

Akustinių laukų vizualizavimo metodai

S. Sajauskas

Prof. K.Baršausko ultragarso mokslo centras, KTU

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

Ivadas

Ultragarso vizualinio stebėjimo metodas, pagrįstas akustooptine dviejų skirtingos prigimties bangų – akustinių ir elektromagnetinių – sąveika, naudojamas nuo A.Teplerio laikų, tačiau dėl labai didelio informatyvumo ir vaizdumo jis neprarado reikšmės iki šių dienų. Ypač didelės perspektyvos akustooptikoje atsivėrė atradus sužadintą šviesos spinduliavimą ir sukūrus nepaprastai koherentiškus poliarizuotos šviesos šaltinius – lazerius. Dinaminiam ultragarso sklidimo reiškiniams tirti sėkmingai buvo naudojami kietojo kūno impulsiniai, pavyzdžiui, rubino, lazeriai, generuojantys nanosekundžių trukmės didelio energetinio tankio šviesos impulsus. Nauja era prasidėjo D. Gaborui atradus holografijos principą [1] ir išstobulinius holografavimo techniką, leidžiančią gauti geros kokybės erdvinis objektų atvaizdus, turinčius realių objektų savybių [2,3]. Holografijos principų pritaikymas registruoti elektromagnetinių bangų amplitudės bei fazės pokyčiams, atsiradusiems dėl atspindinčio objekto formos ypatumų, sklidimo terpės optinio lūžio rodiklio ar objekto atspindžio koeficiento pokyčių, sukeliama temperatūros, tankio bei kitų poveikių, atvėrė kelią taikyti holografiją akustiniams laukams tirti.

Vizualizavimo procesas, nusakomas vaizdų registravimu, apdorojimu, analize, yra susijęs su didelės apimties informacijos srautais. Vaizdams registruoti ilgą laiką pakako fotografinių, vėliau televizinių metodų, o jų apdorojimas, ypač dinaminis, kelia didelių problemų, kurias įveikti galima tik tobulinant diskretinius kompiuterinius tyrimo metodus. Greitų procesorių ir specialių vaizdų apdorojimo programų dėka šiandien galima stebėti erdvinį akustinių laukų dinamiką plačiame dažnių diapazone – nuo žemiausių (garso) iki gigahercinių (akustinė mikroskopija).

Akustinių bangų vizualizavimo metodai, jų klasifikavimas

Dažniausiai susiduriama su ultragarso vizualizavimu. Bendriausiu atveju sąvoka “ultragarso vizualizavimas” yra dviprasmiška. Ji gali būti taikoma paslėptų, vizualiai nematomų objektų (daiktų, ertmių, vidaus organų) atvaizdams sukurti, vizualiai informacijai apie juos gauti, apdoroti ir registruoti, naudojant akustines bangas. Šiam tikslui naudojami ultragarso lokacijos, difrakcijos, holografijos ir kiti metodai. Didžiausias laimėjimas šioje srityje yra vidinių struktūrų vizualizavimas impulsiniais ultragarso signalais, plačiai taikomas neardančiajai gaminių kontrolei (defektoskopijai). Kaip vienas iš ultragarsinės neardančiosios kontrolės atvejų paminėtina medicininė ultragarsinė diagnostika, kur kompiuterinių

signalų apdorojimo metodų ir palyginti mažo ultragarso greičio minkštuose biologiniuose audiniuose (apie 1500 m/s) dėka, gaunami didelės erdvinės skyros biologinių darinių, vidaus organų vaizdai (1 pav.).

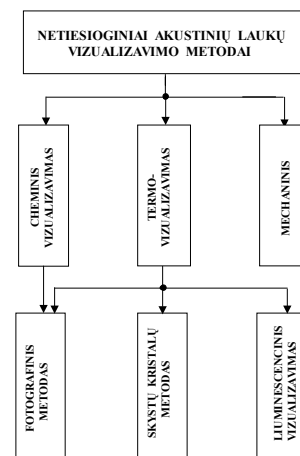


1 pav. 17 savaičių vaisiaus vaizdas, gautas skleidžiant 3,5 MHz ultragarso impulsais. Aiškiai matomos kojos, galva, stuburo slanksteliai

Kita termino “ultragarso vizualizavimas” prasmė – tai ultragarso laukų, generuojamų skaidriose terpėse arba kūnų paviršiuje, vizualiai matomų atvaizdų gavimas. Šiems atvaizdams gauti dažniausiai naudojami optiniai signalai, tačiau akustiniai signalai šviesos signalais (vaizdais) gali būti verčiami arba netiesiogiai, panaudojant ultragarso savybes, pavyzdžiui, savybę keisti cheminių reakcijų greitį, veikti termiškai, arba tiesiogiai - ultragarsui sąveikaujant su šviesa.

Netiesioginiai ultragarso vizualizavimo metodai

2 pav. pateiktas akustinių laukų vizualizavimo netiesioginių metodų klasifikavimas.



2 pav. Netiesioginiai akustinių laukų vizualizavimo metodai

Chemini vizualizavimo metodas pagrįstas kai kurių specifinių cheminių reakcijų aktyvumo padidėjimu dėl ultragarso poveikio. W. T. Richardas ir A.L. Loomis pirmieji aprašė laisvo kalio išsiskyrimą iš KJ tirpalo, veikiant ultragarso [4]. Ultragarso vizualizuojamas krakmolo sluoksniu, kuris patamsėja reaguodamas su išsiskyrusiu jodu. Ši cheminė reakcija vyksta tik veikiant intensyviai ultragarso (esant kavitacijai), tačiau, pridėjus į KJ tirpalą CCl_4 , efektas pasireiškia ir veikiant mažesnio intensyvumo ultragarso [5]. Vizualizavimo jautris padidėja dėl to, kad net veikiant silpnam ultragarso iš CCl_4 tirpalo išsiskiria chloras, kuris, būdamas chemiškai aktyvesnis už jodą, pavaduoja jį ir sudaro junginį KCl [6]. Dėl trūkumų – priklausomybės nuo temperatūros, KJ koncentracijos ir poveikio laiko - cheminis vizualizavimo metodas naudojamas retai.

