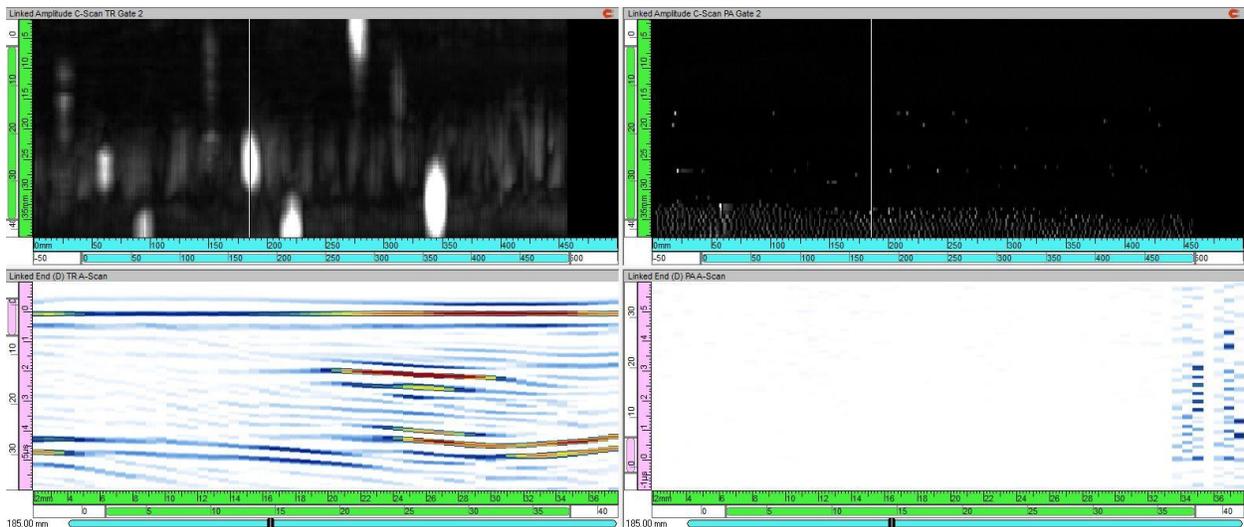


图 14. 弧形1D线阵探头错位后时反技术的幅值C扫与D扫结果(左); 标准相控阵检测结果(右)

结论

结合本文中所做的工作,可得出以下关于时间反演技术用于复合材料结构检测的主要优势的结论:

1. 时间反演技术可用于实时补偿探头与工件表面的不贴合与错位,而不会过度降低扫查速度。
2. 时反技术有助于加强缺陷检测能力,通过维持底面回波的强度,可提高对孔隙等微小缺陷的评估能力。
3. 通过减轻检测时对探头位置的严格要求,时反技术可降低机械系统的需求成本,从而为最终用户带来更多价值。
4. Zetec许多超声相控阵系统都可支持时反技术(ZIRCON®, QuartZ®, 及TOPAZ32®) 这些硬件系统均可被UltraVision®软件驱动;且多个硬件系统可同时连接在一台主机上并行激发多个探头,从而加大大幅提高检测速度的可能性。

参考文献

1. Richard D., Monette M., Maes G., “Iterative Time Reversal Technique for Inspection of Composite Structures”, WCNDT, Munich Germany, 2016
2. Richard D., Maes G., “Advanced PA UT for CFRP Components”, Zetec, Quebec, Canada, 2015