

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

TAUTVYDAS FYLERIS

**ULTRAGARSINIO METODO SUDĖTINGOS GEOMETRIJOS
OBJEKTAMS TIRTI SUKŪRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)

Kaunas, 2020

Disertacija rengta 2014–2019 metais Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Elena JASIŪNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai Elektros ir elektronikos inžinerija, T 001)

Redagavo: Aurelija Gražina Rukšaitė (leidykla „Technologija“)

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (KTU, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001) – **pirmininkas**;

prof. dr. Genadijus KULVIETIS (VGTU, mechanikos inžinerija, informatikos inžinerija – T 007);

prof. habil. dr. Arūnas LUKOŠEVIČIUS (KTU, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001);

prof. dr. Serge dos SANTOS (INSA Val de Loire centras, technikos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001);

prof. dr. Darius VIRŽONIS (KTU, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001).

Disertacija bus ginama viešame elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2020 m. rugpjūčio 31 d. 11 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. +370 37 30 00 42; faks. +370 37 32 41 44; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2020 m. liepos 31 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

SANTRUMPOS

ATFM	Adaptive Total Focusing Method
B-scan	Brightness amplitude scan or stacked line-by-line multiple A-scans
CAD	Computer Aided Model
CUDA	A parallel computing platform and application programming interface model created by Nvidia Corporation
DAS	Delay And Sum
GPGPU	General-Purpose computing on Graphics Processing Unit
MV	Minimum Variance
PWI	Plane Wave Imaging
SAUL	Surface Adaptive Ultrasound
TFM	Total Focusing Method

ĮVADAS

Tyrimo aktualumas

Įvairiose gamybos, atominės energetikos, statybos srityse reikia atlikti įvairių struktūrinių komponentų defektoskopiją, norint įsitikinti, ar nėra vidinių pažeidimų, dėl kurių struktūra gali katastrofiškai neatlikti savo paskirties [1]–[3]. Tam gali būti panaudojami tiek neardomieji metodai, tokie kaip lazerio [4]–[6], rentgeno spindulių [7], [8], ultragarso [5], [9]–[12], ar netgi ardomieji metodai [13]–[17], paimant mėginį iš komponento. Kiekvienas metodas turi savo stiprybių ir silpnybių, ir jų pasirinkimą nulemia turimos galimybės darbinėje aplinkoje. Pavyzdžiui, jeigu reikia ištirti didelę struktūrą, tokią kaip tiltas, tai rentgeno aparatas dėl techninių galimybių nebus praktiškas sprendimas, todėl tyrimams vietoje (*in-situ*) reikalinga nešiojamoji įranga. Vienas iš tokių sprendimų yra naudoti ultragarsinį defektoskopą, kuris su šiuolaikinių technologijų minimizavimu įgalina sukurti lengvą nešiojamąjį įrenginį.

Naudojantis ultragarso defektoskopu, kuris yra plačiai taikomas metodas [10], [18], [19], tiek neardomoji, tiek ir nejonizuojanti spinduliuotė turi gerą skvarbą į medžiagą, o, naudojantis fazuota gardelė, galima atlikti elektroninį pasukimą, skenavimą.

Į ultragarsinį defektų detektavimą galima žiūrėti kaip į aidų interpretavimo procesą [5], kai yra atspindžiai arba kai jų visai nėra. Tačiau, norint žinoti defekto poziciją, yra reikalingas bangos sklidimo akustinis modelis, kuris yra sudėtingas procesas, nes atsiranda bangų difrakcija, refrakcija, dispersija, modos pasikeitimas, medžiagos struktūrinis triukšmas ir dviejų aplinkų poveikis, kai riba tarp bandinio ir gardelės aplinkos nėra linija. Todėl analitiniai bangos sklidimo sprendiniai nėra visada įmanomi. Ir tai yra viena iš tyrimų ultragarsu problemų, kur nėra atsakyta į visus klausimus, ir tam reikalingi tyrimai.

Viena iš pagrindinių tyrimų ultragarsu dalių yra signalų generavimas ir priėmimas [20], [21]. Pavyzdžiui, ultragarsinis siųstuvas ir imtuvas gali būti fiziškai nutolusiose taškuose (*angl. pitch-catch* režimas) arba naudojamas tas pats įrenginys (*angl. pulse-echo*). O signalas gali būti ne tik harmoninis Gauso [22]–[24] impulsas, bet ir čirpo (*angl. chirp*) [25]–[27] signalas ar sudėtinis moduluotas impulsas [28]–[32], ar vienas iš populiarių būdų – Barkerio kodų naudojimas [33], ar fazuotų gardelių atveju – signalų kombinacijų naudojimas. Tačiau iš praktinės pusės dėl įrangos sudėtingumo dažniausiai apsiribojama Gauso impulsu [22] (aparaturoje Gekko M2M [34], Dasel SITAU [35], Omniscan MX2 [36]).

Norint gauti gerą defekto rekonstrukciją, reikalingas tikslus akustinio kelio modelis. Kai bandinys su nereguliariumi paviršiumi, skaičiuojant analitiškai, kelias gali būti gaunamas tik mažam segmentui ar dėl esančio netolygumo, skaičiuojant pagal Snello taisyklę, matematiškai gaunami keli keliai. Dar vienas Snello taisyklės trūkumas yra tas, kad kelias apskaičiuojamas tiksliai matematinio

spindulio pločiui, ignoruojant dispersiją. Metodai, kurie remiasi Snello taisykle, yra naudojami praktikoje, kai objekto ribos išlinkimas yra pakankamai minimalus ir susidariusi paklaida nedaro įtakos rezultatams [37]–[42]. Bet jei bangos modos pasikeitimo ir refrakcijos efektai daro didelį poveikį objekto neardomajam tyrimui, galima apsiriboti ties klausimu, ar yra defektų, ar jų nėra. Tokie automatinio fokusavimo metodai yra pakankamai ištyrinėti [43]–[45], netgi daugeliu atvejų užtenka panaudoti tik B-tipo vaizdo rezultatus. Deja, iš kitos pusės, automatiniai fokusavimo metodai, kurie atsako į defekto egzistavimo klausimą, tokie kaip laiko atgręžimo,[46]–[49] (angl. *Time reverse*) arba minimalios variacijos [41], [50]–[52], sutelks energiją į reflektorių, bet be jokios fizinės pozicijos informacijos.

Norint sukurti universalų inspekcijos metodą, geriausia naudoti fazuotas gardeles [37], [43], [44], [53]. kadangi pirmiausia pati gardelė gali būti fiziškai lanksti ir prisitaikyti prie bandinio formos [54]–[56]. Tačiau, kaip minėta, atsiranda sudėtingas uždavinys surasti defekto poziciją (gardelė išlenkta, bet apie išlinkį informacija dažniausia neperduodama). Kita vertus, į fokusavimą galima žiūrėti kaip į energijos sutelkimą į norimą zoną, o tai dėl gebėjimo valdyti individualius daviklius suteikia fazuotai gardelei lankstumą kuriant virtualią akustinę linzę. Taip galimas virtualus fokusavimas ir elektroninio spindulio valdymo [57] pritaikymas įvairių formų objektams (angl. *electronic steering*), o gaunami rezultatai yra šiek tiek žemesnės kokybės nei fizinių įrenginių.

Naudojantis fazuotomis gardelėmis teigiama yra tai, kad galima naudoti įvairius skaitinius metodus signalams interpretuoti. Aišku, reikia įvertinti fizines savybes, kad ne visur gali gautis atspindys. O, apdorojant signalus neturint jokios papildomos informacijos, galima daryti prielaidą, kad nuo kiekvieno dominančio regiono (arba taško) yra sferinis vienodos energijos atspindys [39], [58]–[60]. Toks bangos sklidimo matematinis supaprastinimas gali būti išvestas iš banginių lygčių ir literatūroje dažniausiai sutinkamas kaip sprogstančiojo reflektoriaus modelis [46], [51], [61]–[63] (angl. *exploding reflector model*). Toks modelis puikiai veikia, kai yra viena aplinka ir bangos sklidimo kelias turi tik vieną sprendinį. Tokie praktiniai sprendiniai gali būti apskaičiuoti dažnių erdvėje ar naudojantis statistiniais metodais, kurie kartais sumažina algoritmų apdorojimo laiką. Tačiau tokie metodai pradeda generuoti neteisingus rezultatus, kai atspindžiai nuo reflektorių yra koreliuoti (t. y. negalima atskirti, ar atspindys nuo vieno defekto, ar nuo kelių): ar tai atspindžiai nuo objekto sienų, ar tai *multi-path* dalies atspindžiai. Kitaip tariant, nuo reflektoriaus iki sensoriaus yra daug akustinių kelių. Ši koreliacija yra dar aštresnė, kai atsiranda akustinio kelio iškraipymas dėl dviejų medžiagų ribos (kai riba nėra plokščia). Vienas iš tokių koreliacijos sprendimo būdų yra skaičiavimams naudoti stipriausius signalus, atmetant visus kitus, tačiau ne visada įmanoma patikimai atskirti signalus [64], [65].

Defektų klausimas, kai yra dvi aplinkos (jungiamoji aplinka, pvz., vanduo ir objektas), nėra išspręstas, kai objektai su nereguliais paviršiais. Kaip jau minėta, vienas iš galimų sprendimų yra apskaičiuoti akustinius kelius, kurie yra skaičiuojami tarp objekto paviršiaus ir defekto, taip, kaip daroma taikant adaptyvų fokusavimo metodą (angl. ATFM) [66]. Kitokie sprendimo būdai galimi sukuriant virtualią gardelę iš „uždedant“ ant objekto [30], [37], [53], [67], [68]. Šie virtualios gardelės metodai dažniausiai naudojami, kai objektas yra sąlyginai mažai išlenktas ir akustiniai efektai dėl refrakcijos, modos nenustelbia rezultatų interpretacijos. Jei šie efektai yra dideli, juos galima kompensuoti naudojantis fazuotą gardelę su dideliu elementų kiekiu.

Dar galima paminėti, kad defektoskopija, naudojantis tiksliai fazuota gardele ir turint tiksliai garso sklaidimo informaciją, turi pranašumą, nes yra greita (nereikia įvesti informacijos apie objekto kompiuterinį modelį ar atlikti kalibravimo). Tai yra pranašumas, kai reikia atlikti defektoskopiją vietoje (*in-situ*). Iš komercinių pasiūlymų galima paminėti, kad jie dažniausiai savo metodus taiko objektams, kai išlenkimas yra sąlyginai mažas, palyginti su akustinės bangos ilgiu.

Mokslinė, technologinė problema ir darbo hipotezė

Naudojant aukšto dažnio imersines ultragarsines fazuotas gardeles (kurių centrinis dažnis yra nuo 1 MHz iki 20 MHz), galima pasiekti 1 mm defektų pozicijos nustatymo neapibrėžtį, kai tiriami objektai, kurių paviršius nėra plokščias.

Tikslas ir uždaviniai

Šio tyrimo **tikslas** – sukurti ultragarsinį metodą sudėtingos geometrijos objektams tirti, naudojant ultragarsines fazuotas gardeles, kai turima informacija yra tiksliai garso greitis ir akustinį kelią yra labai sudėtinga ar neįmanoma išskaičiuoti tiesiogiai.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti ultragarsinius metodus, skirtus defektams aptikti objektuose su sudėtingos geometrijos paviršiais.
2. Teoriškai sukurti ir ištyrinėti metodą, skirtą nereguliesiems paviršiams atkurti.
3. Teoriškai sukurti ir ištyrinėti vidinės struktūros atkūrimo metodą, kai nereguliojo paviršiaus informacija gaunama iš prieš tai einančio uždavinio.
4. Atlikti pasiūlyto metodo skaitinę analizę.
5. Atlikti pasiūlyto metodo praktinius eksperimentus..

Mokslinis naujumas

Šiame darbe siūloma nauja objektų su neregulariais paviršiais patikrinimo metodika, pagal kurią sukurtas algoritmas automatiškai prisitaiko prie objekto paviršiaus morfologijos, naudojant fokusuotus ultragarsinius duomenis iš automatinio aplinkos zondavimo. Siūlomi metodai atkuria paviršių tiesiai iš signalų. Surinkus paviršiaus morfologijos informaciją, naudojant siūlomą algoritmą, rekonstruojama vidinė objekto struktūra.

Praktinė darbo vertė

Sukurti algoritmai ir pasiūlyta metodika leidžia atlikti patikrinimus pramonėje nustatant defektų vietą, kai dominančio objekto paviršius yra nereguliarusis ir nėra tikslaus tiriamo objekto kompiuterio modelio.

Tyrimų rezultatų aprobavimas

Disertacijos rezultatai buvo publikuoti dviejose publikacijose: du straipsniai buvo publikuoti periodiniuose užsienio žurnaluose, nurodytuose „Thomson Reuters Web Science“ pagrindinio sąrašo žurnaluose. Rezultatai taip pat buvo pristatyti dviejose tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Disertacijos struktūra

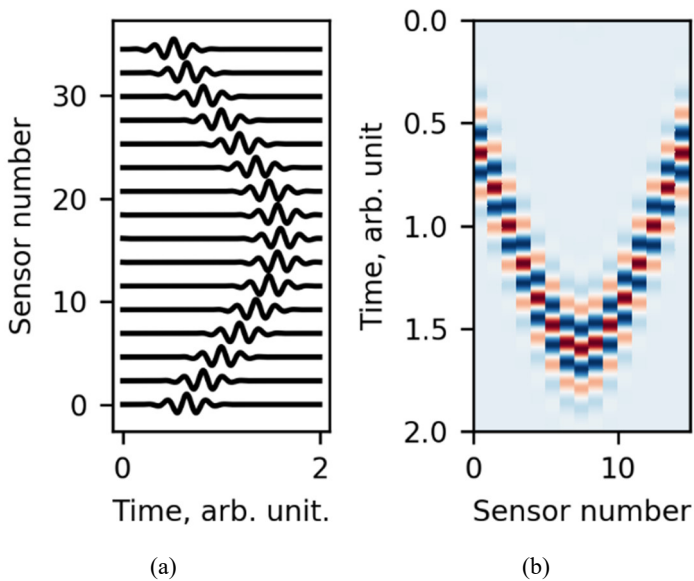
Darbą sudaro įvadas, penki skyriai, bendros išvados, literatūros sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas. Disertacijos skyriai yra išdėstyti taip:

1. Pirmame skyriuje yra aprašyti ultragarsiniai metodai, skirti defektoskopijai, apžvelgti jų privalumai ir trūkumai tiek defektoskopijos prasme, tiek ir įgyvendinimo sudėtingumo prasme.
2. Antrame skyriuje aptariama siūloma paviršiaus morfologijos atkūrimo metodika. Aptariami du atvejai – kai objektas yra sudarytas iš plokščių segmentų ir kai yra bet kokios formos.
3. Trečiame skyriuje pateikta sudėtingos geometrijos objektų vidinės struktūros atkūrimo metodika.
4. Ketvirtame skyriuje pateiktas skaitinis siūlomos metodikos įvertinimas. Modelio tikslumas yra įvertintas naudojant skaitinius eksperimentus.
5. Penktame skyriuje pateikti eksperimentinio tyrimo rezultatai, naudojant įvairių formų bandinius. Įvertintos siūlomos metodikos.

Bendra disertacijos apimtis – 103 puslapiai. Darbe pateiktas 31 paveikslėlis, 12 lentelių, 96 formulės ir 250 bibliografinės nuorodos.

1. ULTRAGARSINĖ DEFEKTOSKOPIJA NAUDOJANTIS FAZUOTOMIS GARDELĖMIS

Ultragarsinė defektoskopija naudojantis fazuotomis gardelėmis pasidarė įmanoma, kai atsirado pakankamai galingi signalų apdorojimo procesoriai. Nors santykinai nesudėtingus signalo apdorojimo algoritmus galima įgyvendinti neturint ypač didelių skaičiavimų resursų [69], (pvz., koherenti akustinio kelio sumavimas [70], [71], koreliacijos skaičiavimas [72]), netgi paprasčiausiais atvejais užtenka oscilografo ekrano, tačiau fazuotos gardelės vaizdavimas su didesniu elementų skaičiumi be grafinio vaizdavimo yra keblus:



1.1 pav. Fazuotos gardelės atspindžio pavyzdys: (a) – laiko amplitudės trasavimas (A-scan) ir šviesumo amplitudės vaizdas (B-scan)

Pavyzdžiui, netgi turint gana nedidelio elementų kiekio gardelę (pvz., 16 elementų), naudojantis tikrai osciloskopo ekranu, yra sudėtinga interpretuoti signalus (1.1 pav., a) ir jau yra daug aiškiau naudojantis B-scan informacija (1.1 pav., b) ir tuo pačiu metu yra daugiau vizualios informacijos.

Naudojant analoginę aparatūrą, turint ne vieną aktyvų elementą, fazuotos gardelės atveju galima atlikti aktyvų emisijos valdymą (angl. *electronic steering*) ir taip atlikti dinaminę gardelės pasukimo fokusavimą, prarandant nedidelę signalo energijos dalį.