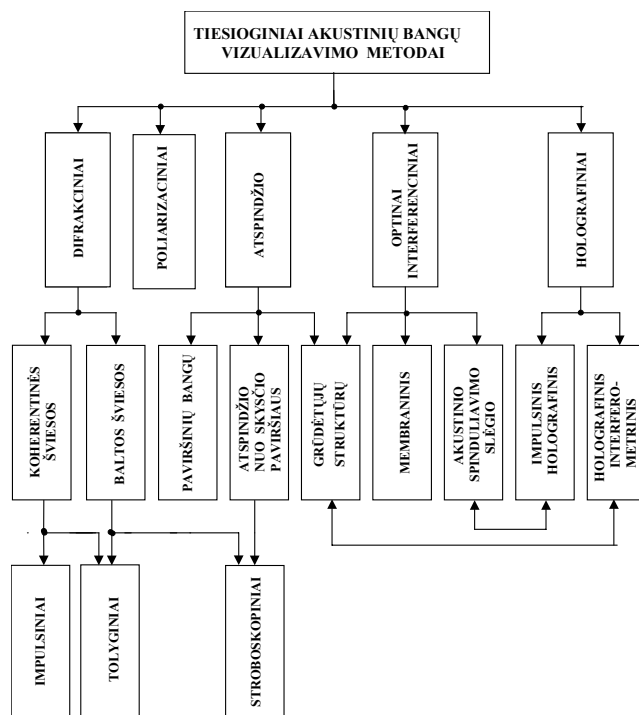
Terminis vizualizavimas pagrįstas ultragarso šiluminio poveikio registravimu, pavyzdžiui, skystaisiais kristalais, keičiančiais spalvą nuo temperatūros. Padengus skystu kristalu spinduliuojantį pjezoeitklio paviršių, šiuo būdu galima vizualiai stebėti akustinio lauko konfiguraciją jo apertūroje. Ultragarso poveikio termoeftas, taigi ir ultragarso laukas, gali būti registruojamas apšviestu fotoemulsiu sluoksniu, panardintu į koncentruotą ryškumą, kuriame šis ultragarso veikia. Tačiau šiuo atveju, be termoefto, kartu veikia ir cheminis efektas [7,8].

Ultragarso temperatūrinio poveikio aiškinamas taip pat ir kai kurių organinių fosforinių medžiagų švytėjimo susilpnėjimas, veikiant ultragarso [9,10]. Ultragarso vizualizuoti ypač tinka tetrajodomerkuratas (Ag_2HgJ_4), keičiantis spalvą nuo šviesiai geltonos iki tamsiai raudonos, kintant jo temperatūrai 39.5° aplinkoje. Ribotas temperatūrinis diapazonas, kuriame pasireiškia šis efektas, yra akivaizdus šio metodo trūkumas, apsunkinantis jį naudoti, mažinantis jo galimybes.

Vizualizuojant mechaniniu metodu, kurį pirmasis aprašė R. Pohlmanas [11], akustiniame lauke išdėstomi plokšti šviesos reflektoriai, pavyzdžiui, maži ($20 \times 20 \times 1,5 \mu m$) aliuminio folijos žvyneliai. Veikiami ultragarso spinduliavimo slėgio, jie išsidėsto išilgai ultragarso bangų sklaidimo krypties. Kadangi jų orientavimo kampas priklauso nuo ultragarso intensyvumo (spinduliavimo slėgio), tai, stebint tam tikra kryptimi veidrodžiškai nuo žvynelių atsispindėjusią šviesą, matomas ultragarso lauko pasiskirstymas. Beje, patekus į ultragarso lauką objektui, sugeriančiam ar atspindinčiam ultragarso, atitinkamai pasikeičia žvynelių orientacija ir matomas objekto atvaizdas. Deja, tas atvaizdas yra neryškus, ir nedidelės skyros. Ji priklauso nuo šviesos deflektorių diskretiškumo ir matmenų. Be to, metodas yra inertiškas. Todėl šis vizualizavimo metodas naudojamas retai.

Tiesioginiai akustinių laukų vizualizavimo metodai

Akustinės bangos ir laukai gali būti vizualizuoti tiesiogiai, panaudojant jų sąveiką su šviesos bangomis. Sukurta nemažai tiesioginio vizualizavimo metodų (3 pav.), kurie yra pranašesni už netiesioginius ne tik didesne gaunamų vaizdų skyra, kontrastu ir ryškiumi, bet ir tuo, kad šiais metodais galima kiekybiškai išmatuoti jų parametrus, dažnai absoliučiais vienetais.



3 pav. Akustinių bangų tiesioginio vizualizavimo metodų klasifikavimas

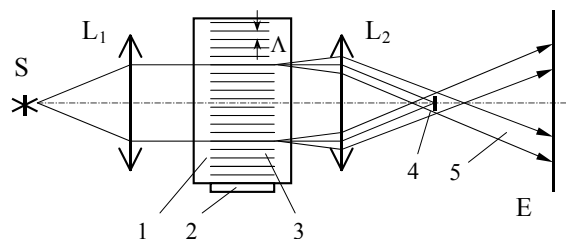
Difrakciniai vizualizavimo metodai

Paprastai ir įgyvendinamas ir todėl dažnai naudojamas yra difrakcinis metodas, pagal akustooptinės sąveikos mechanizmą kartais vadinamas pranariniu metodu. Čia panaudojama šviesos sklaidimo krypties skaidrioje terpėje nuokrypio kampo priklausomybė nuo jo lūžio rodiklio (Debajaus ir Syroso efektas). Vizualizuojant šiuo metodu, šviesos banga yra nukreipiama statmenai akustinės bangos sklaidimo krypties, ir dėl difrakcijos joje pakinta jų sklaidimo kryptis. Akustinė banga veikia kaip difrakcinė gardelė, kurios pastovioji lygi akustinės bangos ilgiui. Paprastai gaunama Ramano ir Nato difrakcija, kai difraguota šviesa nukrypsta kampais α_n , aprašomais formule

$$\sin \alpha_n = \pm n \lambda / 2A, \quad (1)$$

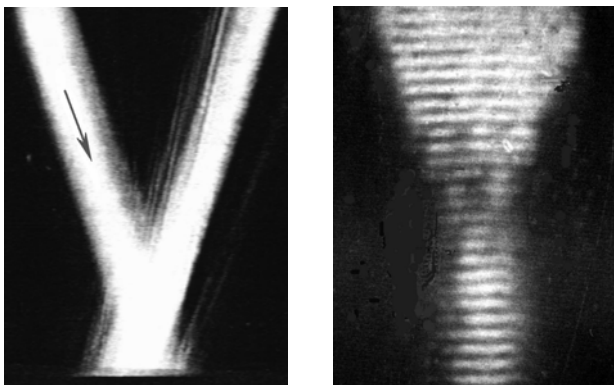
čia $n = 1, 2, 3, \dots$; λ - šviesos bangos ilgis; A - akustinės bangos ilgis.

