

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
SISTEMINĖS ANALIZĖS KATEDRA

Gytis Kondratas

**Bangelių transformacijos panaudojimas
ultragarsiniams signalams apdoroti**

Magistro darbas

Darbo vadovas
prof. dr. L. Mažeika

Kaunas, 2004

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
SISTEMINĖS ANALIZĖS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas
(parašas) prof. habil. dr. R. Barauskas
2004 05

**Bangelių transformacijos panaudojimas
ultragarsiniams signalams apdoroti**

Informatikos mokslo magistro baigiamasis darbas

Kalbos konsultantė
Lietuvių kalbos katedros lektorė
(parašas) dr. J. Mikelionienė
2004 05

Vadovas
(parašas) prof. dr. L. Mažeika
2004 05

Recenzentas
(parašas) doc. dr. K. Plukas
2004 05

Atliko
IFM-8/1 gr. stud.
(parašas) G. Kondratas
2004 05

Kaunas, 2004

Turinys

<i>Summary</i>	5
<i>Sutrumpinimų sąrašas</i>	6
<i>Pratarmė</i>	7
<i>Įvadas</i>	8
1. Ultragarsinės introskopijos rezultatų tiesioginio vizualizavimo metodas	9
1.1 Ultragarsinė introskopija	9
1.2 Tiesioginio vizualizavimo būdai	10
1.3 Automatizuota neardomoji kontrolė	13
1.4 Ultragarsinės introskopijos veiksniai	13
1.5 Dažniausiai naudojami ultragarsinio signalo apdorojimo metodai	15
1.6 Bangelių transformacijos taikymai ultragarsinio signalo apdorojimui	16
1.7 Darbo tikslas	18
2. Bangelių transformacija	19
2.1 Signalų analizės metodų palyginimas	19
2.2 Bangelių apibrėžimas ir taikymo sritys	21
2.3 Begalinės detalizacijos analizė	22
2.4 Diskrečioji bangelių transformacija	25
2.5 Tolydžioji bangelių transformacija	28
2.6 Bangelių paketai	28
2.7 Daugiamatė bangelių transformacija	30
3. Akustinio vaizdo gerinimas	31
3.1 C tipo skenavimo vaizdo apdorojimo aspektai	31
3.2 Algoritmo aprašymas	31
3.3 Diskrečiosios bangelių transformacijos realizavimas	33
3.4 Aproximacijos koeficientų filtravimo slenksčio parinkimo kriterijus	35
3.5 Bangelių transformacijos efektyvumo tyrimas	37
4. Eksperimento rezultatai	43
4.1 Tiriamasis objektas	43
4.3 Bangelių transformacijos panaudojimas A tipo signalų apdorojimui	44
4.4 Bangelių tipo įtaka C tipo signalų apdorojimui	45
4.5 Bangelių transformacijos lygio įtaka C tipo signalų apdorojimui	48
4.6 Bangelių transformacijos panaudojimo C tipo signalų apdorojimui rezultatai	50
5. Išvados	51
<i>Literatūros sąrašas</i>	52

<i>Priedai</i>	55
1 Priedas. Bangelė Haar (Daub-1)	55
2 Priedas. Bangelė Daub-4	56
3 Priedas. Bangelė Daub-20	57
4 Priedas. Bangelė Sym-4	58
5 Priedas. Bangelė Coif-4	59
6 Priedas. Straipsnis „Vilnelių transformacijos panaudojimas ultragarsinių signalų apdorojimui“	60

Summary

The major task of imaging systems used in non-destructive testing is detection of defects (flaws, holes) echoes and evaluation of their dimensions and position. Images generated by direct imaging are poor quality due to diffraction, coherent echoes, limited capabilities of system, white noise. So acoustic images and optic images are very different. Solving these problems, numerical methods are used for signal processing and analysis.

An application for ultrasonic signal processing of wavelet transformations was investigated in the work. The investigation was signals distortion type and level when wavelets transformation may give effective results. The investigation was performed using modeling and signal processing of the experimental signals.

Sutrumpinimų sąrašas

ADBT – atvirkštinė diskrečioji bangelių transformacija

AGFT – atvirkštinė greitoji Furjė transformacija

BT – bangelių transformacija

DBT - diskrečioji bangelių transformacija

GFT – greitoji Furjė transformacija

KVD – kvadratūrinis veidrodinis filtras

MRA – multirezoliucinė analizė

PSA – padalyto spektro apdorojimas

SEF – statistinio eiliškumo filtras

STS – signalo ir triukšmų santykis

TBT – tolydžioji bangelių transformacija

Pratarmė

Ultragarsinėje neardomoje kontrolėje naudojamos automatizuotos vizualizavimo sistemos turi pavaizduoti aptiktus defektus ir nevienalytiškumus, nustatyti jų dydį ir vietą. Vaizdai, gaunami iš ultragarsinių signalų, be papildomo apdorojimo, esti nepakankamos kokybės dėl difrakcijos, interferencijos reiškinių, dėl struktūrinių triukšmų, naudojamos aparatūros ribotų galimybių, baltojo triukšmo. Dėl šių priežasčių objekto akustiniai ir optiniai vaizdai labai skiriasi. Šias problemas bandoma spręsti signalus apdorojant ir analizuojant skaitmeniniais metodais.

Siūlomas bangelių (*wavelet*) transformacija paremtas algoritmas medžiagos sandaros defektams išryškinti C skenavimo vaizduose. Informacijos apie defektus medžiagoje ieškoma dvimatės transformacijos aproksimacijos koeficientų vaizduose. Darbe atliekami eksperimentai su susintetintais duomenimis, bei gautais skenuojant tiriamąjį objektą. Siekiant sumažinti triukšmų įtaką ir vaizdo iškreipius C skenavimo vaizde, atlikta “pseudo trimatė” bangelių transformacija.

Siūloma nauja idėja ir algoritmas akustiniams C skenavimo vaizdams apdoroti atliekant “pseudo trimatę” bangelių transformaciją (vienmatė transformacija A-skenavimo signalui ir po to dvimatė C skenavimo vaizdui), bei panaudojant defektų signalų normalizaciją. Idėja grindžiama realiais eksperimentiniais rezultatais. Darbas buvo pristatytas 9-tojoje magistrantų ir doktorantų konferencijoje „Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos“ Vytauto Didžiojo universitete (žiur. 6 priedą).

Ivadas

Sudėtingų objektų kontrolei plačiai naudojami automatizuoti neardomosios kontrolės metodai, paremti ultragarsinių bangų sąveika su tiriamuoju objektu. Neardomoje kontrolėje naudojamos automatizuotos vizualizavimo sistemos turi atvaizduoti aptiktus defektus ir nevienalytiškumus, nustatyti jų dydį ir vietą. Vaizdai, gaunami tiesioginio vizualizavimo metodais, esti nepakankamos kokybės ir neatitinka šiuolaikinių reikalavimų. Neardomosios kontrolės informatyvumas gali būti pagerintas naudojant skaitmeninio signalo apdorojimo metodus. Tuo požiūriu gali būti ypač įdomus vienmatės arba dvimatės bangelių (*wavelet*) transformacijos panaudojimas priimtų ultragarsinių signalų analizei. Informacija apie objekto sandarą gali būti pagerinta, jei pagal objekto akustinį vaizdą sukursime objekto sandarą atitinkančią binarinę plokštumą, kurioje nebus vaizduojami foniniai ir interferenciniai triukšmai. Tam galėtų būti naudojama bangelių transformacija ir skirtingų transformacijos lygių koeficientų statistinė analizė.

Darbo tikslas – naudojant bangelių transformacijas, apdoroti ultragarsinius vienmačius signalus ir dvimačius vaizdus, siekiant aptikti ir išryškinti objekto sandaros nevienalytiškumus.

1. Ultragarsinės introskopijos rezultatų tiesioginio vizualizavimo metodas

1.1 Ultragarsinė introskopija

Neardomoji kontrolė yra pagrįsta introskopija – tai mokslo ir technikos šaka, nagrinėjanti objektų, neskaidrių optinėms bangoms, vidinės sandaros vizualizavimą. Šiuo metu naudojami įvairūs vidinės objektų sandaros vizualizavimo metodai: tiesioginis vizualizavimas, holografija ir tomografija [1, 3]. Tiesioginio vizualizavimo sistemos leidžia aptikti medžiagoje nevienalytiškumus, nustatyti defektų dydžius, pagerina neardomosios kontrolės našumą ir patikimumą. Jos naudojamos ypatingos svarbos gaminių ir mazgų neardomajai kontrolei: atominėje energetikoje, aviacijos pramonėje ir kitur [1].

Ultragarsiniu tiriamojo objekto vaizdu vadinamas optinis vaizdo ekvivalentas, kuriame ryškumas arba spalva vaizduoja akustines objekto savybes [1, p.137]. Kadangi kiekviena terpė apibūdinama skirtingais akustiniais parametrais [1, p.139, 2, p.105-108] – ultragarso bangų sklidimo greičiu ir slopinimu, akustine varža, atspindžio ir virsmo koeficientais – tam pačiam tiriamajam objektui gali būti gauta keletas skirtingų ultragarsinių vaizdų.

Informacija apie objekto sandarą gaunama sąveikaujant ultragarsui su tiriamuoju objektu [1, p.140]. Kadangi šios sąveikos pobūdis labai skiriasi nuo optinės spinduliuotės sąveikos su objektu, optiniai ir ultragarso vaizdai taip pat skiriasi. Ultragarsinis vaizdas gaunamas dėl atskirų tiriamojo objekto vietų skirtingo akustinio impedanso. Dviejų aplinkų riboje su skirtingais akustiniais impedansais bangos atsispindi, dalis praeina [2, p.108-118; 3].

1.2 Tiesioginio vizualizavimo būdai

Tiesioginio vizualizavimo sistemose plačiai paplitęs objekto nuoseklaus apspinduliavimo metodas. Tam naudojamas ultragarsinis signalas, kurio padėtis nuosekliai keičiama erdvėje. Toks procesas vadinamas skenavimu [1, p.132; 3]. Skenavimas susijęs su gaunamo akustinio vaizdo matavimo skaičiumi. Akustinis vaizdas gali būti vienmatis, dvimatis ir trimatis. Vienmačiai vaizdai gaunami amplitudinio skenavimo metodu (A skenavimas), dvimačiai – B skenavimo, trimatis – C skenavimo metodais [1, p.154].

A tipo signalo gavimui į tiriamąjį objektą pasiunčiamas trumpas ultragarsinis signalas impulsiniu režimu. Impulsas, sklisdamas objektu, nuosekliai atsispindi nuo sandaros nelygumų ir yra priimamas imtuvo (keitiklio). Atsispindėjusių signalų sklidimo laikas nusakomas

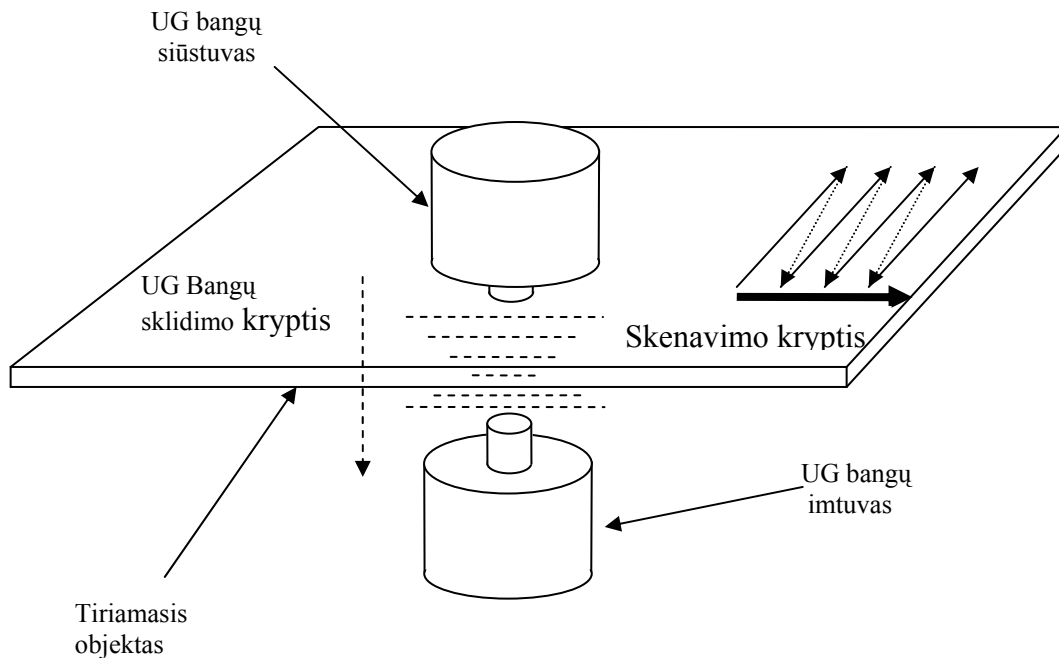
$$\tau_j = \frac{2 \cdot D_j}{c}, \quad (1.1)$$

čia D_j - atstumas tarp keitiklio ir j -ojo netolygumo, c – ultragarsinės bangos sklidimo greitis tiriamojoje medžiagoje. Signalų amplitudė priklauso nuo daugelio veiksnių, tokių, kaip bangos ilgis, atstumas D_j , slopinimas, netolygumo arba defekto dydis. Todėl žinant kitus veiksnius, galima spręsti apie netolygumo matmenis. A skenavimo metodu vaizduojamas signalas, kurio kreipimas nuo horizontalės proporcingas signalo amplitudei [1, p.155; 2 p. 131-132]. Yra keli skirtingi vaizdavimo būdai [3]:

- teigiamos ir neigiamos signalų reikšmės,
- teigiamos reikšmės,
- neigiamos reikšmės,
- signalų gaubtinė.

B skenavimo metode elektroninio signalo amplitudės kreipimas nuo vertikalės proporcingas gyliui, o horizontalė - proporcinga ultragarsinio spindulio padėčiai erdvėje, pavyzdžiui x ašies kryptimi [1, p.156; 2 p.132; 3]. Signalo amplitudės atvaizdavimui naudojama spalvinė indikacija: signalas kvantuojamas pagal amplitudę ir skirtingi amplitudės lygiai vaizduojami ekrane skirtingomis spalvomis.

C skenavimo metode ultragarsinis spindulys dvimatėje plokštumoje atlieka $n \cdot m$ žingsnių, kur n yra x ašimi judėjimo pozicijų taškai, o m – y ašimi judėjimo pozicijų taškai (1.1 pav.). Kiekviename taške tiriamasis objektas testuojamas ultragarsiniu impulsu ir gaunamas signalas $u(t)$. Bendrą tiriamojo objekto akustinį vaizdą galima aprašyti kaip funkciją $v(n, m, t)$.



1.1 pav. C skenavimo metodo principas

Dvimačiais vaizdais galima atvaizduoti ne tik amplitudę, bet ir kitokius signalo parametrus. Pavyzdžiui, *T skenavimu* ekrane spalvine indikacija vaizduojama atspindėtų signalų delsa. Šiuo atveju visas galimų delsų laikinis intervalas dalomas į laikinius diapazonus, o signalai patenkantys į skirtingus dalinius diapazonus, vaizduojami skirtingomis spalvomis. Tokiu būdu galima atvaizduoti ekrane vietoje dvimačio spalvoto kontūro atstumus iki defektų arba tiriamojo objekto storį.

P skenavimo atveju spalvine indikacija vaizduojamas užlaikymas atspindėtų signalų, kaip ir *T skenavimo* metode, tik dėl vaizdų, gaunamų iš spindulių su skirtingu sklaidimo kampų,

naudojamos skirtingos spalvos, ir ekrane vienu metu gali būti atvaizduota ne viena, o kelios tiriamojo objekto projekcijos [1, p.158; 2 p. 132; 3].

Suprantama, kad tokių indikacijų metu priekiniame plane esantys defektai paslepia tolesnius objektus. Ši trūkumą galima pašalinti naudojant sudėtingesnius informacijos atvaizdavimo metodus, pavyzdžiui, “pusiau skaidrus” metodas vaizduoja trimatį vaizdą, tolesni defektai vaizduojami ne tokio ryškaus atspalvio arba kita spalva.

Trimačiai akustiniai tiesioginio vizualizavimo vaizdai formuojami iš dvimačių vaizdų, gautų B ir C skenavimo metodais [1 p. 159]. Tiksliau sakant, gaunami tik kvazitrimačiai vaizdai. Ekrane vaizduojami aksonometriniai vaizdai ortogonalioje koordinatų sistemoje. Signalai, atsispindėję nuo netolydumų, vaizduojami ryškiau arba kita spalva. Ryškumas ar spalva priklauso nuo signalo amplitudės.

1.3 Automatizuota neardomoji kontrolė

Automatizuotos neardomosios kontrolės valdymą, informacijos surinkimą ir apdorojimą atlieka pramoninis arba asmeninis kompiuteris. Kompiuterio programinę įrangą sudarančių programinių paketų paskirtis [1 p. 194-196]:

- pradinių parametru parinkimas;
- akustinio skenerio valdymas;
- akustinio vaizdo formavimas;
- informacijos išsaugojimas kompiuterio informacijos laikmenoje;
- rezultatų dokumentavimas;
- matavimai, įvertinimai ir antrinis apdorojimas.

Visos šios programos, išskyrus antrinį apdorojimą ir rezultatų dokumentavimą, vykdomos realiuoju laiku. Realiuoju laiku programos atlieka tokias operacijas [1 p. 197-200]:

- 1) Signalo amplitudės kvantavimas;
- 2) Aukšto dažnio signalo impulsų filtravimas;
- 3) Signalų kaupimas, kad būtų galima įvertinti defektą remiantis kelių signalų informacija;
- 4) Laiko mastelio keitimas (ištempimas, suspaudimas);
- 5) Laiko, amplitudės ir erdvės parametru keitimas;
- 6) Didžiausios signalo amplitudės registracija tiriamojo objekto tam tikroje vietoje.

Antriniu apdorojimu filtruojami ir glodinami signalai, apdorojamas akustinis vaizdas, gerinama skiriamoji vaizdo geba, atliekama spektrinė analizė, defektų klasifikacija

Automatizuotos neardomosios kontrolės vizualizavimo sistemos tikslai:

- 1) Patikimai nustatyti ar tiriamasis objektas turi ar neturi didesnių nei nustatyto dydžio defektų;
- 2) Nustatyti kiek galima tiksliau defektų parametrus (forma, dydis, koordinatės).