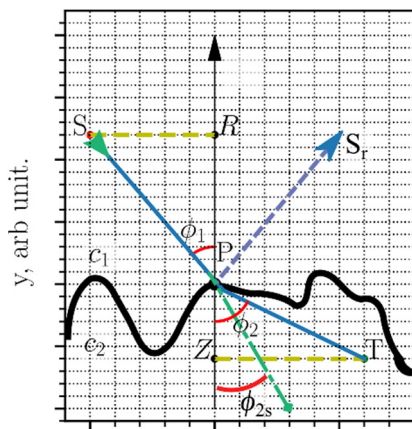
Kiekvienas fiziškai fazuotos gardelės elementas turi savo fizines ribas (kaip fokusas, *sidelobes*) ir gali būti tyrinėjimas kaip vieno elemento daviklis, tačiau, taikant skaičiuojamuosius metodus, šiuos trūkumus galima kompensuoti:

Papildomai galima ne tik elektroniskai valdyti gardelę, bet ir generuoti moduluotą signalą, kuriuo galima pagerinti skvarbą į objektą ar įgalinti paprastesnį imtuvą. Apskritai signalus galima išskirti į tris grupes:

- Čirpo (angl. *chirp*) moduliacija [25], [27], [73] (dažninis valdymas): kai siuntimo metu signalo centrinis dažnis didėja ar mažėja, priklausomai nuo laiko, o priėmimo metu apdorojamas su suderintais filtrais (angl. *matched filters*). Pagrindinis privalumas yra tai, kad kintamasis dažnis dėl nelinejinių efektų turi didesnių matomų požymių ultragarsinėje aplinkoje, bet šiai moduliacijai yra kritiška valdyti šoninės skilties (angl. *side-lobes*) triukšmą, kurio SNR turi būti žemesnis nei pagrindinio vaizdo.
- Dvejetainiu kodu moduluoti signalai [26], [30], [74], [75]: pagrindinis trūkumas yra mažesnė skiriamoji geba, bet, iš kitos pusės, atspindėjusio signalo nuo reflektoriaus SNR yra didesnis. Tiek signalų siuntimo, tiek priėmimo pagrindinė idėja panaši, kaip ir čirpo (angl. *chirp*) moduliacijos atveju, pvz., naudojantis Golay ar Barkerio kodais [26], [74], priimant galima naudoti suderintą filtrą. O Hadamardo sekų [30], [76]–[78] atveju naudojami matricos inversijos veiksmai.
- Gardelės harmoninė moduliacija [22], [23], [73], [79]: tai praktikoje dažniausiai naudojama moduliacija (sugeneravus aukštos įtampos elektrinį impulsą, pjezo elementas virpa savo harmoniniu dažniu), nes, įvertinant reikalingą grandinių sudėtingumą, kiekvieno elemento, valdančiai grandiniai, harmoninis impulso generavimo režimas yra nesudėtinga elektroninė grandinė su kiek mažesniu praktiniu SNR.

1.1. Bangos sklidimas keliose terpėse

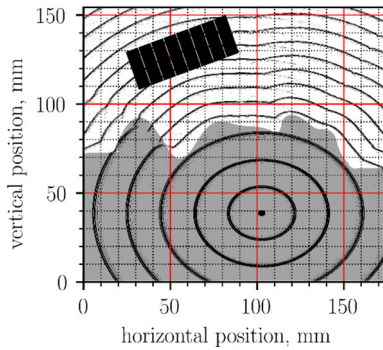
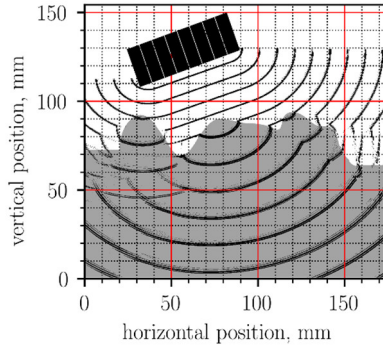
Bangos sklidimas vieningoje aplinkoje ir jos atvirkštinis sprendinys gali būti pusiau analitiškai apskaičiuotas iš diferencialinės bangos lygties. Tačiau toks sprendinys pasidaro sunkiai analitiškai išsprendžiamas, kai atsiranda keletas aplinkų su skirtingais akustiniais greičiais ir dar apsunkina tai, kad yra nereguliarūs paviršius, nors ir galima užrašyti Snello taisyklę nereguliariam paviršiui [80]:



x, arb unit.

1.2 pav. Snello taisyklės pavyzdys, kai spinduliuojama iš taško S , per ribą (stora linija) P , o suskaičiuotas akustinis kampas išilginiai bangai T . Snello taisyklė išilginei bangai gali būti išreikšta $\sin(\varphi_1)/\sin(\varphi_2) = c_1/c_2$ (SRP ir ZPT trikampiai). Sr – nuo paviršiaus atsispindėjusi banga, φ_{2s} – medžiagoje susidariusi skersinė banga

Pagal Snello taisyklę galima tiesiogiai apskaičiuoti kampus ir sudėtingos formos objektų (galima nereguliarųjį paviršių sukomentuoti ir kiekvienam segmentui atskirai ieškoti Snello taisyklės). Tačiau tai yra keblu dėl to, kad gali būti keletas kampų su teisingais algebriniais sprendimais, nors šie keliai fokusavimo atveju gali duoti pakankamai gerų rezultatų. Jie nėra teisingas sprendinys, nes nėra įvertinamas bangos dispersijos efektas, kuris turi didelę įtaką atspindžiams:



(a)

(b)

1.3 pav. Skaitinio akustinio kelio modeliavimo pavyzdys, naudojant

plokštumos bangos (angl. *plane wave*) siuntimą (atvaizduojami akustinės bangos frontai slėgio ir išilginei bangai): (a) – plokštumos banga (angl. *plane wave*) siunčiant iš daviklio, (b) – atspindys taškinio reflektoriaus atveju. Balta zona yra akustinė vandens aplinka $c_1 = 1500$ m/s, tamsesnė zona yra medžiaga $c_2 = 3000$ m/s

Atliekant skaitinį eksperimentą, įvertinus tiek gardelės, tiek dispersijos fizinį dydį, galima pamatyti, kad akustinis bangos sklidimas yra sudėtingas reiškinys ir didelę dalį akustinės terpės sklidimui sudaro dispersijos efektas, kur bangos sklidimą per sudėtingą paviršių paverčia nelinijiniu reiškiniu (1.3 pav., a). Nors atspindys nuo tiesioginio reflektoriaus ir yra gerai aprokiruojamas skaičiuojant apskritimais ir trumpiausiu keliu (1.3 pav., b).

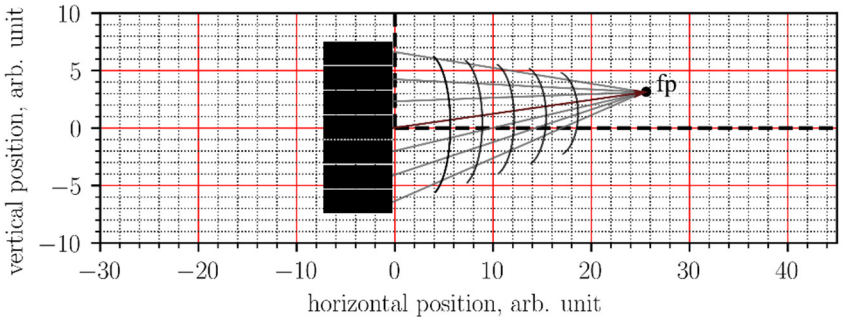
1.2. Fokusavimo metodai naudojant fazuotas garseles

Ultragarsinio fokusavimo funkciją galima interpretuoti kaip uždavinį, kuris atsakytų į tokį klausimą: kaip signalas turi būti uždėstas fazuotoje garselėje tiek siuntimo, tiek priėmimo metu, kad būtų galima gauti prasmingus rezultatus? Vienas iš sprendimų būtų yra suskaičiuoti akustinį kelią tarp daviklio ir dominančios pozicijos ir atitinkamai įvertinti užvėlinimą. Šis procesas literatūroje dažnai sutinkamas spinduliavimo formavimo (angl. *beamforming*) pavadinimu. Nors fokusavimo metodai naudojant homogeninę aplinką turi algebrinių sprendinių ir yra pakankamai išplėtoti [31], [81]–[83], bet mokslinis susidomėjimas tyrimais dar nėra išblėšęs [42], [50], [59], [84]–[88].

Matematiškai daugelį fokusavimo metodų galima aprašyti bendrąja fokusavimo (angl. *beamformer*) lygtimi [3], [10], [83]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N A_{ri} \sum_{j=1}^N A_{xj} s_{i,j} \left(t - \tau_{ri} - \tau_{xj} + \frac{2R_{fp}(t)}{c} \right), \quad (1.1)$$

čia A_{ri} , A_{xj} yra slopinimo funkcijos tiek priimant tiek išsiunčiant [89], [90], $s_{i,j}(t)$ yra įrašytas aidas iš elemento i iki priimančiojo elemento j , notacija r žymi priimančią elementą ir x siųstuvą. $R_{fp}(t)$ – yra atstumas nuo atskaitos taško iki fokusavimo regiono centro. τ_{ri} ir τ_{xj} yra užvėlinimo laikai, kai turime c garso greitį.



1.4 pav. Fokusavimo geometrija

Kaip vieną iš algebrinių sprendimų galima fokusuojant panaudoti šią lygtį:

$$\tau_n = \frac{\sqrt{(x_n - x_t)^2 + z_n^2} - R_{fp}}{c}, \quad (1.2)$$

čia (x_n, z_n) yra norimas fokusuoti taškas, R_{fp} – fokusuotas centrinis taškas nuo pasirinktos koordinatų pradžios (pav. 1.4) ir c – garso greitis. Taipateiktos schemos bendrosios spinduliavimo formavimo formulės analitinis sprendinys.

Tokia fokusavimo strategija yra dažniau sutinkama kaip totalus fokusavimo metodas (TFM), o jeigu signalai yra kaupiami iš kiekvieno elemento ir iki galo įrašomi, toks bandymo metodas vadinasi pilnos matricos gavimu.

Šioje disertacijos apžvalgoje vaizdavimo metodai bus suskirstyti į dvi grupes: klasikinius ir modernius. Metodų pasiskirstymas nustatomas atsižvelgiant į tariamąjį defekto (reflektoriaus) dydį.

- Nėra defekto dydžio apribojimų – tai galima vadinti klasikiniiais metodais.
- Reflektorius turi būti taškinio dydžio – laikant reflektorių taškiniu dydžiu, dėl to atsiranda paprastesnės matematinės aproksimacijos, susijusios su bangos lygtimi.

Nors toks metodų skirstymas nėra visiškai griežtas, o tik vienas iš rodiklių, kuriais galima klasifikuoti įvairias fokusavimo procedūras, detaliau galima išskirti standartinių metodo lentelę.

1.1 lentelė. Fokusavimo metodų palyginimas

Klasikiniai metodai	Modernūs metodai
<ul style="list-style-type: none"> • Atkūrimo dydis ribotas difrakcijos • Naudoja tiesiogiai atspindžio signalus ir triukšmas turi ribotą įtaką, algoritmas vykdomas tiesiogiai netransformuojant gautų signalų • Intuityvūs skaičiavimai (pvz., akustinis kelias yra tiesioginis atstumas tarp taškų) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nėra apriboti difrakcijos ribos • Gali veikti dažnių erdvėje • Triukšmas turi didelę įtaką. O esantis triukšmas turi turėti žinomą skirstinį (pageidautina Gauso) • Defektai (reflektoriai) yra aproksimuojami taškiniu dydžiu • Yra ribos, kokie signalai gali būti apdoroti

Galima pastebėti, kad pagrindinis skirtumas tarp terminų „klasikinis“ ir „modernus“ yra metodo jautrumas triukšmui (arba, moksliniu požiūriu, jei metodas buvo gautas naudojant „Green“ funkciją [91] arba „Born“ aproksimaciją [92]–[94]). Idealoje aplinkoje statistiniai matematika pagrįsti metodai pralenkia klasikinius metodus, o skaičiavimai užtrunka daug trumpiau (pvz., naudojant FFT transformacija pagrįstus algoritmus).

Tačiau realiame pasaulyje nėra taškinių šaltinių, skenavimo dažnis nėra tiksliai suderintas, o keitiksiai turi inerciją, iš kurios atsiranda nevienodas signalo užvėlinimas, ir jautrumas gali būti nepakankamas. Tai dar labiau sumažina metodų efektyvumą. Be abejo, galima atlikti įrangos kalibravimą (o tai gali būti labai

laikui imlus darbas) ar naudoti tokią skenavimo strategiją, kuri bus atsparesnė įrangos netobulumams.

1.2 lentelė. Apžvalgų metodų sąrašas

Algoritmas / Metodai	Komentaras
<i>Electronic synthetic focusing</i> (SAFT)	Elektroninis fokusavimas yra 1.5 formulės tiesioginis sprendimas, tai pats elementariausias metodas, kai tiek siuntimo metu, tiek priėmimo metu skaičiuojami užvėlinimai ir gaunamas <i>B-scan</i> vaizdas. Galima aparatūriškai realizuoti, tačiau gaunamas rezultatas yra <i>B-scan</i> vaizdas, kurį reikia papildomai apdoroti.
TFM[38]	Totalaus fokusavimo metodas veikia skaičiuodamas akustinius kelius kiekvienam regionui. Santykinai paprastas realizavimas, tačiau paprastas algoritmas, ir reikia atlikti veiksmus kiekvienam taškui atskirai; kaip privalumas yra visiškai atsparus triukšmams.
DAS[95]	Veikia panašiai, kaip TFM, tiktai siųstuvus siunčia bangą naudodamasis keliais (dažnai visais) siųstuvais. Pagrindinis privalumas, palyginti su TFM, yra didesnė išspinduliuoja akustinė energija
<i>Delay, multiply and sum</i> (DMAS),[85], [86]	Tai DAS metodo patobulinimas, kai signalai fokusavimo taške yra koreliuojami; esant nedidelio triukšmo atspindžiams kokybė bus geresnė dėl koreliacijos veiksmo.
<i>Double stage</i> DMAS[88]	Vykdoma koreliacija du kartus, koreliuotuose atspindžiuose kokybė bus dar didesnė, bet jeigu atspindys yra išderintas dėl ne visų žinomų kintamųjų, kokybė atitinkamai bus prastesnė.
<i>Surface adaptive ultrasound</i> SAUL [43]	Autofokusavimo metodas, kuris priglaidina atspindį prie objekto paviršiaus, taip padidindamas energiją į objektą. Įgaubtų paviršių atveju toks metodas gali diverguoti, jis neatkuria pozicijų, tačiau nereikalauja daug skaičiavimo resursų.

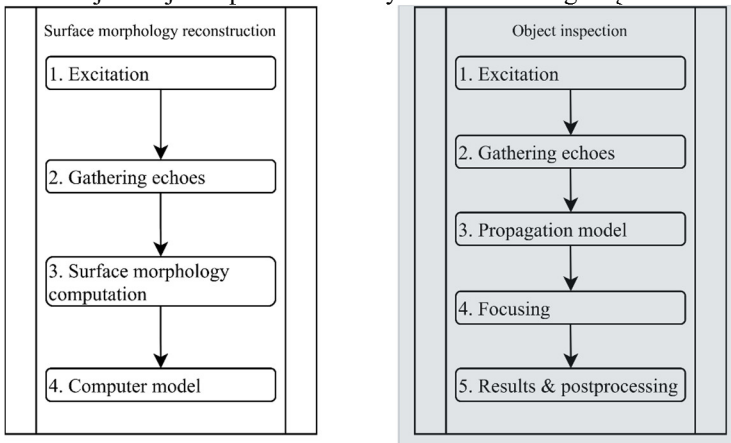
<p>Bangos numerio algoritmai[39], [58], [96] dažnių erdvės TFM [39] arba dažnai sutinkamas kaip Stolt-k migracija[61], [97]–[100]</p>	<p>Matematiškai yra Furjė lygties FFT sprendinys taškinio reflektoriaus sąlygai. Šie veikia keisdami iš laiko domeno sprendimo į dažninį domeną (su atitinkamai koordinacių transformacija). Skaičiavimų laikas dėl FFT realizacijos daug sutrumpėja, bet atspindžiai turi atitikti taškinius reflektorius; dėl FFT specifikos jautrus pašaliniais triukšmams.</p>
<p><i>Multiple signal classification</i> [40], [101]</p>	<p>Statistiniai metodai, skirti taškiniams reflektoriams, reikalauja triukšmo pasiskirstymo apie 0, bet gali atskirti skirtingus reflektorius atstumu, trumpesniu negu bangos ilgis.</p>
<p><i>Time reversal</i> [40], [40], [47], [102]</p>	<p>Aktyvus metodas, išnaudojantis bangos invarianto principą. Įrašydamas signalas išspinduliuoja atgal reflektoriui, tik su neigiamu laiko ašimi. Reikalauja visiškai valdomų keitiklių gardelių. Kaip privalumas – sufokusuos energiją į reflektorių, neturėdamas informacijos apie aplinką (ir paviršiaus kreivumą). Tačiau reikalauja taškinio reflektoriaus ir papildomo reflektoriaus atskyrimų metodo.</p>
<p><i>Minimal variance beamforming</i> [50]–[52], [81]</p>	<p>Optimizacinio tipo metodas, vienas iš kraštinio atvejų sprendinių yra DAS fokusavimo metodas. Veikia skaičiuodamas signalo kovariaciją (naudodamasis tikrinėmis matricomis) ir optimizuodamas signalo atsaką taip, kad energijos suma būtų nepakitusi. Kadangi reikia skaičiuoti tikrines kovariacijos sumas, metodas reikalauja daug skaičiavimo išteklių, esant dideliems triukšmams, gali generuoti neteisingus atvaizdus, ypač kai triukšmo skirstinys nėra Gauso.</p>

Apžvelgti metodai 1.2.2 lentelėje techniškai atlieka fokusavimo funkciją ir idealiomis sąlygomis generuos panašius rezultatus, tačiau bendru atveju laikoma, kad akustinis kelias yra homogeniškoje aplinkoje, todėl, norint pritaikyti fokusavimo metodą, kai yra kelios aplinkos ir ypač kai yra nereguliarusis paviršius, reikia turėti tikslų akustinio kelio modelį, todėl, atsižvelgiant į galimus

triukšmus ir aplinką, galutiniam fokusavimo vaizdui galima naudoti TFM ar DAS metodus dėl realizavimo paprastumo ir taip sumažinti realizacijos klaidas.

