



全矩阵捕捉方案的开发及验证

论文发表于第九届核级承压部件结构完整性无损评价会议,

西雅图 (美国), 2012年6月21-24日

全矩阵捕捉方案开发及验证

Patrick Tremblay, Daniel Richard
ZETEC, 加拿大

摘要

近15年以来,相控阵技术完全改变了超声检测的面貌。这项技术正日渐成熟且因其高效性被广泛的应用于航空航天,石油天然气,重工及核电等领域重要结构部件的检测。

全矩阵捕捉技术(FMC)被认为是相控阵技术一项崭新的应用,充满着前景。通过采集及存储来自所有发射-接收晶片组合的时域信号(A扫描信号)实现全矩阵捕捉。A扫描信号经过数字化处理之后,可通过离线后处理的方式根据任意给定的波束参数(孔径, 折射/偏转角度, 聚焦位置)得到相应的结果。

为实现高效FMC数据采集, 本文将解决数据采集过程中面临的挑战同时将展示出这项技术所带来的数据处理能力。完整的验证过程将在下文中呈现出来。

此外, 为充分挖掘FMC的潜在能力, 本文还将讨论软件及硬参数等方面的考虑。

引言

长期以来主要用于医疗及实验室用途的超声相控阵技术, 如今也已被工业无损检测行业采用。自从2000年初期航空航天, 石油天然气, 重工及核电等工业领域引入超声相控阵技术进行关键性部件的超声检测以来, 相控阵技术在超声检测领域起着越来越重要的作用。

一种基于相控阵应用的先进技术正逐渐从实验室转向工业无损检测领域: 全矩阵捕捉(FMC)技术。

本文将详细阐述FMC的技术原理。同时还将论证FMC技术对比标准相控阵技术的优势以及解决为实现高效FMC数据采集所带来的挑战。下文将展示完整的实验论证过程包括与标准相控阵技术的彻底比较。

此外, 为充分挖掘FMC的潜在能力, 本文还将讨论软件及硬参数等方面的考虑。

标准相控阵 VS 全矩阵捕捉

为介绍FMC技术原理, 先简短回顾一下标准相控阵技术的原理。相控阵技术PA UT采用多个独立发射-接收通道。超声波发射阶段, 标准PA系统对相控阵探头各个晶片施加不同的时间延时, 通过不同波前的干涉叠加来获取带有特定声学特性的物理超声波束。超声波接收阶段, PA系统同样对各个晶片接收到的信号施加延时使它们处于同一相位以便进行硬件求和。最终得到求和后的数字化A扫描信号会被传输到计算机用于记录及显示(见图1)。

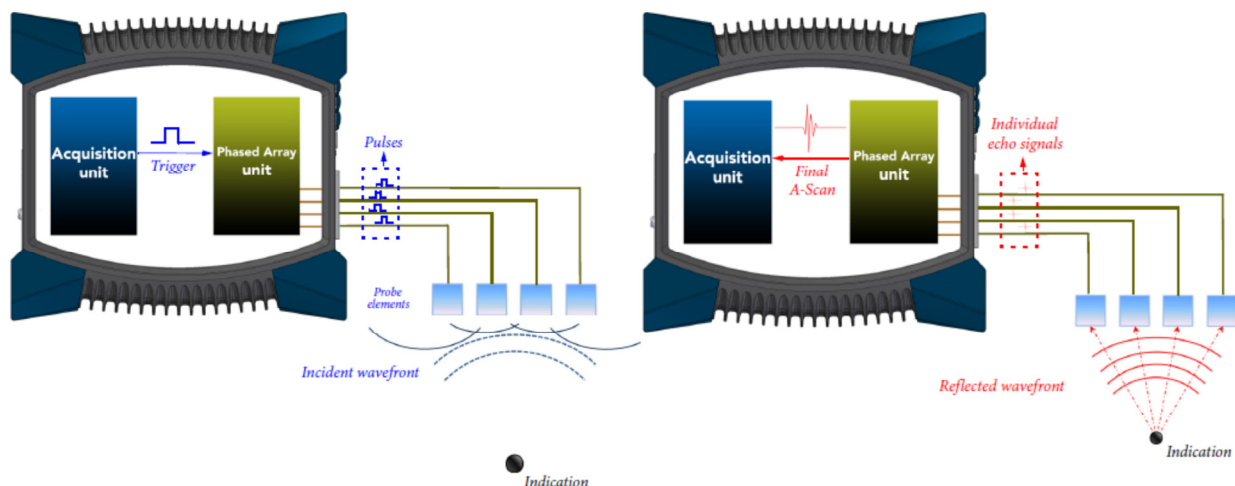


图 1: 标准相控阵发射 & 接收过程

在标准PA采集过程,原始A扫描信号只通过硬件处理, 因此不可以用作离线软件后处理。相对的, FMC技术会采集与记录所有发射-接收晶片组合的时域信号[1], 如图2所示。

