

# Višepretvornička tehnika ultrazvučnog ispitivanja kompozitnih struktra

---

**Beljo, Branimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:685016>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

**ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:  
Prof.dr.sc. Damir Markučić

Branimir Beljo

Zagreb, 2010

## **Izjava**

Izjavljujem da sam završni projekt preddiplomskog studija radio samostalno i odgovorno uz stručnu pomoć voditelja rada prof.dr.sc. Damira Markučića kojem se ovim putem srdačno zahvaljujem na bezuvjetnoj i neiscrpoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se na pomoći i dipl. ing. Miroslavu Omeliću koji mi je omogućio pristup laboratoriju za nerazorna ispitivanja te upoznavanje s opremom i načinom rada ove tehnike ispitivanja a također ovim putem se zahvaljujem i prof.dr.sc. Ivici Smojveru koji mi je ustupio uzorke koji su mi bili potrebni za laboratorijska ispitivanja. Tijekom izrade koristio sam se znanjem stečenim tijekom studija, posebno iz područja nerazornih ispitivanja u okviru kolegija "Tehnologija održavanja I" kao i navedenom literaturom.

---

Branimir Beljo

## **Sažetak rada**

Tema ovog završnog rada je višepretvornička tehnika ultrazvučnog ispitivanja, komercijalnog naziva "Phased Array", ili skraćeno PA.

To je tehnika koja u novije vrijeme ima sve veću primjenu u zrakoplovstvu, bilo kod kompozita ili kod drugih materijala. U radu je navedena usporedba s konvencionalnom ultrazvučnom tehnikom (Pulse Echo ili PE tehnika) te su istaknute prednosti i nedostaci u odnosu na nju.

U uvodnom dijelu prikazana su načela rada višepretvorničke tehnike ispitivanja, prednosti i nedostaci tehnike te njena primjena kod ispitivanja različitih materijala zrakoplovnih konstrukcija.

U drugom dijelu rada opisana je primjena ove tehnike u ispitivanjima kompozitnih struktura u zrakoplovnim konstrukcijama te su naglašene specifičnosti ove tehnike u odnosu na konvencionalnu tehniku odjeka u pogledu korištenih ultrazvučnih parametara, podešavanja ispitnog sustava, prikaza rezultata ispitivanja i interpretacije indikacija nepravilnosti.

Treći dio opisuje praktični dio rada u kojem je provedeno ispitivanje odabranih uzoraka kompozitne strukture pomoću višepretvorničke ultrazvučne tehnike. Prikazani su rezultati ispitivanja, tj. karakteristične indikacije uz pripadna tumačenja.

U posljednjem, četvrtom dijelu dan je zaključak ovog završnog rada.

1. UVOD.....	5
1.1. Pregled metode .....	5
1.1.1. Osnovni principi.....	5
1.1.2. Zakoni zadržke ili žarišni zakoni ( <i>Delay Laws or Focal Laws</i> ) .....	8
1.1.3. Osnovne komponente PA sustava .....	10
1.1.4. Osnovno ispitivanje i slikovni prikaz rezultata.....	11
1.2. Značajke višepretvorničke ultrazvučne tehnike .....	14
1.3. Primjena višepretvorničke metode ispitivanja u zrakoplovstvu .....	16
1.3.1. Ostale primjene u zrakoplovstvu.....	18
1.4. Prednosti i nedostaci višepretvorničke ultrazvučne tehnike ispitivanja .....	19
2. PRIMJENA VIŠEPRETVORNIČKE TEHNIKE ISPITIVANJA NA KOMPOZITIMA...20	
2.1. Ispitivanje ravnih panela .....	20
2.2. Ispitivanja rubova .....	22
2.3. Analiza podataka .....	24
2.4. Dobrobiti Phased Array ultrazvuka .....	25
2.5. Brzo slikovno prikazivanje velikih kompozitnih dijelova za avione pomoću PA ultrazvuka.....	25
2.5.1. Uvod .....	25
2.5.2. Rezultati ispitivanja.....	27
2.5.3. Razmatranje .....	30
2.5.4. Zaključci .....	30
2.6. Primjer primjene višepretvorničke tehnike u praksi .....	31
2.6.1. Ručno i automatizirano ultrazvučno ispitivanje .....	31
2.6.2. Mjerenje poroznosti .....	33
3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	34
4. ZAKLJUČAK .....	38
5. LITERATURA.....	39

# 1. UVOD

Phased Array (PA) je napredna metoda ultrazvučnog ispitivanja koja se koristi za nerazorna ispitivanja. Primjenom ove metode mogu se dobiti prikazi koji pokazuju volumen ispitanih dijelova unutar kojega mogu biti pukotine skrivene unutar strukture.

Sonde u PA tehnici sastoje se od više malih ultrazvučnih pretvornika od kojih se svaki može samostalno pobuđivati. Upravljanjem vremena okidanja, odnosno okidanjem pojedinačnih pretvornika nekim redosljedom, ultrazvučnim se snopom može upravljati elektronički. Podatci mnogih snopova zajedno se skupljaju i stvaraju vizualni prikaz koji pokazuje eventualnu pukotinu u objektu.

Višepretvornička sonda proizvodi upravljiv, visokorezolutni, dobro fokusiran snop i stvara sliku koja prikazuje eventualne pukotine u objektu. U odnosu na konvencionalne uređaje za ultrazvučno ispitivanje koji imaju jednu sondu (mogu imati i dvije sonde ali je tada jedna emitira a druga prima odjek), PA uređaji su skuplji i složeniji, te zahtijevaju veću stručnost i radno iskustvo ispitivača.

## 1.1. Pregled metode

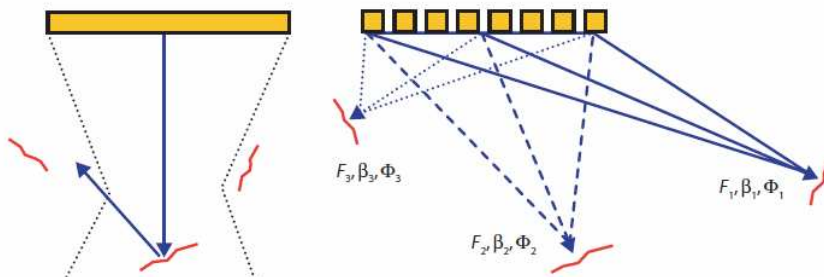
### 1.1.1. Osnovni principi

Ultrazvučni valovi su mehaničke vibracije inducirane u uzorak koji se ispituje putem sonde koje se pobuđuju električnim naponom. Frekvencije valova su u rasponu 0.1 MHz do 50 MHz, a u industrijskoj upotrebi koriste se frekvencije od 0.5 MHz do 15 MHz.

Većina konvencionalnih ultrazvučnih uređaja koriste sonde s jednim pretvornikom koje imaju divergentni ultrazvučni snop.

Višepretvornička sonda odnosno zajednički blok sastoji se od više identičnih pretvornika koji mogu biti različitih geometrija. Svaki mali pretvornik može se smatrati kao linijski izvor cilindričnih valova. Valne fronte pojedinačnih pretvornika međusobno interferiraju i združuju se u zajedničku valnu frontu. Zasebne valne fronte mogu se okidati s vremenskim kašnjenjem i usklađivati po kašnjenju i amplitudi kako bi se dobio rezultatni ultrazvučni snop kojim je na taj način moguće upravljati i usmjeravati ga.

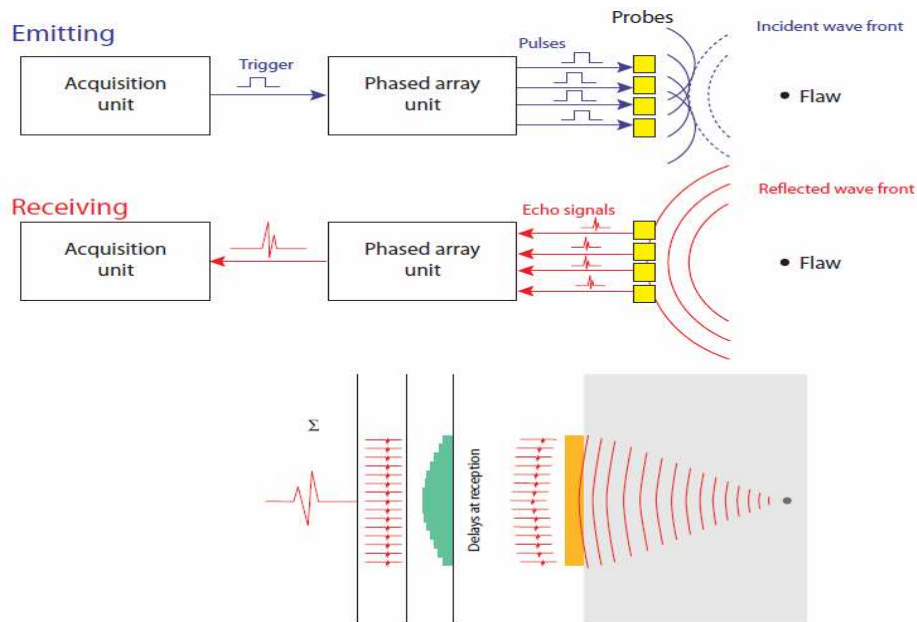
Glavna odlika PA tehnike je kompjuterski kontrolirano pobuđivanje (amplituda i kašnjenje) pojedinih pretvornika u sondi sačinjenoj od više pretvornika. Pobuđivanje pretvornika može stvoriti ultrazvučni snop s mogućnošću modificiranja parametara snopa putem software-a kao što su kut, žarišna udaljenost, veličina žarišne točke i taj snop može otkriti različito orijentirane pukotine. Prednost PA tehnike je to što se kutovi ultrazvučnih snopova mogu generirati praktički kontinuirano za razliku od konvencionalnih PE sonde koje imaju fiksne kutove (standardni su 45°, 60°, 70° ili specifično prema narudžbi).



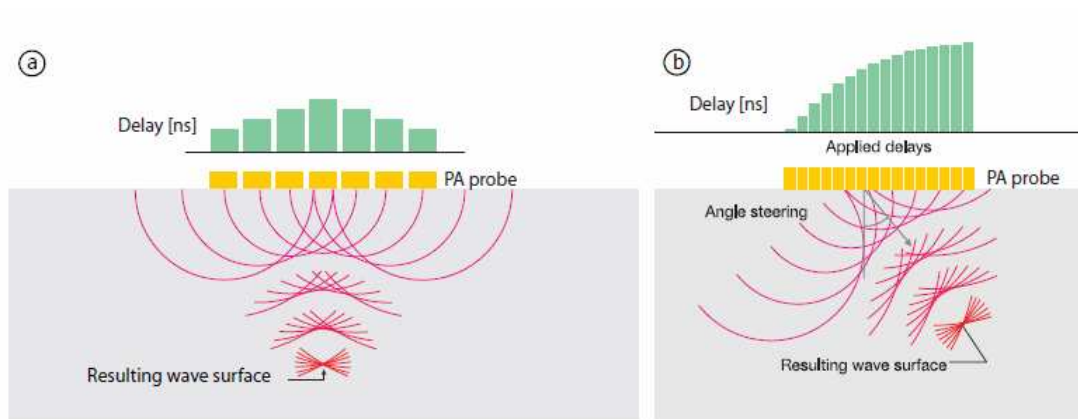
Slika 1: Otkrivanje različito orijentiranih pukotina pomoću sonde s jednim pretvornikom te pomoću višepretvorničke sonde (desno). Snop je divergentan i jednosmjernan za sondu s jednim pretvornikom, dok je usmjeren i pod više kuteva za PA sondu. Pukotine raznih orijentacija mogu se otkriti s PA sondom [1]

Da bi se stvorio snop sa korisnom interferencijom, različiti aktivni pretvornici sonde okidaju se u neznatno različitim vremenima. Odjek od reflektora vraća se i detektira u različitim pretvorničkim elementima. Signali ultrazvučnog odjeka primljeni na svaki pretvornički element vremenski su pomaknuti. Rezultirajuća suma tih signala je tzv. A-prikaz.

- Tijekom okidanja ultrazvučnih signala instrument šalje pobudni signal na PA uređaj koji vrši okidanje pretvornika po nekom zadanom programu. Signal se pretvori u visokonaponske impulse sa predprogramiranom širinom i vremenskim kašnjenjem uzevši u obzir i žarišne zakone. Svaki pretvornik prima samo jedan pobudni impuls. To stvara snop sa specifičnim kutom, usmjeren na određenu dubinu. Snop pogađa eventualni reflektor i odbija se natrag.
- Ultrazvučni impulsi tj. niskofrekvntni signali ultrazvučnog odjeka se primaju od strane pojedinih pretvornika, oni su vremenski pomaknuti i tada se ponovo spajaju kako bi oblikovali jedan ultrazvučni signal koji se šalje u jedinicu za prikupljanje.



Slika 2: Oblikovanje snopa i vremenska zadržka za različite okidajuće i prijemne snopove [1]



Slika 3: Principi usmjeravanja snopa za a) normalne i b) kutne slučajeve [1]

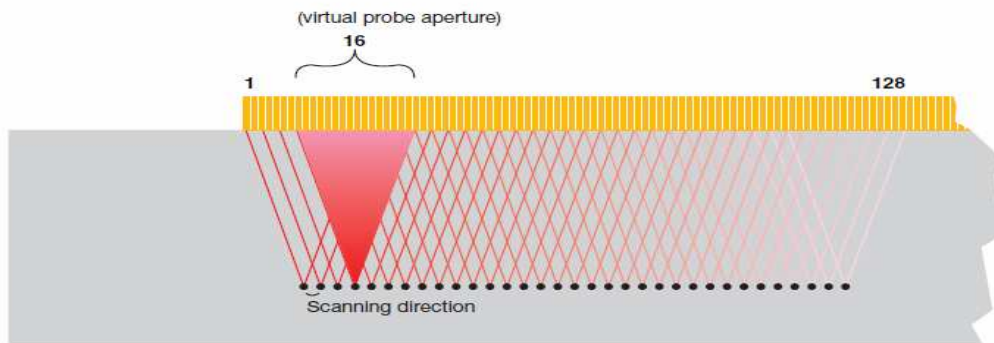
Vrijednost zadržke na svakom elementu ovisi o promjeru sonde, vrsti valova, kutu loma zraka i žarišnoj dubini.