2. SUDĖTINGOS GEOMETRIJOS OBJEKTO PAVIRŠIAUS REKONSTRAVIMO TYRIMAS

Paviršius gali būti rekonstruojamas įvairiais būdais, pavyzdžiui, naudojantis lazeriu ar rentgeno tomografija, tačiau šiame skyriuje daugiausia dėmesio bus skiriama rekonstrukcijai naudojant tik ultragarsinę fazuotą gardelę. Norima pabrėžti, kad atspindys nuo objekto paviršiaus negali būti aproksimuotas kaip taškinis reflektorius, todėl statistiniais metodais šią procedūrą atlikti sudėtinga. Patikimas paviršiaus fokusavimas galimas laiko domeno metodais, tokiais kaip totalus fokusavimo metodas (TFM) ar plokštumos bangos (angl. *plane wave*, PWI). Bendroju atveju šis procesas sudarytas iš keleto žingsnių:



2.1 pav. Pasiūlytos metodologijos žingsniai bendrajame kontekste (šiam skyriuje diskutuojama (a))

Tai galima suskirstyti į keturis loginius žingsnius (2.1 pav., a), jie detaliau aprašyti lentelėje.

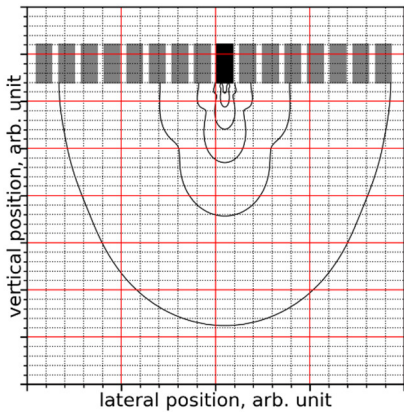
2.1 lentelė. Paviršiaus rekonstrukcijos metodo bendra eiga

Žingsnio Nr.	Procedūra	Komentaras
1.	Žadinimas	Žadinimo signalo generavimas, vienas gardelės elementas ar plokščia banga

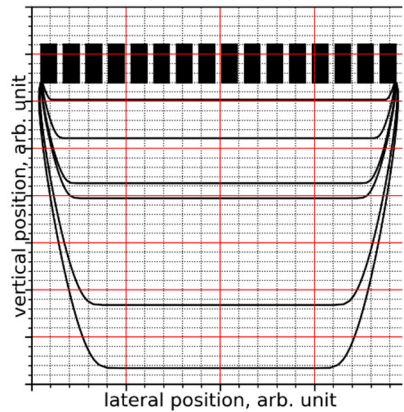
2.	Aido surinkimas	Užvėlinimo programinis sulyginimas, duomenų paruošimas
3.	Paviršiaus morfologinis skaičiavimas	Filtravimas, tendų pašalinimas, skaičiavimo regiono parinkimas ir fokusavimo algoritmo įvykdymas
4.	Kompiuterinis modelis	Fokusuotas

2.1 lentelėje yra bendriniai žingsniai, jie suskirstyti pagal reikalingus atlikimo veiksmus.

Signalą žadinti naudojant harmoninį pjezo elemento gardelės dydį galima įvairiais variantais, tačiau matematiškai geriausi yra du pagrindiniai: vieno elemento žadinimas ir plokščios bangos.



(a)



(b)

2.2 pav. Akustinio slėgio evoliucijos brėžinys (tamsesni elementai – spinduliuojantys energija), izolinijos rodo slėgio ribos (pozicijos pasirinktos laisvai dėl vaizdumo), (a) – vieno elemento spinduliavimas, (b)– plokščios bangos spinduliavimas

Matematiškai vieno elemento akustinis slėgis gali būti aproksimuotas *sinc* funkcija:

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ \frac{\sin x}{x}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (0.1)$$

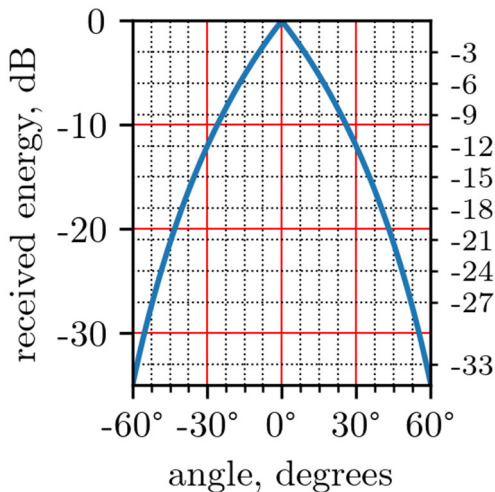
čia x yra kampas. Pagrindinis vieno elemento spinduliavimo privalumas yra galimybė aproksimuoti akustinį šaltinį kaip turintį taškinį dydį ir spinduliuojantį sferą į visas puses vienodai, tai skaičiavimą daro daug paprastesnį (2.2 pav.,a)

Iš kitos pusės, naudojant plokščios bangos emisiją (2.2 pav.,b), bendra akustinė banga turi daugiau energijos, tačiau akustinė forma yra panaši į nupjautą kūgį [103], dėl to paviršiaus skaičiavimai yra keblūs ir norint gauti geros kokybės atkūrimą reikalinga netriviali matematika.

Akustinės energijos nuslopimas yra kur kas didesnis, kai yra kampas tarp gardelės ir objekto paviršiaus. Pirmiausia energija spinduliavimo metu yra prarandama, po to nuo paviršiaus atsispindėjusi akustinė energija irgi priklauso nuo kampo, ignoruojant prarastą energiją nuo paviršiaus. Šį dėsnį galima aprašyti naudojantis sinuso funkcija:

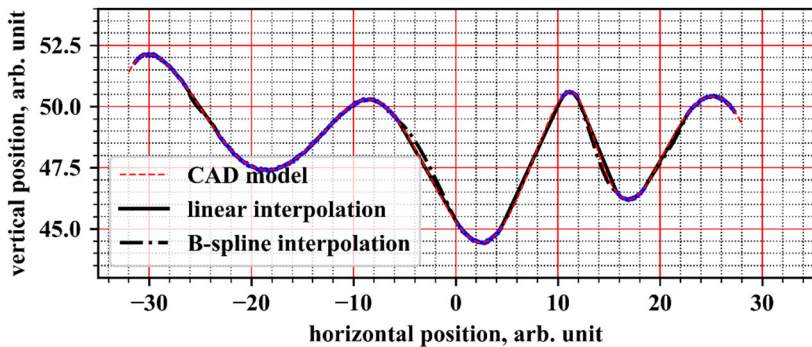
$$I_t = I_0 \sin^2(\alpha), \quad (0.2)$$

čia I_t yra aproksimuota energija gardelės paviršiuje, I_0 yra pradinė energija, α – yra kampas tarp bandinio paviršiaus ir gardelės. Ši formulė neatkreipia dėmesio į energijos slopinimą ir kitus fizinius procesus, tačiau aproksimuotai parodo, koks yra atsispindėjusius energijos pokytis. Grafiškai galima ją išreikšti taip:



2.3 pav. Iš plokščio paviršiaus atsispindinti energija, kai keitiklis sukamas α laipsniais (2.2 lygtis)

Kaip parodyta (2.4 pav.), ties 30 laipsnių kampu atsispindėjusi energija yra jau 12dB sumažėjusi, ir ribotos energijos spinduliavimo metu jau reikės interpoliuoti trūkstamus duomenis.



2.4 pav. CAD modelio interpoliacijos pavyzdys, interpoliacijos vertės įtraukė atsitiktinį triukšmą, kad klaidų poveikis būtų labiau matomas

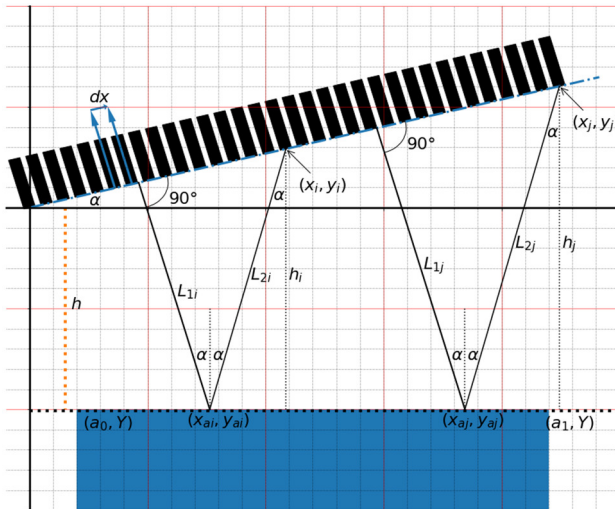
Paveikslėlis parodo vieną iš galimų rekonstrukcijos procedūros rezultatų, kai dalis duomenų yra žinomi. Interpoliacijos procedūra, įskaitant trūkstamus duomenis, pasiūlyta tokia:

- iš aplinkos pasirenkama zona su atspindžiu nuo paviršiaus;
- surenkami stipriausios energijos taškai, atkreipiant dėmesį į didelę energijos diapazoną (-3 dB taisyklės taikyti negalima);

- naudojama interpoliacinė funkcija iš trūkstatų taškų, interpoliacija gali būti tikslinama, jei žinomos savybės, tačiau bendruoju atveju B-spline taikymas duoda gerų rezultatų.

2.1 Iš segmentų sudaryto paviršiaus atkūrimas

Jei objekto paviršius yra sudarytas iš linijinių segmentų, galima naudoti kitą strategiją. Galima atkurti paviršiaus kreivumą naudojantis tiksliai B-scan duomenimis. Toks paviršiaus atkūrimo metodas turi pranašumą – nereikia sudėtingo skaičiavimo ir duomenis galima gauti tiesioginiu būdu.



2.5 pav. Dviejų priimančių elementų akustiniai keliai linijiniam segmentui, kai yra išspinduliuota plokščioji banga; akustinį kelią galima algebriskai išreikšti naudojantis statmenų trikampių teorema

Iš paveikslo galima matyti, kad tiek atstumo, tiek ir kampo skaičiavimas galimas algebrine išraiška, nes kampą galima išreikšti per i ir j trikampių akustinio kelio skirtumą, o atstumas iki segmento yra paprastas sprendimas:

$$\Delta D = (dx \cos^3(\alpha) + dx \cos(\alpha)) \sin(\alpha), \quad (2.3)$$

čia ΔD – atstumo skirtumas tarp dviejų priimančių elementų (2.5 pav. i ir j trikampiai), dx – linijinis atstumas gardelėje tarp i ir j elementų, o α – nežinomas kampas. Šią netiesinę formulę galima išspręsti naudojantis optimizavimo metodais, tokiais kaip Newtono ir Raphono [104], [105].

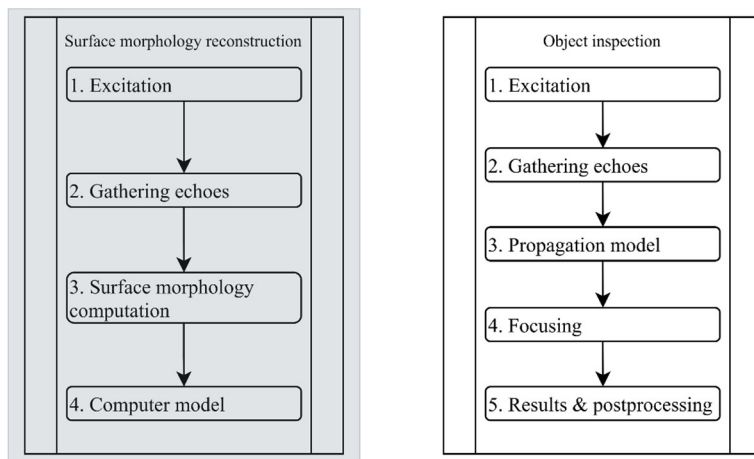
Žinant paviršiaus pasvirimą, galima grįžti prie neapdorotų duomenų ir apskaičiuoti pradinių elemento ir objekto paviršiaus atstumą:

$$Y = (i - 1)dx \sin(\alpha) - \frac{C_w t_i}{2 \cos(\alpha)}, \quad (2.4)$$

čia $(i - 1)dx$ – elemento pozicija gardelėje (elementai skaičiuojami nuo 1). C_w – garso greitis, α – kampas, apskaičiuotas pagal 2.3 formulę.

Šiuo pasiūlytu būdu (formulė 2.3 ir 2.4) galima atkurti objekto paviršių, kai jis yra sudarytas iš linijinių segmentų. Toks metodas turi greičio pranašumą, nes užtenka naudoti B-scan duomenis ir rasti tiktai atspindžius nuo paviršiaus. Šio metodo trūkumas tas, kad nėra šoninės pozicijos, Tai daro prielaidą apie begalinio ilgio segmentus, todėl šonines pozicijas reikia rasti kitais būdais.

3. PASIŪLYTAS SUDĖTINGO OBJEKTO DEFEKTOSKOPIJOS FOKUSAVIMO METODAS



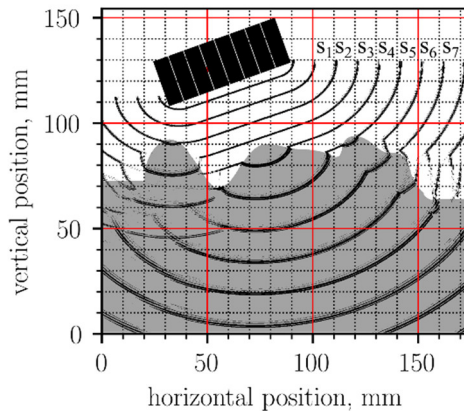
3.1 pav. Pasiūlytos metodologijos žingsniai bendrajame kontekste (šiam skyriuje diskutuojama (b))

Šiame skyriuje yra diskutuojama pasiūlytos metodikos defektoskopijos žingsnis, kai jau paviršius yra atkurtas algoritmiškai. Nors žingsniai panašūs, kaip ir paviršiaus atkūrimo atveju (3.1 pav.), tačiau vidinė realizacija yra kur kas sudėtingesnė.

0.1 lentelė. Bandinio pasiūlyto defektoskopijos metodo žingsniai

Žingsnio Nr.	Procedūra	Trumpas aprašymas
1.	Žadinimas	Žadinimo procedūra, kaip ir paviršiumi atkurti galima naudoti PWI ar FMC
2.	Aido rinkimas	Užvėlinimo programinis sulginimas, duomenų paruošimas
3.	Akustinio kelio modelio skaičiavimas	Skaičiuojamas akustinis kelias, atkreipiant dėmesį į paviršiaus netolygumus
4.	Fokusavimo vykdymas	Pasinaudojant akustiniu modeliu, įvykdoma fokusavimo funkcija
5.	Rezultatų apdorojimas	Rezultatų apdorojimas

3.1 lentelėje nurodyti pasiūlyto defektoskopijos metodo žingsniai. Žadinimo funkcija, taip, kaip paviršiaus atveju, gali būti tiek PWI, tiek FMC.



0.1 pav. Bangos sklidimo trajektorija, kai žadinant naudojama plokščioji banga (trajektorija pažymėta izolinijomis)

Iš 3.2 pav. galima pamatyti scheminį bangos sklidimą naudojantis plokščia banga. Kaip matoma, iš izolinijų pereinant per skirtingas aplinkas, atkreipiant dėmesį tik į išilginę bangą, sklidimas bandinyje nėra tiksliai išreikštas.

Vienas iš akustinės bangos skaičiavimo būdų yra Snello dėsnis, ir skaičiuoti galima kiekvienam taškui atskirai, tačiau atsiranda dvi problemos:

1. Nors Snello taisyklė skaičiuoja trumpiausią akustinį kelią, dėl nereguliarinio paviršiaus galima gauti daug taškų, atsakymas bus teisingas arba artimas teisingam.

2. Kaip jau minėta, naudojantis Snello taisykle, nėra įvertinta dispersija.

Jeigu bandinio kreivumas yra ribotos formos, Snello taisyklės taikymas duoda pakankamai gerų rezultatų ATFM[106] metodo atveju. Tačiau, norint tiksliau įvertinti bangos sklidimą, galima naudotis α -shape (liet. α -forma) [107]–[114], kuri turi geras aproksimacijos galimybes sklindančiomis bangomis.

Nors α -shape turi geras aproksimacijos galimybes, tiesioginis metodo skaičiavimas yra laikui imlus procesas. Dėl laiko imlumo ir taškų skaičiaus šią funkciją rekomenduojame skaičiuoti aproksimuotą, taip sutaupant daug laiko. Tai ypač svarbu, kai fokusavimo taškų yra daug. Kaip pavyzdį galima paminėti 2000x2000 taškų tinklelio dydį, net jei vienam taškui užtrunkama 1 ms, tai visas tinklelis, net ir su 128 branduolių procesoriais, truks 31,25 s.

