

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Bernardas Butkus

**BIOLOGINĖS MIKROSTRUKTŪROS IR AUDINIŲ
ULTRAGARSINIS CHAREKTERIZAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

dr. Rytis Jurkonis

Kaunas, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**BIOLOGINĖS MIKROSTRUKTŪROS IR AUDINIŲ
ULTRAGARSINIS CHAREKTERIZAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Biomedicininė inžinerija
621H16001

Vadovas
dr. R. Jurkonis

Recenzentas
doc. dr. D. Kybartas

Projektą atliko
B. Butkus

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 _____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Bernardo Butkaus** baigiamasis projektas tema „.....“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

B. Butkus. Biologinės mikrostruktūros ir audinių ultragarsinis charakterizavimas: Biomedicininės inžinerijos magistro baigiamasis projektas/ vadovas dr. R. Jurkonis; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektronikos inžinerijos katedra. Kaunas, 2016 61 p.

Santrauka

Šio darbo pradžioje atliekama literatūros analizė, norint įvertinti pasirinktos temos svarbumą ir taip pat, apžvelgti kokie darbai ar tyrimai jau yra padaryti. Mūsų šio darbo pagrindinis tikslas yra: išsiaiškinti kokie požymiai teorinio skaičiavimo rezultatuose susiję su mikrostruktūrą sudarančių dalelių dydžiu. Mikro struktūrą, panašia į biologinę, mes pasirinkome naudoti Sephadex daleles, kurių dydžiai yra 35um, 50um, 80um, 100um, 200um. Šių dalelių dydžiai yra panašūs į audinių ląsteles. Taip pat, norint gauti daugiau stabilumo, visos dalelės buvo talpinamo į agarą. Modelio sudaryme, buvo nuspręsta suskaičiuoti tris variantus, kai dalelės yra monodispersinės, kai dalelės yra tolygiai pasiskirsčiusios ir kai dalelės pasiskirsčiusios pagal gauso skirstinį. Šiuos tris skaičiavimo variantus pasirinkome todėl, kad visos dalelės nuo 35um iki 200um turi tam tikrą išsibarstymą ir nėra visos vienodo.

Šiame darbe naudojome 12MHz ultragarsinį keitiklį. Visi B-scan vaizdai buvo užrašomi su keturiais stiprinimais 70dB, 73dB, 76dB, 86dB. Taip pat visiems šiems stiprinimams apskaičiavome atraminis spektrus. Norint įvertinti ar visame B-scan vaizde spektras išlieka nepakitęs, spektrus skaičiavome skirtinguose regionuose. Taip pat apskaičiavome regionus pagal didį. Nustatę kur spektro signalas stipriausias ir kokio dydžio regionai yra informatyviausi, spektrus apskaičiavome visiems stiprinimams ir visiems dalelių dydžiams. Gautus rezultatus palyginimo su teoriškai apskaičiuotais modeliavimo rezultatais.

B. Butkus. Biological tissue microstructure and ultrasonic characterization: Final project of biomedical engineering master degree / supervisor dr. R. Jurkonis Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of electronics. - Kaunas 2016 - 61 pages.

Summary

Beginning of this experiment, literature analysis, to assess the importance of the selected theme and also to review what works and studies have been done. Our main objective of this work are: to find out what features of the theoretical calculation results related to the microstructure forming particle sizes. Micro structure similar to biological, we chose to use a Sephadex particles whose size is 35um, 50um, 80um, 100um, 200um. The particle sizes which are similar to the tissue cells. Also, in order to obtain more stability, all the particles were plated in agar. Model, it was decided to calculate the three cases in which the particles are monodispersed in which the particles are evenly distributed and when the particles are distributed according to the Gaussian distribution. These three calculation options to choose from so that all particles from 35um to 200um has a dispersing and not all equal.

In this work we used 12MHz ultrasonic transducer. All B-scan images were recorded with four Strengthening 70dB, 73dB, 76dB, 86dB. Also, all these stiprinimam calculated thrust spectra. In order to assess whether over the B-scan image spectrum remains unchanged, we estimate the spectra of different regions. It also calculated the regions in size. After setting where spectrum signal is strongest and the size of the regions is the most informative, calculated spectra for all building and for all particle sizes. The obtained results in comparison with theoretically calculated simulation results.

Turinys

	Įvadas.....	8
1	Literatūros analizė.....	9
1.1	Ultragarsinis mikro struktūrų charakterizavimas	9
1.1.1	Empirinis tyrimas	9
1.1.2	Ultragarsinis mikro struktūrų charakterizavimas	13
1.2	Ultragarsinių vaizdų stebėjimas terapijoje	14
1.2.1	Kiekybinis ultragarsinių vaizdų spektroskopinis vertinimas prostatos vėžiu sergantiems pacientams	14
1.3	Kiekybinė erdvinių ultragarsinių vaizdų analizė limfmazgių metastazėms aptikti	17
1.3.1	Ultragarsinis kietųjų audinių charakterizavimas	18
2	Atspindėtų Ultragarso bangų spektrų skaičiavimo metodika.....	21
2.1	Ultragarsinių bangų spektrų matematinis modelis	21
2.2	Duomenys modeliavimui	21
3	Rezultatai.....	23
3.1	Teorinio modelio rezultatai	23
3.1.1	Rezultatai: skaičiuojant spektrus vidutiniam dalelės diametrai	23
3.1.2	Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų tolydiniam skirstiniui.....	23
3.1.3	Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų Gauso skirstiniui.....	25
3.1.4	Rezultatų aptarimas	27
3.2	Eksperimentiniai rezultatai.....	28
3.2.1	Atraminio spektro skaičiavimas	30
3.2.2	Signalas triukšmas vertinimas	32
3.2.3	Spektrinė analizė penkiuose regionuose visiems vaizdams	34
3.2.4	Spektrinė analizė trijuose skirtingo dydžio regionuose.....	37
3.2.5	Dalelių spektrai viename regione	38

3.2.6	Rezultatų palyginimas su teoriniu modeliavimu	40
3.2.7	Standartinis nuokrypis	42
4	Išvados.....	44
	Literatūros sąrašas	45
5	Priedai.....	47
5.1	Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų tolydiniam skirstiniui	47
5.2	Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų Gauso skirstiniui.....	49
5.3	Sephadex dalelių vaizdas per mikroskopą	50
5.4	Spektrinė analizė penkiuose regionuose visiems vaizdams	52
5.5	Rezultatų palyginimas su teoriniu modeliavimu pusė vaizdo.....	60

Įvadas

Tradicinis B skenavimas ultragarsu yra plačiai naudojamas kaip klinikinės diagnostikos priemonė, skirta kokybiškai [1] vizualizuoti vietinių audinių struktūras. B skenavimas ultragarsu naudoja iš audinių atspindėtų ultragarsinių impulsų radijo dažnio signalus. Iš šio duomenų masyvo vėliau suformuojami pilki vaizdai, charakterizuojantys audinių struktūras. Kiti ultragarso audinių charakterizavimo metodai buvo sukurti siekiant gauti daugiau informacijos, kuri galbūt nėra identifikuojama B skenavimo vaizduose. Tam tikslui sukurti įvairūs metodai, norint įvertinti parametrus apibūdinančius audinius, tai: bangų sklidimo greičio vertinimas [1,2], absorbcijos (sugerties) vertinimas, netiesiškumo parametrų gavimas, kampinės sklaidos, atgalinės sklaidos, integruotos atgalinės sklaidos vertinimai [2], vidutinio juostos pločio pritaikymas [2], spektro intercept/poslinkio ir spektro statumo skaičiavimai [3]. Šie parametrai gali suteikti labai daug naudingos informacijos apie ląsteles ir audinius. Kiekybiniai ultragarso metodai [5] gali būti taikomi labai plačiai, pavyzdžiui, kiekybinis ultragarsinis metodas buvo naudojamas apibūdinti įvairius navikus [7], įvertinti širdies sutrikimus [8], stebėti ląstelių mirtis ar sunykimus [9], įvertinti terapinį atsaką piktybinėms ląstelėms [6,7,10,11]. Yra paskelbta kiekybinio ultragarso metodų teoriniai skaičiavimo pagrindai [12]. Randame teorinių rezultatų palyginimą su eksperimentiniais duomenis iš fantomų [13]. Biologinės mikrostruktūros fantomai pagaminami iš polimero granulių, pavyzdžiui, Sephadex, kurių diametras yra vienintelis 50 mikrometrų [13]. Tačiau mūsų žiniomis nėra paskelbta teorinio modeliavimo rezultatų su įvairaus diametro atspindinčiomis dalelėmis.

Pagrindinis tikslas, yra išsiaiškinti, kokie požymiai teorinio skaičiavimo rezultatų požymiai susiję su mikrostruktūrą sudarančių dalelių dydžiu. Šiame darbe uždaviniai yra:

- 1) sudaryti teorinį modelį, kuriuo galima suskaičiuoti ultragarso bangų atspindėtų iš panašios į biologinę mikrostruktūrą spektrus;
- 2) ultragarso bangų spektrus teoriškai reikia suskaičiuoti dalelėms, kurių dydžiai 35, 50, 80, 100, 200 mikrometrų;
- 3) Teorinius rezultatus reikia įvertinti esant keliems skirstinių, pagal kuriuos pasiskirstę dalelių dydžiai aplink vidutinę vertę. Taigi gautus teorinius rezultatus bus galimi palyginti su realiais eksperimentiniais duomenimis.

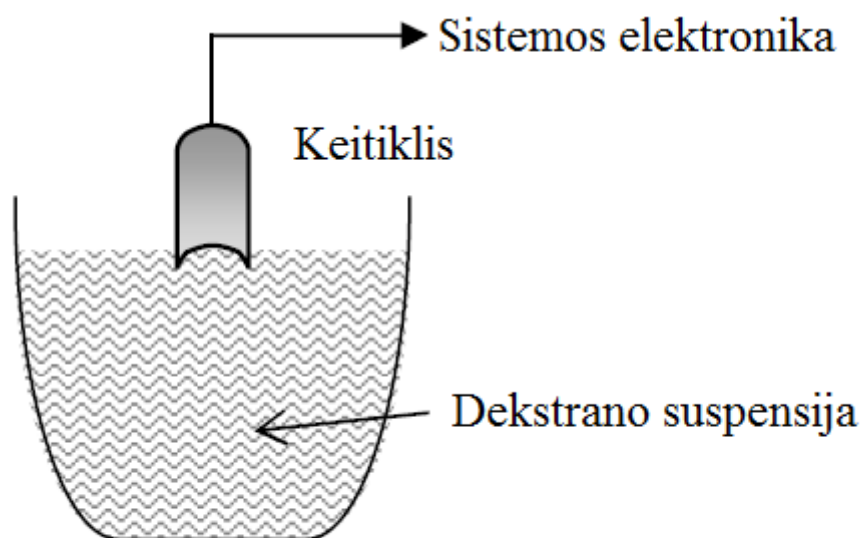
1 Literatūros analizė

1.1 Ultragarso mikro struktūrų charakterizavimas

1.1.1 Empirinis tyrimas

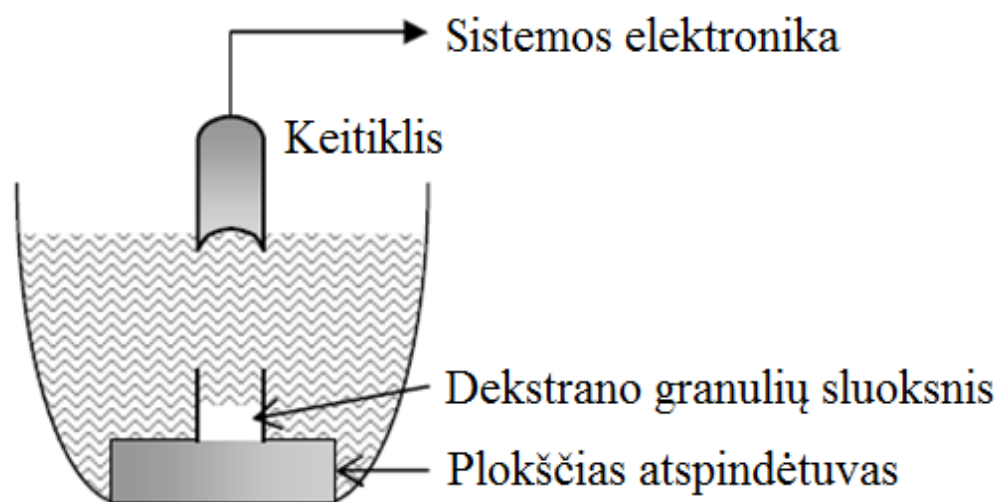
Ultragarso spektrinių parametrų reikšmės gali būti susiję su skleistinės savybėmis, pavyzdžiui, skleistinės dydžio, akustinės varžos ar koncentracijos [4]. Pasitelkę teoriją ir teorinius skaičiavimus, pirmą kartą tai nustatė mokslininkas Lizzi [4]. Ši sistema atsižvelgo į lango savybes, taip pat keitiklio savybes, tokias kaip dažnis, pralaidumas, diafragma, ir židinio nuotolis. Šiuo tyrimu siekiama eksperimentiškai patikrinti teorinius skaičiavimus, akcentuojant keitiklio fokusavimo savybes.

Šiam tyrimui naudojama 0,25 g dekstrano sausi milteliai (Sephadex), kurie maišomi su 150 ml fiziologinio tirpalo ir po 4 valandų suformuoja dekstrano gelio granulės. Po to, kai pilnai susiformavo dekstrano masė, fiziologinis tirpalas buvo nupiltas ir įpilta 150 ml natrio chlorido tirpalo. Dekstrano-sūrus mišinys buvo naudojamas pašalinti oro burbuliukus, prieš atliekant ultragarsinius tyrimus. Granulių geometrijos, tankių ir dydžių pasiskirstymo specifikacijos buvo numatytos gamintojo; granulės buvo rutulio formos, su $1,06 \text{ g/cm}^3$ tankį, ir 80proc. granulių, buvo tarp 20 ir 80 mikronų skersmens. Vidutinis granulės skersmuo buvo 51 mikronai. Ultragarso RF duomenys buvo gaunami naudojant du keitiklius. Pirmasis su centriniu dažniu 24 MHz ir juostos pločiu 30 MHz, o F numeris 2. Antrasis keitiklis su F 5, centrinis dažnis 21,5 MHz dažniu, ir 16 MHz juostos pločiu.

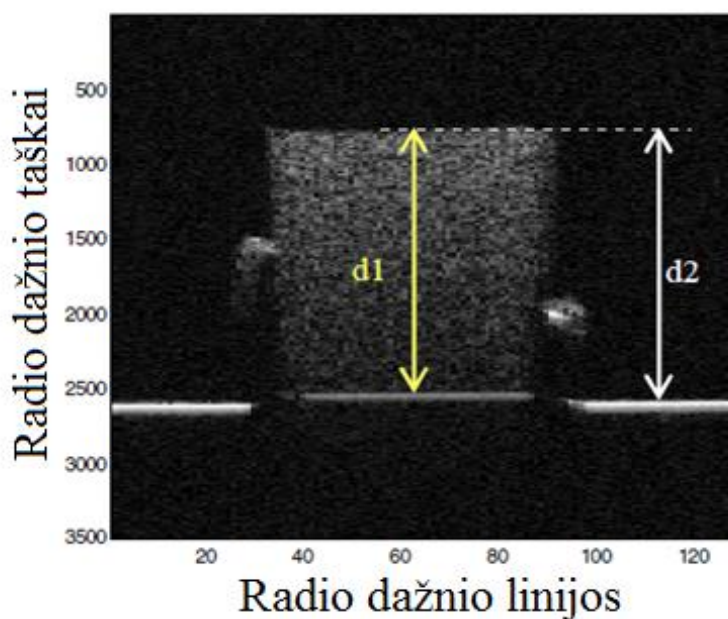


Pav. 1 Eksperimento scheminis pavaizdavimas [4]

Gauti duomenys iš skirtingų koncentracijų dekstrano granulių, buvo apdorojami naudojant standartinius Furjė metodus. Nuolydžio, juostos pločio ir atskirties spektriniai parametrai, skaičiuojami pagal gautus radijo dažnio duomenis. Taip pat buvo atliekamas kalibravimas naudojant signalą, gautą iš alyvos-vandens sąsajos, siekiant pašalinti sistemos poveikį. Trijų dydžių, atitinkančių nuolydžio, juostos pločio ir atskirties, vertės buvo gaunamos iš kiekvieno dekstrano koncentracijos vidurkio spektrinių parametru „*region of interest (ROI)*“. ROI dydis buvo visur laikomas kaip konstanta.



Pav. 2 akustinių bangų sklaidimo greičio nustatymo schema [4]



Pav. 3 Akustinių bangų greičio įvertinimas: A - dekstrano sluoksnis, vaizdas mm, B - realus atstumas nuo viršaus iki paviršius, vaizdas mm [4]

Akustinių bangų greitis, c per dekstrano granulių sluoksnį buvo nustatomas naudojant laiko pokyčio metodą, lyginant tariamąjį atstumą, $D1$, iš dekstrano granulių sluoksnio iki plokštuminiu ir faktinį atstumą, $d2$, kaip pavaizduota Pav. 3. Greitis buvo skaičiuojamas pagal 1 lygtį:

$$c = c_w d_2 / d_1 \quad [1]$$

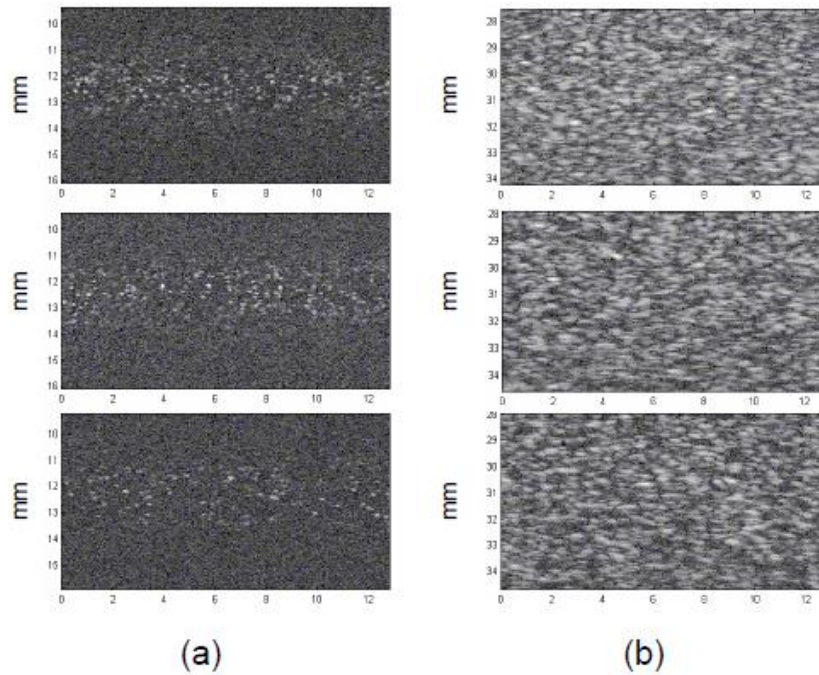
$$y_c = 4,34 \ln E + 4,43 \ln(a^{2(n-1)} C Q^2) + g_1(f_c, b)n + g_2(f_c)a^2 \quad [2]$$

$$m = 26,058 \frac{[b - (1 - \frac{b^2}{4}) \ln(\frac{2+b}{2-b})]}{b^3 f_c} n - 105,5(f_c)a^2 \quad [3]$$

Šiame metode naudojama Lizzi teorija skirta įvertinti ir normalizuoti spektrų parametrų reikšmes, kur signalai gaunami iš dekstrano suspensijos nuskaitymo, naudojant du keitiklius. Naudojamos lygtys 2 ir 3 apskaičiuoti standartizuotą juostos pločio, y_c ir nuolydžio, m , vertes visoms dekstrano granulių koncentracijoms.

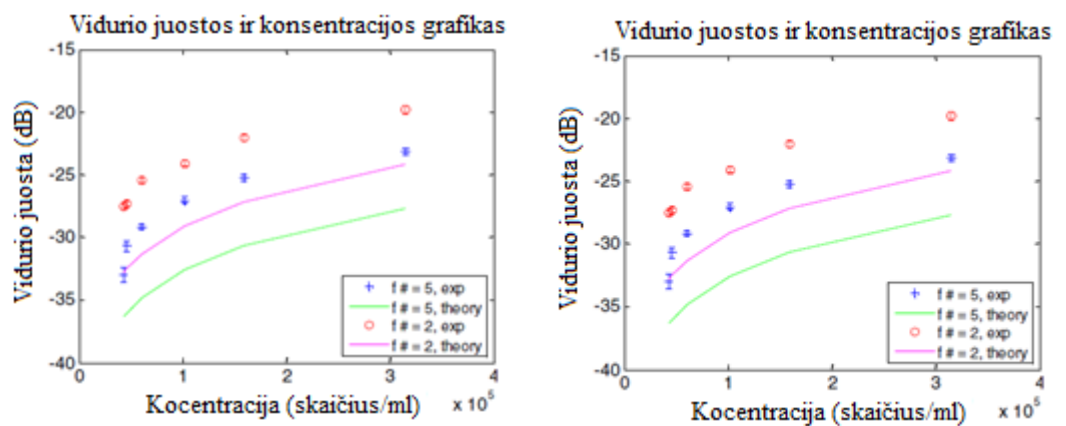
A yra spindulys; b ir f_c dažnių juostos plotis ir keitiklio centrinis dažnis; g_1 ir g_2 yra funkcijos b ir f_c ; E yra židinio nuotolio ir diafragmos funkcija (b , f_c , g_1 , g_2 , ir E); C yra sklaidos skaičius, nustatoma naudojant „Coulter“ skaitiklis; ir Q yra apskaičiuojamas pagal formulę $(Z-z_0) / Z_0$ (kur Z yra akustinis varža dekstrano, nustatoma naudojant aprašyta anksčiau laiko pokyčio metodą, ir Z_0 yra akustinė varža fiziologinio tirpalo).

Vaizdai iš atgalinės sklaidos radio dažnio duomenų nuskaitymo, kurie buvo atliekami su skirtingomis dekstrano suspensijoje koncentracijomis. Taip pat viskas buvo atliekama su dviem keitikliais ir tai pavaizduota Pav. 4.



Pav. 4 Vaizdai iš skirtingų koncentracijų dekstrano suspensijos. Dekstrano karoliukų diametras mažėja nuo viršaus į apačią gauti. A vaizdai yra gauti su pirmuoju keitikliu, vaizdai B su antruoju keitikliu [4]

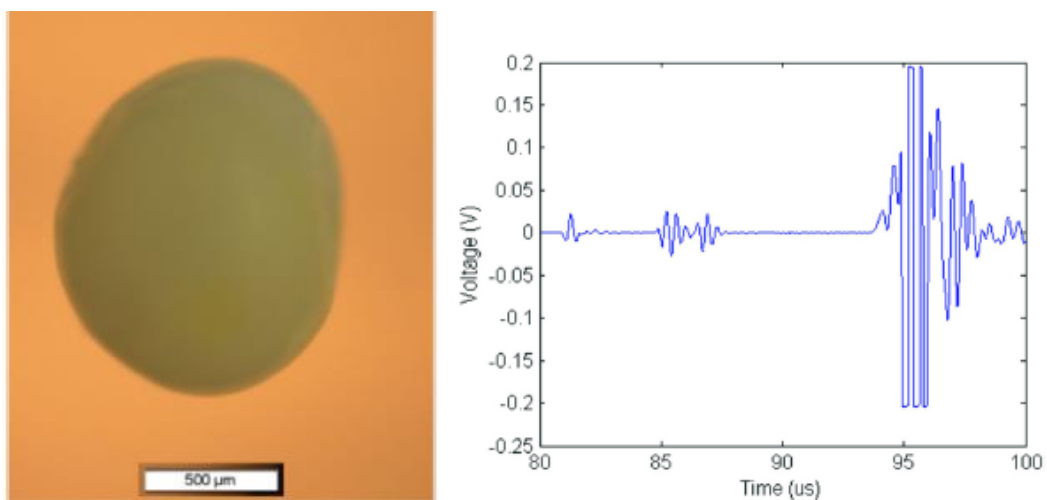
Eksperimentai gauti su vidurinio dažnio ir nuolydžio metodais parodė, kad parametų reikšmės didėja didinant koncentraciją, kaip ir buvo tikėtasi. Nors parametų vertės, gautos iš dviejų keitiklių skirtumas yra nedidelis, lyginant su teoriniais skaičiavimas skirtumas tarp teorinių ir eksperimentinių verčių yra šiek tiek didesnis. Šis neatitikimas galėjo atsirasti dėl keletos veiksnių, nepakankamą kompensavimo sistemos poveikį (kalibravimo) ir netikslūs koncentracijos įvertinimui. Gauti rezultatai pateikti Pav. 5



Pav. 5 Eksperimentiniai ir teoriniai intercept su koncentracijos skaičiumi [4]

1.1.2 Ultragarsinis mikro struktūrų charakterizavimas

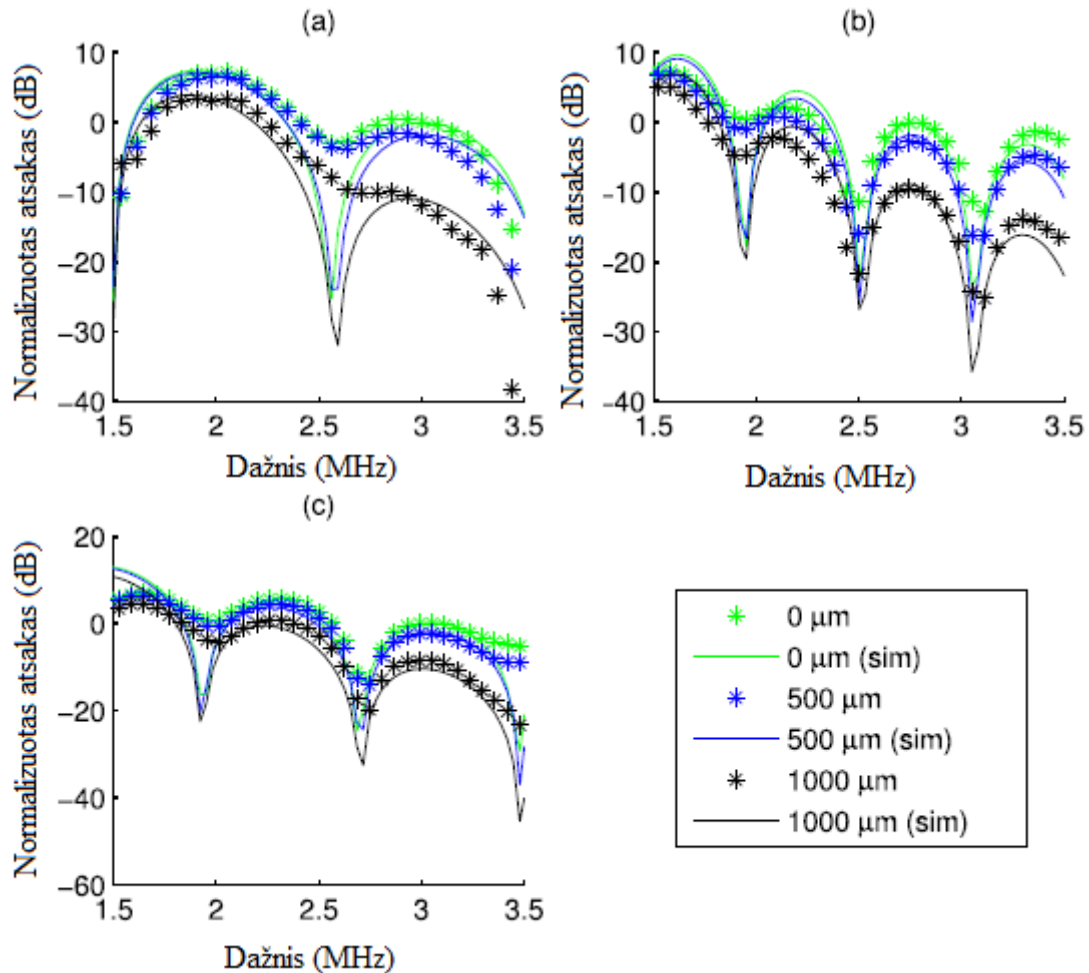
Šiame metode buvo naudojami žuvų ikrai kaip fantomai, kurių forma yra beveik kaip sferos, o matmenys 1mm skersmens. Buvo pagamintas fantomas, naudojant 2,25 g tauriųjų agaro miltelių, kurie sumaišyti su 100 ml vandens ir degazuoti maišant su magnetine maišykle. Vėliau jis buvo dedamas į vieną iš kelių plastikinių cilindrų. Tada žuvų ikrai buvo išdėstyti agare [7].



Pav. 6 Žuvies ikras naudojamas kaip fantomas. Signalas nuo vienos žuvies ikro patalpinto agare.[7]

Vėliau buvo matuojamas sunormintas ultragarsinis dažnio atsakas iš kiekvienos žuvies ikro ir apskaičiuotas galios spektras. Kad šis galios spektras būtų sunormuotas, buvo apskaičiuotas galios spektras naudojant plokštuminį reflektorių. Vėliau šis normalizuoto dažnio atsakas buvo

lyginamas su modeliavimo rezultatais. Visą tai buvo atliekama naudojant programinį paketą Matlab.



Pav. 7 Šiuose grafikuose pateikti sumodeliuotų ir apskaičiuotų ikrų spektrai iš trijų skirtingų pusių. Ištinė linija vaizduoja su sumodeliuotą signalą, o žvaigždutės apskaičiuotą. [7]

1.2 Ultragarsinių vaizdų stebėjimas terapijoje

1.2.1 Kiekybinis ultragarsinių vaizdų spektroskopinis vertinimas prostatos vėžiu sergantiems pacientams

Trimatis kiekybinis ultragarso vaizdų spektroskopinis vertinimas buvo atliekamas prostatos vėžiui stebėti [10]. Vaizdai buvo gaunami atliekant klinikinius tyrimus neinvaziniu būdu naudojant ultragarsą. Gauti vaizdai buvo lyginami su tų pačių pacientų jau invaziniu būdu atliktais tyrimais. Penkiolikai pacientų buvo atlikta prostatos vėžio ultragarso peržiūra prieš atliekant prostatos

šalinimą. Dažnis, kuris buvo naudojamas, yra (~5 MHz). Taip pat buvo normalizuoti spektrai (atliekamas spektrų normalizavimas), kurie vėliau buvo naudojami kaip kiekybinės ultragarso spektroskopijos atskaita. Naudojama speciali spalva koduoti parametriniams žemėlapiams 0 MHz įterpties, vidurio juostos ir spektro nuolydžio, buvo apskaičiuoti ir panaudoti charakterizuoti prostatos audinį ultragarso vaizduose. Vėžio regionai buvo identifikuojami visame histopatologiniame pavyzdyje, ligos paplitimas buvo siejamas tarpusavyje, vertinami su kiekvienu ultragarsiniu parametriniu atvaizdu. Gauti rezultatai parodė, kad koreliacija tarp ligos masto įvertinimo neinvaziniu būdu pagrįsti midband ir intercept parametrai parodė mažesnę koreliaciją su histopatologiniais pavyzdžiais. Spektriniai slope parametrai neparodė jokių ligos požymių.

Ultragarso duomenų analizė atlikta naudojant tiesinės regresijos analizę normalizuojant galios spektrą. Galios spektras buvo apskaičiuotas naudojant greitąją Furjė transformaciją. Kiekvienai skenavimo linijai, buvo naudojama Hamingo lango funkcija, taip pat signalas buvo suvidurkinamas. Norėdami pašalinti sistemos artefaktus ir difrakcijos poveikį, duomenys buvo normalizuojami naudojant galios spektrą, gautą iš stiklo karoliukų įterptų agarų gelyje, arba kitaip sakant naudojamas fantomo modelis. Lygtis (4) apibūdina normalizuotas galios spektro skaičiavimo procesą [10]:

$$NPS(f) = \log\left(\frac{\sum_{i=M}^N |FFT(Hamming(e_t(t, x_i)))|^2}{\sum_{i=M}^N |FFT(Hamming(e_p(t, x_i)))|^2}\right) \quad [4]$$

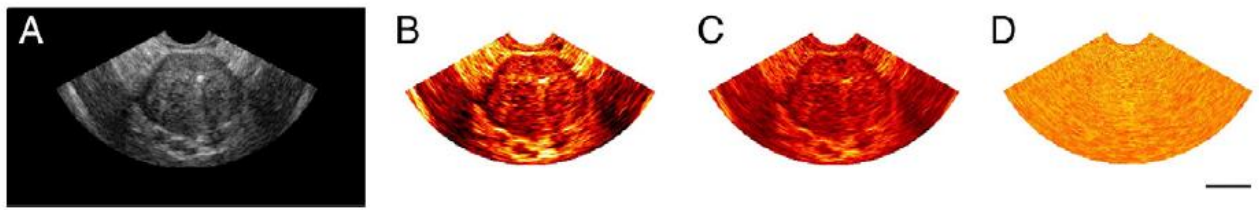
Šioje lygtyje, $NPS(f)$, tai sunormuotas galios spektras (dB) kaip dažnio (f) funkcija; $e_t(t, x_i)$ ir $e_p(t, x_i)$ yra ultragarsinio signalo „backscattered“ pagal audinių ir fantomo. Skirtingas linijų skaičius yra: ($i = M, M + 1, \dots, N$).

Tiesinės regresijos analizė buvo atlikta remiantis normalizuotu galios spektru, gauti duomenys praleidžiami per -6 dB langą (juostos plotis 3,5-6,5 MHz), centrinis keitiklio dažnis (f_c), šie duomenys naudojami lygtyje 5. Vėliau parametrai MBF nustatomi skaičiuojant lygtį 6. [10]

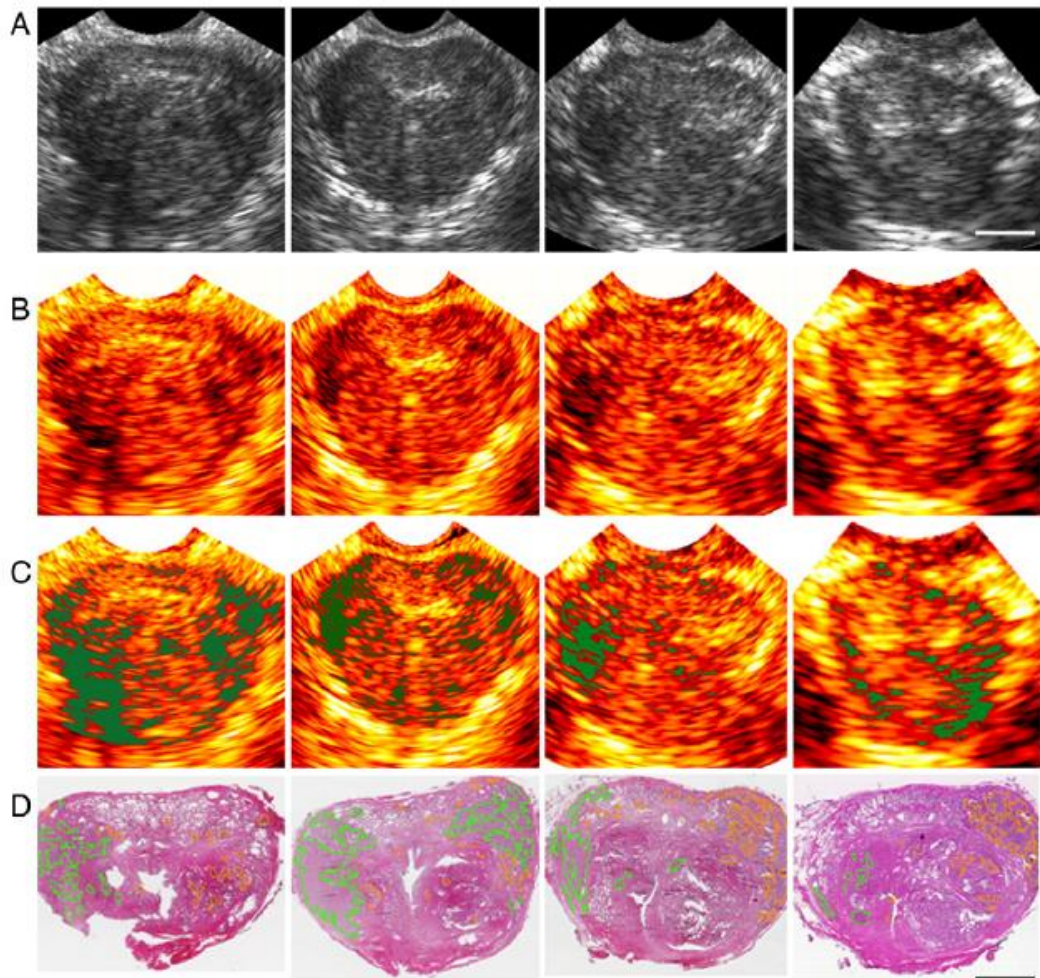
$$NPS(f) = Slope \times f + Intercept \quad [5]$$

$$NPS(f) = Slope \times f_c + Intercept \quad [6]$$

Ultragarso vaizdo ir QUS spektriniai parametriniai vaizdai. (A) ultragarsinis B režimo vaizdas, (B) atitinkamą QUS spektrinis parametrinis vaizdas gautas iš MBF, 0-MHz intercept (C), ir spektrinis „slope“ (D). Mastelio juosta yra ~ 1 cm.



Pav. 8 (A) Ultragarso B režimo vaizdas ir (B-D) QUS spektrinių parametru vaizdai [10]



Pav. 9 (A) Neapdoroti ultragarsiniai vaizda B-scan vaizdai, (B) B-scan vaizdai pateikti spalvineje skalėje, (C) vėžinių audinių atpažinimas ir (D) mikroskopinis vaizdas [10]

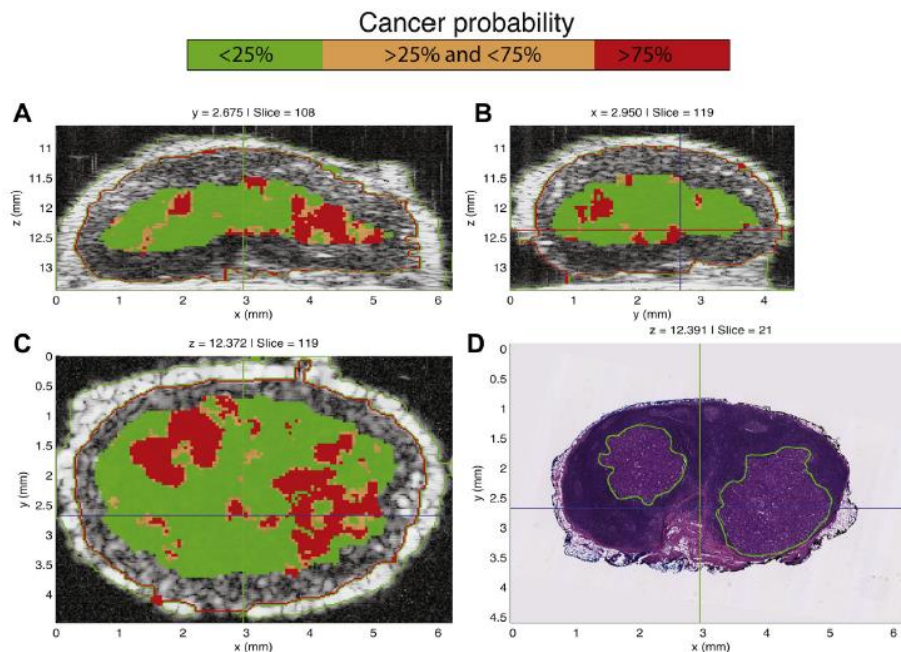
(A) Ultragarso B režimo vaizdai. Duomenys buvo gauti iš keturių skersinių plokštumų skenavimo visoje. (B) Tai MBF parametriniai vaizdai gauti iš keturių skersinių plokštumų skenavimo visoje. Mastelio juosta yra ~ 1 cm. (C) MBF parametriniai vaizdai, kur yra spėjimai dėl vėžinių darinių nuspalvinti žalia spalva. (D) Histopatologiniai vaizdai, pagaminti iš prostatektomijos, kurie beveik atitinka ultragarsinių tyrimo vaizdų plokštumas. Žalia ir oranžinė sritys rodo vėžinių hiperplazinių anomalijų sritis. Mastelio juosta yra ~ 1 cm.

1.3 Kiekybinė erdvinių ultragarsinių vaizdų analizė limfmazgių metastazėms aptikti

160 pacientai (44 vyrų ir 116 moterų) su histologiškai patvirtintais žarnyno, skrandžio ir krūties vėžio diagnozėmis, kuriems buvo atliktas vėžio šalinimo operacija „Kuakini Medical Centerviso“ medicinos centre [7]. Jie atsitiktinai įtraukti į šį perspektyvų tyrimą. 71 pacientų (visos moterys) su krūties vėžiu, 77 pacientų (38 vyrų ir 39 moterų) su storosios žarnos vėžiu, o 12 pacientai, sergantys skrandžio vėžiu (6 vyrai ir 6 moterys). Vidutinis amžius kiekvienam vėžio tipo buvo: krūties 65 m (diapazonas, 42-93 m; vidurkis - 67,4 m; standartinis nuokrypis [SD], 12,5 m); gaubtinės ir tiesiosios žarnos, 74 m (diapazonas, 40-95 m; vidurkis - 71 m; SD 13,1 m); ir skrandžio, 81,5 m (diapazonas, 52-93 m; vidurkis - 76,3 m; SD 14,1 m).

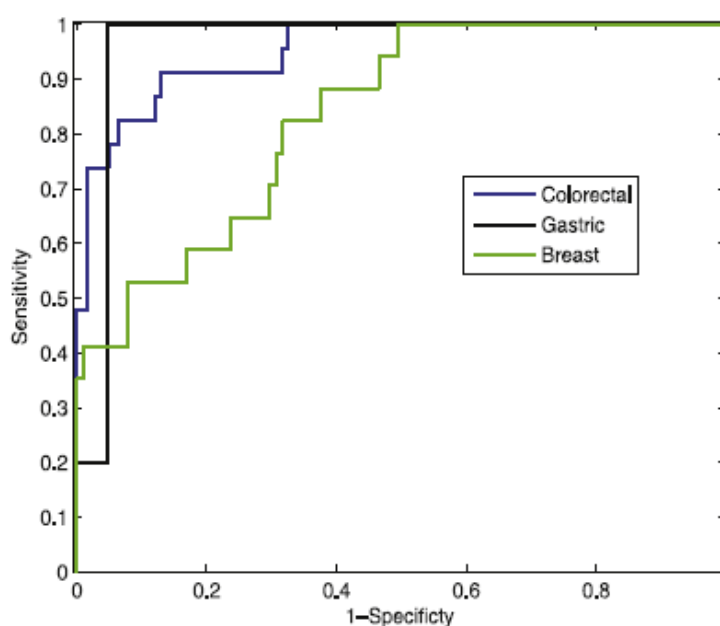
Naudojamas keitiklis, kurio centrinis dažnis 25,6 MHz ir E6-dB juostos plotis. Gauti signalai buvo suskaitmeninti 400 MHz diskretizavimo dažniu su 8 bitų tikslumu. Skenavimo vektoriai buvo vienodai išdėstyti 25 μm tikslumu X ir Y kryptimis. Skenavimo laikas svyravo 5-30 min, priklausomai nuo dydžio.

Buvo skaičiuojamas normalizuotas vidutinis galios spektras gautas iš vandens ir aliejaus sąsajos. Iš echo signalų gauti keturis spektrinės analizės parametrai. Tiesinį sklaidos modelis spektro slope ir intercept.



Pav. 10 B režimo skerspjūvio vaizdai su trijų skirtingų spalvų atvaizdavimas atitinkantis tikimybę[7]

3D vėžio tikimybės nustatymo metodas iš ultragarsinių vaizdų lokalizuoja vietas, kur galbūt yra metastazavusieji audiniai ir kur adenokarcinoma [7]. Pav. 10 pavaizduoti B režimo skerspjūvio vaizdai su trijų skirtingų spalvų atvaizdavimais atitinkančias tikimybę (10A-10C). Skerspjūviai vaizduojami spalviniu kodavimu vėžio tikimybės vertinti, naudojant raudona spalvą nurodanti tikimybę >75%, oranžinė tarp 25% ir 75%, ir žalia tikimybė <25%. Pav. 10 pateiktas tamsintas histologijos fotomikrografijos, atitinkantį tame pačiame sluoksnyje, vaizdas kaip ir 10c ultragarsiniame vaizde. Šie vaizdai rodo, kad yra puikus sutapimas pasiekiamas tarp raudonos vėžio tikimybės spalvos ir histologinių rezultatų. 3D vaizde pažymėtos sritys parodo metastazavusiu audinių vietas.



Pav. 11 Tai trijų skirtingų ligų atpažinimo ROC kreivės. Tiesiosios žarnos, skrandžio ir krūties. [7]

1.3.1 Ultragarsinis kietųjų audinių charakterizavimas

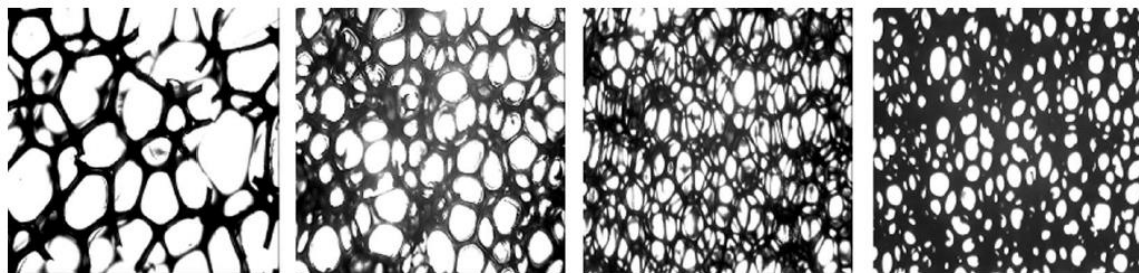
Įprastiniame pilkame ultragarsiniame vaizde, grįžtančio iš audinių, informacija pateikiama taip, kad struktūros atvaizduojamos įvairių akustiniu impedancu, pilkais šešėliais, kylančių iš akustinių sąveikų su struktūra, daug mažesne negu bangos ilgis (mikrostruktūrose). Tokie vaizdai teikia labai naudingą informaciją, galima analizuoti anatomines struktūras ir jų judėjimą, pakitimus audinių mikrostruktūrose, pavyzdžiui, ankstyva stadijos kepenų cirozė, fibromos, ar stebėti embrioninį plaučių brendimą, dažnai negali būti vizualiai aptinkami.

Taikant signalų analizės metodus ir neperdirbtus ultragarsinius signalus, buvo pasiūlyta gauti papildomos kiekybinės informacijos, susijusios su vidaus audinių struktūromis [13]. Audinių

savybės gali būti vertinamos pagal akustinį slopinimą, atgalinės sklaidos koeficientą, efektinis sklaidos tankis, vidutinį dalelės diametrą, ir vidutinius sklaidos tarpus audiniuose. Skirtinga šių parametru vertės gali būti naudojamos siekiant nustatyti skirtumus tarp sveikų ir ligų pažeistų audinių, kurie nėra matomi įprastuose vaizduose.

Pagrindinės savybės, spektrų analizėje, buvo tiriama naudojant Monte Carlo metodą ant imituotų biomedicinos ultragarso signalų. Šiame darbe, imituojamas 1-D audinių modelis, kuris yra sudarytas iš nuolatinių sklaiduolių (scatterers) ir pasklidusių sklaiduolių. Echo signalas yra generuojama pagal laiko konvoliuciją į ultragarso impulsą ir impulso atsaką į audinius.

Šiame darbe duomenų masyvai susideda iš signalų (gautą per Hilbert transformacija) ir ultragarso RF echo (A-linijos) iš kiekvienos terpės su N taškų. Kiekviena A-linijos matrica (Cx) yra sukonstruota iš amplitudės verčių pasiskirsčiusių M lango dydyje ($M < N$)

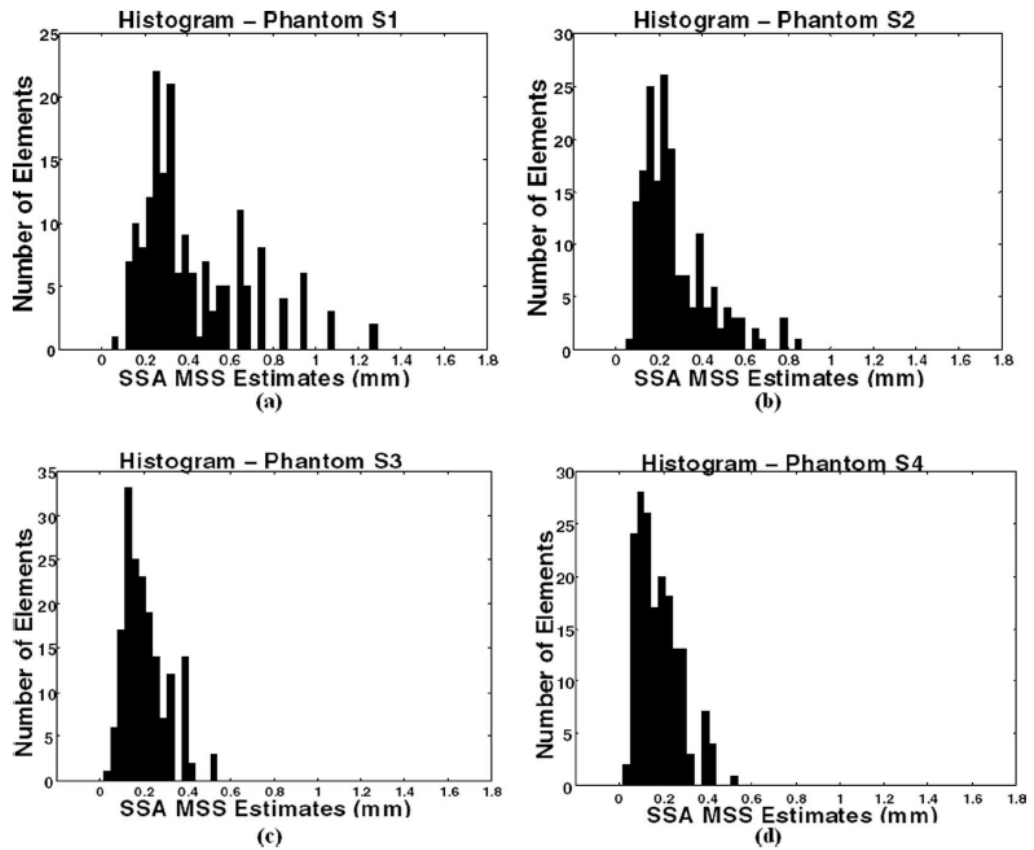


Pav. 12 Optinis mikroskopo vaizdas kaulinio audinio sluoksnis su skirtingais tankiais, norint imituoti audinių diametru sklaidą [13]

Lentelė 1 Pateikti matmenys, vidurkis ir nuokrypis [13]

Phantom	Range of pore sizes (μm)	Average MSS (μm)	MSS CV (%) ¹
S1	500–1000	453	61
S2	300–500	298	68
S3	200–300	210	47
S4	100–200	179	54

Optinis mikroskopo vaizdas pateiktas Pav. 12. Tai kaulinio audinio sluoksnis su skirtingais tankiais, norint imituoti audinių diametru sklaidą. Iš kairės į dešinę, pavadintas S1, S2, S3, S4 Pav. 12. Porų skersmens dydžių diapazonų vertinimas atliktas su kompiuterine vaizdų analize iš optiniu mikroskopu gautų duomenų Lentelė 1 pateikti matmenys, vidurkis ir nuokrypis.



Pav. 13 Šiose histogramose pavaizduotas diametrų pasiskirstymas [13]

Rezultatai pateikiami Pav. 13. Jie buvo skaičiuojami naudojant dvigubą furjė transformaciją arba dar kitaip vadinamą kepsrą. Visi gauti rezultatai pateikiami histogramuose, kur x ašyje yra diametras, o y ašyje kiekis. Pirmą histogramą gauta nuo pirmojo fantomo, kaip ir matoma vaizde per mikroskopą, šis fantomas turėjo gana nemažą diametrų sklaidą, taip pat tai matoma rezultatuose. Pažvelgus į paskutinį fantomą, kuris turėjo gana mažą diametrų sklaidą, gautuose rezultatuose matome, jog diametrai histogramoje susitelkę vienoje vietoje.

2 Atspindėtų Ultragarso bangų spektrų skaičiavimo metodika

2.1 Ultragarsinių bangų spektrų matematinis modelis

Ultragarso bangų atspindėtų iš panašios į biologinę mikrostruktūros spektrus teoriškai galima suskaičiuoti keletu metodų [3,9,14]. Empirinio ir analitinio metodų rezultatų palyginimą galima rasti [3,14]. Pasirinktas analitinis metodas, kurio parametraž yra kompleksinė slėgio amplitudė, funkcijų skaičiavimui.

$$P_s = \frac{P_0 a}{2r} \left[\frac{2}{k_3 a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \sin(\eta_n) e^{-j\eta_n} P_n(\cos\theta) \right] e^{-jk_3(c_3 t - r)} \quad (1)$$

$$C_{m1} = \frac{k_1^* a}{k^* a} * \frac{k^* a}{k_1^* a} \quad (2)$$

$$g = \frac{rh01}{rho0} \quad (3)$$

$$h = \frac{c_1}{c_0} \quad (4)$$

$$C_{m2} = \frac{k^* a}{k^* a} * g * h \quad (5)$$

$$C_m = C_{m1} - C_{m2} \quad (6)$$

Kur: P_0 – yra pradinis slėgis, a – sferos spindulys, c_3 – garso greitis supančioje medžiagoje, k_3 – banginis skaičius skystyje ($2\pi/\lambda$), θ – stebėjimo kampas, r – atstumas tarp sferos ir stebimo taško, P_n – Legendre daugianario skaičius, n – atskaitų kiekis pagal dažnį, η_n – fazės kampas, ρ_1 – dalelių tankis, ρ_2 – supančios aplinkos tankis

2.2 Duomenys modeliavimui

Biologinės mikrostruktūros su išsklaidančiomis dalelėmis atitikmens pagaminimui bus naudojami Sephadex granulės, kurių diametrai yra nuo 35 iki 200 mikrometrų. Gamintojo pateikiami Sephadex granulių duomenys pateikti Lentelė 2.

Lentelė 2 Duomenys [14] apie Sephadex daleles

Sephadex	Dydis nuo, μm	Dydis iki, μm	Vidurkis, μm	Greitis, m/s	Tankis, g/cm ³	brinkimo laikas 20 C (h)	brinkimo laikas 90 C (h)	Iš 1g sausų gaunama ml išbrinkusiu
G10050	20	50	35	1604	1060	72	5	2-3
G2580-10G	20	80	50	1604	1060	3	1	4-6
G100120	40	120	80	1604	1060	72	5	20-30
G50150	50	150	100	1604	1060	3	1	9-11
G25300	100	300	200	1604	1060	3	1	4-6

Biologinės mikrostruktūros pagrindu būtų laikoma agarų terpė. Šioje terpėje ultragarso bangų sklaidimo sąlygos charakterizuojamos Greitis, m/s Tankis, g/cm³ surašyti kitus parametrus iš MATLAB Naudoti duomenys pateikti Lentelė 3.

Lentelė 3 lentelėje pateikti agarų ir vandens parametrai

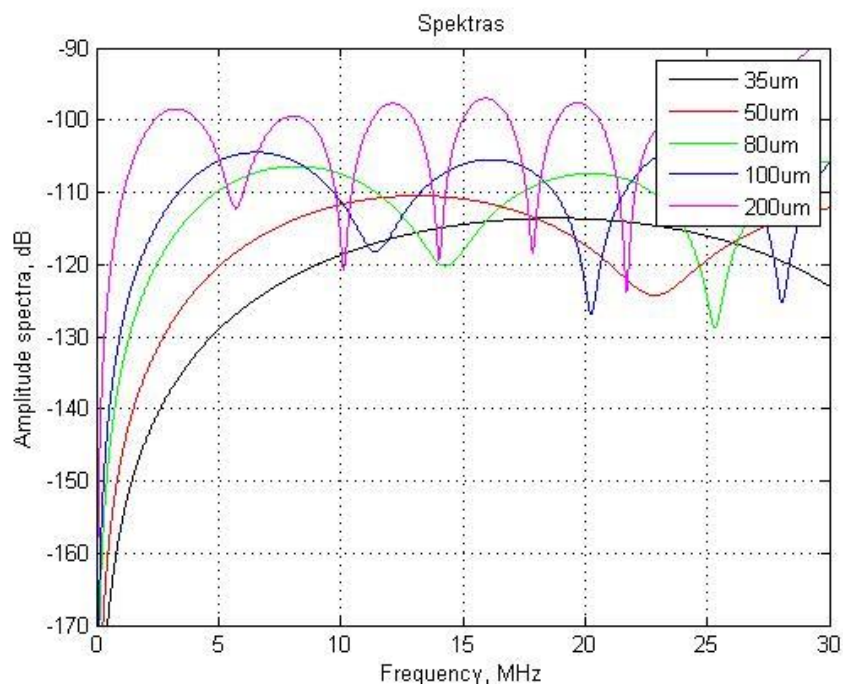
Pagrindo medžiaga	Greitis, m/s	Tankis, g/cm ³	Šaltinis
Vanduo	1497	1000	[14]
Agaras	1547.4	999	[14]

3 Rezultatai

3.1 Teorinio modelio rezultatai

3.1.1 Rezultatai: skaičiuojant spektrus vidutiniam dalelės diametru

Modeliavimas atliktas su programavus algoritmą MATLAB programų aplinkoje. Algoritmas skaičiuoja pagal formules (1-6). Pirmiausia gautas rezultatas paprasčiausiam dalelių dydžių skirstinio atvejams, t.y. skaičiuojant spektrus laikoma kad dalelės yra vieno dydžio kiekvienoje ir grupių. Taip vadinama monodispersinė mikrostruktūra. Apskaičiuoti spektrai monodispersinių dalelių atvejams pateikti Pav. 14.

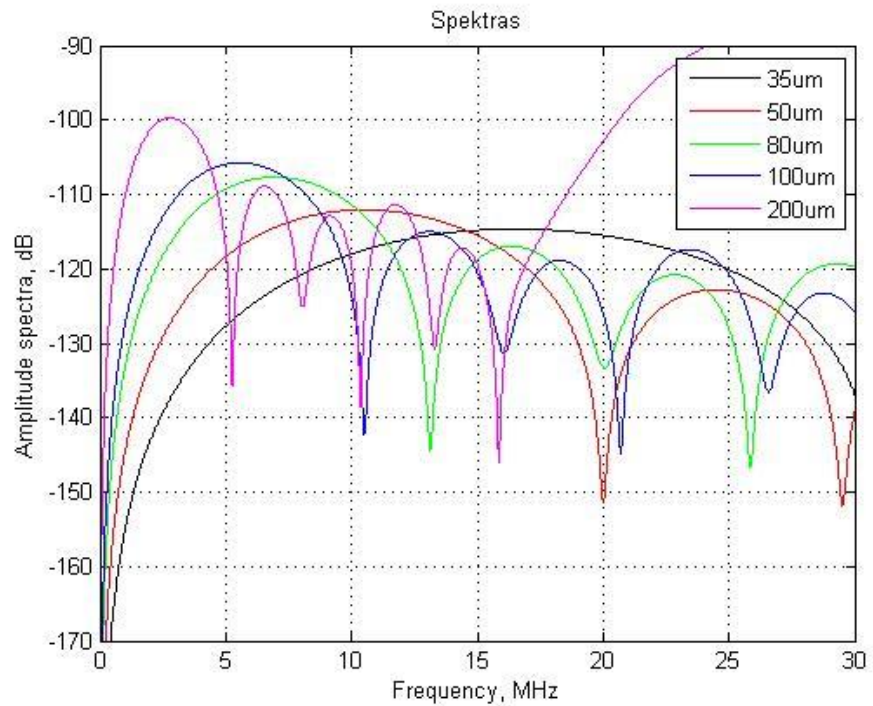


Pav. 14 Spektrai įvairiems monodispersinių dalelių diametrams.

3.1.2 Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų tolydiniam skirstiniui

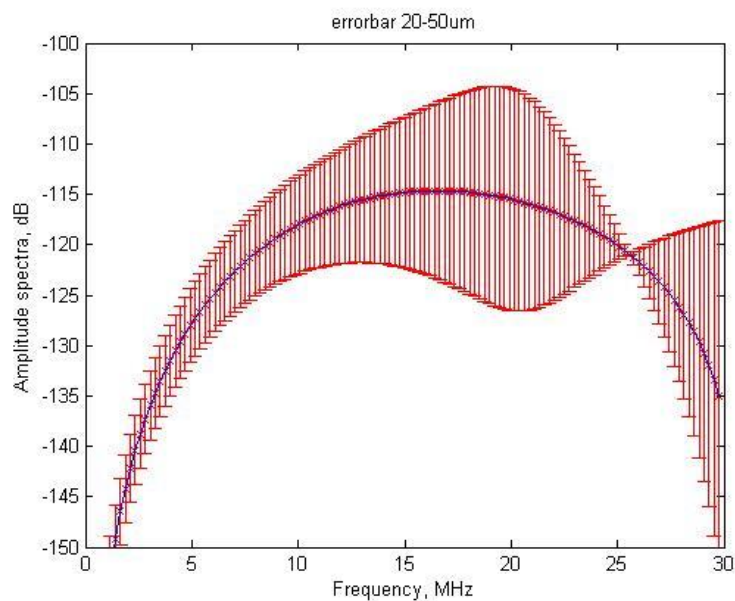
Tačiau, kaip matosi iš 1 lentelės dalelių dydžiai nėra idealiai monodispersiniai, nes pasiskirstę diapazonuose. Todėl reikia ištirti ar neidealus monodispersiškumas turi įtakos ultragarsinių bangų išsklaidytiems spektrams. Ultragarsinių bangų išsklaidymo spektrus modeliuoju laikydamas, kad dalelių nuo mažiausios iki didžiausios diametro dydžiai visame diapazone pasiskirstę

tolygiai, todėl visų dydžių indėlis į bendrą spektrą vienodo didumo. Sumodeliuotai visai spektrų šeimai buvo skaičiuotas aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis.



Pav. 15 Spektrus dalelių diametrų tolydiniam skirstiniui

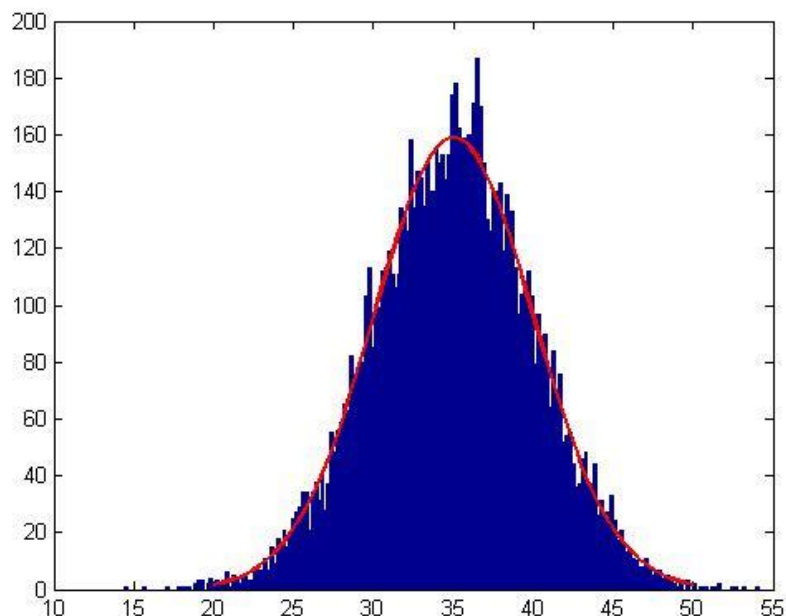
Visoms dalelėms buvo skaičiuojamas aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis. Vėliau iš šių duomenų gauti grafikai parodantys spektrų išsibarstymą. Pav. 16 pateiktas mažiausios dalelės 35 μ m spektras su jo išsibarstymu. Iš šio grafiko matome, kad didžiausias išsibarstymas yra ties 20MHz, o mažiausias ties 25MHz. Kitų dalelių spektrai su išsibarstymais pateikiami priede 5.1.



Pav. 16 Spektras dalelių, kurių dydžiai tolydiškai išsibarstę, 20-50 μ m diapazone. Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinį nuokrypį tarp spektrų.

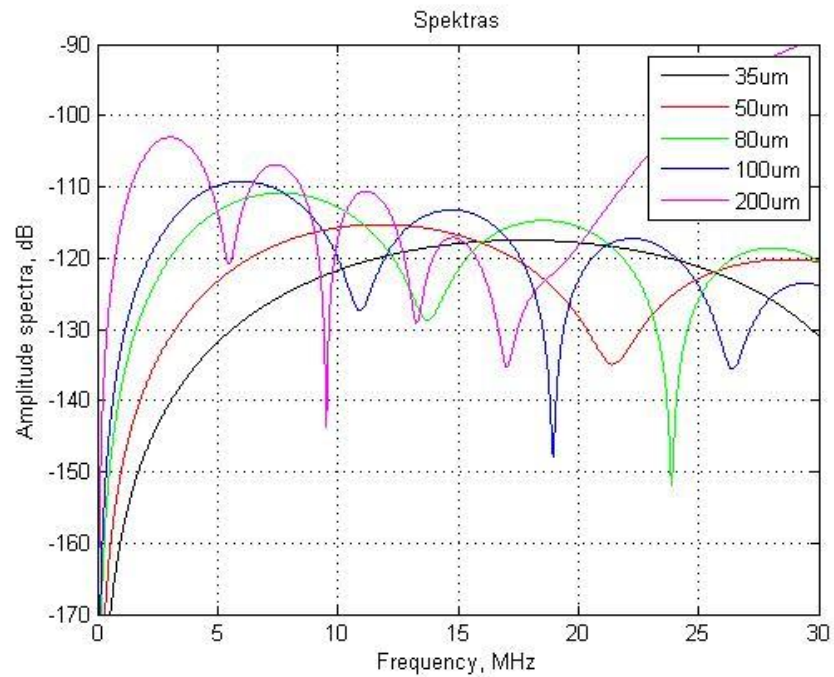
3.1.3 Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametru Gauso skirstiniui

Ultragarsinių bangų išsklaidymo spektrus modeliuoju laikydamas kad dalelių nuo mažiausios iki didžiausios diametro dydžiai visame diapazone turi Gauso skirstinį, todėl visų dydžių indėliai į bendrą spektrą bus nevienodų didumų. Dalelių, kurios pasitaiko dažniausiai indėlis į galutinį spektra numanomai turėtų būti stipriausias. Numanomo rezultato patikrinimui buvo atliktas modeliavimas. Sumodeliuotai visai spektrų šeimai buvo skaičiuotas aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis. Rezultatai pateikti Pav. 18.



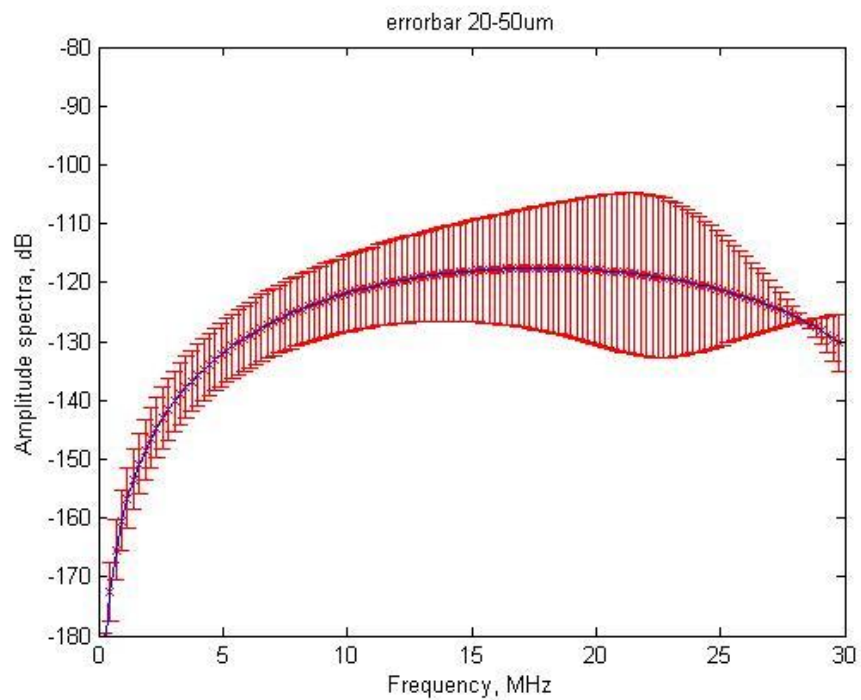
Pav. 17 Gauso skirstinio histograma 35μm dalelėms

Pav. 17 Pateikta histograma mažiausia vidurkį turinčioms dalelėms 35μm. Kiekvienoms dalelėms buvo naudojamas Gauso skirstinys, kurio ilgis 1000 atskaitų, o vidurkis, tiriamos dalelės, tačiau dydžiai svyruoja priklausomai nuo dalelė vidurkio. Kaip pateikta Pav. 17 dalelės vidurkis 35μm, dydžių išsibarstymas nuo 20 iki 50μm. Kitų dalelių rezultatai pateikti priede 5.2



Pav. 18 . Spektras įvairiems dydžiams pasiskirsčiusiems pagal Gauso skirstinį. Pateiktisuvidurkinti spektrai

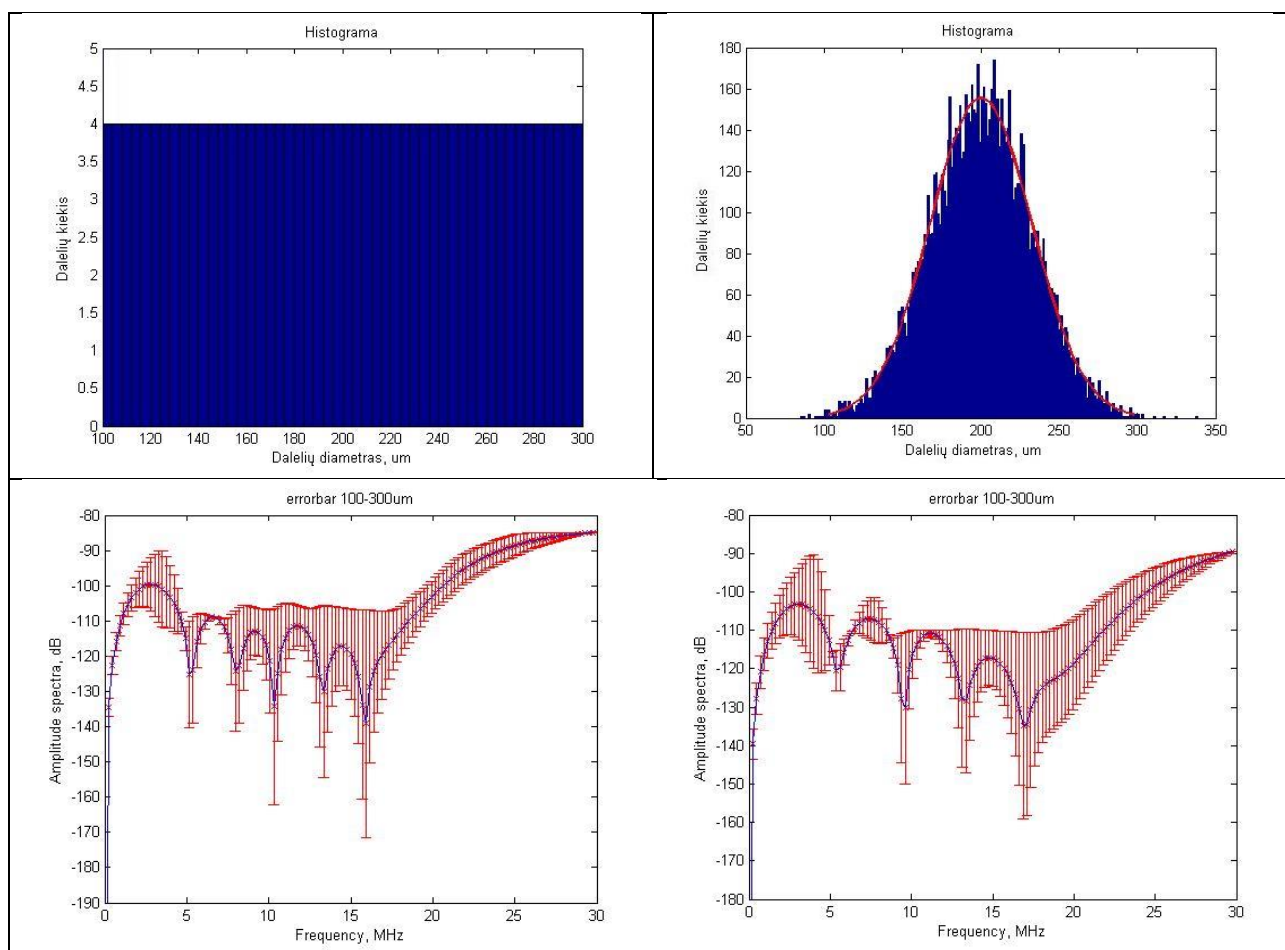
Visoms dalelėms buvo skaičiuojamas aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis. Vėliau iš šių duomenų gauti grafikai parodantys spektrų išsibarstymą. Pav. 19 pateiktas mažiausios dalelės 35 μ m spektras su jo išsibarstymu. Iš šio grafiko matome, kad didžiausias išsibarstymas yra ties 23MHz, o mažiausias ties 27MHz. Kitų dalelių spektrai su išsibarstymais pateikiami priede 5.2



Pav. 19 Dalelių spektras 20-50 μ m

3.1.4 Rezultatų aptarimas

Palyginimui pateikta: tolydžiai ir pagal Gauso skirstinį pasiskirsčiusių dalelių spektrai (Pav. 20). Tyrimas rodo, kad dalelių dydžiams pasiskirsčius pagal tolydiškai ir Gauso dėsnius, Ultragrso bangų spektrai nesiskiria esmės. Tačiau stebime ekstremumų skirtingą skaičių: kai Gauso dėsnis mus dominačių dažnių diapazone stebime 4 minimumus, o kai tolydinis dėsnis yra 5 minimumai. Pasikeičia lokalių maksimumų lygiai: pvz.: ties 3MHz Gauso skirstinio atveju stebime sumažėjimą per 5dB, ties 7MHz Gauso skirstinio atveju stebime padidėjimą per 5dB.



Pav. 20 Ultragrso bangų spektrai dalelių 100-300 μm dydžiams pasiskirsčiusiems pagal: tolydinį skirstinį (c) ir pagal Gauso skirstinį (d). Tolydiškai pasiskirsčiusių dalelių 100-300 μm histograma pateikta (a), pagal Gauso dėsnį pasiskirsčiusių dalelių 100-300 μm histograma pateikta (b). Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinį nuokrypį tarp spektrų.

Vertinant rezultatus gautus iš visų trijų metodų galime pasakyti, kad rezultatai gana skirtingi. Mažiausi pokyčiai stebimi mažiausioms dalelėms, kurių diametras 35 μm . Dažnių srityje matoma nedidelis skirtumas. Amplitudė skyrėsi per maždaug 5dB. Didžiausi pokyčiai matomi

dalelėse, kuriu vidurkis 200 μm . Monodispersinių dalelių spektrai turi daugiau minimumų, taip pat amplitudėt gana ženkliai skiriasi nuo modelio, kuris buvo atliekamas su Gauso skirstiniu. Šie rezultatai skiriasi todėl, kad monodispersinės dalelės susideda tik iš vieno dydžio struktūrų, o skaičiuojant pagal Gauso skirstinį yra vertinamas realus dalelių dydžių išsibarstymas, kuris yra gana didelis, nuo 100 iki 300 μm .

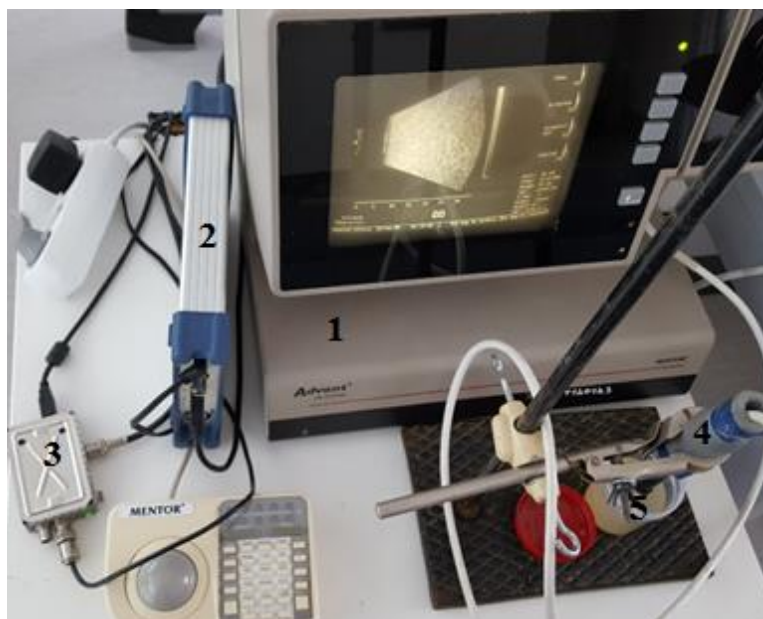
Eksperimente tikimasi gauti rezultatus, panašius į trečiame variante gautus modeliavimo duomenis, kur skaičiavimai buvo atliekami pagal Gauso skirstinį. Šiuo atveju rezultatai yra tiksliausi lyginant su kitais, tai yra vidurkis pagal dydį ir tolydišką dydžių pasiskirstymą.

Eksperimentas būtų tiksliausias atliekant tyrimą tokia dažnių diapazone, kuriame pagal modeliavimo rezultatus, išsibarstymą gavome mažiausią. Pavyzdžiui dalelėms su vidurkiu 200 mikro metrų, mažiausias išsibarstymas gautas ties 13MHz, todėl su tokiu keitikliu atliktas eksperimentas būtų informatyviausias.

Būsimam eksperimentui teorinis modeliavimas vandenyje būtų pigus, tačiau mikrostruktūra būtų nestabili laike, būtų dalelių galimybė pasislinkti sujudinus fantomą. Todėl eksperimentams tinkamesnė būtų stabilesnė struktūra su agaru, kai gelio pavidalo medžiaga išlaiko daleles nejudančias.

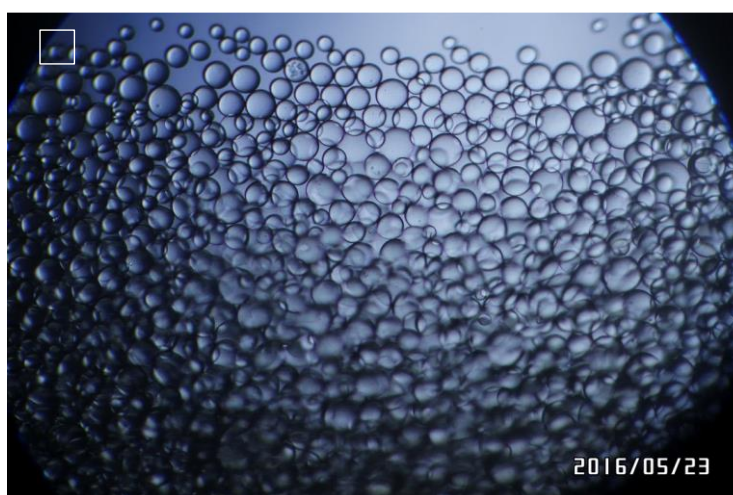
3.2 Eksperimentiniai rezultatai

Pav. 21 pateikta aparatūrinė dalis, su kuria buvo vykdomi tyrimai ir nusiimami signalai. Aparatūrą sudaro A/B skenavimo ultragarsinė sistema Advent Mentor, kuri skirta akies diagnostiniam tyrimui. Išsamiau aparatūra aprašyta [15]. Iš jos analoginio trakto, po Advent Mentor stiprintuvo, laboratorijos sąlygomis buvo įrengtas nestandartinis radijo dažninio signalo išvadas. Bendraašiu kabeliu šis išvadas buvo sujungtas su skaitmeniniu oscilografu Picoscope. Oscilografo sinchronizavimui su Advento Mentor vaizdo eilutėmis iš sistemos papildomai buvo įrengtas echoskopinių eilučių pradžios impulsų išvadas. Šie impulsai per programuojamą sinchronizatorių paleidžia oscilografo skleistinę taip, kad oscilografo atmintyje tilptų visos B scan tipo atvaizdą sudarainčios eilutės. Visų eilučių signalai buvo saugoti į kompiuterio diską. Gautieji signalai buvo apdorojami naudojant Matlab programą.



Pav. 21 Aparatūrinė įranga, su kuria buvo atliekami matavimai eksperimentai: 1) Advent Mentor, 2) programuojamas sinchronizatorius; 3) skaitmeninis oscilografas Picoscope; 4) 12MHz centrino dažnio keitiklis; 5) fantomas su Sephadex

Agaras be priemaišų yra akustiškai skaidri terpė, panašiai kaip vanduo, kuriame nėra bangas atspindinčių centrų. Pav. 22 pateikta iliustraciją kaip atrodo Išbrinkintų per 7 val. laikotarpį Sephadex granulių atvaizdas gautas mikroskopu. Gamintojo specifiukuotas Sepadex diametrų diapazonas 40-120 μm , vidurkis 80 μm . Kvadrato matmenys 0,1x 0,1mm. Kitų diametrų dalelių vaizdai per mikroskopą pateikiami priede 5.3.



Pav. 22 35 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Iterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .

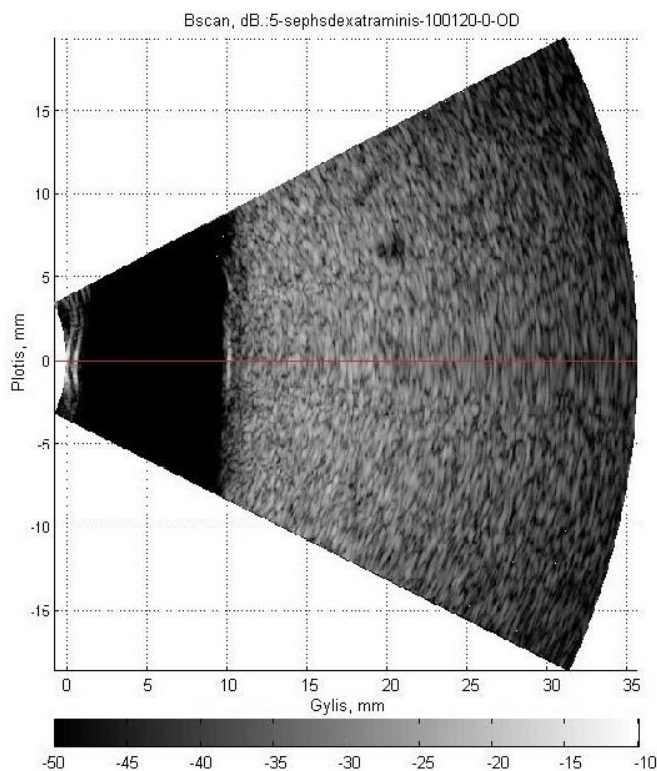
Agaro želė sustingusi indelyje užpilta vandeniu. Tas vanduo sudaro gerą akustinį kontaktą ultragaros bangoms sklusti iš keitiklio į vandenį ir į agarą. Vanduo liečiasi su agaro paviršiumi. Nuo šio paviršiaus atspindėtų bangų impulso spektras tinka atraminiam spektrui gauti.

Nes būtent tokį spektrą turinčios bangos pakliauna į agarą gilyn ir iš ten yra išsklaidomos. Išsklaidymas vyksta ir atgal į keitiklį, todėl keitikliu užregistruojamas atgal išsklaidytų bangų impulsai. Šie impulsai savo spektre turi požymių apie daleles, kurios išsklaidė bangas.

Pirmasis fantomas su Sephadex "G100120" išmirkius užėmė apie 40mL tūrį. Perteklinis vanduo, kurio sluoksnis susidarė virš granulių, kurios nusėdo sluoksniu ant indelio dugno, buvo nupiltas laukan. Nupilta apie 20 mL. Agaro buvo išvirta apie 50mL ir iš to tūrio ant sephadex buvo užpilta apie 10mL (mažiau nei vandens buvo nupilta). Agarą skystas tik jam esant virš +70°C. O sephadex būdamas +20°C greitai užpiltą agarą atvėsino ir pavertė želė, sumaišyti granulių su agaru nelabai pavyko. Todėl tau matosi sluoksnis, kuris skaidresnis. Tai agaras su nedidele, nežinoma granulių koncentracija. Giliau esantis Sephadex sluoksnis praktiškai yra su minimaliu vandens kiekiu, užpildančiu tarpus tarp išbrinkusių granulių. Visi nauji (4 vnt) fantomų neturėjo agaro sluoksnio ant viršaus. Šie 4 fantomai buvo užpilti tik vandeniu, ir tik vanduo skyrė ultragarsinį keitiklį nuo sephadex išbrinkintų granulių.

3.2.1 Atraminio spektro skaičiavimas

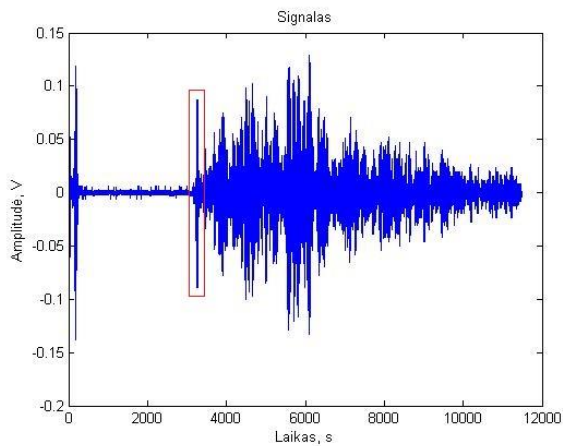
Pav. 23 pateikiamas B-scan vaizdas gauti iš Sephadex mikrostruktūrų. Šių mikrostruktūrų diametras yra 80um. Vaizdas pateiktas pilkoje skalėje. Per vidurį nubrėžta raudona linija, kuri parodo vienos eilutės signalą.



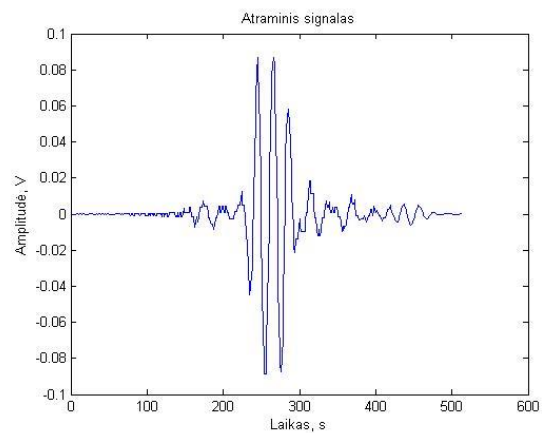
Pav. 23 B-scan vaizdas gautas iš mikrostruktūrų. Raudona linija pažymėta vieta, kurioje buvo skaičiuojami duomenys

Skaičiavimai modelyje buvo tam atvejui kai į daleles siunčiamas pastovios amplitudės ultragarso signalas, ir keičiamas tik dažnis, o amplitudės visada vienoda. Eksperimentuose su Sephadex - siunčiamas ultragarso signalas nėra vienos amplitudės visuose dažniuose. Keitiklio dažnių juostoje amplitudės perdavimas nevienodas - yra maksimumų skaičius. Eksperimentu gautuose signaluose yra susiklojusios dvi savybės: ultragarsinio keitiklio spektrinės savybės ir sephadex spektrinės savybės. Siekiant eksperimentiniuose spektruose palikti tik sephadex savybes, reikia kompensuoti keitiklio įtaką. Tokį kompensavimą dar vadina spektro kalibravimu, kai naudojamas atraminio impulso spektras, kurį nulemia tik keitiklio spektrinės savybės. Atraminį impulsą mes jau turim, todėl reikia jo spektrą (atraminį spektrą) atimti iš visų eksperimentinių spektrų.

Žemiau pateikti signalai ir spektrai, kurie buvo apskaičiuoti Matlab pagalba. Pav. 24 pateiktas vienas signalas paimtas iš B-scan vaizdo 125 eilutės. Pav. 23 raudonai pažymėta linija, iš kurios buvo gautas šis signalas. Norint gauti vien tik mūsų tiriamų dalelių reikalingą informaciją, naudojome atraminį signalą. Atraminis signalas buvo paimtas iš tos srities, kuri pažymėta Pav. 24 raudonai. Šis signalas atvaizduotas Pav. 24. Taip pat atraminiam impulsui naudojome Hamingo langą, kad nugltoninti nereikalingus triukšmus. Atraminis impulsas buvo skaičiuojamas iš keturių B-scan vaizdo eilučių ir vėliau suvidurkintas.

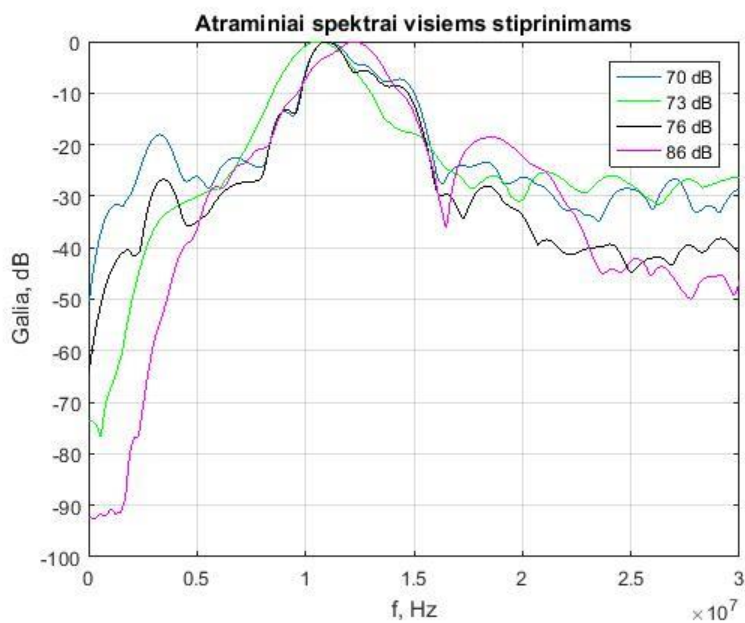


Pav. 24 Vienas signalas paimtas vienas iš B-scan



Pav. 25 Atraminis impulsas

Pav. 26 Pateikiami visų stiprinimų atraminiai spektrai. Jiems apskaičiuoti buvo naudojamas tas pats metodas kaip prieš tai aprašytame.



Pav. 26 Atraminų impulsų spektrai.

3.2.2 Signalas triukšmas vertinimas

Visiems šiems tyrimams buvo naudojami katerių tipų stiprinimo B-scan vaizdai, tai yra 70 dB, 73dB, 76dB ir 86 dB. Visų stiprinimų vaizdai su skirtingomis dalelėmis buvo įvertinti pagal signalo ir triukšmo lygį. Žemiau pateiktoje lentelėje surašyti visų stiprinimo vaizdų ir visų dalelių signalų ir triukšmo lygiai. Siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus, triukšmo lygis turėjo būti kuo mažesnis, o signalas iš fantomo kuo didesnis.

Lentelė 4 Duomenys apie 16bit ir 70dB vaizdų triukšmus ir signalų lygius visose dalelėse

16bit dB70	Triukšmas mVpp	Triukšmas, dB	Fantomas, mVpp	Fantomas, dB
25300 – 200 μm	3.3	-55	15	-41
50150 – 100 μm	5	-56	10	-43
100120 – 80μm	2	-56	9	-50
10050 – 35μm	3.5	-55	26	-35 (20)
2580 – 50μm	4	-55	12	-44

Lentelė 5 Duomenys apie 8bit ir 73dB vaizdų triukšmus ir signalų lygius visose dalelėse

8bit dB73	Triukšmas mVpp	Triukšmas, dB	Fantomas, mVpp	Fantomas, dB
25300 – 200 μm	6	-53	30	-33
50150 – 100 μm	6	-53	15	-40
100120 – 80μm	6	-50	8	-45
10050 – 35μm	6	-53	16	-40
2580 – 50μm	6	-53	50	-28 (25)

Lentelė 6 Duomenys apie 16bit ir 76dB vaizdų triukšmus ir signalų lygius visose dalelėse

16bit dB76	Triukšmas mVpp	Triukšmas, dB	Fantomas, mVpp	Fantomas, dB
25300 – 200 μm	4	-55	35	-33
50150 – 100 μm	3	-55	20	-40
100120 – 80μm	3.5	-56	30	-35
10050 – 35μm	6	-53	16	-40
2580 – 50μm	2	-55	45	-32 (23)

Lentelė 7 Duomenys apie 8bit ir 86dB vaizdų triukšmus ir signalų lygius visose dalelėse

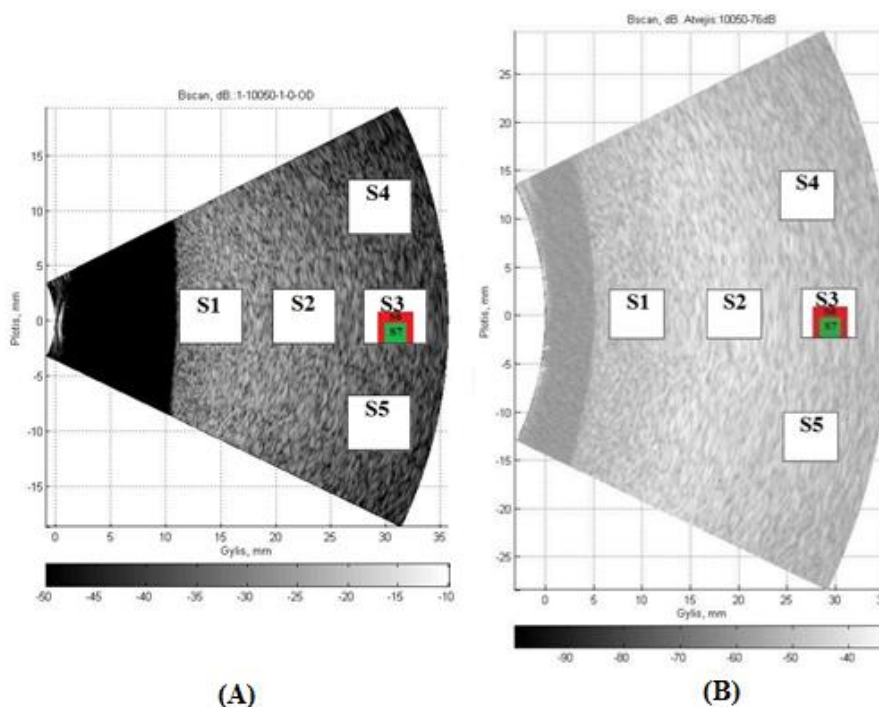
8bit dB 86	Triukšmas mVpp	Triukšmas, dB	Fantomas, mVpp	Fantomas, dB
25300 – 200 μm	4	-50	30	-14
50150 – 100 μm	4	-50	18	-20
100120 – 80μm	4	-50	13	-22
10050 – 35μm	5	-50	12	-23
2580 – 50μm	8	-45	33	-13 (32)

Fantome išsklaidytų ultragarso bangų impulsų amplitudėse pastebime, kad intensyviausiai atspindi fantomai sudaryti iš mažesnių dalelių (50 μm pastebėta 3 kartus iš 4). Mažiausiai atspindimos ultragarso bangos iš fantomų, kuriuose dalelių diametras 35 ir 80 μm (pastebėta po 2 kartus iš 4). Tikintis gauti detalesnės amplitudinės informacijos pabandyta pakeisti amplitudės kantavimo raišką nuo 8 bitų iki 16 bitų. Tačiau ženklus santykio signalas triukšmas

pagerėjimo negauta naudojant 16 bitų raišką, jeigu lyginti su 8 bitų raiška. Kita vertus, santykinis signalas triukšmas stipriau didėja (nuo 20dB iki 32dB) dėka stiprinimo didinimo nuo 70dB iki 86dB.

3.2.3 Spektrinė analizė penkiuose regionuose visiems vaizdams

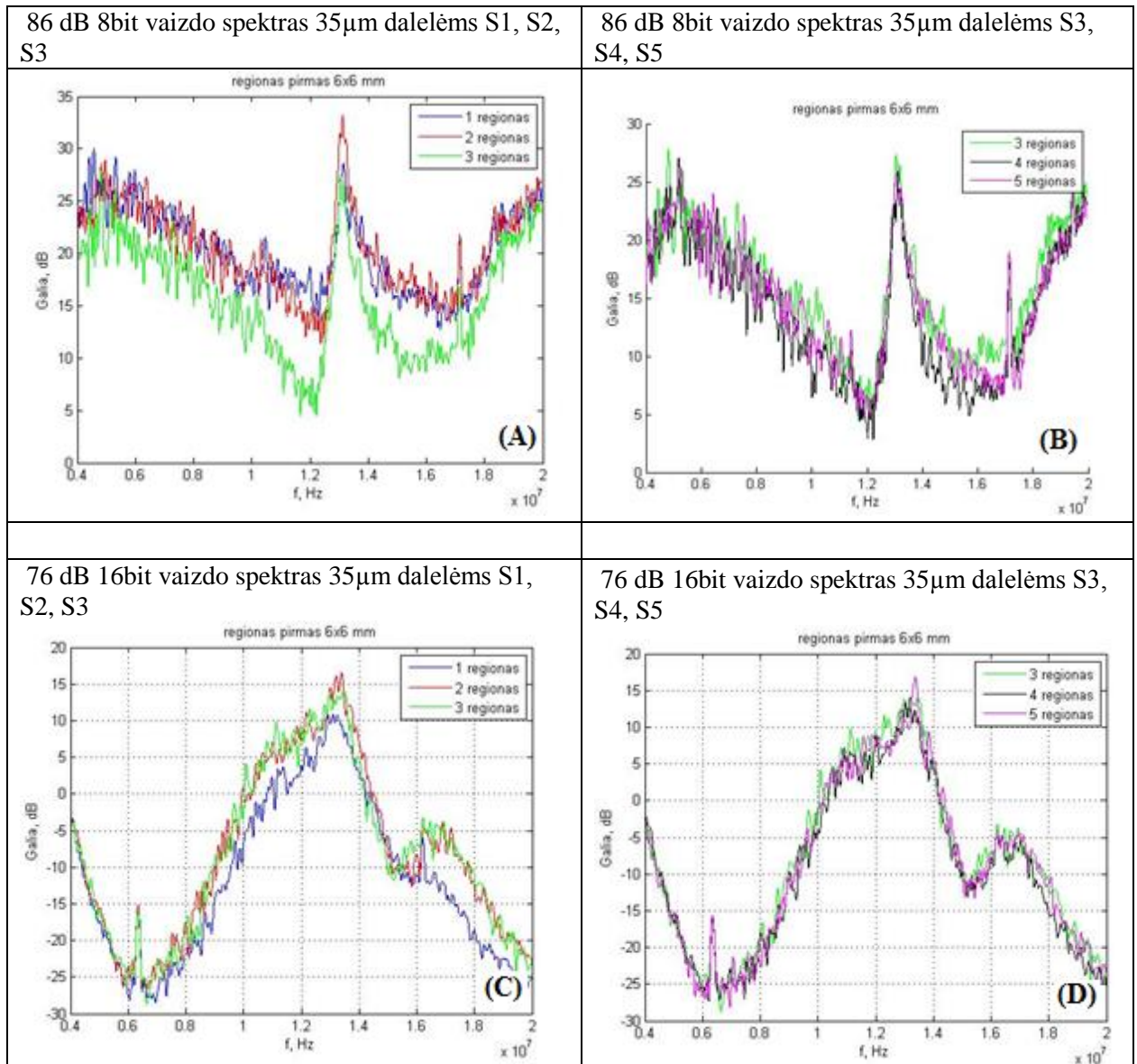
Spektrinei analizei buvo parinkti regionai skirtinguose gyliuose. Visų regionų dydis buvo 6 x 6 mm. S1 S2 S3 regionus parinkome simetriškai į visą B-scan vaizdo gylį. Artimiausias regionas S1 pasibaigia ties 15 mm, vidurinis S2 ties 25mm, giliausias S3 ties 35mm. Kryptyse skirtingi regionai simetriškai regionui S2: per 10 mm nutolęs S4, ir simetriškai jam – S5



Pav. 27 B-scan vaizdas su regionais nuo S1-S5, kuriuose buvo skaičiuojami spektrai 86dB ir 76dB 35 μ m dalelėms.

Iš viso echoskopinių eilučių į regioną tilpo 44. Regiono signalų buvo pritaikytas Haningo Langas. Galių spektras apskaičiuotas kiekvienai echoskopinei eilutei, atvaizdavimui suskaičiuotas spektro vidurkis ir standartinis nuokrypis. Spektus atvejams S1 S2 S3 86dB matome Pav. 28 (A) 76dB (C), o atvejams S3 S4 S5 Pav. 28 (B) ir (D). Šis metodas leido atsakydamas į klausimą ar spektrai išlieka nepakitę vienoje B-scan vaizdo vietoje. Visi spektrai skaičiuoti su 86 dB stiprinimu turi dedamąsias ties 13MHz ir 17MHz. Šios dedamosios galėjo atsirasti ir signalą sugadinti pačiame Advent Mentor analoginiame trakte. Radijo dažninio ultragarsinio signalo išvadas įrengtas sistemoje, kurioje nėra vykdoma spektrinė analizė. Advent Mentor sistemoje gamykliškai yra tik radijo dažninio signalo demoduliacija amplitudiniu detektoriumi. Jeigu gamintojas nebuvo numatęs spektinės analizės, tai pavyzdžiui stiprintuve gali būti nemažų netiesinių iškraipymų. Šie

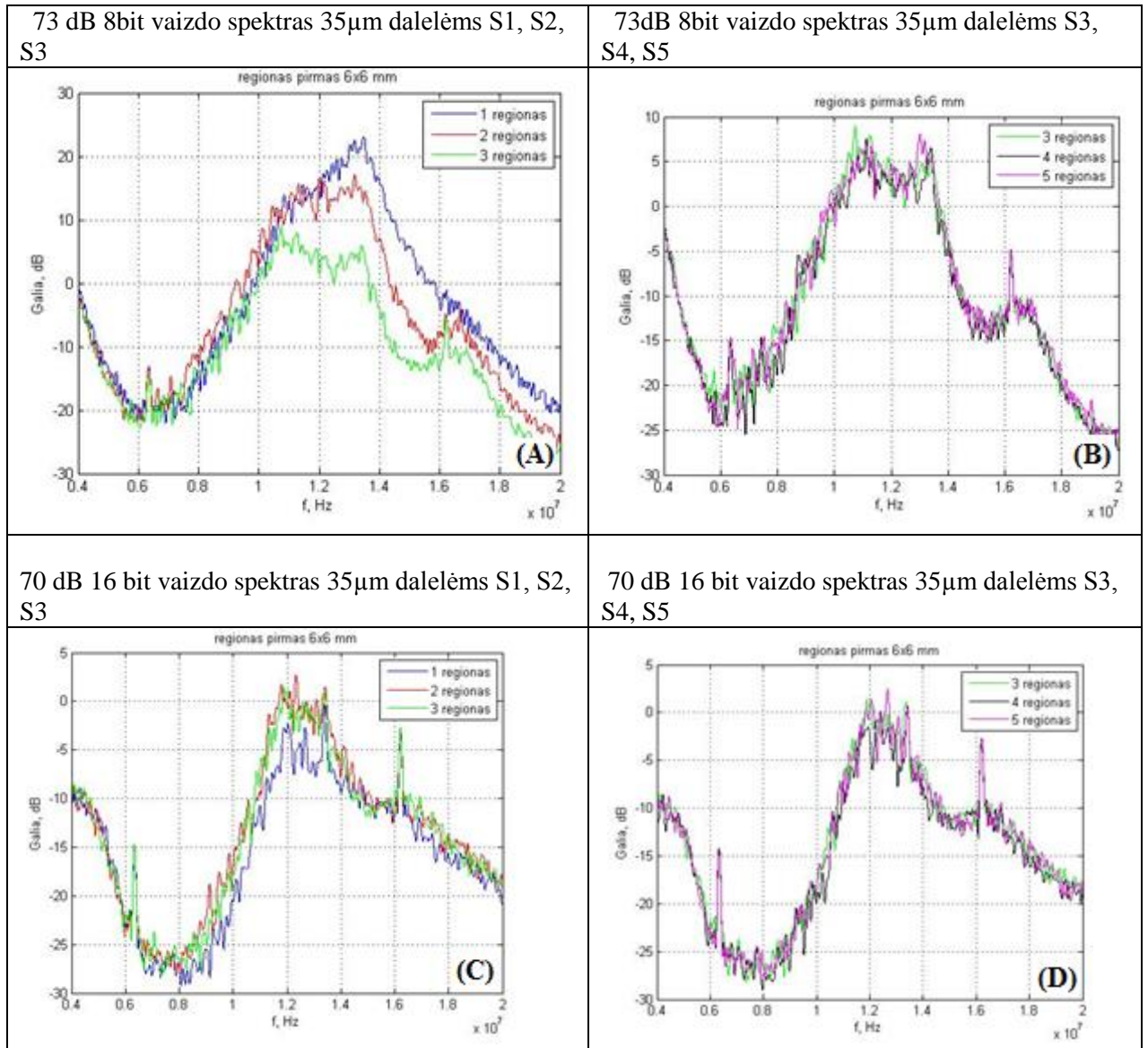
netiesiškumai, didinant stiprinimą netiesiškai pakeičia spektrą, tačiau gamintojo įdiegto amplitudinio demoduliacijos išėjime spektro pokyčiai nestebimi. O išsamiai spektrinei analizei šie netiesiškumai jau trukdo. Su fantomais įgauta patirties, rodančios būtinybę atkreipti dėmesį į galimus netiesinius iškreipimus. Laboratorijos sąlygomis siekdami tobulinti Advent Mentor radijo dažnino signalo analizei būtina turėti neiškraipytą signalą analoginiame trakte



Pav. 28 Spektrai iš regionų 86 ir 76 dB stiprinimo 35 μ m dalelėms

Padarėme spektrų grafikus, pateiktus , Pav. 29. Iki S3 regiono bangos sklinda ilgiausią atstumą, todėl patiria didžiausią slopinimą ir matome spektrą žemiausiame lygyje, apie 5dB žemiau negu artimesnių regionų spektrai. Gyliai visi gana artimi 27-32mm, todėl bangų slopinimai visuose

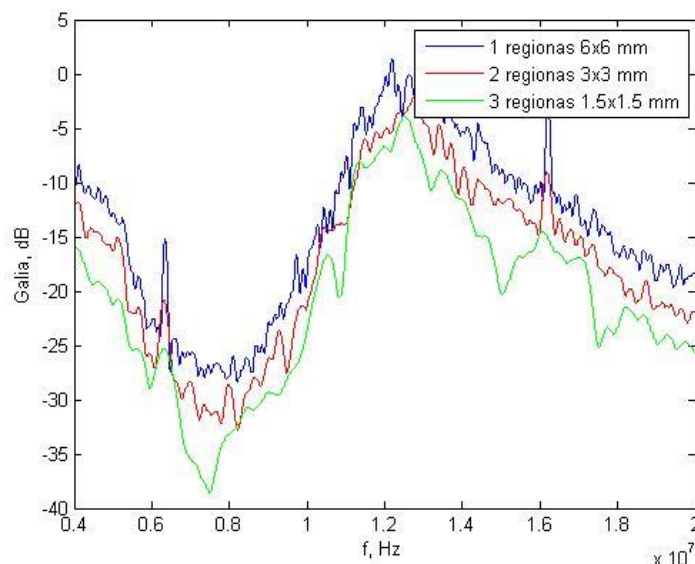
gana artimas ir spektrų skirtumų nesimato, nes juos bangos pasiekia vienodai nuslopintos. Paveiksle Pav. 29 pateikta 35 μ m dalelių spektrai.



Pav. 29 Spektrai iš regionų 70 ir 73 dB stiprinimo 35 μ m dalelėms

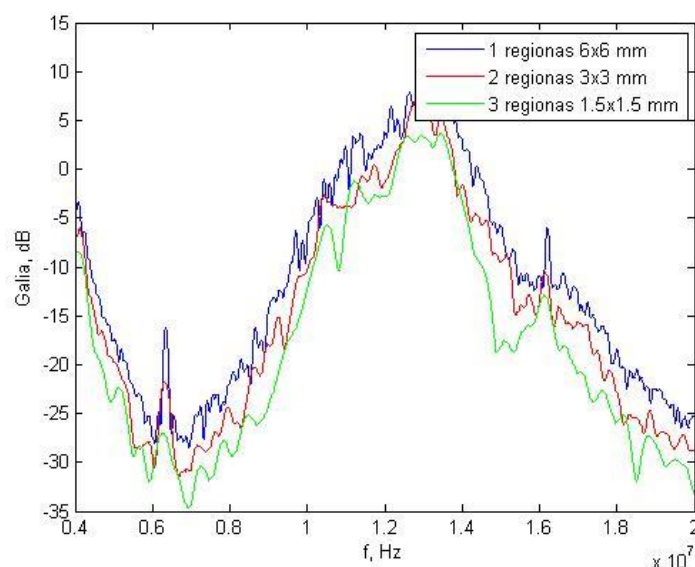
3.2.4 Spektrinė analizė trijuose skirtingo dydžio regionuose

Norint įvertinti ar spektrai nepakinta nuo regiono dydžio, buvo atliekami skaičiavimai keičiant jų dydį. Kaip pateikta Pav. 27 B-scan vaizde, 3 regione, jo viduje yra mažesni. Paėmėme signalus iš Sepahdex fantomo, regionų S3 S6 ir S7, kurie skirtingų dydžių: apie 6x6mm, 3x3mm ir apie 1,5x1,5mm.



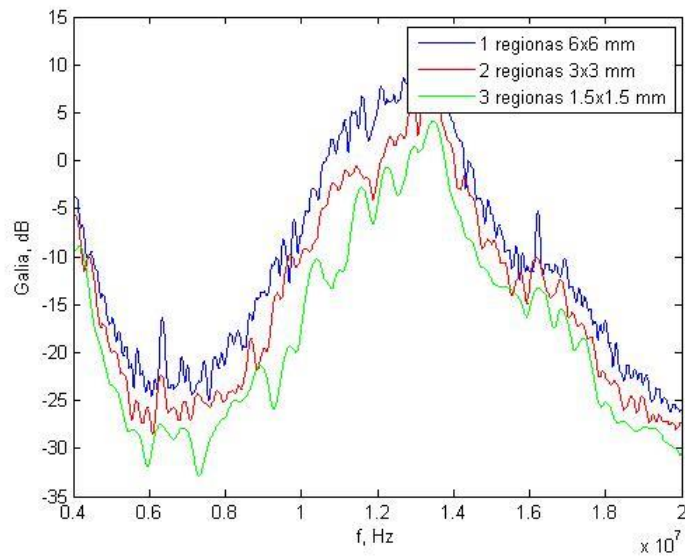
Pav. 30 35µm dalelių spektras pagal tris skirtingo dydžio regionus su 76dB stiprinimu

Pav. 30 Pateiktas 35µm dalelių spektrai su skirtingais regionų dydžiais 76dB. Pagal gautus rezultatus matome, kad regiono dydžiui didėjant, atsiranda daugiau dedamųjų spektre.



Pav. 31 35µm dalelių spektras pagal tris skirtingo dydžio regionus su 73dB stiprinimu

Pav. 31 Pateiktas 35 μ m dalelių spektrai su skirtingais regionų dydžiais 73dB. Pagal gautus rezultatus matome, kad regiono dydžiui didėjant, atsiranda daugiau dedamųjų spektre.

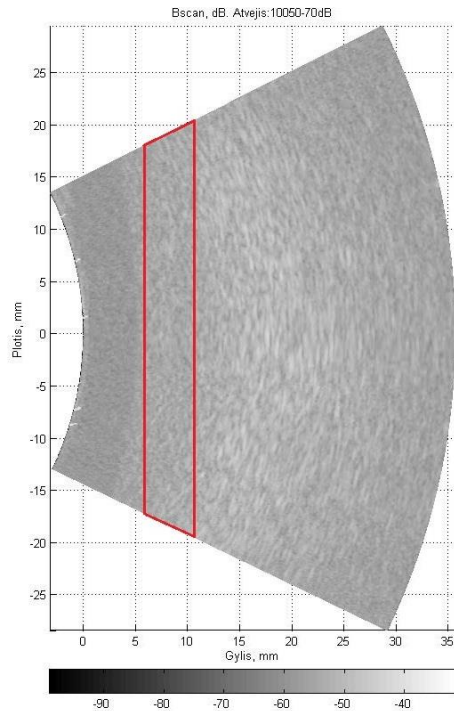


Pav. 32 35 μ m dalelių spektras pagal tris skirtingo dydžio regionus su 70dB stiprinimu

Pav. 32 Pateiktas 35 μ m dalelių spektrai su skirtingais regionų dydžiais 70dB. Pagal gautus rezultatus matome, kad regiono dydžiui didėjant, atsiranda daugiau dedamųjų spektre.

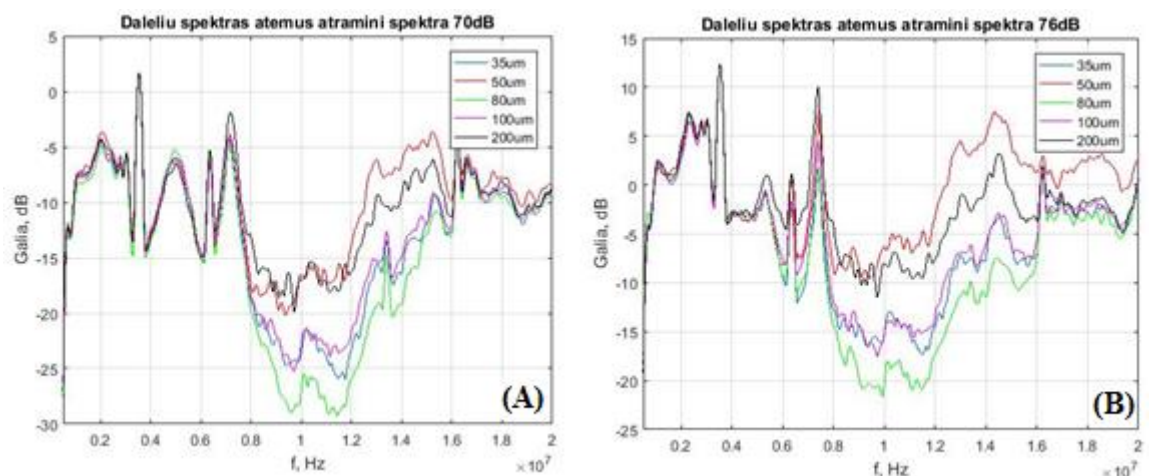
3.2.5 Dalelių spektrai viename regione

Iš atliktų skaičiavimų regionuose pagal gylį B-scan vaizde, buvo padaryta išvada, kad geriausia būtų atlikti spektrų skaičiavimus vaizdų pradžioje, nes signalas stipriausias ir turi mažiausiais iškreipimų. Todėl buvo nuspręsta apskaičiuoti spektrą viename regione, kaip pavaizduota Pav. 33. visose eilutėse, kurių yra 250, ir vėliau visus spektrus suvidurkinti. Ruožo plotis, kuriame buvo skaičiuojami spektrai yra 5mm. Pav. 33 pateiktas B-scan vaizdas dalelių 35 μ m ir pažymėtas regionas, kuriame skaičiuoti spektrai. Skaičiavimai buvo atliekami visoms dalelėms ir visiems stiprinimo vaizdams išskyrus 86 dB.



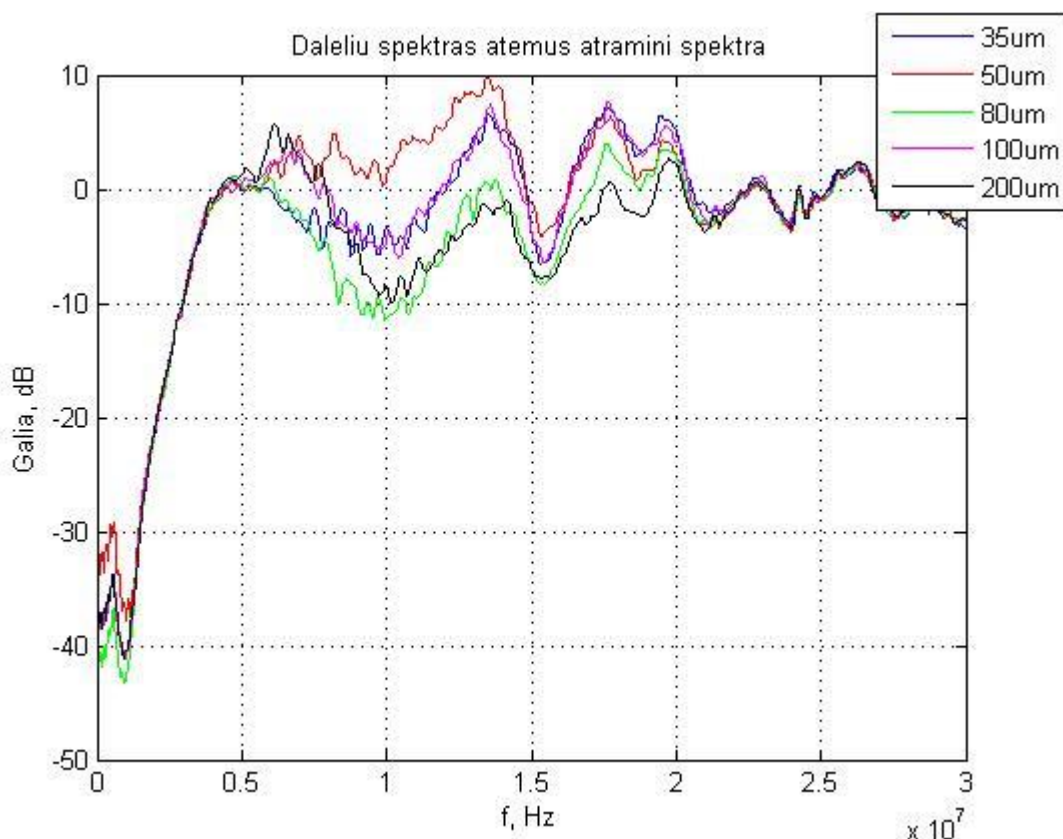
Pav. 33 B-scan vaizdas 35 μ m dalelių su 70db stiprinimu

Žemiau pateiktame Pav. 34 pavaizduoti du grafikai su skirtingu stiprinimu 70 ir 76 dB grafikais visoms dalelėms, tai yra nuo 35 μ m iki 200 μ m. Iš grafikų matome, kad spektrai turi nemažai triukšmų ir nereikalingų dedamųjų, kurie iškraipo spektro duomenis. Dauguma spektrų turi pašalines dedamąsias. Šios dedamosios galėjo atsirasti ir signalą sugadina pats keitiklis, arba analoginis aukšto dažnio traktas. Apsispręsta, kad +86dB stiprinimas yra per didelis, ir spektras išsikraipo dar prieš pakliūdamas į skaitmenizatorių.



Pav. 34 pavaizduoti du grafikai su skirtingu stiprinimu 70 ir 76 dB grafikais visoms dalelėms

Žemiau pateiktame Pav. 35 yra pavaizduotas 73 dB stiprinimo spektras visoms dalelėms. Šiame spektre pastebime mažiausiai pašalinių trikdžių. Nors spektrai yra gana panašūs, žadančiai atrodo skirtumo nebuvimas nuo 0 iki maždaug 5 MHz. Tai reiškia, kad triukšmai iš keitiklio ir stiprintuvo arba viso analoginio trakto, tai yra elektroniniai triukšmai, atrodo vienodai, koks bebūtų fantomas. Taip pat skirtumo nebuvimas nuo 20MHz dažnio ir į aukštesnius dažnius. Tai reiškia tą patį ką žemesniuose dažniuose.



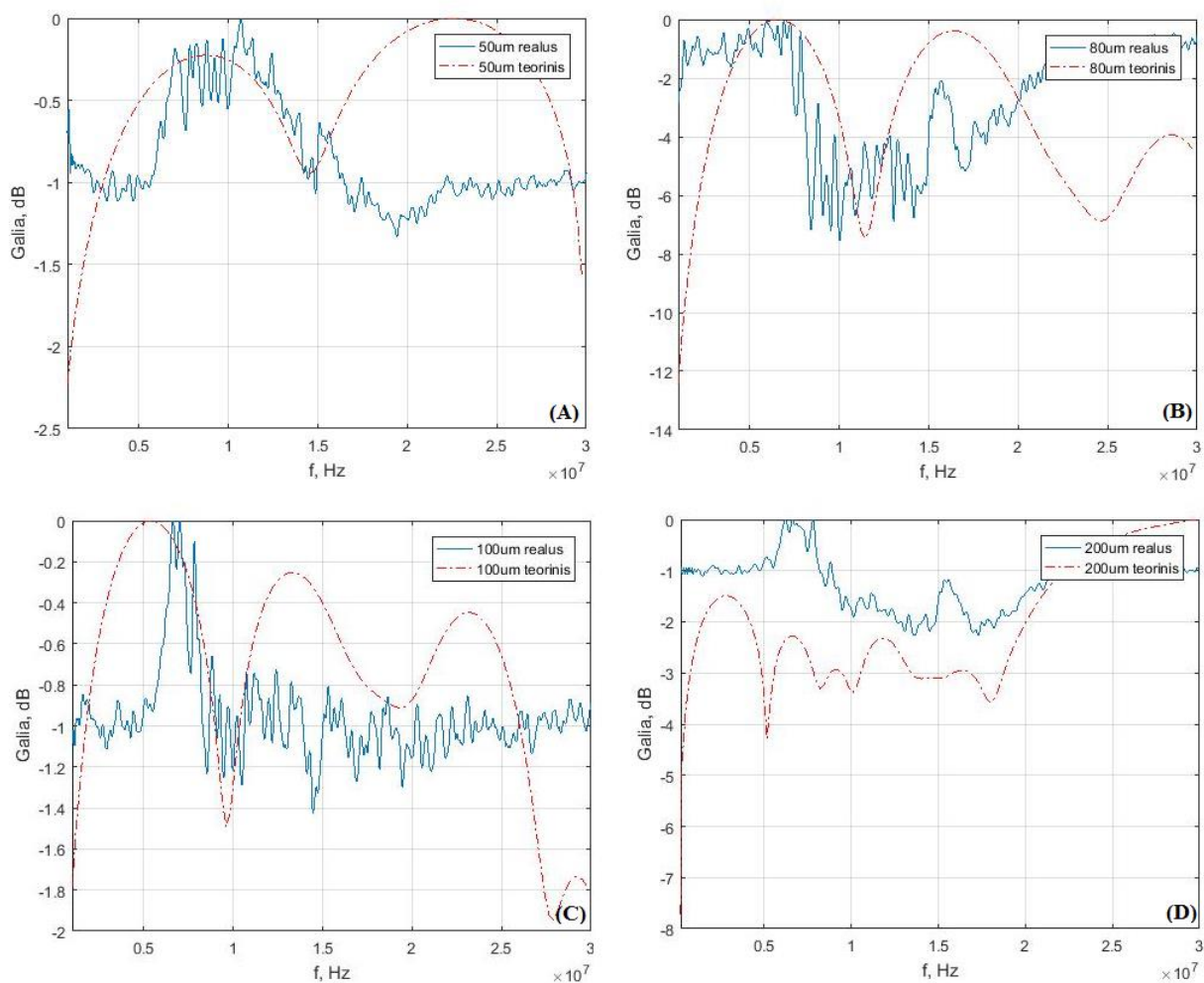
Pav. 35 Visų dalelių spektrai viename ruože 73 dB

Tačiau skirtumo buvimas galios spektruose, dažnio diapazone nuo 5 iki 20MHz, atrodo gana neblogai, būtent tokia diapazone randasi ultragarsinio keitiklio perduodamų dažnių juosta. Tai reiškia, jog tai yra ne triukšmas, todėl fantomas šiuose dažniuose spektrui daro įtaką. Svarbiausia užduotis rasti tinkamą atraminį spektrą ir atimti iš čia matomų spektrų. Galbūt mūsų naudojamas atraminis signalas nėra visiškai tinkamas.

3.2.6 Rezultatų palyginimas su teoriniu modeliavimu

Kadangi mums nepavyko rasti tinkamo atraminio spektro, kurį galėtume atimti iš mūsų apskaičiuotų dalelių spektrų, tam panaudojome mažiausios dalelės spektrą. Iš visų apskaičiuotų spektrų, išskyrus 35um, atimame būtent šios mažiausios dalelės spektrą. Tačiau norint šiuos gautus

rezultatus palyginti su teoriniais, reikia tą pati padaryti modeliavimo duomenyse, atimti mažiausios dalelės spektrą iš visų kitų dalelių, tai yra 50 μ m, 80 μ m, 100 μ m ir 200 μ m.



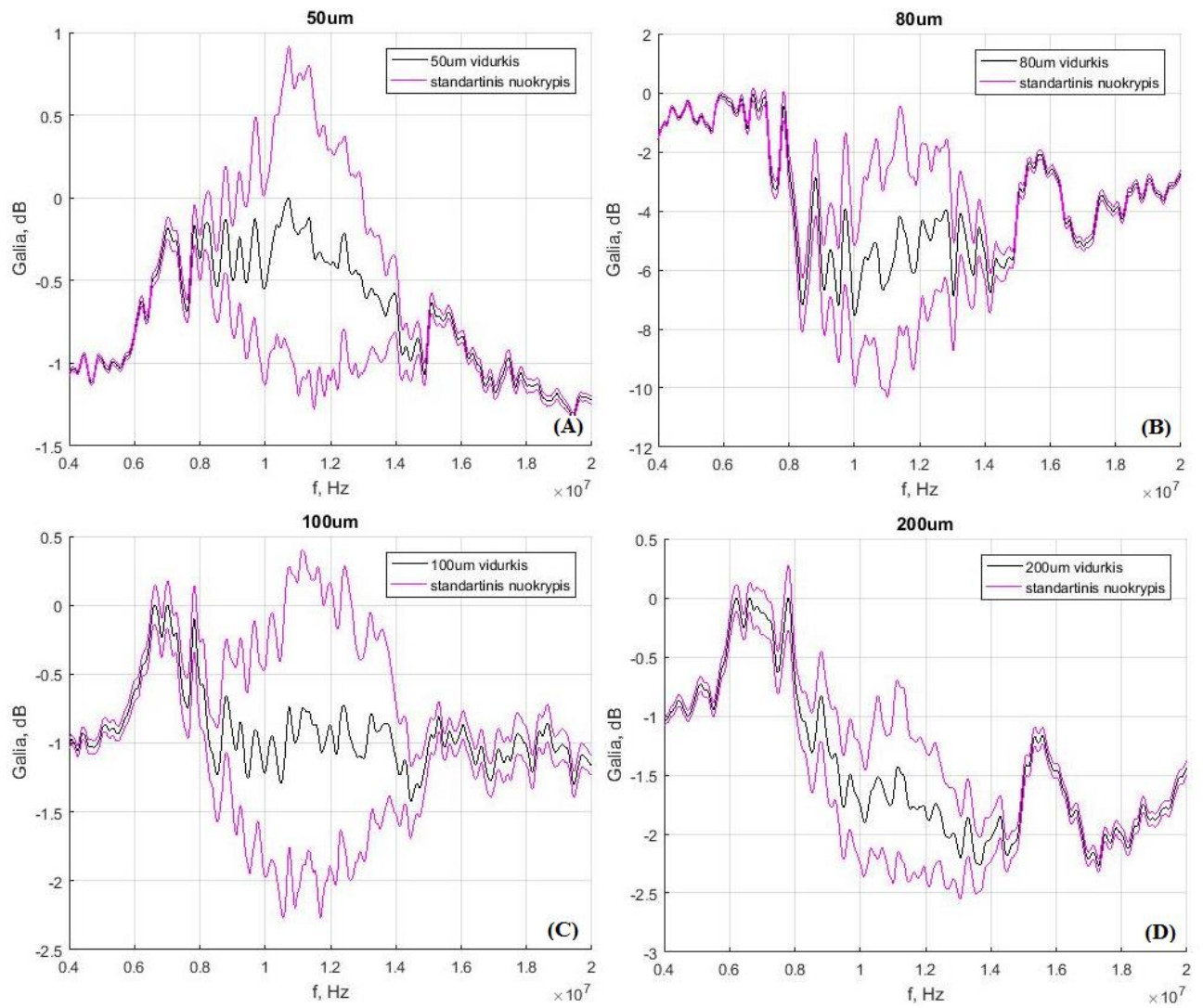
Pav. 36 Dalelių spektrai 50 μ m, 80 μ m, 100 μ m, 200 μ m nubrėžti kartu su teoriniais skaičiavimais. Raudona punktyrinė linija yra teorinio modelio rezultatas, o mėlyna ištisinė gautas skaičiuojant spektrus nuo dalelių.

Gautuose rezultatuose Pav. 36 randame atitikimą tarp teorijos ir eksperimentu keliuose fantomų duomenyse išskyrus mažiausio diametro daleles, kurios spektrą panaudojome kaip atraminį. Pirmame grafike, dalelių diametrams 50 μ m, panašumų randame ties 20MHz, kur yra teorinio modelio minimumas. Tačiau spektre maksimumai sutampa ne taip gerai, nors dažnių diapazonai gana panašūs. 80 μ m dalelėmis galime išvelgti sutapimą ties antruoju maksimumu, kuris yra ties 16MHz dažniu. Pirmojo maksimumo dažniai sutampa ne taip gerai, tačiau matome, kad teorinio maksimumas staigiai mažėja ties 13MHz, o apskaičiuoto ties 7MHz. 100 μ m dalelėse spektrų panašumų nelabai įžvelgiama. 200 μ m dalelėse spektrų panašumų taip pat nelabai yra, tačiau po visų minimumų ir maksimumų tiek teorinis tiek realiai apskaičiuotas spektras ties 17 didėja.

Teorinių ir eksperimentinių duomenų neatitikimo papildoma priežastis gali būti realus išbrinkintų granulių diametras. Apytikriai vertinant mikroskopu gautus atvaizdus, kurie visi pateikti prieduose 5.3, stebime kad diametrai neatitinka tų kuriuos turėtume gauti pagal gamintojo specifikaciją. Galbūt granulių fantomų gamybai reikia specialių sąlygų arba specialios koncentracijos tirpalo. Tačiau gamintojas tokios paskirties, - atraminio dydžio granulė šiam produktui nenumato. Tiesioginė GE gaminamų Sephadex produktų paskirtis yra tirpalų filtravimas biocheminiais tikslais, pvz. baltymų valymui. Gali būti, kad pagamintas fantomas per ilgą laiką išbrinko per daug. Dabar 5.3 prieduose stebime, kad 35 ir 50 μm granules yra labai artimo didumo, panašiai artimus didumus matome 80 ir 100 μm . Ženklausiai galime išskirti dydžius pagal nuotraukas į tris grupes: 1. (35 ir 50) μm ; 2. (80 ir 100) μm ir 200 μm . Iš šio patirties dydžio fantomų gamyboje darytume tokią rekomendaciją ateičiai. Ateityje fantomų nuotraukas fotografuoti iškart po ultragasrisnių duomenų (signalų) užrašymo. Nuotraukose programinės įrangos pagalba įvertinti tikrąją arba realią dydžių sklaidą. Tikėtina, kad tada realiai dydžių sklaidai sumodeliuoti spektrai turėtų geresnį panašumą į eksperimentinius. Su fantomais įgauta patirties, rodančios būtinybę atkreipti dėmesį į galimus netiesinius iškraipymus. Laboratorijos sąlygomis siekdami tobulinti Advent Mentor radijo dažnino signalo analizei būtina turėti neiškraipytą signalą analoginiame trakte

3.2.7 Standartinis nuokrypis

Norin įvertinti spektrų netolygumą visame skaičiuojamame B-scan vaizde, buvo apskaičiuotas standartinis nuokrypis. Pav. 37 pateikti rezultatai. Juoda linija roto suvidurkintą spektra iš visų 250 eilučių, o rožinės linijos standartinį nuokrypį nuo vidurkio į teigiamą ir neigiamą puses. Gauti rezultatai parodė, jog spektrų išsibarstymai yra ganėtinai dideli. Visose dalelėse didžiausias spektro netolygumas spėjamas 8-14 MHz dažniuose. Šis spektrų netolygumas gali atsirasti dėl gana didelio dalelių diametro nevienodumo. Gamintojai nurodo, jog dalelės turėtų būti pasiskirsčiusios pagal gauso skirstinį apie tam tikrą vidurkį, kaip pateikta lentelėje 1. Tačiau iš gautų mikroskopinių vaizdų matome, kurie pateikti priede 5.3, jog pvz: 50 μm dalelės, kurios išsibarsčiusios nuo 20 μm iki 50 μm , kaip nurodo gamintojas, mikroskopiniuose vaizduose pastebime apie 100 μm , ir didesnių dalelių. Tai galėjo labai stipriai paveikti mūsų gautus rezultatus. Mūsų modeliavimo rezultatai remėsi Sephadex gamintojo nurodytais parametrais. Ateityje atliekant tokius tyrimus su šiomis dalelėmis, reiktu patiems įvertinti dydžių pasiskirstymą.



Pav. 37 Spektrų standartinis nuokrypis

4 Išvados

1. Įgyvendintas sferiškų dalelių, panašių į biologinę mikrostruktūrą, atspindimų ultragarsinių bangų spektrų teorinis apskaičiavimo modelis. Modeliavimas buvo atliktas trimis atvejais, kai dalelės buvo vieno dydžio arba monodispersinės, kai dalelių dydžiai buvo tolydžiai pasiskirstę ir kaip dalelės pasiskirsčiusios pagal gauso skirstinį su tam tikru vidurkiu. Modeliu suskaičiuoti spektrai dalelėms, kurių diametrų vidurkiai 35, 50, 80, 100 ir 200 mikrometrų. Atlikta teorinė analizė parodė spektrų sąsają su statistinių dydžių skirstiniais.

2. Ištirta ultragarsinės sistemos stiprinimo įtaka iš fantomų atspindėtų ultragarso spektrų charakteristikoms. Buvo naudojami keturių tipų vaizdai nuo kiekvienų dalelių, tai 8 bit 86 dB, 16 bit 70dB, 16 bit 76 dB ir 8 bit 73dB. Norint gauti tik sephadex dalelių spektrų informacija, kiekvienam vaizdui buvo skaičiuojamas atraminis spektras, kuris vėliau atimtas iš gautojo nuo dalelių. Parinktas tinkamiausias stiprinimas vadovaujantis signalas / triukšmas santykiu ir leistinu spektro iškraipymu 5%. Tokius parametrus atitiko 8 bit 73 dB signalai.

3. Atlikta teoriškai sumodeliuoto ir eksperimentiškai užregistruoto spektrų palyginamoji analizė, siekiant patvirtinti hipotezę apie požymių buvimą. Iš mūsų atlikto tyrimo galima teigti, kad hipotezė dalinai pasitvirtino, nes eksperimentiškai gauti rezultatai nevisiškai sutapo su teoriškai apskaičiuotais. Taip pat apskaičiavome spektrų netolygumą ir apskaičiavome standartinį nuokrypį, kuris parodė, kad spektrai turi gana didelį išsibarstymą. Iš vaizdų gautų per mikroskopą stebint daleles, pastebėjome, jos jų dydžiai nėra tokie, kokius nurodo gamintojas. Tai galėjo labai stipriai paveikti mūsų gautus rezultatus. Mūsų modeliavimo rezultatai remėsi Sephadex gamintojo nurodytais parametrais. Ateityje atliekant tokius tyrimus su šiomis dalelėmis, reiktu patiems įvertinti dydžių pasiskirstymą.

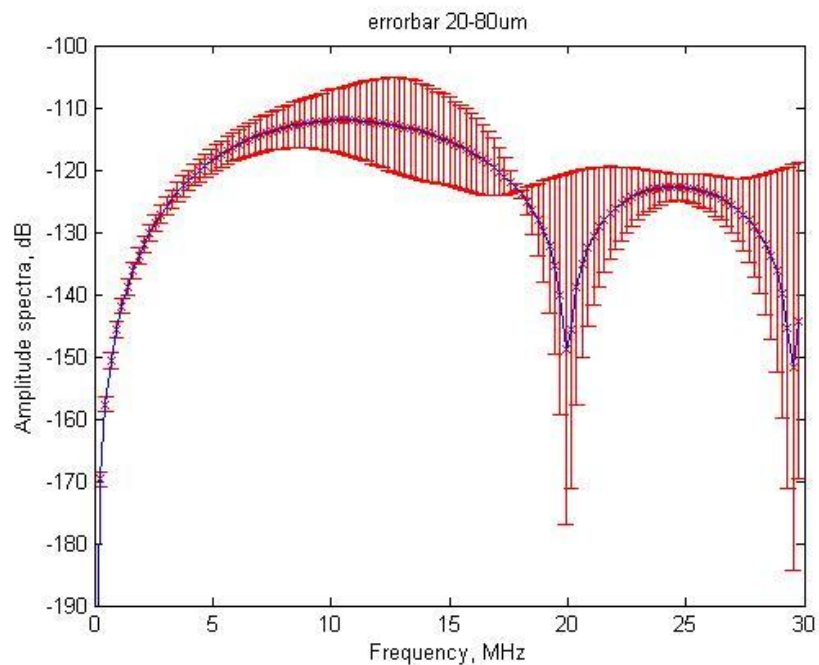
Literatūros sąrašas

1. Peter Hoskins, Abigail Trush, Kevin Martin, Tony Witthingam: „Diagnostic Ultrasound– Physics and Equipment“. 2003
2. K. Kirk Shung: „Diagnostic Ultrasound– Imaging and Blood Flow Measurements“. 2006
3. R. Jurkonis, A. Lukoševičius: „Comparison of microsphere models for calculation of backscattered ultrasound spectra“. 2012
4. Mamou, Jonathan, Oelze, Michael L. (Eds.): „Quantitative Ultrasound in Soft Tissues“. 2013
5. Jeremy P. Kemmerer and Michael L. Oelze: „Scattering by single physically large and weak scatterers in the beam of a single-element transducer“. 2015
6. Ali Sadeghi-Naini, Ervis Sofroni, Naum Papanicolau, Omar Falou, Linda Sugar, Gerard Morton, Martin J. Yaffe, Robert Nam, Alireza Sadeghian, Michael C. Kolios, Hans T. Chung, Gregory J. Czarnota: „Quantitative Ultrasound Spectroscopic Imaging for Characterization of Disease Extent in Prostate Cancer Patients“. 2015
7. Tadashi Yamaguchi, Michael L. Oelze, Pascal Laugier, Ernest J. Feleppa: „Three dimensional quantitative ultrasound for detecting lymph node metastases“. 2013
8. Thomas L. Szabo: „Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out“. 2014
9. M.C. Kolios, L. Taggart, R.E. Baddour, F.S. Foster, J.W. Hunt, G.J. Czarnota, M.D. Sherar: „AN INVESTIGATION OF BACKSCATTER POWER SPECTRA FROM CELLS, CELL PELLETS AND MICROSPHERES“. 2014
10. Michael L. Oelze and William D. O'Brien, Jr.: „Quantitative ultrasound assessment of breast cancer using a multiparameter approach“. 2007
11. Ali Sadeghi-Naini, Omar Falou, Gregory J. Czarnota: „Quantitative Ultrasound Visualization of Cell Death: Emerging Clinical Applications for Detection of Cancer Treatment Response“. 2012
12. Ali Sadeghi-Naini, Naum Papanicolau, Omar Falou: „Quantitative Ultrasound Evaluation of Tumour Cell Death Response in Locally Advanced Breast Cancer Patients Receiving Chemotherapy“. 2013
13. Shreedevi Dasgupta, Ernest J. Feleppa: „Empirical Validation of the Theoretical Frameworks Underlying Ultrasound Scattering in Tissue“. 2007

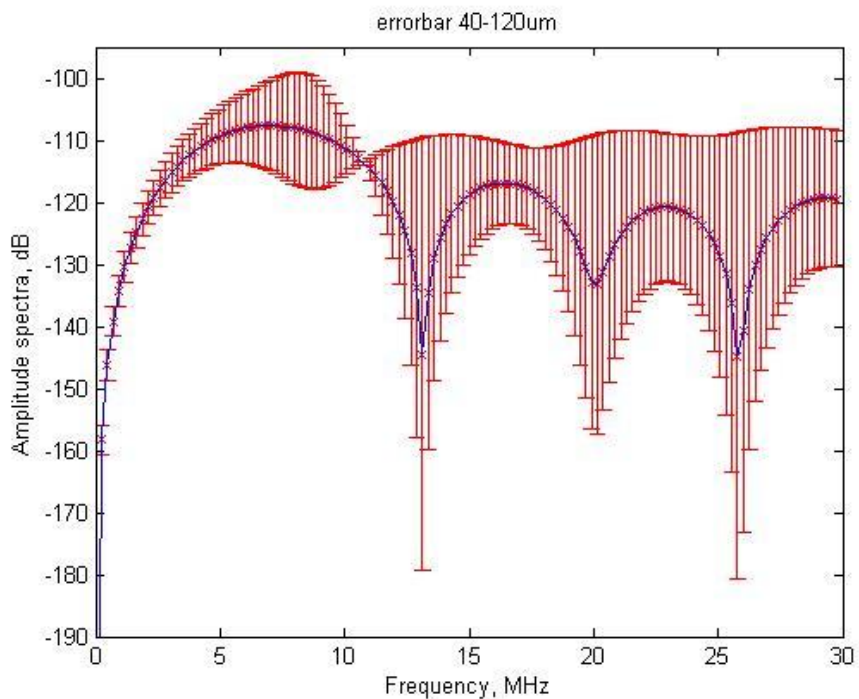
14. King MR, Anderson JJ, Herd MT, Ma D, Haak A, Wirtzfeld LA, Madsen EL, Zagzebski JA, Oelze ML: „Ultrasonic backscatter coefficients for weakly scattering, agar spheres in agar phantoms.“
15. R. Jurkonis, S. Daukantas, A. Janušauskas, A. Lukoševičius, V. Marozas, D. Jegelevičius, Synthesis of Parametric Map from Raw Ultrasound B-Scan Data, Elektronika ir elektrotechnika, 2009, 94(6): 109-112.
<http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/10118>

5 Priedai

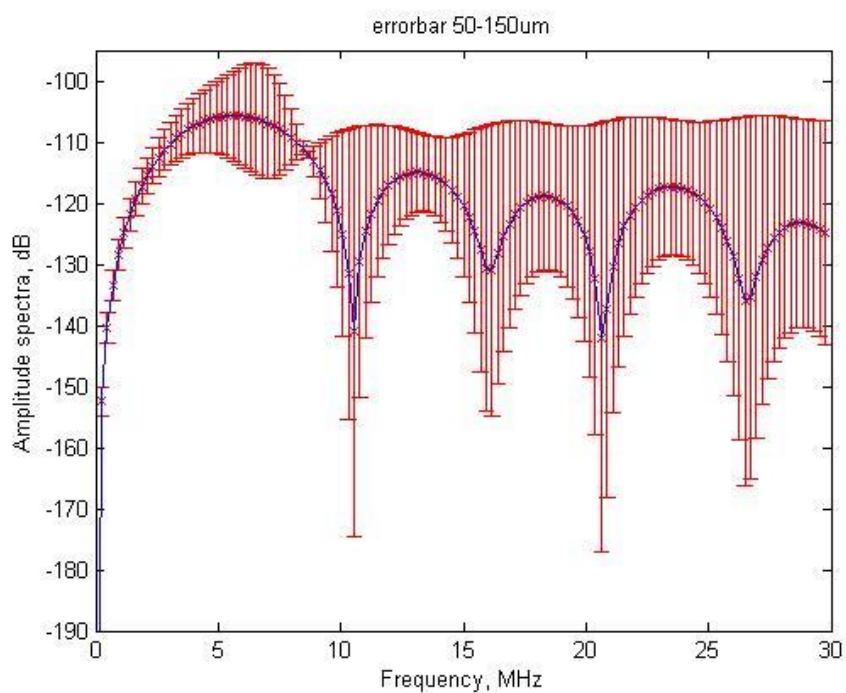
5.1 Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametru tolydiniam skirstiniui



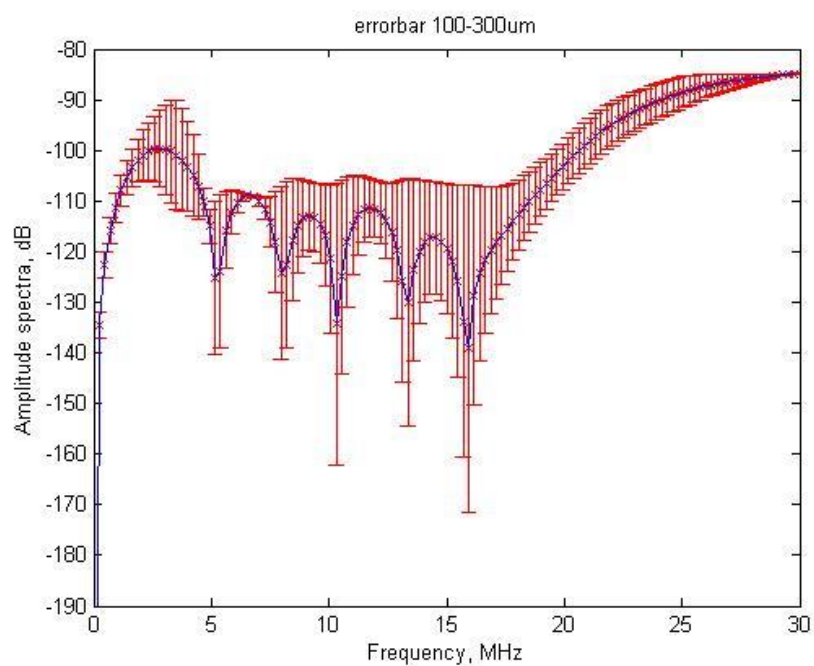
Pav. 3. Spektras dalelių, kurių dydžiai tolydiškai išsibarstę, 20-80 μm diapazone. Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinę nuokrypį tarp spektrų.



Pav. 4. Spektras dalelių, kurių dydžiai tolydiškai išsibarstę, 40-120 μm diapazone. Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinę nuokrypį tarp spektrų.

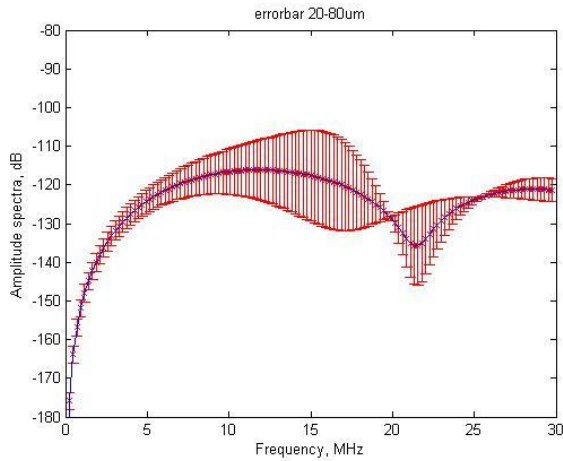


Pav. 5. Spektras dalelių, kurių dydžiai tolydiškai išsibarstę, 50-150 μm diapazone. Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinę nuokrypį tarp spektrų.

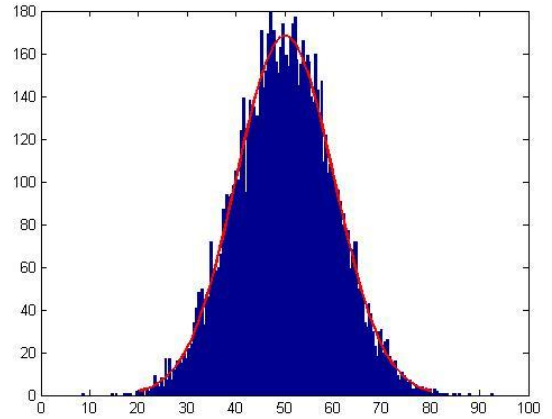


Pav. 6. Spektras dalelių, kurių dydžiai tolydiškai išsibarstę, 100-300 μm diapazone. Vidutinis spektras gautas skaičiuojant spektrų aritmetinį vidurkį, neapibrėžties - skaičiuojant standartinę nuokrypį tarp spektrų.

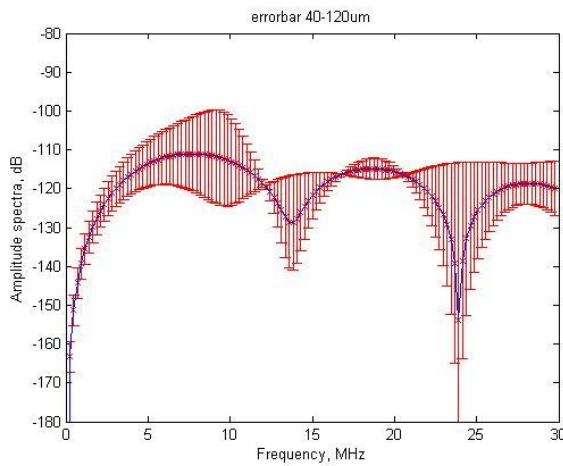
5.2 Rezultatai: skaičiuojant spektrus dalelių diametrų Gauso skirstiniui



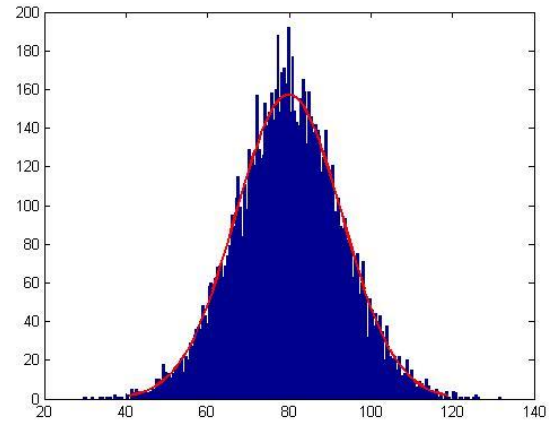
Pav1 Dalelių spektras 20-80 μm



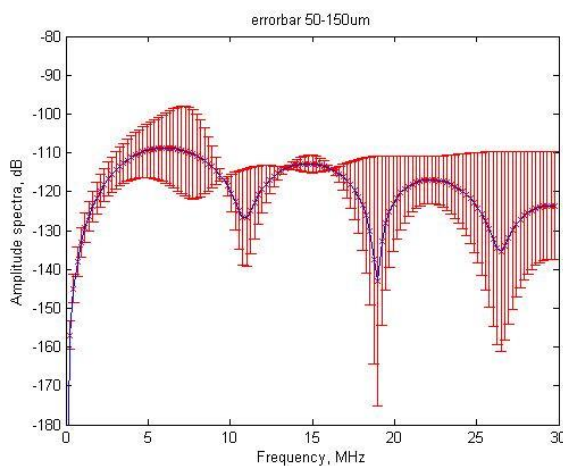
Pav2 Dalelių 20-80 μm pasiskirstymo histograma



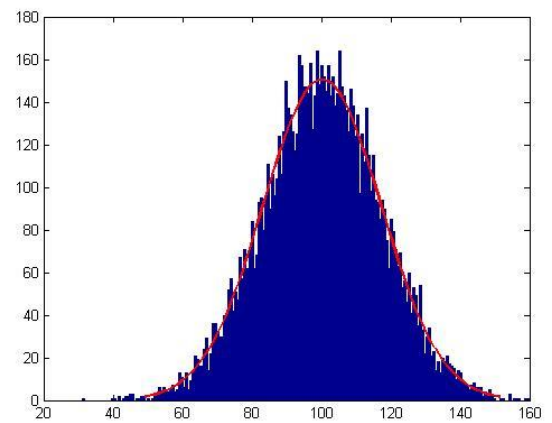
Pav3 Dalelių spektras 40-120 μm



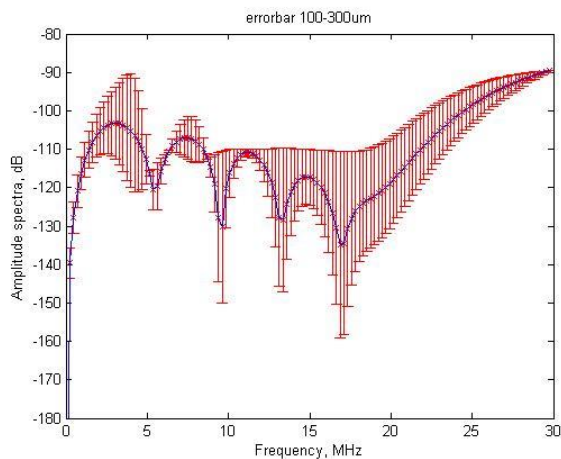
Pav4 Dalelių 40-120 μm pasiskirstymo histograma



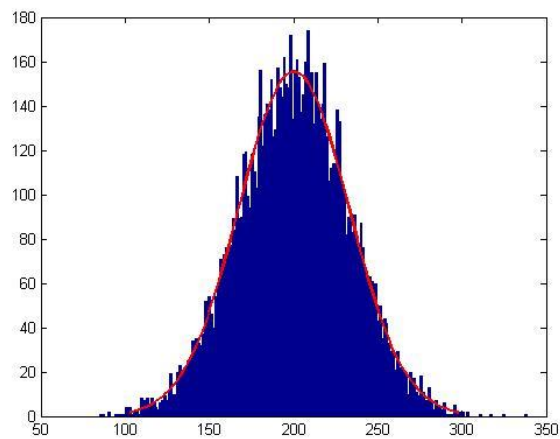
Pav5 Dalelių spektras 50-150 μm



Pav6 Dalelių 50-150 μm pasiskirstymo histograma



Pav7 Dalelių spektras 100-300 μm

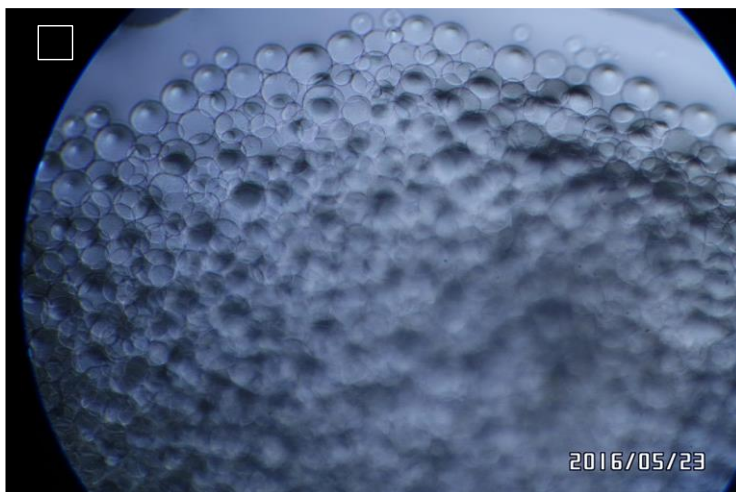


Pav8 Dalelių 100-300 μm pasiskirstymo histograma

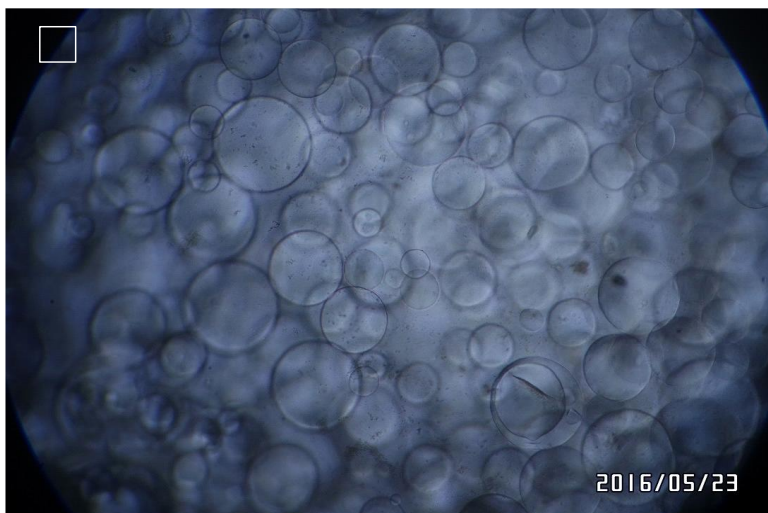
5.3 Sephadex dalelių vaizdas per mikroskopą



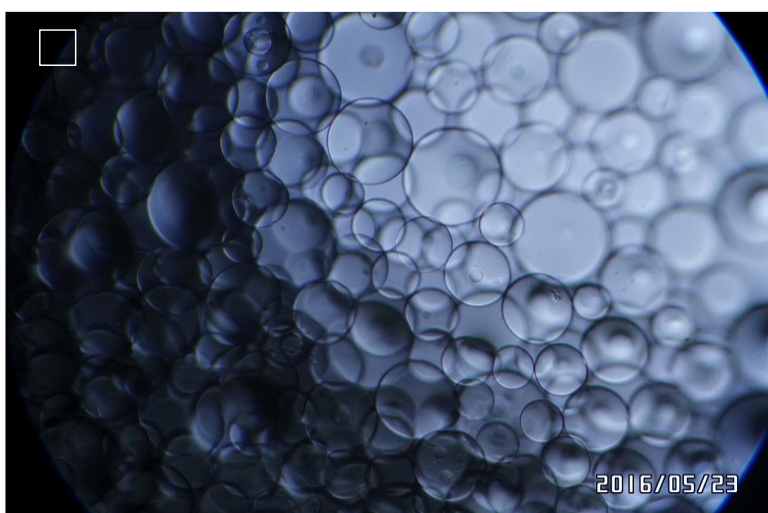
Pav. 38 35 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Įterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .



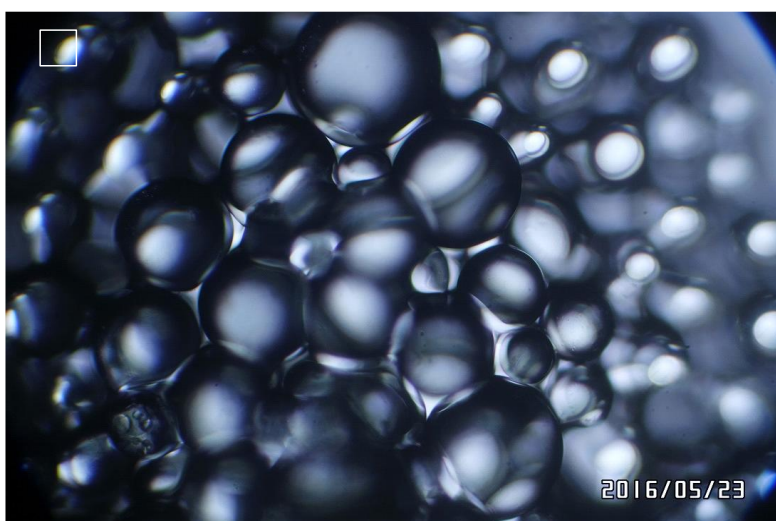
Pav. 39 50 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Įterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .



Pav. 40 80 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Įterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .

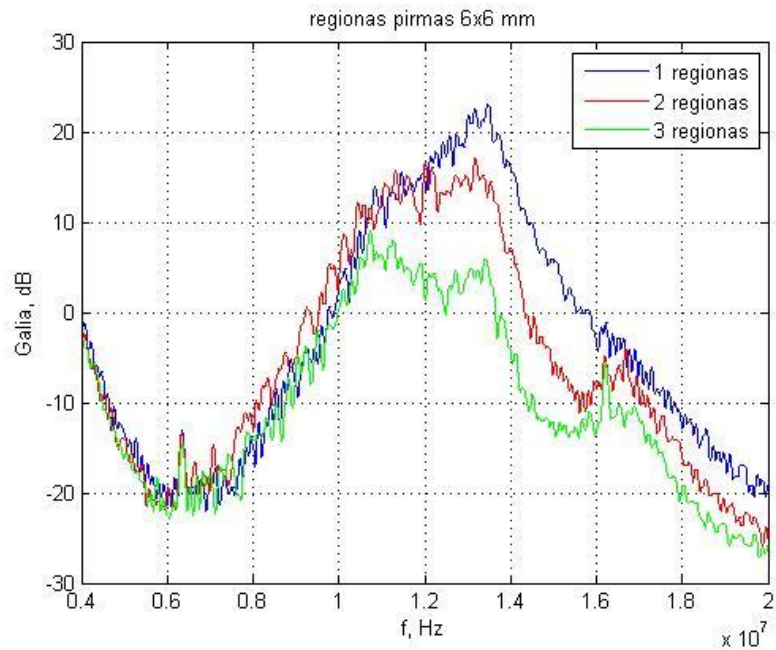


Pav. 41 100 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Įterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .

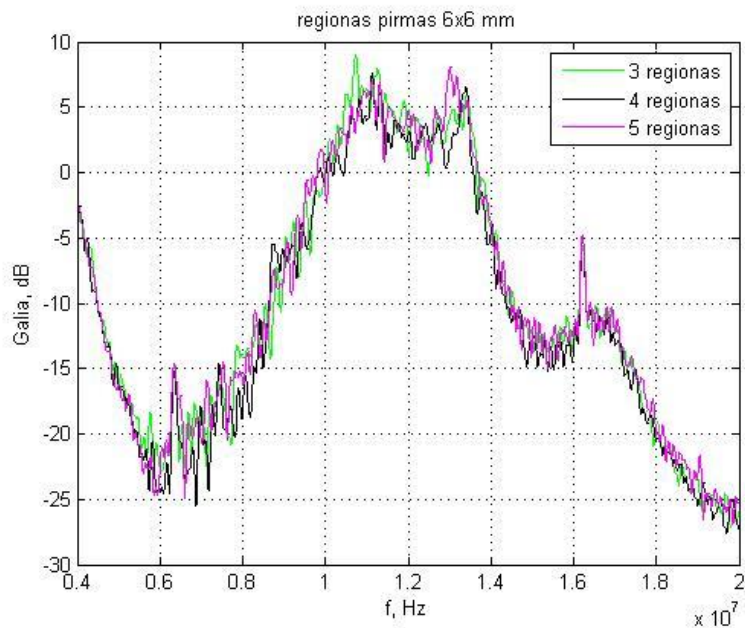


Pav. 42 200 μm žiūrint per mikroskopą padidinus X40 Įterpto kvadrato matmenys yra 100 x 100 μm .

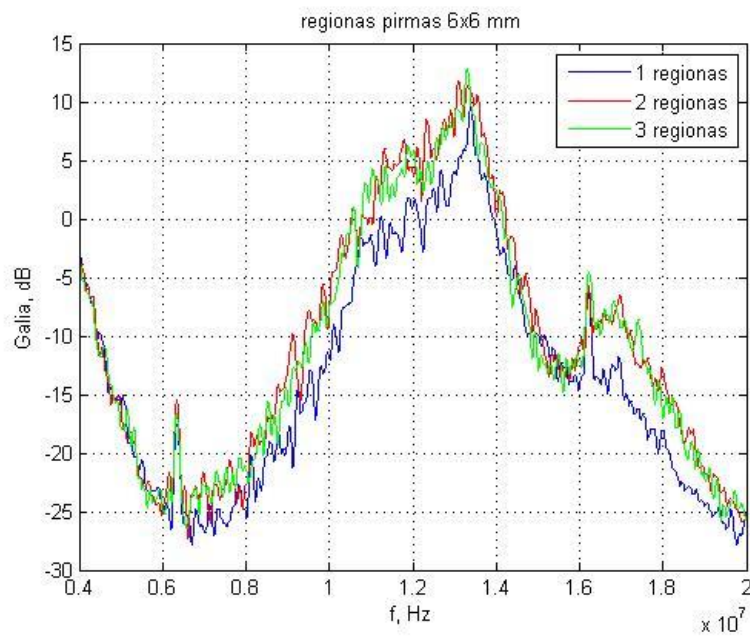
5.4 Spektrinė analizė penkiuose regionuose visiems vaizdams



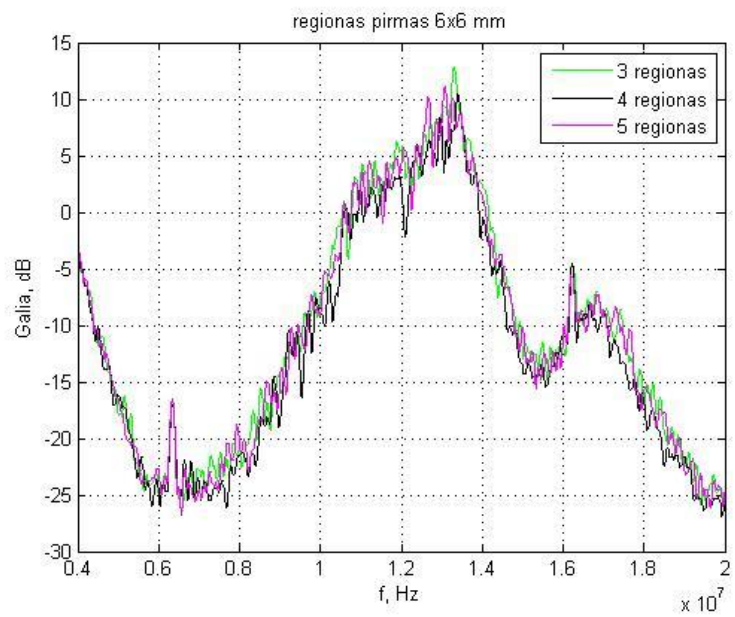
Pav. 43 76dB 50 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



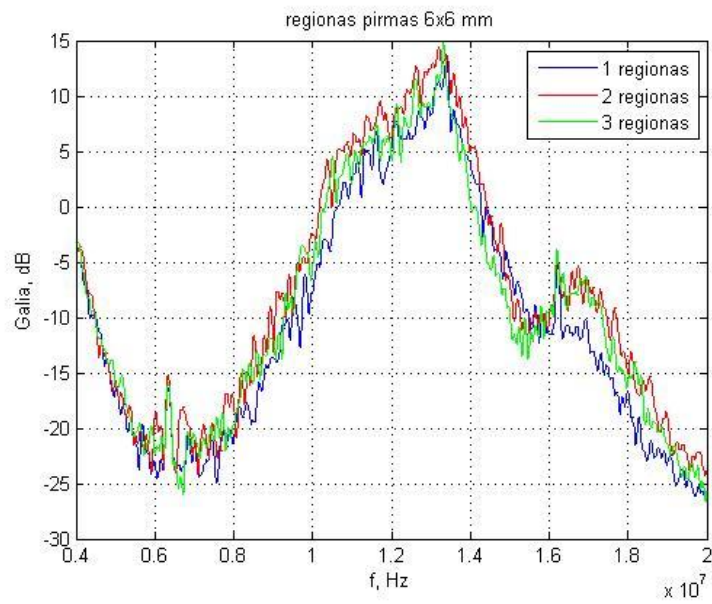
Pav. 44 76dB 50 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



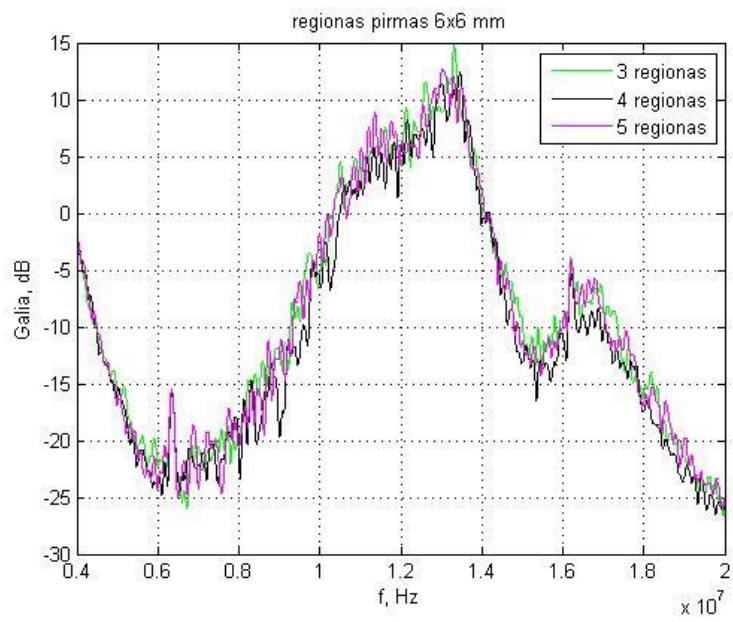
Pav. 45 76dB 80 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



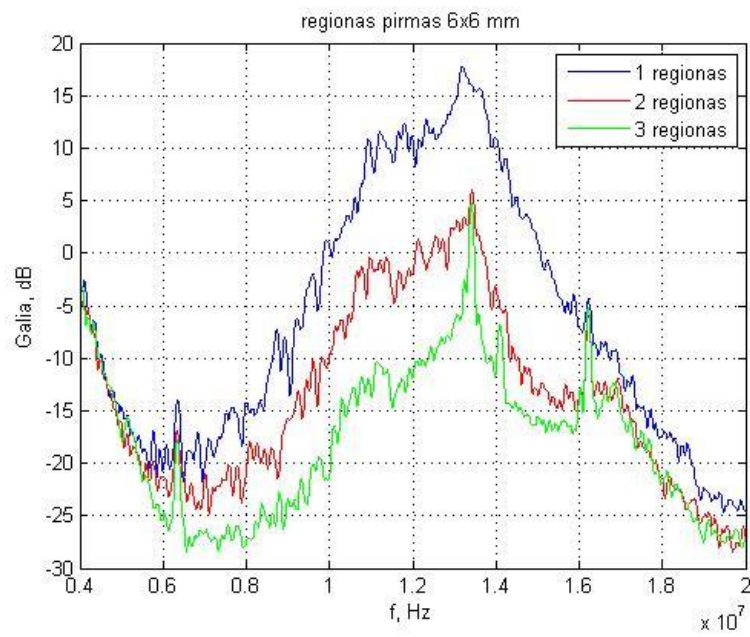
Pav. 46 76dB 80 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



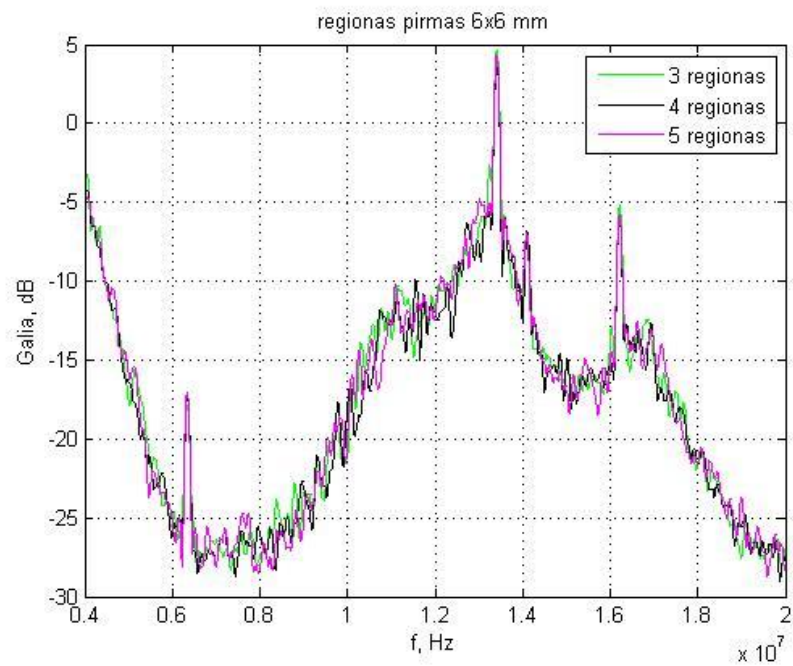
Pav. 47 76dB 100 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



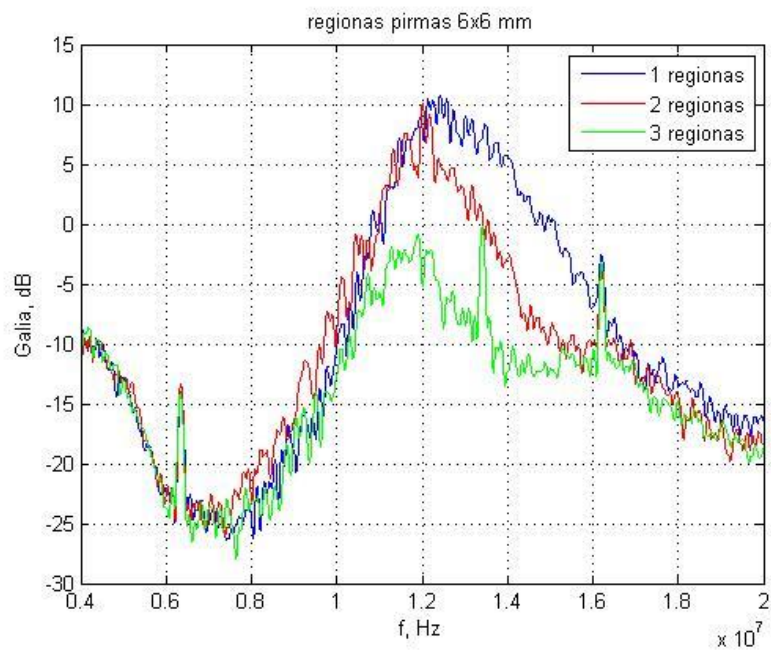
Pav. 48 76dB 100 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



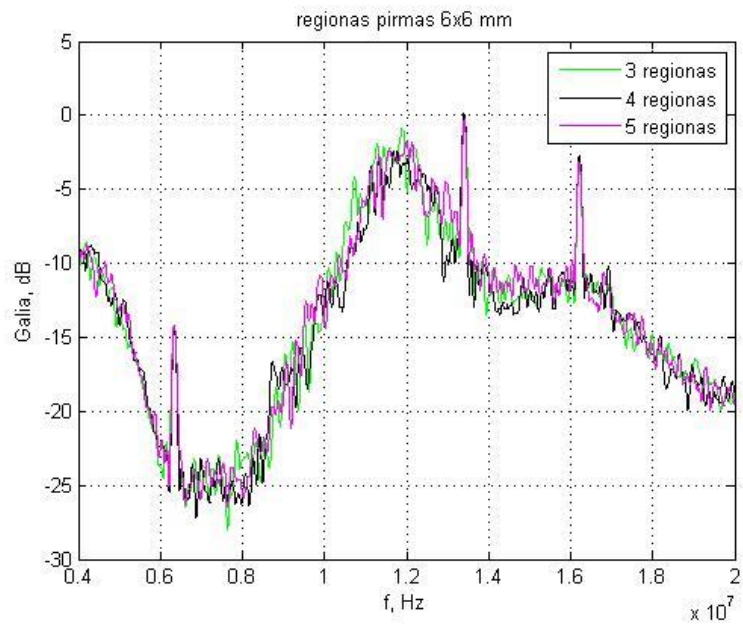
Pav. 49 76dB 200 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



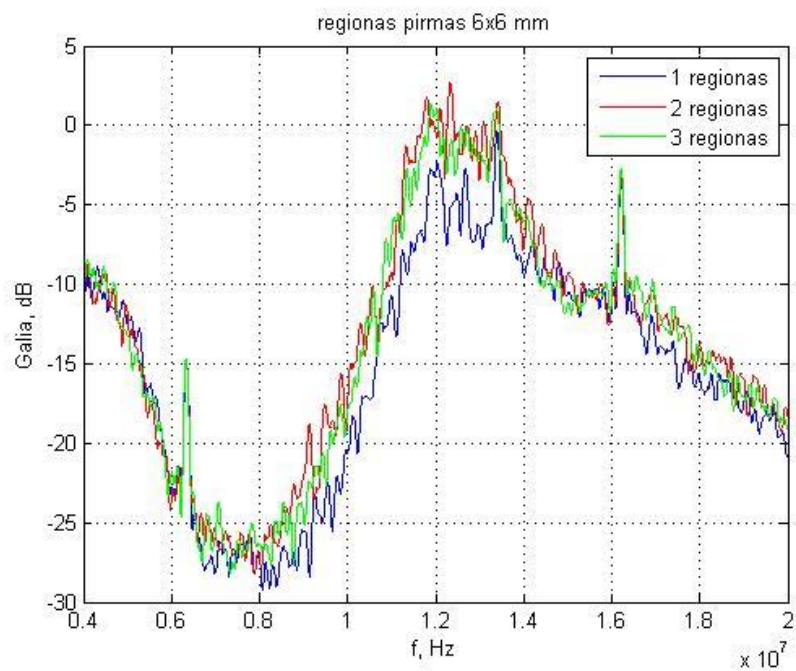
Pav. 50 76dB 200 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



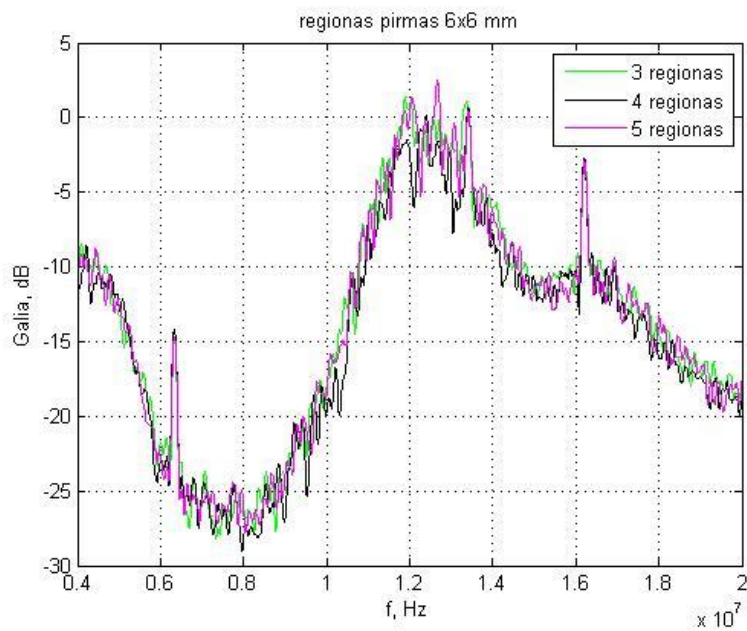
Pav. 51 70dB 50 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



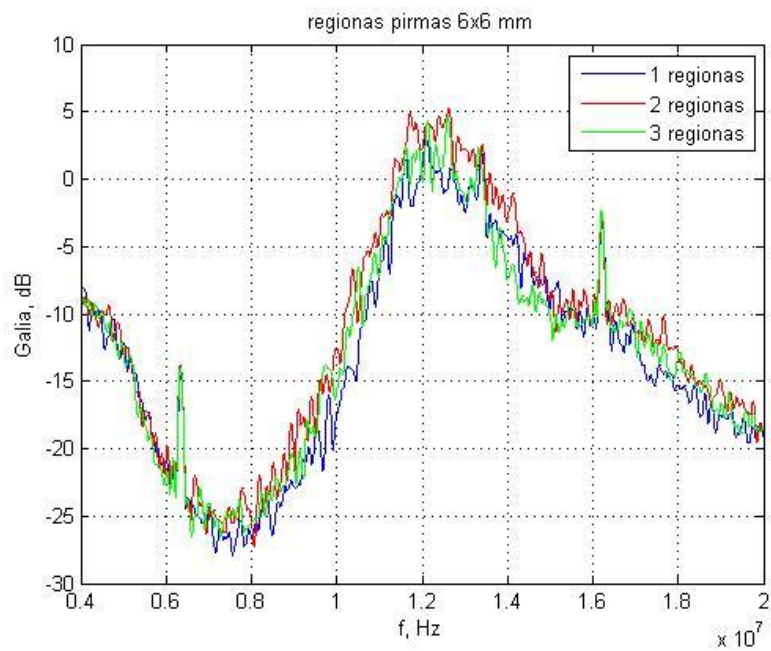
Pav. 52 70dB 50 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



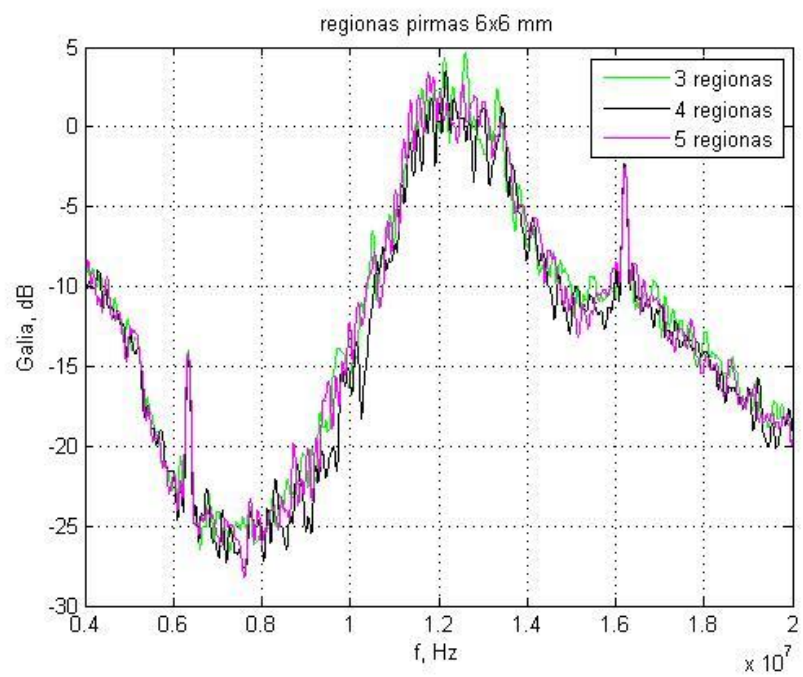
Pav. 53 70dB 80 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



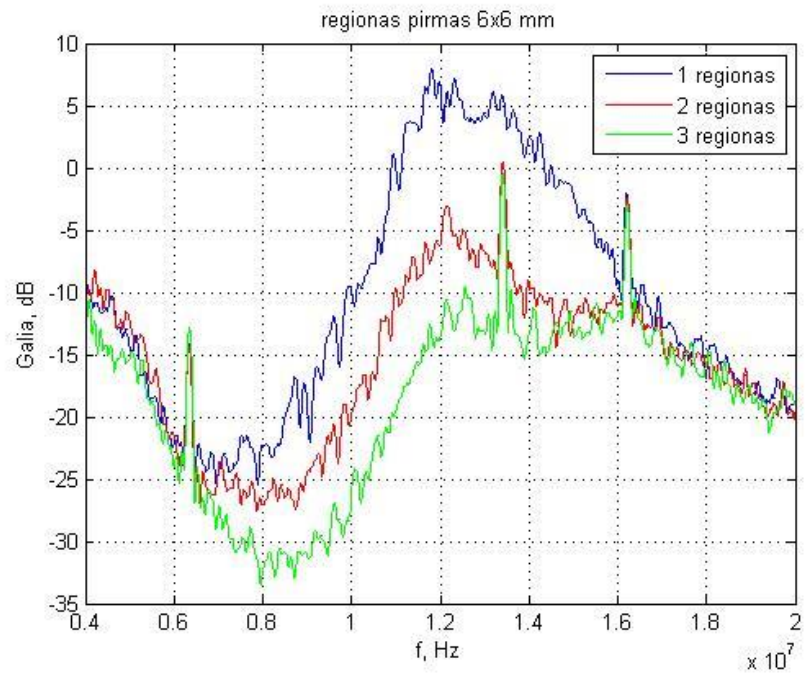
Pav. 54 70dB 80 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5



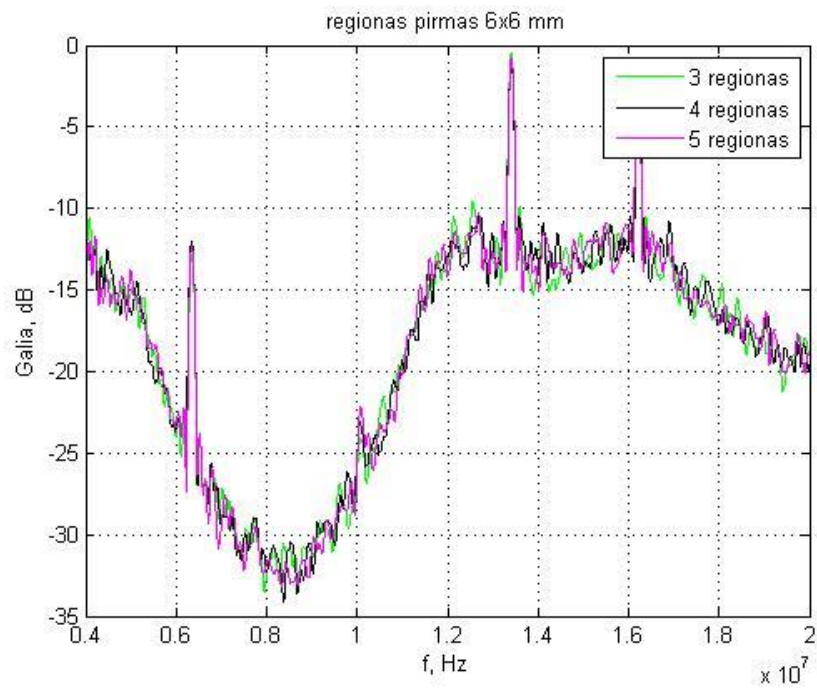
Pav. 55 70dB 100 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3



Pav. 56 70dB 100 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5

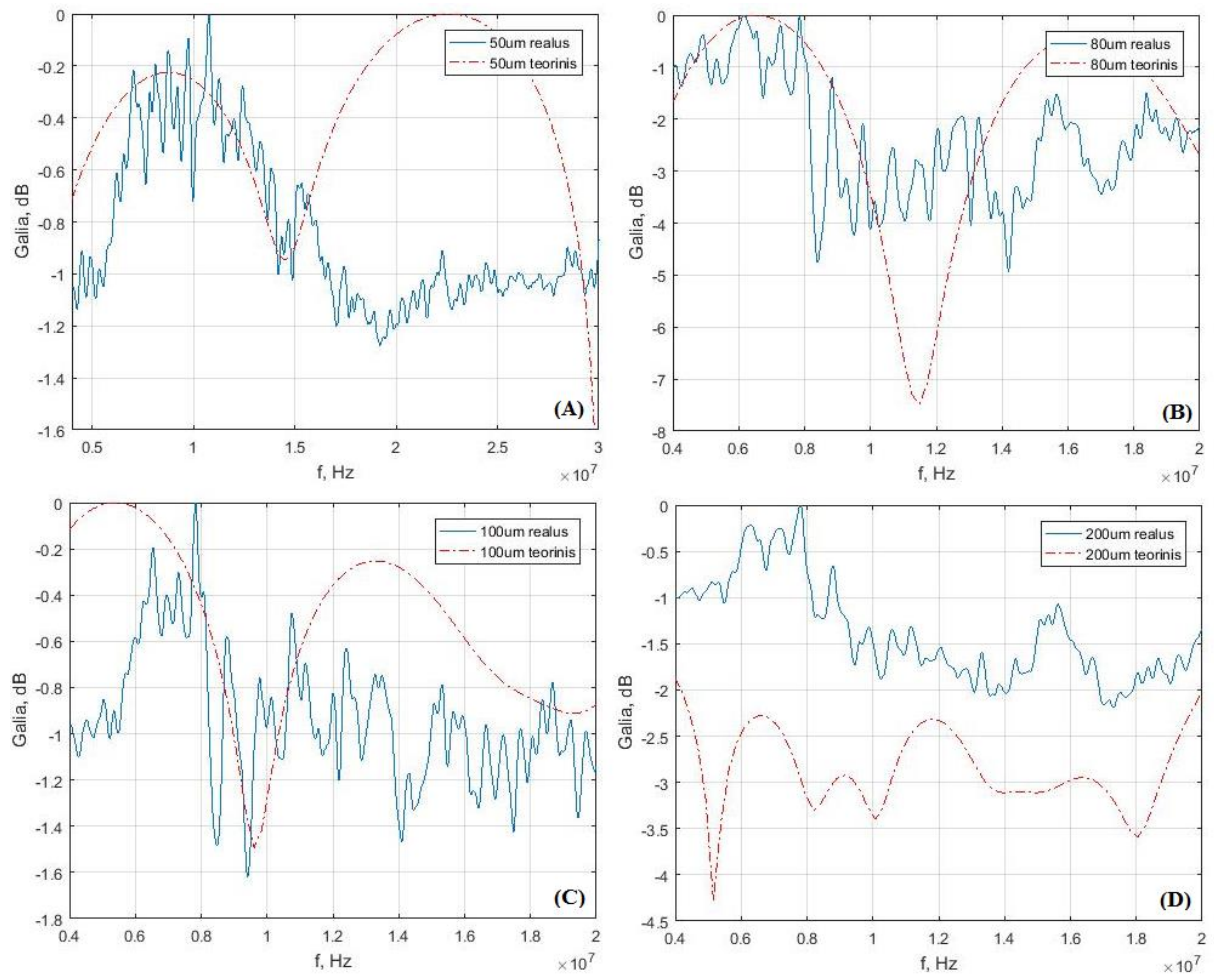


Pav. 57 70dB 200 μ m dydžio dalelės regionam S1 S2 ir S3

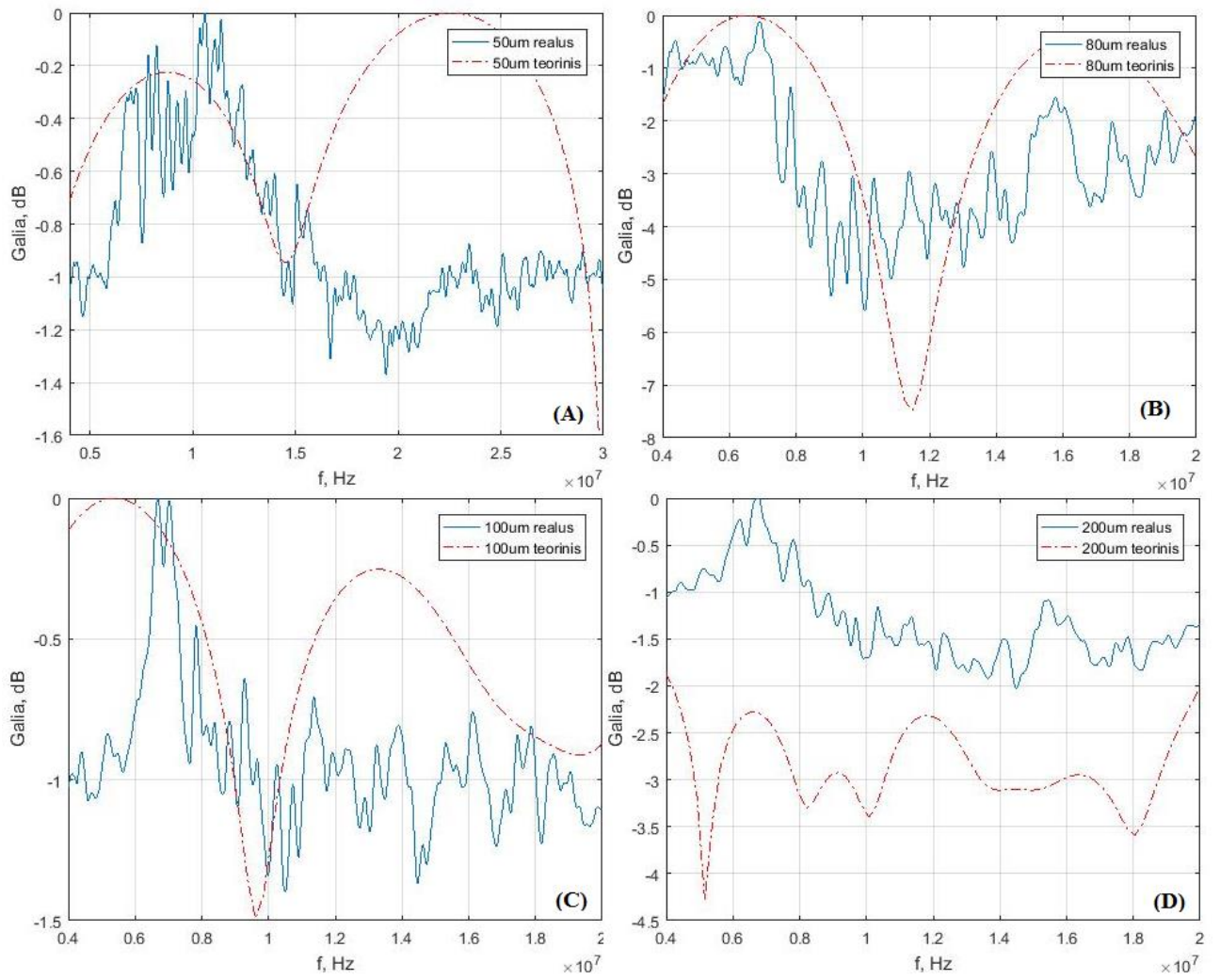


Pav. 58 70dB 200 μ m dydžio dalelės regionam S3 S4 ir S5

5.5 Rezultatų palyginimas su teoriniu modeliavimu pusė vaizdo



Pav. 59 spektrai iš B-scan vaizdo eilučių nuo 1 iki 125



Pav. 60 spektrai iš B-scan vaizdo eilučių nuo 125 iki 250