Postoje tri glavna računalno kontrolirana modela očitavanja snopa:

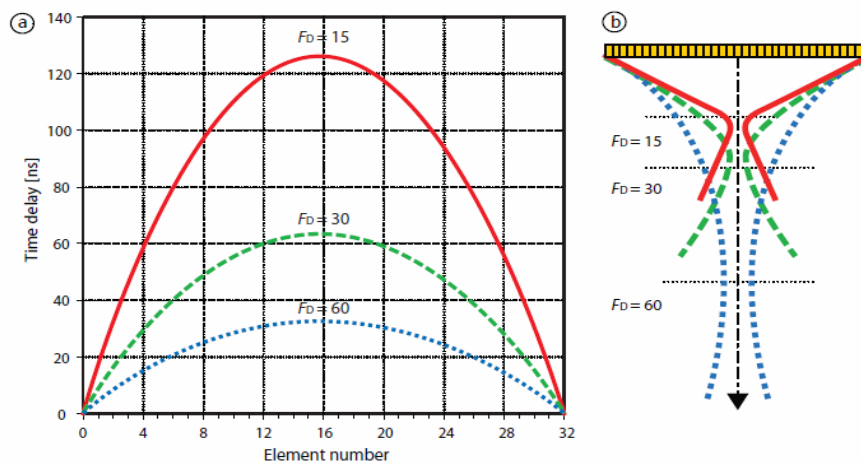
- Elektroničko očitavanje: isti žarišni zakon i zadržka je višestruka kroz grupu aktivnih pretvornika (vidi sliku 4); ispitivanje se izvodi pri konstantnom kutu i uzduž cijele duljine PA sonde (promjera). Ovo je ekvivalentno konvencionalnim ultrazvučnim pretvornicima koji se npr. koriste za ispitivanje korozije.
- Dynamic Depth Focusing (DDF, promjenjiva dubina fokusiranja): ispitivanje se izvodi s različitim žarišnim dubinama. U praksi, koristi se jedan odaslani usmjereni ultrazvučni impuls, a ponovno usmjeravanje se izvodi pri prijemu signala odjeka za sve programirane dubine (vidi sliku 5).



- Sektorsko ispitivanje (azimutsko, kutno ispitivanje): snop se pomiče kroz raspon područja za određene žarišne dubine, pri tom koristeći iste elemente; također se mogu dodati drugi rasponi područja sa različitom žarišnom dubinom. Kutni sektori mogu imati različite vrijednosti.



Slika 4: Elektroničko skeniranje normalnim snopom (VPA od 16 elemenata) [1]

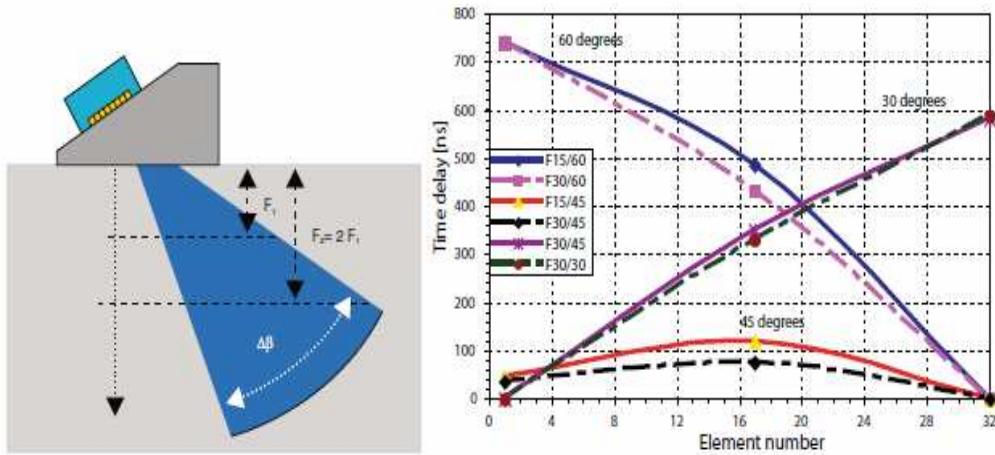


Slika 5: Vrijednosti zadržke (lijevo) i principi ispitivanja dubine (desno) za linearnu PA sondu s 32 elementa fokusiranu na 15 mm, 30 mm i 60 mm [1]

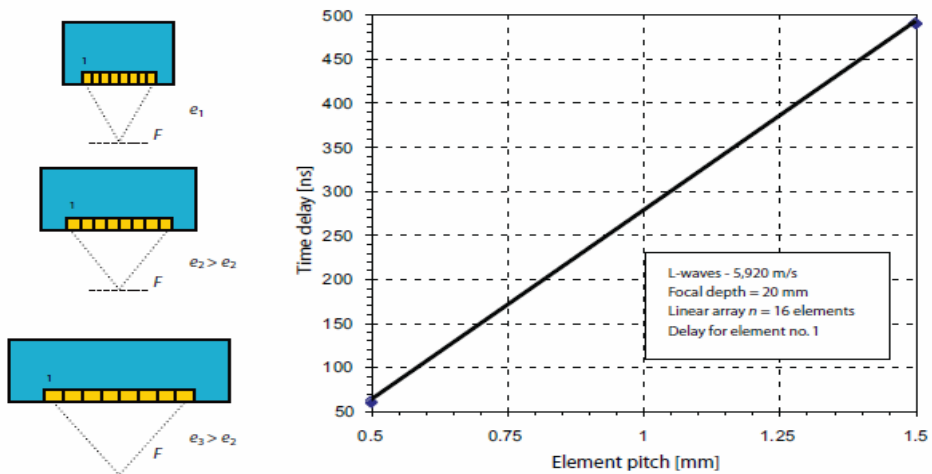
### 1.1.2. Zakoni zadržke ili žarišni zakoni (Delay Laws or Focal Laws)

PA sonde postavljene na klinove omogućuju zakone kašnjenja u raznim oblicima, temeljene na Fermat-ovom principu minimalnog vremena dolaska uzduž pojedine putanje (slika 6). Žarišni zakon zadržke ima parabolični oblik za dubinsko fokusiranje. Zadržka se povećava od rubova sonde prema središtu. Zadržka će biti djeljiva na pola kad se žarišna udaljenost popolovi (slika 5). Vrijeme zadržke elementa ima linearno povećanje kako se

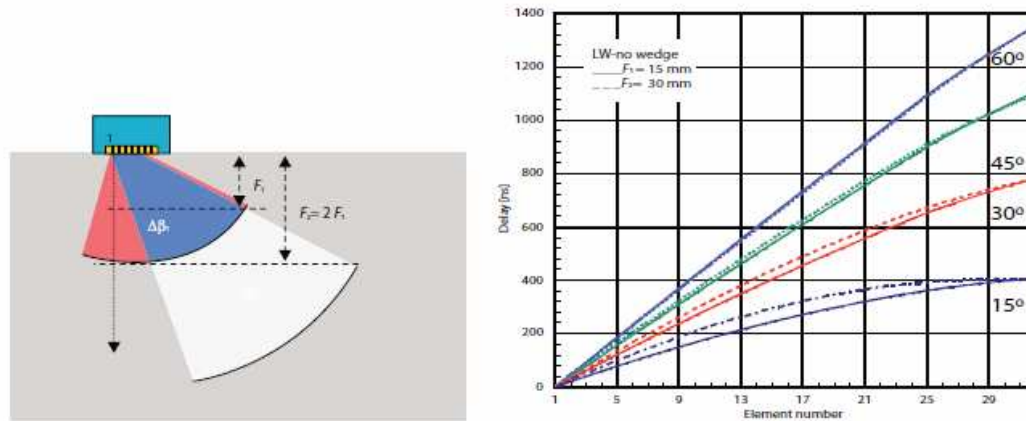
veličina elementa povećava (slika 7). Ako je odbijanje snopa sektorsko (azimutsko) i sonda nema nagiba, zadržka identičnih elemenata će ovisiti o poziciji elementa u aktivnom promjeru i o postavljenom kutu. (slika 8).



Slika 6: Primjer ovisnosti zadržke o kutu loma i poziciji pretvornika za PA sondu na ključu pod 37° [1]



Slika 7: Ovisnost zadržke o veličini pretvornika kod iste žarišne udaljenosti [1]



Slika 8: Primjer ovisnosti zadržke o kutu snopa, poziciji pretvornika i žarišnoj udaljenosti za sondu bez klina [1]

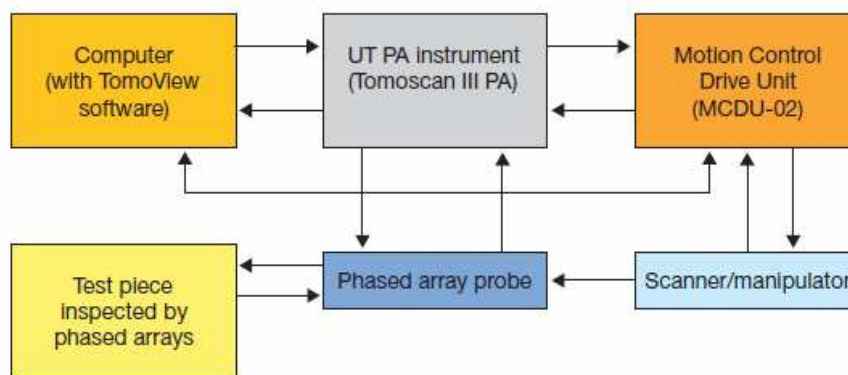
Ako je PA sonda postavljena na klin, vrijednost zadržke ovisi o poziciji pretvornika i kutu loma.

Zadržka ima paraboličan oblik koji je dan Snellius-ovim zakonom ( $45^\circ$  na slici 6). Za kuteve manje od onih predviđenih Snellius-ovim zakonom, zadržka se na pretvornicima povećava straga prema naprijed uzduž sonde.

Vrijednost zadržke na svakom elementu mora biti točno kontrolirana. Minimalni prirast zadržke određuje maksimalnu frekvenciju sonde.

### 1.1.3. Osnovne komponente PA sustava

Osnovne komponente potrebne za osnovno ispitivanje sustava sa PA instrumentima prikazuje slika 9:



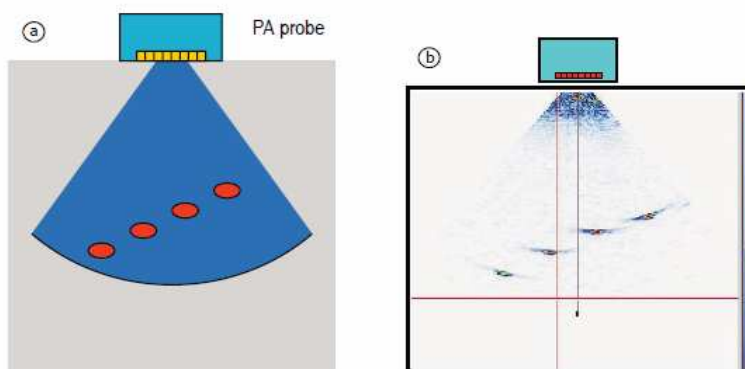
Slika 9: Osnovne komponente PA sustava i njihova međusobna povezanost [1]

### 1.1.4. Osnovno ispitivanje i slikovni prikaz rezultata

Podatci prikupljeni tijekom ispitivanja prikazuju se u raznim oblicima kako bi se mogli interpretirati. Tipično, PA koristi višestruke A-prikaze (također ih zovu B-prikazi) s različitim kutevima, vremenima prolaza i vremenima kašnjenja na svakom pretvorniku PA sonde.

Podatci od ukupnih A-prikaza, koji su izvedeni za pojedine položaje PA sonde, prikazani su sektorskim prikazom ili tzv. S-prikazom ili elektroničkim B-prikazom.

I S-prikaz i B-prikaz omogućuju globalnu sliku i brzu informaciju o komponenti i o mogućim nepravilnostima otkrivenim u ultrazvučnom području pri svim kutevima i pozicijama (slika 10). S-prikazi se primjenjuju u raznim područjima, od područja medicine do primjene u industriji.



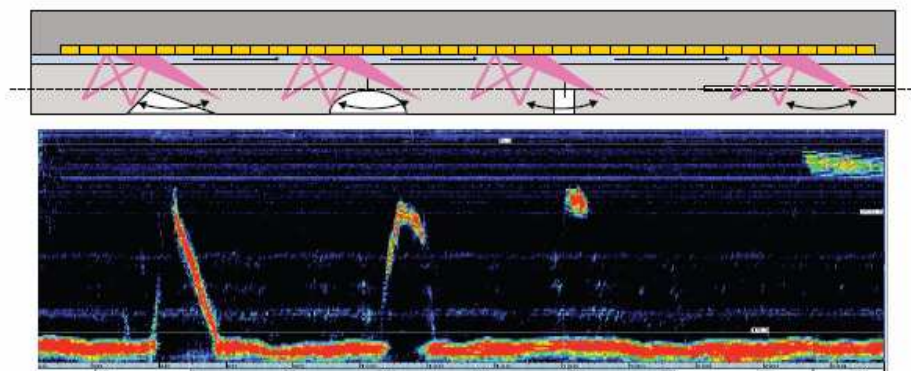
Slika 10: Pronalaženje četiri rupe izbušene sa strane u uzorku a) principi sektorskog skeniranja b) dobiveni S-prikaz, korištenjem  $\pm 30^\circ$  [1]

Iscrtavanje podataka u 2D formatu, koje se naziva "ispravljeni S-prikaz", omogućava jasnu interpretaciju i analizu rezultata prikupljenih ultrazvukom.