4 pav. pavaizduota paprasčiausia ultragarso bangų vizualizavimo difrakciniu metodu schema.

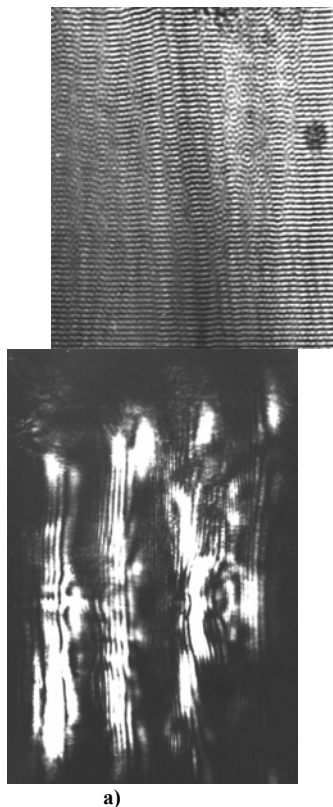


4 pav. Ultragarso bangų vizualizavimo difrakciniu metodu schema: 1 – stiklinė kiuvetė; 2 – ultragarso spinduliuoties šaltinis; 3 – ultragarso banga; 4 – šviesos užtvara; 5 – difraguota šviesa; S – šviesos šaltinis; L_1 , L_2 – glaudžiamieji lęšiai; E – ekranas

Ultragarso bangos 3, sukuriamos pjezoelektrinio spinduolio 2 šviesai skaidrijoje skysčio kiuvetėje 1, veikia per ją pereinančią šviesą kaip difrakcinę gardelę, kurios pastovioji lygi šviesos bangos ilgiui λ . Šviesa, „pranėrusi“ akustinę bangą, glaudžiamuoju lęšiu L_2 sufokusuojama židinio plokštumoje, kurioje esanti užtvara 4 sulaiko nedifraguotą šviesą. Difraguota šviesa 5 patenka į ekraną E, kuriame matomas ultragarso bangos atvaizdas. Jei ultragarso banga yra bėganti, matomas ištisinis šviesus ultragarso konfigūracijos ruožas (5 pav., a).



5 pav. Difrakciniu metodu gauti ultragarso bangų atvaizdai; a) – bėgančiųjų ultragarso bangų atspindys nuo periodinės struktūros [12]; b) konfokalinio keitiklio fokusuotų stovinčiųjų ultragarso bangų laukas ($f=0,3$ MHz) [13]



6 pav. Ultragarso laukų impulsinis vizualizavimas: a) 30 MHz dažnio bėgančiosios bangos atspindys nuo skysčio kreivinio paviršiaus, užregistruotas antrinės interferencijos metodu (S. S.); b) 30 mm skersmens, 14 mm storio mechanškai nedempferuoto pjezokeraminio disko, sužadinto 1 μ s trukmės elektriniu impulsu, išspinduliuotas impulsinis akustinis laukas [13]

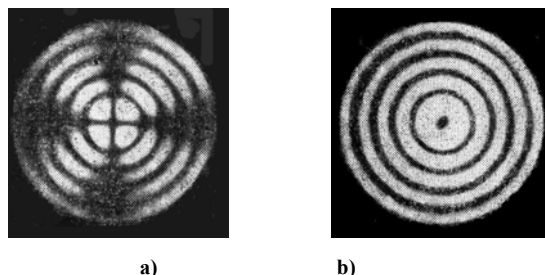
Esant stovinčiai ultragarso bangai, ekrane E registruojami šviesūs lygiagretūs ruožai (5 pav., b), nutolę vienas nuo kito atstumu $d=k\lambda$, čia k – proporcingumo koeficientas.

4 pav. pavaizduotoje schemoje pašalinus šviesos užtvartą 4, gaunama difrakcinio vizualizavimo metodo atmainos – antrinės interferencijos metodo schema. Šiuo atveju ekrane E matomas difraguotos ir nedifraguotos šviesos srautų interferencinis vaizdas (6 pav., a).

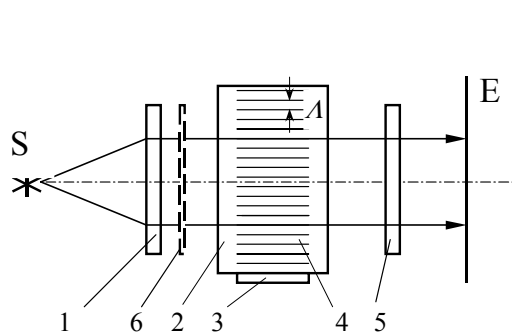
Kai difrakcinei vizualizavimui naudojamas baltos šviesos šaltinis, dėl šviesos dispersijos gaunamo ultragarso bangų vaizdo kontūrai būna apvesti skirtingos spalvos izochromomis. Fotografuojant monochromatinėje šviesoje, vaizdas būna kontrastingesnis. Bėgančiųjų bangų režimu ultragarso lauko dinaminę struktūrą galima užfiksuoti apšviečiant jį arba trumpais šviesos impulsais (impulsinio lazerio), arba naudojant stroboskopinį apšvietimą, sinchronizuotą su ultragarso banga. 5 pav., b, pavaizduoti pjezokeitiklio išspinduliuoti ultragarso impulsai, užregistruoti impulsiniu lazeriu. Ekspozicijos trukmė lygi lazerio impulso trukmei ($\tau_i = 30$ ns).