Todėl siūlome tokią defektoskopijos procedūrą:

- a) suskaičiuojamas akustinės bangos evoliucijos modelis objekte;
- b) skaičiuojamas laikas tarp išsiunčiamo elemento iki bandinio paviršiaus;
- c) atliekama fokusavimo funkcija, norint efektyviai įgyvendinti GPGPU, atliekama per du žingsnius.

3.1 algoritmas. Bangos evoliucijos laiko skaičiavimas naudojantis CUDA (pseudokodas)

Assumptions: thread **block size 1024 (threadIdx.x ∈ 0...1023)**

```
uint16_t* evolution_data // propagation model quadrant (1024x1024 size)
uint3_t* focus_emit_points // (x,y,z) – boundary points (x,y) , z – time offset
uint32_t world // the world table in uintless coordinate system (4096x4096 size)
```

```
1 uint3 ep = focus_emit_points[blockIdx.x];
2 uint16_t tmp;
3 for i = 0 < 1024
4   uint16_t ld = evolution_data[1024*i + threadIdx.x];
5   __syncthreads();
6   int (x,y) = (ep.x + threadIdx.x, ep.y + i); // right pixel bottom ROI
7   if (x,y) ∈ world
8     tmp = ep.z + ld;
9   atomicMin(&world[y * 4096 + x],tmp);
10  end if
11
12  int (x,y) = (ep.x + threadIdx.x, ep.y - i); // right top ROI
13  if (x,y) ∈ world
14    tmp = ep.z + ld;
15  atomicMin(&world[y * 4096 + x],tmp);
16  end if
17
18  int (x,y) = (ep.x - threadIdx.x, ep.y + i); // left bottom ROI
```

```

19 if (x,y) ∈ world
20   tmp = ep.z + ld;
21   atomicMin(&world[y * 4096 + x],tmp);
22 end if
23 int (x,y) = (ep.x - threadIdx.x, ep.y - i); // left top ROI
24 if (x,y) ∈ world
25   tmp = ep.z + ld;
26   atomicMin(&world[y * 4096 + x],tmp);
27 end if

```

3.1 algoritmas yra bangos evoliucijos funkcija, kai bangos evoliucijos informacija yra iš anksto apskaičiuota. Galima pastebėti, kad ši procedūra yra labai draugiška naudojant vaizdo plokštės skaičiavimams atlikti ir panaši į tekstūros užpildymo funkciją. Turint bangos sklidimo informaciją, reikia atlikti fokusavimo žingsnį:

Algorithm 3.2 Fokusavimo metodo psudokodas naudojantis CUDA

Assumptions: **thread number is a active aperture for example 128 elements (threadIdx.x ∈ 0...127)**

Boundary points are given by group of 128 (optimisation propose).

pixel_pos – (x,y) – ROI position z – is a wave propagation time in sample

glob_tr_pos – transducer element position (x,y) and z – t0 (time to first surface point)

blockIdx.x – the result number/point, the request data is given by (x,y) point list

DATA_PITCH – number of samples in one time trace

```

1  const int tid = threadIdx.x;
2  __shared__ float pixel_value[128];
3  __shared__ float3 pixel_pos;
4  __shared__ float2 bndr[128];
5
6  float3 tr_pos = glob_tr_pos[threadIdx.x];
7
8  pixel_value[threadIdx.x] = 0;
9
9  if (threadIdx.x == 0)
10   pixel_pos = focus_points[blockIdx.x];
11 end if
12 __syncthreads();
13 if (pixel_pos.z >= ∞){
14   if (tid == 0){
15     result[blockIdx.x] = 0;
16     return
17   }
18 end if
19 float tmin = ∞;int tmin_idx = ∞
20 for i = 0 < (boundary_points_len >> 7)
21   bndr[tid] = boundary_points[128*i + tid];
22   __syncthreads();

```



```

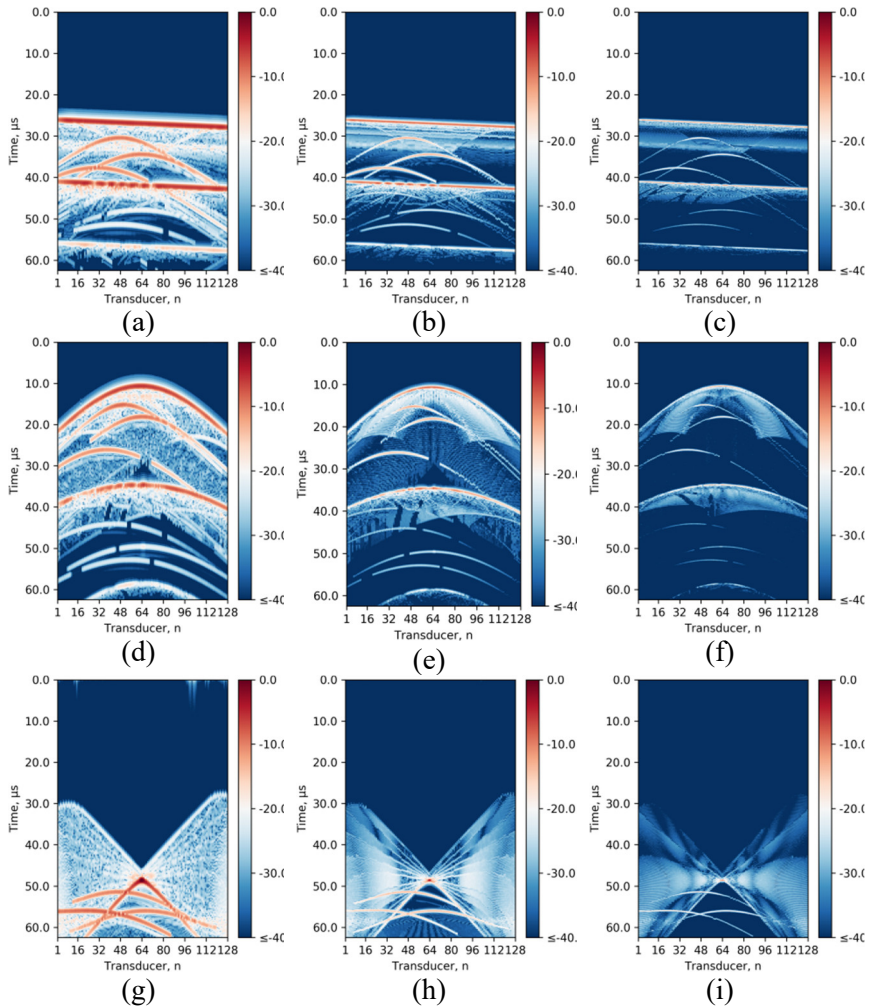
23 for j = 0..127
24   float a = sqrt( (pixel_pos.x - bndr[jval].x)2 + (pixel_pos.y - bndr[jval].y)2 ) * C2inv;
25   float b = sqrt ( ((bndr[jval].x - tr_pos.x)2 + (bndr[jval].y - tr_pos.y)2 ) * C1inv
26   float t = a + b + pixel_pos.z + t0;
27   if (t < tmin)
28     tmin = t; tmin_idx = 128*i + jval
29   end if
30 end for
31 end for
32 // processing remainder
33 int mmax = boundary_points_len - ((boundary_points_len >> 7)*128);
34 int mof = ((boundary_points_len >> 7)*128);
35 if (tid < mmax)
36   bndr[tid] = boundary_points[mof + tid];
37 end if
38 __syncthreads();
39 for j = 0 < mmax
40   float a = sqrt( (pixel_pos.x - bndr[jval].x)2 + (pixel_pos.y - bndr[jval].y)2 ) * C2inv;
41   float b = sqrt ( ((bndr[jval].x - tr_pos.x)2 + (bndr[jval].y - tr_pos.y)2 ) * C1inv
42   float t = a + b + pixel_pos.z + t0;
43   if (t < tmin)
44     tmin = t; tmin_idx = 128*i + jval
45   end if
46 end for
47 int sample = tmin*SAMPLING_RATE_MHZ;
48 if ( sample ∈ (0..DATA_PITCH) )
49   pixel_value[tid] = data[ (tid * DATA_PITCH + sample) + (128*DATA_PITCH)*emmitter ];
50 for s = 64, s > 0, s >>= 1
51   __syncthreads();
52   if (tid < s)
53     suma[tid] = suma[tid] + suma [tid + s];
54   end if
55 end for
56 if tid == 0
57   atomicAdd(&result[blockIdx.x],suma[0])
58 end if

```

Antras fokusavimo funkcijos algoritmo žingsnis (3.2 algoritmas) iš esmės yra TFM metodo modifikacija, pritaikyta prie autoriaus pasiūlytos metodikos, iš kitos pusės, pati fokusavimo procedūra gali būti paimta iš kitų funkcijų, kaip, pvz., iš minimalios variacijos metodo (MV) kokybei padidinti ar kitos metodologijos, kur akustinis kelias yra laikomas kaip juodoji dėžė (angl. *black-box*).

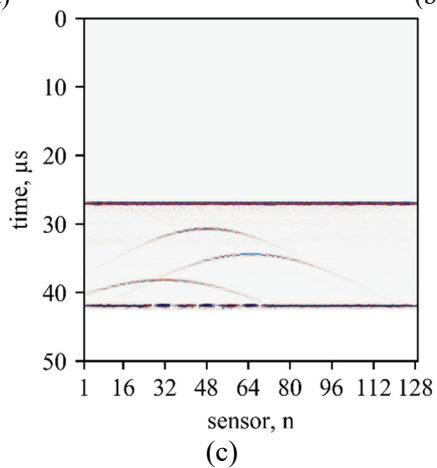
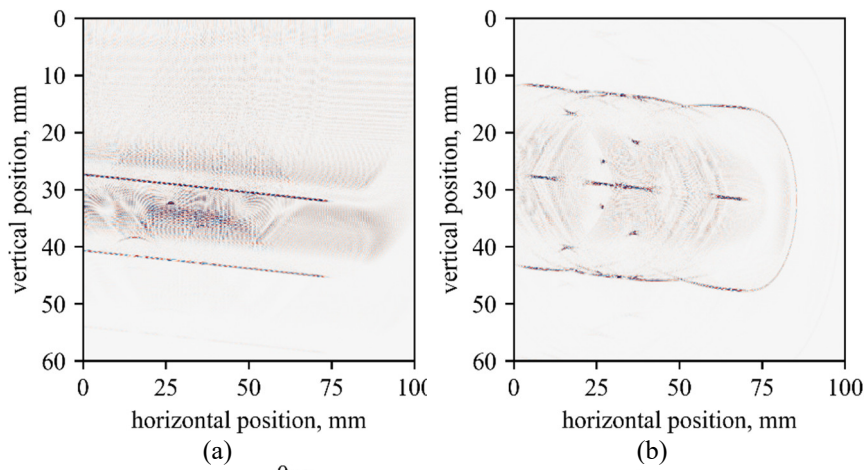
4. SKAITINIAI EKSPERIMENTO REZULTATAI

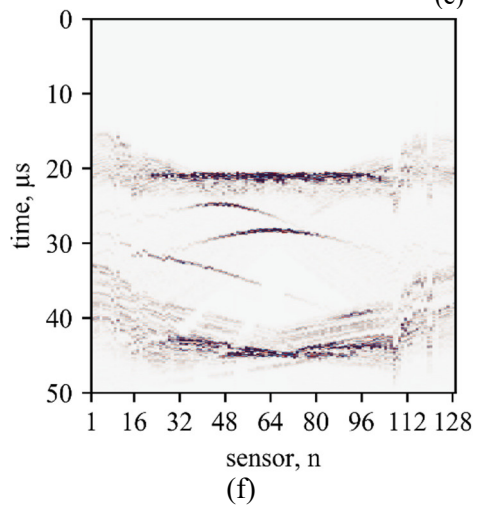
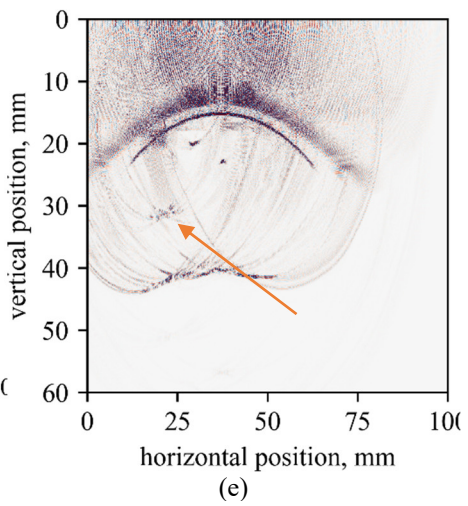
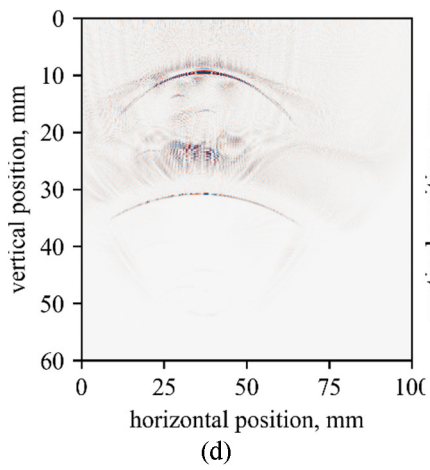
Pasiūlyto algoritmo skaitiniai rezultatai. Pirmiausia, naudojantis CIVA programine įranga, apskaičiuoti inspekcijos modeliai, kur modeliavimams atlikti naudoti trys skirtingi centriniai dažniai (2.25MHz., 5MHz ir 10MHz):

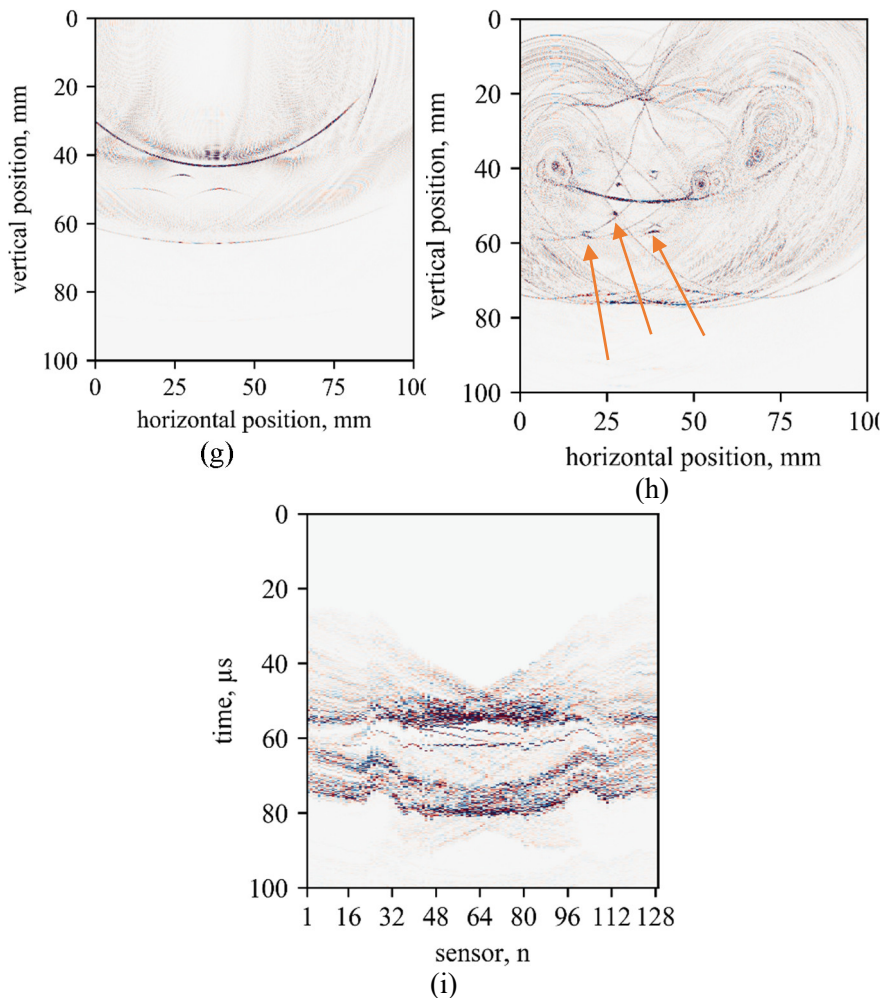


0.1 pav. B-scan neapdoroti vaizdai

4.1 pav. yra panaudoti trys modeliai (a–c – objektas plokščiu paviršiumi;, d–f iškilus objektas ir g–i – įgaubtas bandinys). Šie bandiniai buvo pasirinkti tam, kad modeliuotų 3 pagrindines objektų formas. Jiems palyginti buvo naudojami trys algoritmai (TFM – kaip atraminis metodas, pasiūlytas metodas ir SAUL algoritmai):







0.2 pav. Algoritminiai rekonstrukcijos rezultatai (rodoma 2.25Mhz gardelė)

Skaitiniams rezultatams yra naudojama 2.25Mhz gardelė (4.2 pav.). Šie rezultatai vizualiai yra palyginti su TFM ir SAUL algoritmais. Kaip matyti iš rezultatų, naudojantis TFM metodu gaunamas atkūrimas turi šoninių triukšmų dėl akustinio greičio skirtumo, o SAUL metodas dėl didesnės akustinės energijos atkuria geriau, tačiau iškraipydamas geometriją.