S-prikaz pruža nam sljedeće prednosti:

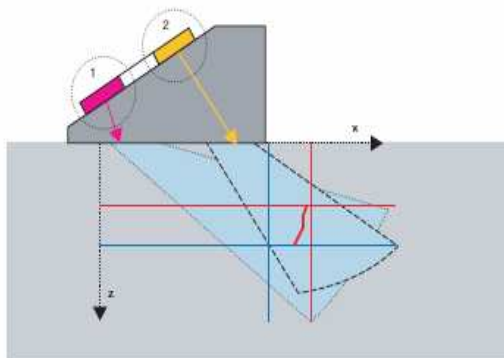
- slikovni prikaz tijekom ispitivanja
- prikazivanje stvarne dubine
- 2D volumensku rekonstrukciju

Napredno prikazivanje može se postići kombinacijom linearnih i sektorskih ispitivanja sa ispitivanjem pod više kutova tijekom pomicanja PA sonde. S-prikazi u kombinaciji s drugim prikazima dovode do oblikovanja slike nepravilnosti ili do njezinog prepoznavanja. Slika 11 pokazuje otkrivanje umjetnih oštećenja, usporedbu između dimenzija oštećenja (uključujući i oblik) i podatke B-prikaza.



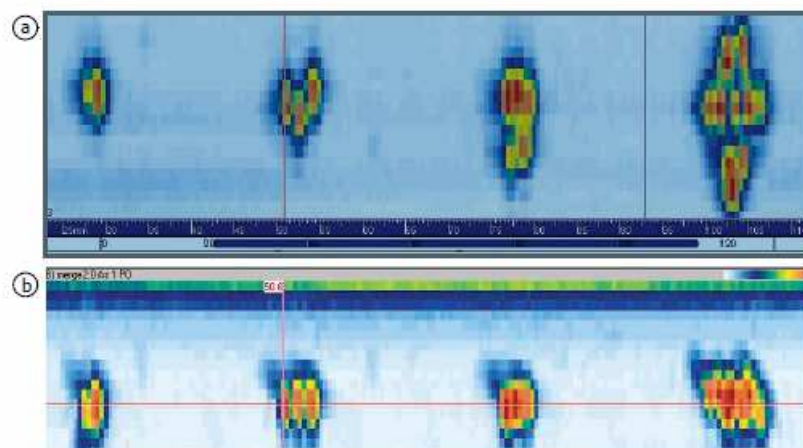
Slika 11: Napredno slikovno prikazivanje umjetnih oštećenja korištenjem povezivanja podataka: oštećenja i obrazac ispitivanja (na vrhu); povezani B- prikaz (na dnu) [1]

Kombinacija longitudinalnih i posmičnih valova kod ispitivanja uz malene pomake PA sonde može biti vrlo korisna za otkrivanje i dimenzioniranje nepravilnosti (slika 12). U ovom načinu rada, aktivni luk može se pomicati da se optimizira otkrivanje.



Slika 12: Otkrivanje i dimenzioniranje različito orijentiranih pukotina kombinacijom longitudinalnog vala (1) i posmičnog vala (2) kod sektorskog ispitivanja [1]

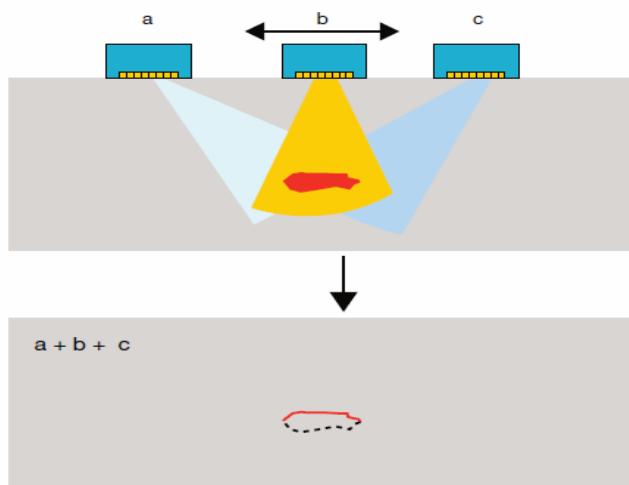
Cilindrični, eliptični ili kuglasto usmjereni snopovi imaju bolji omjer signal/buka (Signal-To-Noise Ratio ili SNR) i manje širenje snopa u odnosu na divergentne snopove. Slika 13 pokazuje diskriminaciju nakupine rupa sa cilindričnim usmjerenim snopom.



Slika 13: Diskriminacija (razlučivanje) skupine rupa: a) pogled s vrha (C-prikaz), b) pogled sa strane (B-prikaz) [1]

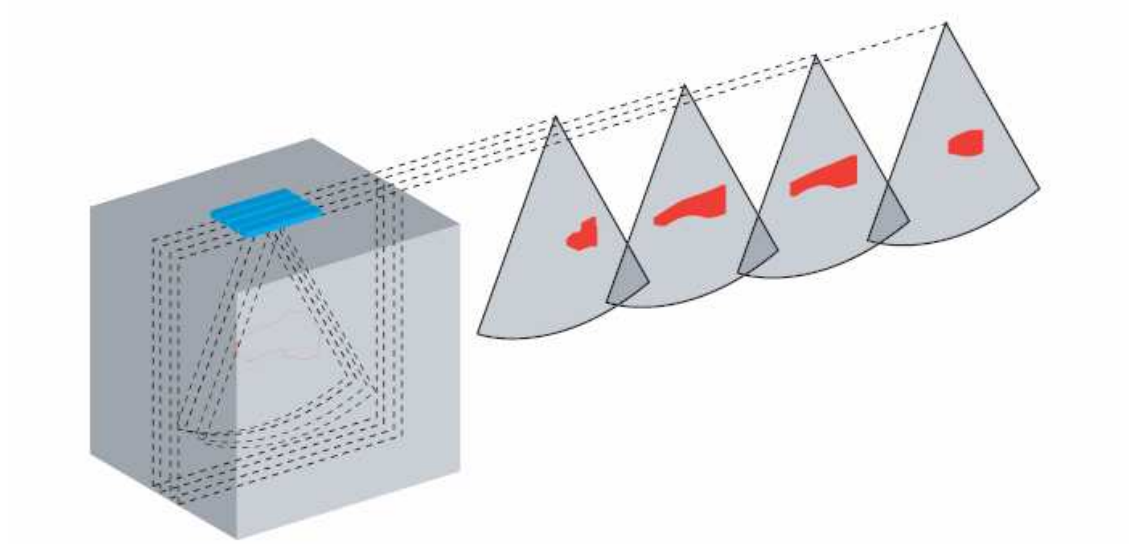
Skeniranje se može kombinirati sa pomicanjem sonde a podatci se mogu povezati u jedan prikaz (slika 14). Ovo svojstvo nudi sljedeće pogodnosti:

- visoku redudanciju
- lociranje nepravilnosti
- točno iscrtavanje
- slikovni prikaz nepravilnosti



Slika 14: Različiti načini ispitivanja i povezivanje podataka kako bi se prikazale potencijalne tehnike prikazivanja nepravilnosti [1]

Slika 15 pokazuje sektorske planove u volumenu. Svaki dio predstavlja dio nepravilnosti na različitim pozicijama.

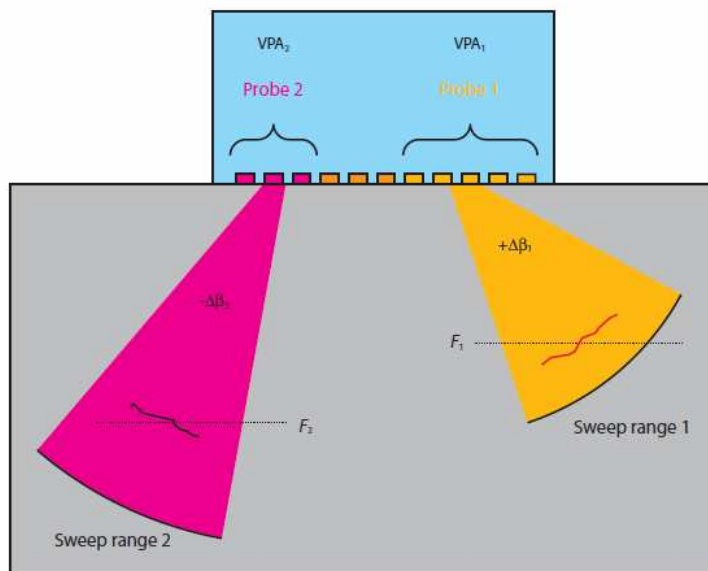


*Slika 15: Različiti načini ispitivanja i povezivanje podataka kako bi se prikazale potencijalne tehnike prikazivanja nepravilnosti [1]*

## **1.2. Značajke višepretvorničke ultrazvučne tehnike**

PA tehnika temelji se na sljedećim tehničkim značajkama:

- višestruko isprepletanje ultrazvučnih signala nastalih od velikog broja pretvornika unutar jedne sonde
- kontrola žarišne udaljenosti
- kontrola kuta usmjeravanja
- kontrola širine luka
- programiranje virtualnog luka sonde
- ispitivanje s velikim brojem A-prikaza
- prikaz podataka dobivenih ispitivanjem općenitim prikazom koji se zove S-prikaz



Slika 16: VPA - Virtual Probe Aperture (sonda se fokusira na različite dubine i pod različitim kutovima, kut zakretanja može biti pozitivan i/ili negativan a različit broj pretvornika može se grupirati kako bi se oblikovao virtualni promjer sonde - VPA) [2]

Posebne značajke PA tehnologije su:

- konstrukcija sonde temelji se na modeliranju
- svaki aktivni pretvornik višepretvorničke sonde se pobuđuje neovisnim okidačem
- vrijeme pobuđivanja je računalno kontrolirano i zadržano prema Fermat-ovu principu na taj način da će cilindrična valna fronta dosegnuti pojedine točke u prostoru u isto vrijeme (u fazi)
- snop je cilindrično ili sferično fokusiran
- valna fronta odbijena od reflektora dolazi do prijammnika; vrijeme putovanja se zadržava u odnosu na žarište, kut odbijanja i broj aktivnih pretvornika
- individualne amplitude od svakog aktivnog pretvornika se zbrajaju
- računalno se određuje vrijeme zadržke na svakom pretvorniku kako bi se snop usmjerio i fokusirao na razne dubine i pod raznim kutovima
- analogni signali se isprave, izglate, uprosječe i mogu se komprimirati
- podatci ispitivanja se prikazuju u više pogleda ili prikaza; amplituda nepravilnosti je kodirana bojama prema specifičnoj paleti boja, za svaki pogled podatci se isrcavaju u 2D prikazu
- analiza podataka je pouzdanija i učinkovitija sa prilagođenim listama nepravilnosti i povezanim A-prikazima

Glavne prednosti PA tehnologije su:

1. Brzina. PA ispitivanja s linearnim skeniranjem su znatno brža od uobičajenih ispitivanja s jednom sondom što znatno štedi vrijeme i troškove rada.
2. Fleksibilnost. Jedna grupa pretvornika može ispitati više različitih komponenata na razne načine.
3. Složena ispitivanja. PA može se relativno lako programirati za ispitivanje geometrijski složenih komponenti, npr. automatiziranih zavara ili mlaznica. PA također se može

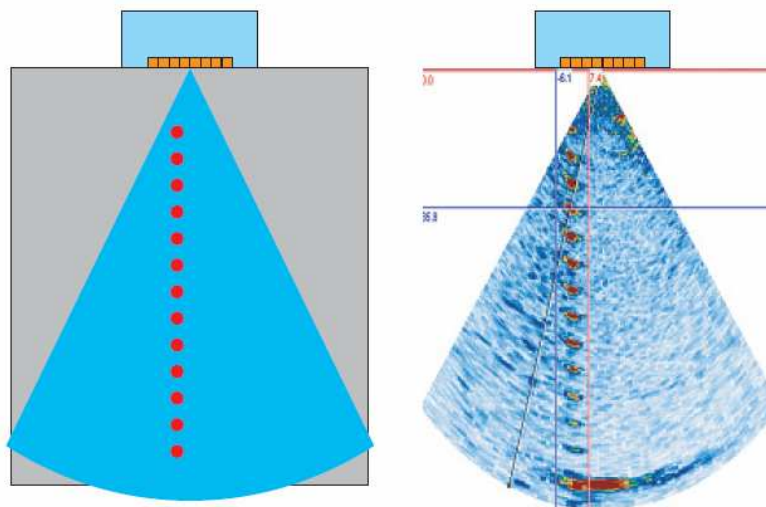


programirati da izvodi specijalna ispitivanja npr. uzastopna ispitivanja, s više kutova, na više načina i s diskriminacijom zona.

4. Mala veličina grupe pretvornika. Mala veličina grupe pretvornika u sondi čini ih savršenim za specifične primjene, npr. turbine ili diskove gdje je prostor skučen.

5. Mehanička pouzdanost. Manje pokretnih dijelova sustav čine pouzdanijim. Zamjenom mehanike s elektronikom smanjeno je trošenje i buka.

6. Povećana mogućnost otkrivanja različito orijentiranih nepravilnosti. Usmjereni snop povećava omjer signal/buka (SNR signal-to-noise ratio)



*Slika 17: Višekutno ispitivanje kalibracijskog bloka s naslaganim rupama, lijevo su postavke ispitivanja, desno ultrazvučni prikaz - sektorsko ispitivanje [2]*

### 1.3. Primjena višepretvorničke metode ispitivanja u zrakoplovstvu

Vrlo važna primjena PA tehnike je kod ispitivanja stajnog trapa koji je izložen jakim naprezanjima prilikom slijetanja i uzlijetanja. Dio koji se ispituje je cilindar koji ima tri različita promjera u području koje nas zanima a najbolji način da se ispita to područje je korištenje PA tehnike s mogućnošću zakretanja snopa kako bi se istodobno okinuli posmični valovi od  $40^\circ$  do  $65^\circ$ . Prilagođeni klin i kombinacija kuteva koju omogućuje PA sustav omogućava kompletan pregled područja koje nas zanima u jednom prolazu. Prednosti te tehnike u odnosu na standardne tehnike su jednostavnost (jedan prolaz umjesto više njih), mogućnost pokrivanja cijelog volumena istovremenim korištenjem višestrukih kuteva. Ispitivanje je dakle brže i pouzdanije.