Poliarizaciniai vizualizavimo metodai

Vizualizuojant ultragarą polarizaciniu metodu, panaudojamas šviesos dvigubo lūžio efektas kietuose kūnuose, pasireiškiantis veikiant mechaniniams įtempimams. Dėl šio efekto gaunami skirtingi šviesos, sklindančios statmenai slėgio kryptčiai ir lygiagrečiai su ja, lūžio rodikliai [15]. Todėl tiesiškai polarizuotai šviesai difraguojant ultragarso bangose, kinta jos polarizacijos vektoriaus kryptis ir, kai analizatorius 1 (7 pav.) orientuotas statmenai polarizatoriui 5, difraguota šviesa pereina per analizatorių 5 ir sukuria ekrane E ultragarso sukeltų mechaninių įtempimų vaizdą.



8 pav. Stiklinio cilindro, virpančio penktąja radialine harmonika, virpesių pasiskirstymas: a) tiesiškai polarizuotoje šviesoje; b) apskritimiškai polarizuotoje šviesoje



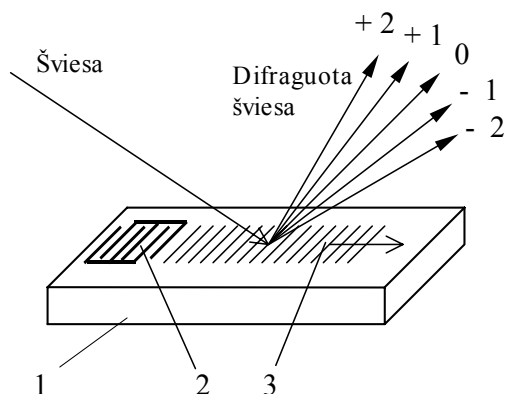
7 pav. Ultragarso bangų vizualizavimo kietuose kūnuose schema: 1 – šviesos poliarizatorius; 2 – skaidrus optiškai aktyvus kietasis kūnas; 3 – pjezokeitklis; 4 – ultragarso banga; 5 – šviesos analizatorius; 6 - $\lambda/4$ storio žėručio plokštė; S – šviesos šaltinis; E – ekranas

8 pav. pateiktas cilindro, pagaminto iš optiškai aktyvaus stiklo, sužadinto radialinio rezonanso 5-tąja harmonika ($f=1,115$ MHz, virpesių pasiskirstymas [15]. Vizualizavimui naudojant tiesiškai poliarizuotą šviesą (8 pav.,a) matomas tamsus “kryžius” ir dėl to prarandama informacija. Įdėjus tarp poliarizatoriaus 1 ir analizatoriaus 5 $\lambda/4$ plokštelę (7 pav.), gaunama apskritiminė šviesos poliarizacija. Virpesių laukas šiuo atveju pavaizduotas 8 pav.,b. Šis metodas gali būti panaudotas ultragarsui vizualizuoti tik optiškai aktyviose medžiagose (kai kuriuose stikluose, plastmasėse).

Šviesos atspindžio vizualizavimo metodai

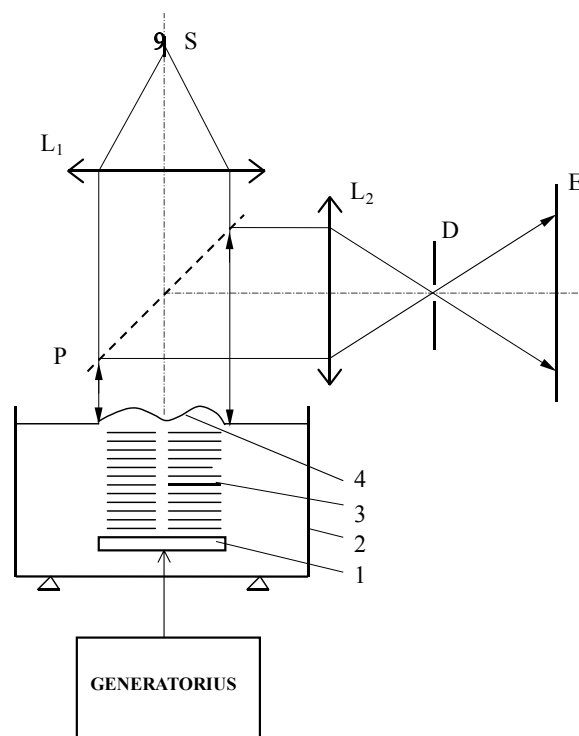
Vizualizuojant paviršines arba lankstymo akustines bangas, dažniausiai moduluojama nuo virpančio paviršiaus atsispindėjusios šviesos amplitudė, dažnis ar fazė.

SAD paviršinėms akustinėms bangoms (PAB) vizualizuoti naudojama tiesioginė šviesos, pavyzdžiui, lazerio spindulio, difrakcija, jai sąveikaujant su banga. Dėl Doplerio efekto nuo judančio paviršiaus atsispindėjusi šviesa moduluojama dažniu (9 pav.) [16].



9 pav. Nuo PAB atspindėtos šviesos difrakcija: 1 – pjezoelektrikas; 2 – PAB keitiklis; 3 – PAB

Difraguotos šviesos srauto informacija apie PAB gali būti paversta vizualia naudojant tokią pat techniką kaip ir



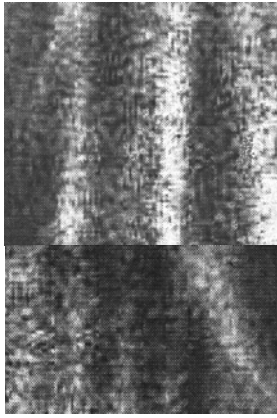
10 pav. Ultragarso lauko vizualizavimas atspindžio nuo skysčio paviršiaus metodu: 1 – ultragarso spindulis; 2 – rezervuaras su skysčiu; 3 – ultragarso bangos; 4 – skysčio paviršiaus reljefas; S – šviesos šaltinis; L₁, L₂ – glaudžiamieji lęšiai; P – puskskaidris veidrodis; D – diafragma; E – ekranas

vizualizuojant pranariniu metodu. Žemųjų dažnių diapazone, kai paviršinės bangos ilgis $\lambda \gg \lambda$, atspindėtos šviesos sklindimo kampas moduluojamas pagal paviršinės bangos dėsni, ir gali būti transformuotas į amplitudės moduliaciją, iš dalies užteriant jai kelią sklįsti diafragma.

Skystyje sklindančioms tūrinėms ultragarso bangoms vizualizuoti dažnai naudojama skysčio paviršiaus deformacija, gaunama veikiant šį paviršių akustiniam spinduliavimo slėgiui (10 pav.). Šį paprastą metodą K. Šusteris pasiūlė tolydiniam akustiniam laukams vizualizuoti, apšviečiant jį balta šviesa [17]. Vėliau jis buvo išplėtotas, pritaikant impulsiniams laukams tirti ir matuoti, paviršių apšviečiant koherentine šviesa [18-21].

Kadangi šviesos atspindžio nuo skysčio (vandens) koeficientas nedidelis (0,04), ryškiam paviršiaus vaizdai gauti reikalingas stiprus apšvietimas. Gerokai silpnesnėje šviesoje galima stebėti akustinio lauko deformuotą paviršių, peršviečiant jį iš skysčio pusės, tačiau šiuo atveju šviesos difrakcijos kampas yra šešis kartus mažesnis. Metodo jautris priklauso nuo skysčio paviršiaus įtempimo koeficiento ir gali būti padidintas mažinant paviršiaus įtempimo koeficientą.

Skysčio paviršiaus deformacija, veikiant akustiniam radiaciniam slėgiui, yra integralinis efektas. Aukšto dažnio ultragarsiniams virpesiams vizualizuoti, panašiai kaip ir bėgančiųjų bangų atveju, skysčio paviršiaus apšvietimą reikia sinchronizuoti su ultragarso bangos dažniu (stroboskopinis metodas). Siūlomu stroboskopiniu metodu vizualizuotos krįtančioje skysčio plėvelėje sklindančios lankstymo bangos parodytos 11 pav.



1

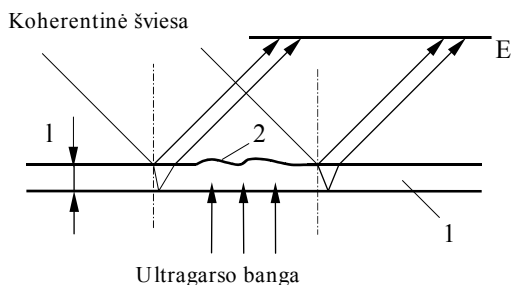
12 pav. Skysčio paviršiaus reljefo, suformuoto veikiant akustiniam slėgiui, interferencinio registravimo optinė schema: 1 – skysčio paviršiaus reljefas; P – puskaidris veidrodis; V – veidrodis; E – šviesos ekranas (fotografinė plokštelė)

Optiniai interferenciniai metodai

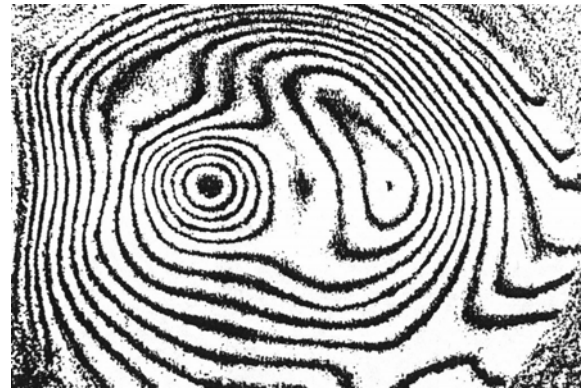
Didžiausias optinių tyrimų tikslumas pasiekiamas interferenciniais metodais. Ypač tai akivaizdu tyrimams naudojant lazerius, nepalyginamus pagal šviesos koherentiškumą, kryptingumą ir didelį energijos tankį. Pažymėtina, kad interferometriniai tyrimai, taip pat ir akustinių bangų vizualizavimas, paprastai gali būti įvertinti kiekybiškai. Jie leidžia išmatuoti akustinio lauko energetinius parametrus: virpesių amplitudės, spinduliavimo slėgio, lauko intensyvumo erdvinius pasiskirstymus.

Iš daugybės optinių interferencinių metodų aptarsime tik naujausius, tarp jų susijusius su mūsų tyrimais šioje srityje.

Prie interferencinių metodų priskirtinas skysčio paviršinio reljefo metodas, kai skysčio paviršius, kuriame suformuotas ultragarso lauko reljefas, yra Tvaivano ir Gryno interferometro [18] veidrodis (12 pav.). Nuo jo atsispindėjęs koherentinės šviesos spindulys interferuoja su atraminiu spinduliu ir suformuoja interferometro išėjime (fotoplokštelėje) skysčio paviršiaus reljefo interferencinį atvaizdą, išmargintą vienodo poslinkio linijomis $\Delta h = \lambda$.



13 pav. Paviršinio reljefo vizualizavimo schema, padengiant skysčio paviršių plėvelę: 1 – skysčio plėvelė; 2 – paviršiaus reljefas; E – ekranas (fotoplokštelė)



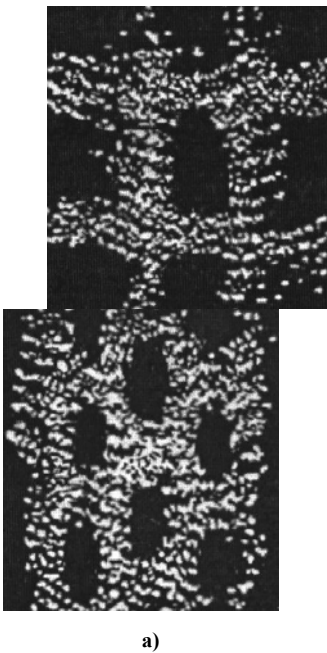
14 pav. 0,72 MHz dažniu virpančio pjezoelektrinio keitiklio akustinis laukas, vizualizuotas interferenciniu metodu, suformuojant vandens paviršiuje žibalo plėvelę [23]

Matavimo schema supaprastėja, padengus skysčio (vandens) paviršių kito skysčio (žibalo) plėvele (13 pav.). Žibalo plėvelę 2 apšvietus koherentine šviesa, interferuoja nuo plėvelės apatinio ir viršutinio paviršių atsispindėję šviesos srautai. Gautasis interferencinis atvaizdas (14 pav.) atitinka plėvelės storio pokyčius, atsiradusius dėl plėvelės laisvo paviršiaus deformacijos, veikiant akustiniam spinduliavimo slėgiui [22].

Interferencinis metodas taikomas plačiame dažnių diapazone, nes apšviečiant koherentine šviesa plėvelės storis l praktiškai neribojamas. Be to, šis metodas leidžia stebėti akustinių laukų dinamiką beveik realiu laiku, nes skysčio reljefo nusistovėjimo laikas ≈ 250 ms [24].

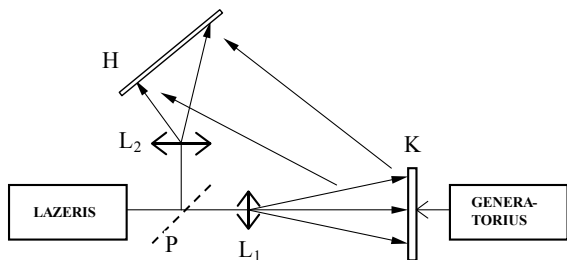
Akustiniam laukui skysčio tūryje vizualizuoti interferencinis metodas gali būti pritaikytas panaudojus akustiškai ploną (storis $d \ll \lambda$), optiškai atspindinčią įtemptą membraną [13], įtaisytą Tvaivano ir Gryno interferometro petyje. Kartu membrana įleidžiama į skystį akustiniame lauke taip, kad jos plokštuma būtų statmena akustinio lauko sklidimo kryptiai. Dėl plonumo ir liaunumo membrana beveik neiškraipo akustinio lauko ir jos virpesių amplitudė apytikriai lygi akustinių dalelių, esančių pačioje jos aplinkoje, virpėjimo amplitudei.

Kietųjų kūnų paviršių virpesių pasiskirstymas taip pat gali būti vizualizuotas interferenciniu metodu, tačiau paviršius turi būti optiškai lygus (nelygumo parametras $\delta \ll \lambda$). Šiurkščių paviršių ($\delta \geq \lambda$) virpesių laukui vizualizuoti naudojamas grūdėtųjų struktūrų metodas [25]. Šiuo atveju vizualizavimui naudojama tik koherentinė šviesa, kuria apšviestas difuzinis paviršius dėl lokalinės interferencijos skirtingos fazės šviesos srautų, atsispindėjusių nuo nelygaus paviršiaus gretimų taškų, atrodo grūdėtas (angl. *speckle pattern interferometry*). 14 pav. pavaizduota supaprastinta virpančio pjezokeitiklio paviršiaus virpesių vizualizavimo schema, aprašyta [26].



16 pav. Virpesių pasiskirstymo grūdėtieji atvaizdai, lankstymo keitkliui virpant rezonansiniais dažniais: a) kai $f_r = 45,1$ kHz; b) kai $f_r = 74,5$ kHz [26]

Televizijos kameros fotokatode interferuoja nuo virpančio pjezokeitiklio K paviršiaus atsispindėjusi šviesa ir atraminis šviesos srautas, atskirtas pusskaidriu veidrodžiu P_1 , ir srautas, atsispindėjęs nuo pusskaidrio veidrodžio P_2 . Monitoriaus ekrane gaunamas vaizdas (16 pav.), kuriame lankstymo būdu virpančio pjezokeitiklio K mazginės linijos išlaiko grūdėtąją struktūrą, o



17 pav. Holografinės interferogramos registravimo schema: P – pusskaidris veidrodis; L_1, L_2 – glaudžiamieji lęšiai; K – akustinė virpesių sistema; H – holografinė fotoplokštelė

virpančiose srityse ši struktūra išnyksta.

Grūdėtųjų struktūrų vizualizavimo metodu gaunami kontrastingi virpančių akustinių struktūrų atvaizdai, kuriems, deja, būdingas mažas jautris bei nedidelė erdvinė skyra. Tad jie gali būti naudingi tik esant virpesių amplitudėms $\xi \geq \lambda/2$.

Holografiniai metodai

Naujausias ir informatyviausias yra holografinis, akustinių laukų vizualizavimo metodas, atsiradęs ir tobulėjęs kartu su holografijos technika [27, 28]. Žemų ultragarsinių dažnių (kilohercų diapazonas) akustinių virpesinių sistemų tyrimams dažniausiai naudojamas holografinis interferometrinis metodas [29], kuriuo

fotoplokštelėje užregistruojama virpančio paviršiaus (nebūtinai plokščio) holograma (17, 18 pav.).

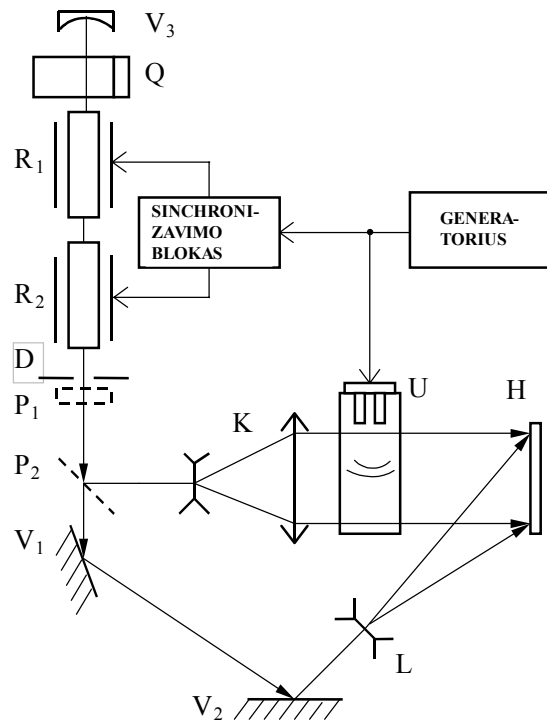
Hologramoje, užregistruotoje laikinio suvidurkinimo būdu, šviesios linijos atitinka mazgines virpesių sritis. Tamsias linijas atitinkančios virpesių amplitudės apskaičiuojamos pagal lygtį

$$J_0(4\pi\xi/\lambda) = 0, \quad (2)$$

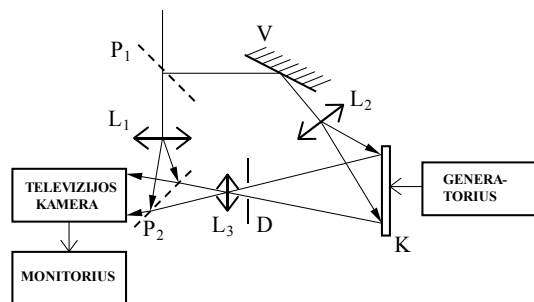
Čia J_0 – nulinės eilės Beselio funkcija; ξ -virpesių amplitudė; λ - šviesos bangos ilgis.

Intervalas tarp dviejų gretutinių interferencinių linijų atitinka virpesių amplitudžių pokytį $\Delta\xi = \lambda/4$.

Panaudojus klasikinę optinio holografavimo schemą, kurioje holografuojamas objektas yra akustinis laukas, holografinėje fotoplokštelėje H užregistruojama akustinio lauko holograma. Panaudojus impulsinį lazerį, galima holografuoti bėgančiųjų bangų lauką. 19 pav. pavaizduota



19 pav. Pavienių akustinių impulsų holografavimo schema: R_1, R_2 – sintetiniai rubinai; Q – lazerio rezonatoriaus kokybės moduliatorius; D – diafragma; P_1, P_2 – pusiauskaidrūs veidrodžiai; V_1, V_2, V_3 – veidrodžiai; L – glaudžiantis lęšis; K – kolimatorius; U – ultragarso impulsų spinduoelis; H – holograma



15 pav. Virpesių vizualizavimo grūdėtųjų struktūrų metodu schema: L_1, L_2, L_3 – glaudžiamieji lęšiai; V – veidrodis, P_1, P_2 – pusskaidriai veidrodžiai; D – diafragma, K – pjezokeitiklis

schema, skirta pavieniams akustiniams impulsams holografuoti (20 pav.) [30].

Ultragarso impulso trimačiam holografiniam atvaizdui gauti buvo panaudotas kartotinės ekspozicijos metodas, sužadinant du trumpus ($\tau=30$ ns trukmės) lazerio impulsus, suvėlintus vienas kito atžvilgiu. Rubinų R_1 ir R_2 sužadavimo momentai sinchronizuojami taip, kad kartu su pirmuoju šviesos impulsu būtų sužadinas ir ultragarso impulsų šaltinis U, o antrasis šviesos impulsas peršviestų sklindantį ultragarso impulsą. Kadangi į holografinę fotoplokštelę H patenka ir atraminis šviesos srautas, tai fotoplokštelėje užregistruojama ultragarso impulso holograma. Išryškintą plokštelę stebint dujinio He-Ne lazerio šviesoje tam tikru rakursu, matomas erdvinis

trimatis ultragarso impulso atvaizdas (20 pav.).

Svarbiausieji aprašytieji akustinių laukų vizualizavimo metodai, jų pagrindinės savybės pateikti lentelėje, iš kurios galima nustatyti jų taikymo galimybes, trūkumus, palyginti juos tarpusavyje. Lentelėje matyti, kad netiesioginiai vizualizavimo metodai negali lygintis su kur kas tobulesniais tiesioginės akustooptinės sąveikos metodais. Tobuliausi yra holografiniai metodai, tačiau jiems įdiegti reikia nemažai lėšų, sudėtingos aparatūros. Praktikoje itin patogios ir dažnai naudojamos yra įvairios difrakcinio ultragarso bangų vizualizavimo metodo modifikacijos, ypač tinkamos aukštojo dažnio ultragarso vizualizuoti, kai pasiekiamas nepaprastai didelis difrakcijos efektyvumas.

Lentelė. Ultragarso vizualizavimo metodų palyginimas

Netiesioginiai vizualizavimo metodai	Požymiai, savybės	Dažnių diapazonas	Trūkumai
Cheminis	Panaudojamas ultragarso poveikis fotocheminių reakcijų greičiui. Efektas priklauso nuo poveikio trukmės ir aktyviosios medžiagos koncentracijos	>20 kHz	Nejautrus, efektas priklauso nuo temperatūros, inertiškas
Terminis	Gaunami akustinio lauko apertūros, virpesių pasiskirstymo paviršiuje atvaizdai	>20 kHz	Siauras dinaminis diapazonas, nejautrus, inertiškas
Mechaninis	Vaizdas suformuojamas mechaniniais akustiniams slėgiui jautriais reflektoriais	>100 kHz	Atvaizdas neryškus, efektas inertiškas, siauras dinaminis diapazonas
Tiesioginiai vizualizavimo metodai			
Difrakcinis (pranarinis)	Vaizdas gaunamas Debajaus ir Syroso efekto dėka. Jautrus, difrakcijos efektyvumas proporcingas dažniui. Atvaizdai kontrastingi, didelės erdvinės skyros. Tinka bėgančioms ir stovinčioms bangoms vizualizuoti	nuo 100 kHz iki gigahercų	Gaunamas vaizdas integralinis šviesos sklaidimo kryptimi, efektyvumas priklauso nuo bangų dažnio
Poliarizacinis	Panaudojamas šviesos poliarizacijos kampo priklausomybė nuo slėgio	> 20 kHz	Galimas tik optiškai aktyviose medžiagose [$n=f(\lambda)$]
Šviesos atspindžio: - nuo PAB	Panaudojama šviesos fazės, dažnio, atspindžio kampo moduliacija	> 20 kHz	Tinka tik optiškai lygiems paviršio virpesiams vizualizuoti ($\delta \ll \lambda$)
Optinis interferencinis: - membraninis - akustinio spinduliavimo slėgio	Vizualizuojami plonos membranos virpesiai akustiniame lauke Vizualizuojamas akustinio spinduliavimo slėgio pasiskirstymas skysčio paviršiuje. Metodus absoliutus, jautrus, galima vizualizuoti baltojoje šviesoje	20 kHz -10 MHz >20 kHz	Invazinis Efektas integralinis laiko atžvilgiu, poslinkio matavimas diskretinis ($\Delta h = \lambda$)
- grūdėtųjų struktūrų	Realaus laiko tėkmėje vizualizuojamas optiškai šurkštus ($\delta \gg \lambda$) virpantis paviršius. $\xi \geq \lambda/2$	20 kHz –200 kHz	Vaizdas grūdėtas, neryškus, erdvinė skyra maža
Holografinis: - impulsinis	Erdvinis akustinių impulsų vaizdas, puikios kokybės vaizdas, ekspozicijos trukmė ≈ 30 ns	< 100 kHz	Fotocheminis hologramų registravimas, sudėtinga, brangi aparatūra