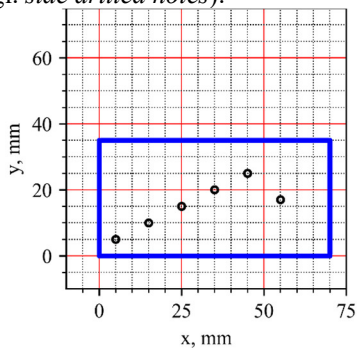
4.1 lentelė. Rekonstruotos defektų vietos, atsižvelgiant tik geriausius rezultatus

	Defekto (SDH) padėties paklaida iš CAD modelio, (Δx, Δy) mm		
Objektas	SDH1	SDH2	SDH3
Plokščias	(0,1,0,2)	(-0,1,0,2)	(0,1,0,3)
Iškilus	(0,2,0,3)	(-0,2,0,3)	(0,4,0,5)
Įgaubtas	(0,4,0,6)	(-0,3,0,5)	(0,6,0,7)

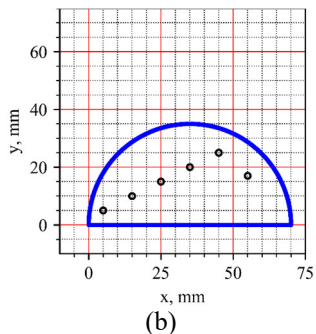
Iš skaitinio eksperimento (4.1 lentelė) galima pastebėti, kad metodu galima atlikti skaičiavimus ne tik esant iškilaus paviršiaus objektui, bet ir esant įgaubtam objektui.

5. PRAKTINIO PRITAIKYMO REZULTATAI

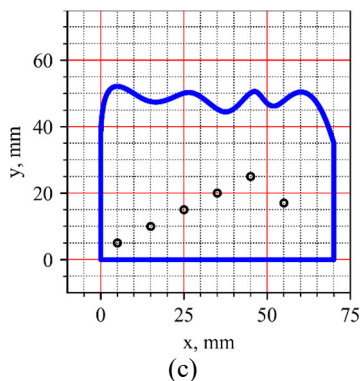
Taikant eksperimentą praktiškai, naudojant CAD programą nubraižyti ir sukurti keturi skirtingi bandiniai su 6 iš šono išgręžtomis skylėmis (angl. *side drilled holes*):



(a)



(b)



(c)

0.1 pav. Eksperimentiniai bandiniai

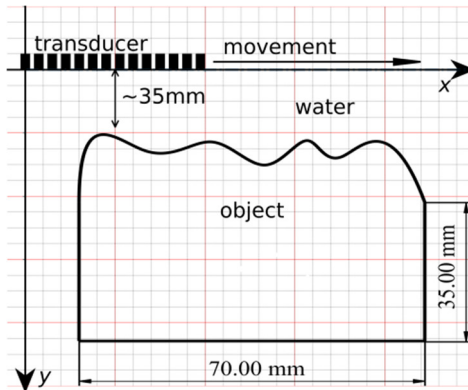
Objektai buvo pasirinkti taip, kad atitiktų realius bandinius ir būtų kraštiniai atvejai (5.1 pav.). Plokščio paviršiaus objektas (5.1 pav., a) yra skirtas metodui patikrinti. Šie objektai buvo pagaminti iš organinio stiklo ir pakankamai nedidelio dydžio, kuris atvaizduotų dalį realaus objekto.

Eksperimentui atlikti buvo naudojama DASEL fazuotų gardelių valdymo įranga.

5.1 lentelė. Eksperimentinė įranga

<i>Component</i>	<i>Value (comment)</i>
<i>Phased array equipment</i>	DASEL SITAU 128:128:1
<i>Sampling rate</i>	40 MHz
<i>Probe center frequency</i>	2,25 MHz
<i>Probe pitch</i>	0,75mm
<i>Probe aperture</i>	128 elements
<i>Pulse</i>	220ns length 100v amplitude spike
<i>Reception delay</i>	1600 samples (40 μS)
<i>ADC</i>	13 bit signed
<i>Storage</i>	4096 samples 128 channels
<i>Pre-process₁</i>	Signal detrend
<i>Filtering</i>	Low-pass 10Mhz transition frequency
<i>First element movement positions</i>	0, 62mm, 107,1mm
<i>GPU for processing</i>	NVIDIA 1080
<i>CPU</i>	Amd Ryzen 2700x with 2999 Mhz DDR4 RAM

Duomenims apdoroti buvo naudojama NVIDIA vaizdo plokštė, o detalesni parametrai parodyti 5.1 lentelėje. Eksperimentas buvo vykdomas pasigamintoje autoriaus vonelėje su programuojamu stovu, o schematiškai galima pavaizduoti 5.2 pav.):

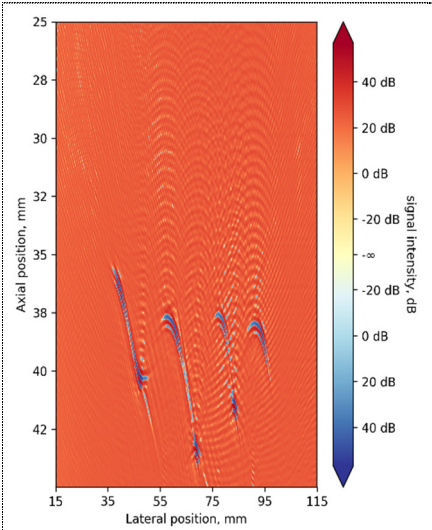


0.2 pav. Eksperimento brėžinys

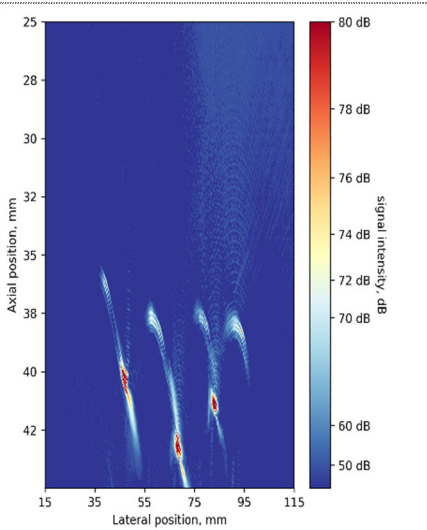
Eksperimento procedūra: naudojantis DASEL aparatūra, bandinys panardinamas į vandenį, ~3cm gylio nuo gardelės, ir vykdomas skenavimas, naudojant kelis stiprinimus.

Procedūrą galima aprašyti tokiais žingsniais:

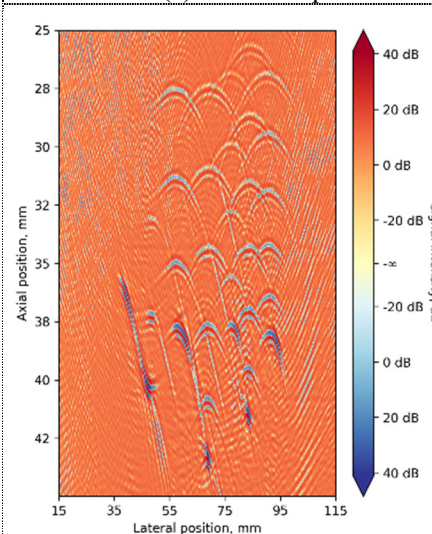
- 1) naudojantis PWI, kas laipsnį nuo -30 iki 30 atliekamas elektroninis skenavimas, stiprinimas (angl. *gain*) parenkamas toks, kad priimtas aidas neviršytų ADC keitiklio ribų;
- 2) atliekamas visos matricos skenavimas, modifikuojamas stiprinimas iki ribų;
- 3) atliekamas visos matricos skenavimas objekto viduje, t. y. stiprinimas padidinamas tiek, kad atspindžiai iš bandinio vidaus neviršytų ADC ribos;
- 4) Kompiuterine programa atliekamas ašies pastūmimas ir kartojama nuo 1 žingsnio.



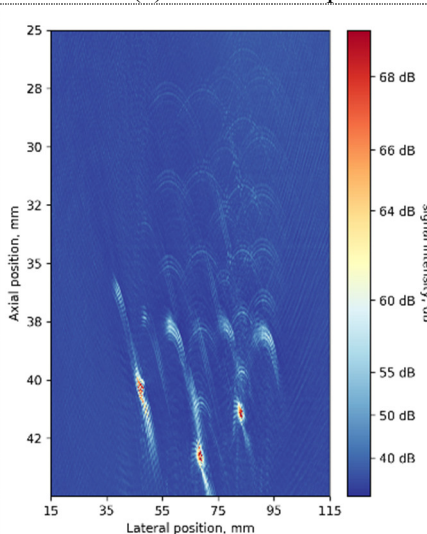
(a) Das 1°step



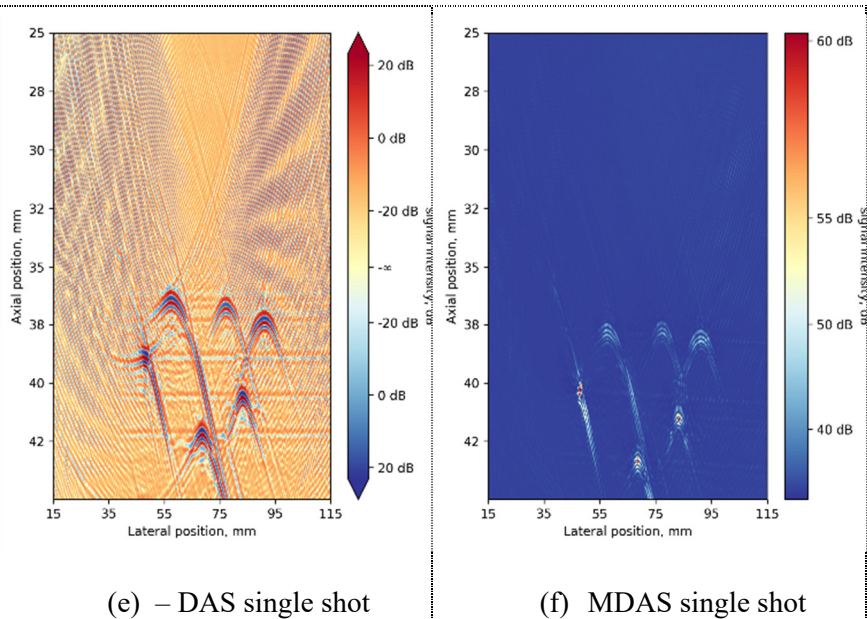
(b) -MDAS 1 step



(c) - DAS 5 step

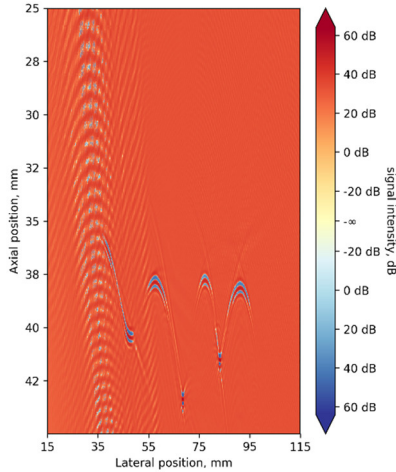


(d) - MDAS 5 step



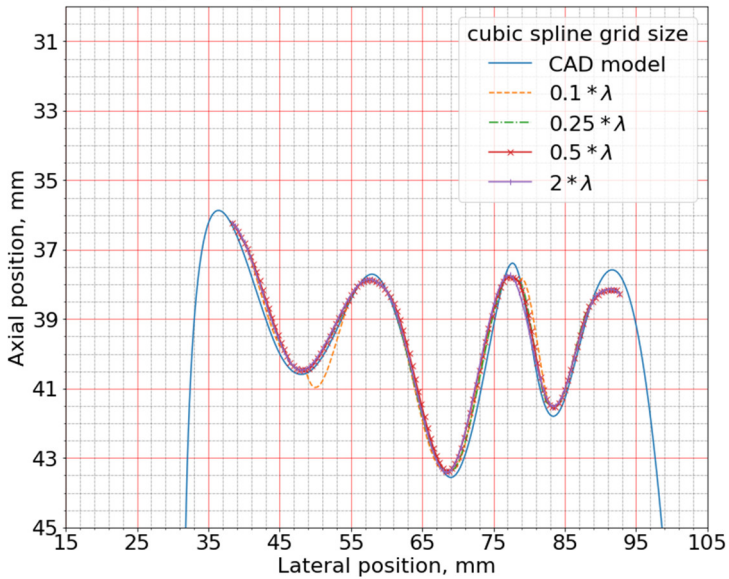
0.3 pav. Paviršiaus atkūrimo algoritmų palyginamosios analizės rezultatai

5.3 ir 5.4 pav. yra parodyti paviršiaus atkūrimo palyginamosios analizės neapdoroti rezultatai. Paveikslėlyje parodyti rezultatai yra tiesioginiai algoritmų rezultatai, nenaudojant filtrų ir papildomo apdorojimo.



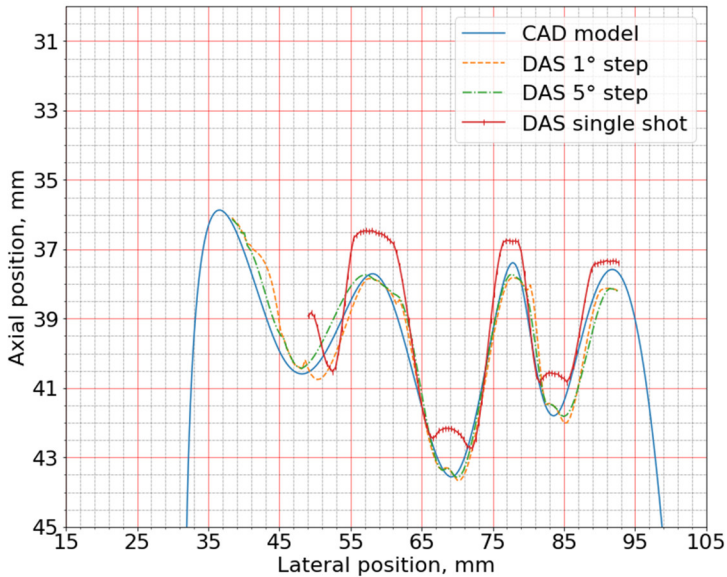
5.4 pav. TFM rezultatai

Bandinio atkūrimo rezultatai yra apskaičiuoti uždedant CAD žinomą objekto modelį, kuris, naudojant tiek stumdymą, tiek pasukimą, taikomas tol, kol kvadratinė uždėjimo paklaida pasidaro mažiausia:



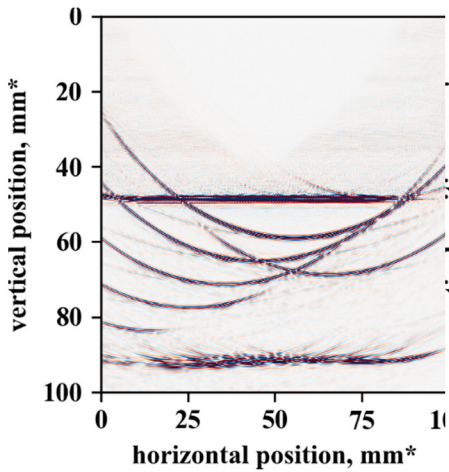
5.5 pav. Paviršiaus rekonstrukcija naudojant TFM procedūrą, kartu su B-spline interpoliacija

Pagal TFM algoritmą, paviršiaus atkūrimas naudojant B-spline interpoliaciją yra gaunamas tikslus, išskyrus statmenų kampų vietas (5.5 pav.), tik reikia atkreipti dėmesį į naudojamą tinklėlio dydį, nes, naudojant per tankų interpoliacinį tinklėlį, gali susidaryti skambėjimo efektas (angl. *ringing*), dėl ko atsiras skaitmeninių klaidų.

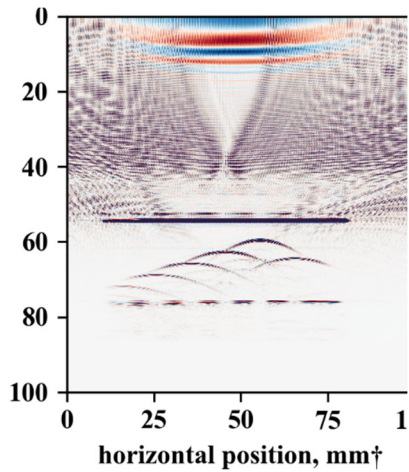


5.6 pav. Paviršiaus rekonstrukcija naudojant plokščios bangos (PWI) metodą, tinklėlio dydis – $0,25\lambda$

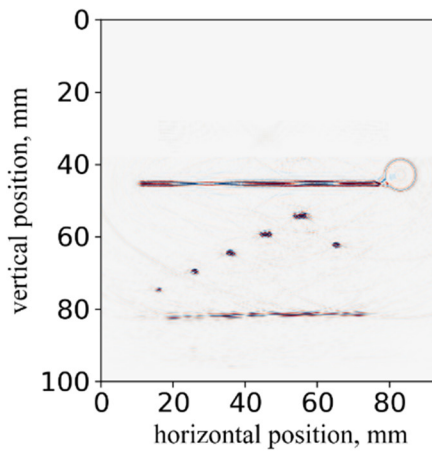
Naudojantis plokščiosios bangos metodu, klaida iš pirmo žvilgsnio yra didesnė (5.6 pav.), ir, norint gauti pakankamai gerus rezultatus, reikia pakankamai daug elektroniskai sukinti gardelę (tada algoritmiškai apdorojimo laikas artės prie TFM metodo).