*Slika 18: Cilindar stajnog trapa i stajni trap zrakoplova koji jedan je od primjera gdje se koristi višepretvornička ultrazvučna metoda ispitivanja [3]*

Druga važna primjena je kod ispitivanja trupa zrakoplova gdje se ispituju urezana oštećenja nastala udarcima ostrim alatima (tzv. "Scribe Marks") koji se koriste tijekom odstranjivanja boje ili sredstava za brtvljenje. Ako se ne otkriju nastala oštećenja ona mogu rezultirati nastankom pukotina i dovesti do oštećenja usljed zamora materijala. Sve komercijalne letjelice koje idu na odstranjivanje boje ili mrlja od ulja su osjetljive na urezana oštećenja.

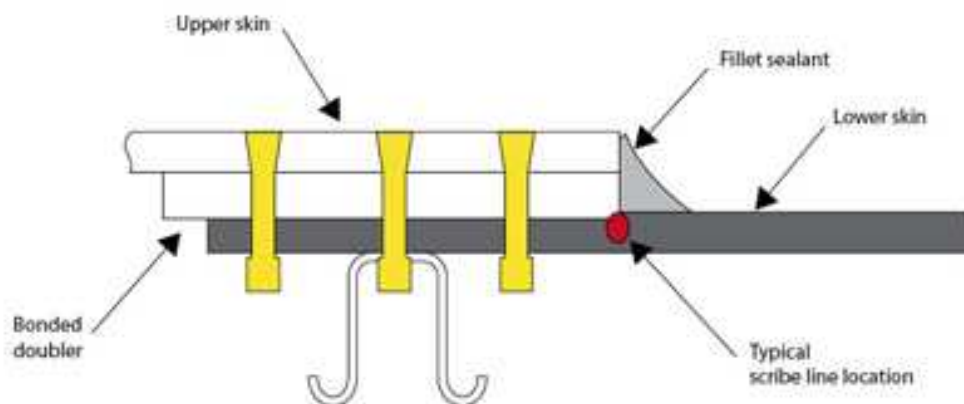
Mogućnosti PA uređaja za otkrivanje ovih oštećenja su:

- software-ska kontrola kuta snopa i žarišne udaljenosti
- ispitivanje višestrukim kutevima sa jednom malom elektronski kontroliranom višepretvorničkom sondom
- nije potrebno ukloniti boju da bi se izvelo ispitivanje
- slikovni prikaz ispitivanog dijela

Prednosti ovog uređaja (OmniScan for Scribe Mark Detection):

- napravljen je da radi u najlošijim uvjetima na terenu
- kompaktan je i lagan (težak samo 4.6 kg)
- radi čak do 6 sati s dvije Li-ion baterije

### Scribe Marks Location on Boeing 737



Slika 19: Urezana oštećenja (Scribe Marks) na Boeing 737 [4]

Višepretvorničkom tehnikom ispituju se i odljevci od titana od kojih su kod nekih letjelica izrađeni npr. nosači motora ili pak cijeli okviri. Ovaj materijal je posebno težak za ispitivanje zbog svoje granularne strukture pa se najčešće ispituva X-zrakama i konvencionalnom ultrazvučnom tehnikom ali je korištenje PA tehnike donijelo napredak u ispitivanjima omogućivši bolju prepoznatljivost u odnosu na uobičajene metode. Zahtjevi kod ispitivanja su najčešće: pronalazak i karakterizacija nepravilnosti, pokrivenost kompletnog volumena odljevka, dovoljna fleksibilnost kako bi odgovaralo raznim oblicima, prenosivost da bi se izvela ispitivanja u službi ili u proizvodnji.

Prednosti PA tehnike u odnosu na X-zrake kod ovog ispitivanja su :

- bolja prepoznatljivost u odnosu na X-zrake (najmanje oštećenje veličine 0.065 inch kod X-zraka a kod PA tehnike je 0.031 inch)
- raznolikost
- uređaj je brz i lagan za upotrebu

#### 1.3.1. Ostale primjene u zrakoplovstvu

Kompoziti – danas postoje kompletni PA sustavi razvijeni za ispitivanje panela od kompozitnih materijala. Ti sustavi mogu ispitati mnoge vrste različitih dijelova, tražeći karakteristične nepravilnosti u kompozitnom materijalu (npr. raslojavanje). Kako bi se mogli ispitati složeni oblici često se koristi višeosni robot. Režim ispitivanja može biti usvojen preko CATIA CAD podataka ili se može automatski naučiti. Kada je oblik memoriran, dio se ispituje automatski s ultrazvukom brzinama i do 330 mm/s.

Važna primjena PA tehnike je i u rješavanju problema korozije na letjelicama, jer ako letjelice lete duže nego što je to pri konstruiranju bilo planirano vrlo je važno da postoji pouzdana i brza tehnika kojom bi se obavilo ispitivanje. PA tehnikom se otkrije i izmjeri unutarnja korozija prvog sloja trupa letjelice, sustav omogućava točno dimenzioniranje korozije kao i brzo ispitivanje.

Također primjenu PA tehnike nalazimo kod ispitivanja zavora. Pri zavarivanju aluminijskih zavara može doći do uskih oštećenja koja je jako teško otkriti. Najbolja metoda za ispitivanje ovih zavara je korištenje PA tehnike jer se cijeli volumen zavora ispita u jednom prolazu a moguće je i bočno ispitivanje kako bi se otkrile poprečne nepravilnosti. Moguća je optimizacija kuta ispitivanja pa je povećana prepoznatljivost a prednosti su još brzina, točnost i raznolikost.

Ultrazvučni mjerači debljine i detektori pukotina se široko koriste u zrakoplovnoj industriji te u operacijama održavanja i u proizvodnji. Primjene ultrazvučnog ispitivanja u održavanju zrakoplova uključuju mjerenje debljine oplata i vjetrobrana nakon operacija prevlačenja i uklanjanja ogrebotina s prozora kao i za otkrivanje pukotina u konstrukciji zrakoplova, stajnom trapu, nosačima motora... Može se pratiti i debljina stijenke turbinskih lopatica tijekom održavanja. Može se ispitati eventualno raslojavanje kompozitnih panela u fazi proizvodnje i može se kvalificirati veličina štete od udaraca zadobivenih tijekom službe.

## **1.4. Prednosti i nedostaci višepretvorničke ultrazvučne tehnike ispitivanja**

PA sustavi mogu se koristiti u skoro svim ispitivanjima gdje su se koristili konvencionalni ultrazvučni detektori pukotina. Ispitivanje zavara i otkrivanje pukotina su jedne od najvažnijih primjena ove tehnike i ova ispitivanja se rade u širokom području industrije uključujući zrakoplovstvo, proizvodnju energije, petrokemiju, konstrukciju i održavanje cjevovoda, konstrukcijski metali i općenita proizvodnja. PA sustavi mogu se također učinkovito koristiti za dimenzioniranje debljine stijenki u ispitivanjima korozije.

Prednosti PA tehnike nad uobičajenim ultrazvučnim metodama dolaze zbog njihove mogućnosti da se može koristiti više pretvornika kojima se može upravljati i usmjeravati snopove. Usmjeravanje snopa može se koristiti za prikazivanje komponenti pod odgovarajućim kutevima. To uvelike može pojednostaviti ispitivanje komponenti složene geometrije. Malena veličina prijemnika i mogućnost zakretanja snopa bez pomicanja sonde također olakšava ispitivanje takvih komponenti u situacijama gdje je ograničen pristup. Sektorsko skeniranje se također često koristi kod ispitivanja zavara. Mogućnost da se ispitaju zavari iz više kuteva s jednom sondom naveliko povećava vjerovatnost otkrivanja anomalija. Elektronsko usmjeravanje omogućava optimiranje oblika i veličine snopa na očekivanoj lokaciji nepravilnosti. Mogućnost usmjeravanja na više dubina također povećava mogućnosti dimenzioniranja kritičnih nepravilnosti. Usmjeravanje može značajno poboljšati omjer signal/šum u zahtjevnim primjenama i elektronsko skeniranje preko više pretvornika omogućuje da se C-prikazi brzo naprave.

Postoji velik broj prednosti povezanih s korištenjem PA ultrazvuka za ispitivanje ravnih dijelova od kompozita kao i rubova. Ponajprije, poboljšano slikovno prikazivanje podataka smanjuje faktor ljudske pogreške. U tom smislu, korištenje C-prikaza povećava pouzdanost ispitivanja zbog toga što garantira cjelokupnu pokrivenost ispitivane površine. Također, velike sonde s mnogo pretvornika povećavaju brzinu ispitivanja i razlučivost. U kombinaciji s prikladnim skenerom, velike ravne površine mogu se ispitati prilično pouzdano kodiranjem cijelog ispitivanja. Čitavi zakrivljeni dijelovi s raznim geometrijama rubova mogu se ispitati u jednom prolazu s linearim kodiranjem duž aksijalnog smjera kako bi se pozicioniralo i dimenzioniralo nepravilnosti. Dodatno, pohranjivanje podataka A i C-prikaza omogućava daljnu analizu ili povremene usporedbe. Nadalje, neki uređaji istovremeno podržavaju PA i konvencionalni ultrazvučni način rada i moguće brzo mjenjanje ovih dviju tehnika.

Potencijalni nedostaci PA sustava su veća cijena i zahtjevi da korisnik prođe trening, mada su ti troškovi i zahtjevi često nadoknađeni velikom fleksibilnošću i smanjenim vremenom koje je potrebno da se izvrši neko ispitivanje.

## 2. PRIMJENA VIŠEPRETVORNIČKE TEHNIKE ISPITIVANJA NA KOMPOZITIMA

Proizvođači letjelica, pružatelji usluga održavanja i operatori zrakoplovnih kompanija su u posljednje vrijeme počeli koristiti ultrazvučnu višepretvorničku tehniku ispitivanja kako bi osigurali kvalitetu kompozitnih dijelova tijekom održavanja i proizvodnje. Postoje razni instrumenti kojima se izvode najzahtjevnije operacije. Postoje PA sonde koje su konkretno konstruirane za ispitivanje kompozitnih ravnih panela i njihovih rubova. Ovi uređaji kombinirani sa specifičnim software-skim značajkama za kompozite omogućuju veću učinkovitost tijekom održavanja i visok stupanj pouzdanosti.

### 2.1. Ispitivanje ravnih panela

Tipični CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) dijelovi koji se sastoje od jedne ili više relativno velikih i ravnih sekcija u zrakoplovnoj industriji uključuju oplatu, struk i pojas ramenjača, okvire... Klasična ispitivanja koja koriste konvencionalni ultrazvuk imaju manu da su spora i zamorna. PA tehnika ima mogućnost da ispita ove velike strukture brzo i pouzdano, a tehnika se sve više koristi i za ispitivanja u službi gdje veliki uređaj za ispitivanje nije uvijek na raspolaganju, ili ispitivanje nije ostvarivo ili ekonomično. Napredni ultrazvučni potpuno prenosivi uređaj za ispitivanje s dvodimenzionalnim mogućnostima kodiranja je veliki dobitak za sve vrste zahtjeva kod ispitivanja.

OmniScan™ PA [5] uređaj koristi odgovarajuće nosače sonde i linearna grupa sastavljena od 64 do 128 pretvornika okida se određenim redoslijedom kako bi se obuhvatilo veliko područje u jednom prolazu. Nadalje, uređaj omogućuje višestruke amplitude ili trenutačno pruža C-prikaz što čini analizu podataka jednostavnim zadatkom. Glavne prednosti korištenja ovog PA uređaja su povećana brzina ispitivanja zbog velike pokrivenosti pomoću PA sonde i prenosivost opreme. Model 16:128 također omogućava mijenjanje preko jednog gumba iz PA načina rada u konvencionalni ultrazvučni način za brzu kontrolu i određivanje veličine nepravilnosti a što je korisno kod nekih primjena.

Važan čimbenik kada se bavimo ispitivanjima velikih površina je pouzdanost kontaktnog medija. Završetak površine i geometrija jako utječu na izbor nosača sonde koji će raditi najbolje. Olympus nudi brojne nosače sonde kako bi se zadovoljilo ove potrebe. U pravilu su standardni reksolitni nosači sonde i verzije nosača s vodenim jastukom dobro prilagođeni za većinu zahtjeva kod ispitivanja.

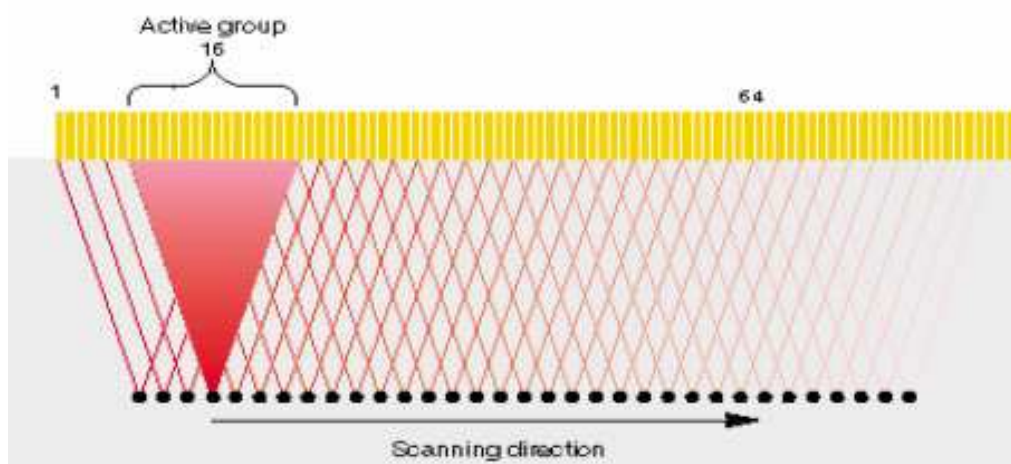
Klin za vodenim jastukom ima brazde od 0.005" na dnu kako bi omogućio da se tanki vodeni film savršeno spoji s dijelom.

U svrhu preslikavanja, jednolinijska ili dvodimenzijska ispitivanja se jednostavno izvode ili s kružnim koderom ili sa dvoosnim skenerom "Glider"[5]. Glider se jednostavno namjesti i stavi na bilo koji ravni ili relativno ravni panel a sisaljke drže skener na mjestu čak i kada je na vertikalnim površinama.



Slika 20: PA uređaj za ispitivanje kompozita [5]

Elektroničko skeniranje pod  $0^\circ$  se izvodi pomoću uzastopnog okidanja pretvornika. Podešavanje osjetljivosti osigurava istu amplitudu signala svakog snopa kod elektroničkog skeniranja. OmniScan™ omogućava korisniku da podesi vremenski korigirano pojačanje (Time Corrected Gain - TCG) ispravljeno u odnosu na standardne panele ili ručno unošenje zahtjevanog pojačanja kao funkcije debljine. To je zahtjev za postizanje relevantnog C-prikaza.



Slika 21: Shematski prikaz elektroničkog skeniranja [5]

Može se izvoditi linearno ili mrežno skeniranje i uređaj OmniScan prikazuje u stvarnom vremenu amplitudu i/ili vrijeme prolaza na C-prikazu. Na kraju ispitivanja analiza i izvještaj mogu se izravno napraviti na uređaju OmniScan ili se podatci ispitivanja mogu spremiti i analizirati naknadno ili prenijeti na računalo za analizu.

Iako se dimenzioniranje nepravilnosti i pozicioniranje može ostvariti naknadnom analizom zbog potpuno kodiranih ispitivanja, određena ispitivanja zahtjevaju trenutno dimenzioniranje nepravilnosti s konvencionalnim ultrazvukom. Prekidač na uređaju prebacuje s PA načina rada u konvencionalni. Konvencionalna sonda može se trajno pričvrstiti na OmniScan i uvijek je spremna za korištenje. Kada se promatra indikacija na C-prikazu, skener Glider se može zaustaviti na određenom mjestu tijekom dimenzioniranja nepravilnosti s konvencionalnim

ultrazvukom i PA ispitivanje se može nastaviti nakon operacija dimenzioniranja. Oba software-ska načina i postavke su potpuno neovisne.

Izvođenje brzih ispitivanja na velikim površinama stavlja naglasak na odgovarajuće sposobnosti slikovnog prikaza. Različite mogućnosti slikovnog prikaza kao što su A- prikazi, B- prikazi, S- prikazi i dvije vrste C- prikaza (amplituda i vrijeme prolaza) ovog uređaja pomažu operatoru da izvodi pouzdana ispitivanja. Međutim, tehnika ne služi samo za slikovni prikaz; oprema također prikuplja podatke u takvom obliku koji se može spremirati i kasnije naknadno ispitati i analizirati. To omogućava pristup neobrađenim signalima (A-prikazi). Koder prikuplja podatke, dajući stvarnu lokaciju indikacija.

## 2.2. Ispitivanja rubova

Uobičajeni dijelovi od kompozita (CFRP) često sadrže rubove koji zahtijevaju ispitivanje isto kao i ravni dijelovi tih komponenti. Ovi dijelovi u zrakoplovnoj industriji mogu se naći na ramenjačama, uzdužnicama i udubljenim dijelovima. Uobičajena ispitivanja rubova izvode se u proizvodnim prostorima. Ispitivanje ovih rubova je relativno novo ali postaje sve važnije zbog povećane proizvodnje dijelova letjelica od CFRP laminata. Klasična ispitivanja se izvode ručno s konvencionalnom ultrazvučnom sondom. Spora i zamorna priroda ovog pristupa ispitivanju i velika ovisnost o ispitivaču su glavni nedostaci te metode.

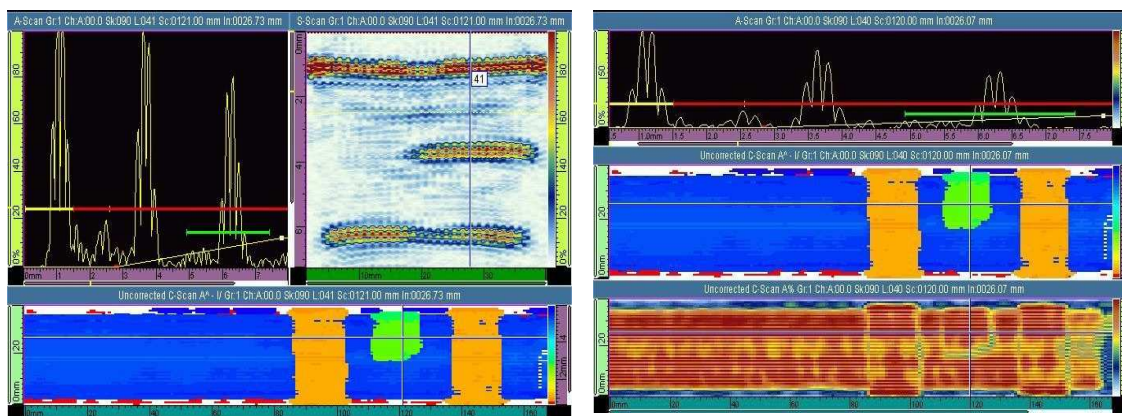
OmniScan™ PA koristi prigodne nosače sonde i zakrivljene linearne grupe sastavljene od 16 do 64 pretvornika koji se okidaju nekim redoslijedom kako bi se pokrio cijeli rub u jednom prolazu. Ispitivanje rubova postaje kodirano jednolinijsko ispitivanje. Geometrija sonde omogućava da se svi ultrazvučni snopovi podudaraju vertikalno s površinom dijela na način homologan ispitivanju ravnih površina. Nadalje, uređaj omogućava višestruke amplitude ili pridružene poglede TOF C-prikaza koji čine analizu podataka laganim zadatkom. U dodatku prednostima koje su ranije navedene za ispitivanje ravnih dijelova, glavne prednosti korištenja ovog uređaja za ovu primjenu je mogućnost pokrivanja cijelog ruba u jednom prolazu i postizanje potpuno kodiranih rezultata za dimenzioniranje. U odnosu na brzinu ispitivanja, uobičajenim postavkama može se ispitati uzduž ruba ugrubo brzinom 200 mm/s.

Sonda i nosači sonde su odabrani i postavljeni u skladu s geometrijom ruba. nosači sonde moraju se odabrati tako da se središte polumjera sonde podudara sa središtem polumjera ruba. Na taj način, ista sonda može se koristiti za većinu geometrija rubova jednostavnim mjenjanjem ili prilagođavanjem nosača sonde. Slični pristupi mogu se primjeniti za ispitivanje i sa unutarnje i sa vanjske strane rubova. Olympus nudi brojne sonde i nosače sonde kako bi se zadovoljile ove potrebe uključujući prilagodljive ulazne klinove koji su prilagodljivi na određeni raspon polumjera rubova.



Slika 22: Sonde za ispitivanje rubova [5]

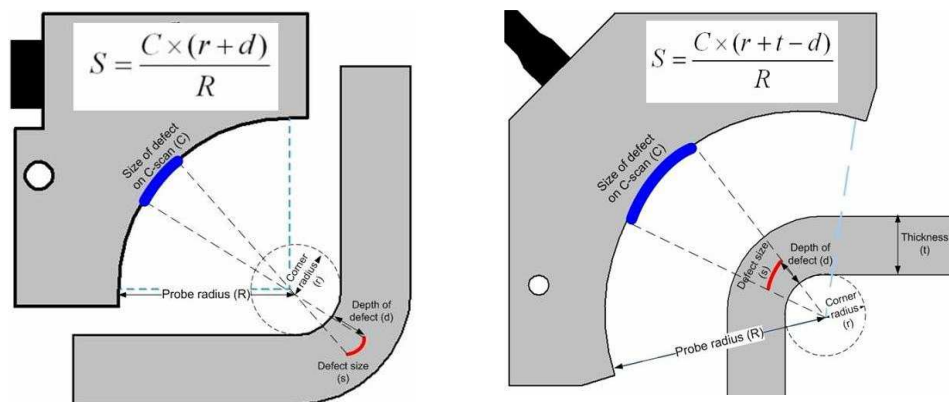
Elektroničko skeniranje pod  $0^\circ$  se izvodi uzastopnim okidanjem elemenata. Sa sondom postavljenom ispravno, ispitivanje postaje identično ispitivanju ravnih dijelova pri  $0^\circ$  jer svaki ultrazvučni snop presjeca površinu okomito. Postavke ulaza za C-prikaze gotovo su identične onima za ispitivanje ravnih dijelova. Međutim, OmniScan™ PA omogućava da se A-prikazi sinkroniziraju što daje određeni stupanj fleksibilnosti u odnosu na poziciju sonde i na polumjer. Podatci ulaza kao i TCG korekcija su sinkronizirani.



Slika 23: Rezultati ispitivanja kompozitnih rubova s različitim pogledima uključujući različite vrste A-prikaza, S-prikaza i amplituda/vrijeme C-prikaza [5]

Glavna razlika između ispitivanja rubova na ovaj način i ispitivanja ravnih panela je ovisnost koja se zahtijeva za dimenzioniranje pokazatelja na rubovima. Dimezioniranje pokazatelja u smjeru ispitivanja može se izravno izmjeriti iz kodiranih očitavanja i prikazati se na uređaju. Geometrijska pretvorba uzima u račun polumjer PA sonde ( $R$ ), polumjer ruba ( $r$ ), dubinu indikacije ( $d$ ), debljinu dijela ( $t$ ) i veličinu indikacije koja je prikazana na uređaju ( $C$ ) i to je potrebno kako bi se postigla stvarna veličina indikacije ( $S$ ). Ova pretvorba također ovisi o vrsti ispitivanja.

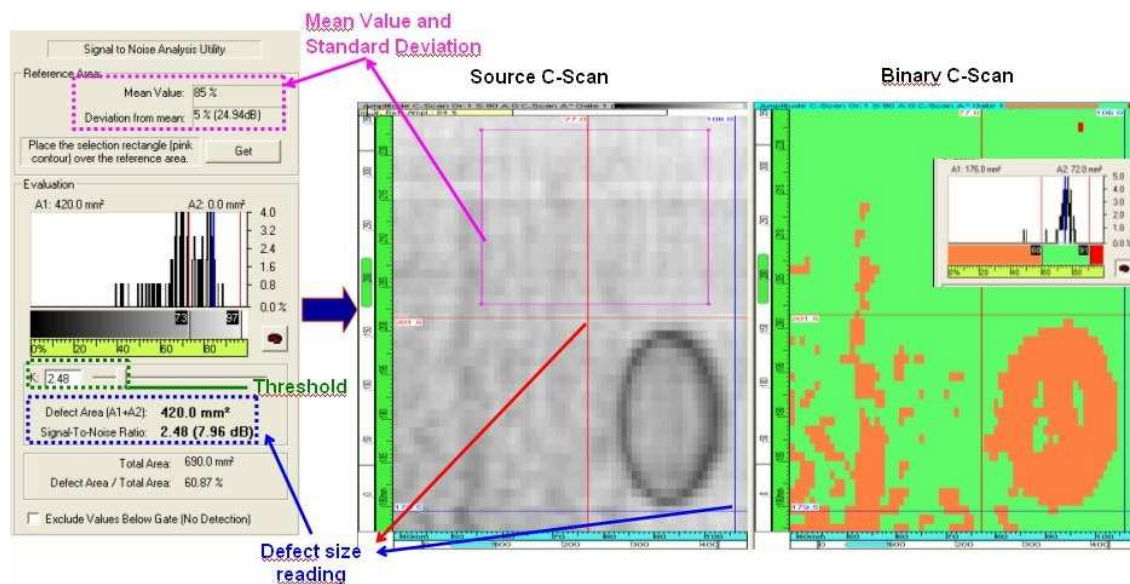




Slika 24: Geometrijska konverzija [5]

## 2.3. Analiza podataka

Olympus NDT je u suradnji s proizvođačima letjelica razvio automatski alat za dimezioniranje nepravilnosti za TomoView™ [5]. Usluga SNR (omjer signal/buka) omogućava mjerenje ukupne površine nepravilnosti koja je ograničena između pokazivača koje postavlja korisnik tako da se u račun uzima beznačajni pozadinski signal u odnosu na referentnu površinu blizu nepravilnosti o kojoj je riječ. SNR se koristi za definiranje značajke i nepravilnosti koje se mogu definirati od strane korisnika. Usluga također uključuje "binarizer" za jednostavno prikazivanje nepravilnosti na C-prikazu sa paletom od 3 boje.



Slika 25: Analiza podataka, kontrolni prozor TomoView™ SNR usluge i tipični C-prikaz [5]

## 2.4. Dobrobiti Phased Array ultrazvuka

Postoji velik broj prednosti povezanih s korištenjem PA ultrazvuka za ispitivanje ravnih dijelova od kompozita kao i rubova. Ponajprije, poboljšano slikovno prikazivanje podataka smanjuje faktor ljudske pogreške. U tom smislu, korištenje C-prikaza povećava pouzdanost ispitivanja zbog toga što garantira punu pokrivenost ispitivane površine. Također, velike višepretvorničke sonde povećavaju brzinu ispitivanja i razlučivost. Kombinirano s prikladnim skenerom, velike ravne površine mogu se ispitati prilično pouzdano uz kodiranje cijelog ispitivanja. Čitavi zakrivljeni dijelovi raznih geometrija rubova mogu se ispitati u jednom prolazu uz linearno kodiranje uzduž aksijalnog smjera za pozicioniranje i dimenzioniranje nepravilnosti. Dodatno, pohranjivanje podataka od A i C-prikaza omogućava daljnu analizu ili povremene usporedbe. Nadalje, OmniScan™ PA uređaj istovremeno podržava PA i konvencionalni ultrazvučni način rada i omogućuje brzo mjenjanje ovih dviju tehnika.