18 pav. Ultragarso interferencinis metodas: a) aptakios formos kevalinio pjūvio kevalinio virpesių amplitudės matavimas diskretinis, dažniu [13]; b) bimorfino pjūvio kevalinio virpesių amplitudės matavimas diskretinis, lankstymo virpesiais rezonansiniu dažniu [13].

pav. 5 μ s trukmės ultragarso impulsų sklidimo pavidalyje, holografinis atvaizdas

Išvados

Pateikta išsami akustinių laukų vizualizavimo metodų klasifikacija ir raida, pradedant paprasčiausiais netiesioginiais metodais, klasikiniu pranariniu, ir baigiant naujais holografiniais metodais, rodo, kad akustooptiniai ultragarso vizualizavimo metodai yra labai įvairūs ir pranašesni už kitus metodus.

Padėkos

Autorius dėkingas moksliniams bendradarbiams dr. V. Ananjevui, dr. V. Minialgai ir dr. V. Zvanoriui, padėjusiems užregistruoti kai kuriuos čia pateiktus akustinių laukų atvaizdus.

Literatūra

1. **Gabor D.** A new microscopic principle // *Nature*. 1948. Vol. 161. P. 777-778.
2. **Leith E. N., Upatnieks J.** Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional object // *Journ. Opt. Soc. Amer.* 1964. Vol. 54. P. 1295-1301.
3. **Goodman J. W.** An introduction to the principle and applications of holography // *Proceed. IEEE*. 1971. Vol. 59. P. 1292-1304.
4. **Richards T. W., Loomis A. L.** The Chemical Effects of High Frequency Sound Waves // *Journ. Amer. Chem. Soc.* 1927. V. 49. P. 3086.
5. **Weissler A., Cooper H. W., Snyder S.** The Chemical Effects of Ultrasonic Irradiation: Reaction Between Carbon Tetrachloride and Water // *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1948. V. 20. P. 589.
6. **Weissler A., Cooper H. W., Snyder S.** The Chemical Effects of Ultrasonic Irradiation: Reaction Between Carbon Tetrachloride and Water // *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1950. V. 22. P. 1769.
7. **Pinoir R., Pouradier J.** Action des ultrasons sur les couches sensibles // *Journ. Chim. Phys.* 1947. V. 44. P. 254.
8. **Ernst P. J.** Ultrasonography. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1951. V. 23. P. 80.
9. **Schreiber H., Degner W.** Sichtbarmachung von Ultraschallwellen // *Naturwissenschaft.* 1950. N. 37. S. 358.
10. **Rust H. H.** Ultraschall-Bildumwandlung mittels thermisch bewirkten Farbumschlages // *Angewandte Chemie*. 1952. N. 64. S. 308.
11. **Pohlman R.** Über die Möglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur optischen // *Zeitschrift für Physik*. 1939. N. 113. S. 697.
12. **Breazeale M. A.** Schlieren photography in physics // *Proceedings of SPIE. Acousto-Optics and Applications III*. Vol. 3581. P. 41-47.
13. **Sajauskas S.** Izotropinių kietų kūnų elektroakustiniai tyrimo metodai. Kaunas: Technologija. 1994. P.
14. **Osterhammel K.** Optische Untersuchung des Schallfeldes kolbenförmig schwingender Quartzes // *Akustische Zeitschrift*. 1941. N. 73. S. 73.
15. **Bergmann L.** Eigenschwingungen von Glaszylindern // *Zeitschrift für Physik*. 1949. N. 125. S. 405.
16. **Sliwiński A.** Perspectives of acoustooptics and photoacoustics // *Acoustooptics and Applications*. 1989. P. 9-17.
17. **Schuster K.** Ultraschall-optische Abbildung nach dem Reliefbild-Verfahren // *Jeaner Jahrbuch*. 1951. S. 217.
18. **Negishi K.** Measurement of ultrasonic fields by the method of liquid-surface-relief // *Japan Journal Applied Physics*. 1972. Vol. 11. P. 1235-1239.
19. **Reibold R.** Liquid-surface relief: its transient behaviour for pulse-excited transducers // *Ultrasonics*. 1980. Vol. 18. P. 85-89.
20. **Ананьев В., Саяускас С.** О численном восстановлении ультразвукового поля по голографической интерферограмме // *Ультразвук*. 1986. No. 18. С. 88-92.
21. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики.- Москва. 1973. С. 280-281.
22. **Саяускас S., Минялга V.** Determination of ultrasound intensity by means of optical interferometric methods // *Acoustooptics and Applications*. 1989. P. 389-394.
23. **Минялга В., Саяускас С.** Измерение акустического радиационного давления оптическими интерференционными методами // *Ультразвук*. 1988. No. 20. С. 115-121.
24. **Анаев В., Домаркас В., Саяускас С.** К вопросу о динамике поверхности жидкости при воздействии акустического радиационного давления // *Акустический журнал*. 1984. No. 1. С. 1-4.
25. **Lökberg O. J., Högmöen K.** Vibration phase measurement using electronic speckle pattern interferometry // *Applied Optics*. 1976. Vol. 15. P. 2701.
26. **Минялга В., Саяускас С.** Электронная спекл-интерферометрия колебаний многомодовых ультразвуковых преобразователей // *Ультразвук*. 1987. No 19. С. 126-132.
27. **Vest Ch. M.** Holographic Interferometry – New York, Chichester, Brisbane, Toronto. – 1979.
28. **Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г. В.** Голографическая интерферометрия.- Москва: Наука, 1977.-336 с.
29. **Саяускас S., Минялга В., Приалгаускас С.** Оптические исследования характеристик излучения изгибного преобразователя // *Ультразвук*. 1989. No 21. С. 51-57.
30. **Анаев В., Домаркас В., Саяускас С.** Голографическая визуализация единичных коротких ультразвуковых импульсов // *Ультразвук*. 1983. No. 15. . 110-111.

Sajauskas S.

The methods of visualisation of acoustical fields

Summary

Classification of acoustical field's visualisation methods, their specific features, implementation and images of registered fields are presented here