

**UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI
FACULTATEA DE ȘTIINȚE**



**CONTRIBUȚII PRIVIND CORELAREA PARAMETRILOR
DE PROPAGARE A UNDELOR ULTRASONORE CU
TEHNOLOGIA DE REALIZARE A CAPETELOR SONAR
BIOMIMETICE**

- REZUMAT -

**COORDONATOR ȘTIINȚIFIC
PROF. DR. ING. FIZ.
LUMINIȚA MORARU**

**DOCTORAND
ANA – MARIA CHISELEV**

**GALAȚI
- 2011 -**

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI

Strada Domnească nr. 47, cod poștal 800008
Galați, România
E-mail: rectorat@ugal.ro



Tel.: (+4) 0336-130.109; 0336-130.108; 336-130.104
Fax: (+4) 0236 - 461.353
www.ugal.ro

Către

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați vă face cunoscut că în data de 11.11.2011, ora 10³⁰, în SALA SA101 CORP CLĂDIRI 5, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: "CONTRIBUȚII PRIVIND CORELAREA PARAMETRILOR DE PROPAGARE A UNDELOR ULTRASONORE CU TEHNOLOGIA DE REALIZARE A CAPETELOR SONAR BIOMIMETICE", elaborată de domnul/doamna CHISELEV ANA-MARIA, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Ingenierie industrială.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

Presedinte: Prof.univ.dr.fiz. Mirela PRAISLER
Prorector-Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Conducător de doctorat: Prof.univ.dr.fiz. Luminița MORARU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Referent 1: Prof.univ.dr. Octavian DULIU
Universitatea București

Referent 2: Prof.univ.dr. Mădălin BUNOIU
Universitatea de Vest Timișoara

Referent 3: Prof.univ.dr.ing. Dorel AIORDĂCHIOAIE
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.



RECTOR,
Prof.dr.ing. Viorel MINZU

SECRETAR DOCTORAT,
Ing. Luiza AXINTE

MULȚUMIRI

Doresc să adresez mulțumirile cuvenite tuturor celor care, direct sau indirect, prin sugestiile oferite au contribuit la șlefuirea acestui demers științific și m-au susținut în finalizarea lui.

Adresez respectuoase mulțumiri doamnei Prof. dr. ing. fiz. Luminița Moraru, conducătorul științific al lucrării, pentru profesionalismul, competența și permanenta îndrumare științifică, pentru sprijinul real acordat pe întreaga perioadă de desfășurare a doctoratului și a elaborării tezei de doctorat.

Mulțumirile mele se adresează și Prof. dr. ing. Herbert Peremans și a colectivului din cadrul laboratorului Active Perception Lab - Universitatea Antwerp, Belgia, pentru găzduirea mea și realizarea măsurătorilor experimentale, precum și a ajutorului acordat în timpul mobilității internaționale.

Mulțumesc tuturor colegilor din cadrul Facultății de Științe – Universitatea Dunărea de Jos din Galați pentru sprijinul moral acordat.

Și nu în ultimul rând, le mulțumesc din suflet părinților mei pentru suportul moral și înțelegerea acordate pe parcursul derulării stagiului de doctorat, această teză de doctorat fiindu-le dedicată.

CUPRINS

Mulțumiri.....	3
Structura lucrării științifice.....	5
Motivația cercetării.....	6
Introducere.....	7
Cap. 1. Analiza traductoarelor - emițătoare EMFI.....	8
1.1. Efectul piezoelectric.....	9
1.2. Descriere, proprietăți și aplicații ale materialului EMFI.....	9
1.3. Emițătoare EMFI.....	12
Concluzii.....	14
Cap. 2. Presiunea câmpului acustic în zona Fraunhofer.....	15
2.1. Caracterizarea zonei Fraunhofer.....	16
2.2. Presiunea acustică a rețelelor liniare.....	16
2.2.1. Difrakția Rayleigh – Sommerfeld.....	19
2.2.2. Transformata Hankel.....	21
2.2.3. Soluții generale ale ecuației undelor.....	22
2.3. Factorii care influențează directivitatea și transmiterea undelor ultrasonore pentru rețele liniare.....	22
2.4. Date experimentale proprii.....	23
Concluzii.....	29
Cap. 3. Sisteme de detecție ultrasonore biomimetice, inspirate din lumea vie (modelul liliacului).....	30
3.1. Modelul Chiang.....	31
3.2. Modelul Kuc.....	34
3.3. Modelul Peremans.....	36
Concluzii.....	38
Cap. 4. Cercetări proprii: Studiul directivității în câmp îndepărtat a emițătoarelor EMFI de tip rețea liniară cu patru elemente și rețea cilindrică cu patru elemente, utilizate la construcția capetelor ultrasonore biomimetice.....	39
4.1. Funcția HRTF (Head Related Transfer Function).....	41
4.2. Date experimentale proprii.....	42
Concluzii.....	49
Cap. 5. Concluzii finale și rezultate personale.....	49
Bibliografie.....	52
Lista lucrărilor publicate.....	56

STRUCTURA LUCRĂRII ȘTIINȚIFICE

Teza de doctorat cu titlul **“Contribuții privind corelarea parametrilor de propagare a undelor ultrasonore cu tehnologia de realizare a capetelor sonar biomimetice”** este structurată pe cinci capitole care permit prezentarea derulării activității de cercetare și a rezultatelor științifice obținute într-un mod coerent și riguros.

În capitolul INTRODUCERE sunt prezentate premisele și fundamentele științifice care au stat la baza alegerii acestei teme de cercetare, importanța și motivarea cercetării științifice.

CAPITOLUL 1 prezintă principiile fizice ce stau la baza efectului piezoelectric. Traductoarele ultrasonore prezintă un interes deosebit, datorită utilizării acestora în domenii variate. Ele funcționează după principiul efectului piezoelectric. Traductoarele ultrasonore sunt folosite în mod deosebit, în construcția sistemelor sonare ultrasonore. Deși, la momentul actual, aceste traductoare sunt confecționate dintr-o paletă de materiale, o inovație în acest domeniu o prezintă traductoarele EMFI – Electro-mechanical Film. Proprietățile acestui material sunt prezentate în cadrul acestui capitol. Deoarece subiectul acestei teze abordează studiul emițătoarelor folosite în construcția capetelor sonar biomimetice (inspirate din lumea vie folosind modelul liliacului), în acest capitol sunt prezentate proprietățile electromecanice deosebite ale emițătoarelor EMFI, ce pot fi considerate variante mai bune pentru acest tip de sisteme ultrasonore.

În CAPITOLUL 2 se analizează câmpul presiunii acustice în zona Fraunhofer. Există diferite variante pentru calculul presiunii acustice în câmp îndepărtat. Liliicii se bazează pe ecolocație pentru a vâna sau a se deplasa într-un mediu întunecat. Ecolocația reprezintă un proces complex, ce constă în emiterea unor pulsuri ultrasonore de către liliicii și “ascultarea” ecourilor. Implementarea acestui proces în cadrul unui sistem de detecție de tip sonar presupune un studiu coerent al modului în care undele ultrasonore sunt emise și ecourile sunt receptate. Deoarece un cap biomimetic ultrasonor este prevăzut cu un emițător și doi receptori, ambele componente reprezintă o provocare în a reuși construcția lor. Dacă în prezent, forma receptorilor a fost rezolvată, încă se caută o variantă pentru emițător. Emițătorul trebuie să prezinte o serie de proprietăți: să fie confecționat dintr-un material care să fie aplicabil pentru mediul de propagarea a undelor ultrasonore, în cazul de față mediul este aerul; să fie de dimensiuni, cel puțin apropiate de cele ale unui liliac; să prezinte o directivitate bună. Toți parametrii au fost luați în considerare pentru calculul presiunii acustice. În partea a doua a capitolului sunt prezentate rezultatele simulărilor proprii realizate pentru diferite tipuri de emițătoare luate în considerare în cadrul acestei teze.

În CAPITOLUL 3 sunt descrise sisteme de detecție de tip sonar prevăzute cu capete biomimetice. Deși cercetările în cadrul acestui domeniu au început în anii '90, s-au obținut rezultate remarcabile, în acest sens. Înțelegerea ecolocația și a modului în care liliicii o folosesc pentru a se orienta în diferite medii (păduri, peșteri) și pentru a lua decizii, a reprezentat o adevărată provocare pentru cercetători încă de la începutul secolului XX. Primele cercetări au fost realizate pentru a descifra modul în care se realizează ecolocația de către liliicii. O dată cu progresele realizate în domeniul roboților, s-a încercat și implementarea acestui model biomimetic pe un sistem de tip sonar autonom. Principalul scop al cercetării actuale este de a găsi cele mai bune variante pentru construcția emițătorului ultrasonor ce echipează capetele biomimetice. În cadrul acestui capitol sunt prezentate rezultatele și neajunsurile câtorva sisteme de detecție ultrasonore prevăzute cu capete biomimetice ultrasonore.

CAPITOLUL 4 prezintă rezultatele cercetărilor proprii asupra emițătoarelor ultrasonore EMFI propuse. S-au construit două tipuri de emițătoare și s-a măsurat directivitatea în câmp îndepărtat. Așa cum am menționat, problema receptorilor a fost rezolvată. Pentru sistemele de

deteție biosonare s-au utilizat emițătoare de tip Polaroid. Aceste emițătoare nu sunt compatibile cu receptorii acestor capete biomimetice, astfel există un efort susținut în realizarea unui emițător care să prezinte proprietăți apropiate cu cele ale unui liliac. S-au realizat măsurători experimentale pentru două tipuri de traductoare – emițătoare: un emițător de tip rețea plană cu patru elemente dreptunghiulare, și un emițător cu patru elemente dispuse pe un suport semi cilindric. Pentru a optimiza directivitatea s-a introdus un timp de întârziere între elementele emițătoarelor. S-au analizat distribuțiile acustice obținute, din două perspective: a nivelului de presiune sonoră și al direcției lobilor principali și secundari prezenți.

Ultimul capitol este dedicat CONCLUZIILOR finale care se desprind din cercetările realizate în cadrul acestei lucrări.

MOTIVAȚIA CERCETĂRII

În conformitate cu titlul tezei de doctorat “Contribuții privind corelarea parametrilor de propagare a undelor ultrasonore cu tehnologia de realizare a capetelor sonar biomimetice” și a referatelor științifice susținute de-a lungul stagiului de pregătire, au fost propuse următoarele obiective:

1. Analiza proprietăților electromecanice ale materialului EMFI în vederea utilizării în construcția emițătoarelor pentru sistemele de dectecție prevăzute cu capete biosonare.
2. Studiul sistemelor de dectecție ultrasonore ce folosesc ecolocația, model inspirat din biologie, precum și stadiului actual al cercetării în acest domeniu.
3. Studiul câmpului presiunii acustice în zona Fraunhofer, pentru diferite geometrii de emițătoare.
4. Simularea funcției de directivitate pentru emițătoarele considerate și analiza acestora în vederea alegerii celei mai bune geometrii pentru un cap biomimetic ultrasonor.
5. Principalul obiectiv al cercetării actuale privind sistemele de dectecție biosonare ce utilizează ecolocația este realizarea unui emițător care să completeze geometria capului biomimetic. În acest scop, este necesară simularea funcției de directivitate pentru diferite geometrii și alegerea celei mai compatibile variante.
6. Măsurători experimentale realizate cu ajutorul unui braț robot, pentru calcularea directivității ultrasonore în câmp îndepărtat pentru două tipuri de emițătoare: rețea plană liniară cu patru elemente și rețea cu patru elemente dispuse semicilindric.
7. Optimizarea directivității rețelelor liniare prin introducerea unui timp de întârziere pentru fiecare element al rețelei.

În contextul internațional al dezvoltării științei roboticii, se pune accentul pe nevoia de creare și optimizare a roboților autoguvernanți. Există un interes deosebit pentru construirea sistemelor de tip sonar, inspirate din lumea vie: modelul delfinului, liliacului, greierului, etc.

Capacitățile acestor animale și insecte au atras atenția cercetătorilor încă de la începutul secolului XX. Principala motivație care a stat la baza utilizării și implementării modelului liliacului a fost capacitatea liliecilor de a lua decizii în medii extreme de dificile, bazându-se exclusiv pe sistemul de emisie – recepție a undelor ultrasonore. Sistemul lor de tip sonar prevăzut cu un emițător și doi receptori împreună cu sistemul neurologic este extrem de performant și adaptat condițiilor de viață ale liliecilor.

În ultimii ani, cercetătorii s-au concentrat pe construcția și buna funcționare a sistemelor ultrasonore prevăzute cu capete sonar biomimetice, obținându-se rezultate remarcabile într-un timp relativ scurt.

INTRODUCERE

Liliecii fac parte din ordinul Chiroptera, fiind cele mai răspândite animale din punct de vedere geografic. Ceea ce le face deosebite față de celelalte animale este modul în care folosesc eclocația. Eclocația este de fapt un sistem sonar de emisie și receptare a undelor ultrasonore folosit de lilieci pentru a se deplasa, a vâna, etc. Este un sistem unic, perfect adaptat din punct de vedere morfologic și fiziologic, ce le permite liliecilor de a “vedea” prin intermediul undelor ultrasonore. Eclocația este caracteristica dominantă a liliecilor, cu ajutorul căreia liliecii se orientează în spațiul în care trăiesc, vânează, etc.

Liliecii produc pulsurile ultrasonore prin contracția mușchilor din laringe, pulsurile fiind caracterizate de câțiva parametri: frecvența (măsurată în kHz), durata (măsurată în s) și intensitatea (măsurată în dB). Pulsurile sunt emise prin intermediul gurii sau a nasului, în funcție de specia de liliac.

Mulți lilieci folosesc spectrul timp-frecvență pentru a analiza ecourile receptate și apoi, pentru a determina, de exemplu, distanța dintre liliac și pradă [Griffin și Novick, 1955]. De asemenea, sistemul neuronal al liliecilor prezintă o capacitate interesantă de a analiza și de a clasifica pulsurile emise cu ecourile receptate, prin compararea caracteristicilor spectrale ale acestora [Novick, 1977; Chiselev și Moraru, 2011].

În funcție de specie și de felul hranei, liliecii folosesc atât componenta CF (Constant Frequency – frecvența constantă) cât și FM (Frequency Modulated - frecvența modulată). Liliecii care folosesc FM, emit unde a căror durată este cuprinsă între 0.5 ms și 10 ms; liliecii pot determina distanța până la pradă prin ajustarea timpului dintre emisia unui nou puls și receptarea ecoului [Kunz și Pierson, 1994; Chiselev și Moraru, 2009].

Receptorii sunt de asemenea, o componentă importantă pentru sistemul de eclocație. Dimensiunea și forma urechii externe prezintă un rol important în procesul de recepție al ecourilor [Kunz și Pierson, 1994]. Se pare că forma urechilor externe a evoluat o dată cu necesitățile liliacului [Kunz și Pierson, 1994]. Sistemul de recepție exterior al liliecilor s-a dezvoltat astfel încât să lucreze pe aceeași lungime de undă cu ecourile receptate. Ecourile sunt preluate de mușchiul timpanului și apoi procesate de sistemul neurologic. Detectarea ecourilor din mediul de viață, le permite liliecilor să localizeze și să captureze prada, să socializeze cu alți lilieci, sau chiar să se protejeze de prădători [Henson et al., 1987].

Au existat multe întrebări privind modul în care liliecii folosesc eclocația și undele ultrasonore. Există câteva răspunsuri în ceea ce privește problema folosirii undelor de frecvențe înalte: unul din motive este faptul că există puține surse naturale ce emit pe frecvențe atât de mari, astfel încât interferențele sunt minime. Apoi, deoarece energia absorbită crește exponențial cu frecvența, undele ultrasonore nu se propagă pe distanțe foarte mari. De exemplu, un liliac ce emite o undă ultrasonoră de 30 kHz va recepta ecourile de la o distanță de maxim 30 m [Simmons și Stein, 1982a]. Este binecunoscut faptul că frecvențele înalte au lungimi de undă mici. Frecvențe de 100, 50, 10 kHz au lungimi de unde, respectiv, 3.4, 6.8, 34 cm. Pentru a detecta un obiect este necesar ca lungimea de undă să aibă aceeași dimensiune cu a obiectului de detectat. Cum liliecii vânează insecte și fructe în general, de mici dimensiuni, este logic să folosească frecvențe înalte. Dar frecvențele joase sunt mai greu atenuate în aer decât cele înalte, astfel că liliecii folosesc unde de

frecvențe joase în faza de urmărire a prăzii, apoi se concentrează pe emiterea de unde cu frecvențe mai înalte, atunci când sunt foarte aproape de capturarea prăzii [Simmons, 1979].

Sistemul de ecolocație al liliecilor este alcătuit din doi receptori (cele două urechi) și un emițător [Chiselev et al., 2009a]. Sistemul acesta morfologic de emisie a pulsurilor și receptarea a ecourilor a fost caracterizat pentru unele specii de lilieci, în sensul că formele pavilionului urechilor și nărilor emițătoare au fost cercetate și replicate [Muller și Hallam, 2005]. Totuși, au existat erori cauzate de poziția și orientările acestora. De aceea, de Mey [de Mey, 2010] a realizat un studiu interesant al întregului sistem de ecolocație al unui liliac, prin scanarea acestuia cu un micro CT. În acest fel, se pot determina exact dimensiunile părților componente ale capului liliacului, precum și orientarea acestora una față de alta. Toate aceste amănunte sunt extrem de importante pentru construcția sistemelor biomimetice.

Pe lângă particularitățile de construcție ale receptorilor și emițătorului pentru un cap senzorial biomimetic, liliecii folosesc informații extrase din spectrele de recepție ale ecourilor. Este cunoscut faptul că liliecii folosesc funcția HRTF – Head Related Transfer Function și IID – Interaural Intensity Differences. Funcția HRTF este funcția ce caracterizează relația de dependență dintre presiunea acustică a sursei pentru diferite poziții din câmpul ultrasonor și presiunea de la nivelul receptării [Young et al., 1996]. Această relație depinde, de asemenea, de absorbția, difracția și reflexia undelor ultrasonore. Măsurătorile experimentale realizate pe lilieci [Firzlaff și Schuller, 2003; Lawrence și Simmons, 1982; Wotton et al., 1995; Wotton și Simmons, 2000], pe oameni [Humanski și Butler, 1988] și alte animale [Carlile, 1990; Xu și Middlebrooks, 2000] au scos în evidență importanța funcției HRTF pentru emisia și receptarea pulsurilor acustice.

Datorită importanței funcției HRTF pentru emisia și receptarea ecourilor, funcțiile HRTF și IID au fost măsurate pentru unele specii de lilieci [Aytekin, 2007; Firzlaff și Schuller, 2003; Obrist și Venstrup, 1998].

Capitolul 1. ANALIZA TRADUCTOARELOR - EMIȚĂTOARE EMFI

Natura foarte diferită a mărimilor de măsurat (care pot fi termice, mecanice, radiații, s.a.) a impus unificarea semnalelor purtătoare de informații. Mărimile electrice au fost considerate optime pentru acest scop, deoarece electronica și tehnica de calcul oferă cele mai mari posibilități de valorificare a informațiilor primite sub forma *electrică* (precizie, sensibilitate, consum mic de putere, viteză mare de răspuns, capacitate de prelucrare operațională a mai multor semnale, stocare, etc.).

Elementele care realizează convertirea unei mărimi de intrare electrică într-o mărime de ieșire de natură neelectrică (tensiune, curent, sarcină electrică, rezistență) se numesc *trductoare*.

Tipurile existente de traductoare sunt extrem de numeroase, clasificarea lor putându-se face după următoarele criterii:

1. După forma semnalului electric obținut, există:

- *trductoare analogice*, la care semnalul produs depinde continuu de mărimea de intrare;
- *trductoare numerice*, la care semnalul de ieșire variază discontinuu, după un anumit cod (operație de codificare).

2. După modul de transformări efectuate și modul de interconectare, traductoarele se împart în:

- *trductoare directe* care realizează o singură transformare;
- *trductoare complexe* care înglobează mai multe tipuri de traductoare directe.

3. După domeniul de utilizare, traductoarele sunt denumite după mărimea măsurată: de presiune, de debit, de temperatura, de umiditate, de deplasare, etc.

1.1. Efectul piezoelectric

Traductoarele ultrasonice uzuale lucrează aproape exclusiv pe baza efectului piezoelectric. Efectul piezoelectric a fost descoperit în anul 1880 de către frații Pierre și Jacques Curie și pus în evidență prin apariția unei diferențe de potențial electric la capetele unui dielectric atunci când asupra lui acționează o forță de compresie mecanică. Diferența de potențial se datorează polarizării electrice a materialului piezoelectric sub acțiunea deformatoare a solicitării mecanice externe. Polarizarea electrică constă în apariția unei sarcini electrice pe suprafața materialelor piezoelectrice supuse acțiunii forțelor de compresie sau întindere.

Materialele monocristaline sau policristaline supuse acțiunii unei presiuni mecanice generează o tensiune electrică, acesta este efectul piezoelectric direct, iar sub acțiunea unui câmp electric suferă o deformare mecanică, acesta fiind efectul piezoelectric indirect [Mason, 1964].

Multe din aplicațiile efectului piezoelectric folosesc materiale ceramice policristaline. Aceste materiale au manifestări puternice din punct de vedere al proprietăților fizice și sunt inerte din punct de vedere chimic. Cele mai utilizate materiale piezoelectrice ceramice sunt: titanatul de bariu (BaTiO_3), zirconatul de plumb (PbZrO_3), și ceramica PZT (plumb zirconat titanat). De asemenea, efectul piezoelectric este caracteristic și materialelor monocristaline omogene cum este cuarțul, sau electreților de tipul EMFI.