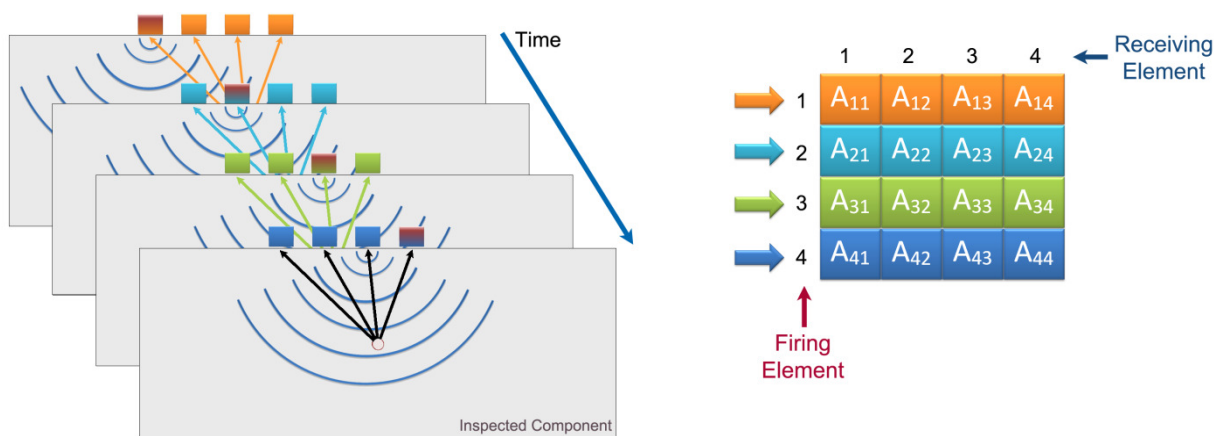


图 2: 全矩阵捕捉原理

FMC的目的不在于数据采集过程,而是对FMC获取到数据进行各种处理的可能性。实际上,一旦原始A扫描信号被存储下来,通过离线后处理的方式就可以人为的按照任意给定的波束参数(孔径, 折射/偏转角度, 聚焦位置)得到相应的结果。

图 3 阐述了由FMC数据提供的新的可能性。一个标准相控阵探头静置于带有横通孔(SDH)的校准试块上。使用标准相控阵激发扇形扫查, 生成40°至70°横波后某些横通孔可以被检测到(a)。与此同时,进行FMC数据采集(b)。通过离线后处理对FMC数据进行处理,可生成与标准相控阵相似的40°至70°横波并得到相似的结果(c)。使用同样的原始FMC数据,还可以得到-10°至10°纵波。位于探头正下方的横通孔,标准PA无法发现,却可以通过FMC处理发现(d)。此结果表明, 通过