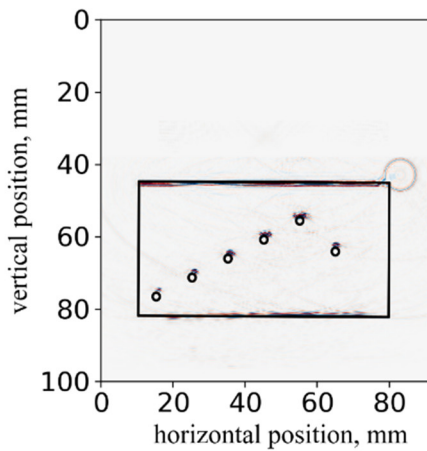
(a)



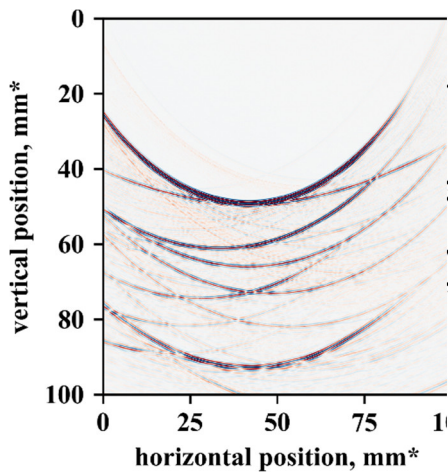
(b)



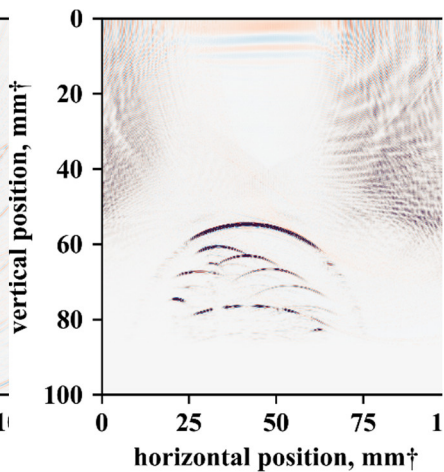
(c)



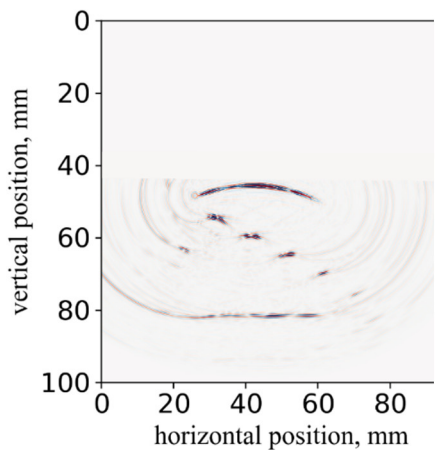
(d)



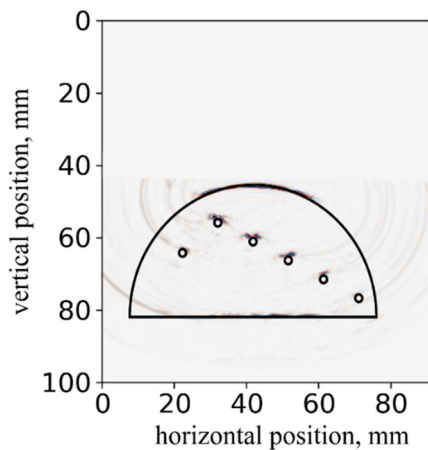
(e)



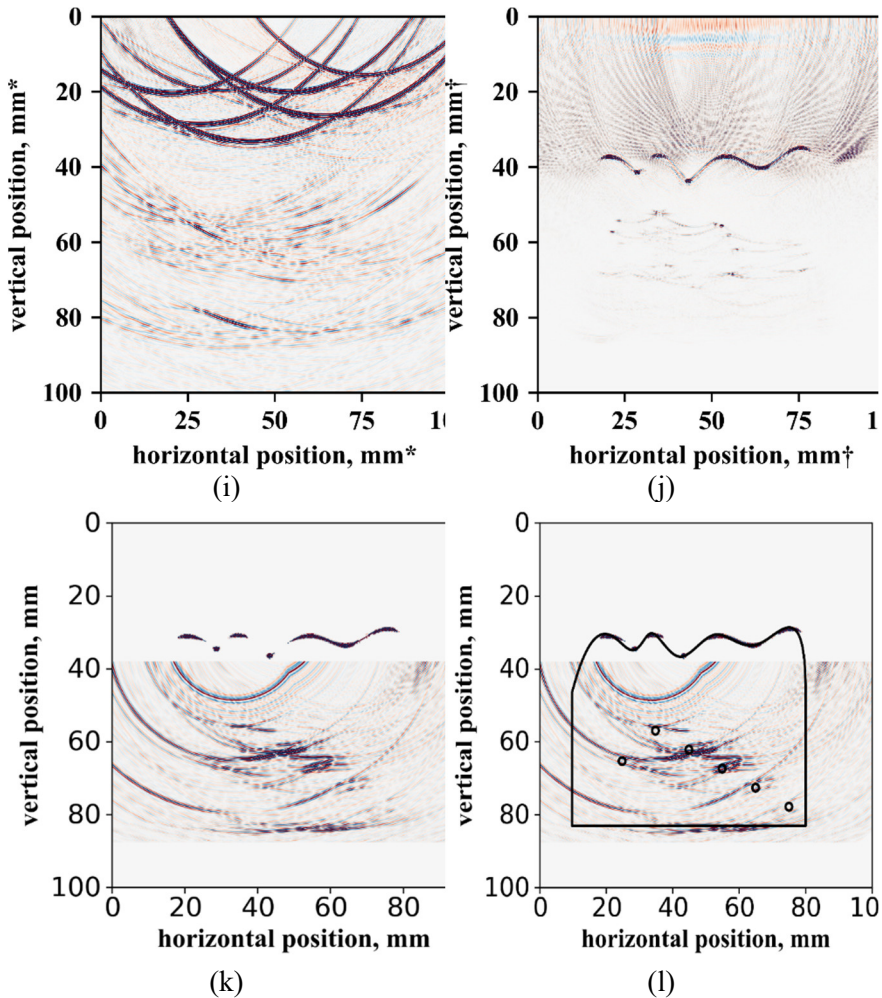
(f)



(g)



(h)



5.7 pav.1 Eksperimento rekonstrukcijos rezultatai: tiek pasiūlyto algoritmo, tiek TFM metodo atveju (a, e, i – naudojamas bandomo garso greitis, b, f, j – naudojamas vandens garso greitis)

Atlikti eksperimento rezultatai (5.7 pav.) rodo metodo panaudojamumą. Kaip matyti iš rezultatų, jeigu lyginant naudojamas totalus fokusavimo metodus, tai rezultatai iš objekto vidaus turi prastą šoninę rezoliuciją. Banguoto bandomo atveju defekto pozicijas dalinai įmanoma nustatyti. Žemiau parodytoje lentelėje pateikti skaitiniai eksperimento duomenys.

5.2 lentelė. Rekonstrukcijos klaidos palyginimas su etalonu

Objektas	Defekto (SDH) pozicijos nuokrypis nuo CAD modelio, (Ax, Ay) mm					
	SDH1	SDH2	SDH3	SDH4	SDH5	SDH6
5.1a (5.10)	(-39,53, 20,80)	(-29,64, -15,63)	(-19,61, -10,42)	(-9,76, -5,21)	(0,0, 0,0)	(9,85, -8,25)
5.1b (5.11)	(-37,30, -19,63)	(-27,65, -14,95)	(-19,34, -10,16)	(-10,41, -5,21)	(0,0, 0,0)	(8,33, -7,7)
5.1c (5.12)	~	~	~	~	(0,0, 0,0)	~

Kaip matoma iš lentelės, defekto pozicijų tikslumui pasiekti galima 2 mm paklauda, šią klaidą galima dar labiau sumažinti, turint tikslesnius aplinkos parametrus, kartu su papildomais triukšmų pašalinimo metodais.

IŠVADOS

1. Iš atliktos metodų analizės galima pastebėti, kad tiesioginių algoritmų, skirtų defektoskopijai dirbant su nereguliariaisiais paviršiais, nėra. Atliekant literatūros apžvalgą, peržiūrėjus metodus galima suskirstyti į dvi grupes: 1) metodai, kuriems reikalinga taškinio reflektoriaus prielaida, nekoreliuoti signalai ir 2) metodai, kuriems nereikia šios prielaidos. Tačiau, atlikus analizę, daugelis metodų reikalavo taškinio reflektoriaus prielaidos ir vis dėlto reikėjo atlikti detalesnę analizę tinkamiems algoritmams, kai fokusavimas atliekamas objektams su nereguliaruoju paviršiumi.
2. Atlikus tyrimą, skirtą metodų, skirtų paviršiui atkurti, paieškai, buvo sukurtas metodas TFM algoritmo pagrindu, kuris prastai atkurtus duomenis papildomai interpoliuoja, naudodamas B-spline kreivę. Toks pasiūlymas turi tą privalumą, kad jį įgyvendinant susiduriama su mažiausiais sunkumų.
3. Sukurtas defektų atkūrimo metodas 2D erdvei objektams su sudėtingu paviršiumi. Atliekant tyrimus pastebėta, kad tiesioginis Snello taisyklės taikymas neįmanomas dėl to, kad Snello taisyklė skaičiuoja akustinį kelią spinduliais (angl. *rays*). Tikslesnis modelis yra naudoti alfa formą, besiremiančią Huigenso sklidimo principu, nors metodas yra iteratyvus ir naudoja apskritiminį sferinį modelį, dėl kurio atsiranda papildoma klaida, bet vis dėlto garso greitis daro kur kas didesnę įtaką.
4. Atliekant skaitinę verifikaciją, buvo pasirinkti dviejų tipo skaitiniai eksperimentai dėl skaičiavimo resursų apribojimų. Pirmiausia, naudojantis BEM metodais, buvo pademonstruotas akustinis bangos sklidimo kelias, kai objektas turi sudėtingą paviršių. Po to, naudojantis CIVA, atlikus skaitinius eksperimentus, buvo parodyta, kad metodas gali atkurti defektų pozicijas 2 mm tikslumu.

5. Atlikus eksperimentinę verifikaciją naudojantis „Dasel Sitau“ įranga, nustatyta, kad galima atkurti defektų pozicijas 2 mm tikslumu, kai turime tikslų garso greitį, tačiau, esant ribiniams objektų atvejams, reikia atlaidžiau žiūrėti į šoninę rezoliuciją.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

- [1] G.-R. Gillich and Z.-I. Praisach, “Modal identification and damage detection in beam-like structures using the power spectrum and time–frequency analysis,” *Signal Processing*, vol. 96, pp. 29–44, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.sigpro.2013.04.027.
- [2] A. Katunin, K. Dragan, and M. Dziendzikowski, “Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques,” *Composite Structures*, vol. 127, pp. 1–9, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.
- [3] *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2016.
- [4] S. J. Davies, C. Edwards, G. S. Taylor, and S. B. Palmer, “Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 26, no. 3, p. 329, 1993, doi: 10.1088/0022-3727/26/3/001.
- [5] K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Ebihara, “Introduction of measurement techniques in ultrasonic electronics: Basic principles and recent trends,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 7S1, p. 07KA02, Jul. 2016, doi: 10.7567/JJAP.55.07KA02.
- [6] S. Okada, O. Nakamura, and Y. Esaki, “Development and commercialization of laser inspection system to detect surface flaws of machined holes,” p. 13, 2018.
- [7] X. Dong, C. J. Taylor, and T. F. Cootes, “Automatic Inspection of Aerospace Welds Using X-Ray Images,” in *2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Beijing, Aug. 2018, pp. 2002–2007, doi: 10.1109/ICPR.2018.8545738.
- [8] M. Kageyama *et al.*, “X-ray phase-imaging scanner with tiled bent gratings for large-field-of-view nondestructive testing,” *NDT & E International*, vol. 105, pp. 19–24, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ndteint.2019.04.007.
- [9] T. D. Rossing, Ed., *Springer handbook of acoustics*. New York, N.Y.: Springer, 2007.
- [10] N. Ida and N. Meyendorf, *Handbook of advanced nondestructive evaluation*. 2019.
- [11] A. G. J. Besson, “Imaging from Echoes: On Inverse Problems in Ultrasound,” p. 236.
- [12] M. Fink, Ed., *Imaging of complex media with acoustic and seismic waves*. Berlin ; New York: Springer, 2002.
- [13] T. E. García, B. Arroyo, C. Rodríguez, F. J. Belzunce, and J. A. Álvarez, “Small punch test methodologies for the analysis of the hydrogen embrittlement of structural steels,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 86, pp. 89–100, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.tafmec.2016.09.005.
- [14] S. Le Roux, M. Salem, and A. Hor, “Improvement of the bridge curvature method to assess residual stresses in selective laser melting,” *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 320–329, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.025.
- [15] R. Coray, M. Zeltner, and M. Özcan, “Fracture strength of implant abutments after fatigue testing: A systematic review and a meta-analysis,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 62, pp. 333–346, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.05.011.
- [16] D. Liu and P. E. J. Flewitt, “Deformation and fracture of carbonaceous materials using in situ micro-mechanical testing,” *Carbon*, vol. 114, pp. 261–274, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.carbon.2016.11.084.
- [17] R. Madjitey, H. Thomson, C. M. E. Simpson, D. M. Frigo, and G. M. Graham, “Corrosion Testing in Moderate and Ultra High Shear Production Environments,” in *SPE International*

- Oilfield Corrosion Conference and Exhibition*, Aberdeen, Scotland, UK, 2018, doi: 10.2118/190906-MS.
- [18] W. Du, Y. Zhao, R. Roy, S. Addepalli, and L. Tinsley, "A review of miniaturised Non-Destructive Testing technologies for in-situ inspections," *Procedia Manufacturing*, vol. 16, pp. 16–23, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.152.
- [19] W. Harara and A. Altahan, "Attempt Towards the Replacement of Radiography with Phased Array Ultrasonic Testing of Steel Plate Welded Joints Performed on Bridges and Other Applications," *Russ J Nondestruct Test*, vol. 54, no. 5, pp. 335–344, May 2018, doi: 10.1134/S1061830918050054.
- [20] M. Zielińska and M. Rucka, "Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography," *Materials*, vol. 11, no. 12, p. 2543, Dec. 2018, doi: 10.3390/ma11122543.
- [21] M. Pérez-Liva, J. L. Herraiz, J. M. Udías, E. Miller, B. T. Cox, and B. E. Treeby, "Time domain reconstruction of sound speed and attenuation in ultrasound computed tomography using full wave inversion," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, no. 3, pp. 1595–1604, Mar. 2017, doi: 10.1121/1.4976688.
- [22] J. A. Brown and G. R. Lockwood, "Low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 49, no. 6, pp. 848–851, Jun. 2002, doi: 10.1109/TUFFC.2002.1009345.
- [23] H. Peng, J. Sabate, and K. Wall, "High frequency GaN-based ultrasound pulse generator for high energy delivery," in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 2017, pp. 1652–1658, doi: 10.1109/APEC.2017.7930921.
- [24] L. Svilainis, A. Chaziachmetovas, and V. Dumbrava, "Half bridge topology 500V pulser for ultrasonic transducer excitation," *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 79–85, May 2015, doi: 10.1016/j.ultras.2015.01.014.
- [25] J. M. G. Borsboom, C. T. Chin, A. Bouakaz, M. Versluis, and N. de Jong, "Harmonic chirp imaging method for ultrasound contrast agent," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, no. 2, pp. 241–249, Feb. 2005, doi: 10.1109/TUFFC.2005.1406550.
- [26] S. Harput, J. McLaughlan, D. M. J. Cowell, and S. Freear, "Superharmonic imaging with chirp coded excitation: filtering spectrally overlapped harmonics," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 61, no. 11, pp. 1802–1814, Nov. 2014, doi: 10.1109/TUFFC.2014.006424.
- [27] C. P. Karunakaran and M. L. Oelze, "Amplitude modulated chirp excitation to reduce grating lobes and maintain ultrasound intensity at the focus of an array," *Ultrasonics*, vol. 53, no. 7, pp. 1293–1303, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.ultras.2013.03.014.
- [28] J.-F. Cardoso and A. Souloumiac, "Blind beamforming for non-Gaussian signals," in *IEEE proceedings F (radar and signal processing)*, 1993, vol. 140, pp. 362–370.
- [29] L. Demi, J. Viti, L. Kusters, F. Guidi, P. Tortoli, and M. Mischi, "Implementation of parallel transmit beamforming using orthogonal frequency division multiplexing-achievable resolution and interbeam interference," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 60, no. 11, pp. 2310–2320, Nov. 2013, doi: 10.1109/TUFFC.2013.6644735.
- [30] P. Gong, P. Song, and S. Chen, "Ultrafast Synthetic Transmit Aperture Imaging Using Hadamard-Encoded Virtual Sources With Overlapping Sub-Apertures," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 36, no. 6, pp. 1372–1381, Jun. 2017, doi: 10.1109/TMI.2017.2687400.
- [31] M. Inerfield, G. R. Lockwood, and S. L. Garverick, "A sigma-delta-based sparse synthetic aperture beamformer for real-time 3-D ultrasound," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 49, no. 2, pp. 243–254, Feb. 2002, doi: 10.1109/58.985708.

