

# Fázově koherentní zobrazování pro detekci defektů

## 1. Úvod

Technika úplné fokusace (TFM) je v současnosti v oblasti ultrazvukových nedestruktivních zkoušek (NDT) široce známou a uznávanou technikou NDT snímkování. Tato metoda je navíc nyní komerčně dostupná u několika přenosných přístrojů, včetně defektoskopů řady OmniScan™ X3, a v komunitě NDT si získává stále větší popularitu.

I přes to, že technika TFM umožňuje snadnější interpretaci obrazu než u kontrol prováděných klasickou technikou phased array (PA), může použití jednoho vysílacího elementu při pořizování dat vést k získání zobrazení s nízkým odstupem signálu od šumu (SNR). Takto nízká hodnota SNR je způsobena špatným vnikem akustického vlnění. Typicky k tomu dochází u dílů o velké tloušťce nebo u materiálů s vysokým útlumem.

Aby se tento problém vyřešil, je zde navržena odlišná implementace klasického TFM algoritmu, která u pořizovaných signálů využívá pouze informace související s fází. Je založena na faktoru vektorové koherence (VCF)<sup>1</sup>, který je sám o sobě používán jako obraz, přičemž z pořizovaných signálů je odstraněna informace o jejich amplitudě. Tento způsob, obecně také známý jako zobrazování na základě fázové koherence (PCI) má určité výhody<sup>2,3,4</sup> včetně těchto:

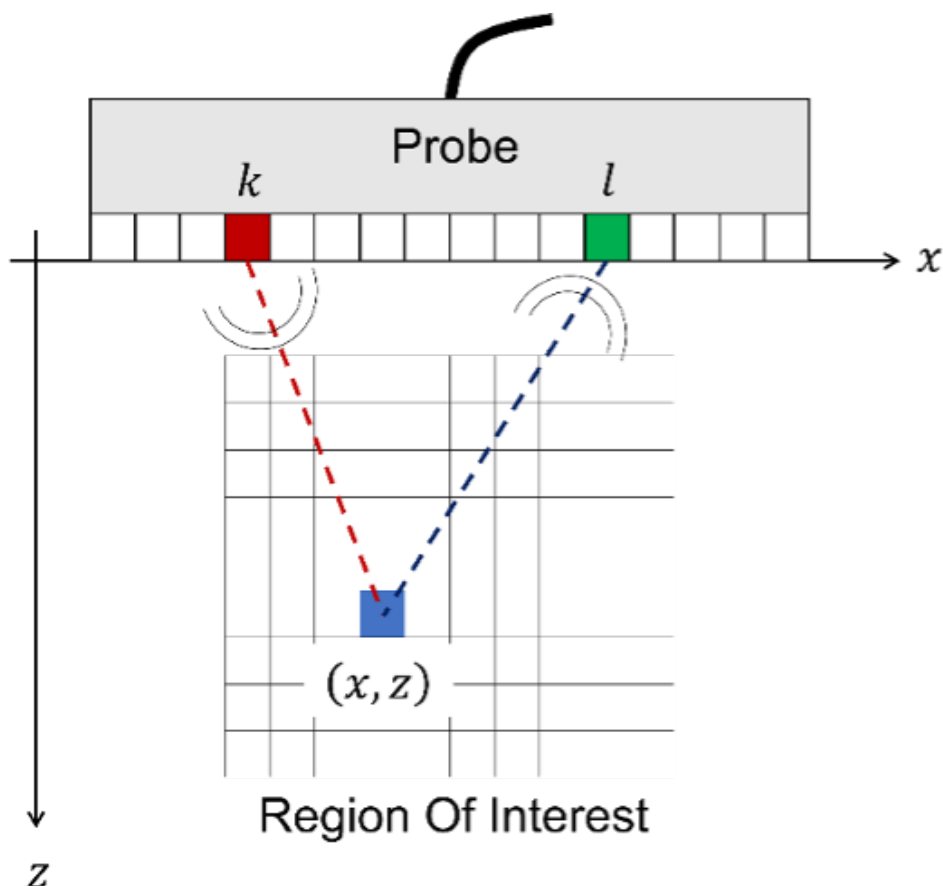
- Je uvažována pouze okamžitá fáze signálu<sup>2</sup>, na kterou nemá útlum materiálu žádný vliv. Proto by zobrazování metodou PCI mohlo být užitečné zejména pro vyřešení problematických kontrol materiálů o velké tloušťce a u materiálů s vysokým útlumem.
- Vzhledem k tomu, že amplituda signálu není vůbec brána v úvahu, je eliminována nutnost kalibrace amplitudy.<sup>3</sup>
- Zlepšená citlivost u geometrií, na kterých dochází k difrakci, a konzistentnost reprezentace vady v zobrazení různých skenů.
- Poskytuje spolehlivou metodu stanovení velikosti trhlin a podobných defektů, jenž není založená na

amplitudě.<sup>3</sup>

Zbývající část tohoto dokumentu vysvětluje základní principy technologie PCI společnosti Evident, jejíž část právě prochází patentovým řízením, jedná se zejména o metodu generování digitalizovaných reprezentací signálů akustické ozvěny, kterou tato technologie využívá. V rámci tohoto vysvětlení je nejdříve poskytnut přehled principu fungování algoritmu DAS (Delay And Sum), který umožňuje konstrukci konvenčního TFM snímku s obálkou z FMC. Poté bude ukázáno, že algoritmus PCI představuje variantu algoritmu DAS.

Příklady z reálné praxe s využitím umělých defektů známé povahy a geometrie dovolují srovnání dvou typů snímků, klasického TFM snímku a PCI snímku<sup>5</sup>, které byly získány pomocí těchto dvou typů algoritmů.

## 2. Přehled principů klasické techniky TFM a algoritmu DAS

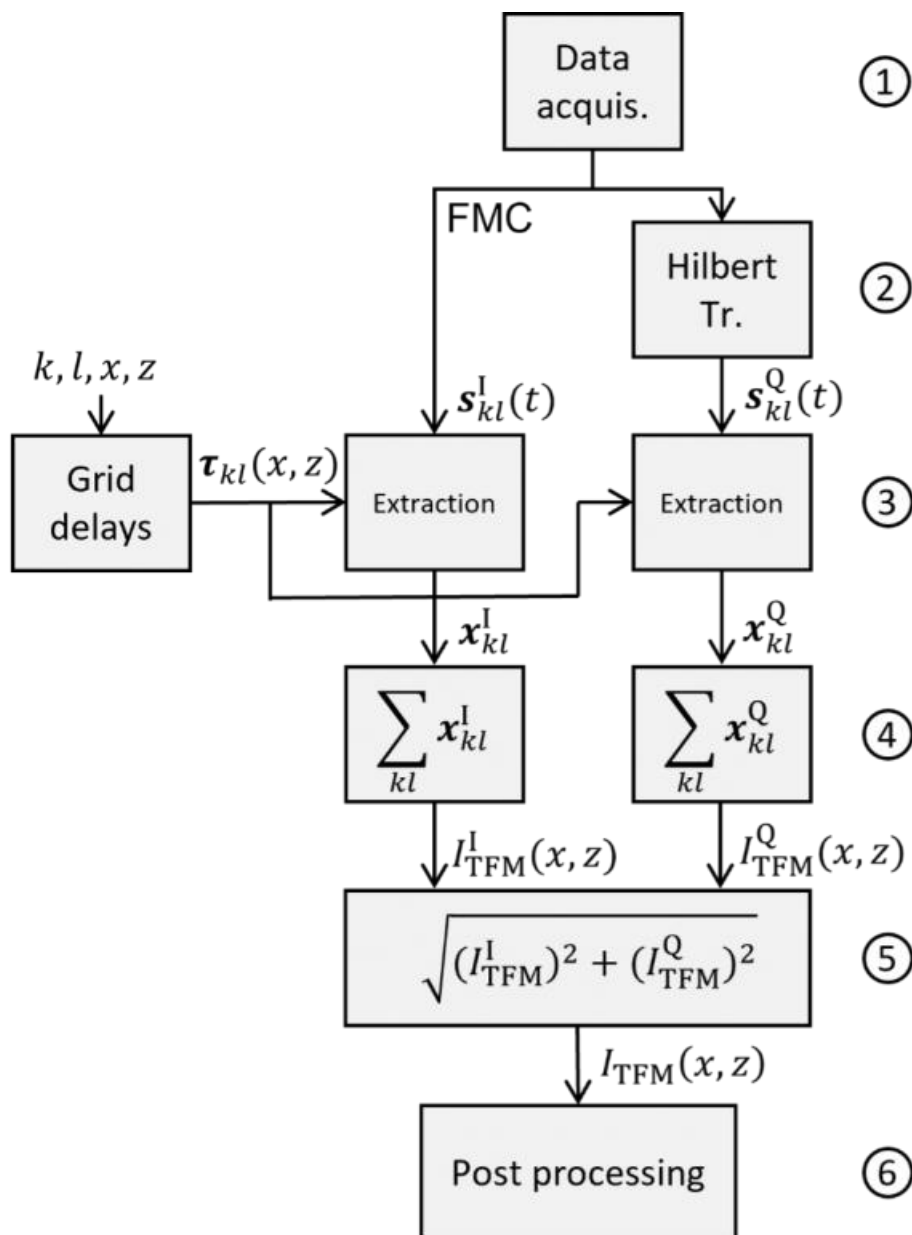


Obrázek 1. Geometrická konfigurace FMC pořizování dat sondou v kontaktu se zkoušeným povrchem. Piezoelektrický element  $k$  vysílá ultrazvukovou akustickou vlnu do materiálu. Piezoelektrický element  $l$  přijímá odraženou ultrazvukovou akustickou vlnu.

Na obrázku 1 je znázorněna geometrická konfigurace pořizování dat metodou snímání úplné matice (FMC) sondou pro zkoušení ultrazvukem technikou phased array (PAUT) a také oblast zájmu (ROI), která odpovídá té části vzorku, která je kontrolována a zobrazena pomocí techniky TFM. Piezoelektrický element  $k$  vysílá ultrazvukovou akustickou vlnu. Tato akustická vlna se pak šíří materiálem kontrolovaného vzorku a odráží se na každé vadě přítomné v materiálu a také na různých rozhraních. Piezoelektrický element  $l$  přijímá odraženou ultrazvukovou akustickou vlnu, čímž vzniká signál A-skenu  $s_{kl}$ . Technikou FMC jsou poté všechny A-skeny pro všechny možné kombinace  $kl$  seskupeny.

Na obrázku 2 je uveden vývojový diagram ilustrující 6 základních kroků principu rekonstrukce klasického TFM obrazu z dat pořízených technikou FMC pomocí algoritmu DAS (delay and sum):

1. Je provedeno pořízení dat metodou FMC, čímž se získají data sestávající ze všech A-skenů  $s_{kl}^I(t)$ . Exponent I zde značí, že tyto A-skeny jsou signály ve fázi.
2. Je uplatněna Hilbertova transformace, čímž se získají kvadrurní složky  $s_{kl}^Q(t)$  A-skenů  $s_{kl}^I(t)$  ve fázi, pořízených a seskupených v FMC datech.
3. Pomocí předem vypočítaných zpoždění  $\tau_{kl}(x,z)$  jsou extrahována data  $x_{kl}^I$  a  $x_{kl}^Q$ . Tato zpoždění jsou předem vypočtena podle typu zvoleného druhu šíření (například L-L, T-T, TT-T, TT-TT) a oblasti zájmu, kterou chceme pozorovat.
4. Součtem se pak získají dva kvadrurní TFM obrazy,  $I_{TFM}^I(x,z)$  a  $I_{TFM}^Q(x,z)$ .
5. Amplituda (nazývaná také modul nebo obálka)  $I_{TFM}(x,z)$  se odhaduje pomocí výpočtu euklidovské vzdálenosti.
6. Krok následného zpracování, umožněný použitím grafické karty, poté formátuje TFM obraz (v podstatě digitální filtrací, převzorkováním a změnou velikosti), který je uživateli prezentován na displeji přístroje.



Obrázek 2. Princip algoritmu DAS sestávající ze šesti kroků vedoucích k získání amplitudového TFM obrazu na základě pořízení dat technikou FMC.

## 3. Princip algoritmu PCI

Základním rozlišovacím znakem algoritmu PCI implementovaném defektoskopem OmniScan X3 64 od konvenčního TFM a ostatních fázově založených technologií zpracování signálu je to, že obsahuje inovativní složku binárního převodníku akustického signálu (prochází patentovým řízením). Pokud porovnáme algoritmus PCI s jednotlivými kroky algoritmu DAS uvedenými na obrázku 2, odlišuje se ve dvou hlavních aspektech:

- Obsah přídavného kroku, kroku 3b (obrázek 4), který sestává z kvantifikace signálů  $s_{kl}^I(t)$  a  $s_{kl}^Q(t)$  pomocí funkce  $\text{sign}$ . Tento krok umožňuje zvýraznit koherenci signálů, jak vysvětlíme dále v tomto článku.
- Vypočtením amplitudy pomocí normy  $L_\infty$ , nazývané také Čebyševova norma, namísto euklidovské normy používané v klasickém TFM.

### 3.1. Koncept fázové koherence

Pro dobré porozumění podstatě zobrazování technikou PCI, je třeba nejprve porozumět koherenci signálů, základnímu principu této metody. Tento odstavec představuje koncept fázové koherence ve zjednodušené formě. Pro tento účel je třeba věnovat pozornost funkci  $\text{sign}$ , někdy též nazývané  $\text{signum}$ .

Funkce kvantifikuje signál  $s(t)$  na 3 odlišné úrovně, +1, 0 a -1:

$$\text{sign}[s(t)] = \begin{cases} -1 & \text{if } s(t) < 0 \\ 0 & \text{if } s(t) = 0 \\ +1 & \text{if } s(t) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

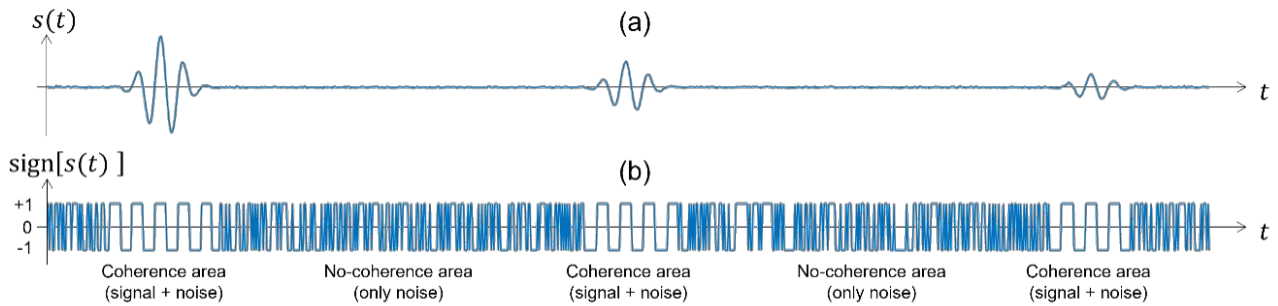
Pro lepší pochopení účinku této operace kvantifikace na signály je na obrázku 3 znázorněn, formou příkladu, výsledek použití funkce na A-sken  $s(t)$ , zde pro účely demonstrování zvolený libovolně. Podíváme-li se na obrázek 3, můžeme si všimnout následujícího:

- Na signálu jsou patrné dva typy zón: (1) takzvané zóny koherence, značící přítomnost indikací, které jsou symptomatické pro přítomnost vad, a (2) takzvané zóny nekoherence, značící nepřítomnost indikací a přítomnost čistě jen šumu. Je třeba poznamenat, že tento šum má původ převážně ve vnitřním elektronickém šumu přístrojového vybavení, ale jeho součástí je také strukturální šum spojený s interakcí akustických vln s materiálem vzorku.
- V zónách koherence je intenzita signálu konstantní a drží se na hodnotách 1 a -1 v kvantovaném signálu (obrázek 3 (b)), zatímco v případě nezpracovaného signálu amplituda v čase klesá (obrázek 3(a)) (například v důsledku útlumu daného geometrií).
- V kvantovaném signálu na obrázku 3(b) je vidět přítomnost silného šumu, s chaotickým projevem, na mnohem vyšší úrovni, než je téměř nepostřehnutelná úroveň šumu u nezpracovaného signálu na obrázku 3(a). To nám pomůže vysvětlit, spolu s tím, co ukazují příklady popsané v tomto dokumentu, proč TFM obrazy získané zobrazováním PCI vypadají „rušivěji“ než klasické TFM obrazy, jak je vidět porovnáním obrázků 6(a) a 6(b) nebo obrázků 8(a) a 8(b). Nicméně statistické rozdělení těchto oblastí s vyšší úrovní chaotického šumu (nekoherentní oblasti) je, na rozdíl od oblastí koherence, nezávislé na poloze v obraze. Z důvodu tohoto rozdílu, a navzdory většímu šumu, lze na obraze vytvořeném zobrazováním PCI snadněji odlišit oblasti koherence od nekoherentních oblastí. Přízpusobená mapa barev, kterou přístroj OmniScan X3 64 ve výchozím nastavením při použití PCI zobrazení aplikuje, usnadňuje rozlišitelnost uživatelem, jak znázorňují obrázky 6(c) a 8(c).

Chování funkce  $\text{sign}$  je tedy v rámci PCI využito na jedné straně<sup>5</sup> k zachování konzistentní intenzity signálů – například bez ovlivnění hloubkou zkoumání – a na druhé straně k separaci koherentních zón, které pravděpodobně korespondují s přítomností defektů a od nekoherentních chaotických zón korespondujících s nepřítomností defektů.

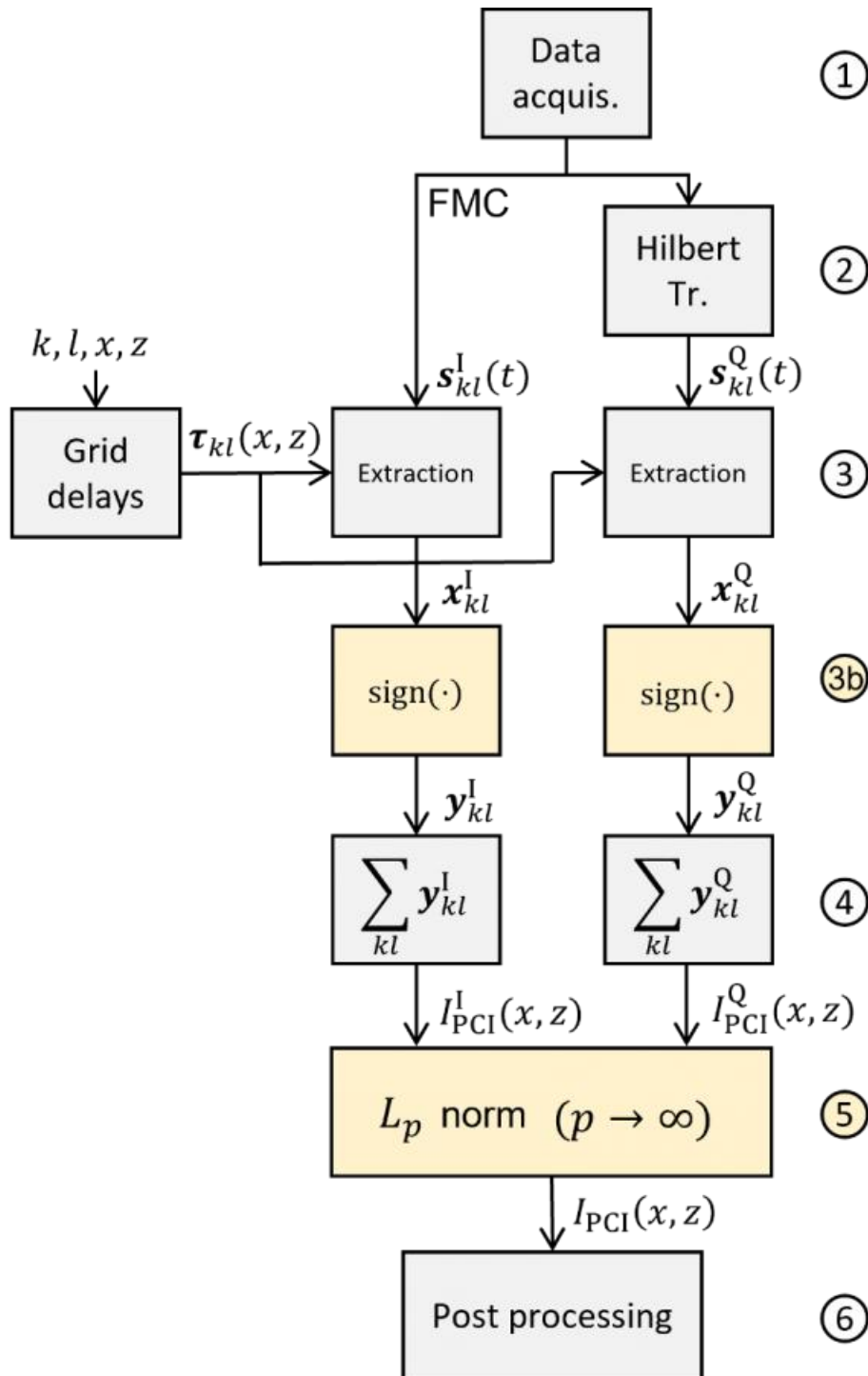
Je třeba poznamenat, že koherence signálů je informace, jejímž nositelem je fáze signálu.

Z určitého úhlu pohledu může být informace, kterou sděluje zobrazení PCI, považována z podstaty za kvazibinární v tom smyslu, že „koherence/nekoherence“ se rovná „přítomnost vady / nepřítomnost vady“. Problém pak spočívá v přijetí strategie, jak tyto dva režimy oddělit. Způsob nebo způsoby, kterými lze tohoto cíle dosáhnout, nejsou předmětem tohoto dokumentu, avšak adaptovaná mapa barev, jakou například implementuje defektoskop OmniScan X3 64, s provedením separace napomáhá.



Obrázek 3. Nezpracovaný signál a šum A-skenového typu (a) a kvantifikovaný signál využívající funkci sign (b).

## 3.2. Algoritmus PCI



Obrázek 4. Princip algoritmu PCI.

Vývojový diagram znázorněný na obrázku 4 souhrnně popisuje algoritmus PCI implementovaný v defektoskopu OmniScan™ X3 64 takto:

1. Fáze pořizování, ve které jsou zkonstruována FMC data sestávající ze všech A-skenů  $s_{kl}^I(t)$ . Exponent I značí, že tyto A-skeny jsou signály ve fázi.
2. Použití Hilbertovy transformace, která umožňuje získat kvadrurní složky  $s_{kl}^Q(t)$  A-skenů  $s_{kl}^I(t)$  ve fázi, pořizovaných a seskupených v FMC datech.
3. Extrakce dat  $x_{kl}^I$  a  $x_{kl}^Q$  pomocí zpoždění  $\tau_{kl}(x, z)$ . Tato zpoždění byla vypočtena předem podle typu zvoleného

druhu šíření (například L-L, T-T, TT-T, TT-TT) a oblasti zájmu, kterou chceme pozorovat.

První tři kroky jsou identické s prvními třemi kroky algoritmu DAS, jak je znázorněného na obrázku 2.

3b. Kvantování signálů  $x_{kl}^I$  a  $x_{kl}^Q$  funkcí sign podle rovnice 1, což vede k signálům  $y_{kl}^I$  a  $y_{kl}^Q$ :

$$\text{sign} \left[ s_{kl}^I(t) \right] = \begin{cases} -1 & \text{if } s_{kl}^{I/Q}(t) < 0 \\ 0 & \text{if } s_{kl}^{I/Q}(t) = 0 \\ +1 & \text{if } s_{kl}^{I/Q}(t) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Krok 3b je přídavný krok, specifický pro algoritmus PCI.

4. Výstupem sumace jsou dva PCI snímky v kvadratuře,  $I_{\text{PCI}}^I(x, z)$  a  $I_{\text{PCI}}^Q(x, z)$ :

$$I_{\text{PCI}}^I(x, z) = \sum_{k=1}^{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} \text{sign}\{y_{kl}^I[\tau_{kl}(x, z)]\} \quad (3)$$

$$I_{\text{PCI}}^Q(x, z) = \sum_{k=1}^{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} \text{sign}\{y_{kl}^Q[\tau_{kl}(x, z)]\} \quad (4)$$

5. Nakonec je proveden odhad amplitudy  $I_{\text{PCI}}(x, z)$  pomocí výpočtu Čebyševovy vzdálenosti, nazývané také uniformní norma nebo  $L_\infty$ , a dvou složek rovnic (3) a (4):

$$I_{\text{PCI}}(x, z) = \left\{ [I_{\text{PCI}}^I(x, z)]^p + [I_{\text{PCI}}^Q(x, z)]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

kde  $p \rightarrow \infty$ .

Odhad amplitudy z rovnice 5 je při  $p \rightarrow \infty$  obtížně proveditelný. Dobrou aproximaci lze získat použitím následujícího výrazu:

$$I_{\text{PCI}}(x, z) \approx \max[|I_{\text{PCI}}^I(x, z)|, |I_{\text{PCI}}^Q(x, z)|] \quad (6)$$

To jest, jako konečná hodnota je zachycena hodnota maxima absolutních hodnot ( $|\cdot|$ ) obrazu ve fázi a kvadraturního obrazu.

6. Nakonec je zde krok následného zpracování, který je shodný s krokem následného zpracování algoritmu DAS používaného k získání konvenčního TFM snímku, umožněného prostřednictvím grafické karty, která formátuje TFM snímek (v podstatě jde o digitální filtrování, převzorkování a změnu velikosti), který je na obrazovce přístroje prezentován uživateli.

Za zmínku stojí, že postup zpracování metody PCI (zobrazený na obrázku 4, implementovaný defektoskopem OmniScan X3 64) je vyhotoven v reálném čase během kontroly, relativně stejnou rychlostí (tj. od pořízení dat do vytvoření obrazu), jako je tomu v případě konvenční techniky TFM daného zařízení.



## 4. Experimentální příklady

Zde uvedeme dva příklady citované z experimentálního měření vad známé povahy a geometrie s cílem porovnat obrazy získané pomocí dvou výše popsaných algoritmů a vyzdvihnout určité vlastnosti metody PCI. Těmi jsou, mimo jiné, odolnost vůči amplitudě a citlivost na špičce vady.

### 4.1. Příklad 1: měrka s bočním vývrtem (SDH)

Cílem prvního zkušební příkladu je zdůraznit tu vlastnost metody PCI spočívající v odolnosti vůči útlumu. Měrka z oceli se 17 vývrty SDH (zkušební měrka z nízkouhlíkové oceli dle normy ASTM E2491) je prověřena bez použití klínu (tj. sonda je v přímém kontaktu se zkoušeným dílem) pomocí sondy 5L64-A32 PAUT. Tato zkušební konfigurace je ilustrována na obrázku 5.

Na obrázku 6 jsou uvedeny výsledné obrazy získané rekonstrukcí klasickou metodou TFM (a) a metodou PCI (b,c) za použití módu šíření L-L. Na obrázku 6 jasně vidíme následující:

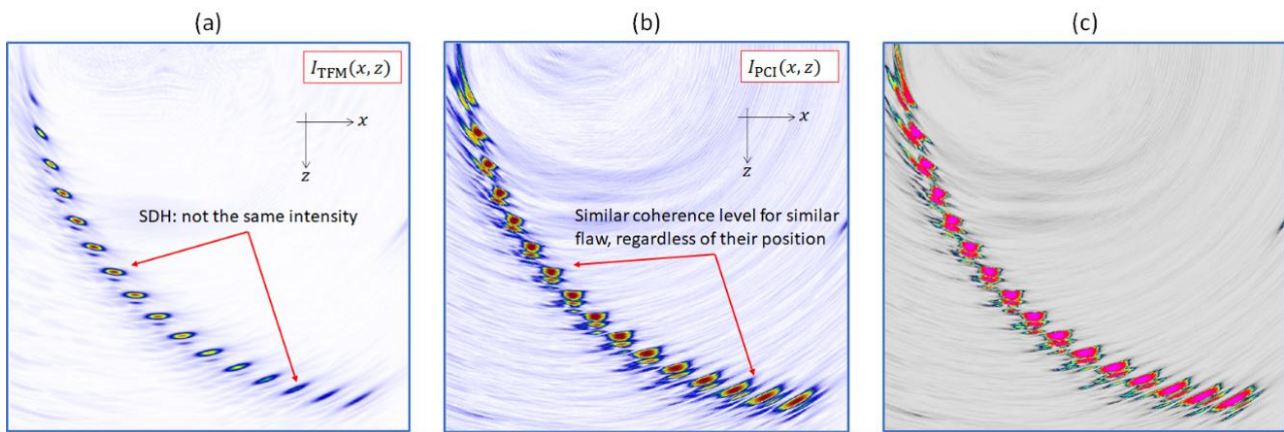
- Na obrazu PCI jsou všechny vady SDH zobrazeny se stejnou intenzitou, zatímco u obrazu získaného klasickou technikou TFM je u vad SDH ve spodní části znatelný vliv útlumu a u vad SDH v horní části je patrný účinek amplitudy vysílaného svazku.
- Také si můžeme všimnout, že šum pozadí je v případě obrazu PCI vyšší.

Protože metoda PCI je metoda zobrazování bez použití amplitudy, součet koherentních složek signálů je proveden nezávisle na amplitudě signálů, a tudíž jeho výsledkem jsou indikace s vysokým kontrastem.<sup>3</sup>



Obrázek 5. Zkušební konfigurace příkladu 1: zkušební měrka z nízkouhlíkové oceli dle normy ASTM E2491 a sonda 5L64-A32.





Obrázek 6. Zobrazení vad SDH pomocí klasické techniky TFM (a), PCI (b) a pomocí PCI s použitím barevné mapy implementované v defektoskopu OmniScan X3 64 (výchozí nastavení defektoskopu).

## 4.2. Příklad 2: vadou je zářez v ocelové měrce

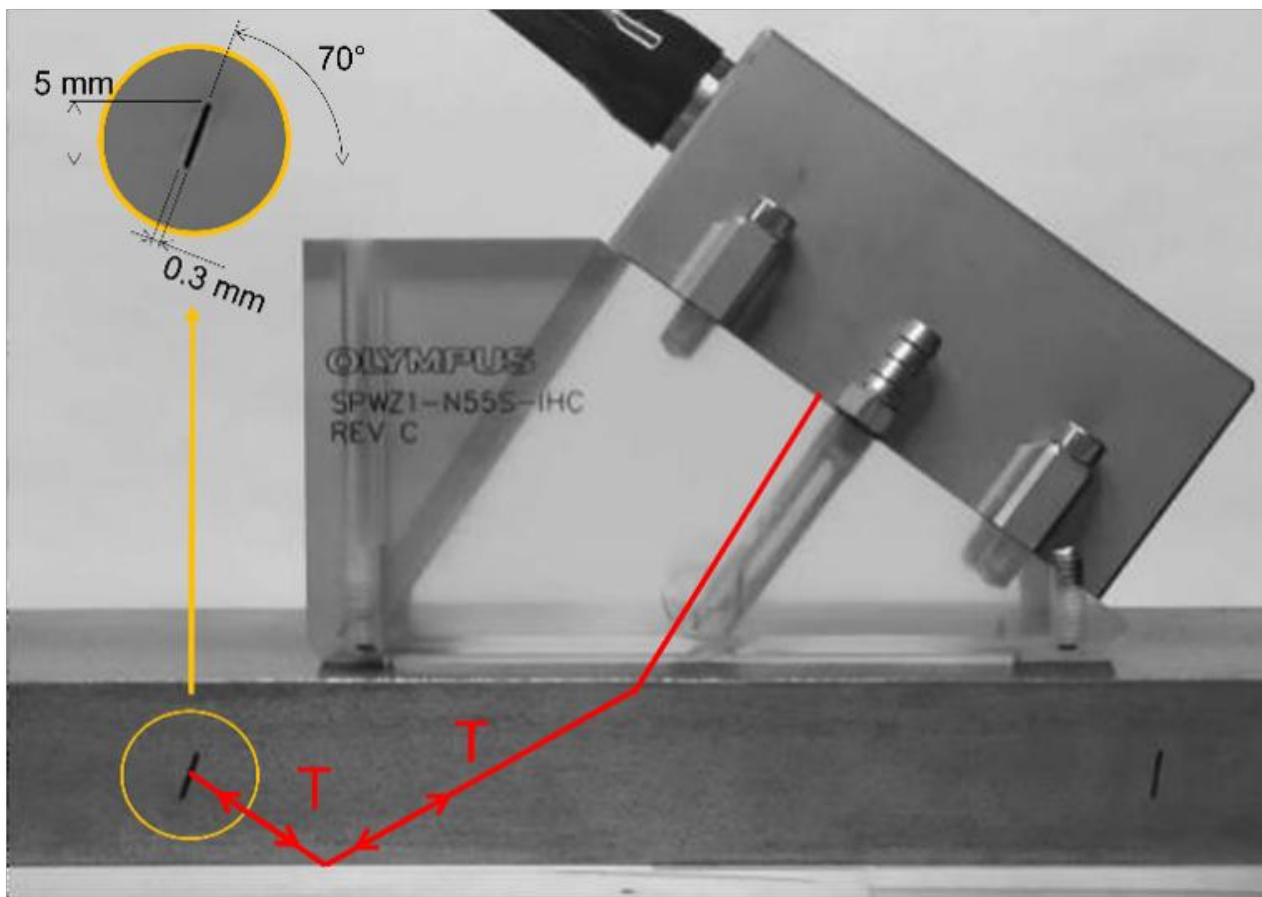
Další zajímavou vlastností zobrazování metodou PCI je citlivost této metody u špiček vad. Díky této citlivosti lze přesně určit velikost nespojitosti. Ukazuje se, že zrcadlové odrazy pocházející od velkých rozptylujících prvků jsou vzhledem ke sčítání amplitudy sníženy, protože do součtu přispívá pouze několik málo příspěvků se společnou fází. Tudíž metoda PCI se jeví jako robustnější v případě úzkých a špičatých reflektorů.

Abychom vyzdvihli tuto charakteristiku metody PCI, předvedeme v rámci tohoto druhého příkladu výsledky kontroly prováděné na ocelové měrce, na které se nachází zářez, kterým nedochází k narušení povrchu, orientovaný v úhlu  $70^\circ$ . Kontrola je provedena s použitím klínu SPWZ1-N55S-IHC a sondy phased array 7.5L60-PWZ1. Zkušební konfigurace je zobrazena na obrázku 7.

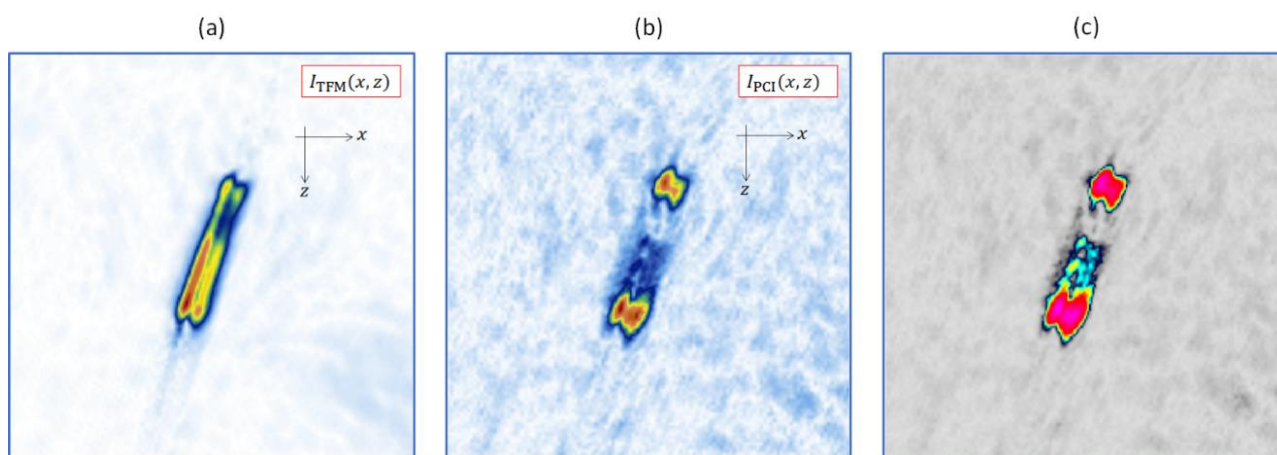
Na obrázku 8 jsou uvedeny výsledné obrazy získané rekonstrukcí klasickou metodou TFM (obrázek a) a metodou PCI (obrázky b a c) za použití módu šíření TT-TT. Na základě těchto obrázků je možné učinit následující srovnání:

- Zrcadlové odrazy od velkých prvků s rozptylem jsou vzhledem ke sčítání amplitudy sníženy, protože do součtu přispívá pouze několik málo příspěvků se společnou fází.
- Kontrast je v případě metody PCI ve srovnání s klasickou technikou TFM zlepšený.
- Metoda PCI poskytuje lepší citlivost u špiček vad.
- Odstup signálu od šumu je v případě metody PCI nižší.

I když v tomto případě umožňuje klasický TFM obraz přesnější vyhodnocení rozsahu zářezu, metoda PCI umožňuje přesné stanovení rozměrů vady typu zářezu, a to díky vysoké citlivosti v oblasti špiček vad bez použití semiempirických úvah, které mohou být, vzhledem ke kalibraci nebo útlumu materiálu, zavádějící.



Obrázek 7. Zkušební konfigurace příkladu 2: měřka z nízkouhlíkové oceli se šikmým zářezem vytvořeným elektroerozivním obráběním, klín SPWZ1-N55S-IHC a sonda 7.5L60-PWZ1.



Obrázek 8. Zobrazení zářezu pomocí klasické techniky TFM (a), PCI (b) a pomocí PCI s použitím výchozí barevné mapy defektoskopu OmniScan X3 64.

## Experimentální zjištění

Závěrem lze říci, že naše experimenty ukázaly, že metoda zobrazování PCI nabízí mnoho výhod:

- Vzhledem k tomu, že se jedná o metodu zobrazování, která nepoužívá amplitudu, není interpretace signálů založena na signálech s kalibrovanou amplitudou, což představuje výhodu oproti klasické technice TFM založené na amplitudě.
- Vyšší citlivost u úzkých a ostrých reflektorů a obecněji u difrakčních geometrií.

- Umožňuje přesné určení velikosti vad typu zářezu bez použití semiempirických úvah, které mohou být snadno nepříznivě ovlivněny kalibračním procesem nebo útlumem v materiálu.
- Nevyžaduje žádný kalibrační postup, díky tomu je určení velikosti zářezu ve srovnání s klasickou technikou TFM snazší a přesnější.
- Zesílení je možné nastavit na skutečně nízkou hodnotu, což brání saturaci signálu.
- Navíc přístroj vybavený dostatečně výkonným procesorem, jako je například defektoskop OmniScan X3 64, generuje PCI obrazy v živém režimu, takže výsledky jsou v průběhu kontroly zobrazovány okamžitě.

Nicméně je třeba uvést i některé nevýhody této metody:

- Špatně reprodukuje planární reflektory.
- Odstup signálu od šumu (SNR) je u metody PCI nižší než u metod založených na amplitudě. Avšak jak bylo vysvětleno dříve, toto není zásadní nevýhoda, protože metoda PCI poskytuje snadné odlišení oblastí koherence, indikujících přítomnost vady, od oblastí nekoherence, které odpovídají zašuměným oblastem obrazu.
- Uživatelé jsou zvyklí pozorovat koncová zobrazení založená na amplitudě, zvyknout si na pozorování obrazu jiného typu tak může nějakou dobu trvat.

## Použitá literatura

1. JF Cruza, J. Camacho, and C. Fritsch, Plane-wave phase-coherence imaging for NDE, NDT & E International, vol. 87, p. 31–37, Apr. 2017.
2. B. Gauthier, G. Painchaud-April, A. Le Duff, and P. Belanger, “Lightweight and Amplitude-Free Ultrasonic Imaging Using Single-Bit Digitization and Instantaneous Phase Coherence,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 69, no. 5, pp. 1763–1774, May 2022, doi: 10.1109/TUFFC.2022.3163621.
3. B. Gauthier, G. Painchaud-April, A. Le Duff, and P. Bélanger, “Towards an Alternative to Time of Flight Diffraction Using Instantaneous Phase Coherence Imaging for Characterization of Crack-Like Defects,” Sensors, vol. 21, no. 3, p. 730, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21030730.
4. A. Le Duff, N. Badeau, E. Peloquin, G. Painchaud-April, C.-H. Kwan, B. Gauthier, “Total Focusing Method with Phase-Only Ultrasound Signal for Small Flaw Detection,” International Ultrasonic Testing Conference (UT-Online), 2021.
5. G Painchaud-April, A. Le Duff, C. Kwan. C. Brillon, Phase-Based Approach for Ultrasonic Inspection, World Intellectual Property Organization (WIPO). 02.09.2021. WO/2021/168565 <https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=WO2021168565=EP383773045>