采集FMC数据,可以在离线分析阶段可以更好的优化信号的相位求和。对比 标准PA这是FMC的一个重要优势且某些情况下可能会避免因重复扫查造成的昂贵成本。

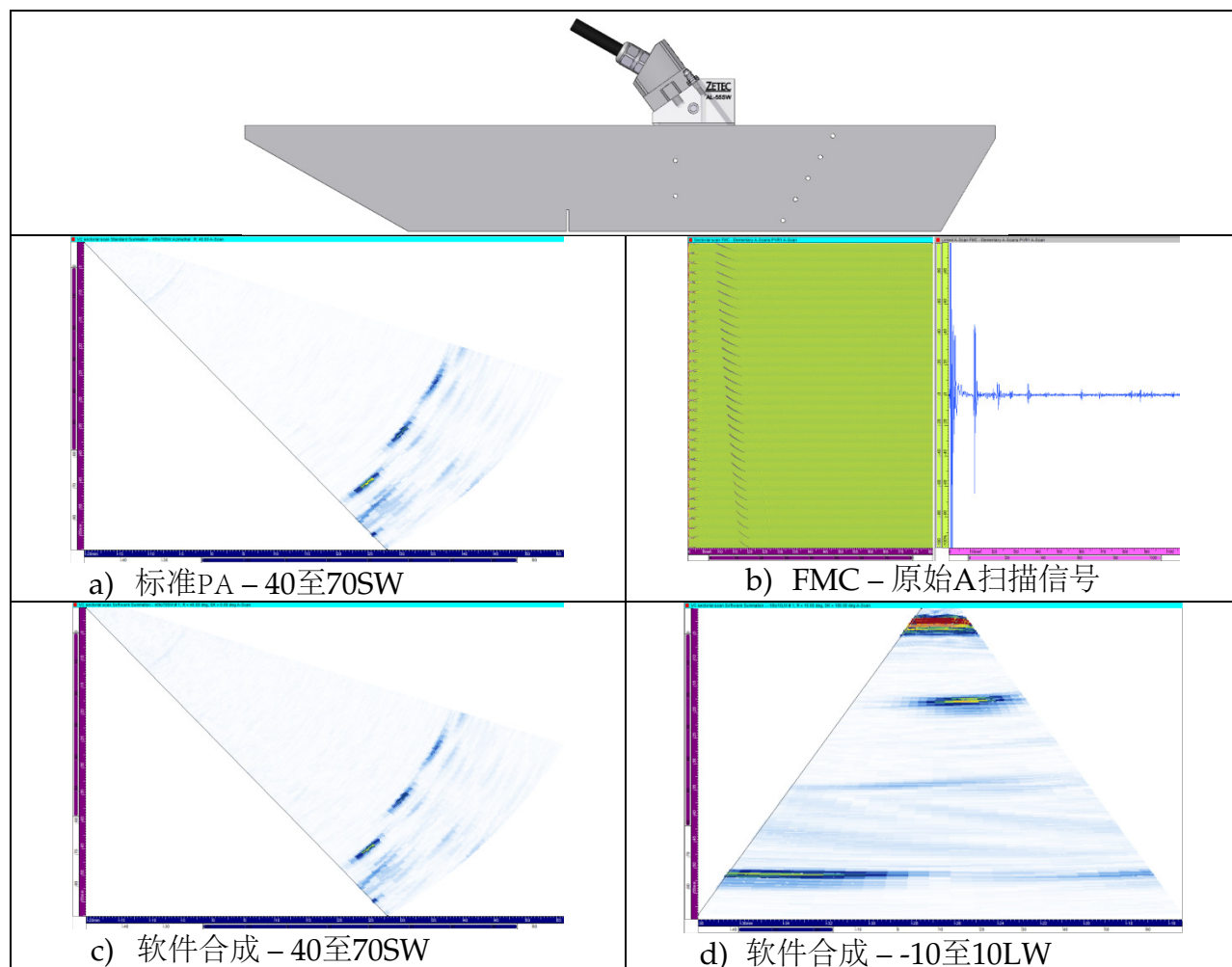


图 3: FMC数据后处理能力实例

此外,原始数据的可获得性为其它高级算法的实现打开了一扇大门。其中全聚焦TFM技术引起了广泛地关注[1,2]。此外FMC也被认为是复杂表面检测的一种可能的方案[3]。

FMC存在的挑战

相比标准PA具有许多优势但同时也伴随着一些挑战。为实现高效的FMC数据采集,采集硬件&软件需克服一些障碍。

A扫描数量

根据定义,对于一个具有 n 个晶片的探头,单个采集位置FMC将会采集 n^2 个A扫描信号。因此用于FMC数据采集的硬件及软件需要处理大量的A扫描信号。用于实验验证的设备为高性能相控阵采集系统DYNARAY[®], 该系统由UltraVision[®] 3.3软件驱动(见图4)。为挖掘FMC的潜能, ZETEC当下正致力于提高该系统的性能,最终将达到单个采集位置最多能处理32,768个A扫描信号。这意味着DYNARAY系统及UltraVision3.3软件将支持最多单个181晶片探头或两个独立128晶片探头的FMC采集。