1.4 Ultragarstinės introskopijos veiksniai

Jei tiriama medžiaga nevientisa (joje yra įtrūkimų, sluoksnių, kiaurymių, tuštumų ir kt.), ultragarso imtuvo priimtame signale tai matoma iš amplitudės pokyčių tam tikrose vietose. Tačiau imtuve priimamas signalas būna paveiktas įvairių papildomų reiškinių:

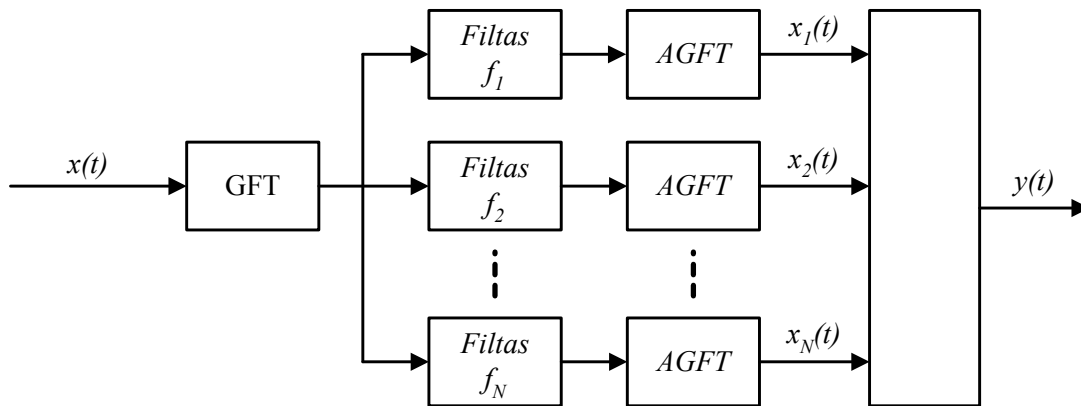
- Optinės bangos ilgis ($0.4\div 0.6 \cdot 10^{-6}$ m) žymiai trumpesnis negu akustinės bangos ilgis ($\approx 10^3$ m), todėl optiniame diapazone matomas vaizdas skiriasi nuo akustinio vaizdo.
- Akustikoje dažniausiai negalioja geometrinės akustikos dėsniai, bet pasireiškia difrakciniai reiškiniai [2].
- Medžiagos sudėties ar sandaros pokyčiai turi įtakos ultragarso sklidimo greičiui, slopinimui [21]. Jei skirtingų akustinių savybių medžiagos skersmuo didesnis už bangos ilgį, tai banga atspindima, o jei mažesnis – gaunama difrakcija [2].
- Siunčiamas signalas ir priimamas signalas yra iškraipomi dėl tiriamosios medžiagos nevienalytiškumo, struktūrinių triukšmų, kurie yra susiję su signalu.
- Defekto paviršius, keitiklio kuriamas laukas ir susidaręs erdvinis atspindys yra trijų kintamųjų funkcijos, o atspindžio ir siunčiamas signalai yra vienmačiai.
- Susidaręs erdvinis atspindys patenka į imtuvą ir jis transformuojamas į vienmatį signalą.
- Dėl ultragarso imtuvo aparatūros netobulumo atsiranda baltasis triukšmas.

Dėl šių priežasčių objekto akustiniai ir optiniai vaizdai labai skiriasi. Sunku iš ultragarsiniame imtuve priimtų signalų gauti visą informaciją apie defektą. Akustinė informacija “turingesnė” apie objektą, nes atspindi daugiau objekto savybių, bet ją sunkiau iššifruoti. Todėl iš vizualizavimo sistemos suformuoto akustinio vaizdo sunku atkurti defekto, esančio medžiagoje, vietą ir geometriją. Šias problemas bandoma spręsti signalus apdorojant ir analizuojant skaitmeniniais metodais.

1.5 Dažniausiai naudojami ultragarsinio signalo apdorojimo metodai

Anksčiau buvo sukurti būdai netolydumams aptikti: dažnio padidinimas, tiesinis filtravimas, padalyto spektro apdorojimo (*split spectrum processing*) metodai, tokie kaip vidurkinimas, minimizavimas, poliariško slenksčio taikymas [23; 24]. PSA yra efektyvus būdas, bet labai jautrus parametrų parinkimui. Alternatyvūs metodai, naudojantys adaptyvų filtravimą, ne tokie jautrūs parametrų parinkimui.

Pagrindinis veiksnys, ribojantis ultragarsinę introskopiją, yra didelės amplitudės interferenciniai atspindžiai, dažnai slepiantys atsispindėjusias bangas nuo tiriamojo objekto medžiagos pokyčių. Padalyto spektro apdorojimo metodas, pagrįstas spektro nepanašumu ir laikomas efektyviu metodu anomalijoms išryškinti ir triukšmams slopinti [23]. PSA sukuria siauro dažnio bangų rinkinį iš vienos plataus dažnių diapazono bangos. Tam naudojama aibė lygiagrečių filtrų, kurių centriniai dažniai yra skirtingi. Kiekvieno signalo amplitudė yra normuojama, o visi gauti signalai vėliau apdorojami, kad būtų gautas vienas signalas laiko atžvilgiu (1.2 pav.). Triukšmai pašalinami, tačiau atsispindėjusios nuo dominančio objekto bangos dažnių spektras būna labai plataus intervalo.



1.2 pav. Padalinto spektro apdorojimo (PSA) filtras

Alternatyvus išskaidymas, galintis pagerinti skiriamąją gebą aukštuose dažniuose, kad būtų galima atskirti erdvėje artimus netolydumus, vadinamas išplėstiniu padalyto spektro apdorojimo metodu [23].

Siekiant gauti signalą be triukšmų, naudojami statistiniai algoritmai, kurių kriterijus – didžiausias signalo ir triukšmo santykis. Algoritmai dažniausiai pagrįsti signalo reikšmių vidurkio skaičiavimu. Tai prilygsta žemo dažnio filtrui.

Kartu su PSA metodu naudojami statistiniai eiliškumo filtrai (*order statistics*). SEF – tai diskretus apdorojimas, kuomet siauro dažnio signalai yra išrikiuojami nuo mažiausio iki didžiausio, išėjimo signalas gaunamas pagal pasirinktą eilę, apskaičiuotą remiantis signalo statistika [23].

Kiti algoritmai naudoja slenksčio algoritmą kartu su kitais operatoriais, tokiais kaip SEF, tiesinis vidurkinimas, geometrinis vidurkis.

1.6 Bangelių transformacijos taikymai ultragarsinio signalo apdorojimui

Bangelių (arba bangelių paketų) transformacijos naudojimas ultragarsinėje introskopijoje netolydumams aptikti yra palyginti naujas metodas. Nėra sukurta bendros teorijos ar plataus taikymo metodų. Pagrindinis bangelių transformacijos taikymas– tai baltojo triukšmo šalinimas iš ultragarsinių signalų (vienmačių ar dvimačių) [27; 28].

Bandoma bangelių transformaciją naudoti kartu su kitais metodais, skirtais defektų aptikimui ultragarsiniame signale ar vaizde. Pvz. literatūroje [23] pateikiamas metodas ir eksperimentiniai rezultatai, kaip PSA metodas analizuojamas laiko-dažnio ir laiko-mastelio srityse. Bangelių transformacija naudota signalo dekompozicijai atlikti. Tiesioginis BT naudojimas, be papildomų netiesinių operacijų, defektų aptikime duoda blogesnius rezultatus, negu PSA [23].

Literatūroje [22] pateikiamas patobulintas Wigner-Ville transformacijos metodas: akustinis signalas išskaidomas į atskirų bangų komponentes laiko ir dažnio srityje, naudojant bangelių transformaciją. Impulsas gali būti siauras laiko srityje ir platus dažnio srityje, todėl lengviau nustatyti, iš kokių bangų komponentių sudarytas signalas. Transformacijai naudojama sinusinės funkcijos. Nustatyta, kad beveik visos sinusinės funkcijos, išdidintos kokios nors baigtinės energijos funkcijos, atliekant bangelių transformaciją, duoda gerą rezultatą, t. y. gali identifikuoti akustinius komponentus [22].

Panaudojant tolydžiąją bangelių transformaciją, sukurtas metodas mažo kontrasto objektų segmentų išskyrimui iš triukšmingų akustinių B skenavimo vaizdų [26]. Praktiškai taikytas medicinoje, plaučių augliams aptikti. Pirmiausia akustinis vaizdas apdorojamas medianiniu filtru,

siekiant pašalinti baltąjį triukšmą. Tada vienmatis profilis, einantis išilgai spindulių sklidimo krypties per spėjamą plaučių auglio vidurį, apdorojamas TBT, naudojant Sombrero bangele, kuri yra antroji Gauso funkcijos išvestinė. Skirtingų profilių didžiausios reikšmės, reiškiančios netolydumo laipsnį, apjungiamos. Taip gaunama spėjamo segmento elipsė. Rezultatai tikslinami naudojant statistinius metodus [26].

Jei bandymų naudoti bangelių transformaciją akustinio vienmačio signalo (vaizdo) kokybės gerinimui galima aptikti konferencijų medžiagoje, tai bandymas panaudoti dvimatę bangelių transformacija C tipo ultragarsinio skenavimo vaizdams apdoroti yra naujas būdas.

1.7 Darbo tikslas

Ultragarsinėje introskopijoje informacija apie objekto sandarą gaunama sąveikaujant ultragarsui su tiriamuoju objektu. Kadangi šios sąveikos pobūdis labai skiriasi nuo optinės spinduliuotės sąveikos su objektu, optiniai ir ultragarso vaizdai taip pat skiriasi. Turint tiriamojo objekto tikrąjį ir akustinį vaizdus, galima gautus ultragarsinius signalus (vienmačius ir dvimačius) apdoroti, siekiant, kad akustinis vaizdas kiek galima labiau atitiktų realiai egzistuojančio objekto išorę ir vidinę sandarą. Tam turėtų gerai tikti bangelių erdvės-laiko-dažnio transformacijomis, leidžiančios signalą nagrinėti skirtingais detalumo-dažnio lygiais.

Darbo tikslas – panaudojant bangelių transformacijas, apdoroti ultragarsinius vienmačius ir dvimačius signalus, siekiant:

- 1) identifikuoti sandaros nevienalytiškumus,
- 2) nustatyti nevienalytiškumo koordinates,
- 3) įvertinti geometrinius nevienalytiškumo matmenis,
- 4) padaryti prielaidas apie tikrąją nevienalytiškumo geometriją.

2. Bangelių transformacija

2.1 Signalų analizės metodų palyginimas

Labiausiai žinomas signalų analizės metodas – Furjė analizė, kuri išskaido signalą į atitinkamas skirtingų dažnių sinusoides. Kitas Furjė analizės taikymo būdas – tai matematinis metodas, transformuojantis signalą iš laiko srities į dažnio sritį [4; 6; 12 p.2-3]. Transformacija daug metų buvo naudojama kaip pagrindinis signalų analizės įrankis, tačiau ji turi didelių trūkumų. Transformuojant signalą į dažnių sritį, prarandama laiko informacija: negalima pasakyti, kada koks įvykis įvyksta. Jei signalas nekinta laike, t. y. jei nagrinėjamas stacionarus signalas, šis trūkumas nėra svarbus. Tačiau pramoniniuose ultragarsiniuose matavimuose dažniausiai nagrinėjami signalai nėra stacionarūs, ir Furjė analizė negali aptikti signalo pokyčių, netolydumų. Dar vienas trūkumas – tai daroma prielaida, kad signalas yra begalinis [9]. Vengiant šio sunkumo, atskiriamas signalo langas, naudojant reguliariąją funkciją $g(t)$, kuri lygi nuliui arba artima nuliui segmento $[-m, m]$ išorėje [17 p. 10-11]. “Lango” Furjė analizės koeficientai apskaičiuojami pagal formulę:

$$\hat{s}(\omega, t) = \int_R s(u)g(t-u) \cdot e^{-i\omega u} du, \quad (2.1)$$

čia, $s(\omega, t)$ - signalas, t - laikas, ω -dažnis.

Patobulintas transformacijos algoritmas, žinomas kaip *greitoji Furjė transformacija* (GFT), leidžia transformaciją atlikti per $N \log_2 N$ aritmetinių veiksmų [12 p.3].

Siekdamas ištaisyti esamus trūkumus, D. Gabor (1946) pritaikė Furjė transformaciją signalo daliai nagrinėti laiko srityje. D. Gabor pritaikymas atvaizduoja signalą kaip dvimatę laiko ir dažnio funkciją [4; 12 p. 3]. Tam naudojo sinusinių virpesių funkcijas, apribotas Gauso funkcija e^{-x^2} [12 p. 4]. Tai kompromisas tarp signalo laiko ir dažnio vaizdo. Pateikiama informacija kartu apie tai, kada ir kokių dažnių įvyksta įvykis. Tačiau šią informaciją galima gauti tik riboto tikslumo, kuri lemia nagrinėjamo signalo intervalo dydis. Trūkumas dar ir tas, kad jei pasirenkamas nagrinėjamas signalo langas, tai jo dydis išlieka visiems dažniams. Bazinės sinusinės ir kosinusinės funkcijos neturi baigtinio pagrindo, todėl negali nustatyti signalų briaunų ar kitokių netolydumų [4; 12 p.3-5].

Bangelių analizė – tai dar vienas žingsnis pirmyn: lango metodas su kintamo dydžio sritimi. Bangelių analizė suteikia galimybę naudoti ilgus intervalus, jei norima kuo tikslesnės

žemo dažnio informacijos, ir siaurus intervalus, jei norime aukštesnio dažnio informacijos. Tuo ji skiriasi nuo laiko srities, dažnio srities ar GFT'os signalo vaizdavimo. Bangelių analizė naudoja ne laiko-dažnio sritį, o laiko-mastelio sritį [4]. Galima taip nusakyti bangelių mastelio ir dažnio ryšį, atliekant bangelių analizę:

- mažas mastelis \Rightarrow suspausta bangelė \Rightarrow greiti mažų detalių pokyčiai \Rightarrow aukštas dažnis ω ,
- didelis mastelis \Rightarrow išplėsta bangelė \Rightarrow lėti didelių detalių pokyčiai \Rightarrow žemas dažnis ω .

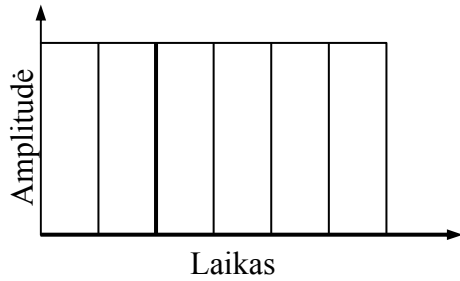
Pagrindinis bangelių pranašumas – tai galimybė atlikti lokalią analizę, t. y. analizuoti pasirinktą signalo dalį [4]. Netolygumai tam tikroje funkcijos vietoje turi įtakos tik tiems transformacijos koeficientams, kurie atitinka funkciją toje vietoje. Naudojant neregulias bangelių funkcijas, lengviau aptinkami staigūs signalo pokyčiai, lūžio taškai, netolydumai aukštesnėse išvestinėse. To negalima aptikti naudojant tolydžias sinusines funkcijas. Naudojant tolydžias bangeles, analizė leidžia aptikti signalo linkmę (pastoviąją dedamąją) bei signalo fragmento pasikartojimą signale (signalu fraktalinį pobūdį).

GFT ir diskrečioji bangelių transformacija (DBT) yra tiesinės operacijos, generuojančios $\log_2 n$ ilgio duomenų struktūrą [4]. BT yra sparti, sudėtingumas $O(n \log_2 n)$.

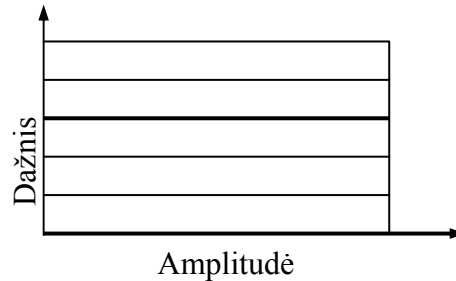
Bangelių transformacijos artumas GFT'ai - tai analizuojamo signalo pavaizdavimas laiko-dažnio plokštumoje [10; 11]. Tam naudojamos laiko-dažnio bangelės.

Bangelių analizė išplečiama naudojant bangelių paketą bangelių ortogonalioje bazėje parenkama automatiškai pagal apdorojamų duomenų ir bangelių panašumą [7; 8]. Panašumas gali būti nustatomas įvairiomis įverčio funkcijomis [8]. Naudojant periodinių bangelių paketo bazę, galima atlikti periodinę bangelių paketo analizę [12 p.21-25].

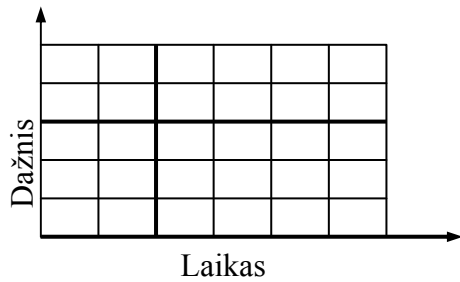
Signalų analizių palyginimas pavaizduotas 2.1-2.4 pav.



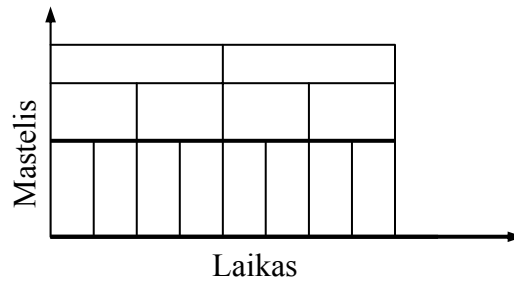
2.1 pav. Laiko sritis (Shannon)



2.2 pav. Dažnio sritis (Furjė)



2.3 pav. Dažnio sritis (Furjė)



2.4 pav. Bangelių analizė

2.2 Bangelių apibrėžimas ir taikymo sritys

Bangelės – tai erdvės $L^2(R)$ kintamo mastelio bazinės funkcijos, kurios generuojamos iš vienos pagrindinės funkcijos $\psi(x)$, atliekant jos plėtinius (*dilation*) ir sveikų skaičių postūmius (*translations*) [4; 6; 14 p.1-4].