1.2. Descriere, proprietăți și aplicații ale materialului EMFI

Traductoarele ultrasonore sunt foarte des utilizate în construcția sistemelor senzoriale și robotice, ce funcționează pe baza timpului de zbor (TOF – Time of Flight) [Chiselev și Moraru, 2009]. Cercetările în acest domeniu au avut la bază compunerea timpului de zbor pentru fiecare traductor în parte. În urma cercetărilor ulterioare, s-au dezvoltat rețele de traductoare având aceeași suprafață de scanare. Folosind rețele de traductoare a fost posibilă localizarea mai multor obiecte, prin compunerea rezoluției laterale (unghiul de deviație față de poziția axială a traductorului) [Peremans et al., 1993]. Din acel moment, s-au dezvoltat mai multe metode prin care se pot determina pozițiile obiectelor față de traductor, sau se pot realiza clasificări ale acestor obiecte, sau chiar și hărți ale unui anumit spațiu [Kleeman, 2004; Gonzalez și Bleakley, 2007; Moita et al., 2007; Kuc, 2001; Chiselev și Moraru, 2009a; Chiselev și Moraru, 2009b].

Există două constrângeri în ceea ce privește semnalele ultrasonore: directivitatea și lungimea de bandă redusă [SeusComp, 2002; Leader Electronic, 2007]. Problema directivității trebuie privită din punctul de vedere al aplicației propuse, în sensul că se dorește o directivitate bună pentru a scana o suprafață mare din fața sistemului sonar. De aceea, traductoarele cu bandă largă oferă mai puține constrângeri în ceea ce privește algoritmi de procesare a semnalului ultrasonor, și în plus permit și extragerea altor parametri din mediul respectiv [Reijneers și Peremans, 2007]. Traductorii de bandă largă au devenit foarte utilizați deoarece folosesc o paletă largă de frecvențe, 20 – 200 kHz, cu sensibilitate ridicată.

În acest context, s-a pus accentul pe realizarea de materiale inovatoare folosite la construirea traductoarelor ultrasonore cu performanță ridicată în ceea ce privește lungimea de bandă. Așa cum am amintit mai sus, unul din aceste materiale [Mulhaupt, 2002] este Polyvinylidene Flouride (PVDF), un electret polimer, piezoelectric, ce este foarte des utilizat în construcția traductorilor ultrasonori [Fukada, 2000; Bauer et al., 2004]. De asemenea, foarte utilizate sunt și materialele PZT

– Lead Zirconate Titanate. S-au realizat numeroase măsurători experimentale, ca de exemplu [Jörk și Berg, 1998], prin care s-au pus în evidență proprietățile și performanțele acestor materiale.

În cercetările de specialitate asupra roboților autoguvernanți și nu numai, un rol esențial îl are transmiterea și recepția undelor ultrasonore. Pentru a folosi principiul ecolocației utilizat de un liliec, traductoarele trebuie să folosească o paletă de frecvențe cuprinsă în intervalul 20 – 200 kHz, să dispună de o sensibilitate ridicată și să fie și eficiente. Pentru a construi un traductor cu aceste proprietăți, este nevoie de un material cu o adaptabilitate bună pentru aer. Un material inovator este filmul celular polimer numit „Electro Mechanical Film” (EMFI). Acest material a fost dezvoltat de VTT Technical Research Centre din Finlanda. S-au realizat progrese majore în ceea ce privește îmbunătățirea proprietăților acestui material, mai ales în ceea ce privește proprietățile electromecanice și electroacustice ale senzorilor ultrasonori EMFI. EMFI este alcătuit dintr-un sau mai multe straturi celulare din polipropilenă sau polyolefin, orientate biaxial (proces care supune materialul la eforturi de întindere în două direcții perpendiculare – axial și pe direcție perpendiculară). Deoarece are în structura internă goluri, separate de straturi de polyolefin, ceea ce îi conferă o rezistență ridicată, este capabil să stocheze o cantitate mare de sarcină electrică permanentă (Figura 1).

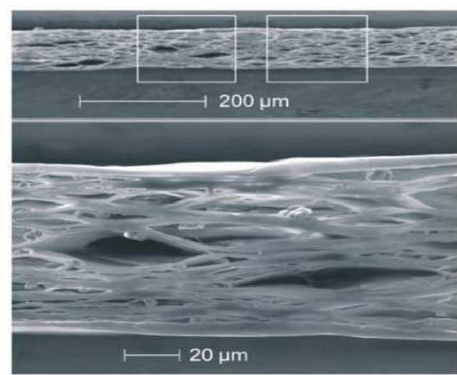


Figura 1. Structura transversală a EMFI de grosime 70 μm, evidențiată folosind un microscop electronic SEM. Ambele suprafețe sunt acoperite cu folii metalice (electrozi) [Bovtun et al., 2006].

Această sarcină este „injectată” folosind tehnologia corona la câmpuri electrice de 10 kV/cm. Se pot produce membrane de diferite grosimi și elasticități. Grosimea uzuală pentru senzorii și actuatorii EMFI este între 30-70 μm. Dacă se metalizează ambele fețe ale membranei (prin procedeul de evaporare în vid), EMFI este capabil să măsoare modificările de forță și presiune [Bovtun et al., 2006].

În cazul straturilor subțiri, cu goluri, și care sunt electreți așa cum sunt materialele EMFI, sarcina electrică se localizează permanent la interfețele polimer-gaz din interiorul stratului subțire. Cu ajutorul fenomenului corona se induce în interiorul stratului subțire EMFI o sarcină electrică permanentă a cărei densitate este echivalentă cu sarcina indusă pe suprafețele exterioare ale stratului subțire. Această structură internă poroasă, face ca stratul subțire să prezinte proprietăți elastice pe direcția grosimii lui. Aceasta înseamnă că golurile se dilată sau se contractă în funcție de modificările grosimii membranei.

Din cauza stării de anizotropie a structurii interne, constanta piezoelectrică longitudinală d_{33} este coeficientul piezoelectric dominant [Neugschwandtner et al., 2001]. Pentru filmele celulare polimere, constanta d_{33} are valori pozitive, iar d_{31} și d_{32} iau valori negative. Atunci, materialele celulare de tipul EMFI au coeficienții piezoelectrici de semn opus față de polimerii feroelectrici, ca

PVDF; și au același semn cu ceramicele feroelectrice, ca PZT. Mai mult, valori mari sunt obținute pentru d_{33} , până la câteva sute de pC/N (130–450 pC/N) pentru straturile subțiri EMFI, față de valorile obținute pentru polimerii feroelectrici (20–30 pC/N pentru PVDF) [Neugschwandtner et al., 2000; Sessler și Hillenbrand, 1999]. Această diferență rezultă din faptul că modulul Young are valori mici (în jur de 2 MPa) pentru materialul EMFI în comparație cu materialele piezoelectrice, de tipul PVDF și PZT [Zhang et al., 2004; Wegener et al., 2004].

Un alt tip de sensor utilizat în aplicații ca scanarea unui mediu, determinarea poziției și geometriei obstacolelor din mediul scanat, etc., este sensorul vizual. Acest tip de sensor este folosit, mai ales, pentru a obține o panoramă a mediului de interes. Sensorul vizual este, de fapt, un sistem prevăzut cu mai multe camere de filmat inteligente, care înregistrează din mai multe unghiuri de interes spațiul de interes [Boult et al., 1998]. Există numeroși cercetători care au realizat roboți autonomi, ce folosesc acest sistem de funcționare [Brunelli și Messelodi, 1993; Nalwa, 1996; Nayar, 1997]. Atât senzorii vizuali cât și cei ultrasonori prezintă o serie de avantaje și dezavantaje (Tabel 1 [Peremans, 1994]).

Tabel 1. Comparații între senzorii acustici și cei vizuali.

	Sensor acustic	Sensor vizual
Cost	Scăzut	Ridicat
Rigiditate	Ridicat	Scăzut
Putere de procesare	Scăzut	Ridicat
Reflexie a obiectelor	Speculară	Difuză
Timp de măsurare	Scăzut	Ridicat
Conținutul informațiilor	Scăzut	Ridicat

Din Tabelul 1 se pot extrage următoarele concluzii:

- Senzorii acustici sunt ieftini, acesta fiind unul din motivele pentru care sunt atât de des utilizați.
- Cum senzorii vizuali folosesc subsisteme de lentile, aceștia devin mult mai vulnerabili, dacă luăm în considerare condiții speciale de lucru, cum ar fi praf, fum, etc. Senzorii acustici prezintă un avantaj din acest punct de vedere putând fi folosiți în astfel de condiții și, în plus, aceștia sunt rezistenți și la radiații mari. De aceea, senzorii acustici sunt folosiți pe roboții din centralele nucleare.
- Privind puterea de procesare pentru a extrage informații relevante din datele obținute, senzorii ultrasonori prezintă un avantaj în acest sens.
- Toate obiectele reflectă difuz lumina, adică obiectul este vizibil din orice unghi am privi. Dar sunetul este reflectat specular, adică obiectul este vizibil doar dintr-un anumit unghi. De aceea, sensorul acustic trebuie să fie poziționat sub anumit unghi față de obiectul de detectat, pentru ca pulsările acustice să fie reflectate, iar ecourile să fie detectate. Altfel, undele acustice vor fi reflectate în alte zone decât cea în care se află receptorul. Acest dezavantaj a fost studiat deja și au fost propuse mai multe strategii [Moravec și Elfes, 1985; Leonard și Durrant - Whyte, 1991].
- Un alt dezavantaj al senzorilor acustici este timpul de măsurare. Prin compararea vitezei de propagare a luminii și a sunetului în aer, $v_1 = 300\,000$ km/s și $c = 0.343$ km/s, este clar că măsurarea cu un sensor vizual are loc aproape instantaneu. Pe când, pentru senzorii ultrasonori timpul de măsurare trebuie luat mereu în considerare: sunetul se propagă în aer în timp de 1 ms doar 34 cm.
- Măsurătorile experimentale realizate cu senzorii ultrasonori presupun ca obiectul să se afle în câmpul de scanare, determinat de lățimea fascicului și de distanța până la sensor. Prin creșterea puterii de procesare și obținerii de informații din mediu, se restricționează lățimea fascicului, și numărul de măsurători devine mai mare.

1.3. Emițătoare EMFI

Lekkala [Lekkala et al., 2003] a realizat o serie de experimente ce au avut ca subiect de studiu emițătoare și receptoare confecționate din materiale EMFI, pentru a evalua proprietățile materialului EMFI. S-a considerat un emițător de tip EMFI și s-a măsurat nivelul de presiune sonoră SPL în fața traductorului EMFI, în funcție de distanță. Presiunea acustică a fost măsurată folosind un microfon calibrat B&K tip 4135. În Figura 2 este prezentată curba de variație cu distanța a SPL [Lekkala et al., 2003].

Se poate observa din Figura 2 că presiunea sonoră scade în funcție de distanță, în mare parte datorită fenomenelor de absorbție în mediul de propagare și atenuării geometrice. La distanța de 1 m, nivelul de presiune sonoră a semnalului ultrasunor transmis este de 79 dB.

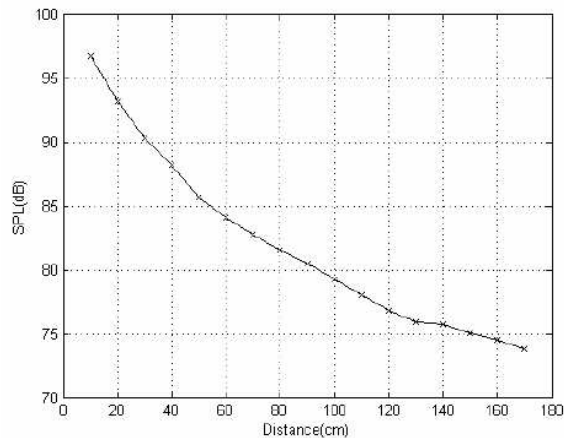


Figura 2. Nivelul de presiune sonoră a traductorului EMFI emițător de ultrasunete în funcție de distanță [Lekkala et al., 2003].

Un alt studiu interesant a fost realizat de Ealo et al. [Ealo et al., 2008]. Aceștia au analizat traductoare EMFI pe suport conic și cilindric (Figura 3).

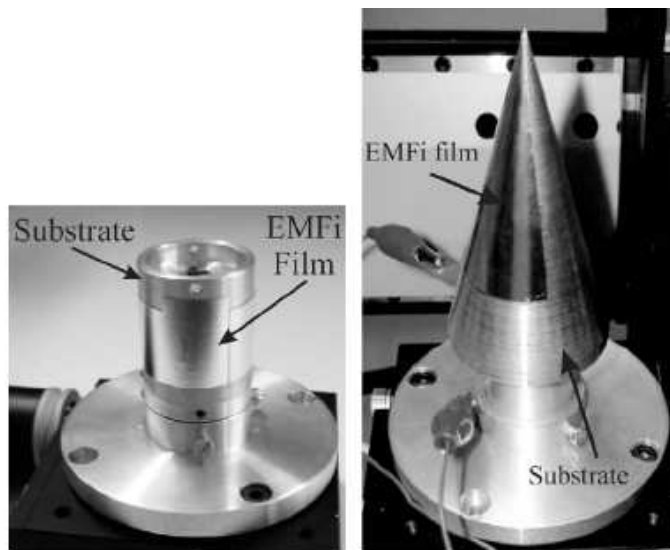


Figura 3. Material EMFI lipit pe suport cilindric și conic [Ealo, 2008].

Ei au propus un model teoretic de calculare a presiunii acustice, au realizat măsurători experimentale și au studiat comportarea materialului EMFI la frecvențe de 30 – 100 kHz.

Presiunea acustică în coordonate cilindrice a unei surse de forma cilindrică infinită, obținută din ecuația undelor este dată de [Morse și Ingard, 1968]

$$p(r, \phi, z) = i\rho ck F_z^{-1} F_\phi^{-1} [\dot{W}_n(a, k_z) \frac{H_n(k_r r)}{k_r H_n'(k_r a)}] \quad (1)$$

$$\text{iar } \dot{W}_n(a, k_z) = F_\phi F_z [v_n(a, \phi, z)]$$

unde a este raza cilindrului, ρc impedanța caracteristică a mediului de propagare a undelor (în cazul de față mediul de propagare este aerul), k_r și k_z sunt constant aflate în relație cu numărul de undă k astfel $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$, r este distanța măsurată din centrul sistemului de coordonate ales la punctul în care se calculează presiunea în plan azimutal, H_n este funcția Hankel de ordinul n de speța I, W_n este transformata Fourier a vitezei suprafeței vibrante.

Presiunea acustică în zona îndepărtată, în coordonate sferice, pentru viteză constantă a suprafeței vibrante este dată de [Morse și Ingard, 1968]

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{\rho c e^{ikR}}{2\pi^2 R} \sum_{n=-N}^N (-1)^n e^{in\phi} \frac{4v_n \alpha L \sin c(n\alpha) \sin c(kL \cos \theta)}{\sin \theta H_n'(ka \sin \theta)} \quad (2)$$

unde N este cel mai apropiat număr întreg al $ka \sin \theta$, $2L$ este lungimea emițătorului de rază a .

În Figurile 4 și 5 sunt prezentate presiunile acustice teoretice și experimentale pentru patru frecvențe diferite (30.0293 kHz; 50.0488 kHz; 70.0684 kHz; 90.0879 kHz), la distanța de 30 cm, considerată ca fiind zona Franunhofer, a unui emițător cilindric confecționat din material EMFI [Ealo et al., 2008].

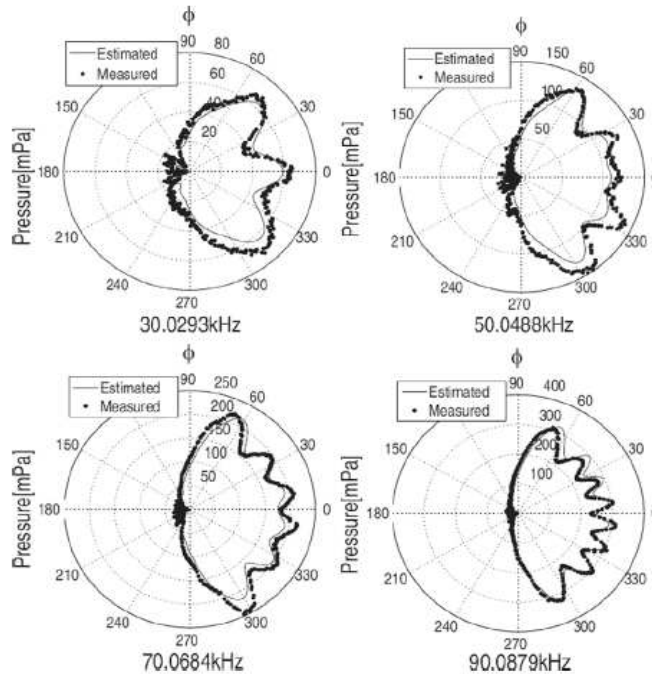


Figura 4. Comparație între modelul teoretic și măsurătorile experimentale pentru presiunea acustică în câmp îndepărtat, în plan azimutal pentru $L/2a = 2/3$ ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm) [Ealo et al., 2008].

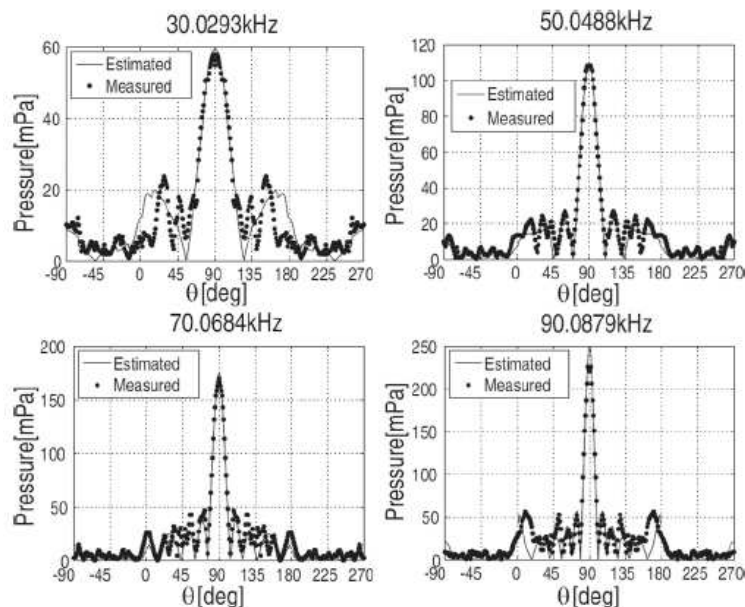


Figura 5. Comparație între modelul teoretic și măsurătorile experimentale a presiunii acustice în câmp îndepărtat, în planul elevației pentru $L/2a = 2/3$ ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm) [Ealo et al., 2008].

Se poate observa atât în Figura 4 cât și în Figura 5, o bună estimare a câmpului presiunii acustice în planul vertical și azimut, acest model având capacitatea de a decela și lobii secundari, pentru frecvențe mari. În primul caz, estimarea erorii nu a depășit 18 %, ceea ce reprezintă mai puțin de 3 dB în SPL. O dată cu valori ale frecvenței mai mari de 100 kHz și erorile pot crește cu 30 % pentru unii transductori, din cauza atenuării undelor sau orientării microfonului [Ealo et al., 2008].

Atunci când frecvența crește, își fac apariția lobii secundari, iar lobul principal își micșorează lățimea.

Concluzii

Este binecunoscut faptul că unul din principalele obstacole în construcția sistemelor robotice de tip sonar care să fie autonome este lipsa unor senzori de calitate superioară. Discrepanțele majore dintre performanțele sistemelor bionomice ale animalelor și roboții mobili autoguvernanți propuși de cercetători reprezintă una din motivațiile acestei teze. Pentru sistemele bionomice care folosesc eclocația, vorbim de un cap biomimetic cu doi receptori și un emițător. Un cap biomimetic de tip sonar inspirat de modelul liliacului prezintă un emițător și doi receptori [Everett, 1989]. Emițătorul emite un puls și se determină timpul dintre emisie și receptarea ecoului produs de către obiectul sau mediul aflat în regiunea câmpului de scanare.

Dacă problema receptorilor a fost rezolvată, eficiența emițătorului este una din problemele care trebuie rezolvată pentru buna funcționare a unui robot biomimetic autonom de acest tip. În toate cercetările de specialitate s-a utilizat transductorul Polaroid, despre care în urma studiilor experimentale s-a concluzionat că nu oferă un randament foarte bun în comparație cu necesitățile unui robot biomimetic. De aceea, în această teză principalul subiect este crearea unor emițătoare din materiale inovatoare, care să ofere informații mai bune într-un timp foarte scurt.

De la început, senzorii ultrasonori au avut un rol extrem de important pentru roboții mobili, datorită comportamentului flexibil în diferite medii. Cu cât mediul prezintă geometrii variate cu atât și informațiile de la senzor trebuie să fie mai precise. Un senzor trebuie să ofere, într-un timp foarte

scurt, informații despre o bună parte a mediului, pentru această categorie de roboți. Deși s-au studiat diferite materiale piezoelectrice, în urma măsurătorilor experimentale realizate, materialul EMFI s-a dovedit a fi alegerea optimă pentru că îndeplinește o serie de criterii:

- prezintă o sensibilitate ridicată pentru mediul de propagare a undelor ultrasonore, în cazul de față aerul,
- este flexibil,
- poate fi folosit pentru o paletă variată de frecvențe (20-200) kHz,
- este capabil să măsoare modificările de forță și presiune, adică prezintă o directivitate bună iar conținutul de informații este ridicat,
- costul accesibil.

Capitolul 2. PRESIUNEA CÂMPULUI ACUSTIC ÎN ZONA FRAUNHOFER

Ecolocația este un proces complex folosit de lilieci, ce constă în producerea de unde ultrasonore și receptarea ecourilor. Prin compararea pulsurilor emise cu ecourile receptate, care sunt versiuni modificate ale pulsurilor emise, sistemul neuronal al liliecilor produce imagini ale mediului înconjurător. Poziția „țintelor” în spațiul tridimensional este determinată de distanța dintre emițător și „țintă” precum și de unghiurile azimut și elevație.

Animalele care folosesc ecolocația pot determina distanța până la un obstacol prin măsurarea timpului de zbor. Timpul de zbor reprezintă timpul dintre producerea pulsurilor și receptarea ecourilor. De exemplu, cum mediul de propagare al undelor ultrasonore emise de lilieci este aerul, pentru viteza sunetului de aproximativ 340 m/s și un timp de zbor de 2 ms dintre emisia pulsului și receptarea ecoului, se poate calcula astfel distanța între liliac și țintă, pe baza formulei [Chiselev și Moraru, 2009]:

$$c = 2d/t \quad (1)$$

obținându-se o distanță de 34 cm. Cifra 2 de la numărătorul relației (1) apare datorită faptului că undele străbat mediul de propagare de două ori: o dată la emisie și apoi când se receptează ecourile.