- [32] G. Matrone, A. Ramalli, A. S. Savoia, P. Tortoli, and G. Magenes, "High Frame-Rate, High Resolution Ultrasound Imaging With Multi-Line Transmission and Filtered-Delay Multiply And Sum Beamforming," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 36, no. 2, pp. 478–486, Feb. 2017, doi: 10.1109/TMI.2016.2615069.
- [33] R. Y. Chiao and Xiaohui Hao, "Coded excitation for diagnostic ultrasound: a system developer's perspective," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 52, no. 2, pp. 160–170, Feb. 2005, doi: 10.1109/TUFFC.2005.1406543.
- [34] "M2M Gekko®," [Online]. Available: https://eddyfi.com/doc/Downloadables/201906_M2M-GEKKO-specifications-sheet_A4-01.pdf.
- [35] "SITAU MX FP," [Online]. Available: <http://www.daselsistemas.com/en/products/phasedarray/full-parallel>.
- [36] "OmniScan MX2," [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx2/>.
- [37] J. F. Cruza and J. Camacho, "Total Focusing Method With Virtual Sources in the Presence of Unknown Geometry Interfaces," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 63, no. 10, pp. 1581–1592, Oct. 2016, doi: 10.1109/TUFFC.2016.2593439.
- [38] C. Holmes, B. Drinkwater, and P. Wilcox, "The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 46, no. 11, pp. 677–680, Nov. 2004, doi: 10.1784/insi.46.11.677.52285.
- [39] A. J. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, "The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 55, no. 11, pp. 2450–2462, Nov. 2008, doi: 10.1109/TUFFC.952.
- [40] E. A. Marengo, F. K. Gruber, and F. Simonetti, "Time-Reversal MUSIC Imaging of Extended Targets," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 8, pp. 1967–1984, Aug. 2007, doi: 10.1109/TIP.2007.899193.
- [41] M. Mozaffarzadeh, A. Mahloojifar, and M. Orooji, "Medical photoacoustic beamforming using minimum variance-based delay multiply and sum," in *Digital Optical Technologies 2017*, 2017, vol. 10335, p. 1033522.
- [42] "Eigenspace-based minimum variance beamforming applied to medical ultrasound imaging - IEEE Journals & Magazine." <http://ieeexplore.ieee.org/document/5611687/#full-text-section> (accessed Mar. 05, 2018).
- [43] D. L. Hopkins, M. Brassard, G. A. Neau, J.-N. Noiret, W. V. Johnson, and L. Le Ber, "Surface-Adaptive Ultrasound (SAUL) for phased-array inspection of composite specimens with curved edges and complex geometry," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1511, no. 1, pp. 809–816, Jan. 2013, doi: 10.1063/1.4789128.
- [44] M. Sutcliffe, M. Weston, P. Charlton, K. Donne, B. Wright, and I. Cooper, "Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 55, no. 6, pp. 297–301, Jun. 2013, doi: 10.1784/insi.2012.55.6.297.
- [45] M. Weston, P. Mudge, C. Davis, and A. Peyton, "Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using Full Matrix Capture," *NDT & E International*, vol. 47, pp. 43–50, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.10.006.
- [46] A. J. Devaney, E. A. Marengo, and F. K. Gruber, "Time-reversal-based imaging and inverse scattering of multiply scattering point targets," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118, no. 5, pp. 3129–3138, Nov. 2005, doi: 10.1121/1.2042987.
- [47] C. Fan, M. Pan, F. Luo, and B. W. Drinkwater, "Multi-frequency time-reversal-based imaging for ultrasonic nondestructive evaluation using full matrix capture," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 61, no. 12, pp. 2067–2074, Dec. 2014, doi: 10.1109/TUFFC.2014.006574.

- [48] M. Fink, "Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 39, no. 5, pp. 555–566, Sep. 1992, doi: 10.1109/58.156174.
- [49] C. Prada, J. Thomas, and M. Fink, "The iterative time reversal process: Analysis of the convergence," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, no. 1, pp. 62–71, Jan. 1995, doi: 10.1121/1.412285.
- [50] B. M. Asl and A. M. Deylami, "A low complexity minimum variance beamformer for ultrasound imaging using dominant mode rejection," *Ultrasonics*, vol. 85, pp. 49–60, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ultras.2017.12.012.
- [51] R. G. Lorenz and S. P. Boyd, "Robust minimum variance beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 5, pp. 1684–1696, May 2005, doi: 10.1109/TSP.2005.845436.
- [52] M. Mozaffarzadeh, A. Mahloojifar, M. Nasirivanaki, and M. Orooji, "Eigenspace-based minimum variance adaptive beamformer combined with delay multiply and sum: experimental study," in *Photonics in Dermatology and Plastic Surgery 2018*, 2018, vol. 10467, p. 1046717.
- [53] M. Sutcliffe, P. Charlton, M. Weston, and S. Mosey, "Virtual source aperture imaging and calibration for ultrasonic inspections through dual-layered media for non-destructive testing," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 59, no. 11, pp. 596–602, Nov. 2017, doi: 10.1784/insi.2017.59.11.596.
- [54] P. S. Lowe, T. Scholehar, J. Yau, J. Kanfoud, T. H. Gan, and C. Selcuk, "Flexible Shear Mode Transducer for Structural Health Monitoring using Ultrasonic Guided Waves," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2775343.
- [55] K. Nakahata, S. Tokumasu, A. Sakai, Y. Iwata, K. Ohira, and Y. Ogura, "Ultrasonic imaging using signal post-processing for a flexible array transducer," *NDT & E International*, vol. 82, pp. 13–25, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2016.04.002.
- [56] T. C. Wu, M. Kobayashi, M. Tanabe, and C. H. Yang, "The Use of Flexible Ultrasound Transducers for the Detection of Laser-Induced Guided Waves on Curved Surfaces at Elevated Temperatures," *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1285, Jun. 2017, doi: 10.3390/s17061285.
- [57] S.-C. Wooh and Y. Shi, "Optimum beam steering of linear phased arrays," *Wave Motion*, vol. 29, no. 3, pp. 245–265, Apr. 1999, doi: 10.1016/S0165-2125(98)00039-0.
- [58] R. Bamler, "A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 4, pp. 706–713, Jul. 1992, doi: 10.1109/36.158864.
- [59] C. Fan, M. Caleap, M. Pan, and B. W. Drinkwater, "A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation," *Ultrasonics*, vol. 54, no. 7, pp. 1842–1850, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2013.12.012.
- [60] L.-J. Gelius and E. Asgedom, "Diffraction-limited imaging and beyond - the concept of super resolution‡: Diffraction-limited imaging and beyond," *Geophysical Prospecting*, vol. 59, no. 3, pp. 400–421, May 2011, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00928.x.
- [61] D. Garcia, L. L. Tarnec, S. Muth, E. Montagnon, J. Porée, and G. Cloutier, "Stolt's f-k migration for plane wave ultrasound imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 60, no. 9, pp. 1853–1867, Sep. 2013, doi: 10.1109/TUFFC.2013.2771.
- [62] P. Gupta and S. P. Kar, "MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival," in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Apr. 2015, pp. 0757–0761, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322593.

- [63] E. A. Marengo and F. K. Gruber, "Subspace-Based Localization and Inverse Scattering of Multiply Scattering Point Targets," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, no. 1, Dec. 2006, doi: 10.1155/2007/17342.
- [64] M. Fink, G. Montaldo, and M. Tanter, "Time reversal acoustics," in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2004*, Aug. 2004, vol. 2, pp. 850-859 Vol.2, doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417870.
- [65] P. Sava and B. Biondi, "Wave-equation migration velocity analysis. I. Theory," *Geophysical Prospecting*, vol. 52, no. 6, pp. 593-606, doi: 10.1111/j.1365-2478.2004.00447.x.
- [66] F. Reverdy and G. Benoist, "Advantages and Complementarity of Phased-Array Technology and Total Focusing Method," p. 8.
- [67] J. Camacho, J. F. Cruza, C. Fritsch, and J. M. Moreno, "Automatic dynamic depth focusing for NDT," presented at the 40TH ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Baltimore, Maryland, USA, 2014, pp. 57-64, doi: 10.1063/1.4864802.
- [68] O. Nowers, D. J. Duxbury, and B. W. Drinkwater, "Ultrasonic array imaging through an anisotropic austenitic steel weld using an efficient ray-tracing algorithm," *NDT & E International*, vol. 79, pp. 98-108, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.12.009.
- [69] Y. H. Hu and S.-Y. Kung, "Systolic Arrays," in *Handbook of Signal Processing Systems*, S. S. Bhattacharyya, E. F. Deprettere, R. Leupers, and J. Takala, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 939-977.
- [70] S. R. Doctor, T. E. Hall, and L. D. Reid, "SAFT — the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing," *NDT International*, vol. 19, no. 3, pp. 163-167, Jun. 1986, doi: 10.1016/0308-9126(86)90105-7.
- [71] B. Lam, M. Price, and A. P. Chandrakasan, "An ASIC for Energy-Scalable, Low-Power Digital Ultrasound Beamforming," in *2016 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*, Oct. 2016, pp. 57-62, doi: 10.1109/SiPS.2016.18.
- [72] N. Quaegebeur and P. Masson, "Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit-receive array for Non-Destructive Evaluation," *Ultrasonics*, vol. 52, no. 8, pp. 1056-1064, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ultras.2012.08.017.
- [73] S. Tamano *et al.*, "Improvement of high-voltage staircase drive circuit waveform for high-intensity therapeutic ultrasound," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 7S1, p. 07KF17, Jun. 2016, doi: 10.7567/JJAP.55.07KF17.
- [74] T. Harrison, A. Sampaleanu, and R. J. Zemp, "S-sequence spatially-encoded synthetic aperture ultrasound imaging [Correspondence]," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 61, no. 5, pp. 886-890, May 2014, doi: 10.1109/TUFFC.2014.2979.
- [75] D. A. Kiefer, M. Fink, and S. J. Rupitsch, "Simultaneous Ultrasonic Measurement of Thickness and Speed of Sound in Elastic Plates Using Coded Excitation Signals," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 64, no. 11, pp. 1744-1757, Nov. 2017, doi: 10.1109/TUFFC.2017.2746900.
- [76] M. M. Betcke, B. T. Cox, N. Huynh, E. Z. Zhang, P. C. Beard, and S. R. Arridge, "Acoustic Wave Field Reconstruction From Compressed Measurements With Application in Photoacoustic Tomography," *IEEE Transactions on Computational Imaging*, vol. 3, no. 4, pp. 710-721, Dec. 2017, doi: 10.1109/TCI.2017.2706029.
- [77] E. Tiran *et al.*, "Multiplane wave imaging increases signal-to-noise ratio in ultrafast ultrasound imaging," *Phys. Med. Biol.*, vol. 60, no. 21, p. 8549, 2015, doi: 10.1088/0031-9155/60/21/8549.
- [78] T. Misaridis and J. A. Jensen, "Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part III: high frame rate imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and*

- Frequency Control*, vol. 52, no. 2, pp. 208–219, Feb. 2005, doi: 10.1109/TUFFC.2005.1406547.
- [79] “Analysis and Design of a High Voltage Integrated Class-B Amplifier for Ultra-Sound Transducers - IEEE Journals & Magazine.” <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6731600/> (accessed Mar. 29, 2018).
- [80] T. Fyleris and E. Jasiuniene, “Analytic Approach for 2D Phased Array Delay Law Calculation in Case of Inspection of Objects with Complex Geometry,” *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 25, no. 2, p. 4, 2019.
- [81] B. M. Asl and A. Mahloojifar, “Eigenspace-based minimum variance beamforming applied to medical ultrasound imaging,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 11, pp. 2381–2390, Nov. 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1706.
- [82] K. Ranganathan and W. F. Walker, “A novel beamformer design method for medical ultrasound. Part I: Theory,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 50, no. 1, pp. 15–24, Jan. 2003, doi: 10.1109/TUFFC.2003.1176522.
- [83] K. E. Thomenius, “Evolution of ultrasound beamformers,” in *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, Nov. 1996, vol. 2, pp. 1615–1622 vol.2, doi: 10.1109/ULTSYM.1996.584398.
- [84] D. Bera, J. G. Bosch, M. D. Verweij, N. de Jong, and H. J. Vos, “Dual stage beamforming in the absence of front-end receive focusing,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 62, no. 16, p. 6631, 2017, doi: 10.1088/1361-6560/aa78df.
- [85] G. Matrone, A. Ramalli, P. Tortoli, and G. Magenes, “Experimental evaluation of ultrasound higher-order harmonic imaging with Filtered-Delay Multiply And Sum (F-DMAS) non-linear beamforming,” *Ultrasonics*, vol. 86, pp. 59–68, May 2018, doi: 10.1016/j.ultras.2018.01.002.
- [86] G. Matrone, A. S. Savoia, G. Caliano, and G. Magenes, “The Delay Multiply and Sum Beamforming Algorithm in Ultrasound B-Mode Medical Imaging,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 34, no. 4, pp. 940–949, Apr. 2015, doi: 10.1109/TMI.2014.2371235.
- [87] G. Matrone, A. S. Savoia, G. Caliano, and G. Magenes, “Ultrasound plane-wave imaging with delay multiply and sum beamforming and coherent compounding,” in *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Aug. 2016, pp. 3223–3226, doi: 10.1109/EMBC.2016.7591415.
- [88] M. Mozaffarzadeh, A. Mahloojifar, M. Orooji, S. Adabi, and M. Nasirivanaki, “Double-Stage Delay Multiply and Sum Beamforming Algorithm: Application to Linear-Array Photoacoustic Imaging,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 31–42, Jan. 2018, doi: 10.1109/TBME.2017.2690959.
- [89] H. Hasegawa, “Apodized adaptive beamformer,” *J Med Ultrasonics*, vol. 44, no. 2, pp. 155–165, Apr. 2017, doi: 10.1007/s10396-016-0764-3.
- [90] J. A. Jensen and N. B. Svendsen, “Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 39, no. 2, pp. 262–267, Mar. 1992, doi: 10.1109/58.139123.
- [91] M. Ochmann, “Exact solution for the acoustical impulse response of a line source above an absorbing plane,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 144, no. 3, pp. 1539–1549, Sep. 2018, doi: 10.1121/1.5054301.
- [92] M. L. Diong, A. Roueff, P. Lasaygues, and A. Litman, “Impact of the Born approximation on the estimation error in 2D inverse scattering,” *Inverse Problems*, vol. 32, no. 6, p. 065006, Jun. 2016, doi: 10.1088/0266-5611/32/6/065006.
- [93] T. S. Jerome, Y. A. Ilinskii, E. A. Zabolotskaya, and M. F. Hamilton, “Acoustic radiation force and torque on nonspherical scatterers in the Born approximation,” presented at the

- 21st International Symposium on Nonlinear Acoustics, Santa Fe, New Mexico, USA, 2018, p. 045013, doi: 10.1121/2.0000858.
- [94] T. S. Jerome, Y. A. Ilinskii, E. A. Zabolotskaya, and M. F. Hamilton, “Born approximation of acoustic radiation force and torque on soft objects of arbitrary shape,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 145, no. 1, pp. 36–44, Jan. 2019, doi: 10.1121/1.5084045.
- [95] W. M. Brown and L. J. Porcello, “An introduction to synthetic-aperture radar,” *IEEE Spectrum*, vol. 6, no. 9, pp. 52–62, Sep. 1969, doi: 10.1109/MSPEC.1969.5213674.
- [96] H. J. Callow, M. P. Hayes, and P. T. Gough, “Wavenumber domain reconstruction of SAR/SAS imagery using single transmitter and multiple-receiver geometry,” *Electronics Letters*, vol. 38, no. 7, pp. 336–338, Mar. 2002, doi: 10.1049/el:20020219.
- [97] I. G. Cumming, “Interpretations of the Omega-K Algorithm and Comparisons with other Algorithms,” p. 4.
- [98] H. Jung, W. Kang, and K. Kim, “Multilayer Stolt Migration Algorithm for Subsurface Target Imaging in Oblique Layers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, pp. 4295–4303, Oct. 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2615867.
- [99] M. H. Skjelvareid, T. Olofsson, Y. Birkelund, and Y. Larsen, “Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-K algorithm,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 58, no. 5, pp. 1037–1048, May 2011, doi: 10.1109/TUFFC.2011.1904.
- [100] R. Stolt, “Migration by fourier transform,” *GEOPHYSICS*, vol. 43, no. 1, pp. 23–48, Feb. 1978, doi: 10.1190/1.14440826.
- [101] Y. Labyed and L. Huang, “Super-resolution ultrasound imaging using a phase-coherent MUSIC method with compensation for the phase response of transducer elements,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 60, no. 6, pp. 1048–1060, Jun. 2013, doi: 10.1109/TUFFC.2013.2669.
- [102] Zhisong Wang, Jian Li, and Renbiao Wu, “Time-delay- and time-reversal-based robust capon beamformers for ultrasound imaging,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 24, no. 10, pp. 1308–1322, Oct. 2005, doi: 10.1109/TMI.2005.857222.
- [103] G. Montaldo, M. Tanter, J. Bercoff, N. Benech, and M. Fink, “Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, no. 3, pp. 489–506, Mar. 2009, doi: 10.1109/TUFFC.2009.1067.
- [104] T. J. Ypma, “Historical Development of the Newton–Raphson Method,” *SIAM Review*, vol. 37, no. 4, pp. 531–551, Dec. 1995, doi: 10.1137/1037125.
- [105] A. Tumeo, N. Gawande, and O. Villa, “A Flexible CUDA LU-Based Solver for Small, Batched Linear Systems,” in *Numerical Computations with GPUs*, V. Kindratenko, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 87–101.
- [106] L. Le Jeune, S. Robert, P. Dumas, A. Membre, and C. Prada, “Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1650, no. 1, pp. 1037–1046, Mar. 2015, doi: 10.1063/1.4914712.
- [107] T. K. F. Da, “2D Alpha Shapes,” in *CGAL User and Reference Manual*, 4.14., CGAL Editorial Board, 2019.
- [108] T. K. F. Da, S. Lorient, and M. Yvinec, “3D Alpha Shapes,” in *CGAL User and Reference Manual*, 4.14., CGAL Editorial Board, 2019.
- [109] H. Edelsbrunner, D. Kirkpatrick, and R. Seidel, “On the shape of a set of points in the plane,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 29, no. 4, pp. 551–559, Jul. 1983, doi: 10.1109/TIT.1983.1056714.
- [110] H. Edelsbrunner and E. P. Mücke, “Three-dimensional Alpha Shapes,” p. 32.