图 4: UltraVision[®] 软件 & DYNARAY[®] 高性能相控阵采集系统

数据传输速率

考虑到从相控阵采集单元到远程计算机需要传输的数据量巨大, 往往数据传输速率是影响数据采集速度的最大因素。因此,为最大化FMC的价值,ZETEC正致力于将DYNARAY系统的数据传输速率提高到30 MB/s。当然, 要维持如此高的数据传输量也需要更高端的计算机。

尽管如此, 对于FMC数据采集, 仍需要做好非常低的数据采集速率的预期。因为在某些情况下(晶片数过大, 时基线范围过大), 采集速率可能会低于1 Hz。

数据文件大小

FMC数据文件很轻易就会达到几个GB。通过UltraVision 3.3软件采集到的数据直接保存在驱动而不是内存上,这就使得大量的FMC数据文件能被很好的采集与保存。

为使得生成的数据量最小化,可能会考虑使用半矩阵捕捉技术(HMC)。HMC原理是(图5)消除晶片信号间的相互重叠。若考虑点状超声源与点状反射体,晶片 x 发射而晶片 y 接收等同于晶片 y 发射晶片 x 接收。因此采用HMC半矩阵捕捉,A扫描数量将从 n^2 减少到 $n(n+1)/2$ 。HMC将作为验证过程的一部分在本文下一节提到。

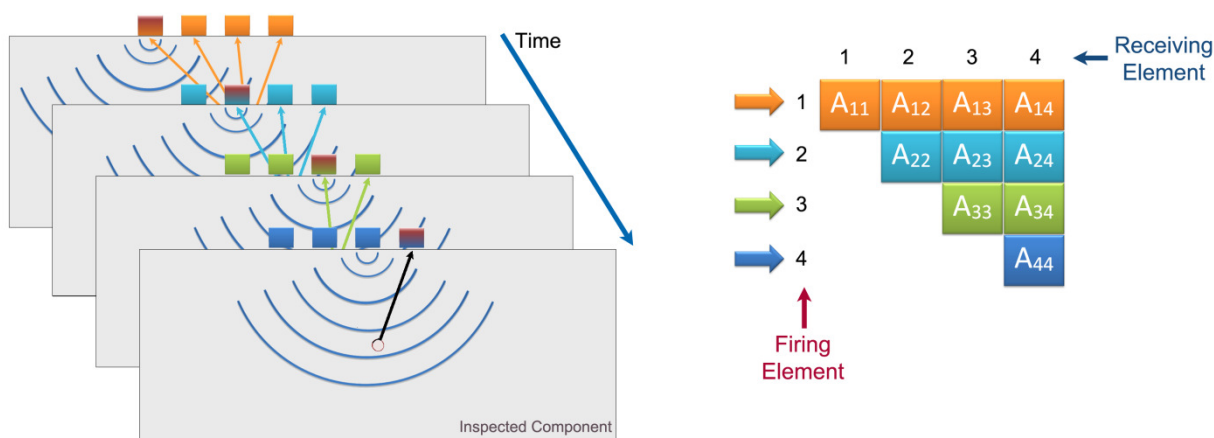


图 5: 半矩阵捕捉原理

声能

由于FMC由连续的单个晶片发射构成,因此FMC数据采集时的信号能量非常弱。此外,由于FMC对声束能量指向性的要求非常低,最好使用尺寸较小的晶片进行数据采集。相应的,接收到的信号能量也非常弱。因此,为避免反射回来的超声信号被采集系统的电噪声所掩盖需配备高质量的发射-接收通道。

验证过程

在UltraVision3.3软件系统的质量保证体系框架内,ZETEC进行了各种对比实验来验证支持FMC数据处理的各项理论及FMC解决方案在ZETEC产品生态体系中的实现。以典型的相控阵应用为代表,一系列的实验配置用于进行定量及定性比较。每一组实验,标准PA数据采集(这里指硬件处理过程)与FMC或HMC同时进行。原始A扫描信号则会通过人为地离线后处理(软件处理)生成标准的PA数据,并将两种结果进行对比。

一维线阵探头 – 脉冲回波 – 横通孔

使用5-MHz, 64晶片, 0.6-mm晶片中心间距的一维相控阵探头搭配36°-横波楔块在带有多个横通孔的铝标定试块上进行编码数据采集。激发40°~70°的波束在深度为5mm~45mm范围内进行扇形扫查同时使用55°横波进行HMC数据采集。采用与标准PA相同的聚焦法则进行HMC数据后处理(图6)。