Este cunoscut faptul că liliecii folosesc trei parametri, pentru determinarea poziției obiectelor în spațiu: distanță (distanța dintre emițător și „ținta” ce trebuie detectată), unghiul azimut și unghiul elevație. Cele două unghiuri sunt importante pentru că definesc direcția „ținte”. Spectrul frecvențelor ecourilor oferă informații importante liliecilor despre mărimea unei ținte sau chiar textura acesteia. Este adevărat că sunt întâmpinate și erori de detecție. De exemplu, pentru liliecii care vânează insecte, ecourile de la frunze induc erori în ceea ce privește captivarea insectei, pentru că ecourile receptate de la insectă interferă cu cele de la frunze.

Schnitzler și Grinnell [Schnitzler și Grinnell, 1977] au realizat un studiu prin care au evidențiat trei proprietăți importante a ecolocației, în funcție de tipul semnalelor. Prin intermediul semnalelor înguste liliecii determină distanța până la pradă. Semnalele largi caracterizate de o paletă mare de frecvențe, sunt de obicei mai mici de 5 ms ca durată, și sunt utilizate pentru localizarea prăzii. Detectarea și localizarea prăzii simultan prezintă un dezavantaj și anume, un semnal desemnat ca fiind de ajutor în detecție poate fi nefolositor pentru localizare. Un liliac ce vânează o insectă va schimba semnalele înguste cu cele largi, de îndată ce insecta a fost detectată. În momentul în care liliacul se află aproape de insectă semnalele înguste sunt înlocuite cu cele largi, datorită faptului că rata emiterii pulsurilor este mare.

Liliecii au dezvoltat diferite tipuri de ecolocație în funcție de mediul în care viețuiesc și vânează. Deci, există diferențe între speciile de lilieci, privind modul în care emit, receptează

ecourile și folosesc un anumit tip de frecvențe. De exemplu, speciile de liliac *Horseshoe* și *Pteronotus parnelli* emit semnale cu o componentă a frecvenței constante lungă ce permite liliecilor o detecție eficientă precum și o clasificare a țintelor. Aceste specii se folosesc de efectul Doppler. În acest caz, liliecii reduc frecvența pulsurilor emise atunci când viteza zborului crește, astfel încât recepția ecourilor să se realizeze cât mai eficient.

Majoritatea liliecilor trebuie să-și ajusteze durata pulsurilor emise astfel încât să recepționeze ecourile după emiter. Constrângerile acustice sunt de remarcat după modul în care liliecii folosesc ecoclocia. Pentru distanțe mari între liliac și pradă sunt utilizate frecvențele joase, pentru că sunt ușor atenuate și se propagă pe distanțe destul de mari. Durata semnalelor emise este mare, de aproximativ 20 ms, astfel încât se presupune că liliacul anticipează ecourile de la țintele mai îndepărtate. Aceste intervale lungi între emisie și recepție sunt o caracteristică a liliecilor care vânează ținte mai îndepărtate, în spații fără obstacole [Chiselev și Moraru, 2011]. Este important să se cunoască aceste aspecte ale modului în care liliecii folosesc ecoclocia.

Pornind de la principiul Huygens de propagare a undelor, s-au dezvoltat diferite relații matematice pentru calculul presiunii câmpului acustic în zona Fraunhofer. Presiunea acustică pentru un emițător este caracterizată de funcția de directivitate.

2.1. Caracterizarea zonei Fraunhofer

Pentru un traductor de dimensiuni mari, undele ultrasonore sunt reprezentate prin linii egal distanțate. Aceste unde se numesc unde plane. Dacă sursa are dimensiuni foarte mici, atunci undele sunt sferice, iar raza acestora crește o dată cu distanța față de sursă.

Pentru un traductor de dimensiuni rezonabile (diametrul traductorului este considerat a fi mai mare decât lungimea de undă), apar zone spațiale în care fenomenul de interferență al undelor este constructiv și zone în care acesta este distructiv. Regiunea apropiată de sursă este denumită zona Fresnel. Pentru un traductor disc de raza r , lungimea zonei Fresnel este dată de relația [Hendee și Ritenour, 2002]:

$$D_{Fresnel} = \frac{r^2}{\lambda} \quad (2)$$

unde λ este lungimea de undă.

După zona Fresnel, o parte din energie se pierde, producând o divergență graduală a unde ultrasonore descrisă de [Hendee și Ritenour, 2002]:

$$\sin \theta = 0,6 \left(\frac{\lambda}{r} \right) \quad (3)$$

unde θ este unghiul de divergență Fraunhofer. Regiunea aflată în continuarea zonei Fresnel este numită zona Fraunhofer (sau zona de câmp îndepărtat).

În regiunea Fresnel, fasciculul se conservă apoi devine divergent în zona Fraunhofer. În acest timp, 90% din puterea emisă rămâne concentrată într-un con de deschidere θ . Cu cât traductorul este mai mare, cu atât zona Fresnel se va mări, iar fasciculul diverge mai puțin [Hendee și Ritenour, 2002]. Aceleași efecte asupra formei fasciculului se obțin printr-o creștere a frecvenței unde emise. Totuși, în același timp va crește și atenuarea undelor.

2.2. Presiunea acustică a rețelelor liniare

Există o varietate mare de traductoare cu geometrii și dimensiuni diferite. Pentru fiecare tip de traductor trebuie găsită o formulă matematică de calcul a presiunii câmpului acustic. A studia presiunea acustică a unui traductor ultrasonor înseamnă a studia directivitatea acestuia.

Funcția de directivitate se obține prin calcularea presiunii acustice într-un punct oarecare și apoi variația presiunii în funcție de un unghi de interes, în cazul nostru fiind vorba de azimut și elevație.

Directivitate în câmp îndepărtat al unei rețele de elemente este suma tuturor directivităților a fiecărui element al rețelei. Studiul funcției de directivitate pentru o rețea de elemente identice este ușor de realizat dacă presupunem că rețeaua se comportă ca un traductor de sine stătător.

Presupunem că avem o suprafață de o formă oarecare de arie S_o . Presiunea acustică produsă de elementul i al rețelei este dată de relația lui Rayleigh:

$$p(\vec{r}) = \frac{jk\rho c}{2\pi} \iint u(\vec{r}_o) \frac{e^{-jkR}}{R} dS_o \quad (4)$$

unde R este distanța de la un punct al suprafeței elementului la punctul în care calculăm presiunea acustică [Sherman și Butler, 2007].

Dacă notăm în relația (4) $dS_o = r_o dr_o d\phi_o$ și considerând r_o și ϕ_o coordonatele punctului sursă de pe suprafața aperturii emițătoare, se va obține

$$p(\vec{r}) = \frac{jk\rho c u_o}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-jkR}}{R} r_o dr_o d\phi_o$$

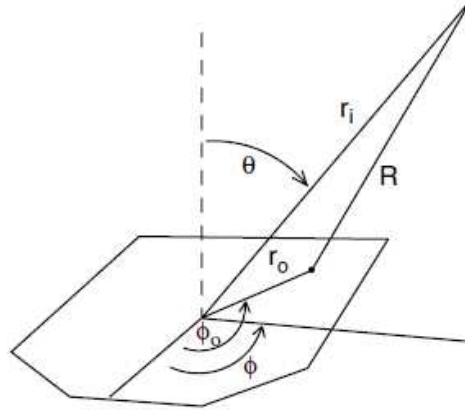


Figura 1. Sistemul de coordonate considerat pentru un traductor de formă oarecare [Sherman și Butler, 2007].

Pentru câmpul acustic în câmp îndepărtat, R este mult mai mare decât dimensiunile traductorului, astfel putem aproxima pe R ca fiind

$$R = r_i - r_o \sin \theta \cos(\phi - \phi_o) \quad (5)$$

unde r_i este distanța de la sistemul de coordonate la punctul considerat în spațiul de propagare, r_o este distanța de la sistemul de coordonate la un punct oarecare de pe suprafața traductorului (Figura 1).

Presiunea acustică pentru o rețea liniară cu i elemente ce vibrează cu viteză uniformă u_o este dată de [Sherman și Butler, 2007]:

$$p_i(r_i, \theta, \phi) = \frac{jk\rho c u_o A}{2\pi} \frac{e^{-jkr_i}}{r_i A} \iint e^{jkr_o \sin \theta \cos(\phi - \phi_o)} dS_o. \quad (6)$$

Se poate observa că integrala dată de relația (6) este o mărime adimensională, reprezentând funcția de directivitate (sau directivitatea) traductorului, ce depinde doar de unghiurile θ , ϕ ; se poate scrie ca $f(\theta, \phi)$ și este aceeași pentru fiecare element al traductorului, atâta timp cât elementele au aceeași orientare. Atunci ecuația (6) se poate scrie ca fiind [Sherman și Butler, 2007]

$$p_i(r_i, \theta, \phi) = \frac{jk\rho c u_o A}{2\pi} f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}. \quad (7)$$

Ecuația (7) poate fi utilizată pentru calcularea funcției de directivitate pentru elementele care au viteze diferite și sunt aranjate arbitrar într-un plan.

Un traductor cu N elemente dispuse într-o direcție oarecare într-un plan, dar fiecare element având aceeași orientare față de sistemul de coordonate ales, are presiunea acustică dată de [Sherman și Butler, 2007]:

$$p(r, \theta, \phi) = \frac{jk\rho c A}{2\pi} \frac{f(\theta, \phi)}{r} \sum_{i=1}^N u_i e^{-jkr_i} \quad (8)$$

unde r_i este aproximat de r în amplitudine dar nu în fază [Sherman și Butler, 2007]. Ecuația (8) arată că presiunea acustică în câmp îndepărtat pentru fiecare element al traductorului este proporțională cu frecvența, viteza de vibrație și aria traductorului respectiv.

Wooh și Shi [Wooh și Shi, 1999] au folosit în studiul traductoarelor de tip rețea principiul lui Huygens. Pentru un element al unei rețele, presiunea acustică s-a calculat considerând că elementul este compus din mai multe surse ce emit cu aceeași amplitudine și fază. În Figura 2 este prezentată o rețea plană de elemente, precum și geometria considerată în calculul presiunii acustice.

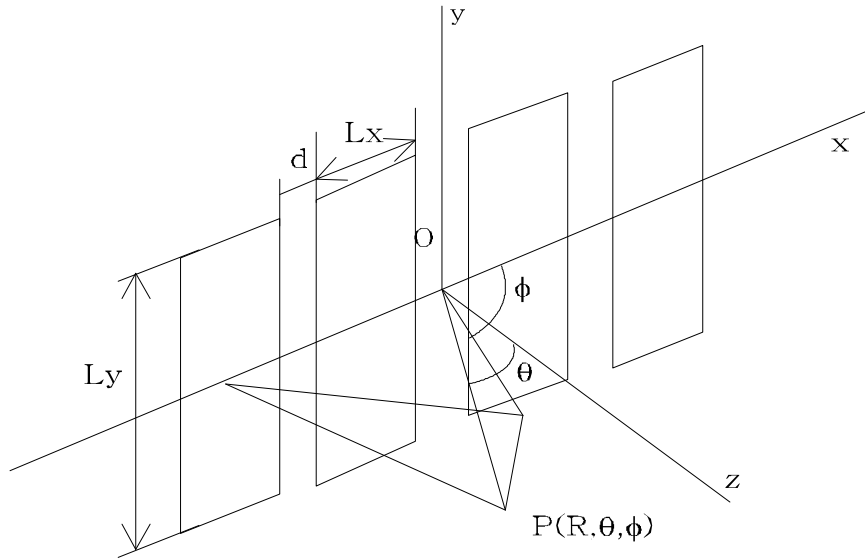


Figura 2. Sistemul de coordonate pentru studiul unei rețele de traductoare. Presiunea acustică în punctul $P(R, \theta, \phi)$ pentru un element este dată de [Wooh și Shi, 1999]:

$$P(R, \theta, \phi) = \frac{jk\rho c u_o}{2\pi R} L_x L_y \sin c\left(\frac{L_x \sin \theta \cos \phi}{\lambda}\right) \sin c\left(\frac{L_y \sin \theta \sin \phi}{\lambda}\right) e^{jkR} \quad (9)$$

unde θ este unghiul elevație, φ unghiul azimutal, r distanța de la punctul în care se calculează presiunea și centrul sistemul de coordonate considerat, k este număr de undă, c este viteza sunetului în aer, u_0 viteza de vibrație a elementului, L_x este lățimea elementului, L_y lungimea elementului, d este distanța dintre oricare două elemente consecutive, λ lungime de undă [Wooh și Shi, 1999].

Din punct de vedere teoretic, se definește noțiunea de directivitate bună atunci când se poate observa existența unui lob principal pe direcția $\theta = 0^\circ$, ce caracterizează cantitatea de energie acustică maximă emisă. De asemenea, o dată cu creșterea unghiului de divergență θ , are loc și apariția lobilor secundari. Apariția acestora este determinată de emisia energiei acustice în alte direcții decât cele dorite. De obicei, lobi secundari au o amplitudine mai mică decât lobul principal. De asemenea, uneori își fac apariția și așa numiții lobi „falși”. Aceștia au aceeași formă ca și lobul principal. Acești lobi „falși” apar atunci când dimensiunile elementelor rețelei sunt egale sau mai mari decât lungimea de undă. Acești lobi, pot fi deci suprimați sau minimizați dacă folosim dimensiuni ale rețelei mai mici decât lungimea de undă luată în considerare.

Există mai multe moduri de a calcula câmpul presiunii acustice pentru traductoare. O altă abordare folosind transformata Fourier (având la bază principiul lui Huygens) a fost propusă de J.F. Synnevag [Synnevag, 1998], pentru a reda matematic fenomenul de difracție.

2.2.1 Difracția Rayleigh - Sommerfeld

Principiului Huygens i s-a dat și o formulare matematică de către Sommerfeld și Rayleigh. Formula Rayleigh-Sommerfeld, ce descrie câmpul de presiune este dată de [Synnevag, 1998]

$$s(\vec{r}_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint_A s(\vec{r}_1) \frac{e^{jk r_{01}}}{r_{01}} \cos \phi dA \quad (10)$$

unde $s(\vec{r}_0)$ este câmpul de presiune acustică în punctul $\vec{r}_0(x_0, y_0, z)$ din spațiu, $\vec{r}_1(x_1, y_1, 0)$ este un punct pe suprafața traductorului, $s(\vec{r}_1)$ este câmpul în punctul r_1 al traductorului, r_{01} este distanța dintre r_1 și r_0 , ϕ este unghiul dintre normala la traductor și vectorul $\vec{r}_0 - \vec{r}_1$, A reprezintă apertura (suprafața emițătoare). Câmpul în punctul \vec{r}_0 reprezintă suma undelor sferice dintr-un punct infinitesimal al traductorului.

Dacă apertura este un disc de rază a , atunci formula pentru calcularea frecvenței câmpului este dată de [Synnevag, 1998]

$$S(\vec{r}_0, \omega) = \frac{1}{j\lambda} \int_0^a \int_{-\pi}^{\pi} S(\vec{r}_1, \omega) e^{ikr_{01}} \frac{z}{r_{01}^2} r_1 dr_1 d\theta_1 + \frac{1}{2\pi} \int_0^a \int_{-\pi}^{\pi} S(\vec{r}_{01}, \omega) e^{ikr_{01}} \frac{z}{r_{01}^3} r_1 dr_1 d\theta_1 \quad (11)$$

unde $S(\vec{r}_0, \omega)$ este frecvența câmpului în punctul $\vec{r}_0(x_0, y_0, z)$, $S(\vec{r}_1, \omega)$ este frecvența la suprafața traductorului în punctul $\vec{r}_1(x_1, y_1, 0)$, $r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ și $\theta_1 = \text{tg}^{-1}(y_1/x_1)$ (Figura 3).

Ambele relații, (10) și (11), implică calculul unor integrale duble destul de complicate. Pentru a ușura aceste calcule s-a apelat la niste aproximații – aproximația Fresnel și aproximația Fraunhofer.

Aproximația Fresnel se bazează pe premisa că termenul $\cos \theta$ din relația (15) este aproximativ 1, și r_{01} este aproximativ egal cu distanța d dintre planul aperturii și un plan paralel de observație ce conține punctul r_0 .

Atunci relația aproximată devine [Synnevag, 1998]

$$s(x, y, d) = \frac{e^{jkd}}{jd\lambda} \iint_A s(\hat{x}, \hat{y}) e^{\frac{jk[(x-\hat{x})^2 + (y-\hat{y})^2]}{2d}} d\hat{x}d\hat{y} \quad (12)$$

unde coordonatele (\hat{x}, \hat{y}) sunt puncte pe traductor. Relația (12) reprezintă convoluția bidimensională dintre funcția $s(\hat{x}, \hat{y})$ ce caracterizează apertura [Synnervag, 1998] și

$$h(x, y, d) = \frac{e^{jkd}}{jd\lambda} e^{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2d}}. \quad (13)$$

O convoluție cu valori discrete poate fi evaluată cu ajutorul transformatei Fourier.

Aproximația Fraunhofer se aplică atunci când planul de observație este îndepărtat de apertură. Presupunând că $d \gg D^2\lambda$, unde D este lungimea traductorului și $e^{\frac{jk(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)}{2d}} \approx 1$ vom obține [Synnervag, 1998]

$$s(x, y) = \frac{e^{jkd}}{jd\lambda} e^{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2d}} \iint_A s(\hat{x}, \hat{y}) e^{\frac{jk(x\hat{x} + y\hat{y})}{d}} d\hat{x}d\hat{y} \quad (14)$$

ce poate fi interpretată ca o transformată Fourier bidimensională pentru $s(\hat{x}, \hat{y})$.

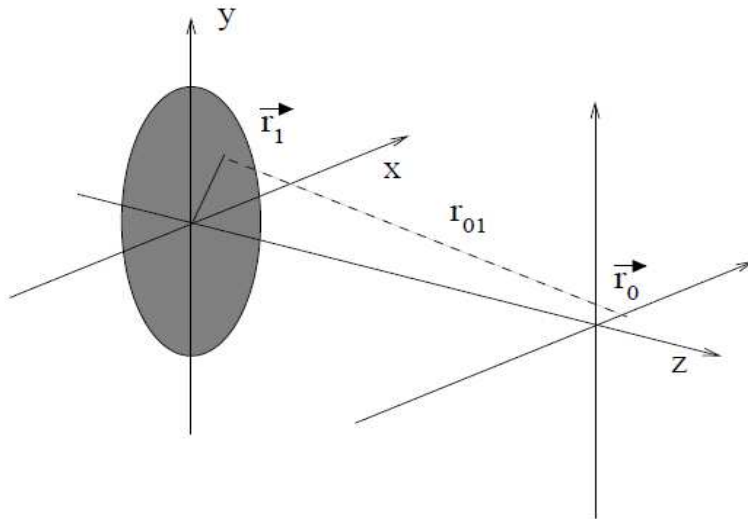


Figura 3. Coordonatele sistemului pentru formula Rayleigh-Sommerfeld. r_l reprezintă un punct de pe suprafața traductorului, r_o este punctul în care calculăm presiunea acustică, r_{01} este distanța dintre r_0 și r_l [Synnervag, 1998].

Williams și Maynard [Williams și Maynard, 1982] folosesc transformata Fourier rapidă într-un mod similar pentru a evalua integrala Rayleigh pentru presiunea acustică în spațiu

$$p(x, y, z) = -j\omega\rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(\hat{x}, \hat{y}) \frac{e^{jkR}}{2\pi R} d\hat{x}d\hat{y} \quad (15)$$

unde

$$R = (x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + z^2 \quad (16)$$

și ρ este densitatea. Relația (15) poate fi scrisă ca o convoluție astfel

$$p(x, y, d) = \hat{p}(x, y) * h(x, y, d) \quad (17)$$

unde

$$h(x, y, d) = -\frac{j\omega\rho e^{jk\sqrt{x^2+y^2+d^2}}}{2\pi\sqrt{x^2+y^2+d^2}} \quad (18)$$

pentru $d = z$. Aplicând această convoluție în spațiu, relația (15) poate fi rescrisă sub forma [Synnervag, 1998]

$$p(x, y, d) = \mathfrak{T}^{-1}\{\hat{P}(k_x, k_y)\hat{H}(k_x, k_y, d)\} \quad (19)$$

unde \mathfrak{T}^{-1} reprezintă inversa transformatei Fourier bidimensională iar $\hat{P}(k_x, k_y)$ și $\hat{H}(k_x, k_y, d)$ sunt transformările Fourier.

2.2.2. Transformata Hankel

Transformata bidimensională Fourier [Synnervag, 1998]

$$G(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (20)$$

În coordonate polare

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$R = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right)$$

se obține pentru relația (20)

$$G(R, \phi) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) e^{-j2\pi R(\cos\theta \cos\phi + \sin\theta \sin\phi)} r d\theta dr \quad (21)$$

Dacă funcția $g(r, \theta)$ este simetrică, atunci aceasta este independentă de θ

$$g(r, \theta) = g_R(r).$$

Relația (21) se poate scrie ca [Synnervag, 1998]

$$G(R, \phi) = \int_0^{\infty} g_R(r) \int_0^{2\pi} e^{-j2\pi R(\cos\theta \cos\phi + \sin\theta \sin\phi)} r d\theta dr \quad (22)$$

$$= \int_0^{\infty} g_R(r) \int_0^{2\pi} e^{-j2\pi R \cos(\theta - \phi)} r dr d\theta \quad (23)$$

Introducând funcția Bessel de ordinul 0

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-jx \cos(\theta - \phi)} d\theta \quad (24)$$

în relația (23), vom obține [Synnervag, 1998]

$$G(R) = 2\pi \int_0^{2\pi} g_R(r) J_0(2\pi r R) dr \quad (25)$$

$G(R)$ a devenit o transformată Fourier bidimensională circulară simetrică, și este denumită transformata Hankel de ordinul 0 sau transformata Fourier-Bessel. Cele două integrale din relația (14) s-au unificat într-o singură integrală, ceea ce înseamnă că s-a redus mult algoritmul de simulare acustic. Convoluția

$$g(x, y) * h(x, y) = \mathfrak{T}^{-1}\{G(k_x, k_y)H(k_x, k_y)\} \quad (26)$$

este valabilă și pentru transformarea Hankel.