- [111] K. Fischer, "Introduction to alpha shapes," *Department of Information and Computing Sciences, Faculty of Science, Utrecht University*, vol. 17, 2000.
- [112] P. Hachenberger, "Convex Decomposition of Polyhedra," in *CGAL User and Reference Manual*, 4.14., CGAL Editorial Board, 2019.
- [113] S. Hert and S. Schirra, "2D Convex Hulls and Extreme Points," in *CGAL User and Reference Manual*, 4.14., CGAL Editorial Board, 2019.
- [114] S. Hert and M. Seel, "dD Convex Hulls and Delaunay Triangulations," in *CGAL User and Reference Manual*, 4.14., CGAL Editorial Board, 2019.
- [115] B. Byram, "Aperture Domain Model Image REconstruction (ADMIRE) for improved ultrasound imaging," in *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, New Orleans, LA, Mar. 2017, pp. 6250–6253, doi: 10.1109/ICASSP.2017.7953358.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai, paskelbti „Clarivate Analytics / Web of Science“ pagrindinio sąrašo leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. **Fyleris, Tautvydas;** Jasiūnienė, Elena. Comparative analysis of plane-wave imaging and the total focusing method in the reconstruction of complex geometrical surfaces // *Surface topography: metrology and properties*. Bristol : IOP Publishing. ISSN 2051-672X. eISSN 2051-672X. 2019, vol. 7, iss. 3, art. no. 035011, p. [1-9]. DOI: 10.1088/2051-672X/ab383d. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus] [IF: 2,439; AIF: 3,562; IF/AIF: 0,684; Q2 (2018, InCites JCR SCIE)] [CiteScore: 2,88; SNIP: 1,731; SJR: 0,774; Q1 (2018, Scopus Sources)] [FOR: T 010, T 001] [Input: 0,500]
2. **Fyleris, Tautvydas;** Jasiūnienė, Elena. Analytic approach for 2D phased array delay law calculation in case of inspection of objects with complex geometry // *Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering*. Kaunas : Technologija. ISSN 1392-1215. eISSN 2029-5731. 2019, vol. 25, iss. 2, p. 28-31. DOI: 10.5755/j01.eie.25.2.23200. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; Computers & Applied Sciences Complete] [IF: 0,684; AIF: 3,195; IF/AIF: 0,214; Q4 (2018, InCites JCR SCIE)] [CiteScore: 0,81; SNIP: 0,488; SJR: 0,182; Q3 (2018, Scopus Sources)] [FOR: T 001] [Input: 0,500]

Tezės mokslinių konferencijų pranešimų leidiniuose

1. **Fyleris, Tautvydas;** Jasiūnienė, Elena. The development of ultrasonic adaptive method for inspection of objects with complex geometry : poster // *Open readings 2019: 62nd international conference for students of physics and natural sciences*, March 19-22, Vilnius, Lithuania: abstract book. Vilnius : Vilnius University, 2019, P3-60. ISBN 9786090701379. p. 336. Prieiga per internetą: <http://www.openreadings.eu/thesismanager/thesis19/P3-60.pdf> [žiūrėta 2019-03-28].
2. **Fyleris, Tautvydas;** Jasiūnienė, Elena. Analytic approach for 2D phased array delay law calculation in case of inspection of objects with complex geometry //

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Tautvydas Fyleris gime 1989m. Vilkaviškyje

Išsilavinimas:

- 2014-2019 m. – elektros ir elektronikos inžinerijos (T 001) doktorantas, Kauno technologijos universitetas.
- 2014 m. – informatikos mokslų magistro laipsnis.
- 2012 m. – informatikos programų inžinerijos bakalauro laipsnis.
- 2008 m. – vidurinis, Vištyčio Petro Kriaučiūno vidurinė mokykla.

Darbo patirtis:

- 2018 m. – Kauno technologijos universitetas, programų inžinerijos katedra, lektorius.
- 2016 m. – Kauno technologijos universitetas, programų inžinerijos katedra, asistentas.

Mokslinių interesų kryptys

Signalų apdorojimo metodai, objektų nehomogeniškumo nustatymo algoritmai paremti analitinės prieigos ir skaitinių optimizavimo metodų sąjunga.

El. Paštas: tautvydas.fyleris@ktu.lt.

ABSTRACT

The inspection of various components for defects or structural integrity is a critical procedure for such industries as aerospace, construction, or nuclear energy [1]–[3]. There are many inspection methods employed, such as using a laser [4]–[6], X-ray [7], [8], destructive testing [9]–[13] or acoustic ultrasound [5], [14]–[17]. All the presently mentioned methods have their strengths and weaknesses, and the selection of a specific method usually depends on the working environment. For example, in the case of inspection of larger structures, such as bridges, the X-ray probably will not work effectively. For practical *in-situ* inspections, portable inspection methods must be used, and one of the most widely used techniques is ultrasound testing (UT). With current advancements in technology miniaturization [18], probes and devices can be easily handled, which is advantageous in hard-to-reach places.

Comprehensive UT inspection [15], [18], [19] is a readily available method which has the advantage of not using ionizing radiation, offers relatively good penetration into an object, and can be electronically steered with phased array transducer.

As the defect inspection by using ultrasound can be summarized as interpreting reflected echoes [5] or the absence of them, the physical wavefront and reflection paths have to be known in order to extract the position information. As for the wave path propagation modeling, it is a complicated process when reflected data contains signals from the walls as well as structural noise. Additionally, an acoustic wave need to cross the boundary between testing the object and the environment (water or air) which can be complex, irregular, or organically shaped, where the direct analytic approach for the path model is not practical [20]. It is one of UT inspection problems which is not fully answered when it is necessary to have good penetration and information on the position.

The central part of UT inspection is signal generation and, then, listening to echoes. There are two standard modes for signal transmission and reception: using the same transducer for emission and reception (pulse-echo), and the pitch-catch mode where different sensors are used for the emission and reception or various combinations of them for ultrasonic tomography [21], [22]. As for pulse generation, various types are proposed, such as the Gaussian pulse [23]–[25], chirp (signal sweep) [26]–[28] or a complex modulated signal [29]–[33]. One of the most popular options is the Barker code [34], and, if used with multiple transducers (such as the phased array), emission can be made with various combinations of signals. As for quick classification acoustic emission, it can be divided into modulated and unmodulated signals. In the commercial equipment (such as *Gekko M2M* [35], *Dasel SITAU* [36], *Omniscan MX2* [37]), usually, signals are limited to the Gaussian pulse with time delay because of cost considerations [23].

In order to obtain good inspection results, knowledge of the accurate acoustic path of the signal is needed. For an object without planar surfaces (such as being of an organic shape), the path can be very complicated, and there is no easy direct analytic method to calculate it; yet, Snell's law can provide correct angles. One of the reasons is that the Snell law only gives results for a single ray angle or a wavefront, while completely ignoring the wave spread. Another reason is that the reflected signal can have multiple signal paths back to the sensor. Although, for regular geometry inspections, methods have already been developed [38]–[43], they assume that the boundary between the object and coupling medium is flat, or at least surface deviation will have little impact. When refraction or mode change effects have a significant influence on the interpretation of echoes, inspection can be reduced to finding the presence of defects by using autofocusing methods [44]–[46] or by using only B-scan raw data. On the other hand, autofocusing without external information will only concentrate energy on to the reflector. Various methods can achieve this, such as Time Reversal (TR) [47]–[50], or Minimum variance (MV) focusing [42], [51]–[53]. In other words, the knowledge of the object boundary surface morphology is required in order to find accurate information about a defect.

A flexible UT inspection solution is to use phased arrays as it is possible to create a universal inspection method [38], [44], [45], [54]. First, the transducer can be flexible and can be held against an object's surface [55]–[57]. However, as mentioned before, tracing back the position information of reflections (defects, object bottom or sides) is not a trivial problem. Another form of phased transducer flexibility comes from the fact that focusing in practice is energy concentration, as the main job of an acoustic lens is to delay a wave's traveling time enough to concentrate energy in the area of interest. Focusing can then be achieved by using electronic steering [58], which alleviates the problem of creating various-shaped physical lenses, albeit with a lower reception quality.

Fortunately, when using phased arrays, the interpretation of echoes becomes more extensive due to the ability to record and send signals from different physical positions and because of the employment of various mathematical processing methods. Yet, there is a configuration of the object surface curvature where it is physically impossible to have a sensible reflection, even with a phased array where a wide range of signals can be detected. However, in practice, when there is little or no information about reflection, an assumption is made that acoustic waves will reflect as if from an infinitely small point in all directions with the same amplitude [40], [59]–[61]. It is a mathematical simplification of wave propagation which can be derived from wave equations, and it is known in literature as the exploding reflector model (ERM) [47], [52], [62]–[64]. It works perfectly for reconstructing reflections when there is only one medium of information that can be reconstructed by using straightforward mathematics and when there is only one inversion solution. Hence, in practice, any focusing method can be used, such as frequency domain-based or statistics-based methodologies, which dramatically decrease the computing time. However, these methods start to provide false results when the defect's response signals are correlated and cannot be easily separated, or when there is a reflection from walls which forms multi-path reflections – in other words, there is no one-to-one mapping relationship between signal timings. This problem becomes more complex when more prominent distortion occurs in acoustic waves due to non-regular surfaces. One of the more straightforward solutions is to filter weaker multi-path signals and only work with the strongest one or few signals, but it is not always possible to reliably separate different signals [65], [66].

A solution when there is substantial interference from multipath and irregular curvature is a complex problem which is not yet entirely solved. One of the solutions is, as discussed earlier, to calculate the acoustic path between water (for the case of immersion) and the object's surface, e.g., when performing the measurement with the adaptive total focusing method (ATFM) with an assumption of the direct and single path [67]. Another method when trying to solve the adaptive part of the object is by using the virtual transducer model [31], [38], [54],

[68], [69]. The virtual transducer model is usually preferred when the objects for inspection have a relatively low curvature where there are no abrupt effects in acoustic propagation. For entirely irregular surfaces with a huge number of the multipath of rays, it is difficult to determine the acoustic path with minimal information. However, with phased arrays using many elements or with a wide aperture, it is possible to reconstruct objects with various curvatures.

Inspection of various objects by using only a phased array has the advantage of being able to fully reconstruct objects with non-planar surface profile at a relatively fast time. As it can be seen, one of the advantages of this model is that the inspection can be done *in-situ* and without knowledge of surface profile. Although there are commercial offerings for this type of problem, usually, it is still preferable to do a reconstruction of the surface with a low curvature related to the wavelength and to use a narrow aperture for the reconstruction of data.

Scientific, technological problem and working hypothesis

By using high-frequency immersion ultrasonic phased arrays (which have center frequency f between 1 MHz and 20 MHz), it is possible to achieve defect position coordinates with an uncertainty error of 1 mm in case of inspection of objects with non-planar surface curvature.

Research aim and objective

This research aims to develop methods for the reconstruction of the surface morphology and of the positions of defects by using phased arrays in case of investigating objects with complex geometry when wave propagation solutions are very complicated, or even impossible to solve, due to multiple acoustic paths.

The object of this research is the inspection of solid objects with non-planar surfaces by using high-frequency ultrasonic immersion phased array transducers, and *a priori* information is only the speed of sound in the surrounding medium and the object. The detection results yield the object surface model and the physical position of the defect.

Research tasks

1. Perform the literature review of ultrasonic methods for the detection of defects in objects with surfaces featuring complex geometry;
2. Create and investigate the method for the reconstruction of surface morphology;
3. Create and investigate the method for inner structure reconstruction when surface morphology information is algorithmically obtained;
4. Numerically verify the proposed methodology for surface morphology and volume reconstruction;
5. Experimentally verify the proposed methodology for object inspection and inner structure reconstruction.

Scientific novelty

In this thesis, a new methodology for the inspection of objects with non-regular surfaces is proposed, whereby the developed algorithm automatically adapts to the object surface morphology by using focused ultrasonic data from automatic environment probing. Robust methods are developed for the reconstruction of extreme surface curvature, although, practically, the volume reconstruction is not always possible. Methods are proposed for analytic reconstruction of the surface directly from signals. After gathering the surface morphology information, the inner structure of the object is reconstructed by using the proposed algorithm.

The practical value of the work

The created algorithms and the proposed methodology allow inspections in industry-relevant applications (defect characterization, high-temperature hydrogen attack, porosity detection) where localization information is necessary when a sample of interest features a non-regular surface without accurate computer model information, e.g., such technical components as: turbine blades, axles or other complex-shaped industrial parts.

Approbation

The results of the dissertation were published in two publications: two papers were published in the periodic foreign journals referred to in the *Journals of the Master List of Thomson Reuters Web of Science*. The results were also presented at two international scientific conferences.

Structure and content of the thesis

The thesis consists of an introduction, five chapters, general conclusions, the reference list, and a list of publications by the author. The dissertation chapters are organised as follows:

- In **Chapter 1**, a review of the standard methods for UT inspection and focusing is presented. The primary aim of the review is the investigation of the reconstruction of the position of defects in 2D space in the dual-medium environment.
- **Chapter 2** discusses and proposes a methodology for surface morphology reconstruction. It is divided into two parts: when an object can be of any form, such as organic forms, and created from planar segments.
- In **Chapter 3**, the characteristics and the proposed methodology are presented for the volume reconstruction of non-regularly shaped objects, and the methodology for numerical investigation is reviewed.
- In **Chapter 4**, numerical evaluation of the proposed methodology is presented, and the model accuracy is investigated with numerical experiments.

- In **Chapter 5**, the experimental investigation is presented with similar to real life samples, which enables to evaluate the proposed methodology.

The overall dissertation volume is 108 pages, including 43 figures, 17 tables, 76 formulas, and 251 bibliographic references.

General conclusions

1. Analysis of methods for the inspection of objects with complex surface morphology and volume reconstruction demonstrated that there are no straightforward algorithms to achieve reconstruction. As for the reflected signal interpretation, each method has its advantages and weaknesses as the methods can be divided into two groups by their reflection approximation assumption. Mainly, the investigated methods assume point size reflection with uncorrelated responses, and, when using a medium where the algebraic acoustic path calculation is possible, the values are easily calculated. Therefore, it is necessary to investigate the acoustic propagation in objects with a complex surface where the reflections are usually correlated.
2. After investigating the method for the surface morphology reconstruction, the developed method is based on TFM and uses FMC signal capturing. After TFM focusing, the data is interpreted by using a B-spline curve for low intensity reflection interpolation as, due to the complex nature of acoustic interactions, it is the least error-prone implementation, although if the surface can be approximated with the segment, an alternative approach can be proposed.
3. A method for 2D volume reconstruction for an object with complex geometry with a computer model has been created. The investigation shows that the acoustic path model uses analytic solution of Snell's law, although, for a more accurate model, Huygens principle needs to be used, particularly for the defects which are not perfectly aligned for Snell's law rays. A more accurate model is the α -shape based on Huygens principle propagation model. Although the method is iterative, its accuracy depends on the wave evolution time steps, and another point is that the number of emission circular wave fronts is used, which increases the error with the distance, and a higher impact in error stems from the speed of sound.
4. The numerical verification of the proposed method can be divided into two classes due to the limitation of computing resources. Initially, we used FEA analysis which provided the direct wavefront path in the numerical results, which demonstrated that the use of the proposed alpha shape algorithms is feasible. The second part of the numerical experiments with CIVA software yielded results that it is possible to achieve an accuracy level of 2mm.

5. Experimentally, the verification for object inspection and its inner structure reconstruction has been performed by using Dasel Sitau equipment. Our experiment shows that, with the use of the proposed methodology, it is possible to reconstruct the position of a defect in objects with a complex surface with 2 mm accuracy by using only the information on the speed of sound with relaxed lateral resolution requirements for extreme cases.

UDK 620.179.16 (043.3)

SL344. 2020-07-xx, 3,5 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas