Universitatea „Dunărea de Jos” din Galaţi

Școala doctorală de inginerie industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

Împrăștierea acustică pe sisteme complexe, rigide și elastice

Doctorand,

Ing. Necula Stan Maria

Conducător științific,

Prof. univ. dr. ing. fiz. Luminița Moraru

Seria I 4: Inginerie industrială Nr. 83

GALAŢI

2022

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galaţi

Școala doctorală de inginerie industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

Împrăştierea acustică pe sisteme complexe, rigide și elastice

Doctorand

Ing. Necula (Stan)Maria

Președinte	Prof univ.dr.ing. Cătălin FETECĂU Președintele senatului Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați
Conducător ştiinţific,	Prof univ.dr.ing.fiz. Luminița MORARU Director Școala Doctorală de Inginerie mecanică și industrială, Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați
Conducător ştiinţific în cotutelă,	Prof univ.dr.ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU Membru corespondent al Academiei Române,director CSUD - Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați
Referenţi stiinţifici,	Prof. univ.dr.ing.Cristian-Vasile DOICIN Universitatea Politehnică București Prof.univ.dr.Gheorghe OANCEA Universitatea Transilvani Brașov Prof univ.dr.ing. habil. Antoaneta ENE Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați

Seria I 4: Inginerie industrială Nr. 83

GALAŢI

2022

Anexa 2

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I 1**: Biotehnologii**
Seria I 2**: Calculatoare și tehnologia informației**
Seria I 3: **Inginerie electrică**
Seria I 4: **Inginerie industrială**
Seria I 5: **Ingineria materialelor**
Seria I 6: **Inginerie mecanică**
Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
Seria I 9: **Inginerie și management în agicultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

Seria E 1: **Economie**
Seria E 2: **Management**
Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE ȘI ARTE

Seria U 1: **Filologie- Engleză**
Seria U 2: **Filologie- Română**
Seria U 3: **Istorie**
Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

Seria M: **Medicină**

MULȚUMIRI

În primul rând, aș dori să îi mulțumesc prof. dr. ing. Luminița Moraru care m-a acceptat în echipa dumneaiei și mi-a oferit șansa de a participa la acest proiect, de a-mi îmbunătăți cunoștințele și abilitățile și, de asemenea, pentru deschiderea arătată domeniul studiat.

Mulțumirile mele speciale se adresează membrilor comisiei mele de îndrumare: prof. dr. ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU, Membru corespondent al Academiei Române, prof. dr. ing. Antoaneta Ene și prof. dr. Mirela Praisler pentru observațiile privind structura tezei, pentru îndrumările de-a lungul studiilor de doctorat și pentru sfaturile acordate în etapa de finalizare a tezei.

Aș dori, de asemenea, să îi mulțumesc în mod special lector dr. Dorin Bibicu pentru încrederea și sprijinul pentru acest proiect de cercetare și pentru interesul său pentru munca mea.

Tuturor le mulțumesc mai ales pentru faptul că m-au ajutat să mă apropii de un domeniu relativ nou în activitatea mea de cercetare.

Mulţumesc conducerii Universităţii ”Dunărea de Jos” din Galați şi Facultăţii de Științe și Mediu pentru atenţia şi sprijinul arătate pe tot parcursul activităţii desfăşurate.

Mulțumesc proiectului Burse pentru educația antreprenorială în rândul doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat (BeAntreprenor!), cod MySMIS: 124539, care mi-a permis să iau contact cu practicile antreprenoriale și mi-a furnizat cunoștințele necesare implementării unei idei de afaceri legată de subiectul tezei mele de doctorat.

Galați, 2022 Maria Necula (Stan)

Cuprins

INTRODUCERE

De câteva decenii, problema reconstruirii fizice a câmpurilor acustice a fost abordată atât în comunitatea științifică dedicată comunicării audio dar, mai nou, și de specialiștii care studiază posibilele utilizări ale undelor acustice de frecvențe joase în detecția obiectelor.

Astăzi, analiza numerică şi algoritmii de simulare sunt la îndemâna specialistului și permit utilizarea unor programe sofisticate de elemente finite, elemente de frontieră sau transformări de tip Fourier pentru analiza digitală a semnalelor, pentru descompunerea sau pentru reconstruirea lor în limita aproximările oferite de diferite modele matematice. Toate aceste instrumente reprezintă un ansamblu complet și complex de mijloace pentru studiul şi descrierea propagării undelor acustice, a câmpurilor acustice complexe din jurul obiectelor ”imersate” în câmpul acustic și permit localizarea obiectelor folosind tehnici de reconstruire a semnalelor retro-împrăștiate.

Studiile de simulare privind detecția obiectelor ”ascunse” prin folosirea undelor acustice de frecvențe joase sunt precursorii dezvoltării unei tehnologii complet nouă și absolut inofensivă de detectare a obiectelor interzise (droguri sau arme albe din materiale ceramice) prin înlocuirea verificării de tip „căutare manuală” cu o căutare automatizatiză. Cea mai atractivă și posibil rapid implementabilă este folosirea în vămile aeroporturilor a unor scanere care vor înlocui ”patdown” sau verificare ”prin căutare cu mâna” cu această verificare automată. În acest fel, procesul de control poate fi accelerat și se „respectă viața privată și libertățile civile”[1] dar se asigură eficient și ”protecția cetățenilor, societății și economiei”[2]. Această tehnologie emergentă este absolut inofensivă, și se estimează că va putea detecta obiecte ascunse sub haine sau în buzunare fără a mai fi necesar contactul, permițând păstrarea demnității și intimității persoanei inspectate.

În teza mea de doctorat am proiectat și implementat experimente de simulare realizate în mediul MATLAB care au urmărit dezvoltarea unor modele de împrăștierea inversă (inverse scattering) cu scopul de a colecta informații despre țintă/obiect prin trimiterea undelor acustice către aceasta și prin recepționarea și analiza undelor împrăștiate de țintă. Problema împrăștierii inverse este utilizată atunci când se urmărește determinarea unor detalii despre structura și compoziția unui obiect sau a unui cluster de obiecte care nu pot fi obținute din măsurători efectuate în situ.

Obiectivele de cercetare urmărite

În timp ce experimentele de împrăștiere acustică rezonantă pe solide în domeniul de frecvențe caracteristice ultrasunetelor sunt destul de numeroase, experimente de împrăștiere acustică în domeniul de frecvențe al sunetelor sunt puține și nu au fost concepute special pentru a detecta rezonanțele.

În scopul derulării acestei teme de cercetare, am adaptat la cerințele noastre de simulare modelele matematice ce descriu împrăștierea unei unde acustice plane pe un cilindru rigid și o sferă rigidă prin folosirea întregului suport teorectic ce descrie generarea, propagarea și împrăștierea undelor plane. Proprietățile obiectului (cum ar fi caracteristicile structurale, modurile

[1] HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 Secure societies – Protecting freedom and security of Europe and its citizens. Page 7 paragraph 3.
[2] COM(2010) 673 final, EU Internal Security Strategy in Action: Five steps towards a more secure Europe

de vibrație etc.) au fost corelate cu proprietățile câmpului sonor radiat (cum ar fi presiunea împrăștiată, câmpul îndepărtat sau modelul de radiație al câmpului apropiat etc.). Simulările au fost efectuate prin abordarea propagării undelor în domeniul de frecvențe joase.

Evenimentele de împăștiere acustică au fost simulate pe ținte de formă cilindrică și sferică și în cadrul abordării dublului strat: un strat reprezentat de aer (mediu fluid care înconjoară ținta) și al doilea strat materialul din care este formată ținta (fluorură de sodiu și clorură de sodiu, PVC și oțel). Distribuția multispectrală a semnalelor împrăștiate a fost analizată utilizând periodograma (permite estimare a densității spectrale a unui semnal și indică frecvența mai importantă a oscilației în seria de timp observată) și spectrogramele 3D (permit vizuală densității spectrale în raport cu timpul).

Un alt obiectiv de cercetare a urmărit împrăștierea acustică inversă pe obiecte cu formă neconvexă într-o abordare bidimensională. Deasemenea am fost interesați de experimentele de simulare care urmăresc detectarea și localizarea unui număr finit de ținte. Acestea au fost realizate cu ajutorul algoritmului MUltiple Signal Classification (MUSIC) ce permite obținerea de informații privind locația și geometria distribuției țintelor văzute ca neomogenități în mediul de propagare. MUSIC este folosit în limitele a două aproximări. Prima este modelul Born de aproximare a unei unde distorsionate (DWBA) când se consideră că amplitudinea undei împrăștiate este mult mai mică decât amplitudinea undei incidente și, cea de-a doua, este formularea Foldy-Lax (FL) a modelului de împrăștiere multiplă. În acest studiu, extindem domeniul de aplicare către domeniul de frecvențe joase, dar se menține neschimbată condiția de omogenitate a mediului de propagare presupus cunoscut.

CAPITOLUL 3 SIMULĂRI PRIVIND ÎMPRĂȘTIEREA SUNETULUI PE SISTEME COMPLEXE DE CORPURI

3.2 Modele matematice

3.2.1. Împrăștierea sunetului pe cilindri și sfere

Deși majoritatea țintelor solide pe care se produce împrăștierea undelor în aer pot fi considerate ca fiind rigide și imobile, această teorie este limitată doar la câteva cazuri particulare. În general, trebuie să fie luate în considerare acele unde sonore care penetrează țintele solide, din moment ce au un efect considerabil asupra unghiurilor de retroîmprăștiere ale sunetului și asupra energiei totale dispersate. Atunci când o undă sonoră întâlnește un obstacol, o parte din undă este reflectată înspre zona spațială a parcursului său inițial. Unda împrăștiată este definită ca diferența dintre unda reală împrăștiată pe un obstacol și unda ce se va propaga neperturbată, în cazul în care obstacolul nu ar exista în calea sa. Astfel, când o undă plană este incidentă pe un corp, în spațiul din jurul corpului, va exista, în plus față de unda plană neperturbată, o undă împrăștiată, care este dispersată de la obstacol în toate direcțiile, distorsionând și interferând cu unda plană incidentă.

Prin acest studiu de simulare suntem interesați să estimăm unda care este împrăștiată de un obstacol solid și efectul acestei unde împrăștiate asupra distribuției de presiune a câmpului sonor.

- Am modelat un **cilindru** cu raza a = 2 cm. Distanța dintre emițător și sistemul investigat este r = 5 cm. Mediul fluid care înconjoară cilindrul este aerul cu o viteză a sunetului c=343 m/s și o densitate medie ρ = 1,21 kg/m^3. O undă plană de amplitudine A și se propagă perpendicular pe direcția axei cilindrului.

Pentru simulările noastre, *m* este considerat 1 și 2, iar presiunile corespunzătoare undelor incidente și împrăștiate, la distanță mare față de **cilindru** devin:

$$p_i = P_0[J_0(kr) + 2i\cos(\phi)J_1(kr) - 2\cos(2\phi)J_2(kr)]e^{-i\omega t}$$

$$p_s = A_1\cos(\phi)\,[J_1(kr) + iN_1(kr)]e^{-i\omega t} + A_2\cos(2\phi)\,[J_2(kr) + iN_2(kr)]e^{-i\omega t}$$

$$p_t = p_i + p_s$$

$$A_0 = -\epsilon_0 P_0 i r^{-i\gamma_0}\sin\gamma_0 \qquad A_1 = -\epsilon_1 P_0 i^2 r^{-i\gamma_1}\sin\gamma_1 = \epsilon_1 P_0 r^{-i\gamma_1}\sin\gamma_1$$

$$A_2 = -\epsilon_2 P_0 i^3 r^{-i\gamma_2}\sin\gamma_2 = \epsilon_2 P_0 i r^{-i\gamma_2}\sin\gamma_2,\ \ \epsilon_m = 2, \forall\, m > 0$$

$$\gamma_0 = tan^{-1}\left(-\frac{J_1(ka)}{N_1(ka)}\right)\ \ \gamma_1 = tan^{-1}\left(\frac{J_0(ka)-J_2(ka)}{N_2(ka)-N_0(ka)}\right) \quad \gamma_3 = tan^{-1}\left(\frac{J_1(ka)-J_3(ka)}{N_3(ka)-N_1(ka)}\right)$$

cu γ_1, γ_2 și γ_3 definite mai sus.

Frecvențele folosite sunt cuprinse între 20 Hz și 10.000 Hz și au fost împărțite în benzi de frecvență (de obicei, o bandă de 2000 Hz) pentru o simulare mai eficientă.
De asemenea, pentru aceleași condiții de simulare, a fost adăugat zgomot pentru a urmări condițiile reale de propagare.

- Am modelat o **sferă** de rază *a* = 2 cm. Mediul fluid care înconjoară sfera este aerul prin care viteza pe propagare a sunetului este c = 343 m/s și densitate medie ρ = 1,21 kg/m^3. O undă plană de amplitudine *A* care se propagă de-a lungul axei +*z* este împrăștiată de sfera rigidă centrată la origine (0; 0; 0). Pentru scopurile noastre de simulare, toate seriile din ecuația (3.59) sunt trunchiate la valoarea întregă *m* egală cu 0, 1 și 2, iar presiunea undei împrăștiate dintr-o sferă rigidă de rază *a* devine:

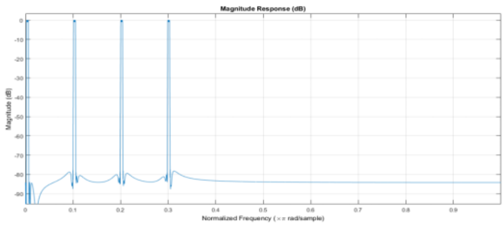
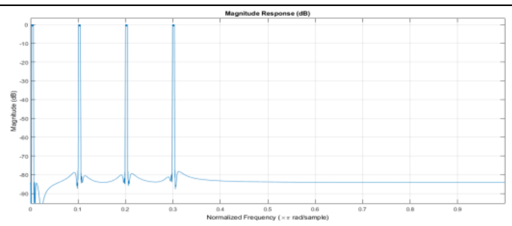
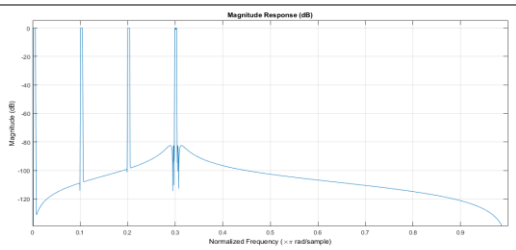
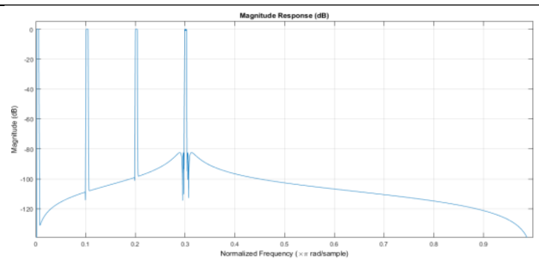
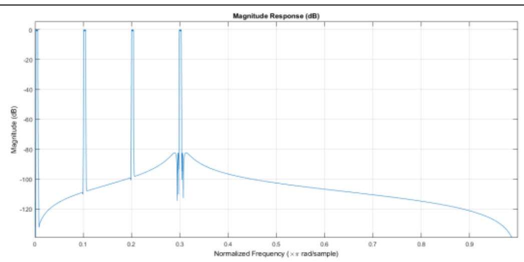
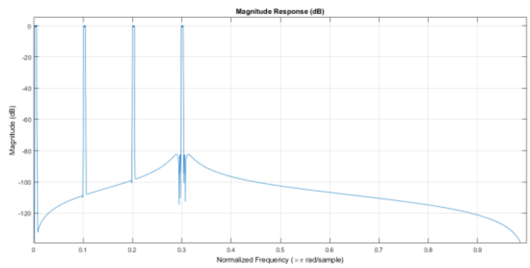
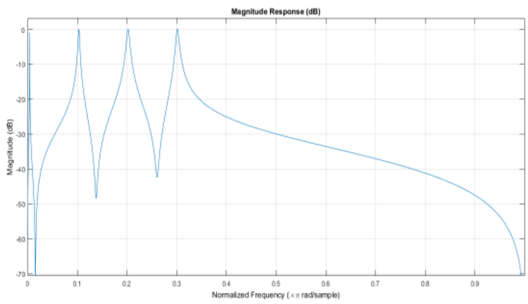
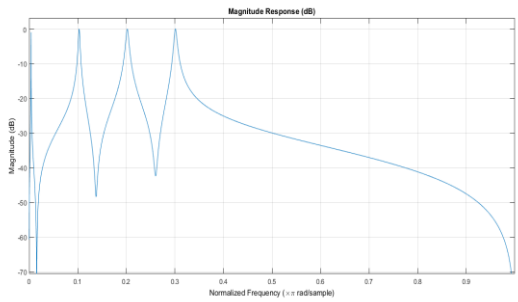
$$p_s = -A\{[ie^{-i\delta_0}\sin\delta_0\, P_0(cos\theta)[j_0(kr) + in_0(kr)] + 3i^2e^{-i\delta_1}\sin\delta_1\, P_1(cos\theta)[j_1(kr) + in_1(kr)] + 5i^3e^{-i\delta_2}\sin\delta_2\, P_2(cos\theta)[j_2(kr) + in_2(kr)]\}e^{-i\omega t} \tag{3.66}$$

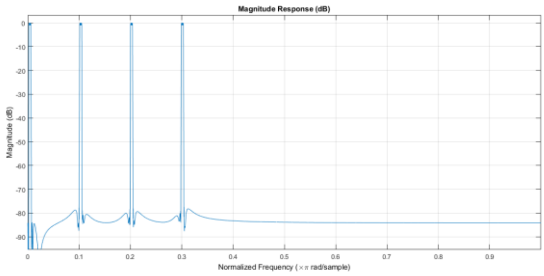
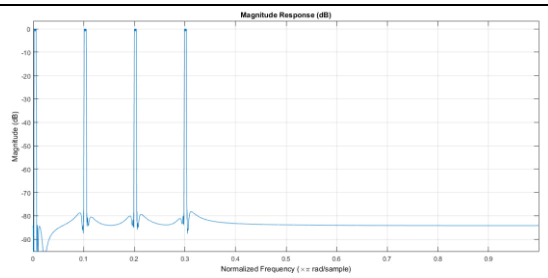
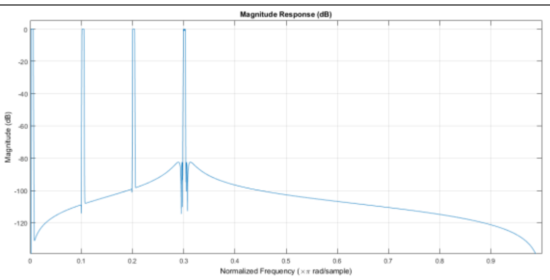
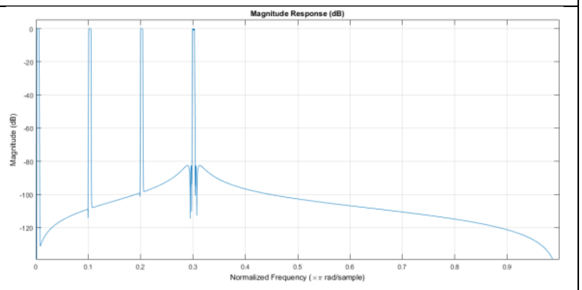
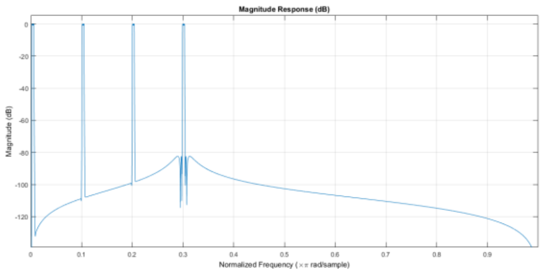
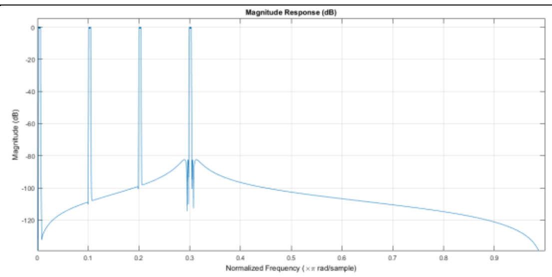
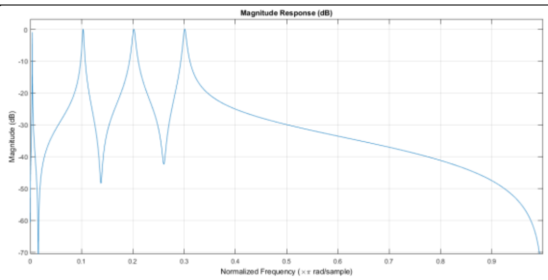
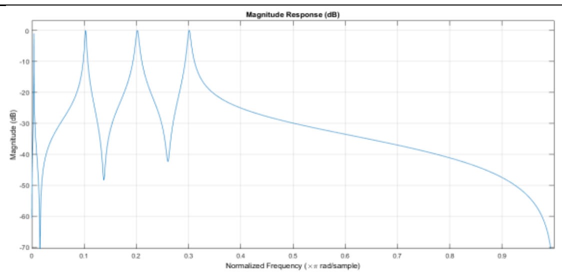
Filtrul rezonant returnează rezultate ale simulării mai bune decât celelalte filtre asociate rezonatorului Helmholtz, chiar și atunci când semnalul este unul zgomotos. Din acest motiv vom limita simulările ulterioare doar la folosirea filtrului rezonant.