2.2.3. Soluții generale ale ecuației undelor

Ecuația unei în coordonate cilindrice este [Synnervag, 1998]

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p = 0 \quad (27)$$

Soluția, p , reprezintă presiunea acustică a unei în coordonate r , θ și z , în timpul t .

O soluție generală pentru această ecuație este dată de Lu [Lu și Greenleaf, 1992]

$$p(s) = \int_0^\infty T(k) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^\pi A(\xi) f(s) d\xi \right] dk \quad (28)$$

unde

$$s = \alpha_0(k, \zeta) r \cos(\theta - \xi) + b(k, \zeta) [z \pm c_1(k, \zeta) t] \quad (29)$$

$$c_1(k, \zeta) = c \sqrt{1 + [\alpha_0(k, \zeta) / b(k, \zeta)]^2} \quad (30)$$

unde $T(k)$, $A(\zeta)$ și $f(s)$ sunt funcții complexe cunoscute. Dacă $c_1(k, \zeta)$ este independentă de k , relația (30) reprezintă o familie de unde nedifracție.

2.3. Factorii care influențează directivitatea și transmiterea undelor ultrasonore pentru rețelele liniare

În această analiză s-a folosit principiul Huygens pentru calcularea presiunii pentru un singur element. Presiunea acustică în câmp îndepărtat pentru o rețea fiind suma presiunilor de la fiecare element al rețelei, funcția de directivitate pentru un traductor rectangular este definită ca fiind [Wooh și Shi, 1999]:

$$H_1(\theta, \varphi) = \left| \sin c \left(\frac{\pi \cdot L_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi}{\lambda} \right) \cdot \sin c \left(\frac{\pi \cdot L_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{\lambda} \right) \right| \quad (31)$$

unde L_x este lățimea unui element, L_y lungimea unui element, λ lungimea de undă, θ și φ coordonatele sferice [Wooh și Shi, 1999].

Funcția de directivitate oferă informații cu privire la direcția de propagare a fasciculului. Atunci când avem o rețea de traductoare, se consideră că fiecare undă (de la fiecare emițător-element) are aceeași amplitudine, dar faze diferite rezultate din întârzierile $\Delta \tau$ emiterii unei ultrasonore dintre oricare două elemente [Wooh și Shi, 1999]:

$$\Delta \tau = \frac{d \cdot \sin \theta_s}{c} \quad (32)$$

unde d distanța dintre două elemente, θ_s unghiul de dirijare a fasciculului de unde, c viteza sunetului în aer.

Funcția de directivitate în câmp îndepărtat pentru o rețea de surse punctiforme este dată de [Wooh și Shi, 1999]:

$$H_2(\theta, \varphi) = \left| \frac{\sin[(\pi d / \lambda) \cdot (\sin \theta_s - \sin \theta \cos \varphi) N]}{N \sin[(\pi d / \lambda)(\sin \theta_s - \sin \theta \cos \varphi)]} \right| \quad (33)$$

unde N este numărul de surse.

Directivitatea pentru o rețea de elemente este dată de [Wooh și Shi, 1999]:

$$H(\theta, \varphi) = H_1(\theta, \varphi) \cdot H_2(\theta, \varphi) \quad (34)$$

S-au realizat simulări și măsurători experimentale prin care au fost puse în evidență faptul că distanța dintre elemente este invers proporțională cu lățimea loburilor. Și de asemenea, numărul de elemente al unei rețele are un rol important în ceea ce privește performanța traductorului. S-a concluzionat că lățimea lobului principal poate fi redusă prin creșterea numărului de elemente, ducând la o mai bună directivitate a traductorului. Dar, pentru studiul capetelor sonar biomimetice, trebuie să se țină cont de faptul că emițătorul trebuie să aibă dimensiuni apropiate cu cele ale unui liliac și să prezinte și o directivitate bună.

2.4. Date experimentale proprii

În cadrul studiului câmpului acustic pentru sisteme biomimetice ce folosesc eclocația, s-a simulat și s-a studiat funcția de directivitate pentru traductoare concave și liniare plane, ce pot fi folosite ca emițători, cu ajutorul programului Field II. Scopul acestor simulări este de a găsi cea mai bună variantă pentru construcția unui emițător pentru un cap sonar biomimetic.

Mediul de simulare Field II a fost conceput de Jensen [Jensen, 1996] cu scopul de a studia propagarea undelor ultrasonore în diferite medii și pentru diferite geometrii ale traductoarelor. Răspunsul spațial al impulsului (SIR) redă câmpul acustic emis într-un anumit punct din spațiu, când suprafața traductorului vibrează. Această excitație este modelată de funcția Dirac. Câmpul acustic este convoluția dintre impulsul spațial și funcția de excitație a undei [Jensen, 1991a].

Pornind de la principiul lui Huygens, fiecare punct al frontului unei unde devine o sursă secundară de unde, astfel s-a calculat răspunsul spațial al impulsului (SIR), care are formula generală dată de [Jensen, 1991a]:

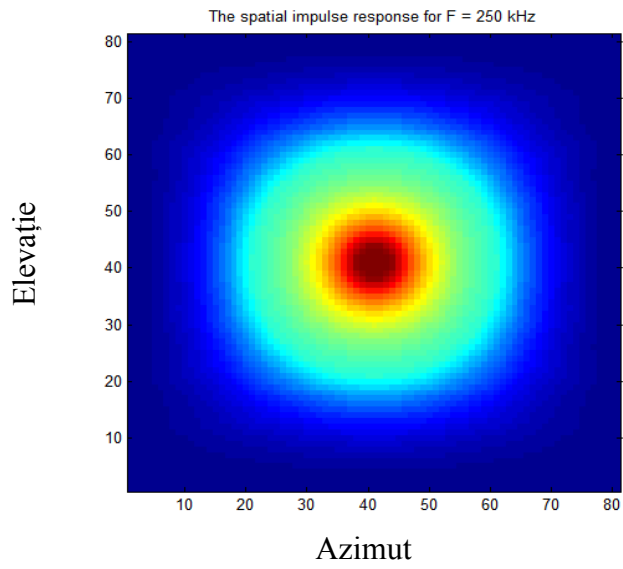
$$h(\vec{r}_1, t) = \frac{c}{2\pi} \sum_{i=1}^{N(t)} [\Theta_2^{(i)}(t) - \Theta_1^{(i)}(t)] \quad (35)$$

unde $N(t)$ reprezintă numărul de arce, determinate de fiecare ecou ce intersectează apertura la timpul t , iar $\Theta_1^{(i)}(t)$ și $\Theta_2^{(i)}(t)$ sunt unghiurile arcelor menționate.

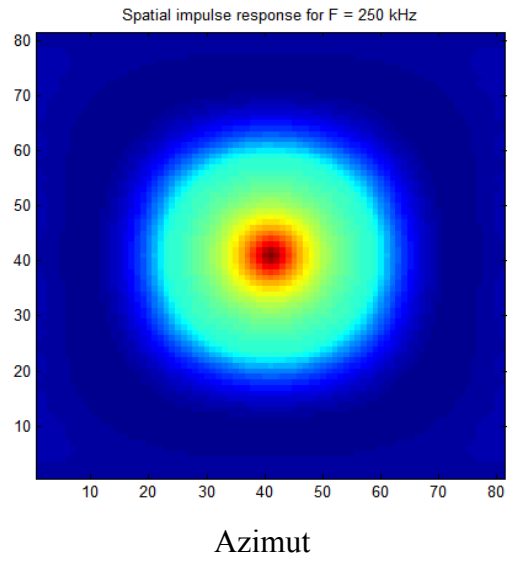
S-a simulat [Chiselev și Moraru, 2010], cu ajutorul programului Field II, directivitatea în câmp îndepărtat a unui traductor circular concav, pentru care avem dimensiunile (Figura 4): a) $R = 8$ mm, b) $R = 10$ mm, c) $R = 12$ mm, d) $R = 14$ mm, e) $R = 16$ mm, viteza sunetului în aer $c = 343$ m/s, frecvența $f = 250$ kHz, atenuare 0. Pentru simplificarea calculului s-a divizat fiecare apertură în elemente de câte 1 mm.

Un emițător – traductor prezintă o directivitate bună atunci când energia acustică este concentrată pe direcție perpendiculară pe traductor, și este caracterizată prin prezența unui lob principal îngust, și lobi secundari cu amplitudini mici sau chiar inexistenți.

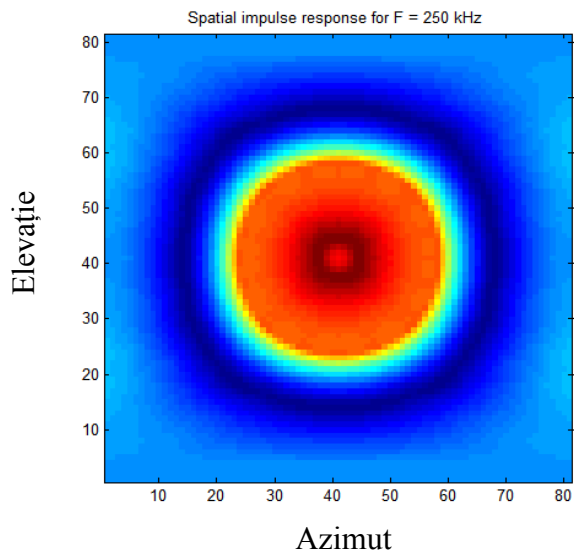
Pentru traductorul cu raza $R = 8$ mm se poate observa prezența lobului principal bine delimitat de cel secundar. Cu cât raza traductorului se mărește, își fac apariția lobi secundari, care au un efect negativ asupra receptării ecourilor [Moraru et al., 2010].



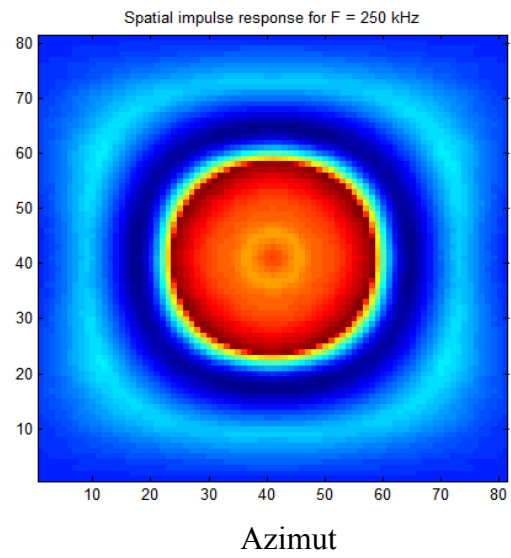
a) R = 8 mm.



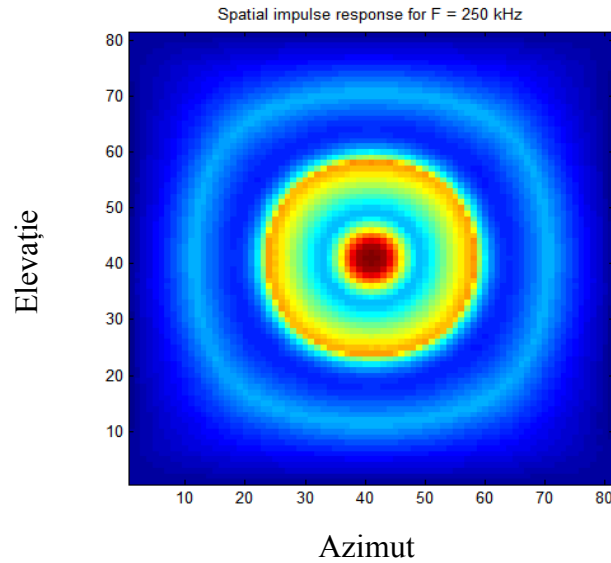
b) R = 10 mm.



c) R = 12 mm.



d) R = 14 mm.



(e) $R = 16 \text{ mm}$.

Figura 4. Răspunsul spațial al impulsului pentru un traductor concav circular cu: a) $R = 8 \text{ mm}$, b) $R = 10 \text{ mm}$, c) $R = 12 \text{ mm}$, d) $R = 14 \text{ mm}$, e) $R = 16 \text{ mm}$ [Chiselev și Moraru, 2010].

În Moraru et al. [Moraru et al., 2010] s-a studiat (cu ajutorul programului de simulare Field II) SIR pentru o rețea liniară cu 20 elemente (Figura 5) ale cărei elemente au dimensiunile: lățime 0.2 mm și lungime 2 mm . SIR este calculat, cu un defazaj, din 2 în 2 mm pe direcția (OX, în plan azimutal la distanța de 10 mm .

Răspunsul spațial al impulsului pentru această apertură a fost calculat și reprezentat în funcție de timp (Figura 6). SIR este nul înainte ca primul ecou să fie receptat de rețea. Scăderea valorilor impulsului în raport cu timpul este evident din Figura 7, și revine la valoarea 0 atunci când ecourile nu mai sunt receptate.

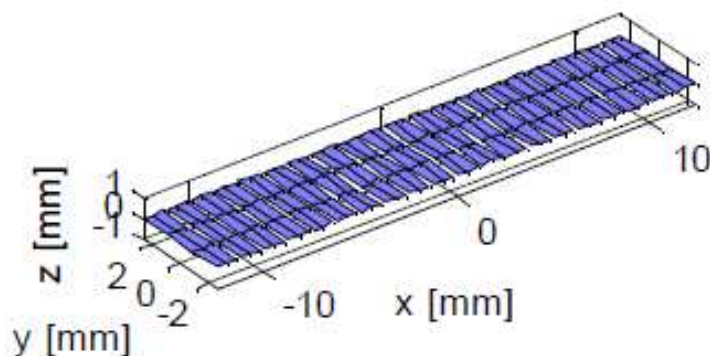


Figura 5. Rețea liniară cu 20 de elemente [Moraru et al., 2010].

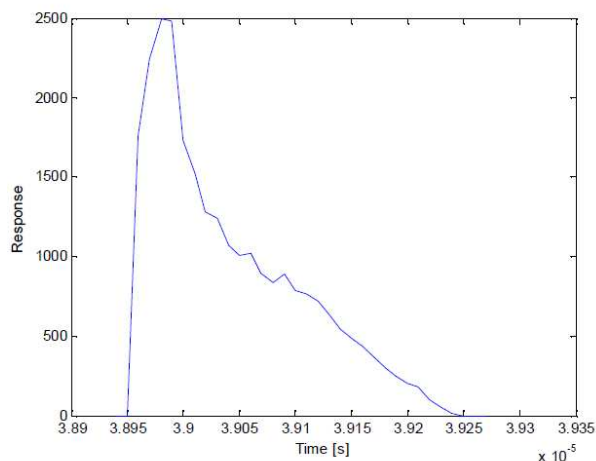


Figura 6. Impulsul – răspuns funcție de timp pentru rețeaua liniară cu 20 de elemente [Moraru et al., 2010].

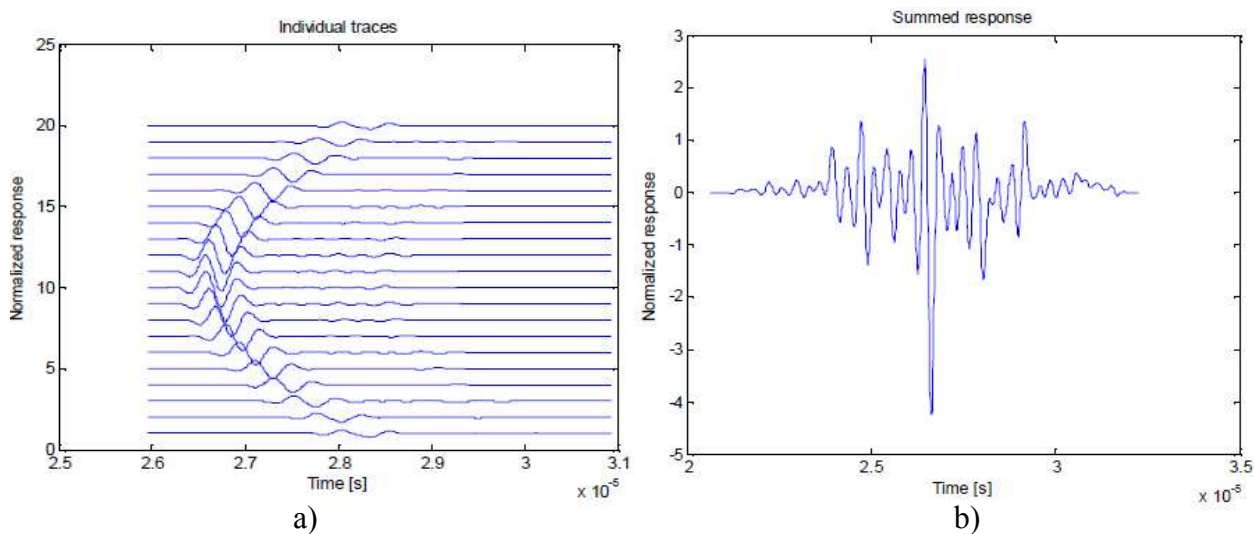


Figura 7. a) SIR individual; b) SIR însumat [Moraru et al., 2010].

În Figura 7.a) este prezentat SIR normalizat pentru fiecare element, iar în Figura 7.b) SIR sunt însumate. Se poate observa cum răspunsul spațial al impulsului se modifică în funcție de poziția aperturii, adică este funcție de timp (Figura 7.b)).

În studiul ecolocației, răspunsul spațial al impulsului unui liliac de exemplu, este strict limitat [Chiselev și Moraru, 2011], deoarece emițătorul în acest caz este unul de dimensiuni foarte mici.

În cadrul lucrării Chiselev și Moraru [Chiselev et al., 2010b] s-a studiat influența numărului de elemente al unei rețele plane de traductoare și distanța dintre elementele rețelei asupra directivității traductorului.

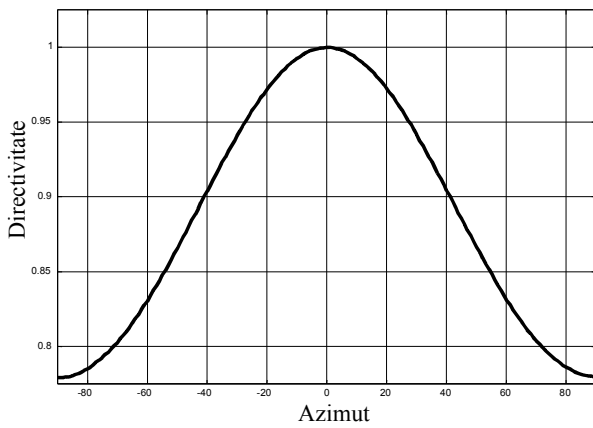
Pornind de la formula lui Wooh [Wooh și Shi, 1999] de calcul a presiunii acustice dată de relația (13)

$$P(R, \theta, \phi) = \frac{jk\rho c U_0}{2\pi R} L_x L_y \operatorname{sinc}\left(\frac{L_x \sin \theta \cos \phi}{\lambda}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{L_y \sin \theta \sin \phi}{\lambda}\right) e^{jkR}$$

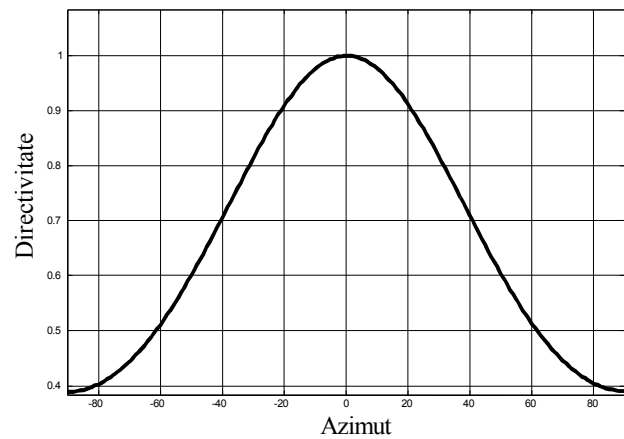
s-a realizat un studiu al directivității pentru o rețea liniară de elemente. Simulările s-au realizat cu ajutorul programului Matlab [Matlab, 2010] versiunea 2010.

S-a simulat directivitatea unei rețele de traductoare liniare în câmp îndepărtat pentru rețele cu frecvența $f = 50$ kHz, $R = 1$ m, dimensiunile unui element $L_x = \lambda/4$, $L_y = 4\lambda$ și distanța dintre oricare două elemente $d = \lambda/6$. Numărul de elemente al rețelei a variat astfel: $N = 2$, $N = 4$, $N = 6$, $N = 8$, $N = 10$, $N = 12$, $N = 14$, $N = 16$.

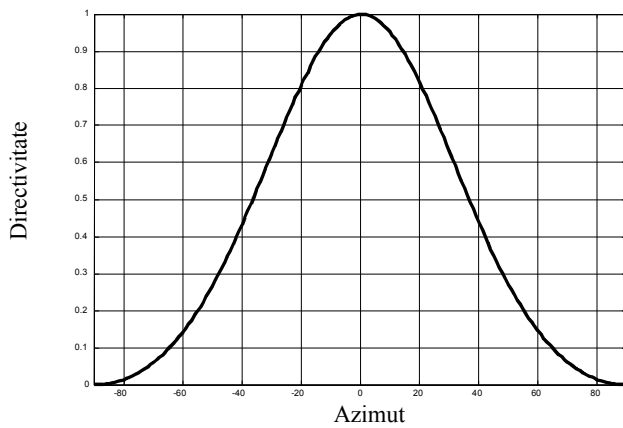
În figurile de mai jos sunt prezentate directivitățile rețelelor liniare funcție de unghiul azimut.



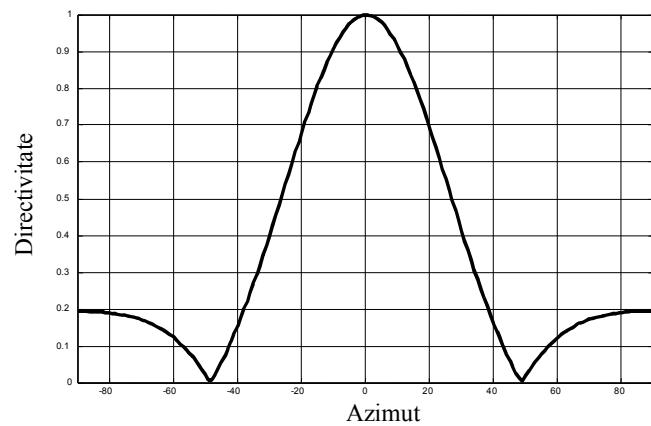
(a) $N = 2$.



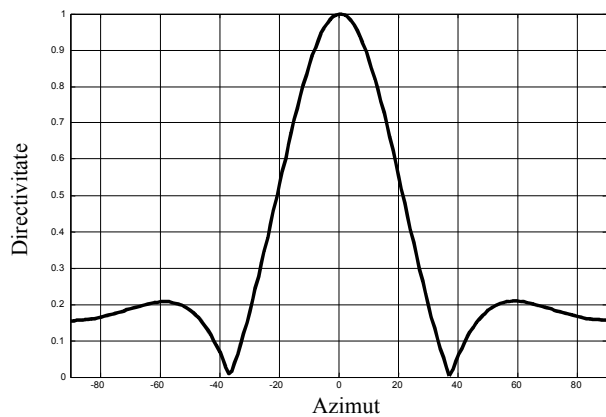
(b) $N = 4$.



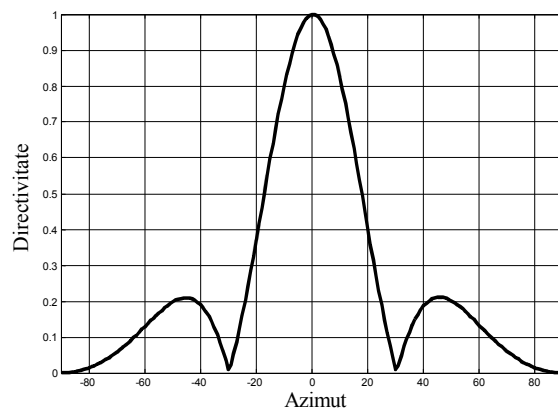
(c) $N = 6$.



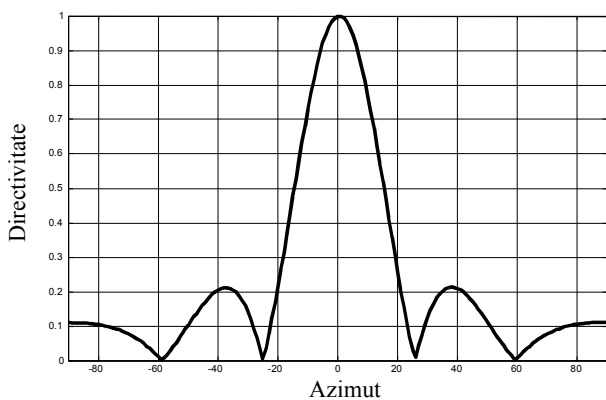
(d) $N = 8$.



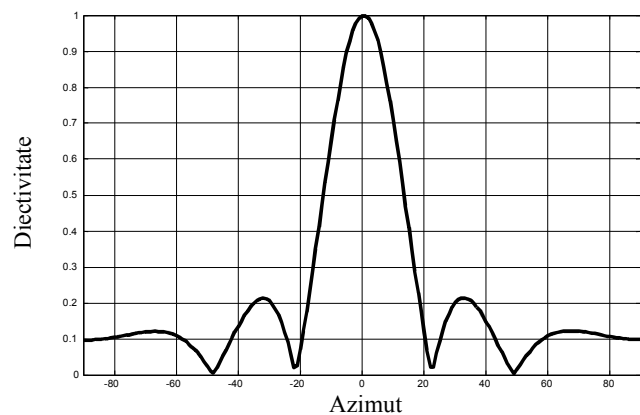
(e) $N = 10$.



(f) $N = 12$.



(g) $N = 14$.



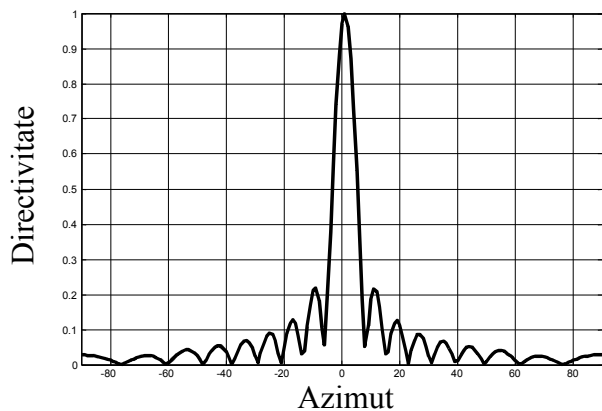
(h) $N = 16$.

Figura 8. Funcția de directivitate în zona Fraunhofer pentru rețele liniare cu N numărul de elemente: (a) $N = 2$; (b) $N = 4$; (c) $N = 6$; (d) $N = 8$; (e) $N = 10$; (f) $N = 12$; (g) $N = 14$; (h) $N = 16$ [Chiselev și Moraru, 2009].

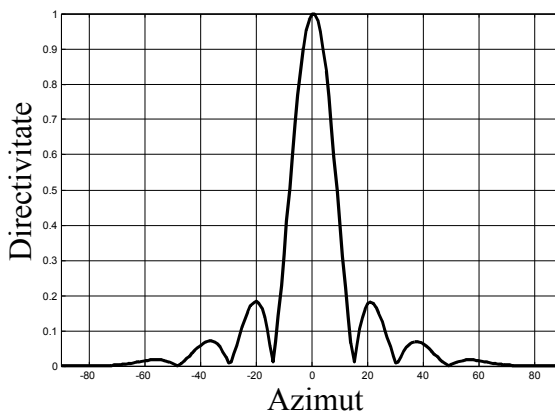
Din Figura 8.a) se poate observa că lobul principal este foarte lat. Pe măsură ce numărul de elemente N crește lobul principal devine mai îngust, dar apar și lobii secundari. Lățimea lobului principal este invers proporțională cu suprafața traductorului, în sensul că o dată cu creșterea numărului de elemente crește și suprafața ce emite pulsuri ultrasonore, deci vom avea o directivitate mai bună.

De asemenea, distanța dintre elemente este un factor important. În Figura 9 sunt prezentate directivitățile pentru o rețea liniară de elemente cu $N = 8$ elemente, frecvența $f = 70$ kHz, dimensiunile unui element $L_x = 0.005$ m, $L_y = 0.015$ m. S-a variat distanța dintre elemente astfel: $d = \lambda$, $d = \lambda/2$, $d = \lambda/4$, $d = \lambda/6$.

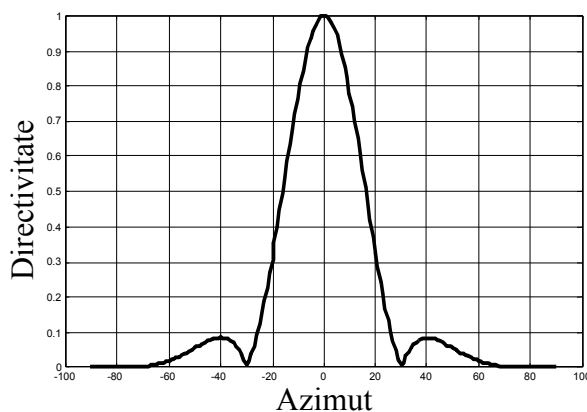
Pentru imaginile în care $d = \lambda/4$ și $d = \lambda/6$ are loc o suprimare a lobilor secundari dar și o lățime mare a lobului principal. Pentru distanțe mari între elemente, lobul principal este evident mai îngust. Apariția lobilor secundari impune o atenție deosebită, mai ales dacă au și amplitudini mari ca în cazul $d = \lambda$, deoarece induc erori la receptarea ecourilor.



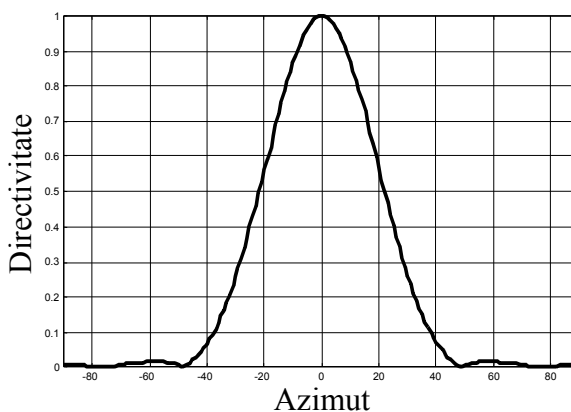
(a) $d = \lambda$.



(b) $d = \lambda/2$.



(c) $d = \lambda/4$.



(d) $d = \lambda/6$.

Figure 9. Funcția de directivitate în câmp îndepărtat pentru o rețea liniară cu $N = 8$, unde N – numărul de elemente, pentru a) $d = \lambda$; b) $d = \lambda/2$; c) $d = \lambda/4$; d) $d = \lambda/6$ [Chiselev și Moraru, 2009].

Pentru a reduce sau a elimina lobii secundari se poate modifica numărul de elemente al rețelei [Beraneck, 1996].

Concluzii

S-a studiat și s-a caracterizat câmpul presiunii acustice în zona Fraunhofer pentru diferite tipuri de traductoare. În cadrul acestui capitol s-au prezentat formulele pentru calcularea presiunii acustice pentru diferite suprafețe emițătoare.

Pentru realizarea sistemelor sonore autonome ce folosesc capete biomimetice inspirate din biologie, modelul liliacului, este necesar să se calculeze presiunea acustică în câmp îndepărtat pentru fiecare tip de emițător - traductor în parte, deoarece trebuie să se țină cont de geometria traductorului - emițător.

Se definește noțiunea de directivitate a unui emițător ca fiind variația presiunii acustice, calculată într-un punct oarecare, în funcție de un unghi de interes. Directivitatea traductoarele este

influențată de dimensiunea elementelor rețelei liniare, numărul de elemente, distanța dintre elementele rețelei și de poziția punctului în care trebuie calculată presiunea acustică. Se studiază funcția de directivitate sau directivitatea pentru că oferă informații privind direcția de propagarea a undelor ultrasonore.

Emițătorul unui cap biomimetic trebuie să respecte o serie de criterii:

- să prezinte o bună directivitate, adică lobul principal al reprezentării presiunii acustice trebuie să fie îngust și de amplitudine maximă,

- prezența lobilor secundari trebuie să fie redusă și de amplitudini mici, altfel apariția acestora poate duce la creșterea nivelului de zgomot pentru receptori, inducându-se erori la receptarea ecourilor,

- dimensiunea emițătorului trebuie să fie în concordanță cu cea a unui liliac.

În cadrul acestui capitol s-a simulat directivitatea unor emițătoare de diferite geometrii, cu scopul de a găsi cea mai bună variantă pentru un emițător de acest tip.

S-a calculat și s-a reprezentat directivitatea unui emițător de formă circulară concavă. Studiul reprezentărilor a condus la faptul că atunci când raza traductorului crește lobul principal se îngustează. Deși se dorește o asemenea evoluție a lățimii lobului principal, se observă că își fac apariția lobi secundari.

S-a simulat și s-a analizat directivitatea rețelelor plane liniare. S-a studiat influența numărului de elemente a unei rețele liniare și a distanței dintre elemente asupra funcției de directivitate. O dată cu creșterea numărului de elemente a unei rețele liniare, are loc o îmbunătățire a directivității. Această îmbunătățire are loc datorită faptului că suprafața emițătoare este mai mare, în urma creșterii numărului de elemente a rețelei. Atunci când se variază distanța dintre elemente, se observă că lățimea lobului principal este invers proporțională cu distanța dintre elemente. În acest ultim caz, există necesitatea de a face o alegere corectă deoarece traductoarele sunt mai ușor de realizat constructiv când distanța dintre elemente este mai mare, dar în acest caz se reduce numărul de elemente active ale rețelei care împiețează directivitatea fasciculului ultrasonor.

Capitolul 3. SISTEME DE DETECȚIE ULTRASONORE BIOMIMETICE, INSPIRATE DIN LUMEA VIE (MODELUL LILIACULUI)

Navigația roboților mobili ce folosește senzori reprezintă subiectul multor cercetări din ultimii anii. Inițial, sistemul sonar a fost privit ca o soluție ieftină pentru roboții mobili, pentru că oferă informații directe la costuri mici.

În cercetările de specialitate ale roboților de tip sonar un rol esențial îl are transmiterea și recepția undelor ultrasonore. Pentru a investiga, spre exemplu, sunetul produs de un liliac, traductoarele trebuie să folosească o paletă de frecvențe cuprinsă între 20 – 200 kHz, să dispună de o sensibilitate ridicată și să fie și eficiente. Pentru a construi un traductor cu aceste proprietăți, este nevoie de un material care să fie foarte bine adaptat la condițiile date. Aceste traductoare se numesc traductoare ultrasonore, pentru ca utilizează frecvențe mai mari de 20 kHz. Cu ajutorul acestor traductoare se poate investiga modul în care unele animale folosesc ecolocația ca mijloc de orientare, de capturare a prăzii, evitarea obstacolelor. Ecolocația reprezintă emisia de unde ultrasonore ce sunt reflectate ca ecouri dinspre suprafețele înconjurătoare, informații ce le pot indica animalelor poziția, distanța relativă, precum și natura obiectelor din mediul respectiv [Chiselev et al., 2009; Chiselev și Moraru, 2010]. Premisa de la care s-a plecat în studierea roboților ce

funcționează după modele inspirate din lumea vie este următoarea: dacă animalele reușesc să folosească acest sistem atunci în mod evident se pot construi sisteme robotice după un model inspirat din lumea vie. Sistemele de detecție care sunt construite după modele inspirate din lumea vie se mai numesc biosonare.

Cercetarea și implementarea roboților inspirați de modelul liliacului este un domeniu relativ nou. Există câteva rezultate remarcabile în acest sens [Kuc, 1996b; Schillebeeckx și Peremans, 2010; Walker et al., 1998; Muller și Kuc, 2007; Tardos et al., 2002; Kleeman și Kuc, 1995; Barshan și Kuc, 1992; Reijniers și Peremans, 2007].

3.1. Modelul Chiang

Chiang et al. [Chiang et al., 1998] au propus o metodă prin care pot fi calculate și estimate distanțele între un robot și o țintă.

Se consideră distanța de la robot la obstacol ca fiind distanța de la centrul robotului la centrul obstacolului.

Din Figura 1 se observă că

$$d \cos \theta = L \cos \theta' \quad (1)$$

$$L = \frac{d \cos \theta}{\cos \theta'} \quad (2)$$

$$d \sin \theta + \overline{PO} = L \sin \theta' \quad (3)$$

de unde se obține pentru L

$$L = \frac{d \sin \theta + \overline{PO}}{\sin \theta'}. \quad (4)$$

Egalând relațiile (1) și (3) se obține

$$\frac{d \cos \theta}{\cos \theta'} = \frac{d \sin \theta + \overline{PO}}{\sin \theta'} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{d \sin \theta + \overline{PO}}{d \cos \theta} \quad (6)$$

de unde

$$\theta' = \operatorname{arctg} \left(\frac{d \sin \theta + \overline{PO}}{d \cos \theta} \right). \quad (7)$$

Înlocuind relația (7) în relația (8) se obține distanța L de la robot la obstacol.

Pentru a calcula lățimea obstacolului, considerăm Figura 2 și următoarele notații [Chiang et al., 1998]:

D_1 : distanța de la primul contact al sonarului cu obstacolul.

D_2 : distanța de la al doilea contact al sonarului cu obstacolul.

D_N : distanța de la al N-lea contact al sonarului cu obstacolul.

D_L : distanța de la ultimul contact al sonarului cu obstacolul.

D_{F-1} : distanța de dinaintea ultimului contact al sonarului cu obstacolul.

D_{L+1} : distanța de la sonar la contactul cu obstacolul.

θ_1 : unghiul dintre primul contact al sonarului cu obstacolul.

θ_2 : unghiul dintre al doilea contact al sonarului cu obstacolul.

θ_F : unghiul dintre al N-lea contact al sonarului cu obstacolul.

θ_L : unghiul dintre ultimul contact al sonarului cu obstacolul.

θ_{F-1} : unghiul dintre contact și obstacolul, înainte de primul contact.

θ_{L+1} : unghiul dintre contact și obstacolul, după ultimul contact.

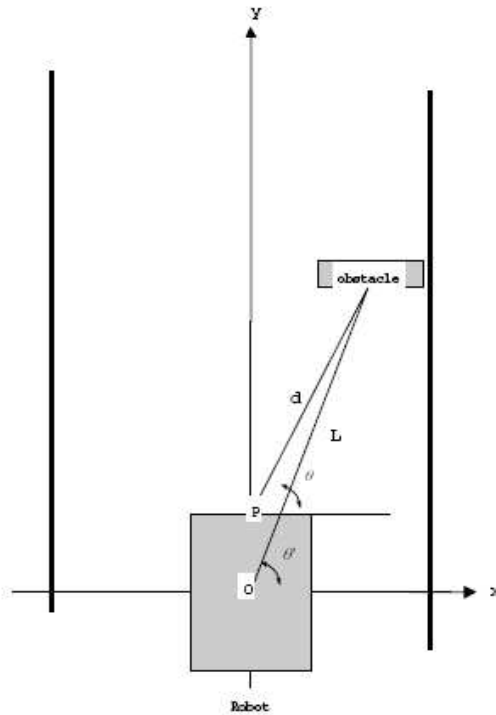


Figura 1. Sistemul de coordonate considerat [Chiang et al., 1998].

Din Figura 2 se observă că

$$\overline{OB} \sin \theta_{F-1} = D_F \sin \theta_F \quad (8)$$

$$\overline{OB} = \frac{D_F \sin \theta_F}{\sin \theta_{F-1}}. \quad (9)$$

De asemenea

$$\overline{OA} = \frac{D_L \sin \theta_L}{\sin \theta_{L+1}}. \quad (10)$$

Astfel se obține lățimea AB a obstacolului [Chiang et al., 1998]

$$\overline{AB} = \overline{OB} \cos \theta_{F-1} - \overline{OA} \cos \theta_{L+1} = D_F \sin \theta_F \operatorname{ctg} \theta_{F-1} - D_L \sin \theta_L \operatorname{ctg} \theta_{L+1}. \quad (11)$$

Pentru a afla direcția pe care trebuie să o urmeze robotul astfel încât să fie evitat obstacolul considerăm următoarele cazuri:

a) $\theta_F < 90^\circ$ și $\theta_L < 90^\circ$, în acest caz obstacolul se află în partea dreaptă a robotului.

L_{road} : lățimea drumului.

L_{robot} : lățimea robotului.

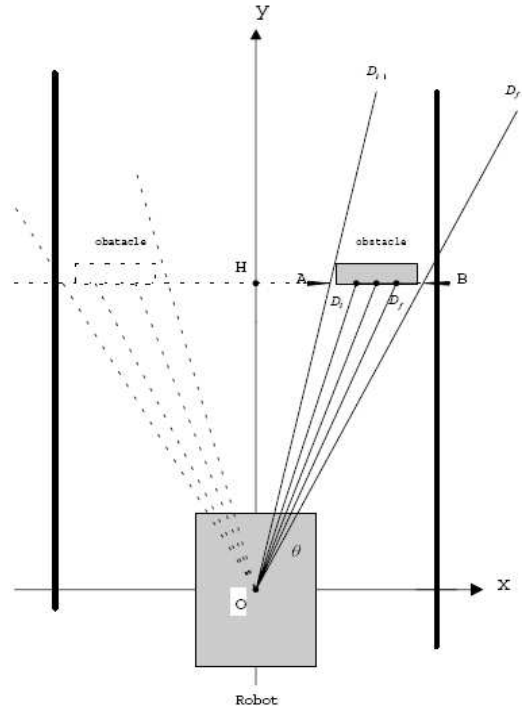


Figura 2. Sistemul de coordonate considerat [Chiang et al., 1998].

Din Figura 2 se știe [Chiang et al., 1998]

$$\overline{OA} = \frac{D_L \sin \theta_L}{\sin \theta_{L+1}}$$

atunci

$$\overline{HA} = \overline{OA} \cos \theta_{L+1} = D_L \sin \theta_L \operatorname{ctg} \theta_{L+1}. \quad (12)$$

Dacă $\overline{HA} > \frac{L_{robot}}{2}$ atunci robotul merge înainte.

Dacă $\overline{HA} \leq \frac{L_{robot}}{2}$ atunci robotul merge la stânga.

b) $\theta_L > 90^\circ$ și $\theta_F > 90^\circ$, în acest caz obstacolul se află în partea stângă a robotului.

L_{road} : lățimea drumului.

L_{robot} : lățimea robotului.

Se știe că

$$\overline{OB} = \frac{D_F \sin \theta_F}{\sin \theta_{F-1}}$$

$$\overline{HB} = \left| \overline{OB} \cos \theta_{F-1} \right| = \left| D_F \sin \theta_F \operatorname{ctg} \theta_{F-1} \right|. \quad (13)$$

Dacă $\overline{HB} > \frac{L_{robot}}{2}$ atunci robotul merge înainte.

Dacă $\overline{HB} \leq \frac{L_{robot}}{2}$ atunci robotul merge la dreapta.

3.2. Modelul Kuc

O altă propunere îi aparține lui Kuc [Kuc, 1996]. A realizat un robot cu particularitățile unui liliac, un emițător flancat de doi receptori. Sistemul sonar biomimetic propus de acesta este redat în Figura 3.

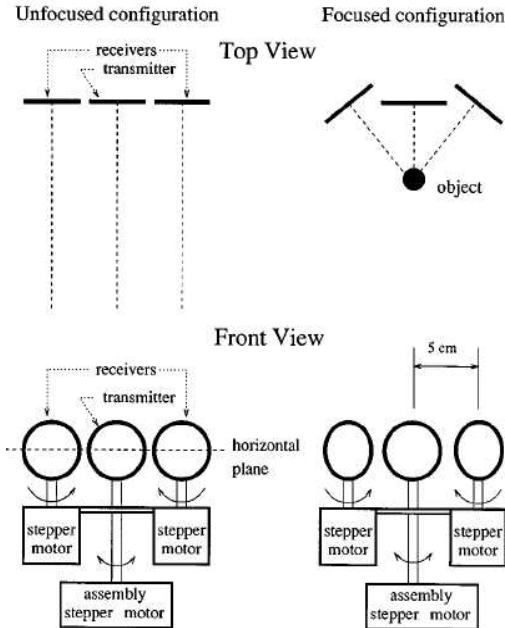


Figura 3. Sistemul biosonar. Vedere de sus și vedere frontală a sistemului. În partea stângă sistemul este nefocalizat, în partea dreaptă sistemul este focalizat [Kuc, 1996].

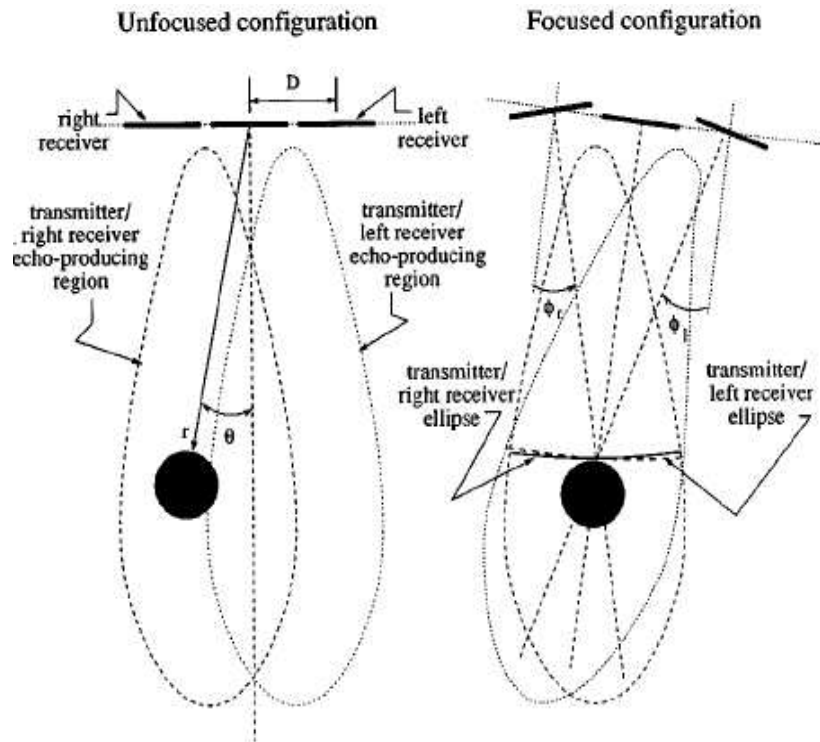


Figura 4. Privire de sus a funcției de directivitate pentru configurația nefocalizată și cea focalizată [Kuc, 1996].

Kuc a considerat două situații pentru acest sistem: sonarul este nefocalizat, adică emițătorul și receptorii sunt orientați către aceeași direcție, și configurația focalizată, atunci când atât emițătorul, care este orientat către cel mai apropiat obiect, cât și receptorii, sunt orientați astfel încât ecourile să fie detectate. Emițătorul și receptorii sunt traductoare Polaroid, sub forma circulară cu raza de 4 cm. Sistemul sonar scanează mediul, prin emiterea undelor ultrasonore și receptarea ecourilor. O nouă emisie are loc atunci când ecourile de la emisia anterioară au fost receptate și procesate. Dacă nici un ecou nu a fost receptat de la o distanță de 70 de cm, sonarul este rotit și o nouă emisie de pulsuri are loc.

Experimentul său a constatat în detectarea unui bile de 3.6 cm în diametru suspendată de un fir de nylon. Inițial, centrul sferei a fost în planul azimutal. Apoi, poziția obiectului a fost modificată. Se pornesc măsurătorile în configurație nefocalizată, emițătorul și receptorii sunt orientați în aceeași direcție (Figura 4), astfel încât ecourile sunt detectate de cel puțin un receptor. Sonarul procesează informațiile primite (adică ecourile), apoi are loc o reorientare a celor trei traductoare către același punct (aproximativ) de pe suprafața sferei care a produs ecoul.

Pentru a direcționa emițătorul către obiect sonarul folosește timpul de zbor - TOF al ecoului, informație dată de receptorii. Timpul de zbor observat de un receptor este definit ca fiind o elipsă, în care receptorul și emițătorul sunt focarele elipsei. Pentru un emițător aflat în originea unui sistem de coordonate cartezian și receptorul drept localizat la $x = D$ ($D = 5$ cm), punctul (x, y) în care un mic obiect poate produce $\text{TOF} = T_r$ este dat de [Kuc, 1996]:

$$\sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{(x - D)^2 + y^2} = cT_r. \quad (14)$$

O ecuație asemănătoare se poate scrie și pentru receptorul stâng. Dacă T_l și T_r sunt momentele de timp când se produce recepția semnalelor de cei doi receptori, obiectul se găsește la intersecția celor două elipse localizate în fața emițătorului. Parametrii r și unghiul θ (Figura 4) pot fi exprimate matematic prin [Kuc, 1996]:

$$r = \frac{(cT_l)^2 + (cT_r)^2 - 2D^2}{2c(T_l + T_r)} \quad (15)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{(c^2T_lT_r + D^2)(cT_l - cT_r)}{D(c^2T_l^2 + c^2T_r^2 - 2D^2)}\right). \quad (16)$$

Pentru a detecta un obiect ambele receptoare trebuie să recepteze ecouri. Dacă inițial doar un receptor detectează un ecou, emițătorul se rotește în direcția indicată de receptorul respectiv, astfel încât întreg sistemul se orientează către obiect.

Ecourile receptate de sistemul aflat în starea focalizată dețin o paletă mai largă de frecvențe ce se găsesc peste nivelul de zgomot. În starea nefocalizată spectrul este mai îngust. Această îngustare poate fi atribuită operațiilor de filtrare „trece-jos”. Din starea focalizată a sistemului sonar se poate determina distanța obiectului față de planul orizontal.

Din Figura 5 se poate observa că amplitudinea este mai mare când obiectul se găsește în planul orizontal, și descrește cu înălțimea. Apare fenomenul de ambiguitate atunci când obiectul se află sub planul orizontal pentru că se produc aceleași ecouri, ca și cum obiectul s-ar afla în planul azimutal pozitiv. Au fost realizate studii în acest sens, de a elimina aceasta ambiguitate [Kuc, 1996b].

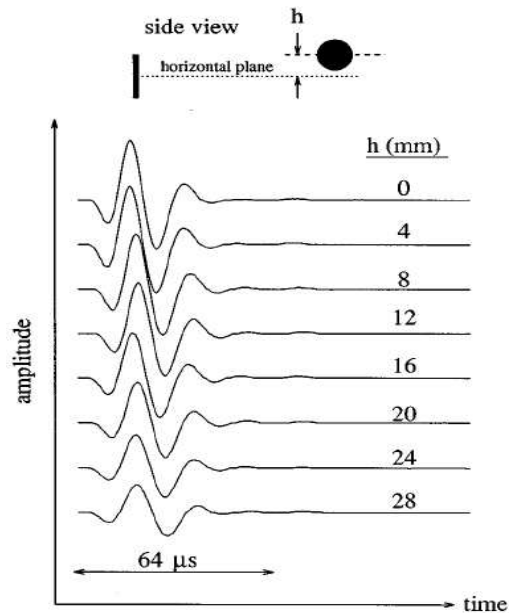


Figura 5. Mulțimea de ecouri receptate de la sferă atunci când distanța obiectului față de planul orizontal este modificată, sistem focalizat [Kuc, 1996].

Sistemul de detecție propus de Kuc prezintă un avantaj major: dacă un receptor (stâng sau drept) detectează un ecou, sistemul se reorientează până când energia receptată (de ambii receptori) este maximă. Acesta lucru îl face foarte asemănător cu sistemul de detecție al liliacului, care își rotește capul în direcția ecoului (sau ecourilor) receptat de o ureche, spre exemplu. De asemenea, o schimbare a poziției obiectului în planul elevației produce atenuări a frecvenței ecourilor, acest lucru fiind folositor în determinarea poziției obiectului față de planul orizontal.

3.3. Modelul Peremans

Schillebeeckx și Peremans [Schillebeeckx și Peremans, 2010] au realizat un robot-sonar biomimetic cu care au studiat localizare unor obiecte în spațiu 3D. Experimentele au demonstrat că lilieci folosesc informații extrase din spectrul ecourilor detectate în funcție de poziția obstacolului.

Măsurătorile au fost realizate cu ajutorul unui cap sonar biomimetic prevăzut cu doi receptori pinna de tipul liliacului *Phyllostomus discolor* și un emițător de tip Polaroid. Capul biomimetic este montat pe o platformă ce se poate roti (între -45° și $+45^\circ$) și înclina (-36° și $+36^\circ$). În fiecare „ureche” se află câte un microfon Knowles FG-23329 (Figura 6).

După fiecare emisie de unde, ecourile sunt receptate de cei doi receptori. Fiecare ecou este filtrat și este reprezentat printr-un cod spectral în domeniu frecvență. Codul spectral al ecoului este extras pentru fiecare obiect reflectat prin selectarea valorilor corespunzătoare maximelor energiilor din spectrograma inițială. Filtrarea introduce variații în codul spectral al ecoului receptat. Această filtrare este descrisă de funcția de transfer Head Related Transfer Function (HRTF).

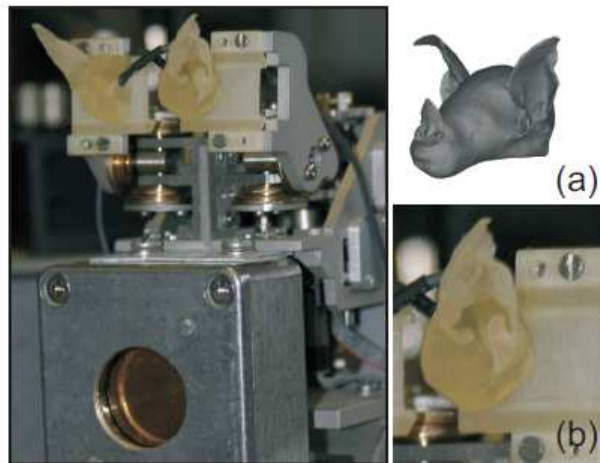


Figura 6. Capul sonar biomimetic prevăzut cu doi receptori și un emițător [Schillebeeckx și Peremans, 2010].

Procedura de localizare 3D a fost testată prin localizarea simultană a trei obiecte, și scanarea mediului în intervalul $[-40^\circ, +40^\circ]$.

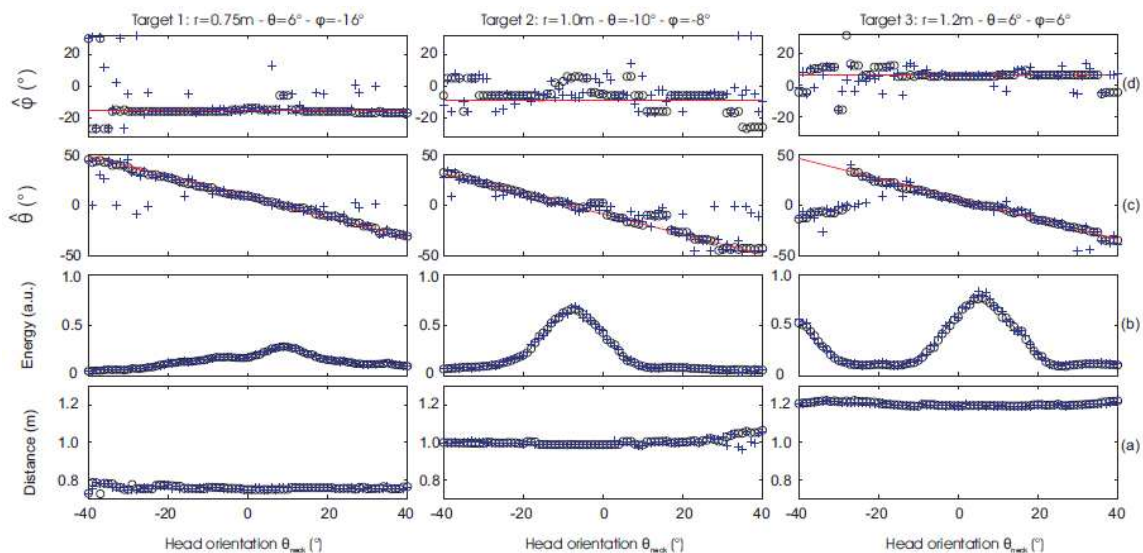


Figura 7. Experimentul 1: a) Distanța din care s-a extras codul spectral; b) energia corespunzătoare codul spectral; c) unghiul azimutal estimat $\hat{\theta}$. Linia continuă reprezintă unghiul azimutal θ corect; d) unghiul elevație estimat $\hat{\phi}$. Linia continuă reprezintă unghiul elevație ϕ corect [Schillebeeckx și Peremans, 2010].

Au fost considerate două situații: în experimentul 1 s-au folosit o bilă de lemn T_1 ($r = 0.75$ m, $d = 0.07$ m, $\theta = 6^\circ$, $\phi = -16^\circ$), o altă bilă de lemn T_2 ($r = 1$ m, $d = 0.05$ m, $\theta = -10^\circ$, $\phi = -8^\circ$) și o bilă de polistieren T_3 ($r = 1.2$ m, $d = 0.045$ m, $\theta = 6^\circ$, $\phi = 6^\circ$); în al doilea experiment s-au folosit aceleași bile, dar localizate la poziții diferite: T_1 ($r = 0.76$ m, $\theta = 6^\circ$, $\phi = 13^\circ$), T_2 ($r = 1$ m, $\theta =$

-10° , $\phi = 3^\circ$) și T_3 ($r = 1.2$ m, $\theta = 6^\circ$, $\phi = -5^\circ$). Un cod spectral a fost extras din spectrogramele rezultate din măsurătorile experimentale.

În Figurile 7 și 8 sunt prezentate rezultatele experimentului. Distanțele din Figura 7.a) arată că cele trei obiecte au fost detectate. În Figura 7.b) sunt indicate maximele energiilor în jurul unghiului azimutal de 30° .

În al doilea experiment, unghiul azimutal este bine estimat pentru toate cele trei obiecte. În schimb, unghiurile elevație din nou nu sunt foarte bine estimate. Erorile pentru măsurători sunt minime, pentru unghiurile elevație și azimut, sub 3° .

În urma acestor experimente, s-a concluzionat că se pot face estimări corecte a localizării obiectelor, în funcție de distanța dintre robot și obstacol (r), unghiul azimutal (θ) și unghiul elevație (ϕ).

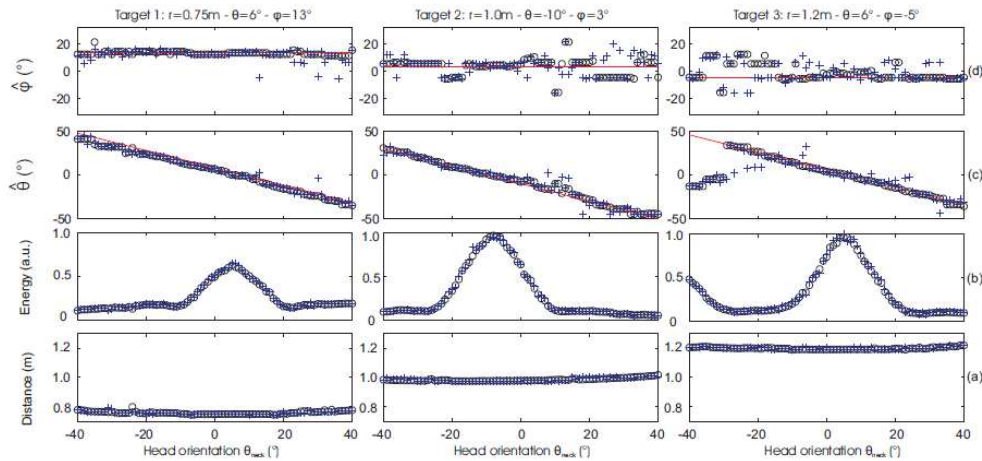


Figura 8. Experimentul 2: a) Distanța din care s-a extras codul spectral; b) energia corespunzătoare codul spectral; c) unghiul azimutal estimat $\hat{\theta}$. Linia continuă reprezintă unghiul azimutal θ corect; d) unghiul elevație estimat $\hat{\phi}$. Linia continuă reprezintă unghiul elevație ϕ corect [Schillebeeckx și Peremans, 2010].

Concluzii

Sistemele cu senzori ultrasonori sunt folosite, cu predilecție, pentru stabilirea poziției obiectelor de detectat și identificarea acestora. Stabilirea poziției unui obiect se realizează în raport cu sistemul ultrasonor și presupune măsurarea timpului de zbor dintre emiterea unui puls și receptarea ecoului. Astfel de sisteme au fost studiate de [Biber, 1980; Barshan și Kuc, 1992; Hickling și Marin, 1986].

Sistemele biosonare utilizate pentru identificarea obiectelor se bazează pe studierea spectrului frecvenței a ecoului receptat de la obiectul de detectat. Exemple de astfel de sisteme sunt descise în [Watabe, 1992; Lindstedt și Olsson, 1993; Sasaki și Takano, 1992]. Pe lângă analiza ecourilor receptate, trebuie avut în vedere și alți factori care pot influența măsurătorile experimentale.

În acest capitol s-au prezentat câteva variante de capete de tip sonar biomimetice realizate și studiate de diferite echipe de cercetare. S-au obținut rezultate remarcabile cu aceste sisteme sonare, cum ar fi recunoașterea unor geometrii pentru diferite ținte sau poziția unei ținte. Deși cercetătorii au propus diferite sisteme de detecție ultrasonore inspirate de modelul liliacului, la ora actuală nu există un astfel de cap biomimetic care să funcționeze și să fie autonom. Una din problemele majore este

faptul că emițătorul unui astfel de sistem (de regulă, s-a folosit un traductor de tip Polaroid) nu este suficient de capabil. De aceea, în capitolul 4 al acestei teze se va discuta despre o nouă variantă de emițător, realizat dintr-un material nou EMFI.

Capitolul 4. CERCETĂRI PROPRII: STUDIUL DIRECTIVITĂȚII ÎN CÂMP ÎNDEPĂRTAT A EMIȚĂTOARELOR EMFI DE TIP REȚEA LINIARĂ CU PATRU ELEMENTE ȘI REȚEA CILINDRICĂ CU PATRU ELEMENTE, UTILIZATE LA CONSTRUCȚIA CAPETELOR ULTRASONORE BIOMIMETICE

În scopul de a realiza sisteme biomimetice ultrasonore este necesar ca acestea să funcționeze după aceleași principii ca și sistemele biologice, ca de exemplu sistemul biosonar al liliacului. Sistemul biosonar al liliacului este excepțional prin faptul că realizează o serie de performanțe în diferite medii. Liliacul folosește sistemul său unic ultrasonor de emisie – recepție a undelor ultrasonore, pentru o varietate de sarcini în mediul său natural de viață.

Sistemul biosonar al liliacului folosește pulsuri acustice ultrasonore și de asemenea, procesează la nivel neuronal informațiile primite la recepția ecourilor [Chiselev și Moraru, 2011]. Deși procedeul exact și detaliat prin care liliecii reușesc să realizeze aceste performanțe este încă în cercetare, câteva caracteristici ale acestora au fost definite. Aceste date (Tabelul 1) sunt sintetizate și comparate cu datele obținute pentru șase capete biomimetice propuse de cercetători [Horiuchi și Hynna, 2001; Kuc, 1993; Kuc, 1997; Muller, 2001; Muller și Peremans, 2003; Peremans et al., 1998].

Tabelul 1. Comparații ale principalelor caracteristici ale sistemelor propuse de cercetători cu cele ale unui liliac [Peremans și Muller, 2003].

	S1[Kuc, 1993]	S2[Horiuchi și Hynna, 2001]	S3[Kuc, 1997]	S4[Peremans et al., 1998]	S5[Muller, 2001]	S6[Muller, Peremans, 2003]	Liliac
Scala ¹	~10	~1-2	~4	~4-5	~4-5	~1	1
Nr.gr.rot. ²	0	1	1	2	2	2	2
Spectru frecv. ³	Nu	Nu	Nu	Da	Da	Da	Da
Pavilioane – urechi ⁴	Nu	Da	Nu	Nu	Nu	Da	Da
Directivitate ⁵	Nu	Nu	Nu	Nu	Nu	Da	Da
Directivitate-frecvență ⁶	Nu	Nu	Nu	Nu	Nu	Da	Da
SNR ⁷ [dB]	?	?	~30	~60	>30	>>60	?
SPL ⁸ [dB]	?	?	?	?	~110	~120	~130
Nr.Cel.Pav. ⁹	1	3	1	Software	Software	~1000	700-2000
Nr.gangl. ¹⁰	0	3	0	Software	Software	~10000	13000-55000

¹Capul unui liliac se presupune că are un diametru de 4 cm.

²Numărul gradelor de rotație

³Lungimea de undă și frecvența în funcție de timp

⁴Existența pavilioanelor

⁵Directivitatea existență ce poate fi modificată

⁶Directivitatea funcție de frecvență

⁷Raportul semnal-zgomot, calculat ca raportul dintre diferența unui ecou receptat la o distanță de 1 m și zgomotul de fond

⁸Nivelul de presiune sonoră la 1 m distanță, pe direcție perpendiculară

⁹Celule receptoare la nivelul pavilioanelor

¹⁰Celule receptoare la nivelul sistemului ganglionar

Deși aceste sisteme biomimetice au fost dezvoltate și studiate cu succes în ultimii 15 – 20 de ani, la ora actuală nu există un robot biomimetic autonom ultrasonor care să prezinte toate particularitățile unui liliac și să funcționeze perfect. Din punct de vedere dimensional, majoritatea sistemelor sonore nu respectă scala unui liliac [Kuc, 1996; Jones et al., 2000; Muller, 2001]. Având dimensiuni mult mai mari decât un cap biosonar, aceste modele sunt incapabile să redea efectele fenomenului de difracție existente în jurul capului liliacului, ce facilitează receptarea ecourilor. Sistemele biomimetice care se apropie ca dimensiuni de cele ale unui liliac se folosesc de efectele difracției, în detrimentul altor caracteristici, cum ar fi mobilitatea pavilioanelor.

Mobilitatea pavilioanelor prezintă unul sau două grade de libertate pentru sistemele propuse [Kuc, 1997; Muller, 2001; Peremans et al., 1998]. Doar sistemele S2 și S6 prezintă pavilioane mobile, ce ajută la receptarea ecourilor.

Deci, pentru a realiza sisteme biomimetice care să imite din punct de vedere funcțional și operațional sistemul sonar al unui liliac, trebuie să avem în vedere următoarele aspecte:

- Forma pavilioanelor urechilor: prezintă un rol important în procesul de ecolocație datorită rolului acestora de filtrare a caracteristicilor directivității la recepția ecourilor.
- Tehnologia traductorului: liliicii sunt capabili să emită pulsuri acustice de frecvență mare, într-un mod foarte eficient. Acest lucru presupune un raport semnal-zgomot bun, chiar și pentru distanțe mari între liliac și pradă. De asemenea, sistemul de recepție este foarte sensibil, făcând posibilă și receptarea ecourilor slabe. De aceea, emițătorul trebuie să dețină proprietăți electromecanice deosebite, și să fie compatibil cu driver-ele electronice adiacente ale sistemului.
- Libertatea de rotație a receptorilor: liliicii receptează ecourile prin orientarea și controlarea poziției pavilioanelor.
- Procesarea neurologică a semnalelor: sistemul neurologic al liliicilor prezintă o provocare pentru procesarea semnalelor ultrasonore, deoarece lungimile de undă mari ale semnalelor emise trebuie să fie adaptate la cele mici ale semnalelor neurologice ce pot fi generate. Principalul mecanism utilizat în acest scop este cel de filtrare a semnalelor. Dar, crearea unui sistem neurologic format dintr-un număr mare de receptori primari din urechile liliicilor (aproximativ 15 700 - 57 200, pentru liliicii [Valter, 1998]) reprezintă un aspect dificil de reprodus pentru ingineri.

Problema receptorilor a fost intens studiată și rezultate remarcabile s-au obținut în această direcție. Muller și Peremans [Muller și Peremans, 2003] au realizat un studiu al pavilioanelor pentru speciile de lilieci: *Eptesicus fuscus*, *Myotis nattereri*, *Nyctalus noctula*, *Plecotus auritus*, *Pipistrellus nathusii*, *Pipistrellus pipistrellus*, *Rhinolophus ferrumequinum*, *Rhinolophus rouxi* și *Tadarida sp.*

Pentru a realiza sisteme sonore biomimetice este necesar ca emițătorul să prezinte o serie de parametri corespunzători cu parametrii specifici liliacului.

Tabel 2. Principalii parametri pentru un liliac [Muller și Peremans, 2003].

	Emitător	Receptor
Dimensiune	15 x 15 mm	< 10 x 10 mm
Paletă de frecvență	20 – 200 kHz	20 – 200 kHz
Nivel de presiune sonoră (SPL)	80 – 100 dB la 1 m	-
Sensitivitate	-	> 1 mV/Pa
SPL al mediului	-	< 40 dB

Toate sistemele biomimetice ultrasonore au folosit ca și emițător traductorul de tip Polaroid și s-a observat că acest tip de emițător introduce erori la măsurările experimentale [Schillebeeckx și Peremans, 2010].

Capacitatea liliecilor de a ecologa și a utiliza acest proces pentru a vâna într-un spațiu complet întunecat a reprezentat o reală provocare pentru cercetătorii din domeniul roboticii [Muller și Kuc, 2007]. Pentru a identifica obiecte 3D este necesară cunoașterea unor parametrii ca: distanța dintre sistemul sonar considerat și obiect, unghiurile azimut și elevație.

Majoritatea sistemelor sonore se folosesc de funcția ITD (Interaural Time Difference) și de funcția HRTF (Head Related Transfer Function) pentru a obține informații din mediu [Barshan și Kuc, 1992; Kuc, 1993; Peremans et al., 1993; Kleeman și Kuc, 1995; Barshan și Sekmen, 1999]. Aceste funcții sunt importante pentru că oferă informații referitoare la direcția de propagarea a sunetelor.

Datele experimentale au arătat că sistemul sonar al liliecilor prezintă o directivitate complexă [de Mey et al., 2008] și variată (depinde de specia de liliac). Capacitatea liliecilor de a-și mișca pavilioanele urechilor este un factor care îi ajută în timpul procesului de ecolocație [Pye et al., 1962]. O astfel de tehnică a fost implementată pe un cap biomimetic ultrasonor de către Peremans [Peremans et al., 1998].

4.1. Funcția HRTF (Head Related Transfer Function)

Liliecii se bazează pe procesul de ecolocație pentru a se deplasa și a vâna. Studiul sistemelor neuronale ale liliecilor a evidențiat faptul că aceștia se folosesc de două funcții foarte importante: HRTF – Head Related Transfer Function și IID – Interaural Intensity Differences. IID este folosită de lilieci pentru a determina diferențele de intensitate a presiunii acustice dintre cei doi receptori [de Mey, 2010]. HRTF este o funcție dependentă de frecvență, ce caracterizează variația presiunii sonore în diferite poziții dintr-un mediu cu presiunea acustică receptată [Young et al., 1996].

Pentru că pulsurile ultrasonore sunt emise de o structură direcțională, gură sau nări, funcție de specia de liliac [Hiryu et al., 2006; Strother și Mogus, 1970], este important să se includă în studiul emițătorului și funcția HRTF.

Datorită influenței funcției HRTF asupra emisiei undelor ultrasonore de către lilieci, în cadrul măsurărilor experimentale realizate în cadrul acestei teze, s-a luat în considerare și această funcție.

4.2. Date experimentale proprii

Un rol deosebit de important pentru realizarea unui robot ce utilizează ecolocația îl prezintă emițătorul. Forma, dimensiunea, natura materialului din care e confecționat sunt extrem de importante.

În cadrul cercetărilor mele, am propus un emițător de tip rețea liniar cu patru elemente dreptunghiulare, realizat din materialul EMFI și unul cilindric format tot din patru elemente dreptunghiulare (Figura 1). Noutatea în cadrul acestor cercetări este că nu s-a mai folosit materialul EMFI și această formă de emițător pentru un cap biomimetic.

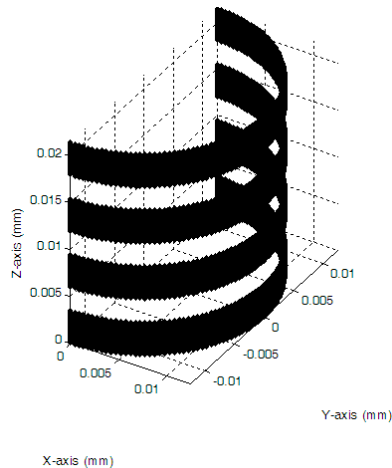


Figura 1. Suprafața emițătoare de tip rețea cu patru elemente dispuse pe un cilindru.

Partea experimentală a acestui studiu a fost realizată în cadrul mobilității internaționale la Universitatea Antwerp din Belgia, Active Perception Lab, sub îndrumarea prof. dr. H. Peremans.

Măsurătorile experimentale s-au realizat cu ajutorul unui braț – robot R7 (Figura 2), conectat la un computer.



Figura 2. Brațul robot utilizat în măsurătorile experimentale din laboratorul Active Perception Lab, Belgia.

Emițătorul, realizat din material EMFI, a fost fixat în fața receptorului (brațul robotizat). Brațul robot receptor, prevăzut cu un microfon Brüel&Kjær, a realizat măsurători pe o semisferă aflată pe direcție perpendiculară pe emițător, la distanța de 30 cm (Figura 3). Pentru că liliecii folosesc unghiul azimut și elevație, am realizat măsurători în plan azimutal și elevație simultan ($-90^\circ : +90^\circ$) pentru ambele unghiuri.

Directivitatea presiunii acustice reprezintă presiunea acustică calculată într-un anumit punct în funcție de unghiul azimut și elevație. Aceste unghiuri sunt prezentate în Figura 4 [de Mey, 2010]. S-a calculat directivitatea pentru fiecare rețea și apoi s-au interpolat rezultatele cu funcția HRTF.

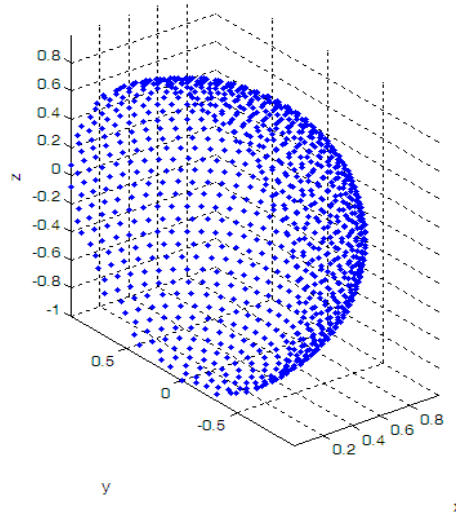


Figura 3. Planul semisferic considerat pentru măsurători.

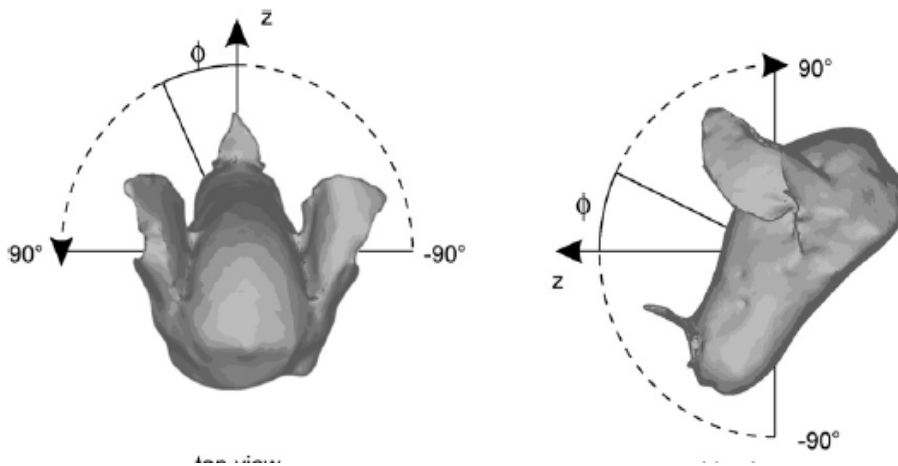


Figura 4. Unghiul azimut și elevație utilizat de lilieci [de Mey, 2010].

Frecvența de eșantionare folosită a fost de 250 kHz, iar măsurătorile s-au realizat utilizând frecvențe cuprinse în intervalul (20 – 80) kHz, cu rata de 1 kHz.

Dimensiunea unui element al rețelei liniare este: lățimea $L_x = 4.5$ mm, lungime $L_y = 42.45$ mm, iar distanța dintre două elemente consecutive $d = 1$ mm. Rețeaua se află în planul $(x0y)$, iar măsurătorile s-au realizat pe direcția axei $(0z)$.

S-au realizat o serie de experimente în care timpul de întârziere dintre elemente este 0 s, iar apoi s-a folosit un timp de întârziere de 0.028 ms pentru fiecare element al rețelei.

Am realizat un studiu [Chiselev și Moraru, 2011b] al funcției de directivitate pentru distribuțiile măsurate experimental, considerând nouă puncte de interes, luate atât în plan azimutal cât și în elevație (Figura 5). S-au luat în considerare directivitățile pentru frecvențe cuprinse în intervalul (25 - 75) kHz cu rata de 10 kHz.

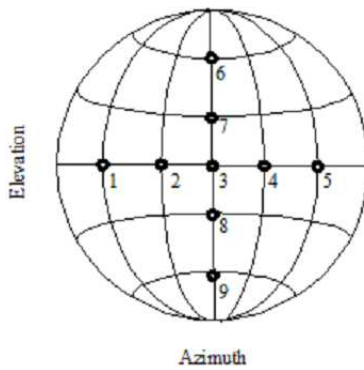
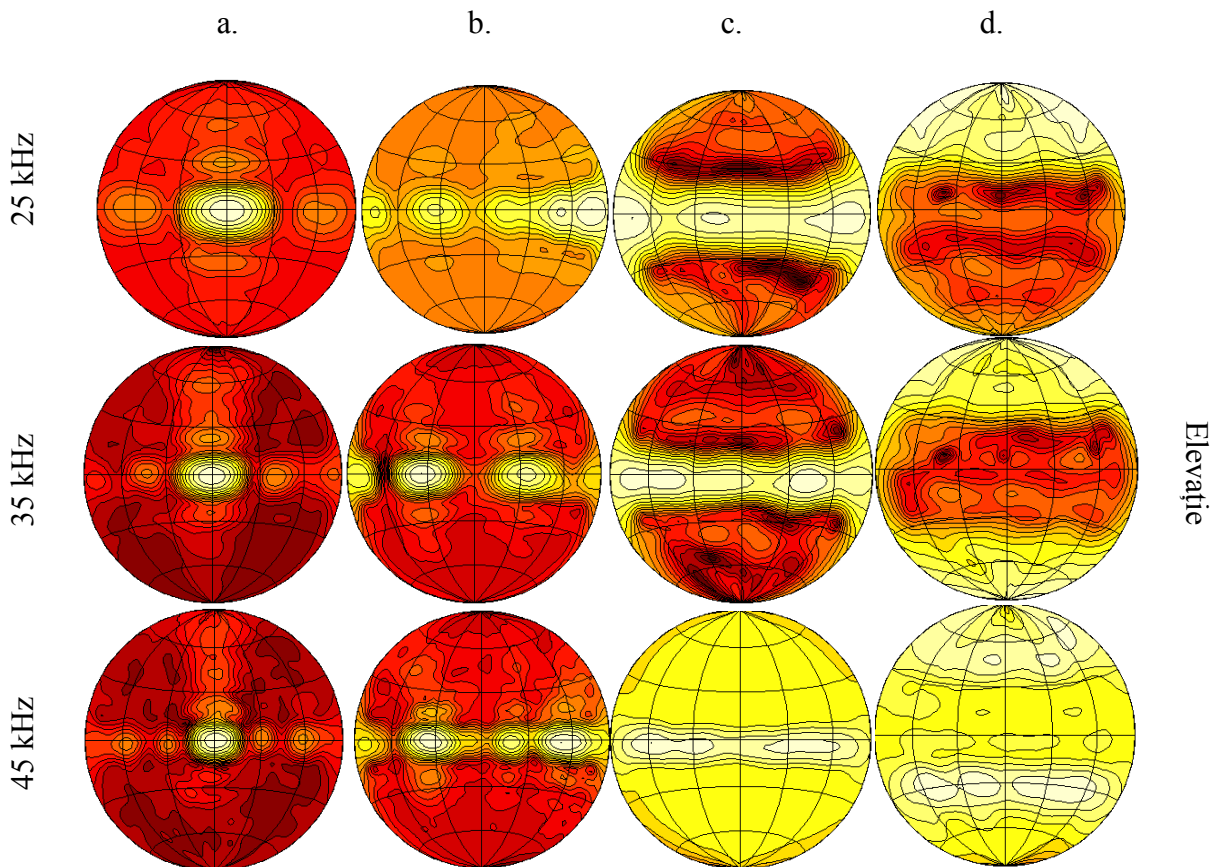


Figura 5. Cele nouă puncte de interes considerate.



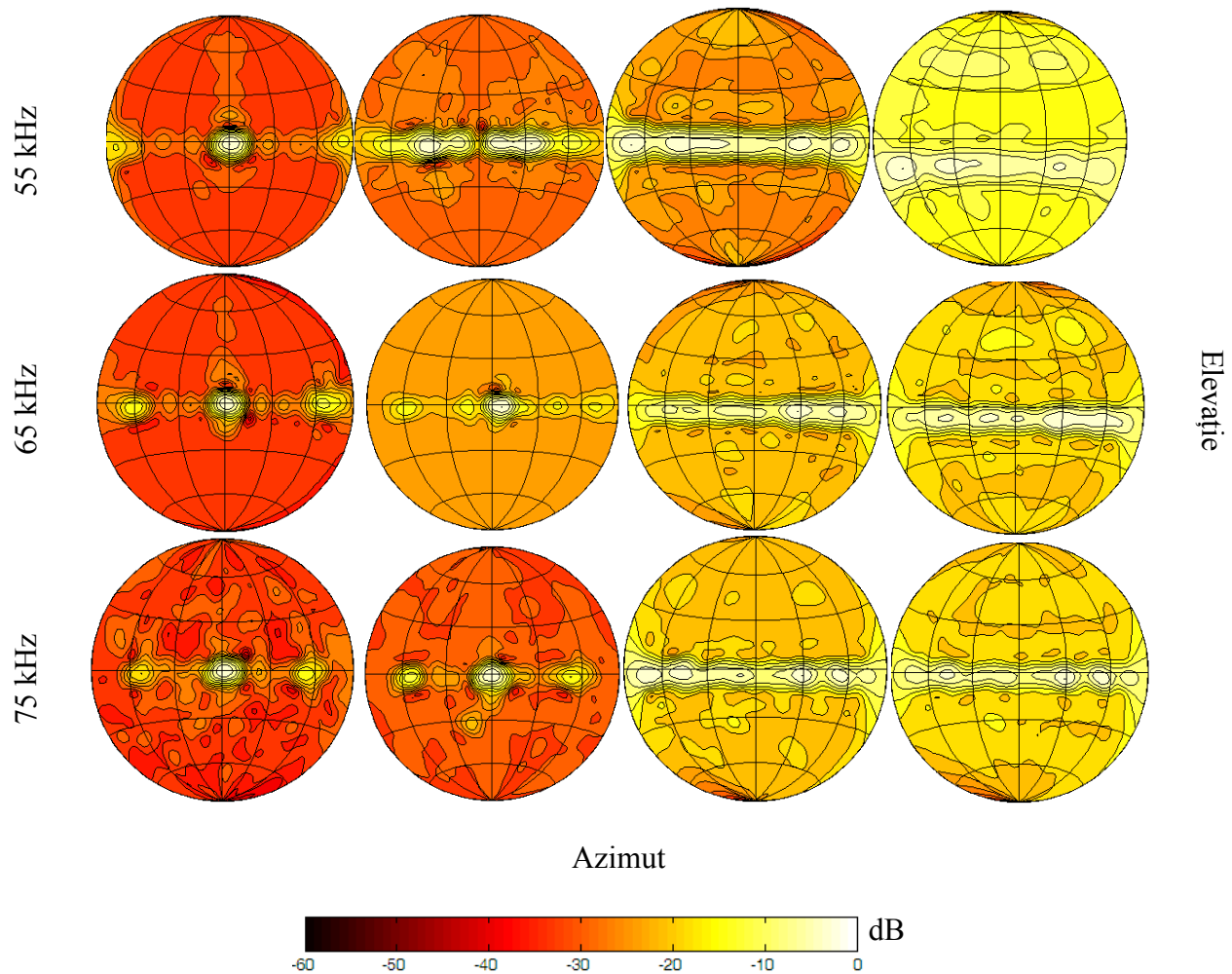


Figure 6. Directivitatea în câmp îndepărtat : a. rețea liniară cu patru elemente, fără timp de întârziere; b. rețea liniară cu patru elemente, cu timp de întârziere; c. rețea cilindrică cu patru elemente, fără timp de întârziere; d. rețea cilindrică cu patru elemente, cu timp de întârziere.

În cadrul acestui studiu s-a urmărit poziția lobului principal, prin selectarea SPL (Sound pressure Level) - nivelul de presiune sonoră, în planul azimut și elevație.

În tabelele 3 și 4 sunt prezentate nivelele de SPL în punctele de interes pentru fiecare tip de emițător.

Analizând datele prezentate în tabelele 3 și 4 se pot extrage informații despre distribuția presiunii acustice în câmp îndepărtat. Din Tabelul 3 se poate observa o bună directivitate a rețelei liniare, fără timp de întârziere, când frecvența are valori mici.

Tabel 3. Valorile SPL pentru cele nouă puncte de studiu (rețea plană liniară cu patru elemente).

Rețea liniară plană – fără timp de întârziere (kHz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	-24.72	-24.26	-0.008	-22.91	-25.82	-30.25	-23.07	-28.46	-34.69
35	-39.63	-34.20	-0.008	-33.18	-34	-28.87	-29.56	-31.18	-43.51
45	-26.9	-25.97	-0.42	-25.16	-23.26	-31.30	-31.93	-41.02	-45.43
55	-25.59	-27.46	-0.10	-25.03	-24.76	-28.16	-28.52	-28.09	-31.02
65	-12.59	-27.73	-0.10	-27.68	-12.65	-29.60	-29.35	-31.55	-31.93
75	-18.77	-24.48	-0.008	-24.44	-15.41	-30.58	-30	-30.85	-31.39
Rețea liniară plană – cu timp de întârziere (kHz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	-20.39	-8.01	-16	-10.33	-3.77	-24.40	-23.31	-24.49	-24.88
35	-41.89	-0.79	-30.12	-5.24	-20.75	-37.20	-37.20	-39.94	-40.41
45	-28.12	-1.37	-19.69	-14.80	-1.37	-38.27	-37.24	-39.90	-40.08
55	-11.08	-2.35	-17.98	-1.17	-10.11	-28.02	-28.03	-27.62	-28.01
65	-13.62	-19.63	-1.16	-18.67	-16.39	-22.54	-22.17	-22.54	-22.80
75	-14.04	-22.63	-0.008	-25.32	-15.66	-29.34	-28.64	-29.03	-29.29

Tabel 4. Valorile SPL pentru cele nouă puncte de studiu (rețea cilindrică cu patru elemente).