就缺陷位置而言, 软件后处理与硬件处理得到的结果一致:最大幅值点在扫查及超声轴上的位置偏差小于1mm。另一方面, 通过软件处理得到的信号最大幅值相比硬件处理要低0.9dB~2.8dB。这是因为标准PA由多个晶片共同作用发射出的信号要比HMC单个晶片的信号强得多, 因而最终接收到的信号能量也会更强, 表1给出了硬件&软件在信号处理上的定量对比。

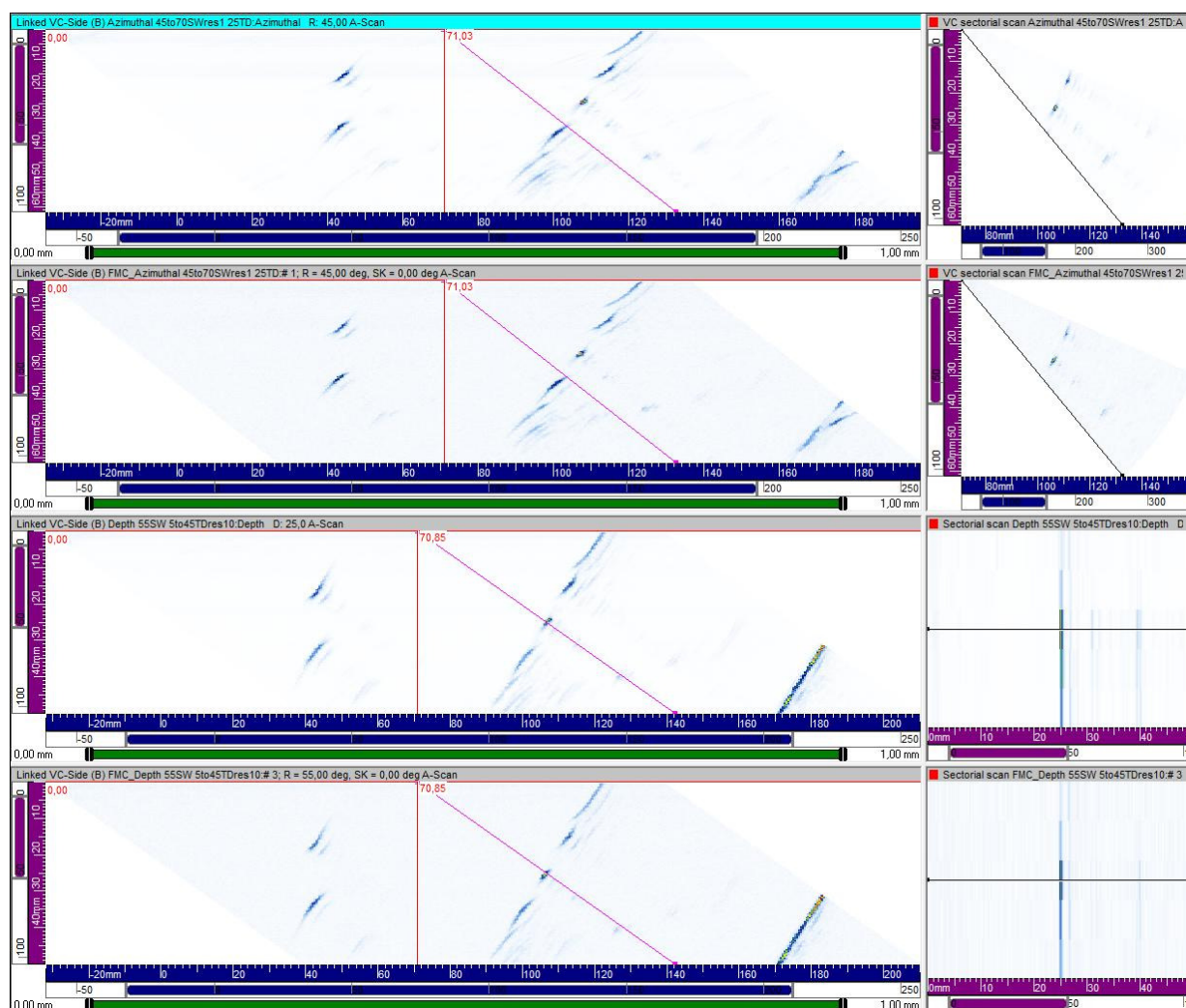


图 6: 硬件&软件处理结果对比

第一行: 硬件处理 – 扇扫 40°~70°SW

第二行: 软件处理 – 扇扫 40°~70°SW

第三行: 硬件处理 – 深度扫查 5mm~45mm 真实深度

第四行: 软件处理 – 深度扫查 5mm~45mm 真实深度

Indication ID	Focal Law	Summation Process	Max Amplitude (%)	ΔMax Amplitude (dB)	Max Amplitude Scan Position (mm)	ΔMax Amplitude Scan Position (mm)	Max Amplitude USound Position (mm)	ΔMax Amplitude USound Position (mm)
SDH #1	Depth D: 5,0	Hardware	100	-1.4	118.85	0.0	5.04	0.11
		Software	85.2		118.85		5.15	
SDH #2	Depth D: 15,0	Hardware	81	-1.4	112.85	0.0	14.87	0.13
		Software	68.6		112.85		15	
	Azimuthal R: 45,00	Hardware	25.2	-1.1	115.03	-0.5	13.3	0.30
		Software	22.1		114.53		13.6	
	Azimuthal R: 60,00	Hardware	23.8	-2.3	112.23	-0.5	16.03	0.62
		Software	18.2		111.73		16.65	
SDH #3	Depth D: 25,0	Hardware	67.7	-1.7	106.85	-0.5	24.73	0.66
		Software	55.8		106.35		25.39	
	Azimuthal R: 45,00	Hardware	96.6	-2.8	107.53	-0.5	24.45	0.50
		Software	70		107.03		24.95	
	Azimuthal R: 60,00	Hardware	45.3	-2.2	106.23	-0.5	25.16	0.46
		Software	35.2		105.73		25.62	
SDH #4	Depth D: 35,0	Hardware	57.3	-2.4	42.35	-0.5	33.31	0.68
		Software	43.4		41.85		33.99	
SDH #5	Depth D: 45,0	Hardware	23.9	-2.6	93.85	-0.5	44.89	0.69
		Software	17.8		93.35		45.58	
SDH #6	Depth D: 15,0	Hardware	75.6	-0.9	43.35	-0.5	16.14	0.46
		Software	68.4		42.85		16.6	
	Azimuthal R: 45,00	Hardware	29.2	-1.2	44.53	-0.5	15.45	0.09
		Software	25.4		44.03		15.54	
	Azimuthal R: 60,00	Hardware	27.8	-2.0	42.23	0.0	17.44	0.62
		Software	22.2		42.23		18.06	
SDH #7	Depth D: 35,0	Hardware	50.3	-1.6	100.35	-1.0	34.9	0.84
		Software	41.6		99.35		35.74	

表 1: 铝标定试块横通孔检测硬件&软件处理定量结果对比

一维线阵探头 – 脉冲回波 – 平底孔

使用5-MHz,64-晶片,0.6-mm晶片中心间距的一维线阵相控阵探头搭配0°楔块在带有平底孔的铝标定试块上进行编码数据采集。除了采集FMC及HMC数据外，还采用8晶片激发孔0°纵波进行电子扫查(也叫线性扫查)。采用与标准PA相同的聚焦法则进行HMC数据后处理(图7)。

这组实验配置结果表明,硬件与软件处理结果相似程度近乎完美。FMC与HMC峰值信号对比标准PA幅值差异几乎可以忽略($\approx -0.3\text{dB}$)，缺陷显示信号在扫查轴，步进轴及时间轴上的位置精度精确到 ± 1 个采样位置。就信号质量与信号幅值而言FMC与HMC数据没有明显差异。

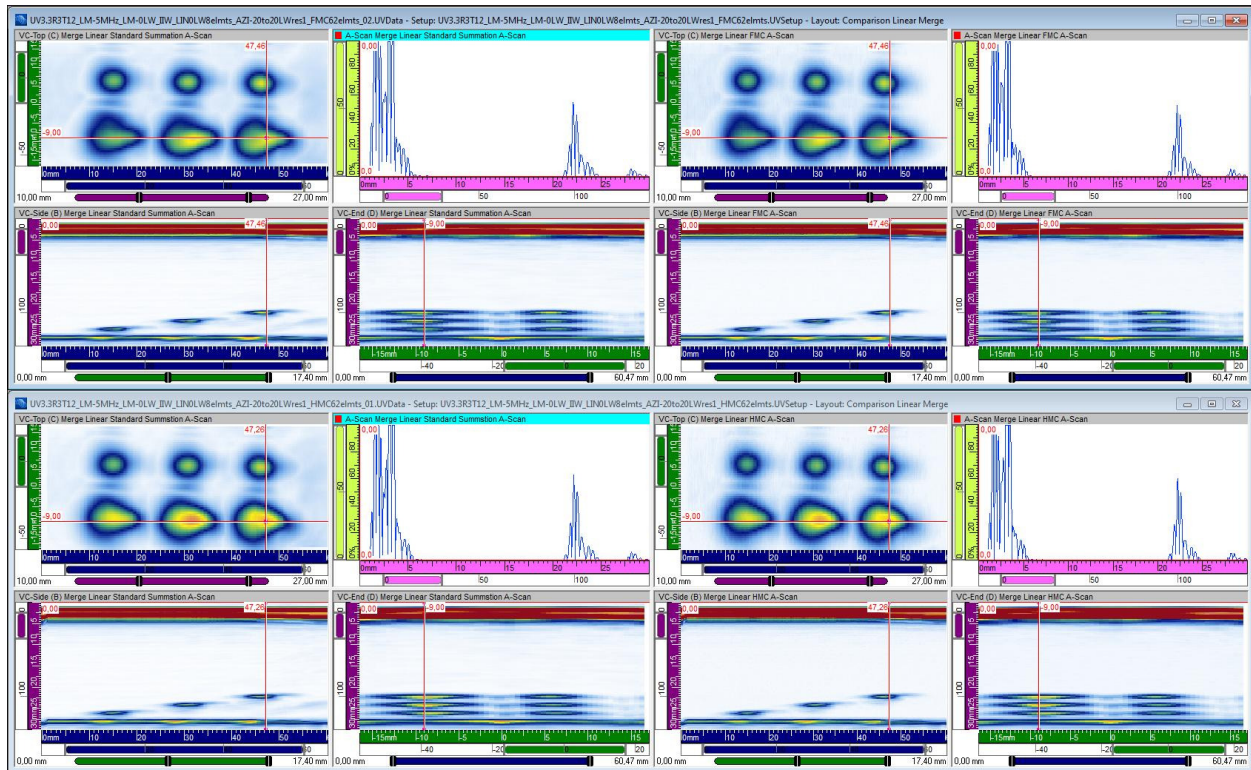


图 7: 平底孔标定试块上硬件&软件处理结果对比

左上: 硬件处理 – 0°LW 线扫 (FMC 数据文件)
 右上: 软件处理 – 0°LW 线扫 (FMC 数据文件)
 左下: 硬件处理 – 0°LW 线扫 (HMC 数据文件)
 右下: 软件处理 – 0°LW 线扫 (HMC 数据文件)

两维面阵探头 – 一发一收 – 真实缺陷

使用1.5-MHz,16x2晶片PA 面阵探头在管径为12英寸带有三处真实缺陷的不锈钢管道上进行一发一收模式下的编码数据采集。处理采集FMC数据外, 还采用8x2孔径分别激发0°LW,45°LW,60°LW,70°LW,45°SW及60°SW进行电子扫查。采用与六个标准PA相同的聚焦法则用于FMC数据离线后处理。图8对比了45°SW扫查时硬件与软件处理的结果,这里变现出的相关性最强因为显示的是三个真实缺陷。

结果再次表明, 硬件与软件处理在结果上呈现出高度的一致。峰值信号幅值差异很小($\approx 1\text{dB}$) 缺陷显示信号在扫查轴, 步进轴及时间轴上的位置精度精确到 ± 1 个采样位置。这组实验表明FMC数据处理过程同样适用于两维面阵及一发一收式检测模式。

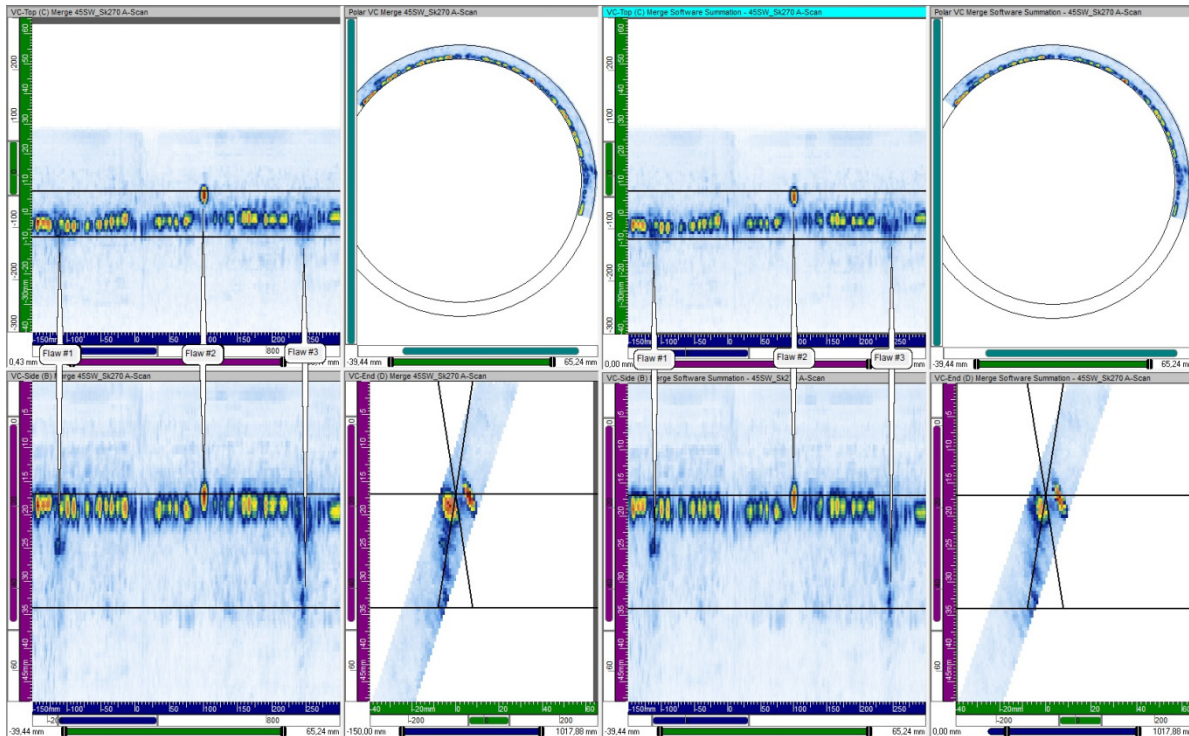


图8: 管道缺陷硬件&软件处理结果对比
左: 硬件扫查 – 45°SW 线性扫查
右: 软件处理 – 45°SW 线性扫查

结论

通过本文的论述,可以得到以下结论:

1. 通过内部实验测试证明了FMC数据采集与处理的有效性。在所有实验组中,若采用相同的聚焦法则, FMC数据经过软件处理得到的结果与标准PA得到的结果一致。这些结果对人工反射体(SDH & FBH) 与真实缺陷均适用。
2. FMC数据的后处理可提供较标准PA更为丰富的信息; 聚焦深度及波束角度均可进行优化以便更好的对观测到的缺陷显示进行定性。
3. 对于所有的实验配置, HMC数据处理结果与FMC呈现出一致性。
4. 为实现高效FMC数据采集, 采集设备需满足以下特性:
 - 单一采集位置支持大量A扫描信号的处理
 - 具备高数据传输速率
 - 支持大数据文件 (几个GB)的处理
 - 可提供非常高的信号质量 (低电噪声)
5. 结合可商用的高性能相控阵硬件及软件, ZETEC已开发并验证了适用于FMC数据采集与处理的高效、友好的方案,

参考文献

- 1 Holmes C, Drinkwater B, Wilcox P, "Post-Processing of the Full Matrix of Ultrasonic Transmit-Receive Array Data for Non-Destructive Evaluation", NDT&E International, 2005.
- 2 Jobst M, Connolly G, "Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds", ECNDT, 2010.
- 3 Long R, Russell J, Cawley P, "Through-Weld Ultrasonic Phased Array Inspection Using Full Matrix Capture", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 29, 2009