Banda de frecvență 20-2000 Hz

Fs = 10000;
fr = [20: 10: 2000];
Fstop1 = [5 500 995 1490];
Fpass1 = [10 505 1000 1495];
Fpass2 = [3052510201515];
Fstop2 = [3553010251520];

Astop1 = 80;
Astop2 = 80;
APASS = 1;
Pentru Filtrul Resonator: fr1 = 20, fr2 = 515, fr3 = 1010, fr4 = 1505

Cilindru circular rigid – magnitudinea (dB)	
Fără zgomot	**Cu zgomot -5 dB**
 Filtrul eliptic trece bandă	 Filtrul eliptic trece bandă
 Filtrul de tip Butterworth	 Filtrul de tip Butterworth
 Filtrul Chebyshev de tipul 1	 Filtrul Chebyshev de tipul 1
 Filtru Resonator HR	 Filtru Resonator HR

Sferă rigidă – magnitudinea (dB)	
Fără zgomot	**Cu zgomot -5 dB**
 Filtrul eliptic trece bandă	 Filtrul eliptic trece bandă
 Filtrul de tip Butterworth	 Filtrul de tip Butterworth
 Filtrul Chebyshev de tipul 1	 Filtrul Chebyshev de tipul 1
 Filtru Resonator HR	 Filtru Resonator HR

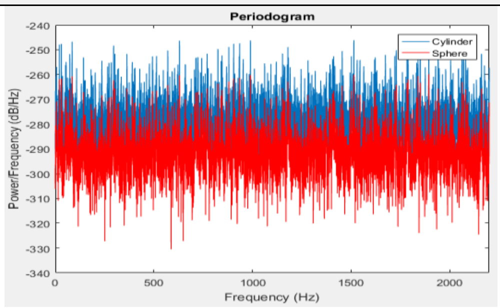
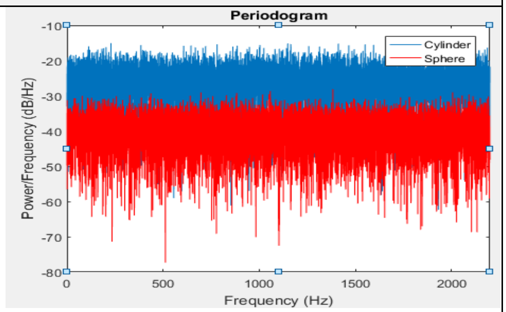
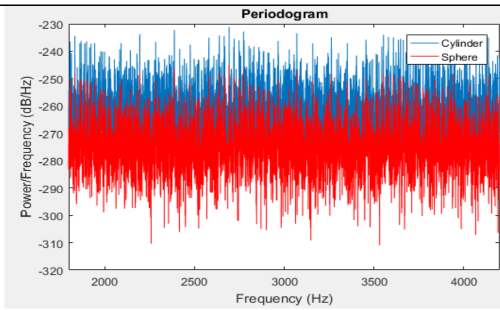
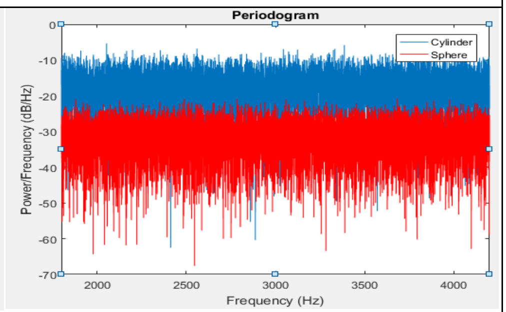
Am realizat o comparație între rezultatele simulărilor privind distribuția multispectrală a semnalelor împrăștiate de obiecte de formă cilindrică și sferică folosind reprezentarea sub formă de periodogramă utilizată pentru a descrie și identifica ciclurile dominante dintr-o serie de timp și de spectrogramă (adică o reprezentare vizuală a spectrului de frecvențe / putere (Hz / dB) a undei acustice, deoarece acestea variază în funcție de timp).

O periodogramă permite identificarea frecvențelor importante dintr-o serie temporală. O serie temporală este privită ca o sumă de unde cosinus cu amplitudini și frecvențe variate. *O valoare relativ mare în periodogramă indică frecvența cea mai importantă a oscilației în seria de timp observată.*

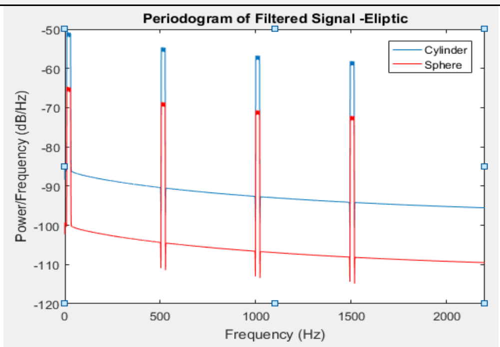
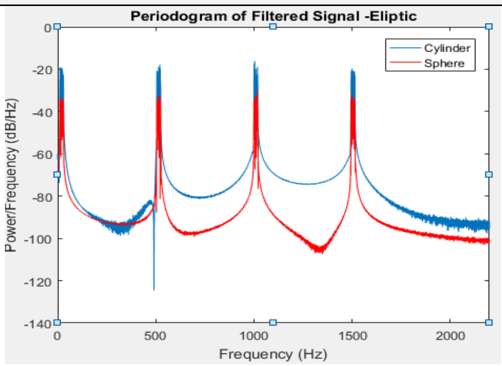
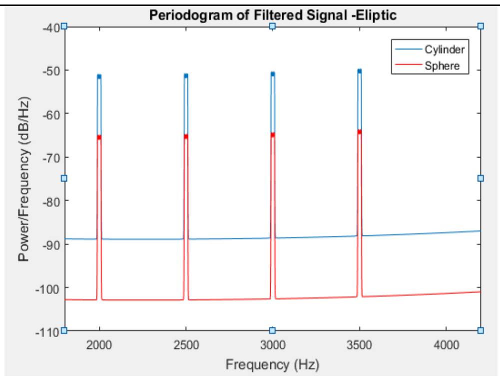
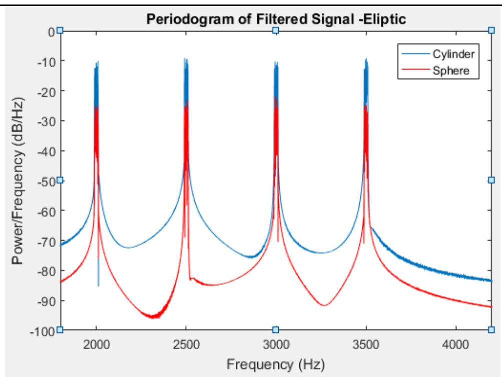
O spectrogramă arată modul în care conținutul de frecvență al unui semnal se modifică în timp. Este o reprezentare vizuală a unei Transformatei Fourier de scurtă durată (Short-Time Fourier Transform). Un semnal aparținând unei serii temporală este împărțit în benzi/ferestre. Fiecare bandă este caracterizată printr-o distribuție de frecvență asociată. O transformată Fourier locală este aplicată fiecărei benzi și se obțin o mulțime de componente de frecvență. Colectarea tuturor acestor componente de frecvență provenite de la fiecare bandă și reprezentarea grafică a tuturor constituie spectrograma. Astfel, se permite vizualizarea semnalelor cu un spectru larg de frecvențe.

Spectrogramele 3D sunt reprezentări ale intensității în funcție de frecvență și de timp. Aceste reprezentări ajută la procesul de recunoaștere. Vârfurile corespund diferitelor frecvențe rezonante acustice. Spectrogramele în bandă îngustă indică modificări ale frecvențelor / răspunsului de frecvență și ale efectului descompunerii.

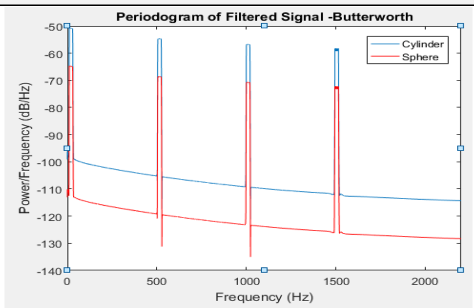
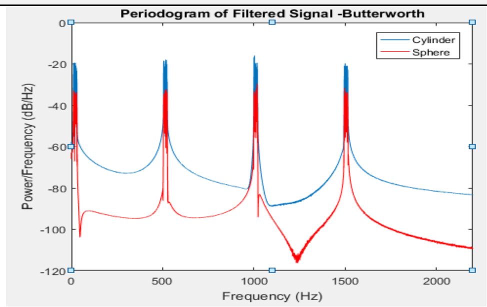
Periodograme cu spectru complet pentru cilindri și sfere rigide

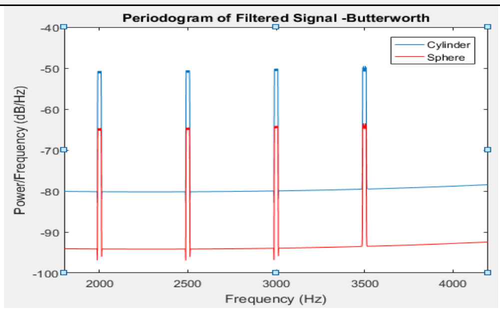
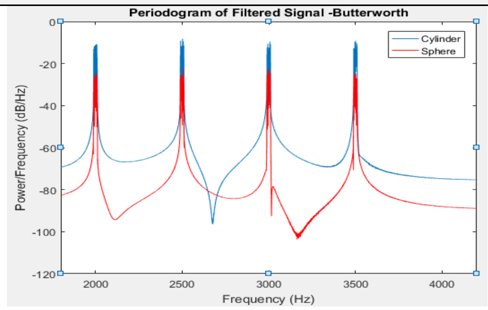
<table>
<tr><th>Banda de frecvențe (Hz)</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adaugat</th></tr>
<tr><td>20-
2000</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2000-
4000</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

Periodograme pentru cilindri și sfere rigide pentru semnale filtrate cu filtrul Eliptic

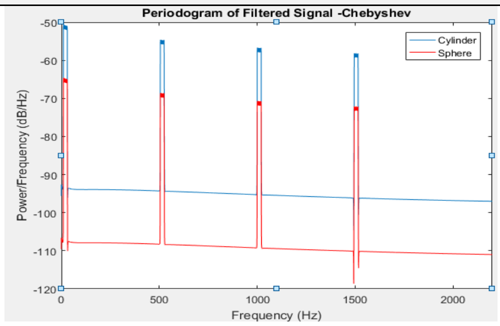
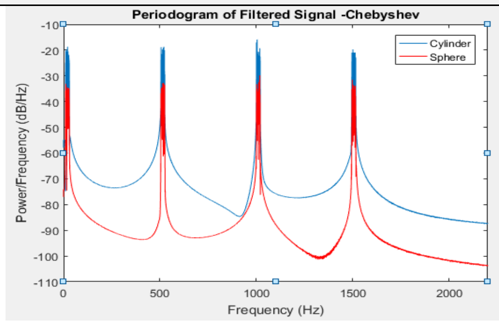
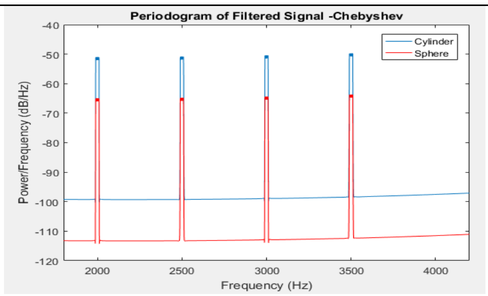
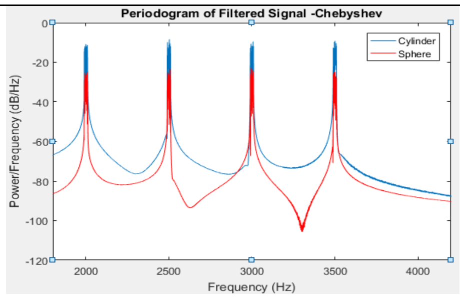
Banda de frecvențe (Hz)	Fără zgomot	Cu zgomot Gaussian adaugat
20- 2000		
2000- 4000		

Periodograme pentru cilindri și sfere rigide pentru semnale filtrate cu filtrul Butterworth

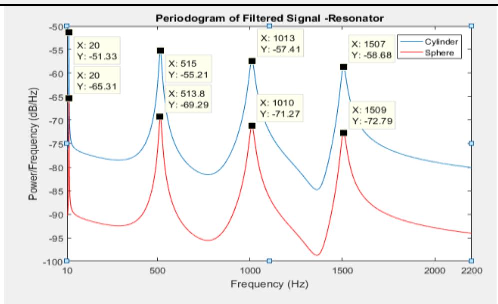
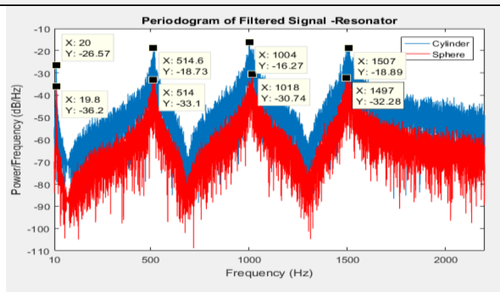
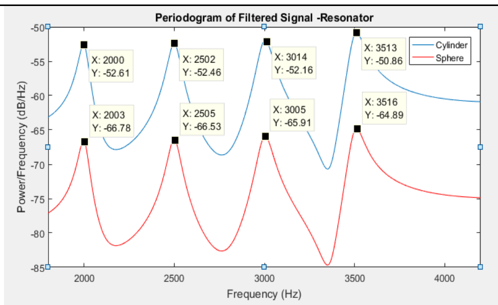
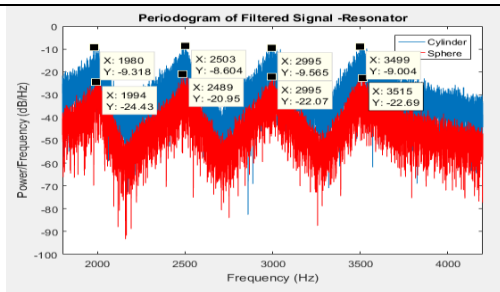
Banda de frecvențe (Hz)	Fără zgomot	Cu zgomot Gaussian adaugat
20- 2000		

Banda de frecvențe (Hz)	Fără zgomot	Cu zgomot Gaussian adaugat
2000-4000		

Periodograme pentru cilindri și sfere rigide pentru semnale filtrate cu filtrul Chebyshev Type I

Banda de frecvențe (Hz)	Fără zgomot	Cu zgomot Gaussian adaugat
20-2000		
2000-4000		

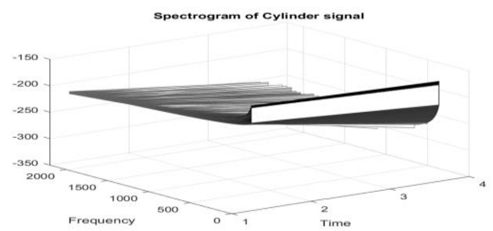
Periodograme pentru cilindri și sfere rigide pentru semnale filtrate cu filtrul Resonator

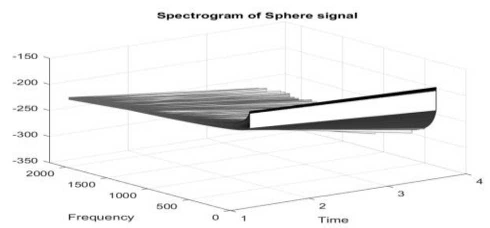
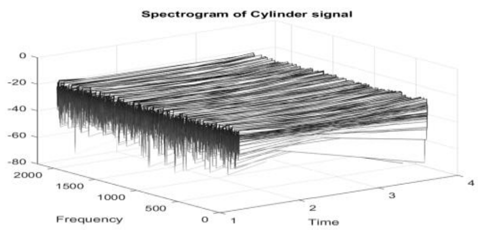
<table>
<tr><th>Banda de frecvențe (Hz)</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adaugat</th></tr>
<tr><td>20-2000</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2000-4000</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

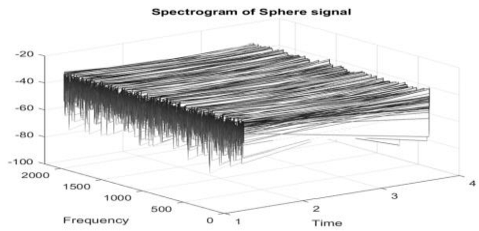
Din analiza distribuției multispectrale a semnalelor împrăștiate folosind periodogramelor concluzionăm următoarele:

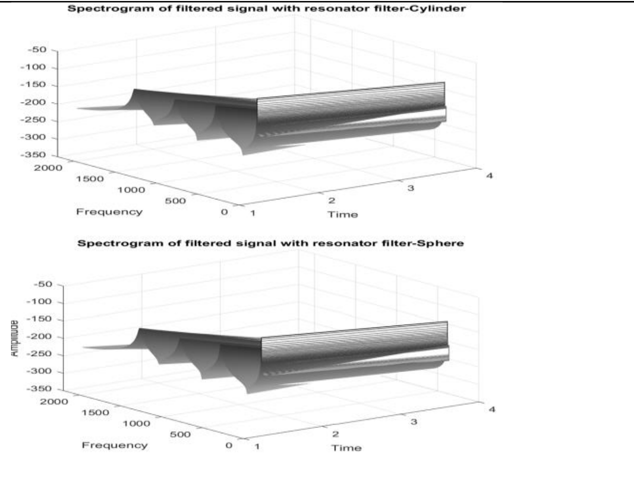
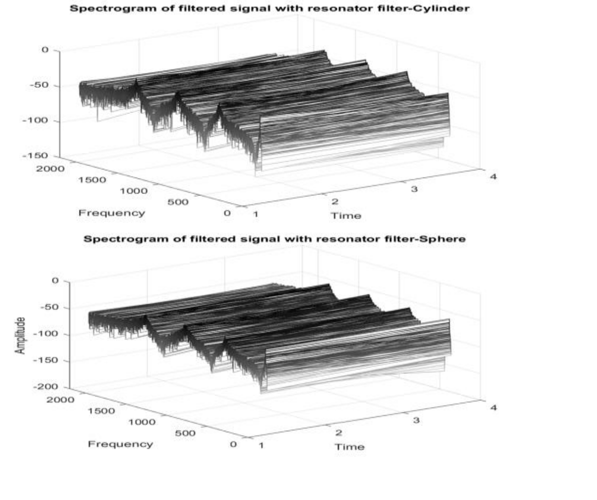
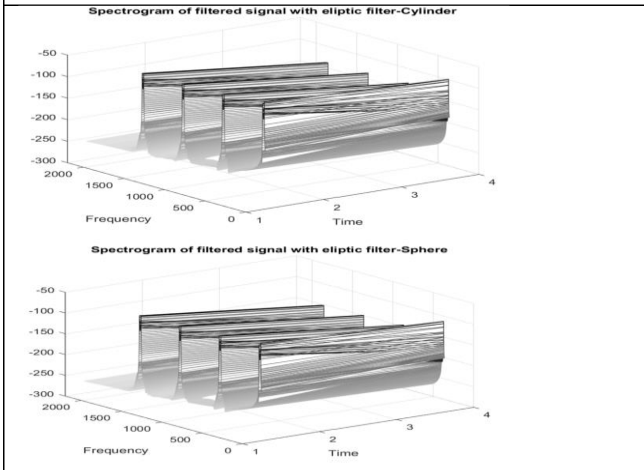
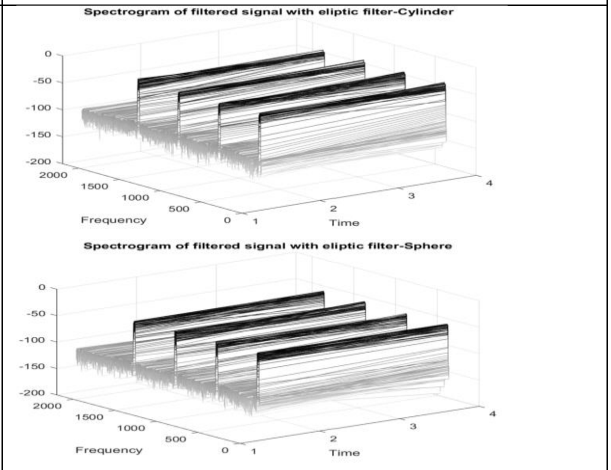
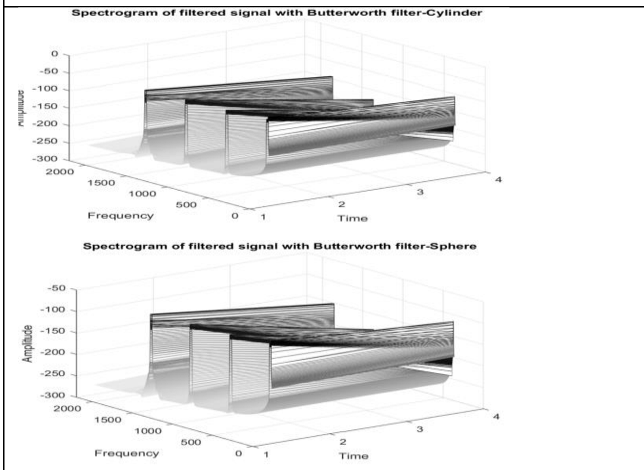
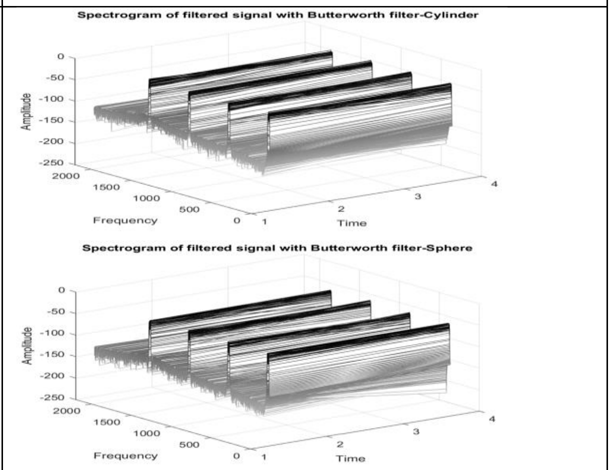
- periodogramelor estimează spectrul de putere al semnalelor împrăștiate și permit extragerea informațiilor utile din datele disponibile. Ele vizualizează variația (energiei) unui semnal în funcție de frecvență și se observă că au o variație mare în amplitudine. Cu alte cuvinte, arată la ce frecvențe aceste variații sunt importante și pentru ce frecvențe aceste variații sunt slabe. Frecvențele (pitch) mai importante ale oscilației din seria de timp observată pentru banda de frecvență de la 20 Hz la 4000 Hz sunt f1 = 20 Hz; 515 Hz; 1013 Hz și 1507 Hz.
- raportul putere/frecvență este cuprinsă între -50 dB și -75 dB (pentru cilindru) și -65 dB până la -90 dB pentru sferă. Aceste valori au fost colectate în cadrul simulărilor realizate și indică faptul că semnalele procesate au un raport semnal/zgomot mic, rămânând clar definite în fondul semnalelor zgomotoase.

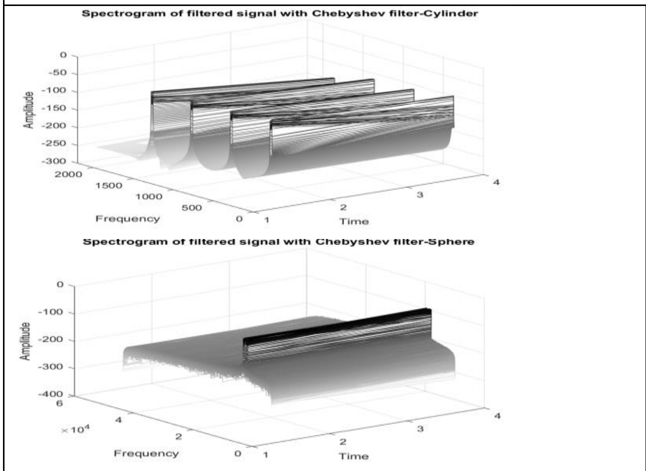
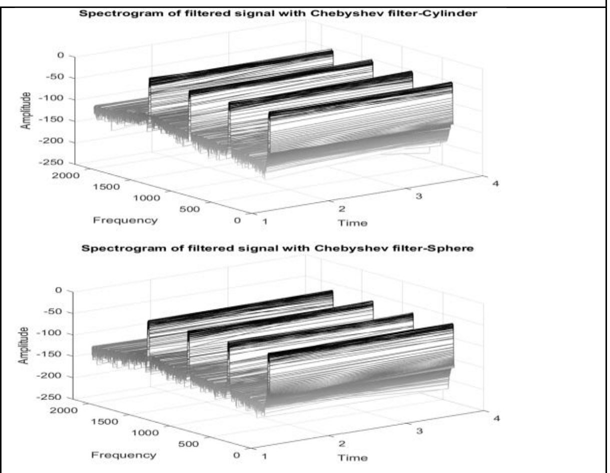
Spectrograme 3D pentru semnalele împrăștiate pe cilindri și sfere rigide și pentru filtre utilizate

<table>
<tr><th colspan="2">Banda de frecvențe 20-2000 Hz</th></tr>
<tr><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adaugat</th></tr>
<tr><th colspan="2">Semnal nefiltrat</th></tr>
<tr><td>


</td><td>


</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adaugat</th></tr>
<tr><th colspan="2">Semnal filtrat</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adaugat</th></tr>
<tr><th colspan="2">Semnal filtrat</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

Spectrogramele 3D ne oferă următoarele informații:

- Peak-urile corespund diferitelor frecvențe de rezonanță acustice. Spectrogramele în bandă îngustă indică modificarea frecvențelor / răspunsului în frecvență și efectul de atenuare.
- Benzile orizontale, întunecate și distribuite uniform, reprezentă contribuția armonicilor la semnalul împrăștiat.
- Pentru benzile de frecvențe 20-2000 Hz și 2000-4000 Hz, filtrul rezonator arată benzile de absorbție bine reprezentate și nu introduce modificarea răspunsului în frecvență a semnalului împrăștiat.

3.4. Împrăștierea undelor acustice pe medii stratificate

O undă sonoră este împrăștiată, nu doar de un obiect solid, ci și de obiecte care, pe lângă proprietăți acustice, cum ar fi densitatea sau compresibilitatea, prezintă și proprietăți elastice care se pot manifeasta în straturile superficiale sau în volumul obiectului. În secțiunea anterioară am simulat raspunsul în frecvență al undelor acustice împrăștiate pe obiecte **rigide** de formă cilindrică și sferică. În acest subcapitolul, interesul nostru de cercetare este extins la împrăștierea undelor pe obiecte solide, pentru care vom considera comportamentul lor la acțiunea undelor de forfecare și de compresiune. O parte din energia acustică pătrunde în obiectul dispersor sub formă de unde de forfecare și de compresiune. La suprafața obiectului apar oscilații ce au un efect important asupra distribuției energiei acustice în câmpul împrăștiat și anume, se modifică unghiului de împrăștiere dar și distribuția energiei totale a undelor împrăștiate [119]. Distribuția multispectrală a undelor acustice împrăștiate este un bun predictor pentru analiza acustică a obiectelor dispersoare. Investigarea experimentală s-a bazat pe simularea unor obiecte dispersoare de formă cilindrică și sferă compuse din două straturi de materiale cu proprietăți elastice diferite și se bazează pe simularea efectelor generate în interiorul și în exteriorul dispersorilor.

3.4.1. Modele matematice

Reprezentarea Helmholtz afirmă că orice câmp vector diferențiat continuu ***u*** poate fi reprezentat ca suma dintre un câmp vectorial irotațional și un câmp vector solenoidal :

$$\boldsymbol{u} = -\nabla\Psi + \Delta \times \mathbf{A} \quad (3.70)$$

Cu alte cuvinte, deplasarea ***u*** este compusă din doi termeni, unul asociat cu unde de compresiune și celălalt cu unde de forfecare. Ambele potențiale satisfac ecuația undei, adică:

$$\nabla^2\Psi = \frac{1}{c_1^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} \quad (3.71a)$$

$$\nabla^2\mathrm{A} = \frac{1}{c_2^2}\frac{\partial^2\mathrm{A}}{\partial t^2} \quad (3.71b)$$

Pentru un sistem de **coordonate cilindric**, $x = rcos\,\theta,\ y = r\sin\theta\,,\ z = z$, vom putea considera faptul că sistemul definit are o simetrie legată de deplasare și presiune în jurul θ = 0 (direcția pozitivă a Ox), și atunci soluția ec. (3.71a) este:

$$\Psi = \sum_{n=0}^{\infty} a_n J_n(k_1 r)\cos n\theta \cdot e^{i\omega t} \quad (3.72)$$

Ecuația vectorială (3.71b) nu poate avea componente în direcțiile r sau θ, iar soluția ei este de forma:

$$A_z = \sum_{n=0}^{\infty} b_n J_n(k_2 r)\sin n\theta \cdot e^{i\omega t} \quad (3.73)$$

Componentele deplasării (compresiune și forfecare) în solid sunt:

$$u_r = \sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{nb_n}{r}J_n(k_2 r) - a_n\frac{d}{dr}J_n(k_1 r)\right]\cos n\theta \quad (3.74)$$

$$u_\theta = \sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{na_n}{r}J_n(k_1 r) - b_n\frac{d}{dr}J_n(k_2 r)\right]\sin n\theta \quad (3.75)$$

Iar deformarea/dilatarea este:

$$\Delta = k_1^2\sum_{n=0}^{\infty} a_n J_n(k_1 r)\cos n\theta \quad (3.76)$$

În stratul de aer adiacent solidului (și care înconjoară obiectul solid) ecuația undei are forma:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_3^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.77)$$

Presupunem că o undă incidentă plană care se deplasează spre dreapta de-a lungul axei polare a unei sferei, în repaus, de rază a, centrată în originea sistemului de coordonate ales. Sfera prezintă caracteristici izotrope. În coordonate sferice, unda incidentă se propagă de-a lungul axei caracteristice unghiului Φ. Componentele nenule ale vectorului potențial sunt A_Φ. În acest caz, potențialul scalar și vector sunt, după cum urmează:

$$\Psi = \sum_{n=0}^{\infty} a_n j_n(k_1 r)P_n(cos\theta) \quad (3.89)$$

și

$$A_\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} b_n j_n(k_2 r)\frac{d}{d\theta}P_n(cos\theta) \quad (3.90)$$

Unda incidentă se scrie:

$$p_i = P_0 e^{-ik_3(rcos\theta - ct)} = P_0 \sum_{n=0}^{\infty}(2n+1)(-i)^n P_n(cos\theta) j_n(k_3 r) e^{-i\omega t} \quad (3.91)$$

Undele acustice împrăștiate rezultate sunt de forma:

$$p_s = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} c_n P_n(cos\theta)[j_n(k_3 r) - in_n(k_3 r)] e^{-i\omega t} \quad (3.92)$$

Se aplică aceleași condiții de frontieră la suprafața sferei și pentru coordonatele sferice:

- Presiunea în aer (adică, în stratul care înconjoară sfera) trebuie să fie egală cu componenta normală a tensiunii din solid, la interfață;
- Componenta radială a deplasării în stratul fluid/aer trebuie să fie egală cu componenta radială a deplasării solidului, la interfață;
- Componenta tangențială a tensiunii de forfecare trebuie să se anuleze la suprafața solidului.

Folosind aceeași metodă ca în cazul împrăștierii pe obiecte de formă cilindrică, va trebui să determinăm coeficientul seriei:

$$c_n = -P_0(2n+1)(-i)^{n+1} \sin\eta_n \, e^{i\eta_n} \quad (3.93)$$

unde variația fazei η_n pentru a- *n*-a undă împrăștiată este:

$$\tan\eta_n = \tan\delta_n\,(x_3)\frac{[\tan\Phi_n + \tan\alpha_n(x_3)]}{\tan\Phi_n + \tan\beta_n(x_3)} \quad (3.94)$$

Parametrii simulării pentru împrăștierea acustică pe obiecte dispersoare de formă cilindrică compuse din două straturi de materiale cu proprietăți elastice diferite

În cadrul simulărilor efectuate, valoarea intregului *n* a fost trunchiată la 0, 1 și 2.
Condițiile, condiționalitățile și parametrii simulării sunt prezentate mai jos.

$p_s = \{c_0[J_0(k_3 r) - iN_0(k_3 r)] + c_1[J_1(k_3 r) - iN_1(k_3 r)]\cos\theta + c_2[J_2(k_3 r) - iN_2(k_3 r)]\cos 2\theta\} e^{-i\omega t}$

$c_0 = -P_0\epsilon_0(-i) \quad \sin\eta_0 e^{i\eta_0} = P_0 i \sin\eta_0 e^{i\eta_0}$

$c_1 = -P_0\epsilon_1(-i)^2 \sin\eta_1 e^{i\eta_1} = 2P_0 \sin\eta_1 e^{i\eta_1}$

$c_2 = -P_0\epsilon_2(-i)^3 \sin\eta_2 e^{i\eta_2} = -2P_0 i \sin\eta_2 e^{i\eta_2}$

$\epsilon_0 = 1$ și $\epsilon_m = 2, \forall\, m > 0.$

<table>
<tr><th colspan="2">$\boldsymbol{c_0 = P_0 i \sin\eta_0 e^{i\eta_0}}$</th></tr>
<tr><td rowspan="3">$\tan\eta_0 = \tan\delta_0(x_3)\cdot\frac{\tan\Phi_0 + \tan\alpha_0(x_3)}{\tan\Phi_0 + \tan\beta_0(x_3)}$</td><td>$\delta_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{J_0(x_3)}{N_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td>$\alpha_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_3 J'_0(x_3)}{J_0(x_3)}\right] = \tan^{-1}\left[\frac{x_3 J_1(x_3)}{J_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td>$\beta_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_3 N'_0(x_3)}{N_0(x_3)}\right] = \tan^{-1}\left[\frac{x_3 N_1(x_3)}{N_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\tan\Phi_0 = -\frac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_0(x_1,\sigma)$</td></tr>
</table>

$$\zeta_0(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_2^2}{2}\frac{\dfrac{x_1J'_0(x_1)}{x_1J'_0(x_1)-J_0(x_1)}}{\dfrac{\frac{\sigma}{1-2\sigma}x_1^2[J_0(x_1)-J_0''(x_1)]}{x_1J'_0(x_1)-J_0(x_1)}}\right]$$

$$J_0''(x) = \frac{1}{4}[J_{-2}(x)-2J_0(x)+J_2(x)] = \frac{1}{4}[(-1)^2J_2(x)-2J_0(x)+J_2(x)] = \frac{1}{2}[J_2(x)-J_0(x)]$$

Unde $x_1 = k_1a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$

$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $\quad c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $\quad c_3 = 343\,\frac{m}{s}$

$c_1 = 2P_0 \sin\eta_1 e^{i\eta_1}$	
$\tan\eta_1 = \tan\delta_1(x_3)\cdot\dfrac{\tan\Phi_1 + \tan\alpha_1(x_3)}{\tan\Phi_1 + \tan\beta_1(x_3)}$	$\delta_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{J_1(x_3)}{N_1(x_3)}\right]$
	$\alpha_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 J'_1(x_3)}{J_1(x_3)}\right]$
	$\beta_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 N'_1(x_3)}{N_1(x_3)}\right]$
$\tan\Phi_1 = -\dfrac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_1(x_1,\sigma)$	
$\zeta_1(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_2^2}{2}\dfrac{\dfrac{x_1 J'_1(x_1)}{x_1 J'_1(x_1) - J_1(x_1)} - \dfrac{2J_1(x_2)}{J_1(x_2) - x_2 J'_1(x_2) + x_2^2 J''_1(x_2)}}{\dfrac{\frac{\sigma}{1-2\sigma}x_1^2[J_1(x_1) - J''_1(x_1)]}{x_1 J'_1(x_1) - J_1(x_1)} + \dfrac{2[x_2 J'_1(x_2) - J_1(x_2)]}{J_1(x_2) - x_2 J'_1(x_2) + x_2^2 J''_1(x_2)}}\right]$	
unde $x_1 = k_1 a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2 a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3 a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$	
$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $c_3 = 343\,\frac{m}{s}$	

$c_2 = -2P_0 i \sin\eta_2 e^{i\eta_2}$ $c_2 = -2P_0 i \sin\eta_2 e^{i\eta_2}$	
$\tan\eta_2 = \tan\delta_2(x_3)\cdot\dfrac{\tan\Phi_2 + \tan\alpha_2(x_3)}{\tan\Phi_2 + \tan\beta_2(x_3)}$	$\delta_2(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{J_2(x_3)}{N_2(x_3)}\right]$
	$\alpha_n(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 J'_2(x_3)}{J_2(x_3)}\right]$
	$\beta_n(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 N'_2(x_3)}{N_2(x_3)}\right]$
$\tan\Phi_2 = -\dfrac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_2(x_1,\sigma)$	
$\zeta_2(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_2^2}{2}\frac{\frac{x_1 J'_2(x_1)}{x_1 J'_2(x_1) - J_2(x_1)} - \frac{8J_2(x_2)}{4J_2(x_2) - x_2 J'_2(x_2) + x_2^2 J''_2(x_2)}}{\frac{\frac{\sigma}{1-2\sigma}x_1^2[J_2(x_1) - J''_2(x_1)]}{x_1 J'_2(x_1) - J_2(x_1)} + \frac{8[x_2 J'_2(x_2) - J_2(x_2)]}{4J_2(x_2) - x_2 J'_2(x_2) + x_2^2 J''_2(x_2)}}\right]$	
unde $x_1 = k_1 a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2 a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3 a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$	
$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $c_3 = 343\,\frac{m}{s}$	

Parametrii simulării pentru împrăștierea acustică pe obiecte dispersoare de formă sferică compuse din două straturi de materiale cu proprietăți elastice diferite

În cadrul simulărilor efectuate, valoarea intregului *n* a fost trunchiată la 0, 1 și 2.

Condițiile, condiționalitățle și parametrii simulării sunt prezentate mai jos.

$p_s = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} c_n P_n(cos\theta)[j_n(k_3 r) - i n_n(k_3 r)]e^{-i\omega t}$

<table>
<tr><td colspan="2">$c_0 = -P_0(-i)\sin\eta_0\, e^{i\eta_0}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$\tan\eta_0 = \tan\delta_0\,(x_3)\dfrac{[\tan\Phi_0 + \tan\alpha_0\,(x_3)]}{\tan\Phi_0 + \tan\beta_0\,(x_3)}$</td><td>$\delta_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{j_0(x_3)}{n_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td>$\alpha_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 j_0'(x_3)}{j_0(x_3)}\right] = \tan^{-1}\left[\dfrac{x_3 j_1(x_3)}{j_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td></td><td>$\beta_0(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 n_0'(x_3)}{n_0(x_3)}\right]$
$= \tan^{-1}\left[\dfrac{x_3 n_1(x_3)}{n_0(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\tan\Phi_0 = -\frac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_0(x_1,\sigma)$
$$\zeta_0(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_2^2}{2}\frac{\dfrac{x_1 j_0'(x_1)}{x_1 j_0'(x_1) - j_0(x_1)}}{\dfrac{x_1^2\left[\frac{\sigma}{1-2\sigma} j_0(x_1) - j_0''(x_1)\right]}{x_1 j_0'(x_1) - j_0(x_1)}}\right]$$
$$j_0''(x) = \frac{1}{4}[j_{-2}(x) - 2j_0(x) + j_2(x)] = \frac{1}{4}[(-1)^2 j_2(x) - 2j_0(x) + j_2(x)] = \frac{1}{2}[j_2(x) - j_0(x)]$$
unde $x_1 = k_1 a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2 a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3 a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$
$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $c_3 = 343\,\frac{m}{s}$</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">$c_1 = 3P_0\sin\eta_1\, e^{i\eta_1}$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">$\tan\eta_1 = \tan\delta_1\,(x_3)\dfrac{[\tan\Phi_1 + \tan\alpha_1\,(x_3)]}{\tan\Phi_1 + \tan\beta_1\,(x_3)}$</td><td>$\delta_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\frac{j_1(x_3)}{n_1(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td>$\alpha_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 j_1'(x_3)}{j_1(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td>$\beta_1(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 n_1'(x_3)}{n_1(x_3)}\right]$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\tan\Phi_1 = -\frac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_1(x_1,\sigma)$
$$\zeta_1(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\frac{x_2^2}{2}\frac{\dfrac{x_1 j_1'(x_1)}{x_1 j_1'(x_1) - j_1(x_1)} - \dfrac{4 j_1(x_2)}{x_2^2 j_2''(x_2)}}{\dfrac{x_1^2\left[\frac{\sigma}{1-2\sigma} j_1(x_1) - j_1''(x_1)\right]}{x_1 j_1'(x_1) - j_1(x_1)} - \dfrac{4[j_1(x_2) - x_2 j_1'(x_2)]}{x_2^2 j_1''(x_2)}}\right]$$
unde $x_1 = k_1 a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2 a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3 a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$
$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $c_3 = 343\,\frac{m}{s}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$c_2 = 5P_0 i\sin\eta_2\, e^{i\eta_2}$</td></tr>
<tr><td></td><td>$\delta_2(x) = \tan^{-1}\left[-\frac{j_2(x_3)}{n_2(x_3)}\right]$</td></tr>
</table>

$\tan\eta_2 = \tan\delta_2\,(x_3)\dfrac{[\tan\Phi_2 + \tan\alpha_2\,(x_3)]}{\tan\Phi_2 + \tan\beta_2\,(x_3)}$	$\alpha_2(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 j_2'(x_3)}{j_2(x_3)}\right]$
	$\beta_2(x_3) = \tan^{-1}\left[-\dfrac{x_3 n_2'(x_3)}{n_2(x_3)}\right]$

$$\tan\Phi_2 = -\frac{\rho_3}{\rho_1}\tan\zeta_2(x_1,\sigma)$$

$$\zeta_2(x_1,\sigma) = \tan^{-1}\left[-\frac{\frac{x_2^2}{2}\left(\frac{x_1 j_2'(x_1)}{x_1 j_2'(x_1) - j_2(x_1)} - \frac{12 j_2(x_2)}{4 j_2(x_2) + x_2^2 j_2''(x_2)}\right)}{\frac{x_1^2\left[\frac{\sigma}{1-2\sigma} j_2(x_1) - j_2''(x_1)\right]}{x_1 j_2'(x_1) - j_2(x_1)} - \frac{12[j_2(x_2) - x_2 j_2'(x_2)]}{4 j_2(x_2) + x_2^2 j_2''(x_2)}}\right]$$

Unde $x_1 = k_1 a = \frac{2\pi\nu}{c_1}a$; $x_2 = k_2 a = \frac{2\pi\nu}{c_2}a$; și $x_3 = k_3 a = \frac{2\pi\nu}{c_3}a$

$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho_1(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$ $\quad c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\sigma)}}$ $\quad c_3 = 343\frac{m}{s}$

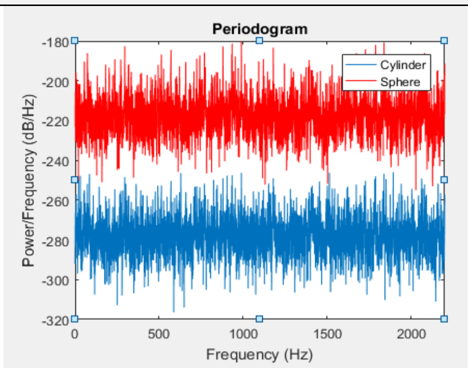
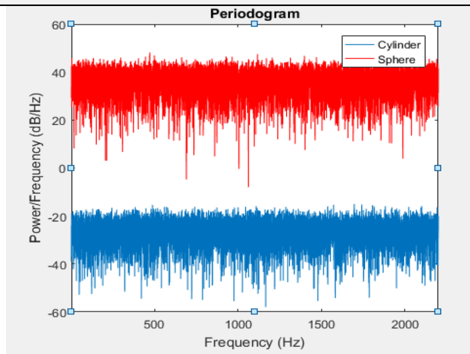
Materialele analizate au fost: fluorură de sodiu, clorură de sodiu, oțel, PVC.

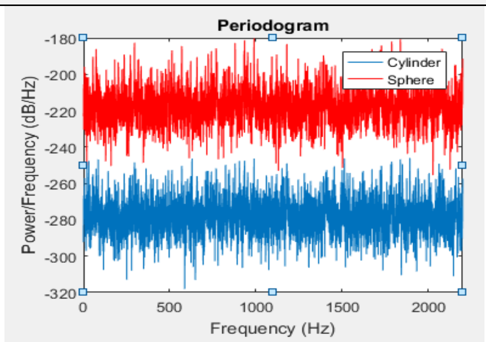
ro1=2560; ρ_1 densitate fluorură de sodiu [kg/m^3]
ro1=2170; ρ_1 densitate clorură de sodiu [kg/m^3]
ro1=7800; ρ_1 densitate oțel [kg/m^3]
ro1=1380; ρ_1 densitate PVC [kg/m^3]

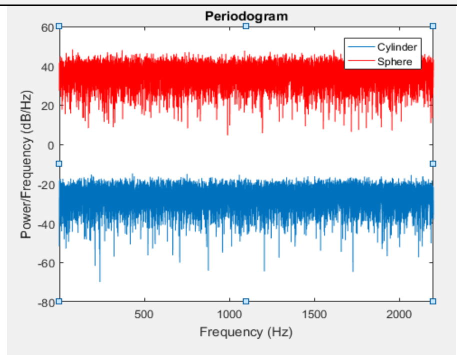
E=79.01*(10^9); modulul lui Young fluorură de sodiu
E=39.98*(10^9); modulul lui Young clorură de sodiu
E=200*(10^9); modulul lui Young oțel
E=2.48*(10^9); modulul lui Young PVC
sigma=0.35; coeficientul Poisson

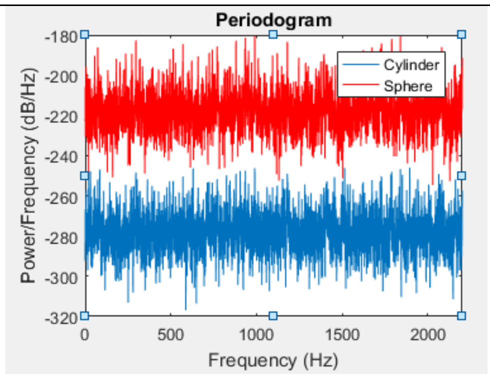
Periodogramele (spectru semnal nefiltrat) pentru geometria cu două straturi (aer-material) în cazul obiectelor solide și elastice de formă cilindrică și sferică

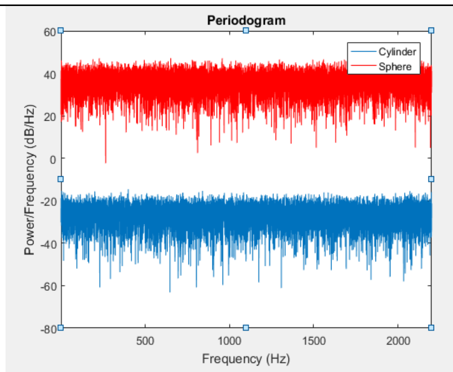
Banda de frecvență 20-2000 Hz

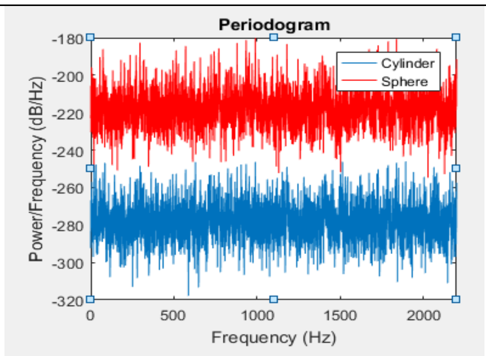
<table>
<tr><th>Material</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adăugat</th></tr>
<tr><td>Fluorură de sodiu</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

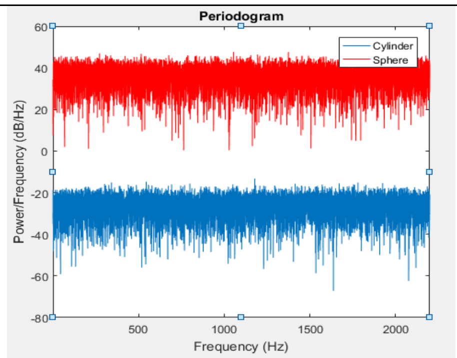
<table>
<tr><th>Material</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adăugat</th></tr>
<tr><td>Clorură de sodiu</td><td>


</td><td>


</td></tr>
<tr><td>Oțel</td><td>


</td><td>


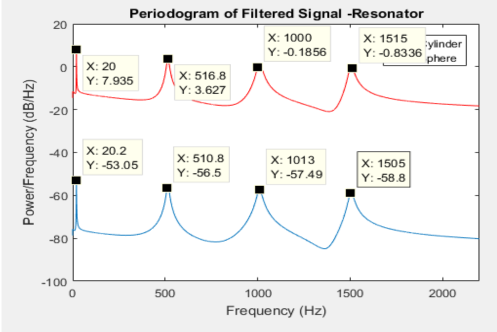
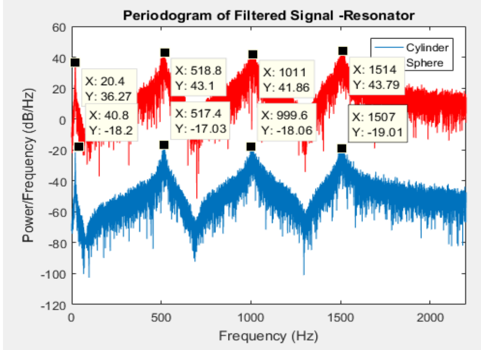
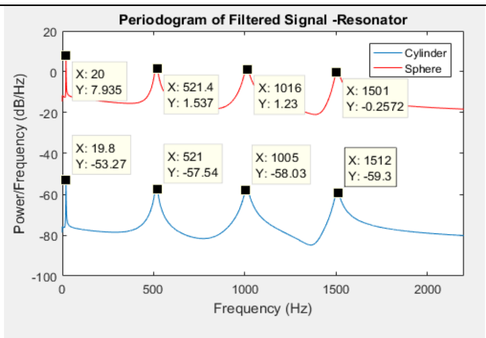
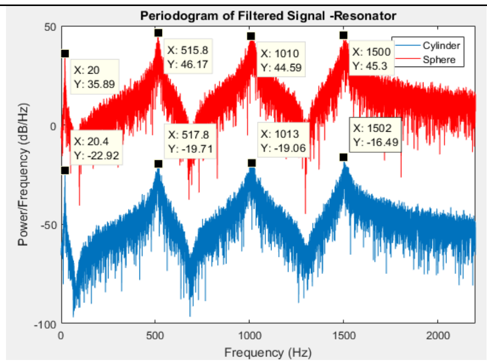
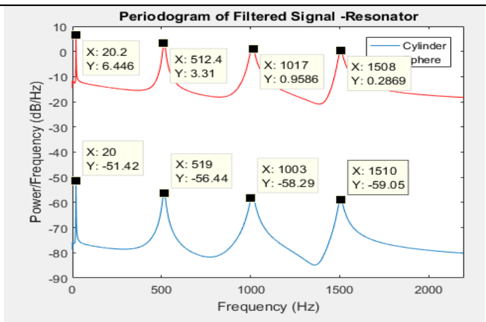
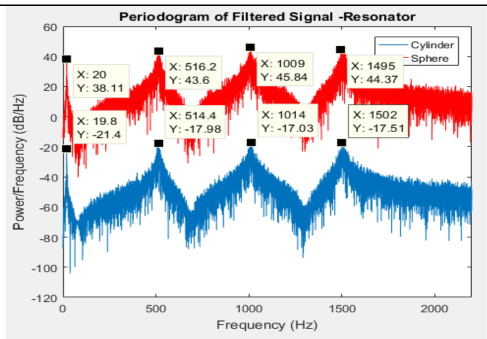
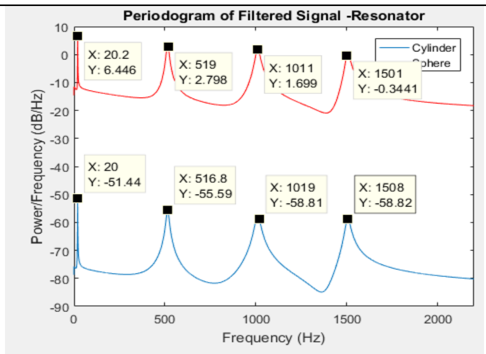
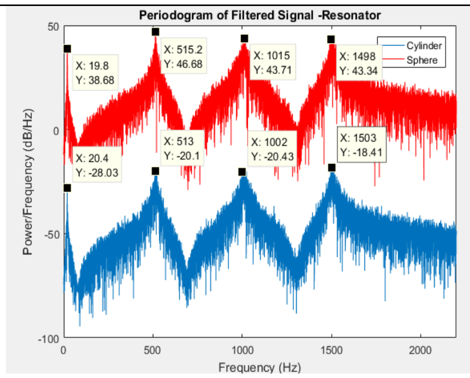
</td></tr>
<tr><td>PVC</td><td>


</td><td>


</td></tr>
</table>

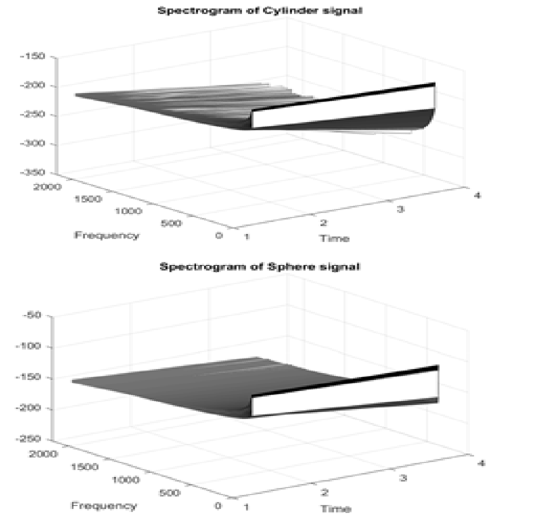
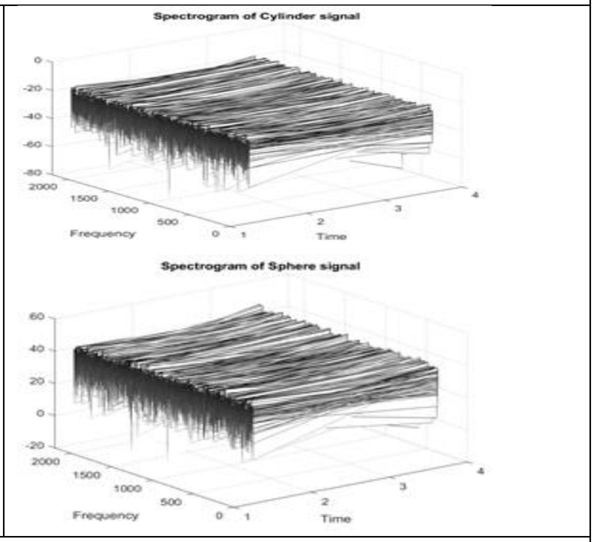
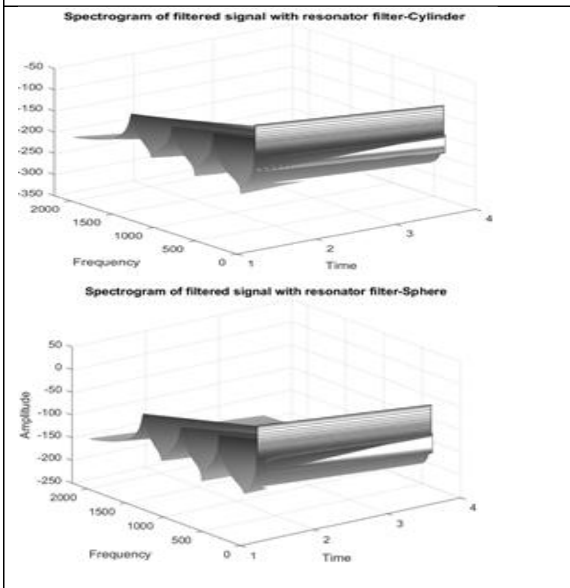
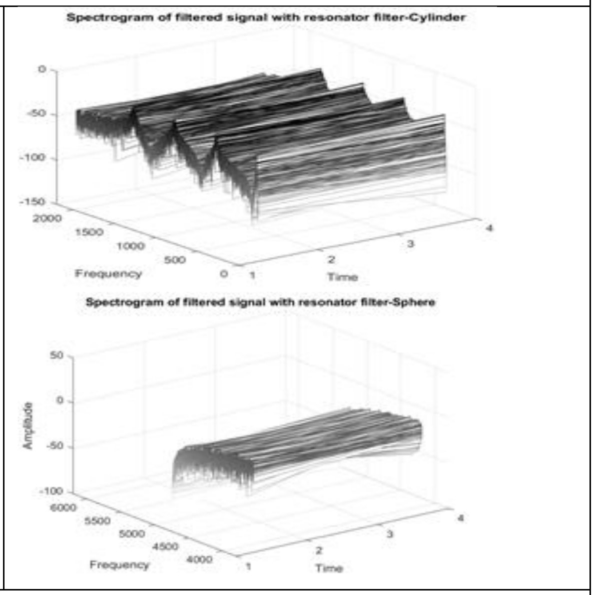
Periodogramele pentru geometria cu două straturi (aer-material) în cazul obiectelor solide și elastice de formă cilindrică și sferică **–** Filtru Rezonator HR

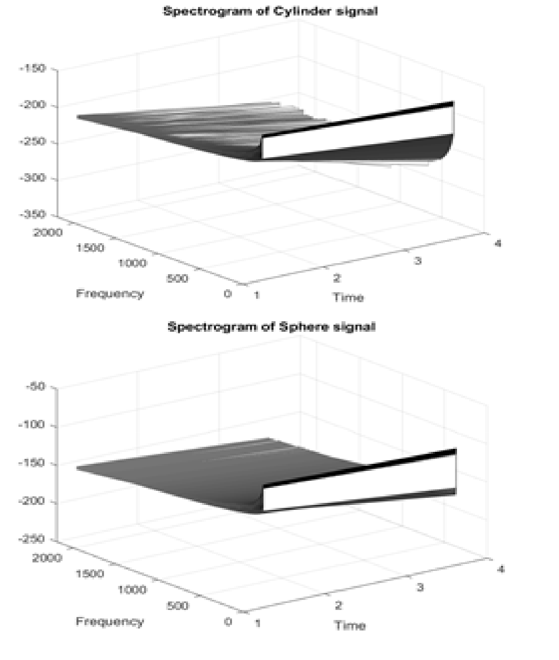
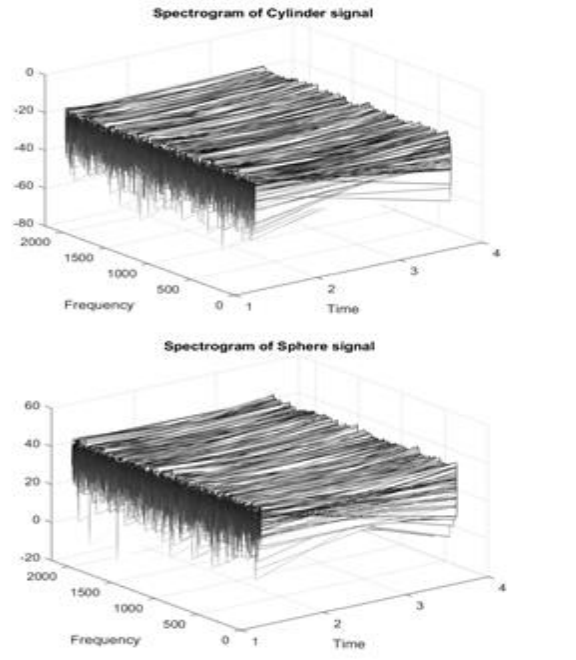
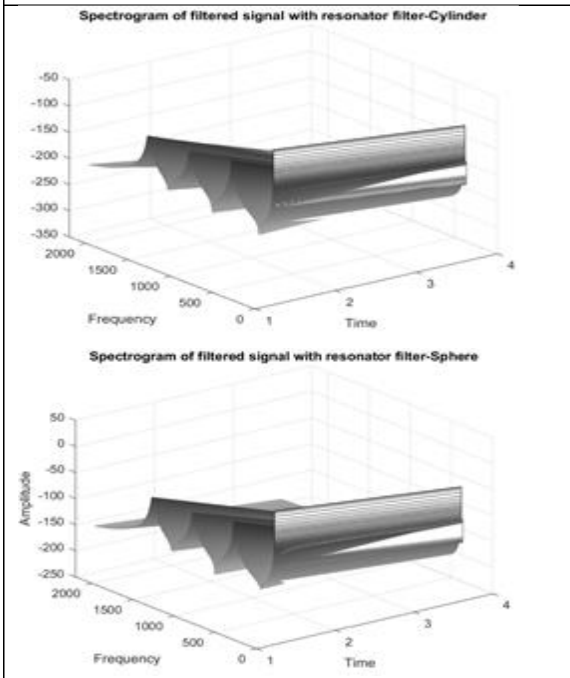
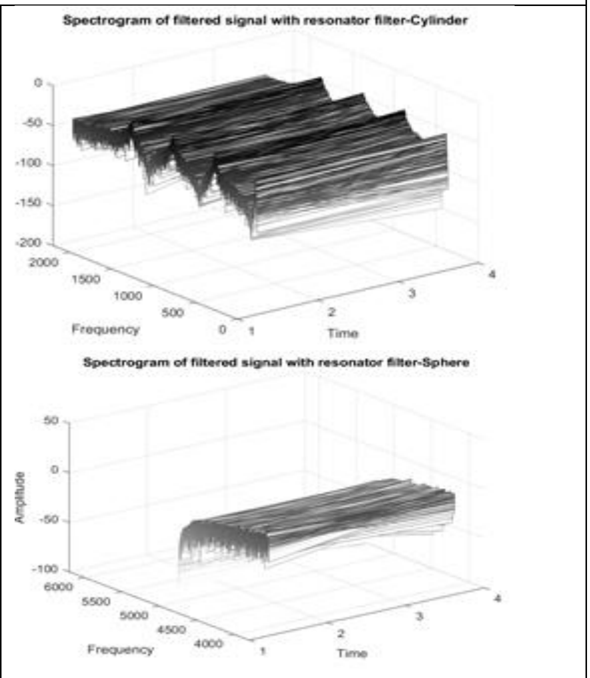
Banda de frecvență 20-2000 Hz

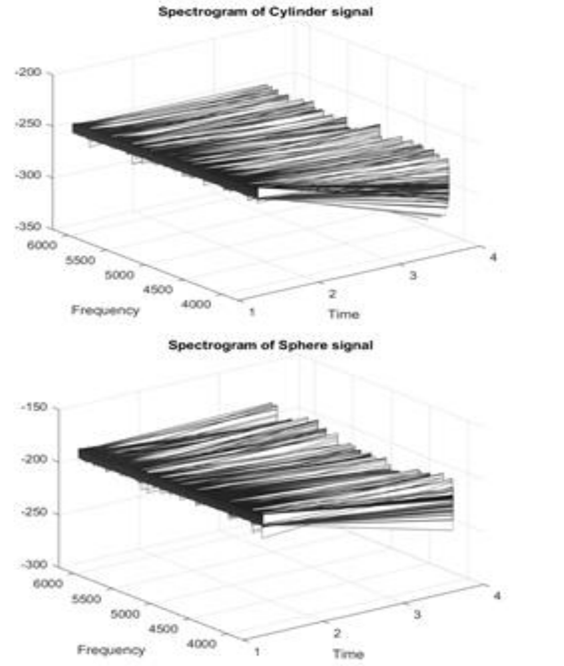
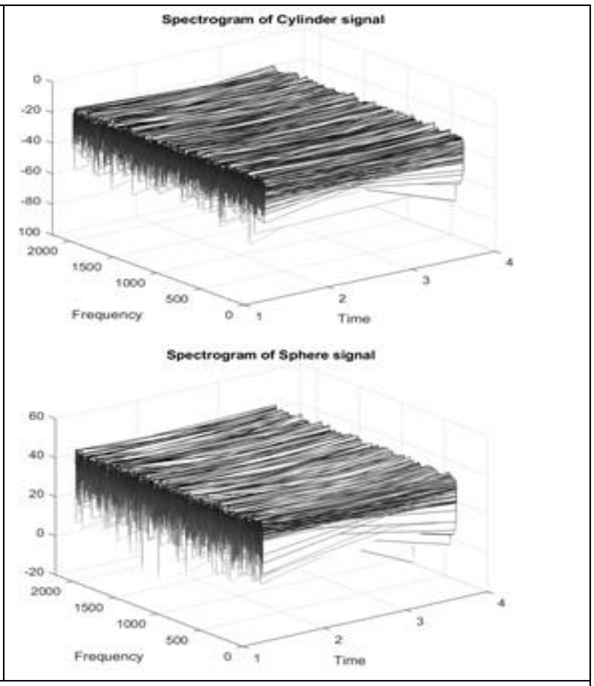
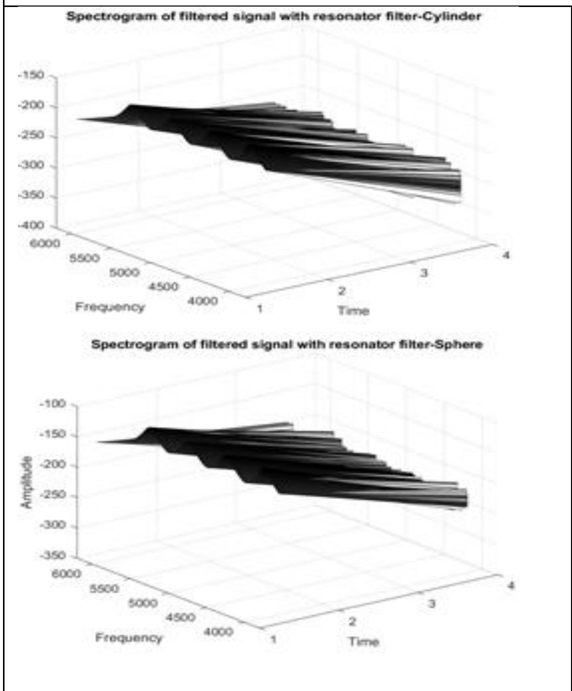
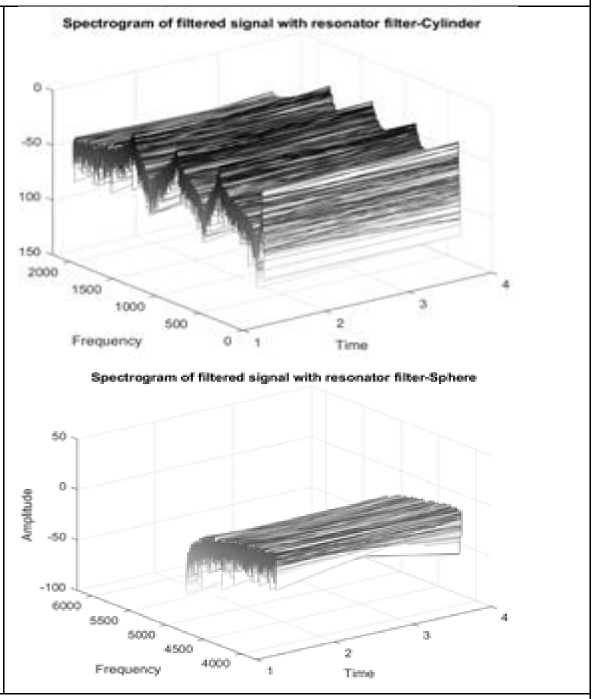
<table>
<tr><th>Material</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adăugat</th></tr>
<tr><td>Fluorură de sodiu</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Clorură de sodiu</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Oțel</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>PVC</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

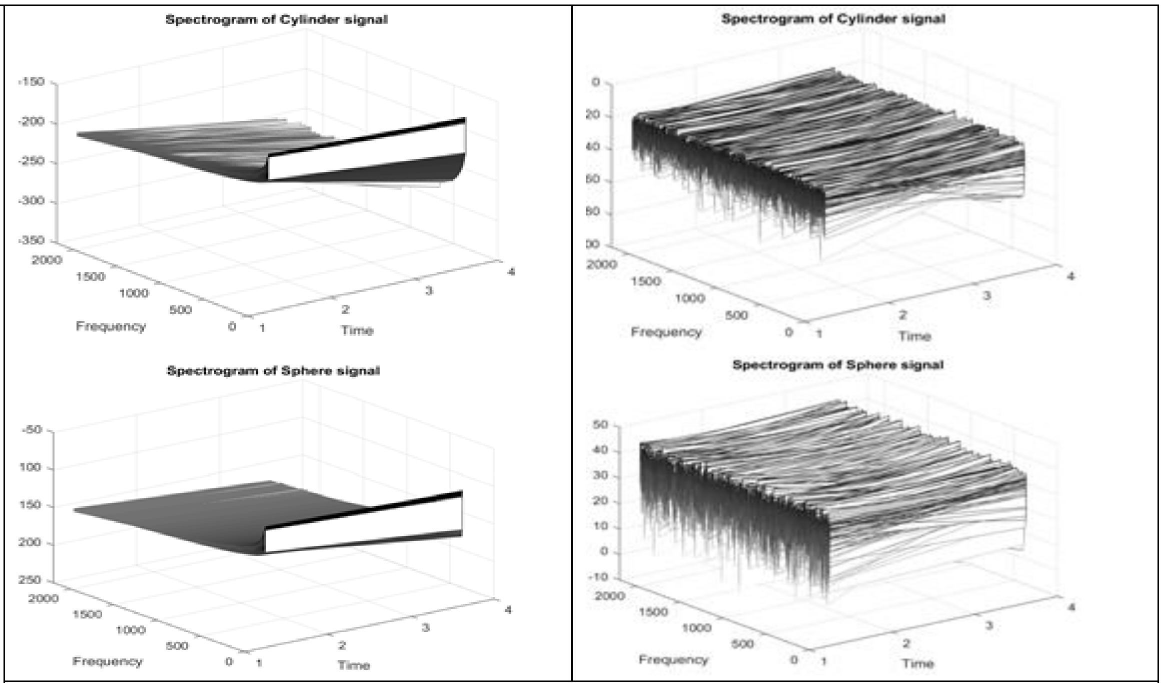
Spectrograme 3D pentru geometria cu două straturi (aer-material) în cazul obiectelor solide și elastice de formă cilindrică și sferică. Prezentăm rezultatele furnizate de filtrul resonator.

Banda de frecvență 20-2000 Hz

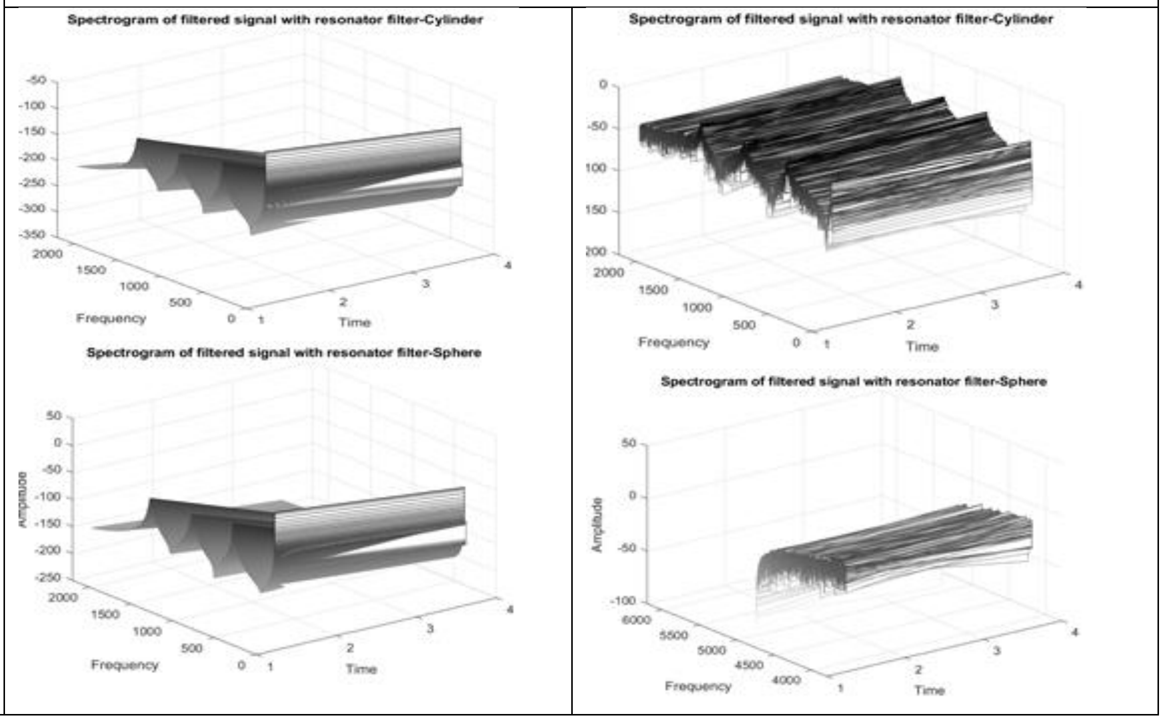
<table>
<tr><th>Material</th><th>Fără zgomot</th><th>Cu zgomot Gaussian adăugat</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Fluorură de sodiu</td><td colspan="2">Semnal nefiltrat</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Filtru rezonator</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Semnal nefiltrat</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="3">Clorură de sodiu</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Filtru rezonator</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Oțel</td><td colspan="2">Semnal nefiltrat</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Filtru rezonator</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>PVC</td><td colspan="2">Semnal nefiltrat</td></tr>
</table>



Filtru rezonator



Datele de simulare prezentate pentru investigarea câmpului acustic împrăștiat de obiecte elastice atunci când s-a considerat abordarea de dublu strat (aer-material) la frontiera obiectului difuzant, ne permit să concluzionăm următoarele:

- Nu există diferențe între rezultatele furnizate într-o abordare locală (distanța dintre emițător și sistemul investigat de 5 cm) și abordarea la distanță (distanța dintre emițător și sistemul investigat de 100 cm). În simularea noastră, s-a evidențiat o separare clară a

semnalelor împrăștiate de obiecte cilindrice și sferice elastice, pentru toate materialele investigate.
- Trebuie să observăm din periodogramele obținute că, în ciuda faptului că forma semnalului este modificată prin retroîmprăștiere, singura modificare notabilă a fost variația ratei putere/frecvență. Această rată crește atunci când distanța dintre emițător/sistemul difuzant crește.
- Cele mai mari peak-uri/vârfuri de răspuns ale semnalului împrăștiat se găsesc în jurul următoarelor frecvențe, 20 Hz, 500 Hz, 1000 Hz și 1500 Hz. Există variații foarte mici pentru diferite condiții experimentale (mai puțin de 1%).

Spectrogramele indică în mod clar benzile de absorbție, pentru fiecare frecvență de rezonanță furnizate de filtrul rezonator.

CAPITOLUL 4

SIMULĂRI PRIVIND ÎMPRĂȘTIEREA ACUSTICĂ INVERSĂ PE ȚINTE CU TRĂSĂTURI GEOMETRICE COMPLEXE ȘI PE ȚINTE MULTIPLE

4.1. Analiza împrăștierii inverse pe obiecte neconvexe în formă de deltoid, în domeniul frecvențelor joase

În această secțiune sunt prezentate rezultatele simulării pentru problemele de împrăștiere acustică pentru **obstacole transparente**/ușor penetrabil acustic, **impenetrabil acustic**/rigide la propagarea unelor acustic și **absorbante** datorate împrăștierii undelor acustice plane pe obiecte neconvexe în formă de deltoid, în domeniul frecvențelor acustice. S-au derulat experimente de simulare privind împrăștierea acustică prin mai multe configurații (cu aceleași obstacole, dar cu dimensiuni și orientări variabile) folosind ecuații ce permit construirea de obiecte difuzante cu diferite caracteristici. De asemenea, sunt prezentate rezultatele asociate împrăștierii acustice în aproximarea câmpurilor îndepărtate și valorile secțiunii transversale acustică (ACS) asociate a configurației de împrăștiere pe direcțiile de analiză.

Pentru scopurile noastre de simulare, se folosesc trei dimensiuni de obstacole cu secțiunea acustică transversală în formă de deltoid neconvex:

A. $x(t) = (\cos t + 0.65 \cos 2t \, , 1.5 \sin t) \quad 0 \leq t \leq 2\pi$
B. $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t \, , 1.5 \sin t) \quad 0 \leq t \leq 2\pi$
C. $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t \, , 2 \sin t) \quad 0 \leq t \leq 2\pi$

De asemenea, se folosesc două lungimi de undă k = 12,5664 (4π) și 6,2832 (2π). Sunt prezentate rezultatele simulării pentru intensitatea câmpului împrăștiat în spatele obstacolelor de la o undă plană care se propagă pe direcția x.

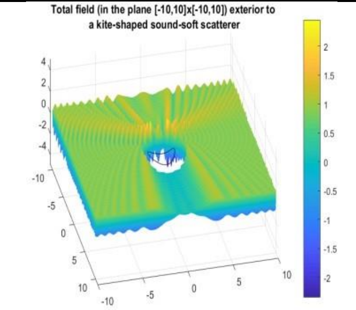
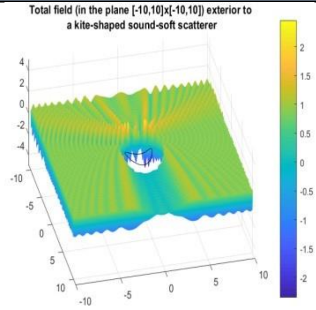
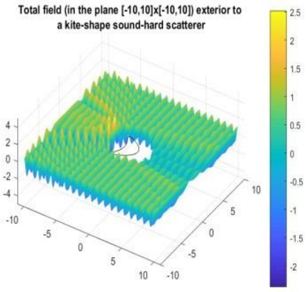
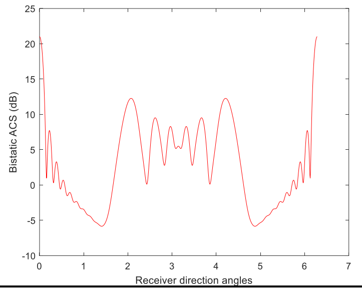
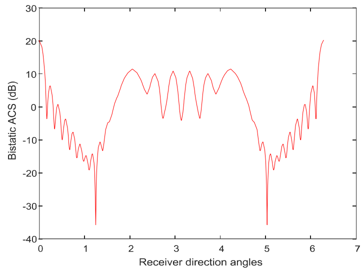
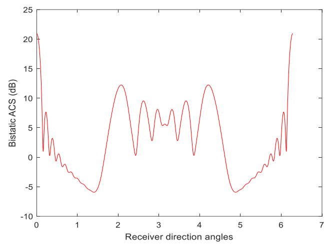
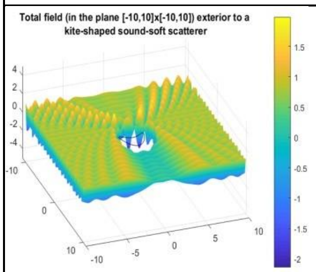
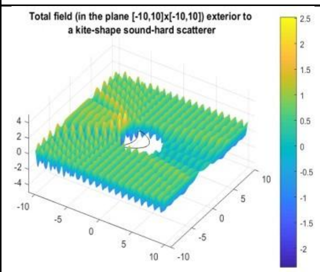
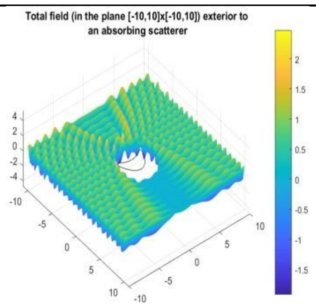
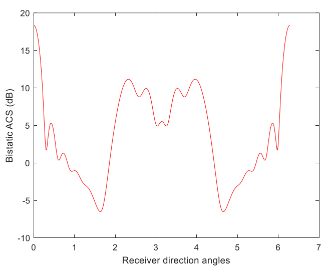
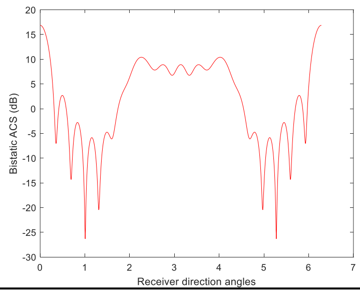
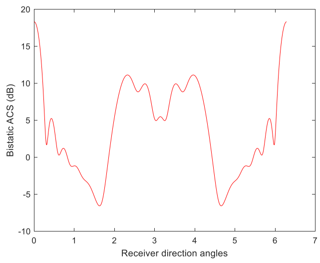
<table>
<tr><th colspan="3">A. x(t) = (cos t +0,65 cos 2t, 1,5 sin t), 0 ≤ t ≤ 2π</th></tr>
<tr><th>A. Obstacol usor penetrabil acustic</th><th>B. Obstacol rigid sau impenetrabil acustic</th><th>C. Obstacol absorbant acustic</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei T 5.27e-07</td><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei T 6.18e-05</td><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei T 1.66e-05</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei T 1.36e-07</td><td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei T 1.01e-07</td><td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei T 1.25e-07</td></tr>
</table>

Fig. 4.1. Vizualizarea câmpului împrăștiat și detectarea regiunii fără radiații (umbre) în spatele obstacolului în formă de deltoid $x(t) = (\cos t + 0.65\cos 2t\,, 1.5\sin t)$ (liniile 1 si 3) și variația secțiunii acustice transversale bistatice (ACS) pentru obstacolul în formă de deltoid calculată folosind matricea T (liniile 2 si 4) și parametrii declarați. Simularea foloseste detecția bistatică.

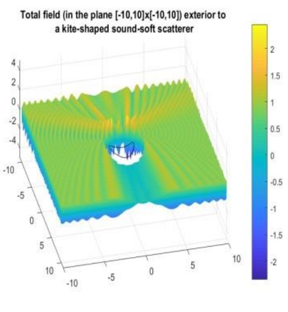
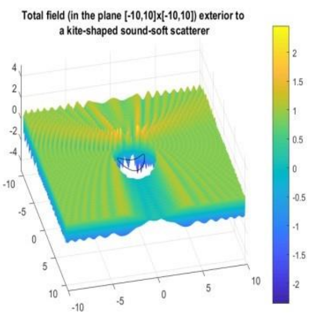
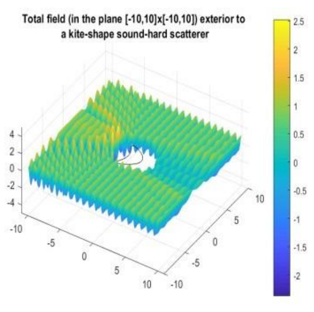
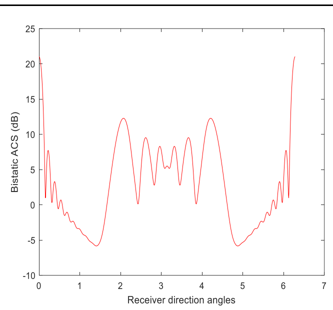
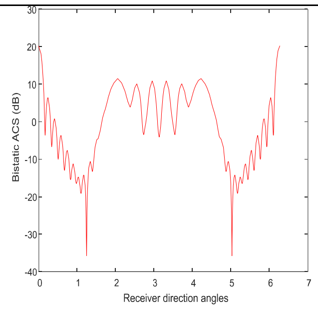
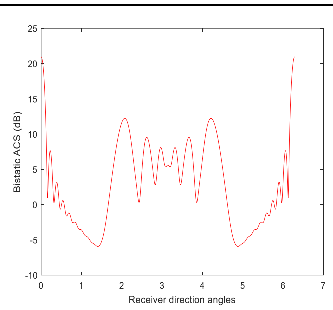
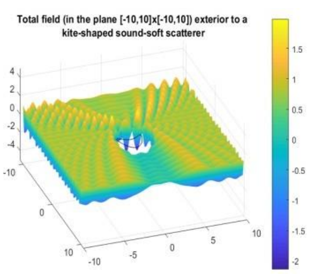
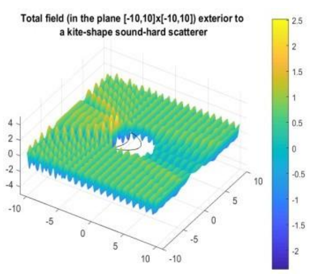
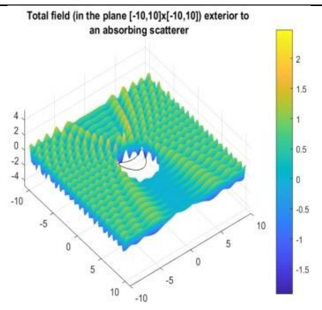
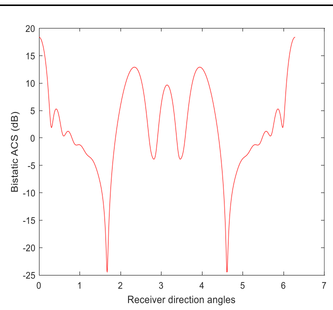
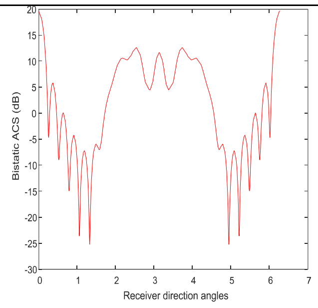
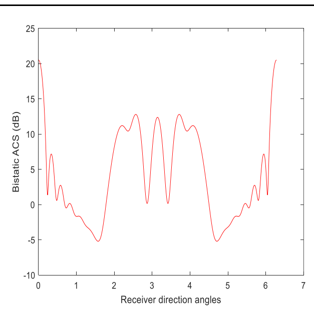
<table>
<tr><th colspan="3">$B.\ x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t,\ 1.5 \sin t) \qquad 0 \leq t \leq 2\pi$</th></tr>
<tr><th>A. Obstacol usor penetrabil acustic</th><th>B. Obstacol rigid sau impenetrabil acustic</th><th>C. Obstacol absorbant acustic</th></tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 5.13e-06</td>
<td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 7.47e-04</td>
<td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 1.30e-04</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei 1.51e-07</td>
<td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei 2.75e-08</td>
<td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei 3.27e-08</td>
</tr>
</table>

Fig. 4.2. Vizualizarea câmpului împrăștiat și detectarea regiunii fără radiații (umbre) în spatele obstacolului în formă de deltoid $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t\,, 1.5 \sin t)$ (liniile 1 si 3) și variația secțiunii acustice transversale bistatice (ACS) pentru obstacolul în formă de deltoid calculată folosind matricea T (liniile 2 si 4) și parametrii declarați. Simularea foloseste detecția bistatică.

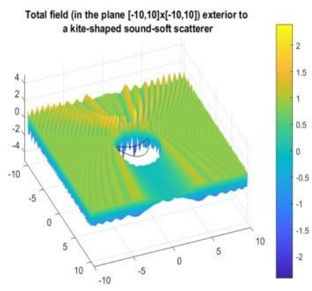
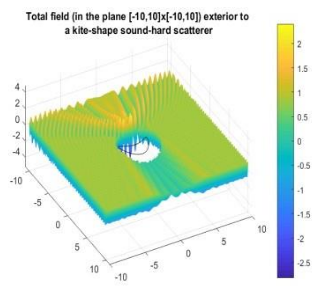
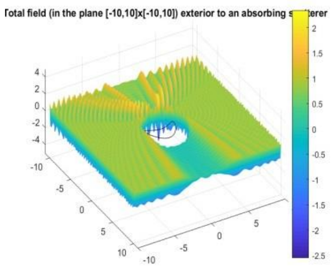
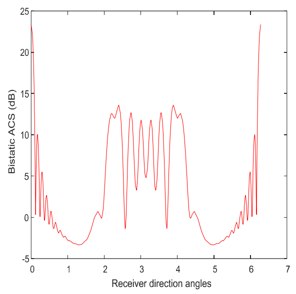
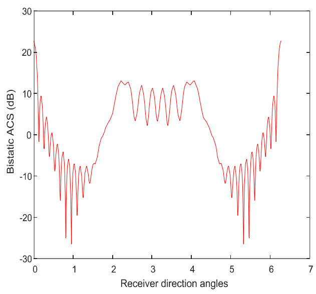
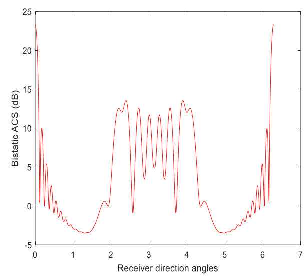
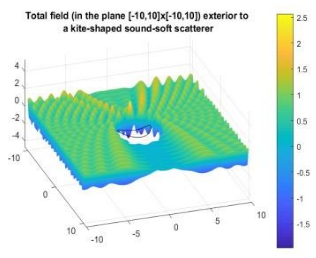
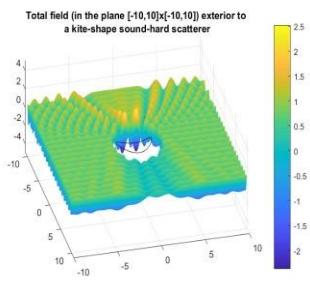
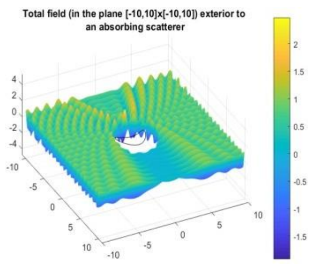
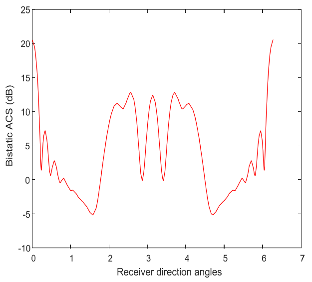
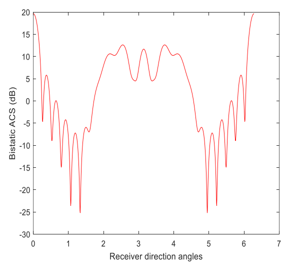
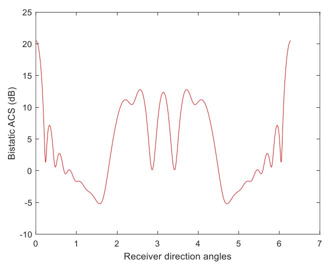
<table>
<tr><th colspan="3">C. $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t\ ,\ 2 \sin t)$ $0 \leq t \leq 2\pi$</th></tr>
<tr><th>A. Obstacol usor penetrabil acustic</th><th>B. Obstacol rigid sau impenetrabil acustic</th><th>C. Obstacol absorbant acustic</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 6.25e-05</td><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 1.82e-03</td><td>k=4*pi,
Estimarea erorii matricei 4.03e-04</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>k=2*pi,
Estimarea erorii matricei 3.55e-08</td><td>K=2*pi,
Estimarea erorii matricei 2.75e-08</td><td>K=2*pi,
Estimarea erorii matricei 1.25e-01</td></tr>
</table>

Fig. 4.3. Vizualizarea câmpului împrăștiat și detectarea regiunii fără radiații (umbre) în spatele obstacolului în formă de deltoid $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t\ , 2 \sin t)$ (liniile 1 si 3) și variația secțiunii acustice transversale bistatice (ACS) pentru obstacolul în formă de deltoid calculata folosind matricea T (liniile 2 si 4) și parametrii declarați. Simularea foloseste detecția bistatică.

Acuratețea estimării realizată cu ajutorul matricii T este între *error* = 1.82e-03 pentru un obiect absorbant acustic de forma $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t\,, 2 \sin t)$ și k = 2π până la *error* = 2.75e-08 pentru un obiect rigid sau impenetrabil acustic de forma $x(t) = (\cos t + 0.75 \cos 2t\,, 1.5 \sin t)$ și k = 2π. Se observă o mai bună estimare a împrăștierii acustice pentru undele acustice cu lungimi de undă mai mari (frecvențe mai mici). Remarcăm totuși, că se poate obține și o estimare bună a erorii matricei T în câmpul îndepărtat indus de o undă acustică cu lungime de undă mai mică (frecvența mai mare). De asemenea, observăm că nu există comportamente clar definite în ceea ce privește variația secțiunii acustice transversale bistatice în cazul obstacolelor ușor penetrabile acustic și a celor absorbante. Această constatare este una așteptată deoarece ambele cazuri implică o cantitate de energie acustică incidentă absorbită în straturile superficiale ale obstacolului. S-a mai constat o acuratețe mai mare în estimarea ACS, prin creșterea numarului de „peak-uri", în cazul obstacolului rigid sau impenetrabil acustic deși, se observă că și împrăștierea secundară este bine reprezentată. Această constatare se bazează pe faptul că întreaga energie a câmpului acustic incident este "întoarsă" de obiect în câmpul acustic îndepartat și este distribuită între lobul central și lobii secundari.

Rezultatele simulărilor indică o acuratețe mai mare a modelului matricei de tranziție T pentru cazurile câmpului îndepărtat generat de unde acustice cu lungimi de undă mai mici.

4.2. Experimente de simulare privind împrăștierea inversă a undelor pe ținte multiple – o problemă de optimizare

Pentru detectarea și localizarea unui număr finit de ținte împrăștietoare cu dimensiuni mici în raport cu lungimea de undă incidentă, am folosit algoritmul MUltiple Signal Classification (MUSIC) care permite ca obiectele împrăștietoare să poată fi încorporate într-un mediu oarecare [71, 80, 81, 139-142]. Prin studierea problemei de împrăștiere inversă a undelor acustice am urmărit localizarea unei neomogenități din mediu, care este văzută ca un perturbator, folosind cunoștințele privind undele împrăștiate de aceasta.

Algoritmul MUSIC este capabil să detecteze ținte punctiforme utilizând atât modelul Born de aproximare a unei unde acustice distorsionate DWBA (adică amplitudinea undei împrăștiate este mult mai mică decât amplitudinea undei incidente), cât și modelele de împrăștiere mai generale care iau în considerare împrăștierea multiplă între ținte, prin folosirea formulării Foldy-Lax (FL) a modelului de împrăștiere multiplă.

Rezultatele acestui studiu de simulare sunt bazate pe determinarea poziției obiectelor împrăștietoare, plecând de la măsurători ale *magnitudinea și fazei semnalelor împrăștiate reconstruite prin utilizarea matricea de răspuns multistatic de împrăștiere* K, în aproximația câmpului îndepărtat. Țintele sunt plasate într-un mediu de propagare cu proprietăți cunoscute. Algoritmul MUSIC nu are nevoie să cunoască tipul țintelor care trebuiesc detectate și nici nu urmărește să determine proprietățile acestor ținte. În acest studiu, extindem domeniul de aplicare către domeniul de frecvențe joase, dar se menține neschimbată condiția de omogenitate a mediului de propagare presupus cunoscut. S-au folosit următoarele lungimi de undă normalizate 1; 0,5; 0,1 și 0,05 astfel încât condiția că țintele să aibă dimensiuni mult mai mici decât lungimea de undă să fie respectată. Reconstituim poziția țintelor punctiforme plasate într-un mediu de propagare omogen, în limitele aproximațiilor FL și DWBA [157-159].

Optimizarea, bazată pe localizarea unor ținte plasate la distanțe reciproce mici, este încă o provocare în cazul unui mediu afectat de zgomote. Datele culese de senzori sunt imprecise, iar semnalele reconstruite prezintă diferențe importante în raport cu datele furnizate de propagarea în medii neafectate de zgomot. Am folosit valori extreme ale zgomotului, adică valoarea maximă P = 0,09 și minimă P = 0,0009 pentru a investiga și optimiza distribuția spațială a țintelor în raport cu valorile diferite ale lungimii de undă și modul în care zgomotul afectează procesul de reconstrucție. Problemele ridicate de împrăștiere inversă datorită modificării parametrilor sunt studiate folosind **distanța Fréchet** care cuantifică distanța dintre curbele ce relaționează magnitudinea și faza semnalelor reconstruite și numărul de emițători, pentru cazuri de propagare în medii neafectate de zgomot (cazul teoretic) și de propagare în medii afectate de zgomot (situație reală), pentru ambele aproximări FL și DWBA. Soluția optimă este asigurată de acele dispuneri ale țintelor și de setul de parametri ce caracterizează procesul de propagare care **minimizează distanța Fréchet și maximizează amplitudinea semnalului reconstruit**.

Diagrama bloc a metodei propuse este prezentată în figura 4.4.

Am studiat o problema de optimizare pentru patru forme de distribuție spațială a țintelor. Figura 4.5 descrie geometria emițătoarelor (reprezentați drept pătrate) și a țintelor (reprezentate ca cercuri). Setul de emițătoare este situat simetric în coordonatele: (-20,0); (-15,0); (-10,0); (-5,0) și (-2,0). Țintele sunt plasate după cum urmează:

- configurație triunghi (T), (0, -8), (-1, -9), (1, -9), (-2, -10), (0, -10) 2, -10);
- configurația paralelogram (P), (-2, -8), (0, -8), (2, -8), (0, -9), (2, -9), (4, -9);
- configurația diamant (D), (0, -6), (-2, -8), (0, -10), (2, -8), (0, -7), (0, -9);
- configurația elipsă (E), (0, -8), (-3, -9), (3, -9), (-3, -10), (3, -10) .

Toate pozițiile sunt corelate cu valorile lungimii de undă λ. Separarea spațială a țintelor în configurațiile geometrice alese este de mărimea λ, $\sqrt{2}\lambda$ and 2λ. Coeficientul de împrăștiere sau puterea de împrăștiere a țintelor este τ = (1; 1.3; 1.6; 1.6; 1.3; 1).

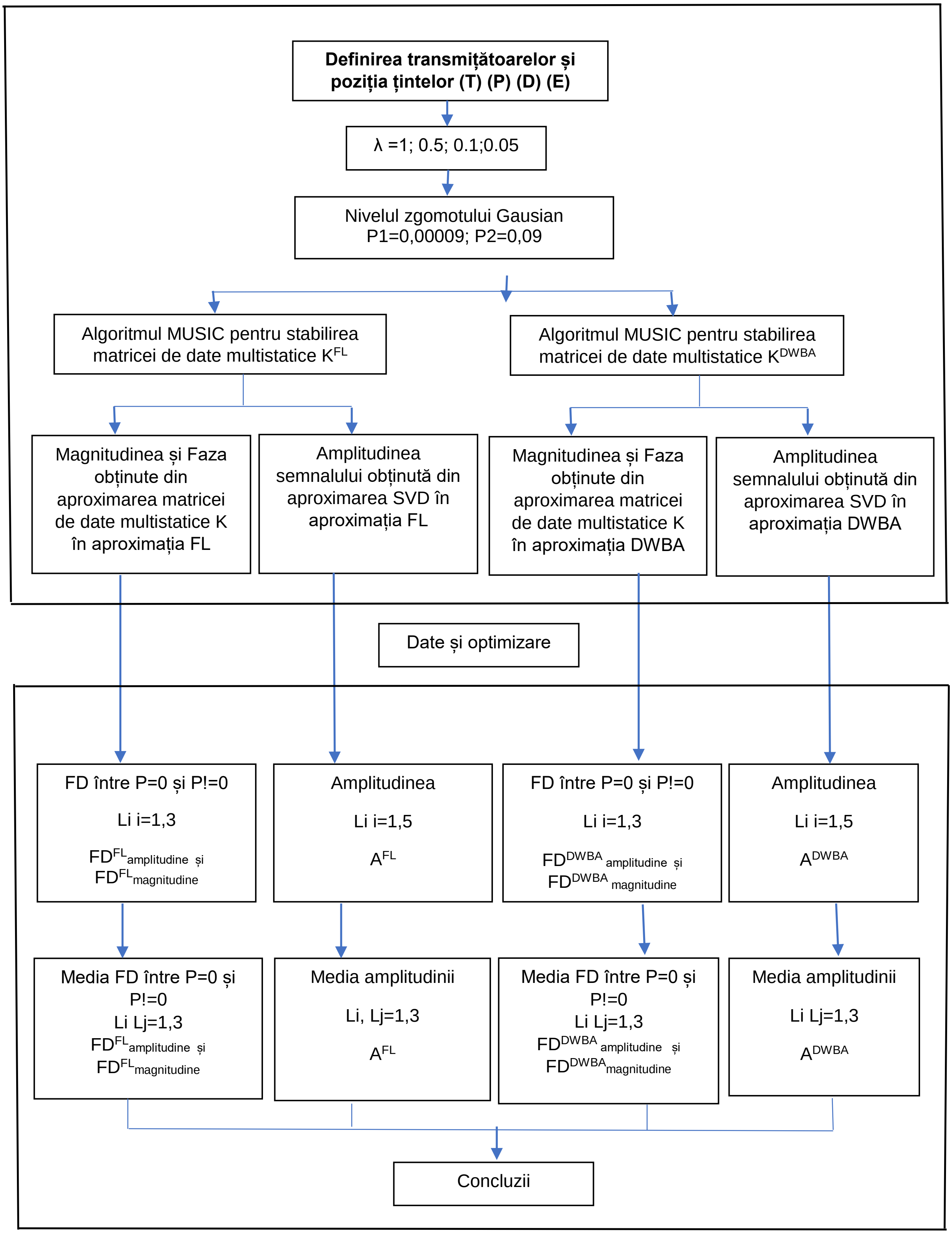


Figura 4.4 – Algoritmul metodei

Unele exemple ale simulării spațiului de propagare și a rezultatelor reconstrucției, pentru aproximarea DWBA și FL, sunt prezentate în figurile 4.7 – 4.10, pentru cazul în care țintele au o localizare spațială triunghiulară și pentru toți parametrii de simulare. În scopul optimizării procesului, au fost determinate curbele ce descriu variația magnitudinii și fazei semnalului împrăștiat reconstruit prin metodele FL și DWBA (fig. 4.6). Problema este aplicabilă atât datelor fără zgomot cât și pentru cele afectate de zgomot.

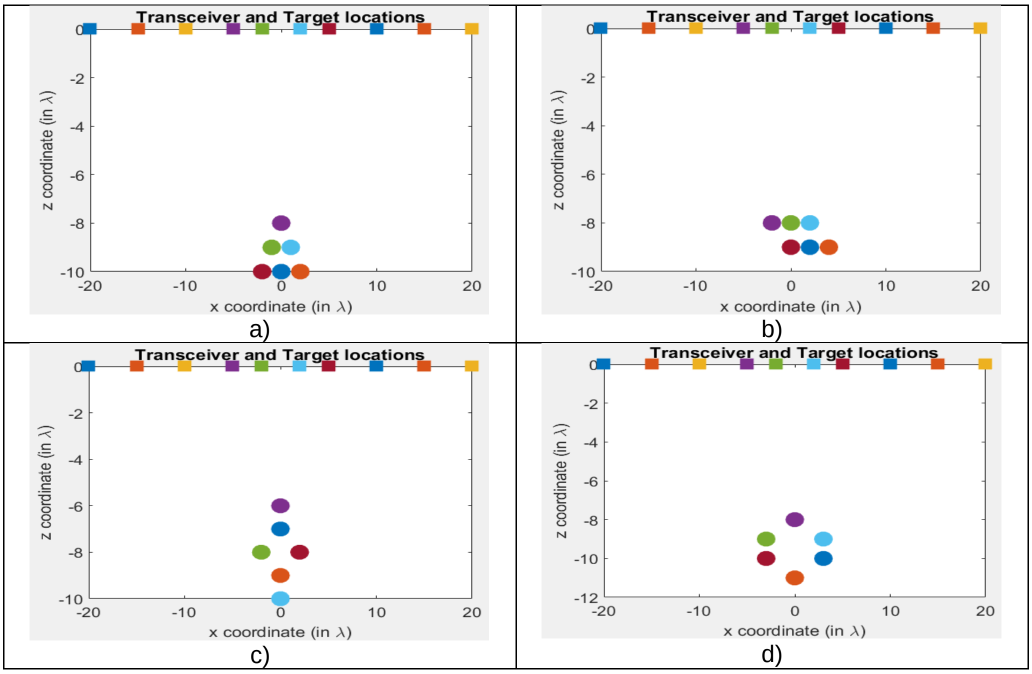


Figura 4.5. Inițializarea spațiului de propagare: 10 emițătoare (reprezentate ca pătrate) și 6 ținte (reprezentate ca cercuri) sunt încorporate într-un mediu de propagare uniform. Distribuția spațială a țintelor este reprezentată ca: a) triunghi (T); b) paralelogram (P); c) diamant (D); și d) elipsă (E).

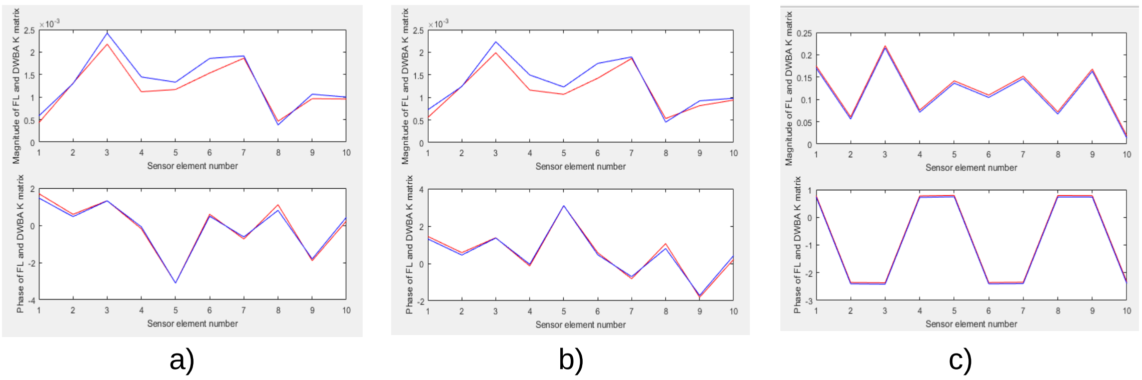
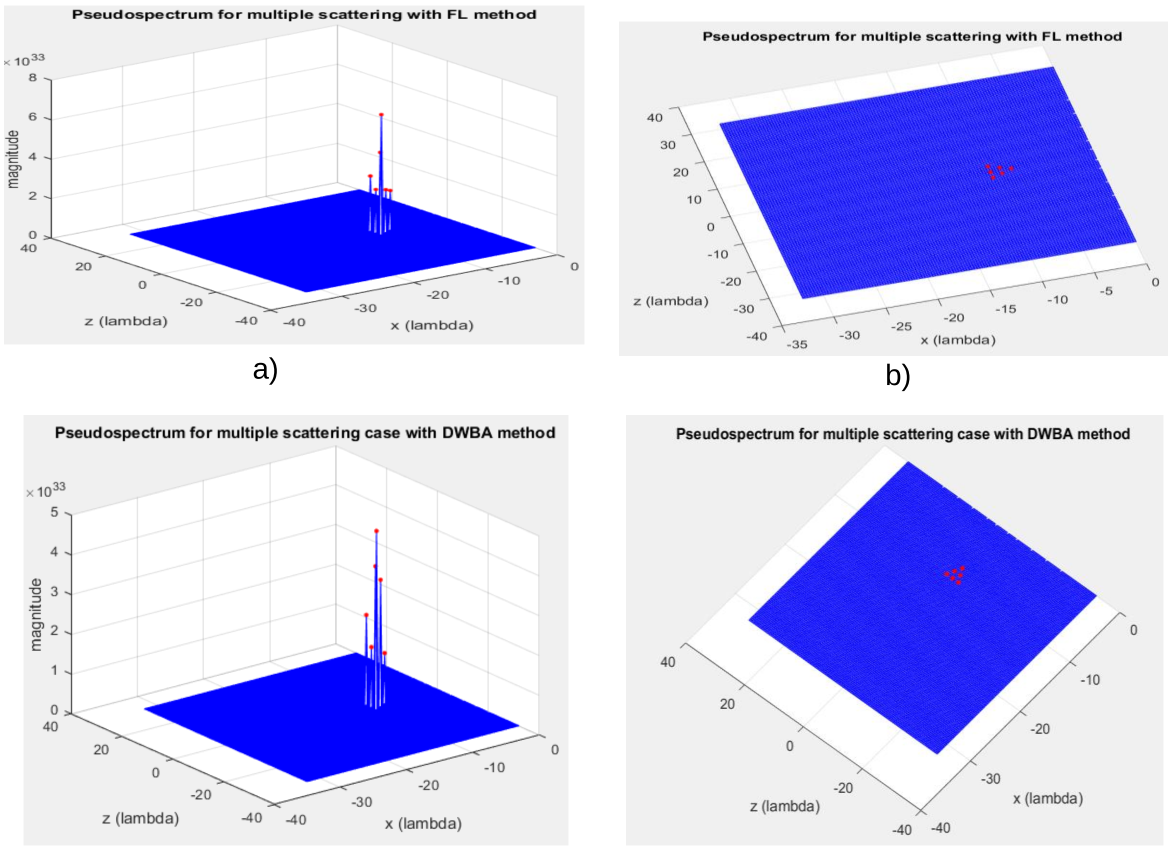


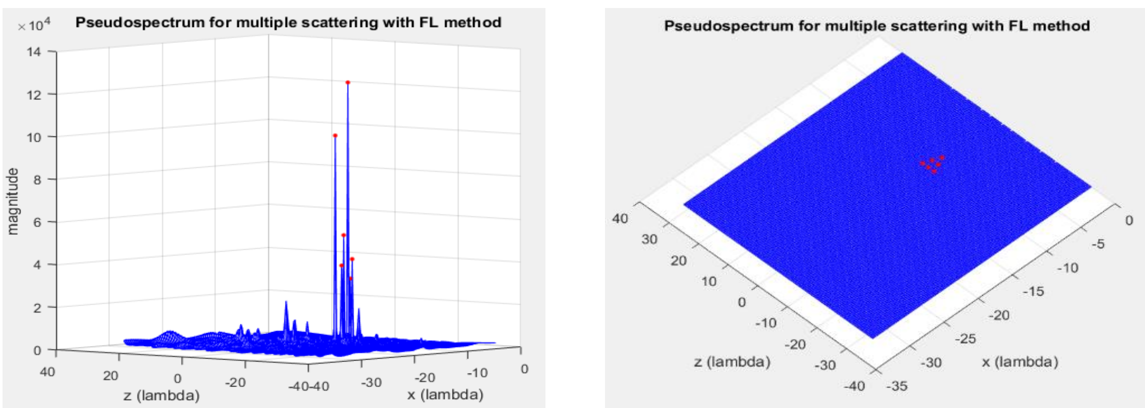
Figura 4.6. Curbele de variație a ”Magnitudinii” (prima linie) și a "Fazei" (linia a doua) obținute din aproximarea matricei de date multistatică K, în aproximația FL (albastru) și aproximarea DWBA (roșu) versus N numărul emițătoarelor, pentru distribuția spațială triunghi (T) a țintelor și λ = 1. a) P = 0 (fără zgomot); b) P=0,00009 (zgomot aleator); c) P=0,09 (zgomot aleator).



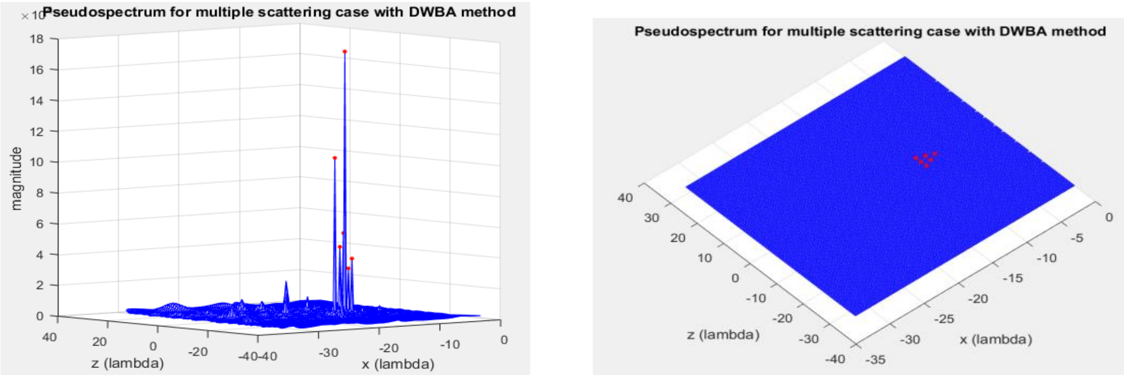
a) b)

c) d)

Figura 4.7 Localizarea exactă a țintelor obținută prin reconstruirea semnalului împrăștiat pentru vizualizarea 3D (coloana stângă) și 2D (coloana din dreapta), pentru P=0 (fără zgomot), λ = 1, distribuție spațială triunghi (T), în abordarea descompunerii în valori singulare (SVD). a) - b) pseudospectrum pentru împrăștierea multiplă în aproximarea FL; c) - d) pseudospectrum pentru împrăștiere multiplă în aproximarea DWBA.

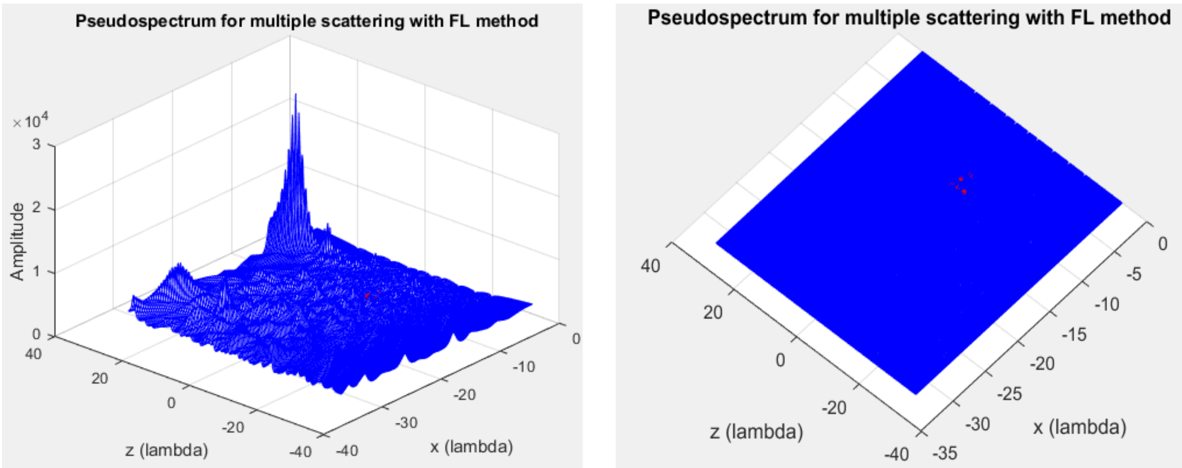


a) b)

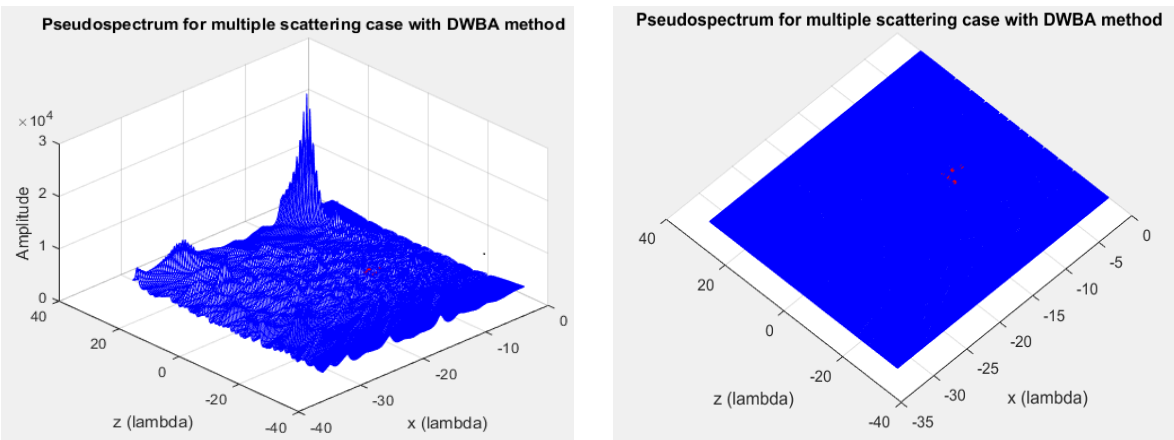


c) d)

Figura 4.8 Localizarea exactă a țintă obținută prin reconstruirea semnalului împrăștiat pentru vizualizarea 3D (coloana stângă) și 2D (coloana din dreapta), pentru P = 0.00009 (zgomot aleator de valoare mic), λ = 1, distribuția spațială a țintelor triunghi (T), în abordarea descompunerii în valori singulare (SVD). a) - b) pseudospectrum pentru împrăștierea multiplă în aproximarea FL; c) - d) pseudospectrum pentru împrăștiere multiplă în aproximarea DWBA.



a) b)



c) d)

Figura 4.9 Localizarea exactă a țintă obținută prin reconstruirea semnalului împrăștiat pentru vizualizarea 3D (coloana stângă) și 2D (coloana din dreapta), pentru P = 0.09 (zgomot aleator de valoare mare), λ = 1, distribuția spațială a țintelor triunghi (T), în abordarea descompunerii în valori singulare (SVD). a) - b) pseudospectrum pentru împrăștierea multiplă în aproximarea FL; c) - d) pseudospectrum pentru împrăștiere multiplă în aproximarea DWBA.

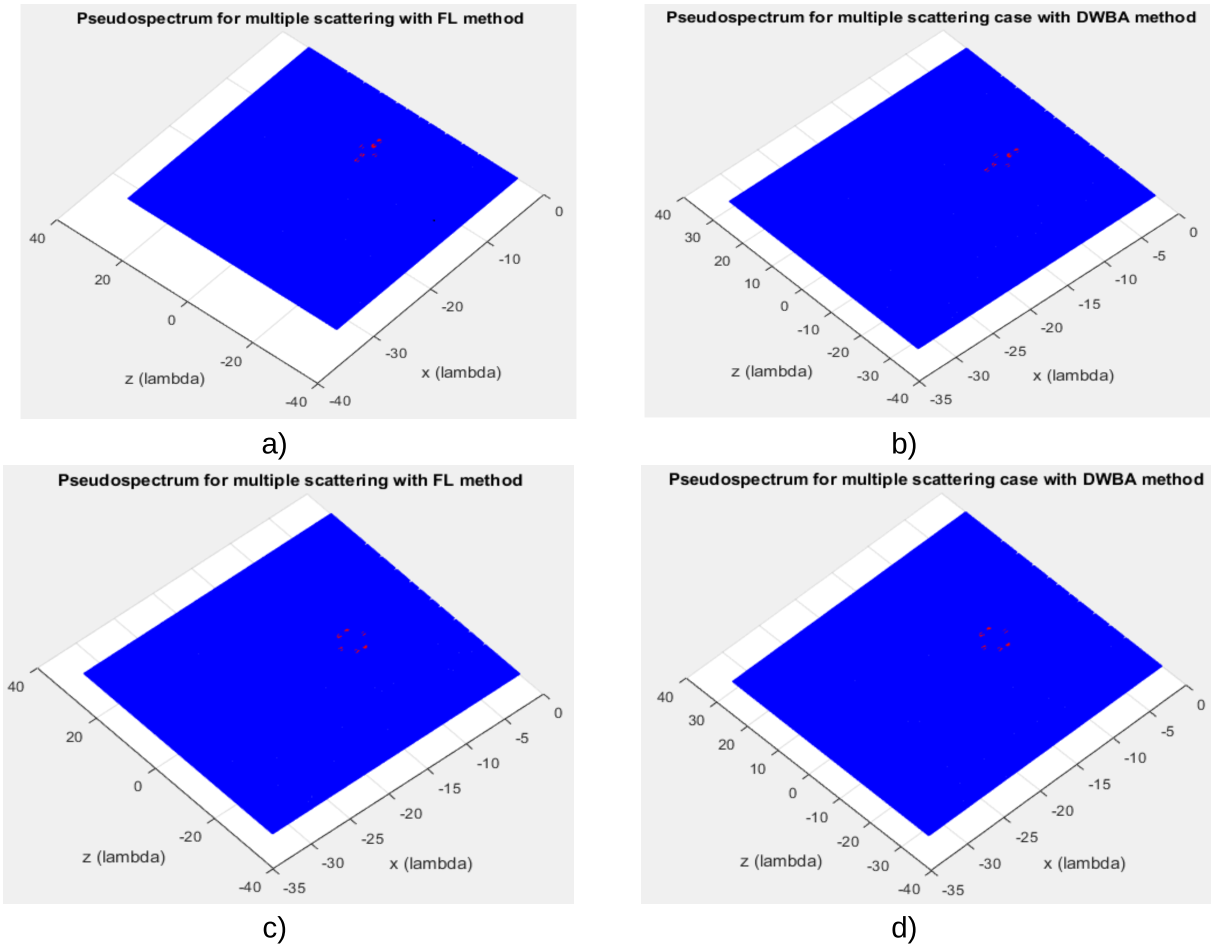


Figura 4.10. Detectarea țintelor dispuse sub formă de diamant D (linia de sus) și elipsă E (linia de jos) în caz pentru P = 0.09 (zgomot aleator), pentru aproximări FL și DWBA.

Tabelul 4.1. Distanța Fréchet (FD) și valorile caracteristice ”magnitudine” și ”fază”, și amplitudinea valorilor semnalelor împrăștiate (A) obținute în experimentele de simulare pentru obstacolele 2D, extrase din lista Li (i = 1: 6).

Geometrie	**Nivel zgomot (dB)**	**SNR (dB)**	**λ**	**Magnitudine**		**Fază**		**Amplitudine**	
				FD^{FL}	**FD^{DWBA}**	**FD^{FL}**	**FD^{DWBA}**	**A^{FL}**	**A^{DWBA}**
(T)	0	-	1	-	-	-	-	3.18E+33	2.69E+33
		-	0.5	-	-	-	-	3.18E+33	2.69E+33
		-	0.1	-	-	-	-	1.43E+33	1.03E+33
		-	0.05	-	-	-	-	1.43E+33	1.03E+33

	0.00009	22.38	1	0.18E-3	0.20E-3	3.03582	3.12496	72073	63082
		22.38	0.5	0.18E-3	0.20E-3	3.03582	3.12496	72073	63082
		22.38	0.1	0.18E-3	0.20E-3	3.03582	3.12496	13173	12729
		22.38	0.05	0.18E-3	0.20E-3	3.03582	3.12496	13173	12729
	0.09	6.3	1	0.21688	0.21835	2.94609	3.00016	480	469
		6.3	0.5	0.21688	0.21835	2.94609	3.00016	480	469
		6.3	0.1	0.21688	0.21835	2.94609	3.00016	187	177
		6.3	0.05	0.21688	0.21835	2.94609	3.00016	187	177
(P)	0	-	1	-	-	-	-	5.72E+33	3.94E+33
		-	0.5	-	-	-	-	5.72E+33	3.94E+33
		-	0.1	-	-	-	-	1.56E+33	1.29E+33
		-	0.05	-	-	-	-	1.56E+33	1.29E+33
	0.00009	22.66	1	0.21E-3	0.00028	0.27809	0.28758	97896	91591
		22.66	0.5	0.21E-3	0.00028	0.27809	0.28758	97896	91591
		22.66	0.1	0.21E-3	0.00028	0.27809	0.28758	44955	43475
		22.66	0.05	0.21E-3	0.00028	0.27809	0.28758	44955	43475
	0.09	8.9	1	0.22223	0.22249	2.21685	2.27478	562	560
		8.9	0.5	0.22223	0.22249	2.21685	2.27478	562	560
		8.9	0.1	0.22223	0.22249	2.21685	2.27478	191	187
		8.9	0.05	0.22223	0.22249	2.21685	2.27478	191	187
(D)	0	-	1	-	-	-	-	3.61E+33	2.68E+33
		-	0.5	-	-	-	-	3.61E+33	2.68E+33
		-	0.1	-	-	-	-	8.76E+33	1.61E+33
		-	0.05	-	-	-	-	8.76E+33	1.61E+33
	0.00009	22.12	1	0.18E-3	0.00029	0.15783	0.21925	85708	77328
		22.12	0.5	0.18E-3	0.00029	0.15783	0.21925	85708	77328
		22.12	0.1	0.18E-3	0.00029	0.15783	0.21925	69885	61827
		22.12	0.05	0.18E-3	0.00029	0.15783	0.21925	69885	61827
	0.09	3.3	1	0.22100	0.22121	3.70183	3.70754	687	676
		3.3	0.5	0.22100	0.22121	3.70183	3.70754	687	676
		3.3	0.1	0.22100	0.22121	3.70183	3.70754	524	514
		3.3	0.05	0.22100	0.22121	3.70183	3.70754	524	514
(E)	0	-	1	-	-	-	-	4.79E+33	3.93E+33
		-	0.5	-	-	-	-	4.79E+33	3.93E+33
		-	0.1	-	-	-	-	9.35E+32	1.34E+33
		-	0.05	-	-	-	-	9.35E+32	1.34E+33
	0.00009	21.62	1	0.13E-3	0.0001	1.8960	0.2143	93064	75146
			0.5	0.13E-3	0.0001	1.8960	0.2143	93064	75146
			0.1	0.13E-3	0.0001	1.8960	0.2143	30912	24563
			0.05	0.13E-3	0.0001	1.8960	0.2143	30912	24563
	0.09	9,32	1	0.22068	0.2205	2.0014	2.0671	661	661
			0.5	0.22068	0.2205	2.0014	2.0671	661	661
			0.1	0.22068	0.2205	2.0014	2.0671	200	201
			0.05	0.22068	0.2205	2.0014	2.0671	200	201

Tabelul 4.2. Cele mai mici valori ale $FD^{FL}_{magnitudine}$ si $FD^{DWBA}_{magnitudine}$ pentru diferitele distribuții spațiale și lungimi de undă, în aproximația FL și DWBA, din lista LLi (i = 1,2). Primele trei linii conțin valorile medii ale datelor

obținute pentru zgomotul multiplicativ aleator și ultimele două linii pentru zgomotul Gaussian alb aditiv cu varianță de 0,01 și 0,1.

P=0 vs. P=0.00009						P=0 vs. P=0.09					
λ	Geometrie	$FD^{FL}_{magnitudine}$	λ	Geometrie	$FD^{DWBA}_{magnitudine}$	λ	Geometrie	$FD^{FL}_{magnitudine}$	λ	Geometrie	$FD^{DWBA}_{magnitudine}$
0.5	(T)	0.21E-3	0.5	(E)	0.33E-3	1	(T)	0.217	1	(E)	0.345
1	(D)	0.18E-3	1	(P)	0.24E-3	1	(D)	0.183	1	(P)	0.244
1	(D)	0.17E-3	0.5	(E)	0.20E-3	1	(D)	0.174	1	(E)	0.345
0.5	(P)	0.20E-3	1	(D)	0.94E-3	1	(E)	0.020	1	(E)	0.020
0.5	(T)	0.23E-3	0.5	(E)	0.33E-3	1	(D)	0.042	1	(D)	0.062

Valorile FD pentru curbele "Magnitudine" în ambele aproximări, prezentate în Tabelul 4.1, prezintă variații atât cu lungimea de undă cât și cu distribuția geometrică spațială a țintelor. Distribuțiile de tip diamant (D) și elipsă (E) au valorile FD mai mari, conform analizei comparative, pentru cele două modele de aproximare (Tabelul 4.2). "Amplitudinea" este influențată mai mult de zgomot. Aproximarea Foldy-Lax reprezintă un model cu o mai bună toleranță la acțiunea zgomotului, în timp ce modelul DWBA este guvernat de un proces de reconstrucție mai instabil, efectele zgomotului din mediul de propagare influențând semnalele reconstruite.

În cazul experimentele de simulare care urmăresc detectarea și localizarea unui număr finit de ținte realizate cu ajutorul algoritmului MUltiple Signal Classification (MUSIC) ce utilizează datele din matricea de răspuns multistatic s-au desprins următoarele concluzii:

- Au fost utilizate două aproximări, formularea Foldy-Lax (FL) a modelului de împrăștiere multiplă și modelul Born de aproximare a unei unde distorsionate (DWBA). Distanța Fréchet este un instrument ușor de implementat într-un algoritm de optimizare a problemei împrăștierii inverse. Optimizarea este realizată prin minimizarea valorilor FD și căutarea valorilor maxime ale amplitudinii semnalelor împrăștiate spre înapoi.
- Rezultatele numerice arată o eficacitate mai ridicată a aproximării Foldy-Lax în identificarea locațiilor țintelor.
- Rezultatele noastre au indicat că eficiența localizării țintelor depinde în mod marginal de amplasarea țintelor interioare în geometriile alese, dar depinde puternic de lungimea de undă și de nivelul zgomotului.
- Ambele aproximări funcționează stabil și pot tolera zgomote moderate.
- Problema împrăștierii inverse a fost folosită cu success pentru identificarea locațiilor țintelor multiple, în special pentru ținte cu împachetare strânsă, cum ar fi geometria diamant și elipsă, cu distanțe între ținte având valorile λ, $\sqrt{2}\lambda$.

LISTA DE LUCRĂRI

Drd Necula Maria (Stan)

Articole publicate în volume indexate Web of Science, Scopus / ISI Proceedings

- **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu și Luminița Moraru, BACKSCATTERING PROBLEMS BY A NON-CONVEX KITE-SHAPE OBJECTS IN ACOUSTIC FREQUENCY DOMAIN, AIP Conference Proceedings 2071, 040008 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5090075

- Dorin Bibicu, **Maria (Stan) Necula** și Luminița Moraru, ACOUSTIC RADIATION FROM BAFFLED VIBRATING PLATES WITH VARIOUS GEOMETRIES - SIMULATION RESULTS, AIP Conference Proceedings 2071, 040009 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5090076

- Dorin Bibicu, **Maria (Stan) Necula** și Luminița Moraru , INVERSE SCATTERING PROBLEM FOR CONCEALED OBJECTS DETECTION, AIP Conference Proceedings 2218, 030007 (2020), https://doi.org/10.1063/5.0001012

- **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu și Luminița Moraru, ANALYSIS OF BACKSCATTERING DATA FROM CLOSELY SPACED SCATTERERS USING THE K MATRIX INFORMATION, Sensors & Transducers, Vol. 245, Issue 6, pp. 99-104

Articole publicate in baze de date internationale (indexat EBSCO)

- **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu, Simona Moldovanu și Luminita Moraru, Performance analysis of an array of sensors based on the direction of arrival algorithm, ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI MATHEMATICS, PHYSICS, theoretical mechanics FASCICLE II, YEAR X (XLI) 2018, No. 1, pp 65-69, **DOI:** https://doi.org/10.35219/ann-ugal-math-phys-mec.2019.1.06

1. **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu, Luminita Moraru, Vibration of rectangular plates: fundamental mode and integer multiple of the fundamental period of vibration, ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI MATHEMATICS, PHYSICS, THEORETICAL MECHANICS FASCICLE II, YEAR XI (XLII) 2019, No. 1, pp 43-48, **DOI:** https://doi.org/10.35219/ann-ugal-math-phys-mec.2019.1.06
2. Maria (Stan) Necula, Dorin Bibicu, Luminita Moraru, Cristian-Victor-Eugen Rusu,, Multiple closely spaced scatterers location based MUSIC via inverse scattering amplitude estimation, ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI, MATHEMATICS, PHYSICS, THEORETICAL MECHANICS FASCICLE II, YEAR XII (XLIII) 2020, No. 1, pp 1-12, DOI: https://doi.org/10.35219/ann-ugal-math-phys-mec.2020

Participare conferinte naționale și internaționale

1. **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu, Luminita Moraru, BACKSCATTERING PROBLEMS BY A NON-CONVEX KITE-SHAPE OBJECTS IN ACOUSTIC FREQUENCY DOMAIN, TIM 18 Physics Conference, 24 - 26 Mai 2018, Timișoara, România

2. Dorin Bibicu, **Maria (Stan) Necula** și Luminita Moraru, ACOUSTIC RADIATION FROM BAFFLED VIBRATING PLATES WITH VARIOUS GEOMETRIES - SIMULATION RESULTS, TIM 18 Physics Conference, 24 - 26 Mai 2018, Timișoara, România

3. Dorin Bibicu, **Maria (Stan) Necula** și Luminița Moraru, INVERSE SCATTERING PROBLEM FOR CONCEALED OBJECTS DETECTION, TIM 19 Physics Conference, 29 - 31 Mai 2019,Timișoara, România

4. **Maria Stan Necula**, Dorin Bibicu and Luminița Moraru, BACKSCATTERING BY CLOSELY SPACED SCATTERERS USING THE K MATRIX DATA FROM AN ACTIVE ARRAY OF N TRANSCEIVERS, 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020), 23-25 September 2020, Porto, Portugal

5. **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu, Simona Moldovanu și Luminița Moraru**,** PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ARRAY OF SENSORS BASED ON THE DIRECTION OF ARRIVAL ALGORITHM**,** 6th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG), 7-8 iunie 2018, Galați, România.

6. **Maria (Stan) Necula**, Dorin Bibicu și Luminița Moraru, VIBRATION OF RECTANGULAR PLATES: FUNDAMENTAL MODE AND INTEGER MULTIPLE OF THE FUNDAMENTAL PERIOD OF VIBRATION, 7th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG), 13-14 iunie 2019, Galați, Romania.

7. Dorin Bibicu, **Maria (Stan) Necula**, Luminița Moraru, Cistian-Victor-Eugen Rusu, MULTIPLE CLOSELY SPACED SCATTERERS LOCATION BASED MUSIC VIA INVERSE SCATTERING AMPLITUDE ESTIMATION, 8th edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools of “Dunărea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG), 18-19 iunie 2020, Galați, Romania.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

55. C. Anand, S. Delrue, H. Jeong, S. Shroff, R. Groves, R. Benedictus, *Simulation of Ultrasonic Beam Propagation From Phased Arrays in Anisotropic Media Using Linearly Phased Multi-Gaussian Beams*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 67(1), (2020) 106-116, ISSN 0885-3010;

66. S.Magura, S.Petropavlovsky, S.Tsynkov, E.Turkel. *High-order numerical solution of the Helmholtz equation for domains with reentrant corners*. Applied Numerical Mathematics, Volume 118, 2017, Pages 87-116, ISSN 0168-9274

70. H. Ammari, G. Josselin, J. Vincent Jugnon, *Detection, reconstruction and characterization algorithms from noisy data in multistatic wave imaging*, Discrete and Continuous Dynamical Systems, 8 (2015) 389-417, ISSN 1078-0947;

71. A. J. Devaney, E. A. Marengo, F. K. Gruber, *Time-reversal-based imaging and inverse scattering of multiply scattering point targets*, The Journal of the Acoustical Society of America, 118 (2005) 3129–3138, ISSN 0001-4966;

80. E. A. Marengo, R. D. Hernandez, Y. R., Citron, F. K. Gruber, M. Zambrano, H. Lev-Ari, *Compressive sensing for inverse scattering*, General Assembly, 2008, Illinois, ISBN 978-1-4799-3538-3;

81. E. A. Marengo, F. K. Gruber, *Noniterative analytical formula for inverse scattering of multiply scattering point targets*, Journal of the Acoustical Society of America, 120 (2006) 3782–3788, ISSN 0001-4966;

86. D. Ciuonzo, G. Romano, R. Solimene, *Performance Analysis of Time-Reversal MUSIC*, IEEE Transactions on Signal Processing, 63 (2015) 2650-2662, ISSN 19410476;

94. G. Shi, A. Nehorai, H. Liu, B. Chen, Y. Wang, *Multiple scattering effects on the localization of two point scatterers*, Proc. IEEE. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), (2016) 3126-3130, ISSN 7367791;

95. D. Ciuonzo, P. S. Rossi*, Noncolocated Time-Reversal MUSIC: High-SNR Distribution of Null Spectrum*, IEEE Signal Processing Letters, 24(4), (2017) 397 – 401, ISSN 10709908;

100. M. Moscoso, A. Novikov, G. Papanicolaou, C. Tsogka, *Robust multifrequency imaging with MUSIC*, Inverse Problems, 35(1), (2018), ISSN 0266-5611;

118. Morse P M, Ingard U K, *Theoretical Acoustics*, MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1968, New York, ISBN 978-0691024011;

119. J.J. Faran, *Sound scattering by solid cylinders and spheres*, The Journal of Acoustical Society of America, 23(4), (1951) 405-418, ISSN 0001-4966;

138. **M. (Stan) Necula**, D. Bibicu, L. Moraru, Backscattering problems by a non-convex kite-shape objects in acoustic frequency domain, AIP Conference Proceedings, 207 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5090075;

139. F. K. Gruber, E. A. Marengo, A. J. Devaney, *Time-reversal imaging with multiple signal classification considering multiple scattering between the targets*. Journal of Acoustical Society of America, 115 (2004) 3042-3047, ISSN 0001-4966;

140. C. Prada, J. L. Thomas, *Experimental subwavelength localization of scatterers by decomposition of the time-reversal operator interpreted as a covariance matrix*. Journal of the Acoustical Society of America, 114 (2003) 235-243, ISSN 0001-4966;

141. T. Miwa, I. Arai, *Super-resolution imaging for point reflectors near transmitting and receiving array*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 52 (2004) 220-229, ISSN 0018-926x;

142. **M. Necula (Stan)**, D. Bibicu, L. Moraru, *Backscattering problems by a non-convex kite-shape objects in acoustic frequency domain*, TIM 18 Physics Conference, Timisoara, Romania, 24 - 26 May 2018;

163. H. Lev-Ari, A. J. Devaney, *The time-reversal technique re-interpreted: subspace-based signal processing for multi-static target location*, Proceedings of the 2000 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. SAM 2000, Cambridge, MA, USA;

166. W. K. Park, *Interpretation of MUSIC for Location Detecting of Small Inhomogeneities Surrounded by Random Scatterers*, Mathematical Problems in Engineering, Article 7872548, (2016) 13, ISSN 1024-123X;

167. W. K Park, *Asymptotic properties of MUSIC-type imaging in two-dimensional inverse scattering from thin electromagnetic inclusions,* SIAM Journal on Applied Mathematics, 75(1), (2015) 209–228, ISSN 00361399;

174. A. G. Ramm, S. Gutman, *Optimization methods in direct and inverse scattering, Optimization Methods in Direct and Inverse Scattering*, Continuous Optimization. Applied Optimization; Jeyakumar, V., Rubinov A., Eds.; Springer, Boston, 99 (2005)