Istoriškai bangelės skirtingais pavidalais buvo taikomos įvairiose fizikos ir technikos šakose, ir pradžioje sunku buvo rasti ryšį tarp visų šių krypčių [4]. Prancūzų geofizikas J. Morlet modeliavo garso sklidimą naudodamas funkcijas “bangeles” [9]. Y. Meyer, prancūzų matematikas, tyrinėjo harmoninius svyravimus ir sukūrė savo bangeles, kurias naudojo sudėtingiems reiškiniams modeliuoti. Jo darbą patobulino amerikiečiai S. Mallat iš Niujorko universiteto ir I. Daubechies iš Bell Labs [9]. 1986 m. S.Mallat sukūrė bendrą teorinį bangelių pagrindą, kuris vadinamas begalinės detalizacijos, arba begalinės skiriamosios gebos, analize (*multiresolution analysis*). Nagrinėjant signalą nuosekliai skirtingose informatyvumo skalėse (lygiuose), galima nustatyti signalo charakteristikas ir aptikti ypatumus.

Bangelių transformacijos taikymo sritys:

- vaizdų suspaudimas [4; 5; 14 p. 18-20; 15 p. 51-52; 17 p. 107-117; 18 p. 29-31; 20 p. 6-7];
- signalų apdorojimas:
 - 1) triukšmų (baltojo ar koreliuoto) pašalinimas iš signalo ar vaizdo [4; 10 p.14-30; 12 p.11-12];
 - 2) signalo pasikartojimo signale, t. y. signalo fraktalinio pobūdžio nustatymas [4];
 - 3) signalų suspaudimas [5; 10 p. 13-14; 17 p. 21-22];
 - 4) žemės drejbėjimo impulsų aptikimas [14 p. 17-18];
- kalbos/garsų apdorojimas: suspaudimas, muzikinių garsų sintezė [4; 15 p.68-70];
- diferencialinių [5; 17 p. 200-203; 18 p. 31-33], integralinių [17 p. 156-181] lygčių sprendimas;
- nestandartinė matricų daugyba [15 p. 52-61];
- statistika.

2.3 Begalinės detalizacijos analizė

Nagrinėjama erdvė $L^2(\mathbb{R})$, kurią sudaro kvadratu integruojamų funkcijų $f(x), x \in \mathbb{R}$ klasė su sumos ir sandaugos iš skaliario (realaus skaičiaus) operacijomis.

1. Funkcijos kvadratu integruojamos $\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx < \infty$.
2. Pavartojama skaliarinė sandauga $\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x) dx$.
3. Norma $\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (f(x))^2 dx$.

MRA analizė $L^2(\mathbb{R})$ erdvėje apibrėžiama kaip uždarų, įdėtų viena į kitą $L^2(\mathbb{R})$ erdvės poerdvių $V_j, j \in \mathbb{Z}$ seka, kuri tenkina savybes [12 p. 6-14; 14 p. 9-11; 17 p. 42-44; 18 p. 6]:

1. $V_j \subset V_{j+1}$
2. $v(x) \in V_j \Leftrightarrow v(2x) \in V_{j+1}$
3. $v(x) \in V_0 \Leftrightarrow v(x+1) \in V_0$
4. $\bigcup_{j=-\infty}^{+\infty} V_j$ yra tiršta erdvėje $L^2(\mathbb{R})$ ir $\bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = \{0\}$

5. Egzistuoja tokia mastelio funkcija (*scaling function*) $\varphi(x) \in V_0$, kad :

$$1) \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^2(x) dx = 1$$

2) rinkinys $\{\varphi(x-k) \mid k \in Z\}$ yra erdvės V_0 normuota Rico (Riesz) bazė. [18 p. 6]

Apskaičiuotina Hilberto erdvės aibė $\{f_n\}$ yra Rico bazė, jei kiekvienas erdvės elementas f

$$1) \text{ Vieninteliu būdu gali būti užrašytas suma } f = \sum_n h_n f_n,$$

$$2) \text{ Egzistuoja tokie skaičiai } A \text{ ir } B, \text{ kad } A \cdot \|f\|^2 \leq \sum_n |h_n|^2 \leq B \cdot \|f\|^2.$$

Keletas savybių, išplaukiančių iš MRA apibrėžimo [14 p. 9-11].

Kadangi $\{\varphi(x-k) \mid k \in Z\}$ yra erdvės V_0 normuota Rico bazė, tai

$$\{\varphi_{nk} = 2^{n/2} \cdot \varphi(2^n x - k) \mid k, n \in Z\} \text{ yra normuota erdvės } V_n \text{ Rico bazė.}$$

Simboliu $P_n f$ pažymėkime funkcijos $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ projekciją erdvėje V_n , t. y.

$$P_n f = \sum_{k \in Z} a_k \cdot \varphi_{nk}.$$

Tada iš 4 savybės gauname, kad $\lim_{n \rightarrow \infty} P_n f = f$. [17 p. 44]

Kadangi $\varphi(x) \in V_0 \subset V_1$, tai egzistuoja tokia koeficientų aibė

$$\{c_k\} \in l^2(Z) = \left\{ c_k, k \in Z \mid \sum_{k \in Z} c_k^2 < \infty \right\}, \text{ kad}$$

$$\varphi(x) = \sum_k c_k \cdot \varphi(2x - k). \quad (2.2)$$

Ši lygtis vadinama plėtinio lygtimi (*dilation equation*) arba dviejų mastelių skirtumine lygtimi (*two-scale difference equation*) [12 p. 9; 13 p. 2; 17 p. 17, 46].

Simboliu W_j pažymėkime erdvės V_j papildymą iki erdvės V_{j+1} , t. y. erdvę, atitinkančią sąlygą $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$, čia simbolis \oplus žymi tiesioginę sumą [17 p. 17; 18 p. 7]. Kitaip tariant, kiekvienas erdvės V_{j+1} elementas vieninteliu būdu gali būti užrašytas elementų V_j ir W_j suma. Reikia pastebėti, kad erdvė W_j nėra vienintelė: yra daug būdų papildyti erdvę V_j iki erdvės V_{j+1} . Praktikoje daugiausia naudojamas ortogonalusis erdvės V_j papildymas iki erdvės V_{j+1} [18 p. 7].

Iš erdvės W_j apibrėžimo galime daryti išvadą, kad

$$L^2(\mathbb{R}) = V_0 \oplus \left\{ \bigoplus_{j=0}^{\infty} W_j \right\} \text{ arba } L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j=-\infty}^{\infty} W_j. \quad [17 \text{ p. } 17]$$

Funkcija $\psi(x) \in W_0$ yra vadinama bangele, jei funkcijų $\{\psi(x-k) | k \in \mathbb{Z}\}$ aibė yra erdvės W_0 normuota Rico bazė.

Tada funkcijų $\left\{ \psi_{nk}(x) = 2^{n/2} \cdot \psi(2^n x - k) \mid n, k \in \mathbb{Z} \right\}$ aibė yra normuota bazė erdvei W_n .

Simboliu $R_n f$ pažymėkime funkcijos $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ projekciją erdvėje W_n .

$$R_n f = \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_k \cdot \psi_{nk}$$

$$\begin{aligned} \text{Tada } P_n f &= P_0 f + (P_1 f - P_0 f) + (P_2 f - P_1 f) + \dots + (P_{n-1} f - P_{n-2} f) + (P_n f - P_{n-1} f) = P_0 f + \sum_{l=0}^{n-1} R_l f = \\ &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \varphi(x-k) + \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_{lk} \psi(2^l x - k). \quad [12 \text{ p. } 9-10] \end{aligned}$$

Kokia yra fizinė erdvės W_n prasmė?

Kadangi $P_n f = P_n f + (P_{n+1} f - P_n f)$ ir $V_{n+1} = V_n \oplus W_n$, tai erdvė W_n atspindi detales informacijos, reikalingos pereinant nuo funkcijos $f(x)$ n -to lygio detalizacijos (skiriamosios gebos) prie $(n+1)$ lygio detalizacijos. Atspindimos funkcijos $f(x)$ detalės, kurių dydis 2^{-n} . Kadangi $\psi(x)$ - pagrindinė bangelės (*mother wavelet*) funkcija priklauso erdvei W_0 , kartu ir erdvei V_1 , tai $\psi(x)$ galime užrašyti sąryšiu [12 p. 9; 14 p. 10; 18 p. 10]

$$\psi(x) = \sum_k g_k \cdot \varphi(2x - k) \quad (2.3)$$

Jei (2.2) lygtyje sumuojamų narių skaičius yra baigtinis, tai funkcijos $\varphi(x)$ ir $\psi(x)$ nelygios nuliui tik baigtiniame intervale, t. y. jų pagrindas yra baigtinis.

Tarkime, kad (2.2) lygtyje k kinta nuo 0 iki N , t. y. sumuojamų narių skaičius lygus $N+1$. Tada $\varphi(x)$ ir $\psi(x)$ pagrindas yra intervalas $[0, N]$. Tokias bangeles vadinsime kompaktiškai nusakytomis (*compactly supported*) bangelėmis. Tarkime, kad (2.2) lygties sprendinys $\varphi(x) \in V_0$ yra toks, kad $\{\varphi(x-l)\}_{l \in \mathbb{Z}}$ yra ortonormuota erdvės V_0 bazė. Tada jei (2.3) sąryšio koeficientai tenkina sąlygą [18 p.12]:

$$g_k = (-1)^k c_{N-k}, \quad (2.4)$$

čia N - (1) lygties indekso k didžiausia reikšmė, o koeficientai c_{N-k} yra (2.2) lygties koeficientai, tai funkcijos

$$\psi(x) = \sum_k (-1)^k c_{N-k} \cdot \varphi(2x - k) \quad (2.5)$$

sveikų skaičių postūmiai $\{\psi(x-k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ yra erdvės W_0 ortonormuota bazė (šiuo atveju W_0 yra ortogonalusis erdvės V_0 papildymas iki erdvės V_1) ir $\{\psi_{n,k}\}_{n,k \in \mathbb{Z}}$ yra erdvės $L^2(\mathbb{R})$ ortonormuota bazė.

Šios bangelės vadinamos ortonormuotomis kompaktiškai nusakytomis bangelėmis (*orthonormal compactly supported wavelets*) [17 p. 68-61] ir jos dažniausiai naudojamos praktikoje. Tokias bangeles pirmoji 1988 m. sukonstravo I. Daubechies. I. Daubechies bangelių šeimos paprasčiausias atvejis yra A.Haar 1910 m. sukonstruota bangelė [4, 20 p. 1-6].

Reikia pabrėžti, kad plėtinio lygtis nebūtinai yra tik bangelių teorijos objektas. Ši lygtis vaidina svarbų vaidmenį splainų teorijoje, tolydžių kreivių generavime ir kitose srityse .

Literatūroje [9; 17 p.55-58; 18] yra išnagrinėtos būtinos ir pakankamos sąlygos, kurias privalo atitikti koeficientai C_0, C_1, \dots, C_N , kad (2.2) lygtis turėtų tolydų integruojamą ir kvadratu integruojamą sprendinį.

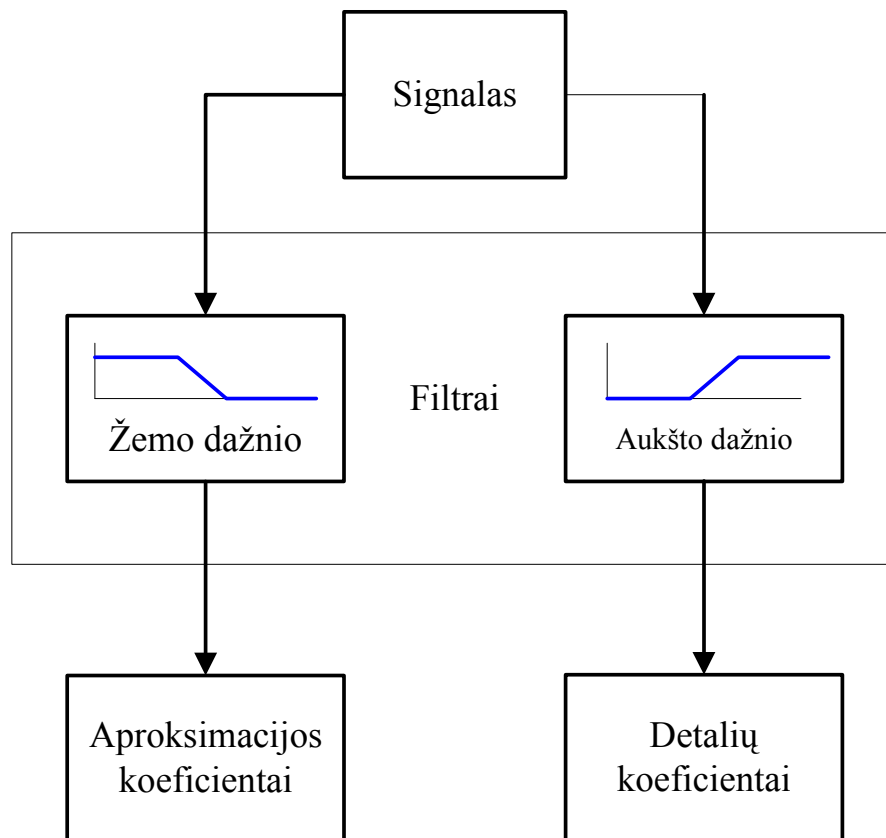
[vairias bangeles nusakantys koeficientai pateikiami literatūroje [9 p. 18-22].

2.4 Diskrečioji bangelių transformacija

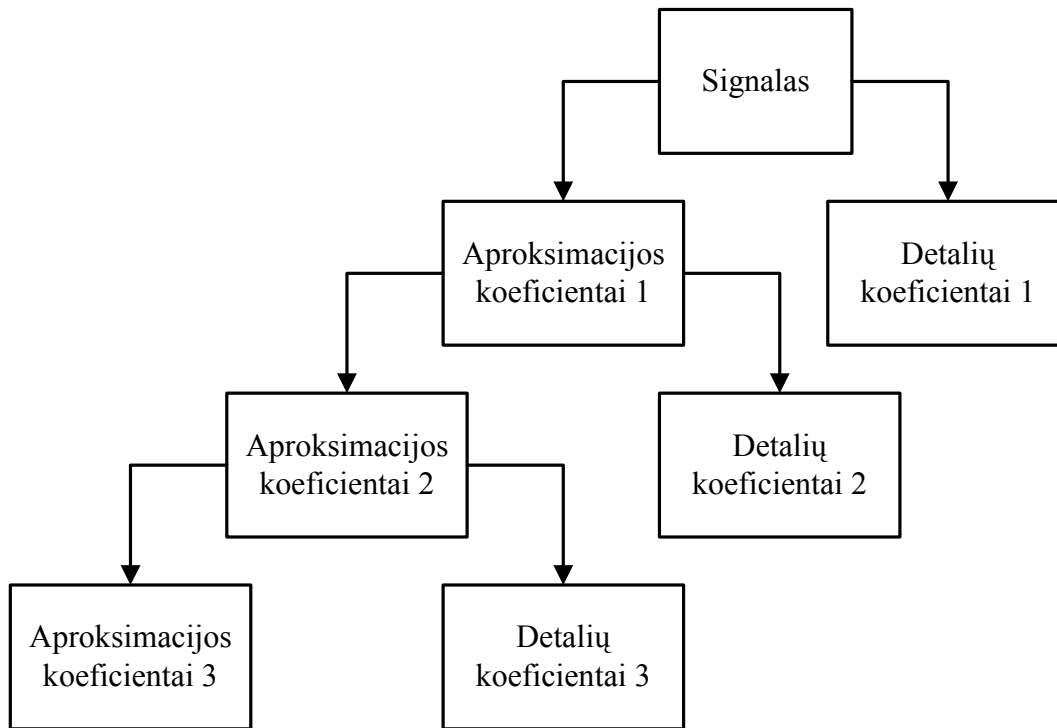
Efektyvų būdą atlikti bangelių transformaciją naudojant filtrus išrado S. Mallat 1998 m.. Tai klasikinė schema, žinoma kaip dviejų kanalų dalinių bangų kodavimas (*two-channel subband coder*) [14 p. 10; 17 p. 14]. Toks filtravimas pavadintas greita bangelių transformacija (*Fast Wavelet Transform*) [18 p. 18-21]. Diskrečioji bangelių transformacija (*Discrete Wavelet Transform*) [13 p 2-4] atliekama skaičiaus 2 laipsnio skalėse ir postūmiais, lygiais skaičiaus 2 laipsniui. Tokios skalės ir pozicijos vadinamos diadinėmis skalėmis ir pozicijomis [17 p. 48-49, 18 p.6].

Remiantis S. Mallat, bangelių analizė sutapatinama su begalinės detalizacijos analize [9 p. 4]. Transformacijos koeficientai dalomi į dvi lygias dalis: aproksimacijos koeficientai ir detalių koeficientai. Aproksimacijos koeficientai – didelio mastelio, žemo dažnio koeficientai. Detalių koeficientai – mažo mastelio, aukšto dažnio koeficientai. Filtravimo supaprastinta schema pavaizduota 2.5 pav. Kad po šios operacijos nebūtų dvigubai daugiau duomenų, saugojimui imamas tik kas antras gautas koeficientas. Kartu aukšto ir žemo dažnio dekompozicijos filtrai bei jiems atitinkantys atstatymo filtrai sudaro sistemą, vadinamą kvadratūriniu veidrodimu filtru (KVD) [9 p. 5-8, 15; 6 p. 4; 14 p. 10] (quadrature mirror filtre). KVD pavyzdžių galima rasti literatūroje [9 p.18-20].

DBT gali būti ne vieno lygio, o iteracinė, t. y. DBT atliekama su gautais aproksimacijos koeficientais. Taip gaunama žemesnio detalizacijos lygio signalo komponentus. Toks algoritmas vadinamas piramidiniu algoritmu [13 p. 3-8; 6 p 4-8; 17 p. 40-42]. Jo konvergavimas įrodytas literatūroje [16]. Transformacija gali būti atliekama iki tol, kol aproksimacijos koeficientus sudarys 2 koeficientai, arba lygių skaičius nustatomas įvertinant signalo prigimtį, pvz.: remiantis entropijos kriterijumi [19]. Piramidinio algoritmo rezultatų schema pavaizduota 2.6 pav.



2.5 pav. Filtravimo schema



2.6 pav. Piramidinio algoritmo schema

Signalų atstatymo arba sintezės procesas matematiškai vadinamas atvirkštine diskrečiąja bangelių transformacija (ADBT). ADBT atliekama analogiškai DBT: aproksimacijos ir detalių koeficientus filtruojami, naudojant atitinkamus atstatymo filtrus, prieš tai įterpus nulius, ir gauti rezultatai susumuojami [9 p.6-8]. Veiksmai kartojami, kol pasiekiamas pirmas lygis. Įrodoma, kad

$$\text{Signalas} = A + D \quad (2.6)$$

čia A – iš aproksimacijos koeficientų atstatytas signalas, D – iš detalių koeficientų atstatytas signalas.

Jei transformacijos lygių yra k , galima užrašyti:

$$S = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = \dots = A_k + D_k + D_{k-1} + \dots + D_1 \quad (2.7)$$

čia S – pradinis signalas, A_i – iš aproksimacijos koeficientų atstatytas signalas, D_i – iš detalių koeficientų atstatytas signalas.

Jei transformacijos koeficientai nebuvo keisti, pradinis ir atstatytas signalas sutampa. Jei norima signalą apdoroti (filtruoti, išryškinti netolydumas ar pan.), tada apdorojami pasirinkto lygio transformacijos koeficientai. DBT ir ADBT algoritmą ir programos kodą galima rasti literatūroje [13 p. 9-20, 22-27; 14 p. 24-26].

2.5 Tolydžioji bangelių transformacija

Realaus pasaulio duomenys kompiuteriu apdorojami kaip diskretiniai signalai, t. y. signalai, kurie buvo matuoti diskrečiais laiko intervalais. Tolydžioji bangelių transformacija (TBT) (*Continuous Wavelet Transform*) skiriasi nuo DBT transformacijoje naudojamais masteliais (lygiais) [17 p. 12-13]. Priešingai DBT, TBT gali būti atlikti bet kuriame mastelyje $m \in \mathbb{N}$. TBT taip pat yra tolydi kalbant apie analizuojančios bangelės postūmius, t. y. analizuojanti bangelė gali būti vienodai pastumta visoje funkcijos srityje.

$$C(\text{mastelis}, \text{pozicija}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi(\text{mastelis}, \text{pozicija}, t)dt \quad (2.8)$$

TBT apibrėžiama kaip suma funkcijos, padaugintos iš įvairaus mastelio bei postūmio bangelės funkcijos, visoje laiko skalėje

Funkcija ψ gali būti išreikšta [18 p. 5]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (2.9)$$

TBT rezultatas – bangelių koeficientai C – tai laiko ir vietos funkcijos. Padauginus kiekvieną koeficientą su atitinkamo mastelio ir atitinkamai pastumta bangele, gauname originalaus signalo sudedamuosius signalus-bangeles. Vaizduojant šių koeficientų dydį (x - laiko ašis, y – mastelis) spalvine gama, galima atlikti signalo laiko-mastelio analizę. Analizė nėra analogiška Furjė analizei, tačiau turi panašumų.

2.6 Bangelių paketai

Bangelių paketus įvedė R. Coifman, Y. Meyer, M. Quaker ir M. Wickerhauser, kaip ortonuormuotą bazę diskrečioms R^N funkcijoms [15; 18 p. 26-28]. Bangelių paketų bibliotekos bazinės funkcijos $\{\mathcal{G}_i; i=0, \dots, +\infty\}$ yra generuojamos iš duotosios funkcijos \mathcal{G}_0 tokiu būdu [15]:

$$\mathcal{G}_{2^l}(x) = \sqrt{2} \sum_n h(n)\mathcal{G}_l(2x - n) \quad (2.10)$$

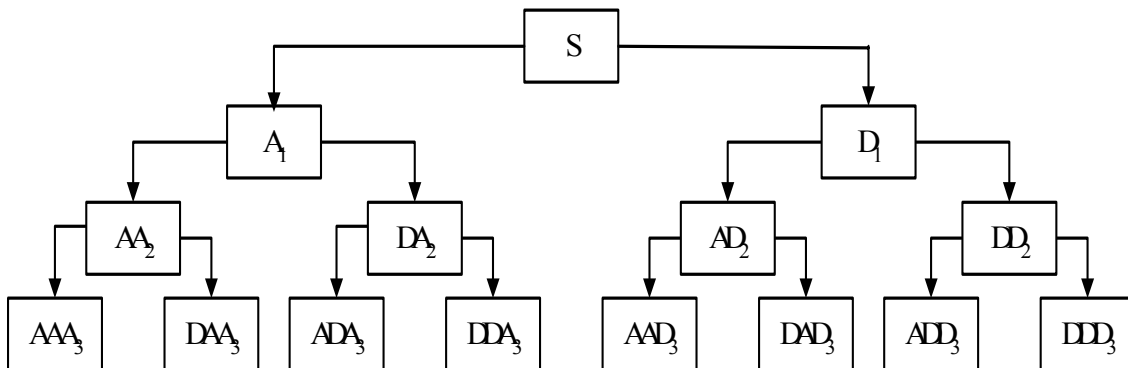
$$\mathcal{G}_{2^{l+1}}(x) = \sqrt{2} \sum_n g(n)\mathcal{G}_l(2x - n) \quad (2.11)$$

čia funkcija $\mathcal{G}_0(x)$ gali būti sutapatinta su mastelio funkcija φ , o $\mathcal{G}_l(x)$ – su pagrindine bangele ψ . Tokiu būdu bangelių paketų biblioteka gali būti sudaryta kaip ortonormuotų bazių rinkinys, sudarytas iš funkcijų aibės [7 p. 4-18]:

$$\left(\mathcal{G}_{j,k,l}(x) = 2^{-\frac{j}{2}} \mathcal{G}_l(2^{-j}x - k) \right)_{(j,k) \in \mathbb{Z}^2; l \in \mathbb{N}} \quad (2.12)$$

Kiekvienas elementas aibėje yra nusakomas indeksų poaibiu: mastelio parametru j , lokalizacijos parametru k ir virpėjimo parametru l . Pavyzdžiui, paprasta bangelių bazė atitinka indeksams $(j, k, 1)$, $(j,k) \in \mathbb{Z}^2$.

Naudojant bangelių paketą, aukštesnio lygio transformacijoje dalyvauja ir aproksimacijos, ir detalių koeficientai. Šiuo atveju galimi 2^n signalo transformavimo būdai, o bangelių transformacijos atveju $n+1$ būdas [15]. 2.7 pav pateiktas transformacijos medis. S – signalas, A_i – aproksimacijos koeficientai, D_i – detalių koeficientai.



2.7 pav. Bangelių paketų transformacijos medis

Transformacijų kelio išrinkimo kriterijumi dažniausiai naudojamas signalo entropija [7 p. 8-12; 10 p. 11-13; 19], t. y. kiekviename mazge sprendžiamas uždavinys, kuriuo keliu einant bus gauta daugiau informacijos.

2.7 Daugiamatė bangelių transformacija

Paprastas būdas išplėsti vienmatę bangelių transformaciją į aukštesnės eilės transformaciją – tai naudoti atskiriamas bangeles [25]. Jei turime vienmatę mastelinę funkciją $\varphi(x)$ ir bangelės funkciją $\psi(x)$, galima sukonstruoti dvimates funkcijas:

$$\begin{aligned}\Phi(x, y) &= \varphi(x)\varphi(y), & \Psi_1(x, y) &= \varphi(x)\psi(y), \\ \Psi_2(x, y) &= \psi(x)\varphi(y), & \Psi_3(x, y) &= \psi(x)\psi(y).\end{aligned}\tag{2.13}$$

Bangelių transformacija d -mačiui signalui lengvai gali būti atliekama nuosekliai atliekant transformaciją su signalo pirmosios komponentės elementais, po to su antrosios komponentės elementais it t.t [18 p. 28-29; 20 p. 4-6]. Kiekviena transformacija atitinka daugybai iš ortogonalios matricos. Pagal matricų asociatyvumą, rezultato nepriklausomumo lygis yra toks, kaip indeksai buvo transformuoti. Situacija yra analogiška kaip ir daugiamatei Furjė transformacijai.

3. Akustinio vaizdo gerinimas

3.1 C tipo skenavimo vaizdo apdorojimo aspektai

Dvimatis defektų aptikimo metodas naudingas tada, kai defektas tęsiasi per du ar daugiau A skenavimo vaizdus. Mažai apdorojimo būdų bando išgauti informaciją iš dvimačio vaizdo. Dažniausiai kiekvienas A skenavimo signalas yra apdorojamas atskirai, lyg akustinis vaizdas būtų naudojamas tik duomenims pateikti, o ne patys duomenys.

Defektą C tipo skenavimo vaizde nusako sumažėjusi A skenavimo signalo amplitudė. Daroma prielaida, kad A tipo signale įsivėlę triukšmai gali daryti įtaką amplitudės skaičiavimuose padidindami ją. Laiko ašyje triukšmo spektro energijos didžioji dalis bus ultragarsinio imtuvo priimamų dažnių aukščiausiam diapazone. Tikėtina, kad defektų spektro didžioji dalis yra vidurinių ir žemų dažnių regione. Naudojant bangelių transformaciją galima nufiltruoti aukšto dažnio trukdžius taip išgryninant informaciją nešantį signalą.

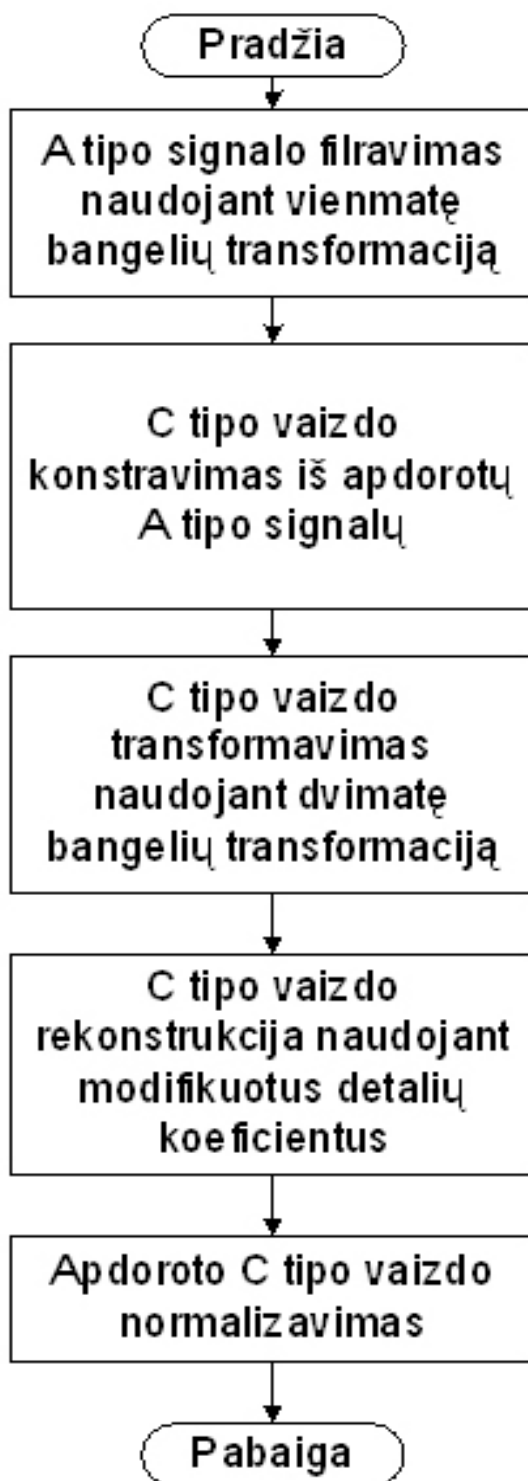
Kiekviename skenavimo taške A tipo signalo amplitudė yra skirtinga dėl medžiagos vidaus sandaros savybių, todėl gautas C tipo skenavimo vaizdas turi pakankamai didelį triukšmo lygį, gauti defektai vaizduojami ne vientisi, sunku atskirti defektu kraštus, mažesni defektai dėl didelio triukšmo lygio yra sunkiai pastebimi.

3.2 Algoritmo aprašymas

Siūlomas algoritmas skirtas antriam akustinių signalų apdorojimui. Apdorojimo rezultatas – akustinis C tipo skenavimo vaizdas, kuriame sumažinti foniniai triukšmai ir išryškinti defektai.

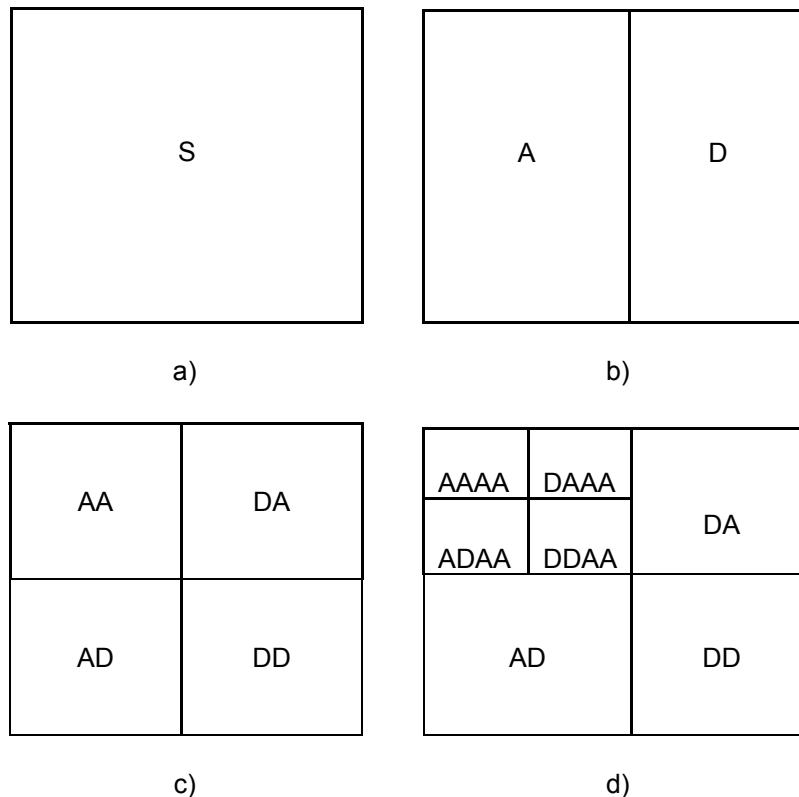
Siūlomas algoritmas pagrįstas tuo, kad vaizduojant C tipo skenavimo vaizdo tam tikrų dažnių bangas (vadinamas informaciją nešančiu dažniu) gaunamas geresnis defekto-triukšmo santykis. Ši prielaida galioja tik tuo atveju, kai bangos ilgis mažesnis, negu defektas, ir defektas aptinkamas keliuose netoli vienas kito esančiuose A skenavimo signaluose. Algoritmo schema pateikta 3.8 pav. Transformuojant A tipo signalą yra paliekami tik informaciją nešantis dažnis, taip sumažinama amplitudės skaičiavimo paklaida. Apdorojus A tipo signalus yra skaičiuojama kiekvieno signalo amplitudė, naudojant gautas reikšmes suformuojamas C tipo vaizdas. Transformacijos metu C tipo vaizde apjungiami greta esantys panašių reikšmių signalai ir

gaunamas glodesnis defekto vaizdas. Siekiant išryškinti smulkesnius defektus vykdomas normalizavimas.



3.1pav. Algoritmo schema

Dvimatės bangelių transformacijos metu viename transformacijos lygyje reikia atlikti dvi transformacijos operacijas. Dvimatį signalą pirma reikia transformuoti horizontaliai, paskui vertikaliai. Tokios transformacijos metu gauname vieną aproksimacijos koeficientų rinkinį ir tris detalių koeficientų rinkinius. Dvimatės bangelių transformacijos schema pavaizduota 3.2 pav.



3.2pav. Dvimatės bangelių transformacijos schema. S – pradinis signalas, A – aproksimacijos koeficientai, D – detalių koeficientai. a) Pradinis signalas, b) pirmojo transformacijos lygio pirmasis etapas, c) pirmojo transformacijos lygio antrasis etapas, d) antrojo transformacijos lygio rezultatas

Vieno lygio dvimatę diskrečiąją bangelių transformacija galima atlikti taip:

$$Y = T_a S T_a^T \tag{3.9}$$

3.4 Aproximacijos koeficientų filtravimo slenksčio parinkimo kriterijus

Aproximacijos koeficientam bus atliekamas filtravimas. Filtravimo tikslas – išryškinti defekto vaizdo detales.

Tarkime turime bangelių paketo transformacijos apdoroto vaizdo aproximacijos koeficientų vaizdą, kurio dydis $M_j \times N_j$. Vaizdą sudaro bangelių paketo transformacijos

$$X = \{X(k, l); k = 0, \dots, M_j - 1, l = 0, \dots, N_j - 1\}$$

koeficientai:

Aibę X sudaro du koeficientų poaibiai: X_f ir X_c . Poaibį $X_f = \{X(k_f, l_f)\}$ sudaro koeficientai, nešantys informaciją apie defektus medžiagoje, o poaibį $X_c = \{X(k_c, l_c)\}$ sudaro vaizdo fono koeficientai, t. y. galima teigti, kad tai triukšmo įtakoti koeficientai. Galima užrašyti:

$$X = X_f \cup X_c, \quad X_f \cap X_c = \emptyset. \quad (3.10)$$

Uždavinys reikalauja nustatyti tokį slenkstį, kuris padalintų aibę X į dvi dalis. Yra sukurta nemažai būdų slenksčio parinkimui, remiantis signalo ir triukšmo santykiu, signalo entropija, signalo vidurkiu. Tačiau šie visi būdai sukurti signalo triukšmo šalinimui arba signalo suspaudimui, todėl po tokio filtravimo signalas išsaugo apie 95% savo informacijos. Čia reikia rasti tokį adaptyvų slenkstį, kad po filtravimo išliktų tik defekto vieta ir geometrija, vaizdo fono nereikia atstatyti. Tam tikrais atvejais vaizdo foną būtina atstatyti, bet turint filtravimo slenkstį galima naudingą informaciją apie defektus turinčius koeficientus padidinti taip, kad jie aiškiai išsiskirtų iš fono vaizdo. Koeficientų filtravimui turi egzistuoti toks optimalus slenkstis T toks, kad aibių X_f ir X_c elementai tenkina sąlygas:

$$|X(k_c, l_c)| \leq T, \quad |X(k_f, l_f)| > T \quad (3.11)$$

Praktiniais bandymais nustatyta, kad medžiagos defektų nulemti transformacijos koeficientai $X(k_f, l_f)$ keičia aproximacijos vaizdų statistines savybes, todėl gaunami tikimybės tankio funkcijos aproximacijos neatitikimai. Praktiniam filtravimo slenksčio skaičiavimui pasinaudota šiuo pastebėjimu ir teorija, išdėstyta [24] literatūroje.

Skaičiuojamas pirmasis momentas:

$$m_1(t) = \int_{-\infty}^t |x| p(x) dx + \int_t^{+\infty} |x| p(x) dx, \quad (3.12)$$

$p(x)$ – koeficientų pasiskirstymo tankio funkcija. Aproximuojantis pirmasis momentas skaičiuojamas įsistačius aproksimuotą tankio funkciją $\tilde{p}(x)$. Globalus slenkstis τ bus:

$$\tau = \arg \min_{t>0} |m_1(t) - \tilde{m}_1(t)| \approx T. \quad (3.13)$$

Realiems skaičiavimams siūloma rasti tokį parametą t , kad funkcija

$$f(t) = \frac{m_1(t)}{\tilde{m}_1(t)} \text{ būtų lygi vienam, t. y. } f(t)=1.$$

Praktiniai rezultatai rodo, kad koeficientų filtravimas kieto ar minkšto slenksčio metodu ir duomenų atstatymas, naudojant ADBT neduoda laukiamų rezultatų. Minkšto slenksčio formulė ir grafikas (3.3 pav.):

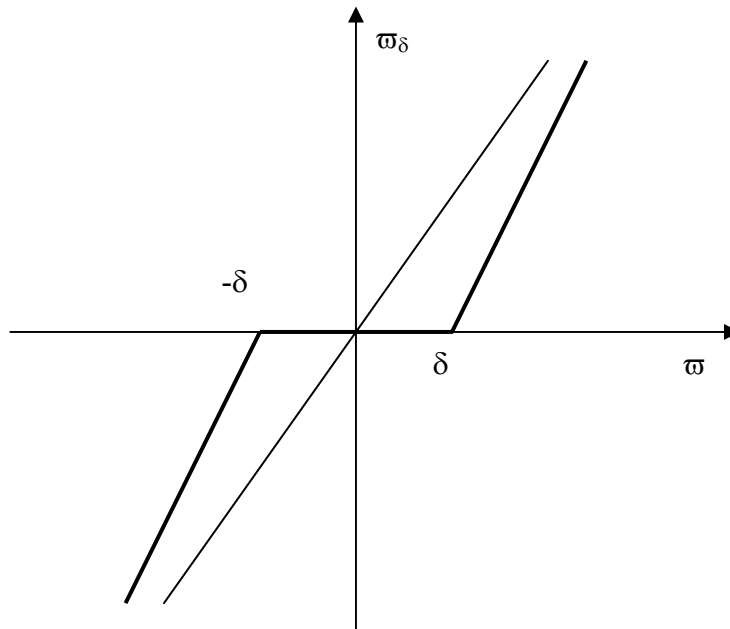
$$\varpi_\delta = D_\delta \cdot \varpi, \quad (3.14)$$

čia ϖ - bangelių transformacijos koeficientai,

ϖ_δ - filtruoti bangelių transformacijos koeficientai,

$$D_\delta = \text{diag}[d_{ii}], \quad (3.15)$$

$$d_{ii} = \begin{cases} 0 & \text{jei } |\varpi_i| < \delta, \\ 1 - \frac{\delta}{|\varpi_i|} & \text{priešingu atveju} \end{cases} \quad (3.16)$$



3.3 pav. Minkšto slenksčio funkcija

Nufiltruotas minkšto ar kieto slenksčio metodu ir atstatytas vaizdas gaunamas netikslus, reikiant pavaizduoti defektus kartu su fono vaidu juos mažai išryškina. Toks vaizdas neduoda reikiamos informacijos apie defektus medžiagoje, nors ir būna be triukšmų.

Todėl šiame darbe atliekamas ne tiesioginis filtravimas, o pagal slenksčių iš aproksimacijos koeficientų kuriami vaizdai :

$$B_{m,n}^j(k,l) = \begin{cases} |D_{m,n}^j f(k,l)|^z & \text{jei } |D_{m,n}^j f(k,l)| > \tau_{m,n}^j \\ 1 & \text{priešingu atveju} \end{cases} \quad (3.17)$$

Reikiant atstatyti foną su jame išryškintais defektų vaizdais kuriami tokie vaizdai:

$$B_{m,n}^j(k,l) = \begin{cases} |D_{m,n}^j f(k,l)|^z & \text{jei } |D_{m,n}^j f(k,l)| > \tau_{m,n}^j \\ |D_{m,n}^j f(k,l)| & \text{priešingu atveju} \end{cases} \quad (3.18)$$

3.5 Bangelių transformacijos efektyvumo tyrimas

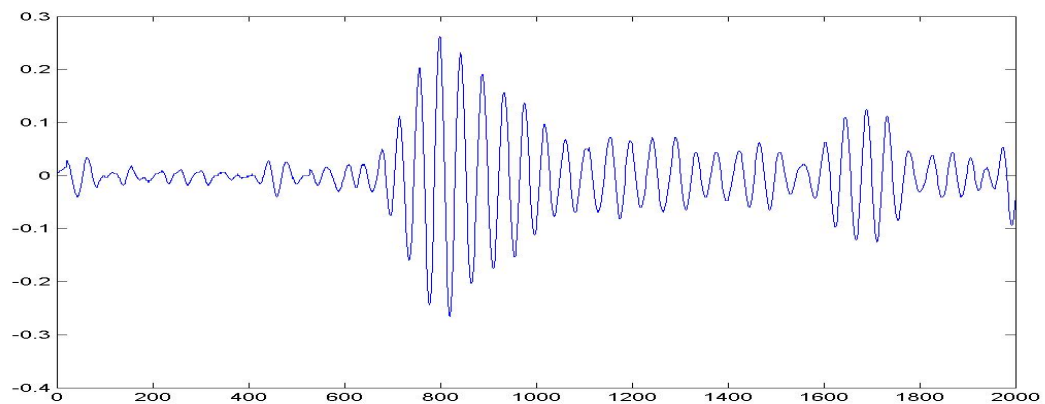
Imituojant C tipo skenavimo būdą buvo susintetinti vienmatis A tipo signalas bei dvimatis C tipo signalas. Tyrimo metu prie signalų pridedamas baltasis triukšmas. Tyrimo tikslas yra nustatyti signalų iškraipymo lygį kuriam esant bangelių transformacijos metodas gali duoti.

Tada kokybės kriterijumi yra signalo triukšmo santykis:

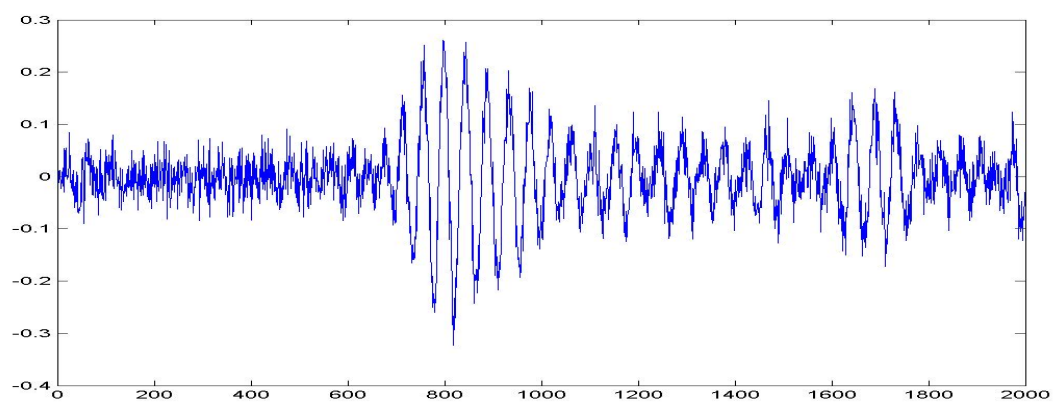
$$STS(\delta) = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sum_i f_i^2}{\sum_i \varepsilon_{\delta}^2} \quad (3.19)$$

čia $\varepsilon_{\delta} = y_{\delta} - f$.

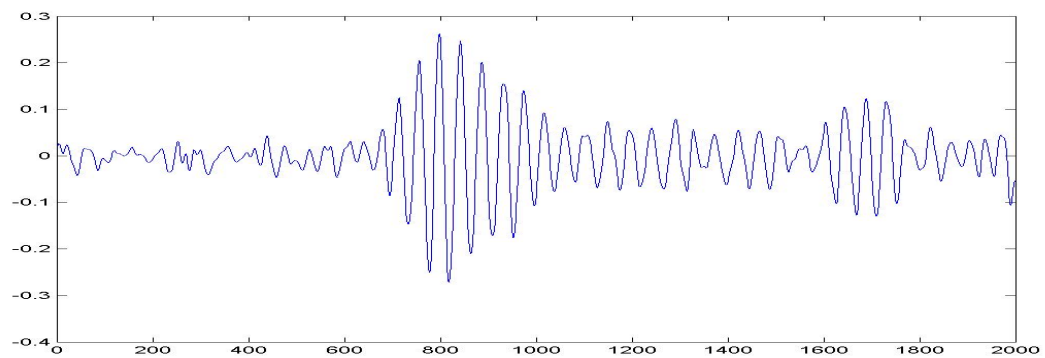
C tipo akustinis vaizdas sudaromas iš A tipo akustinių signalų amplitudžių reikšmių. A tipo signalai turi mažą iškraipymo lygį. Trukdžiai gali daryti neigiamą įtaką tiksliam amplitudės paskaičiavimui, todėl nutarta prieš skaičiuojant amplitudę atlikti signalo sodrinimą naudojant vienmatę bangelių transformaciją. Norint ištirti šios operacijos efektyvumą buvo atliktas eksperimentas pavaizduotas 3.5 pav. Šiam eksperimentui naudotas susintetintas signalas 3.4 pav. a, prie signalo pridėti triukšmai 3.4 pav. b. Eksperimento metu gautas apdorotas signalas vaizduojamas 3.4 pav. c.



a)

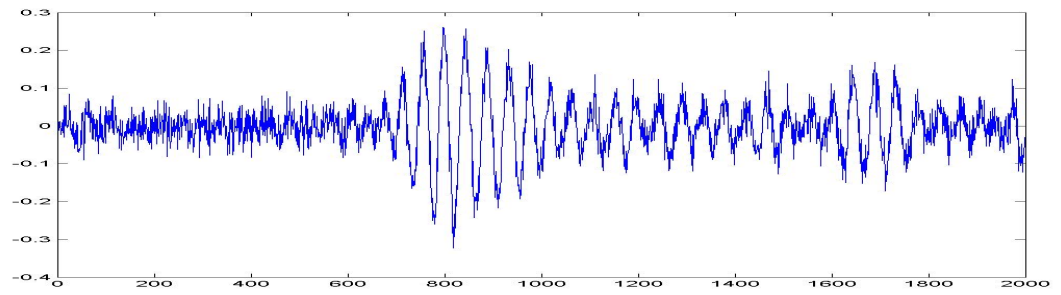


b)

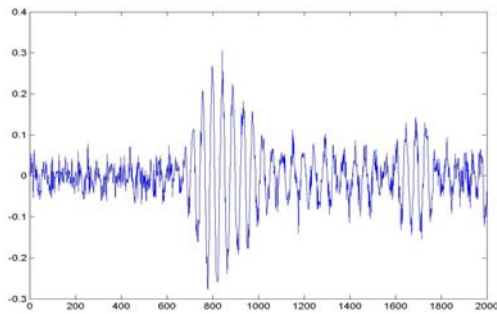


c)

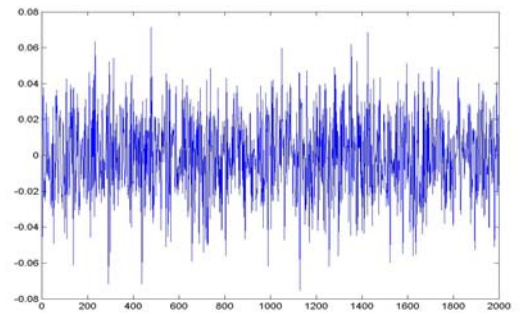
3.4 pav. A tipo ultragarsiniai signalai a) pradinis signalas, b) signalas su baltu triukšmu (STS=0,83), c) nufiltruotas signalas (STS=2,83)



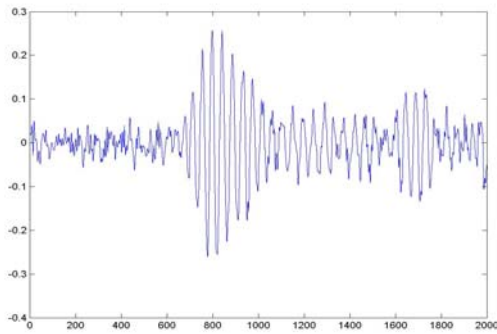
a)



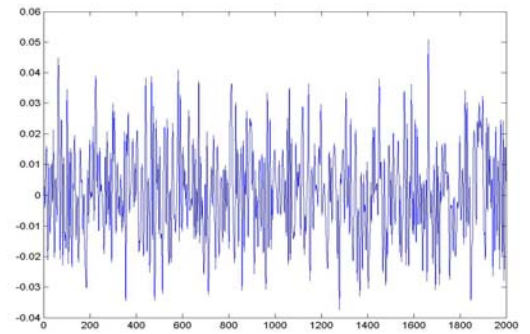
b)



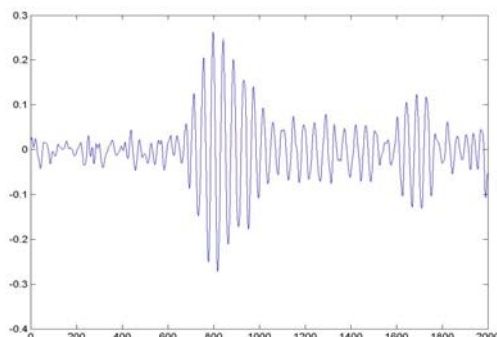
c)



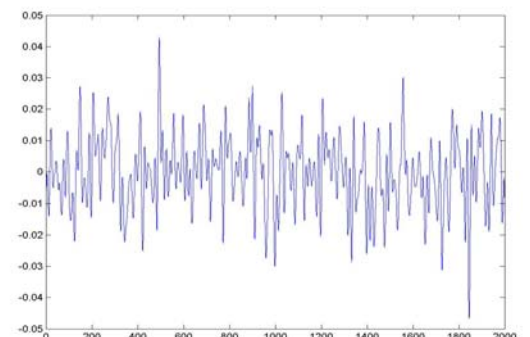
d)



e)



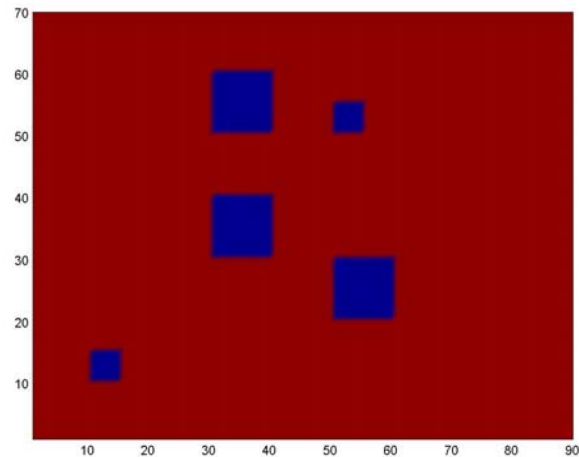
f)



g)

3.5 pav. A tipo ultragarsinio signalo filtravimo eiga. a) signalas su triukšmu, b) pirmojo transformacijos lygio aproksimacijos koeficientai, c) pirmojo transformacijos lygio detalių koeficientai, d) antrojo transformacijos lygio aproksimacijos koeficientai, e) antrojo transformacijos lygio detalių koeficientai, f) trečiojo transformacijos lygio aproksimacijos koeficientai, g) trečiojo transformacijos lygio detalių koeficientai

Antroje eksperimento dalyje buvo tiriamas dvimatės bangelių transformacijos bei adaptyvaus filtravimo slenksčio efektyvumas. Susintetintame C tipo vaizdo modelyje (3.6 pav.) yra dviejų skirtingų dydžių defektų.

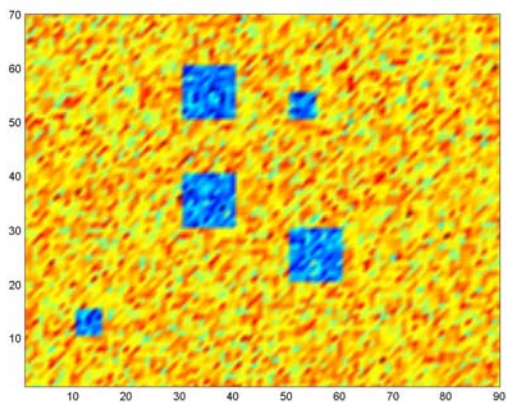


3.6 pav. Susintetintas C tipo vaizdo modelis

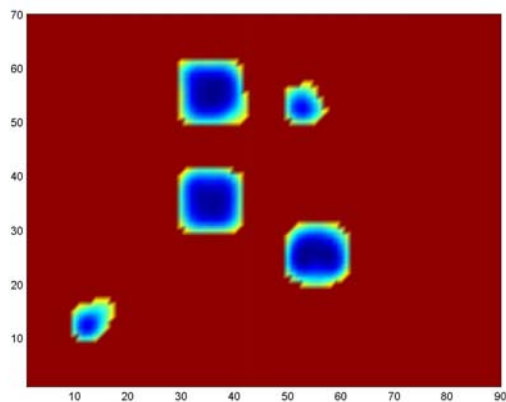
Eksperimente į susintetintą C tipo vaizdą buvo įterpiamas baltasis triukšmas, kurio lygis kiekviename eksperimente buvo didinamas. Eksperimentas parodė, kad esant žemam triukšmų lygiui (3.7 pav.) siūlomas algoritmas gali duoti labai gerų rezultatų, visi defektai aptinkami, jų koordinatės ir dydžiai pakankamai gerai atitinka susintetinto vaizdo defektų koordinatės ir dydžius. Didėjant triukšmų lygiui (3.8 pav.) aptinkamų defektų plotas mažėja. Defektų ploto mažėjimui įtaką daro adaptyvaus filtravimo slenksčio parinkimo algoritmas – esant dideliame triukšmų lygiui transformuotame signale yra labai daug potencialių defektų vaizdų, siekiant atrinkti tik ryškiausius defektus filtravimo slenkstis artėja prie maksimalios defektus vaizduojančios reikšmės. Esant labai aukštam triukšmų mažesni defektai yra neaptinkami (3.8 pav. (f)), aptinkami tik didesni defektai ir mažesni defektai kurių srityje vidutinis triukšmų lygis buvo mažesnis. Visuose eksperimentuose ženkliai padidintas STS (žiūr. 1 lentelę), geriausi rezultatai buvo gauti naudojant Daub-20 bangele.

Lentelė 1. Bangelių tipo įtaka defektų aptikimui modeliuotame vaizde

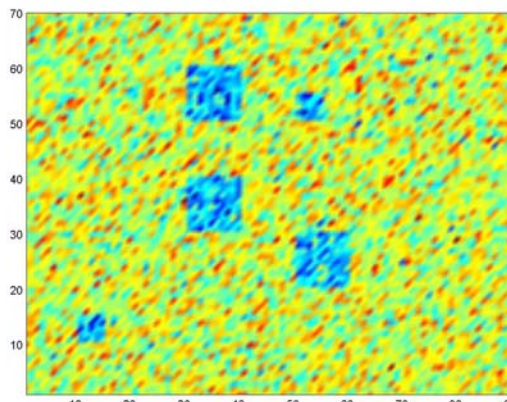
Pradinio vaizdo STS, dB	Naudojant skirtingus bangelių tipus apdorotų vaizdų STS, dB				
	Daub-1	Daub-4	Daub-20	Sym-4	Coif-4
1,22	3,48	6,63	10,67	9,37	10,12
-4,8	3,26	3,47	3,83	3,63	3,79
-10,82	2,68	3,24	3,77	3,52	3,65
-12,76	2,15	2,88	3,48	3,18	3,22
-14,34	1,23	2,35	3,28	2,91	3,19
-15,68	0,48	0,27	0,97	0,78	0,89



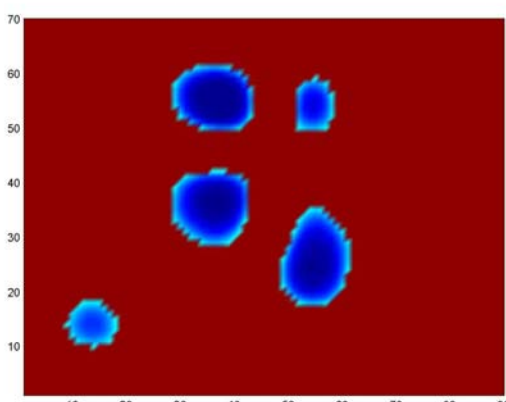
a)



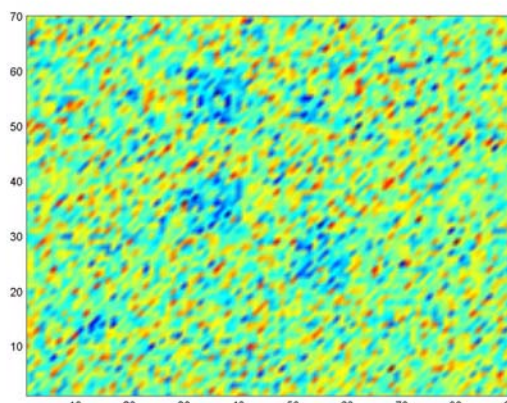
b)



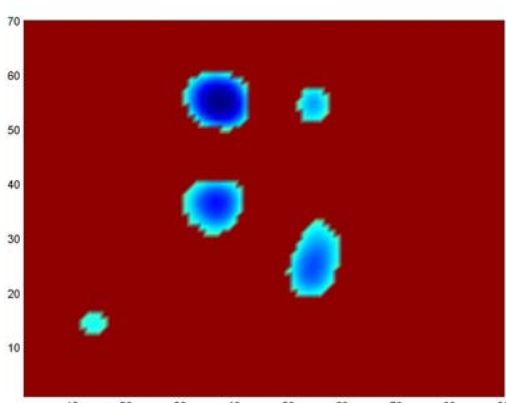
c)



d)

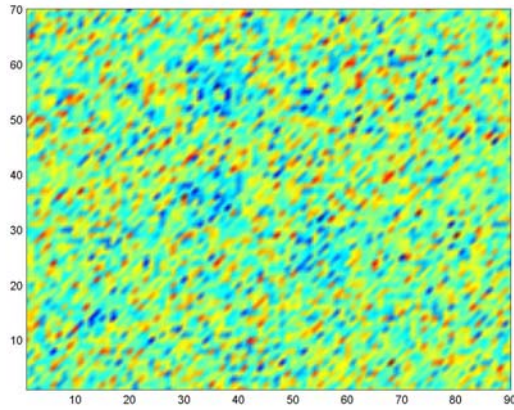


e)

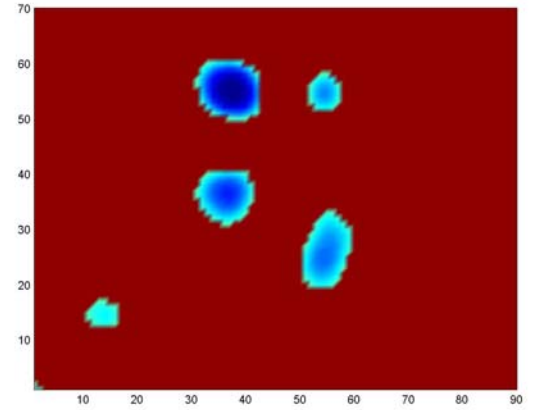


f)

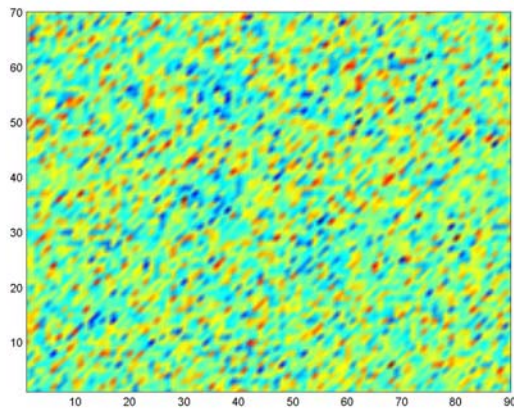
3.7 pav. Modeliavimo rezultatai esant žemam triukšmų lygiui. a) neapdorotas vaizdas (STS = 1,22 dB), b) apdorotas vaizdas (a), c) neapdorotas vaizdas (STS = -4,8 dB), d) apdorotas vaizdas (c), e) neapdorotas vaizdas (STS= -10,82 dB), f) apdorotas vaizdas (e).



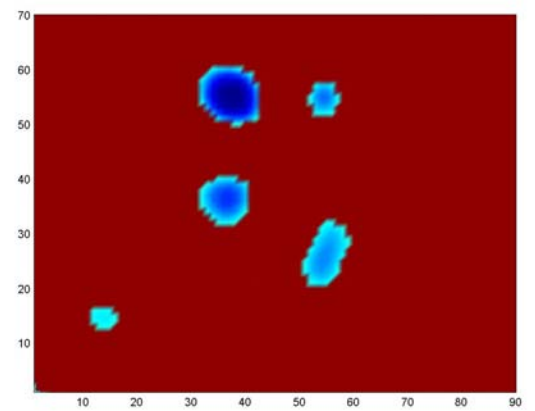
a)



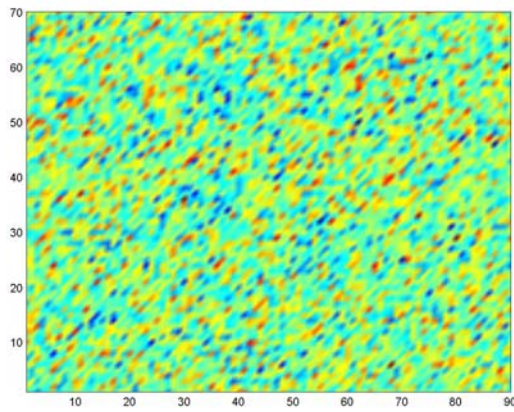
b)



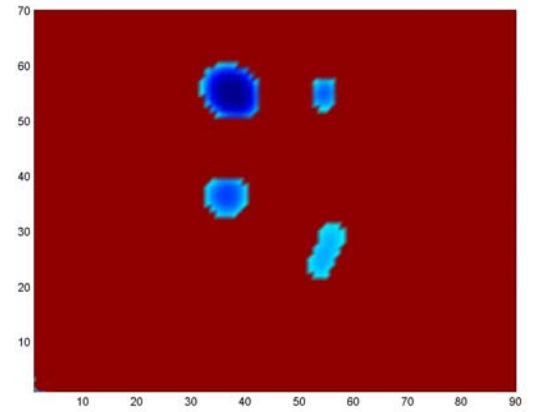
c)



d)



e)



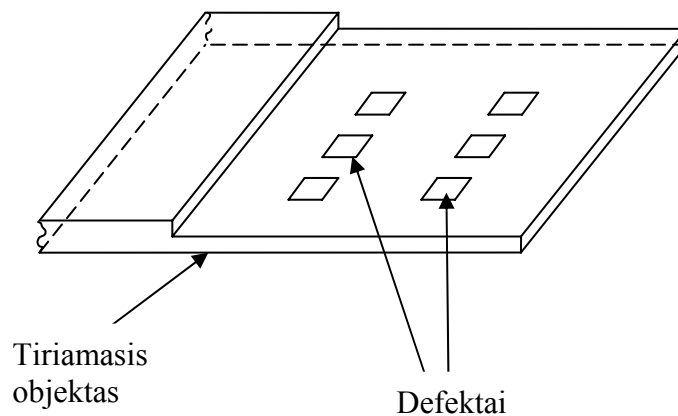
f)

3.8 pav. Modeliavimo rezultatai esant aukštam triukšmų lygiui. a) neapdorotas vaizdas (STS = -12,76 dB), b) apdorotas vaizdas (a), c) neapdorotas vaizdas (STS = -14,34 dB), d) apdorotas vaizdas (c), e) neapdorotas vaizdas (STS = -15,68 dB), f) apdorotas vaizdas (e).

4. Eksperimento rezultatai

4.1 Tiriamasis objektas

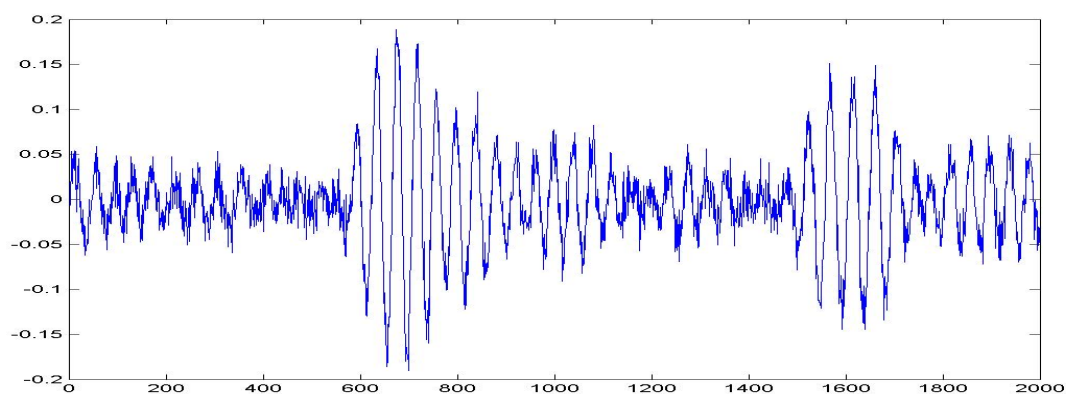
Tyrime ir eksperimente naudoti akustiniai signalai, iš kurių buvo suformuoti akustiniai vaizdai, buvo gauti C skenavimo metodu skenuojant tiriamąjį objektą su žinomais defektais (4.1 pav.). Sukurtas akustinis vaizdas ir turimas tikrasis objekto vaizdas leidžia padaryti išvadas apie ultragarsinio signalo vaizdų kūrimo pagerinimą, bei apie defektų radimo tikslumą ir patikimumą.



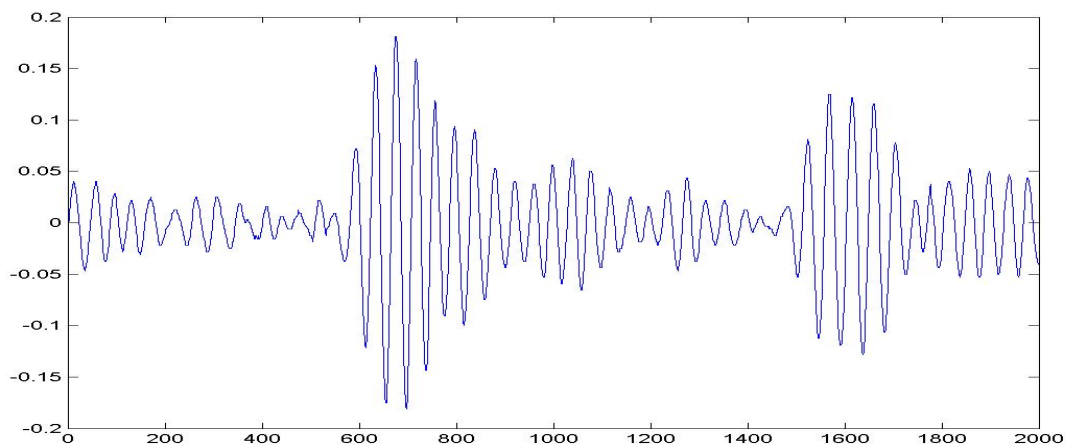
4.1 pav. Tiriamojo objekto schema

4.3 Bangelių transformacijos panaudojimas A tipo signalų apdorojimui

Eksperimentams naudoti tiriamojo objekto skenavimo metu gauti A skenavimo signalai. Transformacijai naudota I.Daubechies sukonstruota Daub-20 bangelė. Atliekama dviejų lygių transformacija. Tolimesniuose skaičiavimuose naudojamas gautas nufiltruotas signalas.



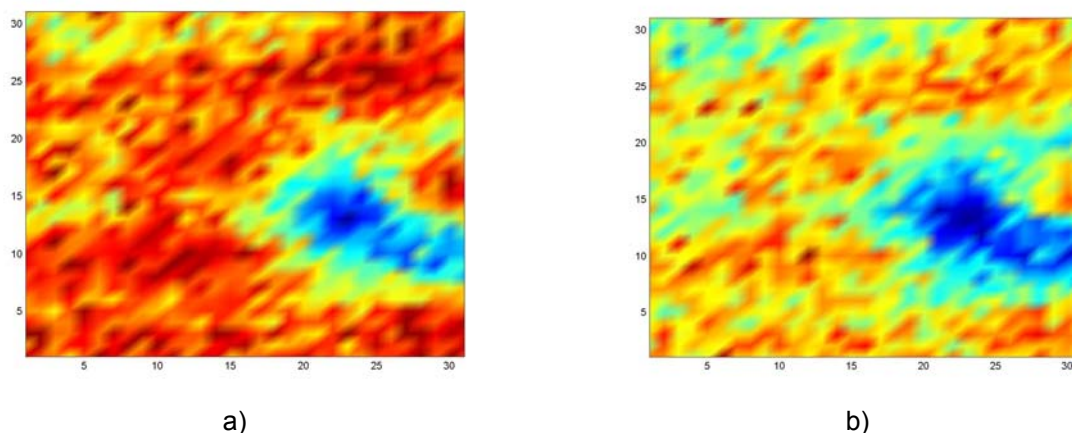
a)



b)

4.2 pav. A tipo skenavimo signalo transformacijos rezultatai. a) pradinis signalas (amplitudė $A = 0.3971$), b) apdorotas signalas (amplitudė $A = 0.3625$)

4.2 pav. pavaizduotas A tipo ultragarsinis signalas gautas skenuojant tiriamąjį objektą (4.2 pav. (a)), su kuriuo buvo atlikta dviejų lygių transformacija. Matyti, kad signalas turi triukšmų kurie gali daryti įtaką signalo amplitudės skaičiavimui. Naudojant bangelių transformaciją gautas signalas (4.2 pav. (b)) kuriame pašalinti triukšmai. Pašalinus triukšmus pasikeitė ir signalo amplitudė.



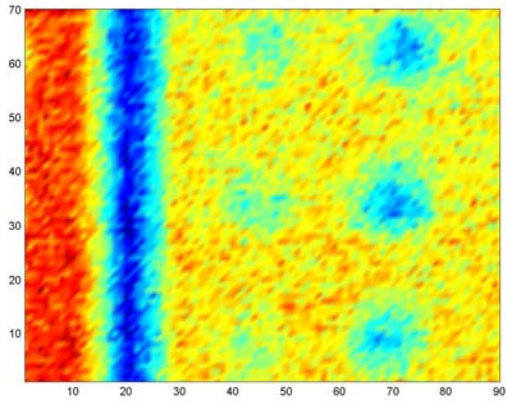
4.3 pav. A tipo skenavimo signalų apdorojimo įtaka C tipo skenavimo vaizdai. a) neapdorotas vaizdas, b) apdorotas vaizdas

4.3 pav. pavaizduota bangelių transformacijos atliktos su A tipo signalais įtaka C tipo vaizdai. Pastebimas bendro triukšmo sumažėjimas, defekto kontūrų išryškėjimas.

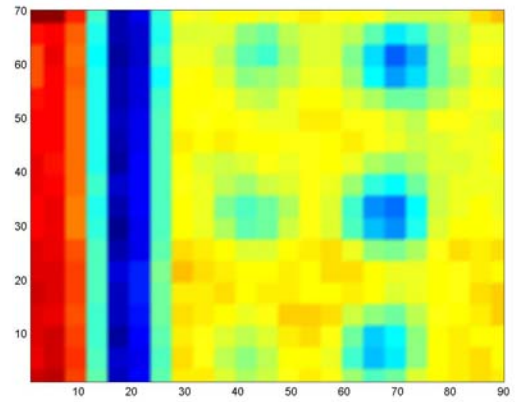
Bangelių transformacijos panaudojimas apdoroti A tipo skenavimo signalams iš kurių yra kuriamas C tipo skenavimo vaizdas davė rezultatų, bet nepakankamų. Taip apdorojus A tipo skenavimo signalus yra sukuriamos geresnės sąlygos atlikti dvimatę bangelių transformaciją su C tipo skenavimo vaizdais.

4.4 Bangelių tipo įtaka C tipo signalų apdorojimui

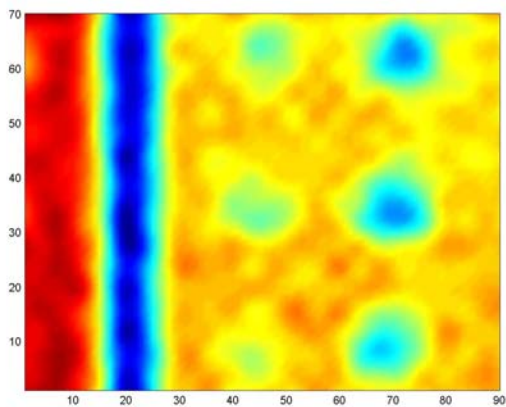
Eksperimentams naudoti tiriamojo objekto skenavimo metu gauti C skenavimo vaizdai. Transformacijai naudotos penki skirtingi bangelių tipai: Haar (žiūr. 1 priedą), Daub-4 (žiūr. 2 priedą), Daub-20 (žiūr. 3 priedą), Sym-4 (žiūr. 4 priedą) ir Coif-4 (žiūr. 5 priedą). Atliekama dviejų lygių transformacija. Tiriama bangelių tipo įtaka C tipo skenavimo vaizdų apdorojimui (4.4 pav.). Po transformacijos vykdoma signalų normalizacija, kuri išryškina po transformacijos apjungtus defektus (4.5 pav.).



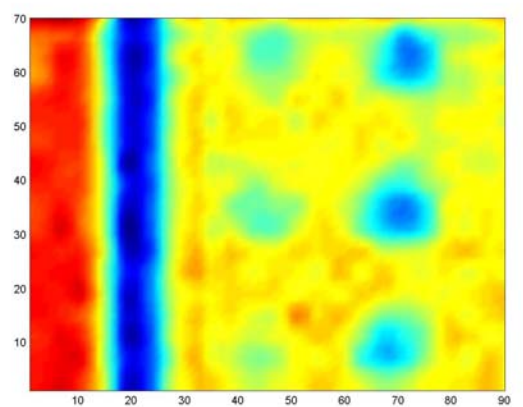
a)



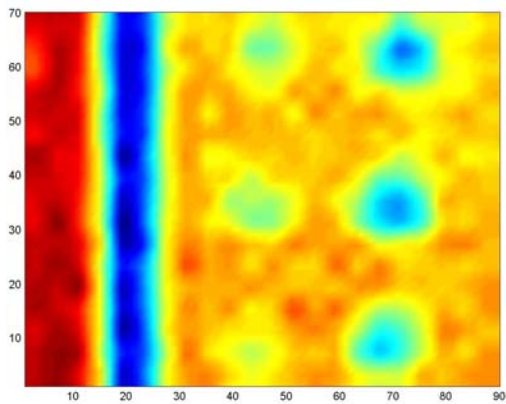
b)



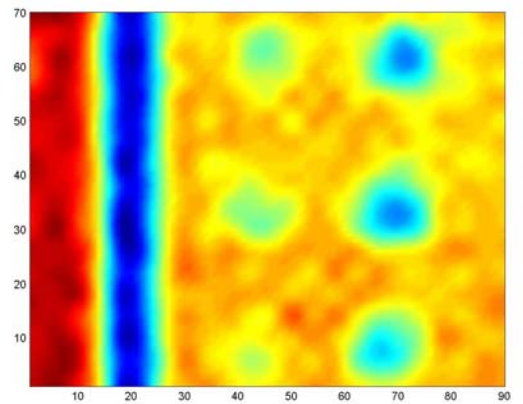
c)



d)

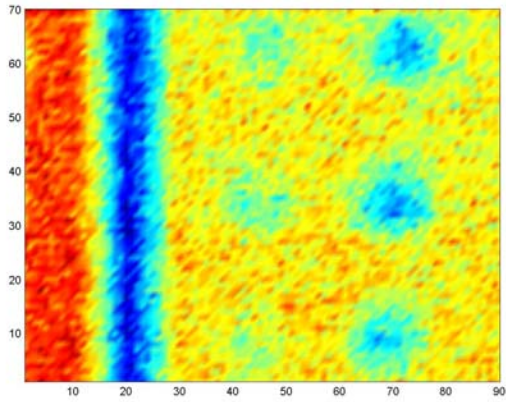


e)

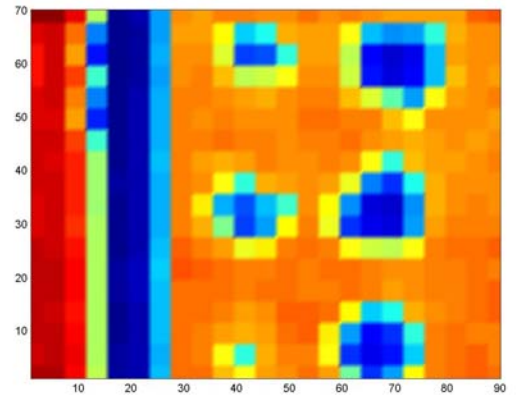


f)

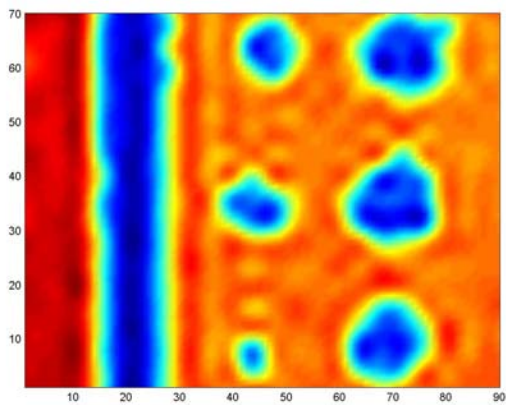
4.4 pav. Dvimatės bangelių transformacijos rezultatai. a) neapdorotas vaizdas, b) transformuotas vaizdas naudojant Haar'o bangele, c) transformuotas vaizdas naudojant Daub-4 bangele, d) transformuotas vaizdas naudojant Daub-20 bangele, e) transformuotas vaizdas naudojant Sym-4 bangele, f) transformuotas vaizdas naudojant Coif-4 bangele



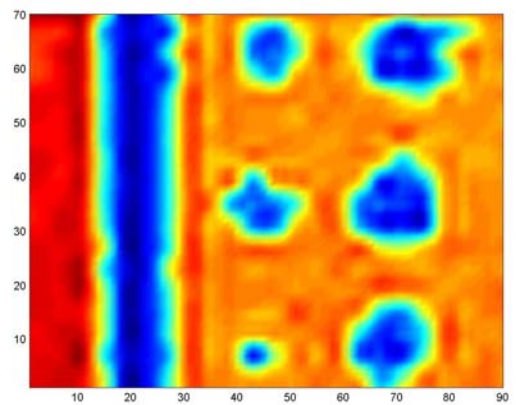
a)



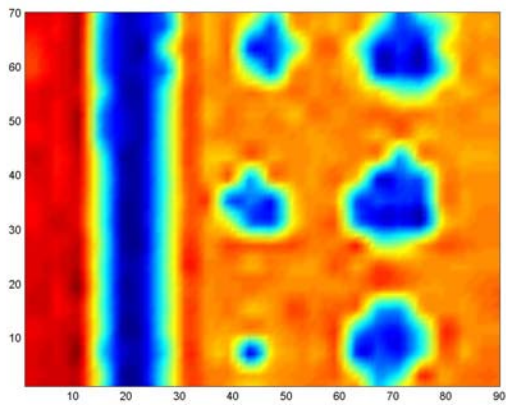
b)



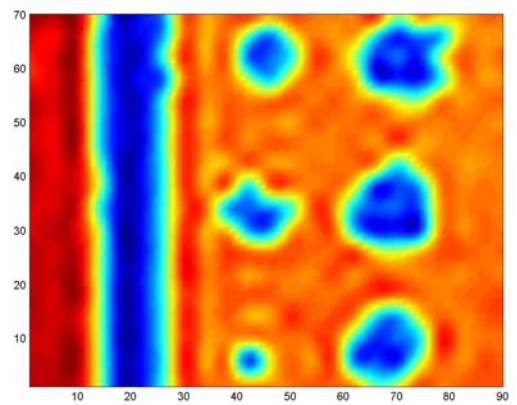
c)



d)



e)



f)

4.5 pav. Normalizuoti dvimatės bangelių transformacijos rezultatai. a) neapdorotas vaizdas, b) transformuotas vaizdas naudojant Haar'o bangelę, c) transformuotas vaizdas naudojant Daub-4 bangelę, d) transformuotas vaizdas naudojant Daub-20 bangelę, e) transformuotas vaizdas naudojant Sym-4 bangelę, f) transformuotas vaizdas naudojant Coif-4 bangelę

4.4 pav. pavaizduota bangelių transformacijos, naudojant skirtingus bangelių tipus, atliktos su C tipo vaizdu. Visuose atvejuose pastebimas bendro triukšmo sumažėjimas, defekto kontūrų išryškėjimas bei defektų vaizdų suglodinimas. Blogiausia kokybė gauta naudojant Haar'o bangelę, o tarp transformacijų rezultatų naudojant kitas bangeles žymių skirtumų nėra. Transformacijos rezultatas vis dar nėra patenkinamas, nes mažesni defektai nors ir išskiriami iš aplinkos, bet vis tiek dar yra labai blogai matomi.

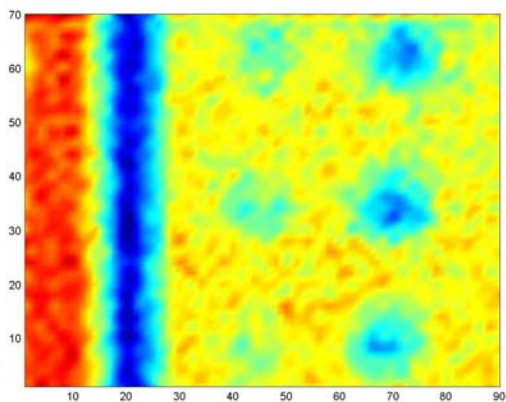
Lentelė 2. Bangelių tipo įtaka defektų aptikimui tiriamajame objekte

Pradinio vaizdo numanomas STS, dB	Naudojant skirtingus bangelių tipus apdorotų vaizdų STS, dB				
	Daub-1	Daub-4	Daub-20	Sym-4	Coif-4
-11,82	1,88	3,12	3,96	3,52	3,65

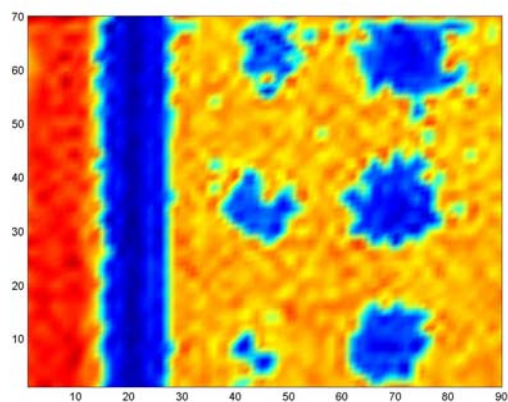
4.5 pav. pavaizduota transformuotų , naudojant skirtingus bangelių tipus, C tipo vaizdų normalizacijos rezultatai. Visuose atvejuose pastebimas žymus defektų ryškumo padidėjimas ir defekto kontūrų išryškėjimas. Transformacijos metu suglontintus signalus pavyko geriau normalizuoti ir taip gauti reikiamų rezultatų. Blogiausi rezultatai gauti naudojant Haar'o bangelę (žiūr. lentelę 2), o tarp transformacijų rezultatų naudojant kitas bangeles žymių skirtumų nėra. Didžiausias STS gautas naudojant Daub-20 bangelę.

4.5 Bangelių transformacijos lygio įtaka C tipo signalų apdorojimui

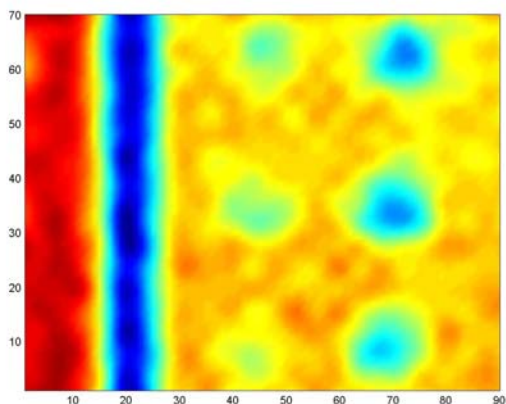
Atlikus bangelių tipo įtakos transformacijos rezultatam tyrimą, galima spręsti, kad bangelių tipas neturi įtakos C tipo vaizdų apdorojimo rezultatam, jei naudojamos aukštesnės eilės bangelės, todėl tolimesniems tyrimams buvo pasirinkta I.Daubechies sukonstruota Daub-20 bangelė. Eksperimente tiriama bangelių transformacijos lygio įtaka C tipo vaizdų apdorojimui (4.6 pav.). Kaip matyti bangelių transformacijos lygis turi didelę įtaką rezultatam. Atlikus tik pirmo lygio transformaciją pašalinami tik labai smulkūs triukšmai, patys defektai šiek tiek paryškunami, bet jų kontūrai lieka neaiškūs ir išbarstyti. Geriausi rezultatai yra po dviejų transformacijos lygiu, vaizduose pakankamai panaikinti foniniai triukšmai, defektų vaizdai glodūs, defektų kontūrai pakankamai aiškūs. Po dviejų lygiu transformacijos ir normalizacijos pakankamai gerai matosi tiek dideli tiek mažesni defektai. Atlikus trijų lygių transformacija foniniu triukšmų lygis dar mažesnis, labai gerai išryškinti dideli defektai, bet smulkesnių defektų kontūrai yra labai neaiškūs. Normalizavus gauta vaizdą galima pastebėti, kad smulkesni defektai, kurie buvo matomi tiek po pirmojo tiek po antrojo transformacijos lygio, dabar yra neryškūs.



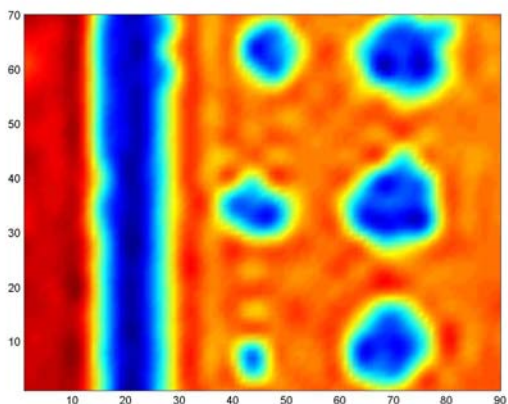
a)



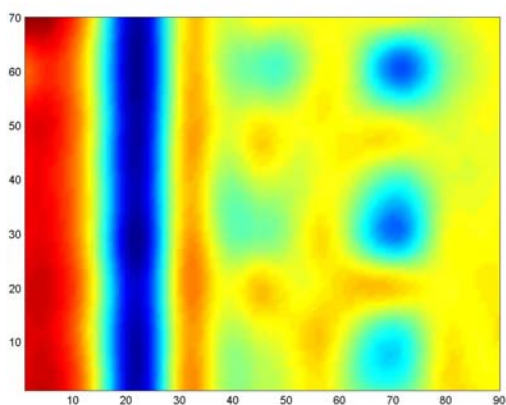
b)



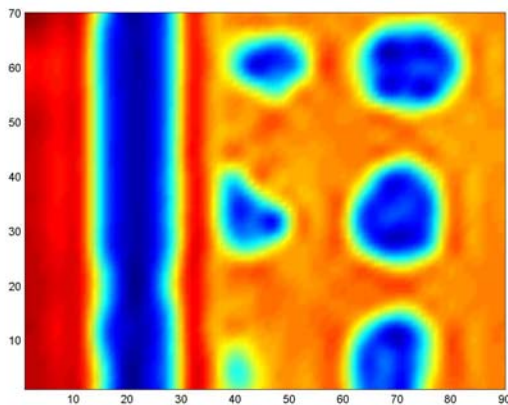
c)



d)



e)

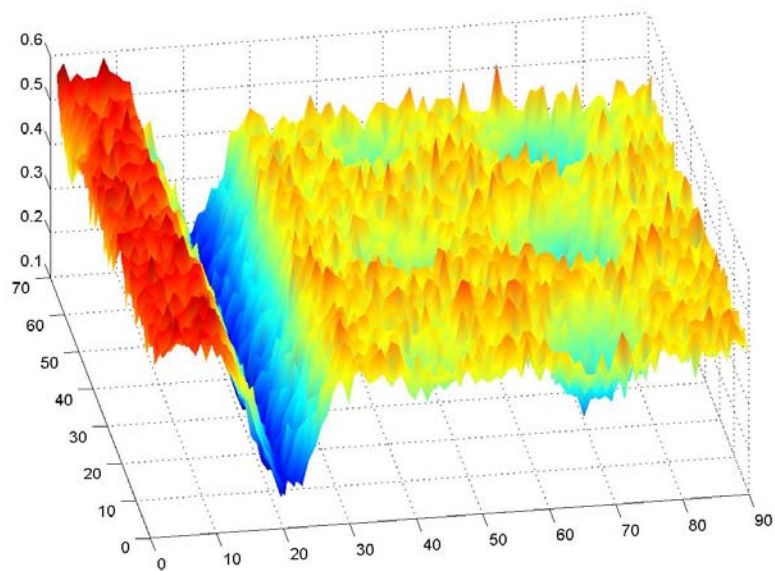


f)

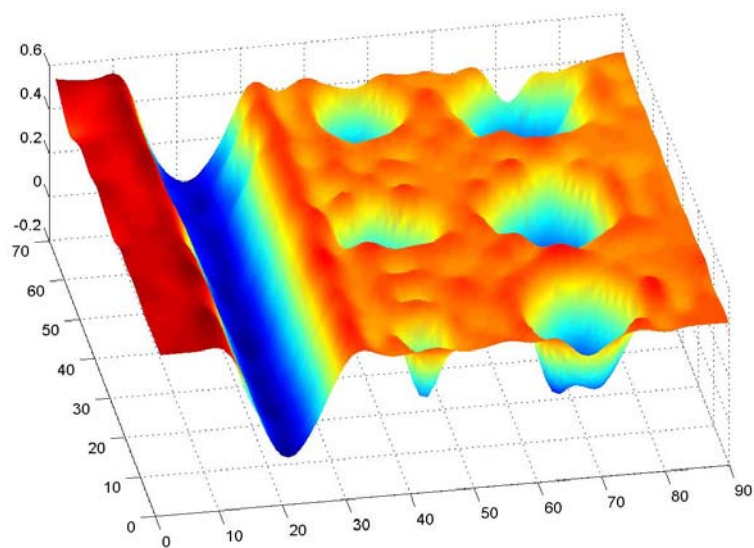
4.6 pav. Dvimatės bangelių transformacijos lygių palyginimas. a) pirmojo transformacijos lygio rezultatas, b) normalizuotas pirmojo transformacijos lygio rezultatas, c) antrojo transformacijos lygio rezultatas, d) normalizuotas antrojo transformacijos lygio rezultatas, e) trečiojo transformacijos lygio rezultatas, f) normalizuotas trečiojo transformacijos lygio rezultatas

4.6 Bangelių transformacijos panaudojimo C tipo signalų apdorojimui rezultatai

Atlikti eksperimentai parodė, kad apdorotuose vaizduose nebelieka foninių ir interferencinių triukšmų, išryškunami defektai, kurie buvo matomi originaliame C skenavimo vaizde. Defektų koordinatės pakankamai tiksliai atitinka realaus objekto sandaros defektus. Pasirinktas algoritmas leidžia apdorotus vaizdus vaizduoti aksiometriniėje erdvėje(4.7 pav.), taip vartotojas susidaro geresnę nuomonę apie tiriamojo objekto defektus bei paviršiaus nelygumus.



a)



b)

4.7 pav. Tyrimų rezultatai. A) neapdorotas vaizdas (aksiometrinis), b) apdorotas vaizdas(aksiometrinis)

5. Išvados

1. Siekiant sumažinti triukšmų įtaką ir vaizdo iškreipimus C skenavimo vaizde, atlikta “pseudo trimatė” bangelių transformacija : vienmatė transformacija A-skenavimo signalui ir po to dvimatė C skenavimo vaizdui. Apdorotame vaizde gaunamas geresnis “gylio” vaizdas.
2. Eksperimentams atlikti buvo naudojami realūs tiriamieji objektai. Eksperimentai parodė kad bangelių transformacija gali būti sėkmingai naudojama tiek vienmačių tiek dvimačių ultragarsiniu signalų apdorojimui.
3. Siūlomas algoritmas C skenavimo vaizdų objekto sandaros defektams išryškinti, naudojant dvimatę bangelių paketų transformaciją. Algoritmas pagrįstas literatūroje pateikiama teorija vaizdų analizei atlikti naudojant bangelių paketų transformaciją. Algoritme nauja yra tai, kad defektams išryškinti naudojamas kombinuotas metodas kurio pirmajame etape duomenys apie defektus yra suglodinami, o antrajame etape duomenys apie defektus yra normalizuojami. Tai leidžia greičiau ir tiksliau nustatyti tiriamajame objekte visus norimo dydžio defektus.
4. Eksperimentai parodė, kad apdorotuose vaizduose nebelieka foninių ir interferencinių triukšmų, išryškinami defektai, kurie buvo matomi originaliaame C skenavimo vaizde. Defektų koordinatės pakankamai tiksliai atitinka realaus objekto sandaros defektus.

Literatūros sąrašas

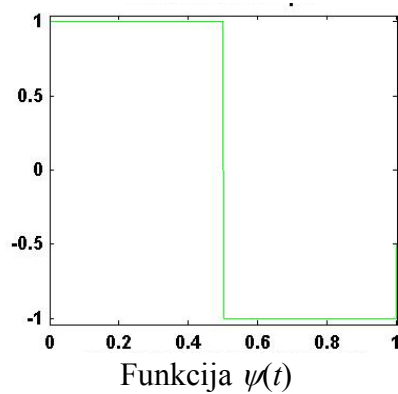
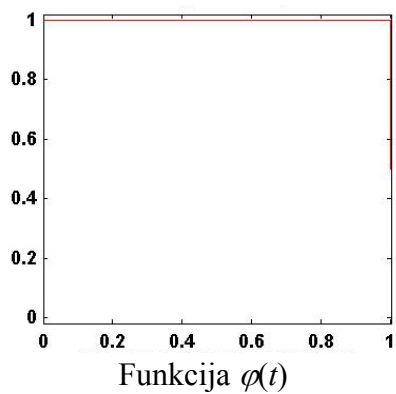
1. Интроскопия и автоматизация неразрушающего контроля / В. Сухоруков, Е. Вайнберг, Р. Кажис, А. Абакумов. Москва, 1993.
2. Halmshaw R. Non-destructive Testing. London, 1993.
3. Nondestructive Testing Encyclopedia Main Page [interaktyvus]. The online Journal of Nondestructive testing & Ultrasonics [žiūrėta 2004-03-26]. Prieiga per internetą: <<http://www.ndt.net/article/az/ndtmain.htm>>.
4. Grap A. An Introduction to Wavelets, IEEE Computational Sciences and Engineering, Volume 2, Number 2, Summer 1995, p 50-61. [žiūrėta 2004-02-10] Amara's Papers and Talks. Prieiga per internetą: <<http://www.amara.com/papers/papers.html#otherpapers>>.
5. Wells R. O. Recent Advances in Wavelet Technology. Rice Computational Mathematics Laboratory, Rice University, Houston [žiūrėta 2004-03-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.cml.rice.edu/94.html>>.
6. Mac Cody A.. The Fast Wavelet Transform-Beyond Fourier Transforms. Dr. Dobb's Journal, April 1992. M&T Publishing Inc., Miller Freeman Publishing, Inc.
7. Coifman R. R. Wavelet Analysis and Signal Processing / Ronald R. Coifman, Yves Meyer, M. Victor Wickerhauser // Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1992, Washington University, Department of Mathematics [žiūrėta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
8. Wickerhauser M. V. Adapted Waveform Analysis, Wavelet-Packets and Applications. Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1992, Washington University, Department of Mathematics [žiūrėta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
9. Wickerhauser M. V. Time Localization Techniques for Wavelet Transforms. Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1995, Washington University, Department of Mathematics [žiūrėta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
10. Coifman R. R. Wavelets, Adapted Waveforms, and De-Noising/ Ronald R. Coifman, M. Victor Wickerhauser // Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1996, Washington University, Department of Mathematics [žiūrėta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.

11. Hess-Nielsen N. Wavelets and Time-Frequency Analysis / Nikolaj Hess-Nielsen, M. Victor Wickerhauser // Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1996, Washington University, Department of Mathematics [žiūrēta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
12. Wickerhauser M. V.. Wavelet Theory and Applications. Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1997, Washington University, Department of Mathematics [žiūrēta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
13. Edwards T. Discrete Wavelet Transforms: Theory and Application. Stanford University [žiūrēta 2003-04-10]. Prieiga per internetą: <ftp://isl.stanford.edu/pub/godfrey/reports/wavelets/tim_edwards/wave_paper/>.
14. Vidakovič B. Wavelets for Kids / Brani Vidakovič, Peter Muler // Duke University, Institute of Statistics and Decision Science [žiūrēta 2004-02-22]. Prieiga per internetą: <<ftp://ftp.isds.duke.edu/pub/brani/papers>>.
15. Wickerhauser M. V..Lectures on Wavelet Packet Algorithms. Publication's by M. Victor Wickerhauser, 1991, Washington University, Department of Mathematics [žiūrēta 2003-09-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.wustl.edu/~victor/papers/index.html>>.
16. Strang G. Eigenvalues of $(\downarrow 2) H$ and Convergence of Cascade Algorithm. Massachusetts University of Technology, Department of Mathematics [žiūrēta 2004-03-10]. Prieiga per internetą: <<http://www-math.mit.edu/~gs/papers/e.ps.gz>>.
17. Fournier A. Wavelets and their Applicatons in Computer Graphics. University of British Columbia [žiūrēta 2003-03-10]. Prieiga per internetą: <<ftp://ftp.cs.ubc.ca/pub/local/bob/wvlt/notes.ps.Z>>.
18. Jawerth B. An Overview of Wavelet Based Multiresolution Analyses / Bjorn Jawerth, Wim SWeldens // Columbia, University of South Carolina, Department of Mathematics [žiūrēta 2003-03-17]. Prieiga per internetą: <<ftp://maxwell.math.scarolina.edu/pub/wavelet/papers/varia/sirev-36-3.ps.gz>>.
19. Coifman R. R. Entropy-based Algorithms for Best Basis Selection / Ronald R. Coifman, Mladen Victor Vickerhauser // Yale University, Department of Mathematics [žiūrēta 2004-01-7]. Prieiga per internetą: <<ftp://wuarchive.wustl.edu/doc/techreports/wustl.edu/math/papers/entbb.ps.Z>>.
20. Stollnitz E. j. Wavelets for Computer Graphics: A Primer / Eric J. Stollnitz, Tony D. DeRose, David H. Salesin // University of Washington [žiūrēta 2004-03-26]. Prieiga per internetą: <<http://www.cs.washington.edu/research/graphics/projects/wavelets/related.html>>.

21. Каино Г. Акустические волны. Москва, 1990. 652 p.
22. Identification and Synthesis of Acoustic Scattering Components via Wavelet Transform / D. M. Drumheller, D. H. Hughes, B. T. O'Connor, C. F. Gaumond // Acoustic Society. 1995, Nr 6.
23. Murthy R. Detection of Ultrasonic Anomaly Signals Using Wavelet Decomposition / Rashmi Murthy, Nihat M. Bilgutay, O. Kagan Kaya // Drexler University, Signal Processing Laboratory [žiūrėta 2003-04-20]. Prieiga per internetą: <http://www.ece.drexel.edu/SPL/nov1997.htm>.
24. Robini M. C. Two-Dimensional Ultrasonic Flaw Detection Based on The Wavelet Packet Transform / Marc C. Robini, Isabelle E. Magnin, Atilla Baskurt // IEEE transactions of ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 1997, Vol. 44, No 6.
25. Mallat. S.. Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. Transactions of the American Mathematical Society, vol 315, no. 1. Pp 69-87, 1989.
26. Wave2000, Software for Computational Ultrasonics [interaktyvus]. Cyber Logic, Inc., 1999 [žiūrėta 2003-04-02]. Prieiga per internetą: <http://www.cyberlogic.com/wave2000.html>.
27. Yoshida H. Segmentation of Liver Tumors in Ultrasound Images based on Scale-Space Analysis of Continuous Wavelet Transform / Hiroyoki Yoshida, Bilgin Keserci, David D. Casalino, Abdulhakim Coskun ir kt. // 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium : tarptautinės konferencijos medžiaga [Japonija, Sendai, 1998 m. spalio 5-8 d.].
28. Cena B. Wavelet Based Visualisation System / Bernard Cena, Nick Spadaccini // The University of Western Australia [žiūrėta 2003-09-05]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.uwa.edu.au/~bernard/research.html>.
29. Cena B. Wavelet Shrinkage of Ultrasound Data/ Bernard Cena, Nick Spadaccini // The University of Western Australia [žiūrėta 2003-09-05]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.uwa.edu.au/~bernard/research.html>.

Priedai

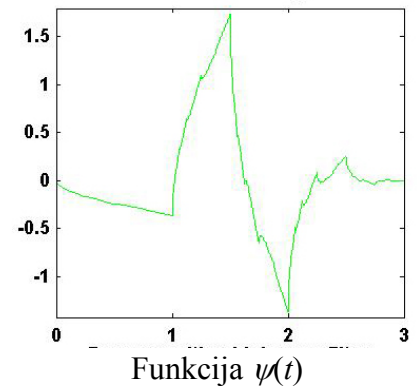
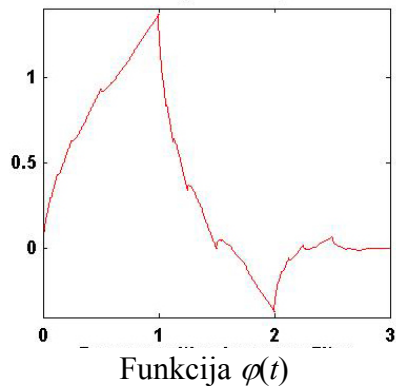
1 Priedas. Bangelē Haar (Daub-1)



Daub-1 bangelēs koeficientai

C0	7.07106781186547 E-1
C1	7.07106781186547 E-1

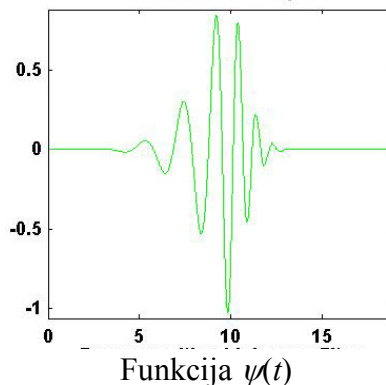
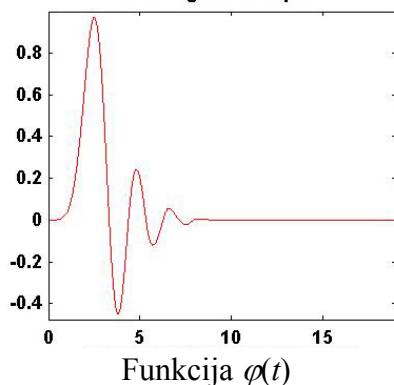
2 Priedas. Bangelē Daub-4



Daub-4 bangelēs koeficientai

C0	4.8296291314453416 E-1
C1	8.3651630373780794 E-1
C2	2.2414386804201339 E-1
C3	-1.2940952255126037 E-1

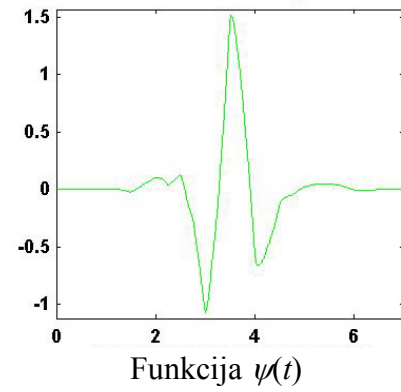
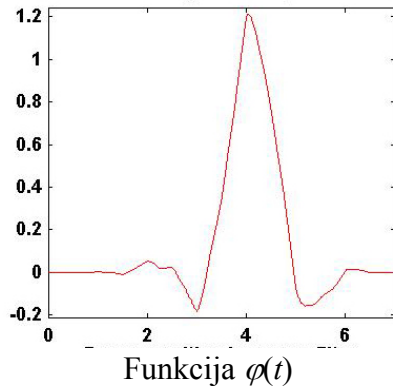
3 Priedas. Bangalē Daub-20



Daub-20 bangalēs koeficientai

C0	2.66700579010 E-2
C1	1.88176800078 E-1
C2	5.27201188932 E-1
C3	6.88459039454 E-1
C4	2.81172343661 E-1
C5	-2.49846424327 E-1
C6	-1.95946274377 E-1
C7	1.27369340336 E-1
C8	9.30573646040 E-2
C9	-7.13941471660 E-2
C10	-2.94575368220 E-2
C11	3.32126740590 E-2
C12	3.60655356700 E-3
C13	-1.07331754830 E-2
C14	1.39535174700 E-3
C15	1.99240529500 E-3
C16	-6.85856695000 E-4
C17	-1.16466855000 E-4
C18	9.35886700000 E-5
C19	-1.32642030000 E-5

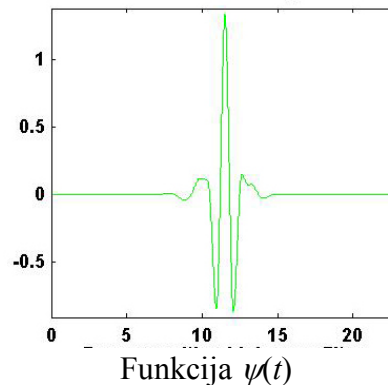
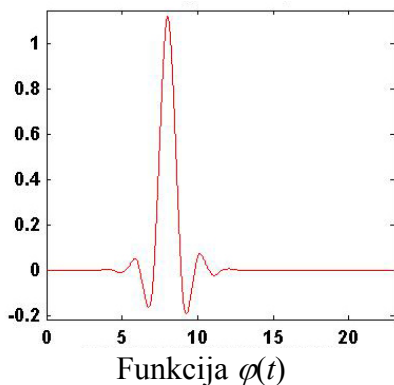
4 Priedas. Bangelė Sym-4



Sym-4 bangelės koeficientai

C0	-0.07576571478927
C1	-0.02963552764600
C2	0.49761866763202
C3	0.80373875180592
C4	0.29785779560528
C5	-0.09921954357685
C6	-0.01260396726204
C7	0.03222310060404

5 Priedas. Bangelė Coif-4



Coif-4 bangelės koeficientai

C0	8.9231366822027571 E-4
C1	-1.6294920131108490 E-3
C2	-7.3461663276562349 E-3
C3	1.6068943964069236 E-2
C4	2.6682300155628804 E-2
C5	-8.1266699680313054 E-2
C6	-5.6077313316471950 E-2
C7	4.1530840703043015 E-1
C8	7.8223893092049879 E-1
C9	4.3438605649146839 E-1
C10	-6.6627474263000752 E-2
C11	-9.6220442033563697 E-2
C12	3.9334427122913219 E-2
C13	2.5082261845146933 E-2
C14	-1.5211731527239149 E-2
C15	-5.6582866859460380 E-3
C16	3.7514361569249027 E-3
C17	1.2665619286795187 E-3
C18	-5.8902075681143784 E-4
C19	-2.5997455231942175 E-4
C20	6.2339033865764618 E-5
C21	3.1229876078043358 E-5
C22	-3.2596804448576129 E-6
C23	-1.7849845586999338 E-6

6 Priedas. Straipsnis „Vilnelių transformacijos panaudojimas ultragarsinių signalų apdorojimui“

Darbas buvo pristatytas 9-tojoje magistrantų ir doktorantų konferencijoje „Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos“, 2004 metais balandžio 15 dieną, Vytauto Didžiojo universitete. Perskaitytas pranešimas „Vilnelių transformacijos panaudojimas ultragarsinių signalų apdorojimui“. Pateikiamas konferencijos pranešimų medžiagoje atspausdintas straipsnis.