## 2.5. Brzo slikovno prikazivanje velikih kompozitnih dijelova za avione pomoću PA ultrazvuka

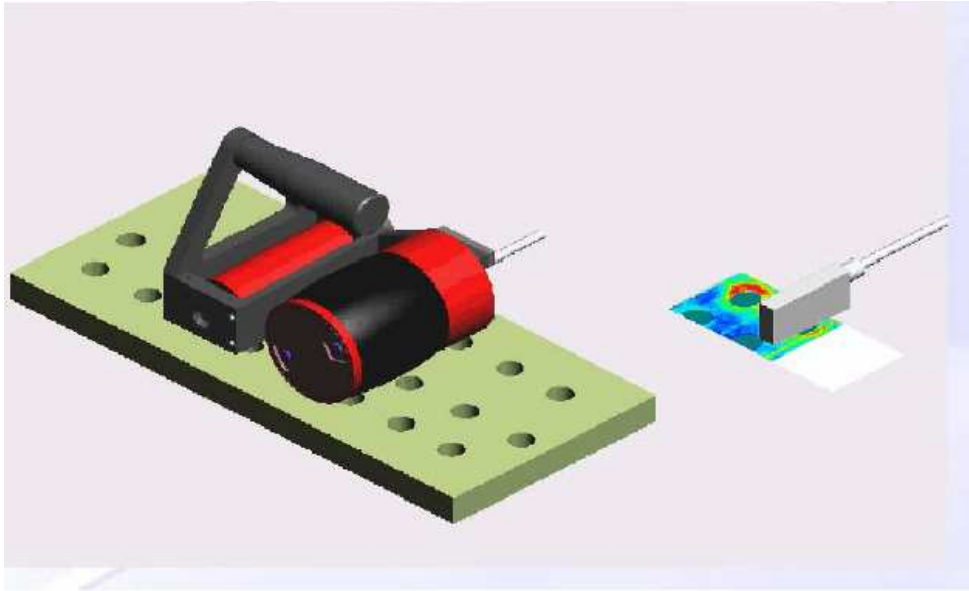
Sve veća upotreba kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji dovela je do potrebe za novim NDT tehnikama kojima se brzo mogu ispitati velike konstrukcije. U mnogim primjenama postoje zajednički zahtjevi za ultrazvučno ispitivanje kompozita koji se odnose poroznost, raslojavanje, onečišćenje stranim tijelima i nabiranje vlakana. Konvencionalne metode ultrazvučnog ispitivanja zahtijevaju korištenje jednostruke sonde ili više sondi. Ova tehnika ispitivanja temelji se na ultrazvučnim grupama pretvornika smještenih unutar zajedničkog kućišta. Pomicanje sonde se može izvoditi ručno ili se konstrukcija može ispitivati pomoću automatiziranog sustava za ispitivanje.

Primjena tehnike omogućuje slikovno prikazivanje u stvarnom vremenu, prijavljivanje udarnih oštećenja, dimenzioniranje poroznosti, raslojavanja i nabiranja vlakana. Navedeni su primjeri i studije raznih slučajeva kod raznih primjena u zrakoplovstvu uključujući ručna i automatizirana ispitivanja malih i velikih kompozitnih dijelova.

### 2.5.1. Uvod

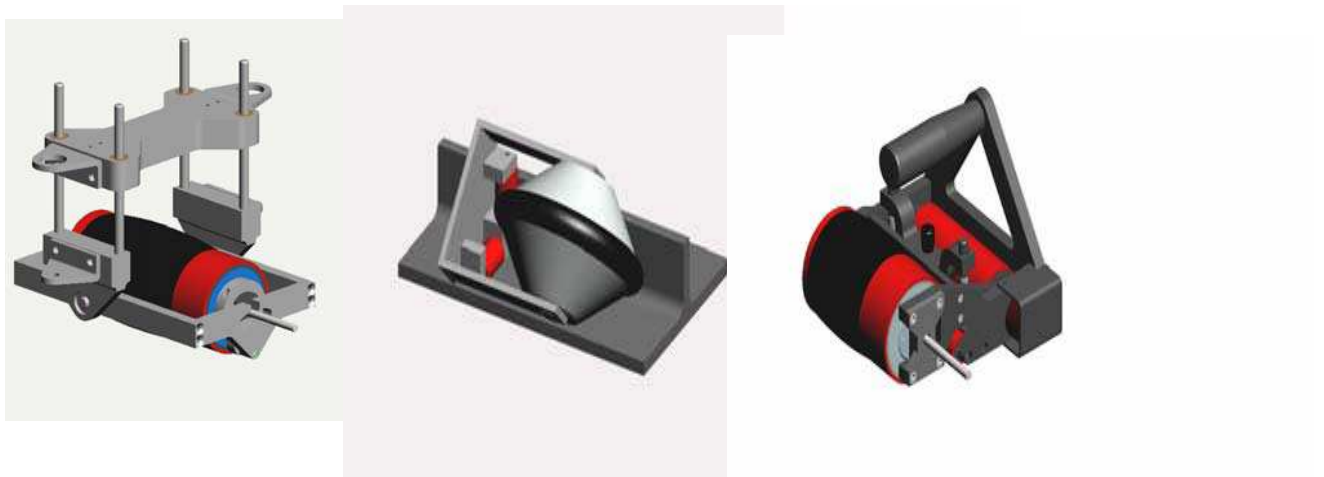
Posljednjih godina broj primjena PA ispitivanja se naglo povećao, česte su primjene za zavare i za otkrivanje pukotina. Većina primjena koristi sektorsko ispitivanje ili mrežne B-prikaze kako bi se omogućio slikovni prikaz nepravilnosti. Kako su se mnogi prenosivi sustavi razvijali za ograničena ispitivanja složeno oblikovanih dijelova ili za otkrivanje pukotina, bilo je manje primjena PA tehnike ispitivanja kod velikih zrakoplovnih dijelova, posebno kompozitnih. To je bilo djelomično zbog relativno sporog prikupljanja podataka koje se može postići prenosivom opremom (otprilike 20 do 50 B-prikaza po sekundi) i poteškoća u razmještanju PA senzora za prenosiva ispitivanja. NDT Solutions u suradnji s Airbus UK je razvio jedinstveni, brzi PA sustav za ispitivanje koji koristi 128 kanalni sustav za okidanje i prihvaćanje signala koji može stvoriti snopove iz 32 aktivna kanala. Taj sustav se poveže sa posebnim uređajem za prihvatanje podataka koji ima veliku brzinu prihvata podataka i sustav elektronički kontrolira oblikovanje snopa i prerađuje neobrađene ultrazvučne podatke kako bi se omogućili brzi B-prikazi i kako bi se brzo obradilo podatke C-prikaza. Ovisno o broju snopova koji su stvoreni i količini podataka, mogu se lako postići brzine B-prikaza između

100 do 300 puta u sekundi što omogućava brzo ispitivanje velikih dijelova vrlo visokom razlučivosti. Sustav koristi visokofrekvencijsku pokretnu sondu kako bi omogućio jednostavno ispitivanje dijelova za zrakoplove. Dijagram pokretanja sonde i stvaranje C-prikaza je prikazan sljedećom slikom.



Slika 26: Stvaranje C-prikaza sa grupom pretvornika smještenom u pokretnu sondu [6]

Pokretna sonda može se pomicati ručno kao što prikazuje slika ili se može pričvrstiti na nosač za automatizirano ispitivanje. Koriste se razne kombinacije veličina pokretnih sondi, dimenzija grupe pretvornika i frekvencija ovisno o primjenama. Priključna mehanika pomične sonde također se može modificirati kako bi se omogućilo lagano ispitivanje zakrivljenih dijelova kao što je oplata krila ili da se omogući ispitivanje rubova i skučenih dijelova kao što su npr. uzdužnice.

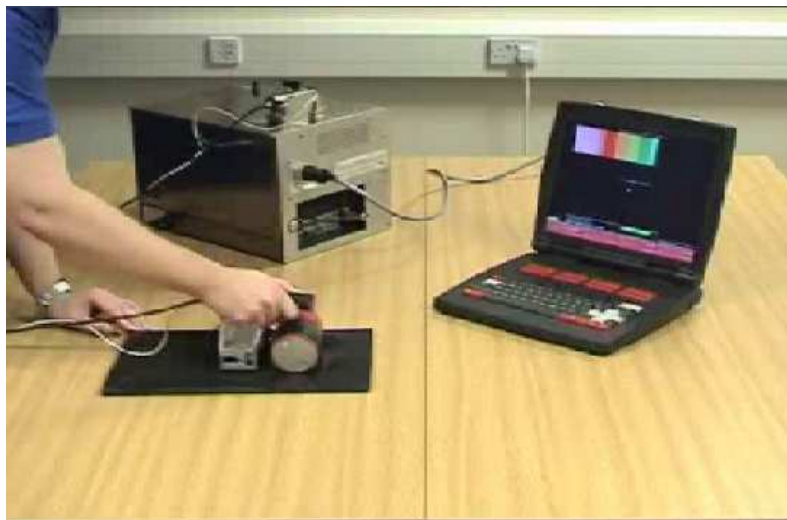


Slika 27: Prilagođene pokretne sonde razvijene za primjene u zrakoplovstvu [6]

U većini slučajeva pomična ultrazvučna sonda s grupom pretvornika zamjenjuje postojeća ispitivanja koja se temelje na jednoj sondi ili više njih. Kako bi se to postiglo mora se osigurati da se ultrazvučna grupa pretvornika i geometrija pomične sonde pažljivo odabere na taj način da su snopovi stvoreni od grupe pretvornika prikladni za određeno ispitivanje.

Modeliranje konačnim elementima se koristi kako bi se osiguralo da pokretna sonda stvara dobar kontaktni sloj između sonde i dijela koji se ispituje. Ovisno o primjeni moguće je "suho" spajanje pokretne sonde ali s druge strane u većini slučajeva zahtijeva se samo mala količina vodenog filma kako bi se osigurao prikladan kontakt.

Frekvencije grupe pretvornika od 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz i 10 MHz koriste se kod PA sonde za veliki broj ispitivanja metalnih i kompozitnih struktura. Sustav se može postaviti i u ručnu i konfiguraciju za automatizirano ispitivanje.



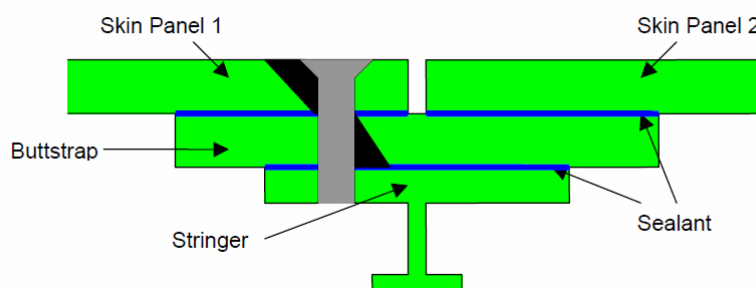
Slika 28: Ručno ispitivanje sustavom RapidScan [6]

Sljedeći odlomak pruža primjere primjena i karakterističnih rezultata ispitivanja sa ispitivanja zrakoplovnih dijelova.

### **2.5.2. Rezultati ispitivanja**

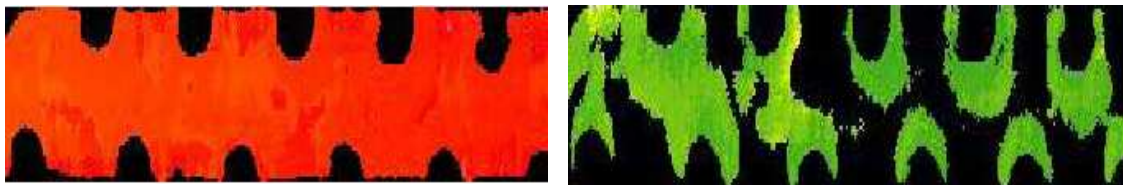
Sustav RapidScan [6] je originalno razvijen za ispitivanje strukture krila kako bi se postiglo osiguranje kvalitete proizvodnje i za otkrivanje pukotina oko rupa za pričvršćivanje kod testiranja tijekom službe. U ovim primjenama korištena je sonda široka 50 mm s frekvencijom od 10 MHz sa dvije konfiguracije: sonda s komprimiranim valom pod  $0^\circ$  za ocjenjivanje brtvljenja i

sonda s  $45^\circ$  posmičnim valom za otkrivanje pukotina oko pričvršćivača. Tipična zajednička konfiguracija je dana na sljedećoj slici.



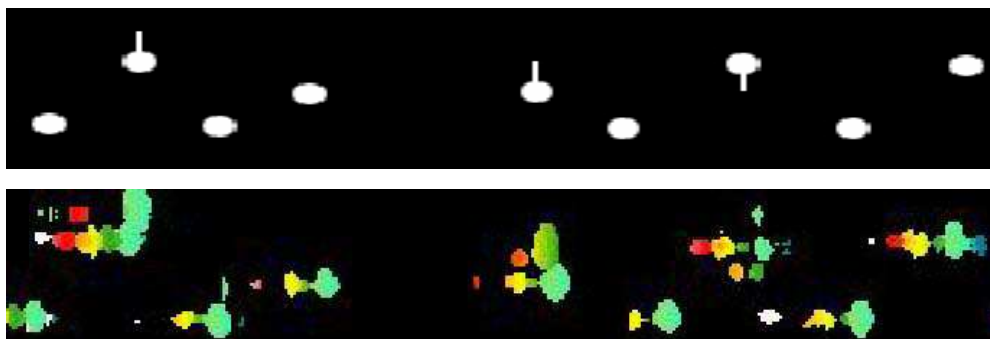
Slika 29: Tipična zajednička konfiguracija koja pokazuje smještaj sredstva za brtvljenje i pričvršćivača. Moguće lokacije pukotina su prikazane crnom bojom lijevo i desno od pričvršćivača [6]

Karakteristični rezultati ispitivanja testiranih dijelova koji pokazuju uspješno otkrivanje raslojavanja sredstva za brtvljenje dani su na sljedećoj slici. Napomena je da je prvi C-prikaz omogućio kontrolu spajanja dok je drugi C-prikaz pružio dijagram debljine sredstva za brtvljenje.



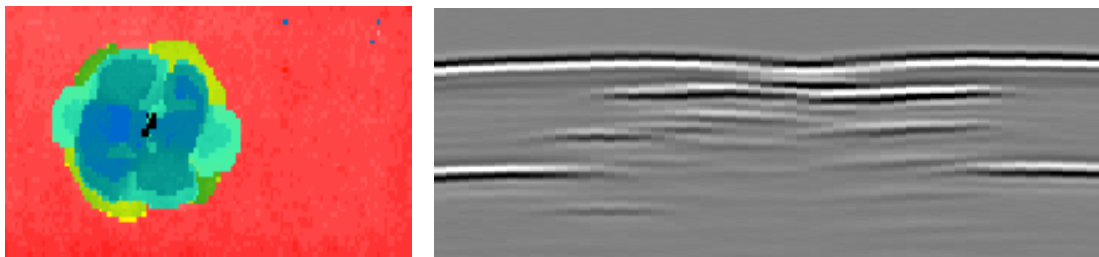
Slika 30: Ispitivanje pokazuje kontrolu spajanja i kontrolu povezanosti sredstva za brtvljenje [6]

Zbog velike brzine prihvata podataka RapidScan sustava potrebno je neko vrijeme da se kut posmičnog vala zakrene pri ispitivanju s nekoliko različitih kuteva kako bi se otkrile pukotine koje se ne mogu otkriti pod nekim kutom. Tipični rezultati ispitivanja dijelova koji pokazuju uspješno otkrivanje pukotina u prvom i u drugom sloju prikazani su sljedećom slikom.

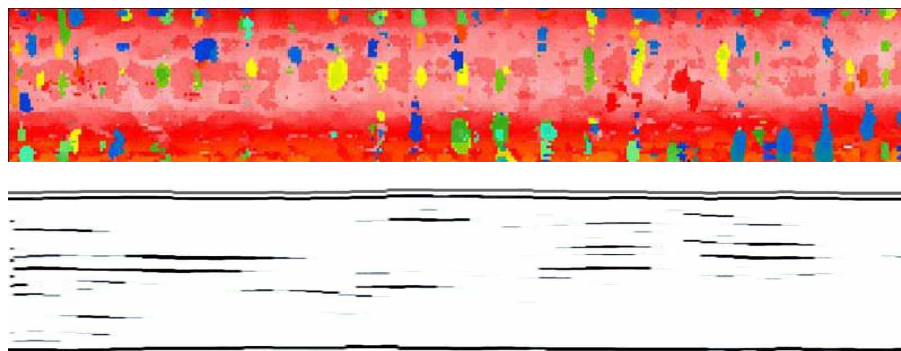


Slika 31: Brzo otkrivanje smještaja pukotina u prvom i u drugom sloju [6]

U posljednje vrijeme sustav RapidScan se navelike koristio za ispitivanje širokog spektra kompozitnih materijala za otkrivanje i ocjenjivanje udarnih oštećenja, pogrešaka u postavljanju vlakana i poroznosti. U ovim primjenama korištenje brzog B-prikaza ili naknadno procesuiranje podataka C-prikaza koristeći analizu B-prikaza omogućilo je vrlo važno strukturno oslikavanje kompozitnog materijala. Dva primjera ovoga dana su ispod gdje se koristi presjek B-prikaza da se nacрта razmještaj jedva vidljivih udarnih oštećenja te da se stvore slike poroznosti visoke rezolucije.

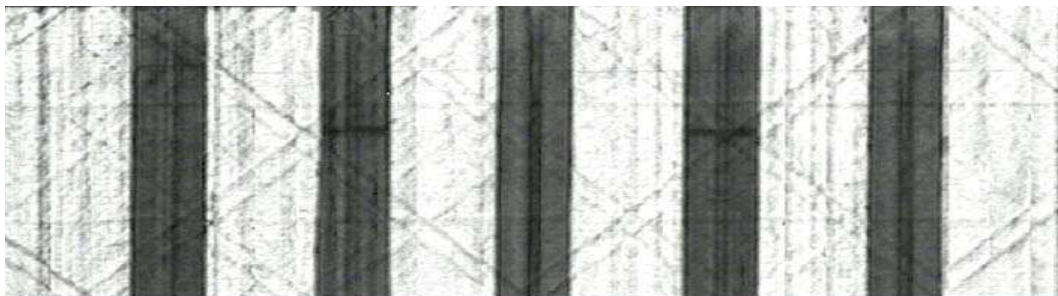


Slika 32: Prikaz gustoće udarnih oštećenja za 5 mm debelu oplatu s ugljičnim vlaknima na C-prikazu i presječni pogled B-prikaza kroz središnji prostor udara [6]



Slika 33: Slika poroznosti na C-prikazu i presječni B-prikaz poroznosti prikazuje dubinu i opseg poroznosti [6]

U gornjem primjeru RapidScan-ova pomična PA sonda korištena je kao ručni alat za ispitivanje kako bi se zamjenili A-prikazi dobiveni s jednom sondom. Sustav se također može uspješno povezati sa brojnim automatiziranim garniturama za ispitivanje kako bi se omogućilo ispitivanje velikih područja kompozitnih struktura. Kod ovih primjena visokokvalitetni C-prikaz se stvori u trenutku u odnosu na izvođenje sa jednokanalnim sustavima ispitivanja. Zbog savršene učinkovitosti spajanja sonde ova ispitivanja kvalitetom odgovaraju uobičajenim ispitivanjima s konvencionalnim uređajima. Sljedeća slika prikazuje rezultate ispitivanje oplata krila od kompozita s pojačanjima u obliku uzdužnica.



Slika 34: kompozitna oplata krila i osiguravajuće uzdužnice [6]

### 2.5.3. Razmatranje

Ručno korištenje RapidScan pokretne sonde uz dobivanje C-prikaza ima jasne prednosti u odnosu na konvencionalne ručne metode koje nam daju samo A-prikaze. U zrakoplovstvu za ispitivanja komponenti uzdužnica i učvršćenja uzdužnica često je moguće ispitati komponente u jednom prolazu, bez potrebe za glomaznim garniturama za ispitivanje što smanjuje vrijeme ispitivanja. Mogućnost potpunog prihvata valnog oblika omogućava neprekidno snimanje strukture što se može koristiti za naknadno ocjenjivanje ili naknadnu analizu strukture. Za velike površine korištenje brzih PA alata za ispitivanje može smanjiti zastoje u ispitivanju tijekom proizvodnje i korištenje pokretnih sondi koje slijede konturu može pomoći smanjenju složenosti sklopa za ispitivanje.

### 2.5.4. Zaključci

Predstavljen je novi sustav za ispitivanje koji koristi PA ultrazvučnu tehniku. Brzo prihvaćanje podataka omogućava brze C-prikaze u realnom vremenu i sposobnost stvaranja B-prikaza za velike zrakoplovne kompozitne strukture. Rezultati koji su predstavljeni jasno prikazuju prednosti visokorezolutnih slika B-prikaza za ispitivanje i analizu značajki kompozita kao što su udarna oštećenja i poroznost.

Specifičnost primjene višepretvorničke ultrazvučne tehnike ispitivanja kompozitnih struktura u odnosu na konvencionalnu tehniku odjeka je ta da konvencionalnom tehnikom kod koje je sonda i emitira ultrazvučne valove i prihvaća odjek, možemo dobiti npr. podatke o eventualnim pukotinama, raslojavanju, debljini materijala ali ne možemo dobiti prikaz cjelokupne unutarnje strukture materijala. Kod višepretvorničke tehnike u sondi imamo veliki broj samostalnih pretvornika od kojih svaki može odašiljati ultrazvučne valove ili prihvaćati odjek samostalno.

Korištenjem višepretvorničke tehnike dobijemo kompletan prikaz unutarnje strukture materijala i to na taj način da sondu nije potrebno pomicati već se ona postavi na jedno mjesto a cjelokupna struktura se ispita promjenom kuta ispitivanja što se vrši elektronički i to je jedna velika prednost a također je i samo ispitivanje znatno brže.

U praksi nam je često potrebno ispitivanje iz raznih smjerova i pod različitim kutovima. Često se susrećemo s problemom skućenog prostora ili ograničenog pristupa pa je teško smjestiti konvencionalne sonde na mjesto koje želimo ispitati. Kada bismo to i uspjeli učiniti opet se susrećemo s problemom da trebamo više prolaza tijekom ispitivanja, što znatno usporava i otežava ispitivanje. Iz toga razloga se konvencionalne sonde zamjenjuju PA sondama kod kojih se ulazni kut kontrolira elektronički preko samog ultrazvučnog PA

uređaja. Digitalno podešavanje kuta snopa se radi u vertikalnom i horizontalnom smjeru kako bi se on prilagodio geometriji dijela koji se ispituje. Tako npr. ulazni kut može biti od 0° do 70°. PA sonda kombinira funkcije nekoliko konvencionalnih sonda u jednom kućištu. Nema potrebe za korištenjem različitih klinova kao kod konvencionalnih sonda kako bi se dobio željeni ulazni kut.

Neke od prednosti korištenja ovih sonda su i: široki raspon i prilagođavanje ulaznih kuteva, odabiranje oblika vala, dobar omjer SNR, bolja rezolucija, kompaktan dizajn sonde, brže ispitivanje zbog jednog prolaza, vodonepropusna kućišta i priključci, mogućnost naknadnog pristupa i analize podataka...

## 2.6. Primjer primjene višepretvorničke tehnike u praksi

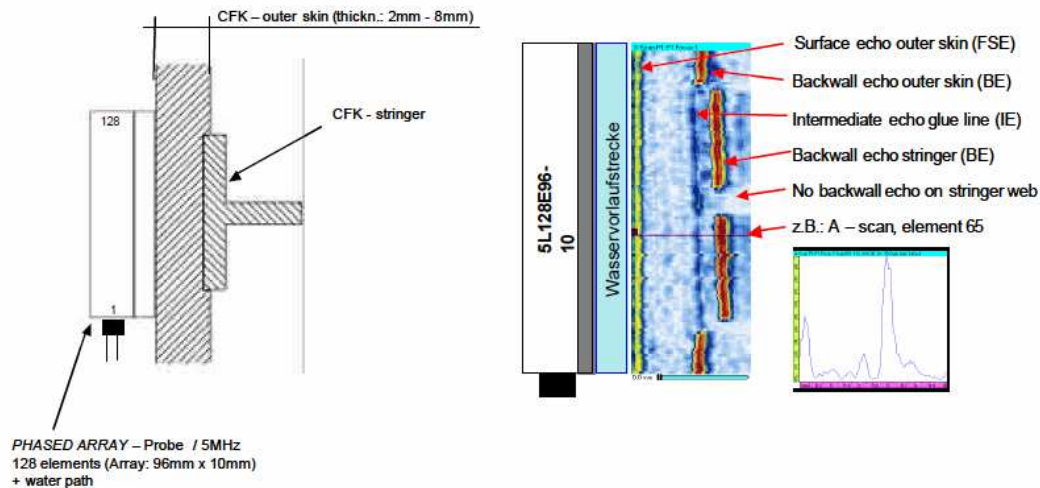
Kompozitni materijali se koriste sve više u proizvodnji zrakoplova. Najvažnije vrste kompozita su Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP), Glass Fibre Reinforced Plastics (GFRP) i metal-aluminijski laminati (npr. Glass Fibre Reinforced Aluminium GLARE). Karakteristični dijelovi napravljeni od CFRP su zakrilca, vertikalni i horizontalni dijelovi repa, središnje kutije krila, stražnje tlačne pregrade, rebra i uzdužnice. Postotak u masenom udjelu kompozita u modernim civilnim letjelicama kao što je npr. Airbus A380 je oko 25% i očekuje se daljnji porast tog postotka u letjelicama sljedeće generacije te da će glavni dijelovi strukture kao što su trup i krila biti izrađeni od kompozita. Kompozitni dijelovi zahtijevaju prikladne NDT metode za ispitivanje, a te metode se koriste i u proizvodnji i tijekom održavanja. Nepravilnosti koje se otkrivaju su raslojavanje, razgraničenja, poroznost i uključivanje stranih tijela. Tehnika koja se najčešće primjenjuje je ispitivanje ultrazvukom, bilo sondom s jednim pretvornikom ili linearnim višepretvorničkim sondama.

### 2.6.1. Ručno i automatizirano ultrazvučno ispitivanje

Ručno ispitivanje pomoću sonde s jednim pretvornikom je još uvijek najčešće korištena metoda za kompozitne dijelove malih i srednjih veličina. Ispitivači ocjenjuju A-prikaze kako bi otkrili pukotine. Veličine pukotina mjere se ručnim skeniranjem sondom u okolici maksimalnog odijeka.

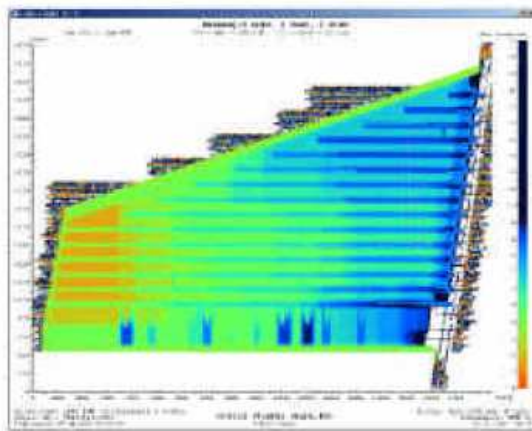
Posljednjih godina sve se više koriste višepretvornički sustavi za ispitivanje z letjelica. S ovim sustavima može se elektronički stvoriti valna fronta kakvu želimo. Samostalni pretvornici se pobuđuju s određenom zadržkom. Zbrajanje individualnih valnih fronti rezultira novom valnom frontom sa željenim svojstvima. PA tehnika se može koristiti da se zvučni snop elektronički zakrivi i usmjeri. Druga prednost u odnosu na konvencionalnu tehniku s jednim pretvornikom je mogućnost slikovnog prikaza (B-prikazi, C-prikazi, S-prikazi) u odnosu na samo A-prikaze kod konvencionalne tehnike, što pruža bolju interpretaciju signala unutar složenih struktura. Primjer PA ispitivanja osiguravajuće uzdužnice prikazan je slikom 35. Signali s različitih reflektirajućih površina mogu se jasno identificirati u B-prikazu (desni dio slike).





Slika 35: višepretvorničko ispitivanje spoja oplata i uzdužnice [7]

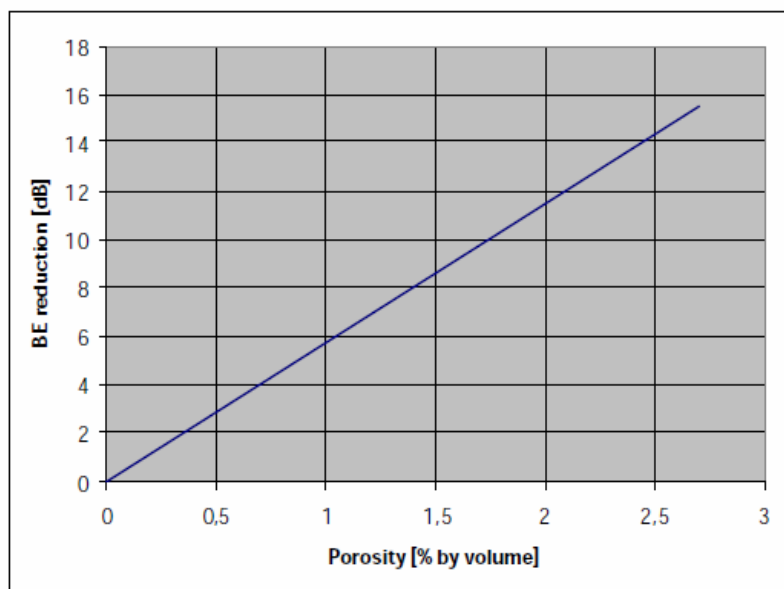
Veliki CFRP dijelovi ispituju automatizirano ili polu-automatizirano sa višepretvorničkim PA uređajima. Takvi uređaji sadrže nosač koji pomiče sondu preko površine dijela. Primjer s Airbus-a, gdje se radi s višepretvorničkim uređajem prikazuje slika 36. Sonda se sastoji od 96 zasebnih pretvornika. Najveća površina ispitivanja je 13m x 7m brzinom 100mm/s. Dio na slici je stražnja tlačna pregrada. U Airbus-u se višepretvornički uređaji koriste za ispitivanje vertikalnih i horizontalnih dijelova repa, stražnje tlačne pregrade, zakrilaca i drugih dugačkih ili velikih CFRP dijelova. Ocjenjivanje podataka potpomognuto je specijalnim software-skim alatima.



Slika 36: Airbus-ov višepretvornički PA uređaj i D-prikaz [7]

## 2.6.2. Mjerenje poroznosti

Poroznost u kompozitima može smanjiti krutost konstrukcije. Poroznost se stoga mora otkriti u proizvodnji. U Airbus Germany zahtjeva se da je dopuštena najveća poroznost 2.5% volumena. Ultrazvučna metoda ispitivanja je razvijena i kvalificirana da otkrije porozne zone u CFRP komponentama. U poroznim zonama često se odmah ne pojavljuje odjek, jer pore mogu raspršiti ulazni ultrazvučni signal u svim smjerovima. Metoda se zato temelji na mjerenju smanjivanja zaostalog odjeka zbog pora. Amplituda zaostalog odjeka se smanjuje ako je zvučni val smanjen zbog poroznosti. Može se pokazati da postoji dobra korelacija između smanjivanja zaostalog odjeka i volumena pora određenog mikrografskom analizom što prikazuje slika 38. Takvi korelacijski dijagrami se snime za sve vrste materijala i za razne kombinacije debljina koje se koriste u proizvodnji. Sličnosti ultrazvučnih karakteristika što se tiče poroznosti dokazane su odobrenim statističkim ispitivanjima provedenim na temelju velike količine podataka. Zbog ove sličnosti, mogu se povezati različiti tipovi materijala. Kao rezultat se dobiju jedinstvene granične vrijednosti smanjenja zaostalog odjeka za klasificiranje poroznosti veće od 2.5% po volumenu. Te granične vrijednosti ovise samo o debljini i one su presudne za sve epoksi smole ojačane ugljičnim vlaknima u jednosmjernom izrađivanju, tvorničkom izrađivanju ili mješovitom izrađivanju.



Slika 37: Ultrazvučno smanjenje zaostalog odjeka u odnosu na volumensku poroznost [7]

### 3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

U laboratoriju za nerazorna ispitivanja PA tehnikom ispitivani su kompozitni materijali. Kompozitne uzorke ispitivali smo GE Phasor XS uređajem koji ima sondu koja sadrži 16 elemenata a radi na frekvenciji 4 MHz s korakom između elemenata od 0.5 mm (tzv. "pitch"). U slučaju korištenja sonde manje frekvencije, npr. 2 MHz imamo veću valnu duljinu ultrazvučnih valova i zvuk lakše prolazi kroz materijal. Brzinu u materijalu pretpostavili smo da je 2200 m/s a raspon kuteva je bio od  $-20^\circ$  do  $+20^\circ$ . Kod ispitivanja je potrebno podesiti još neke parametre poput prigušenja i žarišne udaljenosti. Za evaluaciju rezultata potrebni su nam referentni blokovi kako bismo mogli uspoređivati rezultate dobivene ispitivanjem.



Slika 38: PA oprema i ispitivani uzorci od kompozita

Prvi uzorak je nosač vrata za inverziju potiska (blocker door) na motoru Rolls Royce Trent koji pokreće Airbus A319/320, materijali unutra su ugljična vlakna unutar epoksidne matrice u formi preprega koji su tretirani u autoklavu u kombinaciji s metalnim šesterokutnim saćem. Sitni provrti u uzorku su izbušeni u svrhu smanjenja buke a cijeli komad naknadno je obrađen na mjestima gdje dolaze odgovarajući prihvatni vijci. Ispitivana su mjesta spajanja tog dijela s ostalim dijelovima strukture.

Drugi dio je također dio stvarne avionske konstrukcije. Radi se o jednosmjerenim slojevima pod različitim kutevima slaganja a materijal je građen od ugljičnih i staklenih vlakana s epoksidnom smolom a između slojeva je i tanka bakrena mrežica koja služi za smanjenje osjetljivosti konstrukcije u slučaju udara groma. Ovdje su ispitivane dvije zone različite debljine te su kod oba materijala pronađene određene nepravilnosti tj. na odgovarajućim prikazima (S-prikaz i B-prikaz) imamo skokove amplituda u pojedinim zonama što upućuje na to da imamo raslojavanje unutar materijala ili neke druge nepravilnosti.



Slika 39: PA uređaj za ispitivanje i odgovarajući A-prikaz i S-prikaz

Na slici vidimo uređaj za ispitivanje i zajednički A-prikaz i sektorski S-prikaz. Vidimo odjek od ukupne debljine te vidimo promjene amplituda signala unutar tog područja. Ako imamo velike promjene amplituda između prvog i zadnjeg sloja materijala (ukupne debljine) to upućuje da u materijalu imamo nepravilnosti koje mogu biti npr. oštećenja ili raslojavanje.



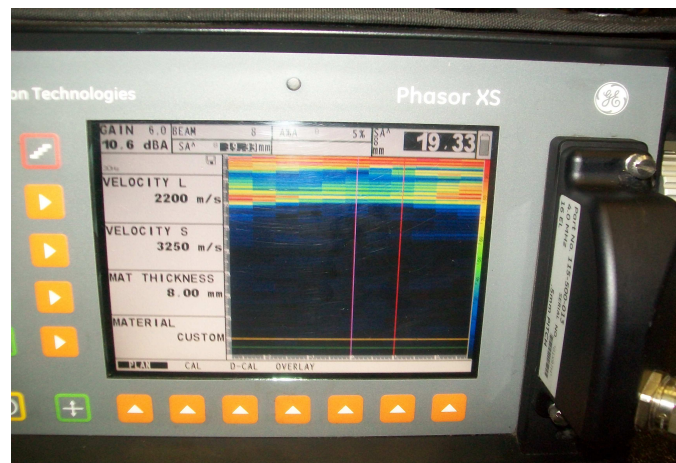
*Slika 40: Ispitivanje s enkoderom i stvaranje B-prikaza*

Na B-prikazu se pomoću amplitude može odrediti i put. B-prikazi dobiju se pomoću S-prikaza i ako je B-prikaz ujednačen (nema velikih skokova amplitude) u materijalu se ništa ne mjenja, dakle može se reći da nema nepravilnosti. Promjena amplitude znači raslojavanje ili općenito neke pogreške u materijalu. Ako se uz sondu tijekom ispitivanja koristi i enkoder tada pomoću njega možemo odrediti točne pozicije eventualnih grešaka.



Slika 41: Linearno ispitivanje i stvaranje linearnog B-prikaza

Linearno ispitivanje je kada se svi elementi sonde, u ovom slučaju 16 njih, okidaju jedan za drugim. Linearni prikaz nam daje slične prikaze koji se dobiju konvencionalnom ultrazvučnom metodom, međutim razlika je što pomoću PA tehnike imamo i linearne B-prikaze dok konvencionalnom metodom dobijemo samo A-prikaze koji su na neki način teži za interpretaciju od B-prikaza.



Slika 42: Karakteristični linearni B-prikaz

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je višepretvornička tehnika ultrazvučnog ispitivanja avionskih konstrukcija, komercijalnog naziva "Phased Array" uz poseban osvrt na primjenu te tehnike na kompozitne materijale u zrakoplovnim strukturama. Ova tehnika u odnosu na konvencionalnu metodu ispitivanja ultrazvukom ima brojne prednosti od kojih su najvažnije poboljšani slikovni prikaz podataka (A- prikaz, B- prikaz, S- prikaz i dvije vrste C- prikaza), fleksibilnost sustava, mogućnost upravljanja i usmjeravanja snopa, kontrola žarišne udaljenosti, kontrola širine snopa, povećana brzina ispitivanja i razlučivost te mnoge druge.

Eventualni nedostaci su veća cijena opreme i nužna certifikacija osoba koje izvode ispitivanje.

Zbog navedenih prednosti primjena ove tehnike ispitivanja u području zrakoplovstva, bilo tijekom proizvodnje ili tijekom održavanja, sve je češća te se koristi i kod metalnih i kod kompozitnih dijelova.

Neke od karakterističnih primjena PA tehnike su ispitivanje stajnog trapa zrakoplova, ispitivanje trupa zrakoplova gdje se ispituju urezana oštećenja nastala udarcima oštrim alatima, ispitivanje odljevaka od titana od kojih su kod nekih letjelica izrađeni npr. nosači motora ili pak cijeli okviri, ispitivanje ravnih panela od kompozitnih materijala, rješavanje problema korozije na letjelicama, ispitivanja zavora, mjerenje debljine.

Kod ispitivanja kompozitnih uzoraka PA uređajem dobijemo karakteristične B-prikaze i S-prikaze koje ne možemo dobiti konvencionalnim ultrazvukom. Ako na prikazima postoje skokovi amplituda koji su na prikazima predstavljeni različitim paletama boja, to upućuje na moguće nepravilnosti u materijalu koje mogu biti npr. određene pukotine ili raslojavanje unutar materijala. Za evaluaciju rezultata ispitivanja potrebni su referentni blokovi.

Ispitivanja se mogu izvoditi ručno ili automatizirano, uz pomoć enkodera ona se kodiraju i dimenzioniranje nepravilnosti, pozicioniranje i naknadna analiza rezultata ispitivanja može se ostvariti naknadno.

PA tehnika ispitivanja je napredna tehnika ispitivanja ultrazvukom koja se sve više koristi kod ispitivanja u zrakoplovstvu zbog brojnih prednosti u odnosu na ispitivanje konvencionalnom ultrazvučnom metodom.

## 5. LITERATURA

- [1] Basic Concepts of Phased Array Ultrasonic Technology, preuzeto s <http://techonline.com/learning/techpaper/196802298>
- [2] R/D Tech Guideline: Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications ; preuzeto s [http://www.lcndt.net/lcndt\\_uppdf/200811414423.pdf](http://www.lcndt.net/lcndt_uppdf/200811414423.pdf)
- [3] Inspection Of Landing Gear; <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-application/183-id.209715225.html>; preuzeto dana 26.10.2009.
- [4] Scribe Marks Inspection with No Paint Removal; <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-application/183-id.209715272.html>; preuzeto dana 5.11.2009.
- [5] Jason HABERMEHL, Andre LAMARRE: Ultrasonic Phased Array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing; preuzeto s <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/116.pdf>, dana 12.11.2009.
- [6] R. J. Freemantle, N. Hankinson and C. J. Brotherhood: RAPID PHASED ARRAY ULTRASONIC IMAGING OF LARGE AREA COMPOSITE AEROSPACE STRUCTURES; preuzeto s [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/aerospace/551\\_freemantle.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/aerospace/551_freemantle.pdf), dana 2.12.2009.
- [7] Ulf Schnars, Rudolf Henrich: Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry; preuzeto s <http://www.ndt.net/article/cdcm2006/papers/schnars.pdf>, dana 3.12. 2009.
- [8] Josip Milošević; Englesko-hrvatski aeronautički rječnik; Zagreb: FS, 1998.