Rețea cilindrică – fără timp de întârziere (kHz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	-3.96	-3.85	-3.98	-4.31	-2	-31.5	-49.62	-28.62	-33.54
35	-2.1	-4.42	-4.17	-3.71	-5.48	-44.63	-31.88	-31.18	-43.37
45	-0.73	-2.72	-5	-3.02	-3.75	-14.28	-13.9	-13.53	-13.88
55	-4.51	-3.39	-5.61	-5	-6.5	-21.27	-24.46	-24.31	-25.56
65	-7.3	-9.27	-8.27	-2.68	-4.63	-18.53	-21.26	-20.63	-18.27
75	-4.52	-7.02	-9.10	-2.76	-6.23	-19.08	-19.41	-19.54	-18.31
Rețea cilindrică – cu timp de	1	2	3	4	5	6	7	8	9

întârziere (kHz)									
25 kHz	-27.33	-25.58	-31.12	-29.74	-33.01	-9.12	-10.01	-35.31	-32.08
35	-32.04	-35.10	-33.76	-32.75	-32.18	-10.69	-21.43	-28.42	-8.67
45	-10.86	-11.32	-11.74	-12.04	-11.23	-4.44	-11.95	-3.49	-13.48
55	-13.03	-11.74	-11.58	-12.81	-12.45	-10.31	-12.69	-10.13	-12.93
65	-8.13	-11.75	-12.65	-7.54	-8.81	-17.65	-18.11	-17.21	-17.78
75	-5.87	-6.68	-7.63	-1.54	-5.34	-17.93	-17.97	-18	-17.95

O dată cu creșterea frecvenței, lobul principal devine mai îngust. Un nivel optim pentru lobul principal prezintă valoarea de -0.008 dB pentru SPL. Această valoare este prezentă pentru fiecare imagine cu excepția $f = 45$ kHz. Când frecvența crește lobi secundari își fac prezența cu valori ale SPL mai mici decât -0.008 dB. De exemplu, pentru $f = 65$ kHz, lobi secundari, punctele 1 până la 5, au valori pentru SPL -12.59 dB și -12.65 dB. Atunci când se introduce un timp de întârziere între elementele rețelei, lobul principal se găsește în planul azimutal pentru toate valorile frecvenței. Pentru 65-75 kHz, amplitudinea lobului principal are valoare apropiată de valoarea -0.008 dB, pentru 65 kHz avem -1.16 dB și pentru 75 kHz avem -0.008 dB.

Pentru distribuțiile considerate în acest studiu ale directivității rețelei cilindrice cu patru elemente, se observă că atunci când nu este timp de întârziere lobul principal se poziționează pe direcția $(-60^\circ; 0^\circ)$. Pentru 25 kHz, lobul principal are nivelul SPL de -2 dB, poziția 5. Atunci când frecvența crește valorile SPL devin ușor egale, deci lobi principali și secundari au tendința de a se uniformiza, în special pentru valori mari ale frecvenței, 65 și 75 kHz.

Când se introduce timpul de întârziere, lobi principali și secundari se deplasează în câmpul elevației. De asemenea, pentru valori mari ale frecvenței se observă valori apropiate ale SPL pentru cele nouă puncte de investigație, și imposibilitatea extragerii unor informații folositoare.

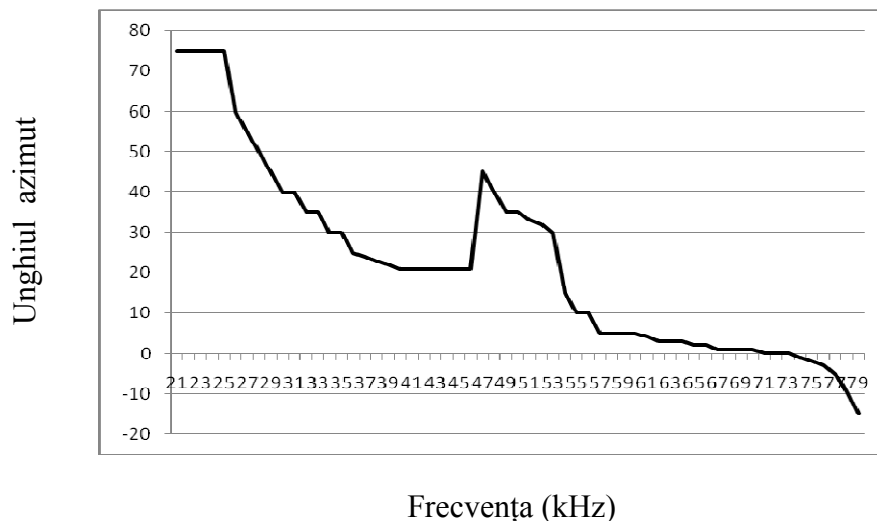


Figura 7. Reprezentarea lobului principal funcție de frecvență și unghiul azimut (rețea liniară plană, cu timp de întârziere).

În graficul din Figura 7 este prezentată apariția lobului principal funcție de frecvențe și unghiul azimut, pentru măsurătorile experimentale realizate pentru rețeaua liniară, cu timp de întârziere. Esențial este faptul că acest tip de emițător concentrează energia acustică în plan

azimutal, pentru valori ale unghiului azimut de ($0^\circ - 40^\circ$), ușor diferit atunci când nu este timp de întârziere.

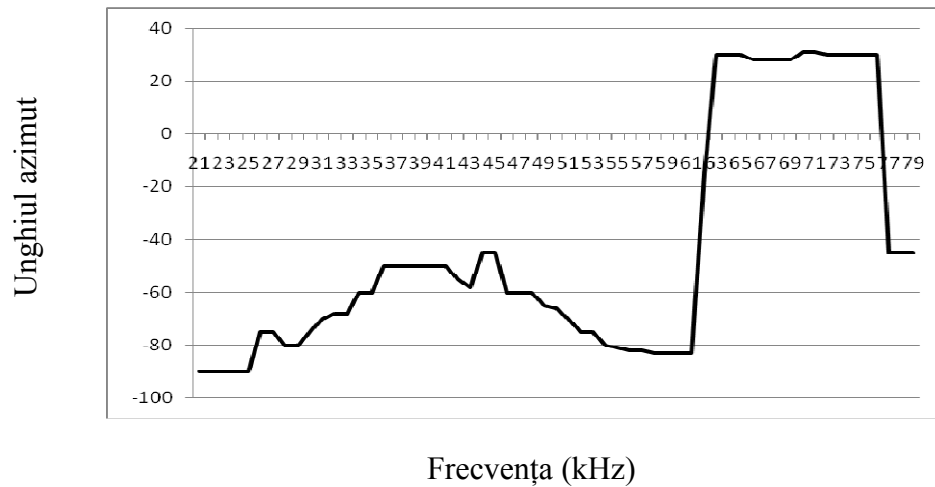


Figura 8. Reprezentarea lobului principal funcție de frecvență și unghiul azimut (rețea cilindrică, fără timp de întârziere).

În graficul din Figura 8 este prezentată apariția lobului principal funcție de frecvență și unghiul azimut pentru rețea cilindrică, fără timp de întârziere. Lobul principal se deplasează și în acest caz în planul azimutal, și are loc un “salt” a acestuia din planul negativ în cel pozitiv.

Studiind graficul 9 se observă că lobul principal se deplasează în intervalul ($0^\circ - 40^\circ$) în planul elevației, pentru valori mai mari de 39 kHz ale frecvenței.

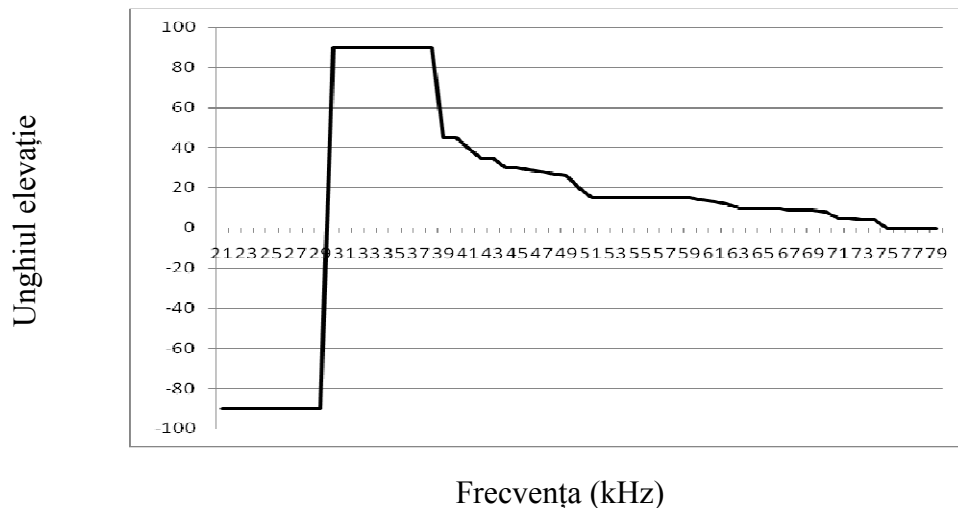


Figura 9. Reprezentarea lobului principal funcție de frecvență și unghiul elevație (rețea cilindrică, cu timp de întârziere).

Concluzii

Există un interes deosebit pentru dezvoltarea roboților ce folosesc modele inspirate din lumea vie. Numeroase cercetări s-au realizat în ultimii ani cu scopul de a îmbunătăți roboții utilizați în zilele noastre.

Unul din cel mai interesant model inspirat din lumea vie este cel al liliacului. Liliacul folosește ecolocația într-un mod inteligent, pentru a vâna sau a se deplasa. Pornind de la principiul ecolocației, s-au realizat capete sonar biomimetice, care „copiază” geometria capului unui liliac, adică poziția și forma emițătorului și a receptorului.

Având în vedere că se acordă importanță mai ales capului biomimetic, deci formei emițătorului cât și receptorului, în cadrul acestui capitol am studiat două tipuri de emițătoare realizate dintr-un material performant, materialul EMFI, sub forma unei rețele liniare cu patru elemente dreptunghiulare, dispuse în planul (xOy) și sub formă unui semicilindru cu patru elemente. Măsurătorile experimentale s-au realizat cu un robot – braț, în care s-a folosit 0 s timp de întârziere, pentru ca apoi să se utilizeze 0.028 ms timp de întârziere, în vederea optimizării funcției de directivitate.

În urma măsurătorile experimentale, se poate concluziona că directivitatea câmpului acustic în zona îndepărtată (zona Fraunhofer) are de suferit o dată cu creșterea frecvenței, pentru ambele tipuri de măsurători (cu și fără timp de întârziere). De asemenea, lobii principali obținuți pentru rețeaua liniară plană prezintă forma și poziția apropiate de cea din literatura de specialitate, pentru măsurătorile realizate fără timp de întârziere.

În cazul măsurătorilor experimentale cu timp de întârziere, lobul principal nu este foarte bine delimitat, iar apariția lobilor secundari vor induce erorile la receptarea ecourilor, lucru valabil, mai ales, pentru frecvențe mari. O recomandare ar fi creșterea timpului de întârziere dintre elemente.

Pentru rețeaua cilindrică, atunci când nu este timp de întârziere între elementele rețelei, planul lobilor principali și secundari se deplasează în planul azimut. Prezența lobilor secundari cu valori ale SPL apropiate de cele ale lobului principal, va induce erori. Atunci când se introduce timpul de întârziere, lobii sunt direcționați în planul elevație.

În urma studiului realizat, putem să subliniem următoarele aspecte referitoare la acest tip de rețele: atât rețelele plane liniare cât și cele dispuse pe un cilindru, fără timp de întârziere, prezintă o directivitate bună, pentru frecvențe mici; introducerea timpului de întârziere între elementele succesive ale rețelei conduce la erori mari în ceea ce privește apariția lobilor principali și secundari.

Din punct de vedere dimensional, ar fi interesant de studiat rețele de traductoare cu mai multe elemente decât cele considerate sau cu alte dimensiuni ale elementelor. O dată cu creșterea numărului de elemente, se va obține o mai bună directivitate, deoarece suprafața care emite va fi mai mare. De asemenea, timpul de întârziere aplicat fiecărui element poate fi modificat, pentru a se vedea îmbunătățiri ale directivității în zona Fraunhofer.

Capitolul V. CONCLUZII FINALE ȘI REZULTATE PERSONALE

Acest capitol cuprinde principalele concluzii care sunt raportate în lucrarea de doctorat cu titlul “Contribuții privind corelarea parametrilor de propagare a undelor ultrasonore cu tehnologia de realizare a capetelor sonar biomimetice”, dar și direcții viitoare pentru continuarea studiului început.

Principalele rezultate ale acestei teze de doctorat sunt sumarizate după cum urmează:

1. În teza de doctorat s-au studiat câteva variante de emițătoare ce pot fi utilizate la construcția capetelor sonar biomimetice.
2. Din gama de subiecte existente în literatura de specialitate s-au selectat acelea care pot prezenta un interes aparte raportat la stadiul actual al temei de cercetare, la nivel internațional. Există un interes deosebit pentru industria roboticii atât la nivel național, cât mai ales la nivel internațional, cercetătorii orientându-se spre studiul sistemelor de detecție sonare ce folosesc capete ultrasonore biomimetice.
3. Direcția principală de cercetare urmată în cadrul acestei teze a constat în crearea celei mai bune variante de emițător aplicabil pentru un cap biosonar, construit din materialul EMFI.
4. În cele ce urmează se vor expune principalele contribuții și rezultatele obținute pe direcția de cercetare urmată:
 - a) Pentru sistemele biosonar care folosesc eclocația, vorbim de un cap biomimetic cu doi receptori și un emițător. Dacă problema receptorilor a fost deja rezolvată, eficiența emițătorului este una din problemele care trebuie rezolvată pentru buna funcționare a unui robot biomimetic autonom de acest tip. În toate cercetările de specialitate s-a utilizat traductorul Polaroid, despre care în urma studiilor experimentale s-a concluzionat că nu oferă un randament foarte bun în comparație cu necesitățile unui robot biomimetic. Deși s-a studiat diferite materiale piezoelectrice, în urma măsurătorilor experimentale realizate, materialul EMFI s-a dovedit a fi alegerea optimă pentru că îndeplinește o serie de criterii: prezintă o sensibilitate ridicată pentru mediul de propagare a undelor ultrasonore, în cazul de față aerul; este flexibil; poate fi folosit pentru o paletă variată de frecvențe (20-200) kHz; este capabil să măsoare modificările mici de forță și presiune, conținutul de informații este ridicat, costul accesibil.
 - b) Pentru realizarea sistemelor sonare autonome ce folosesc capete biomimetice inspirate din biologie, urmând modelul liliacului, este necesar să se calculeze presiunea acustică în câmp îndepărtat pentru fiecare tip de emițător - traductor în parte, deoarece trebuie să se țină cont de geometria traductorului – emițător al unui cap biomimetic care trebuie să respecte o serie de condiții preliminare:
 - să prezinte o bună directivitate, adică lobul principal al reprezentării presiunii acustice trebuie să fie îngust și de amplitudine maximă,
 - prezența lobilor secundari trebuie să fie redusă și de amplitudini mici, altfel apariția acestora poate duce la creșterea nivelului de zgomot pentru receptori, inducându-se erori la receptarea ecourilor,
 - dimensiunea emițătorului trebuie să fie în concordanță cu cea a unui liliac.
 - c) S-a calculat și s-a reprezentat directivitatea unui emițător de formă circulară concavă. Studiul reprezentărilor a condus la faptul că atunci când raza traductorului crește, lobul principal se îngustează. Deși se dorește o asemenea evoluție a lățimii lobului principal, se observă că își fac apariția lobi secundari. În plus, nici raza emițătorului nu poate crește foarte mult deoarece nu se mai respectă dimensiunile modelului biomimetic ultrasonor.
 - d) Cu ajutorul mediului de programare Field II s-a simulat și s-a analizat directivitatea rețelelor plane liniare. S-a studiat influența numărului de elemente a unei rețele liniare și distanța dintre elemente asupra funcției de directivitate. O dată cu creșterea numărului de elemente a unei rețele liniare, are loc o îmbunătățire a directivității. Această îmbunătățire are loc datorită faptului că suprafața emițătoare este mai mare, în urma creșterii numărului de elemente a rețelei. Atunci când se variază distanța dintre elemente, se observă că lățimea lobului principal este invers proporțională cu distanța dintre elemente. S-a căutat varianta optimă din

punctul de vedere al performanței câmpului acustic, prin corelarea numărului de elemente al rețelei cu distanța dintre elemente. Există necesitatea de a face o alegere corectă, deoarece traductoarele sunt mai ușor de realizat constructiv când distanța dintre elemente este mai mare, dar în acest caz se reduce numărul de elemente active ale rețelei care impiedică directivitatea fasciculului ultrasonor.

- e) S-au realizat măsurători experimentale ale directivității pentru două tipuri de geometrii de emițătoare: s-au realizat emițătoare din material EMFI, sub forma unei rețele liniare cu patru elemente dreptunghiulare, și sub forma unui semicilindru cu patru elemente.
- f) Măsurătorile experimentale s-au realizat cu un robot – braț, în care s-a folosit 0 s timp de întârziere pentru fiecare element al rețelei, pentru ca apoi să se utilizeze 0.028 ms timp de întârziere, în vederea optimizării funcției de directivitate.
- g) În urma măsurătorilor experimentale, s-a constatat că directivitatea câmpului acustic în zona îndepărtată (zona Fraunhofer) are de suferit o dată cu creșterea frecvenței, pentru ambele tipuri de măsurători (cu și fără timp de întârziere).
- h) De asemenea, lobi principalii obținuți pentru rețeaua liniară plană prezintă forma și poziția apropiate de cea din literatura de specialitate pentru măsurătorile realizate fără timp de întârziere, adică lobul principal se află pe direcția azimut - elevație ($0^{\circ}; 0^{\circ}$). Cu cât frecvența crește cu atât și lobi principalii descresc în lățime, și apar lobi secundari și chiar acei lobi „falși” (lobii care au aceeași amplitudine ca lobul principal, fiind deseori confundați cu lobul principal), care au un rol negativ asupra recepției ecourilor.
- i) În cazul măsurătorilor experimentale pentru rețeaua plană liniară cu timp de întârziere între elementele rețelei, lobul principal nu este foarte bine delimitat, iar apariția lobilor secundari vor induce erori la recepția ecourilor, lucru valabil, mai ales, pentru frecvențe mari.
- j) Pentru rețeaua semicilindrică, atunci când nu există timp de întârziere între elementele rețelei, planul lobilor principali și secundari se deplasează în planul azimut. Cu cât frecvența crește cu atât și poziția lobului principal se modifică, tinzând să ajungă pe direcție perpendiculară față de receptor. Lobii secundari au lățimi comparabile cu cele ale lobului principal, pentru valori ale frecvenței cuprinse în intervalul (20 – 45) kHz. O dată cu creșterea frecvenței aceștia devin bine delimitați de lobul principal. Din imaginile prezentate se evidențiază faptul că lobul principal împreună cu lobi secundari se deplasează în planul azimutal. Prezența lobilor secundari cu valori ale SPL apropiate de cele ale lobului principal, va induce erori.
- k) Atunci când se introduce timpul de întârziere, lobi sunt direcționați în planul elevație. Lobul principal pentru toate distribuțiile presiunii acustice este sub direcția 0° în plan azimutal, iar lobi secundari se găsesc pe aceeași direcție cu lobul principal. O dată cu creșterea frecvenței, lobi secundari devin și mai „prezenți” iar împreună cu lobi „falși” induc erori rezultând în disiparea energiei acustice. Având în vedere că emițătorul are o formă curbă, este normal ca o parte din energie să nu fie recepțată de către brațul robotizat, pentru anumite poziții ale brațului față de emițător.

În urma studiului realizat, putem să subliniem următoarele lucruri referitoare la acest tip de rețele: atât rețelele plane liniare cât și cele dispuse pe un cilindru, fără timp de întârziere, prezintă o directivitate bună, pentru frecvențe mici; introducerea timpului de întârziere între elemente succesive conduce la erori mari în ceea ce privește apariția lobilor principali și secundari.

Ca direcții viitoare de cercetare, ar fi interesant de studiat rețele de traductoare cu mai multe elemente sau cu alte geometrii decât cele considerate în cadrul acestei cercetări, realizate din acest

material inteligent EMFI. O dată cu creșterea numărului de elemente, se va obține o mai bună directivitate, deoarece suprafața care emite va fi mai mare, dar se va pierde din miniaturizarea dispozitivului, așa cum i se impune unui cap biomimetic ultrasonor. De asemenea, timpul de întârziere aplicat fiecărui element poate fi modificat, pentru a se vedea îmbunătățiri ale directivității în zona Fraunhofer.

Bibliografie

- Aytekin, M., Sound localization by echolocating bats, PhD thesis, University of Maryland, 2007.
- Barshan, B., Kuc, R., A bat-like sonar system for obstacle localization, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 22(4), p. 636–646, 1992.
- Barshan, B., Sekmen, A. S., Radius of curvature estimation and localization of targets using multiple sonar sensors, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 105(4), p. 2318–2331, 1999.
- Barshan, B., Directional processing of ultrasonic arc maps and its comparison with existing techniques, The International Journal of Robotics Research, vol. 26(8), p. 797–820, 2007.
- Beranek, L.L., Acoustics, Acoustical Society of America, ed. Wiley and Sons, USA, 1996.
- Carlile, S., The auditory periphery of the ferret: directional response properties and the pattern of interaural level differences, J. Acous. Soc. Am., vol. 88(5), p. 2180 - 2195, 1990.
- Chiang, W., Ramamurthy, D.C., Mundhenk, T.N., Hall, E.L., Range detection for AGV using a rotating sonar sensor, Intelligence Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Technique and Active Vision, vol. 3522, p. 435-443, 1998.
- Chiselev, A.M.**, Moraru, L., Biomimetic sonar for object localization, Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics Fascicle II, Year I (XXXII), p. 151 – 158, 2009.
- Chiselev, A.M.**, Moraru, L., Gogu, A., Localization of an object using a bat model, inspired from biology, Rom. J. Biophys., vol. 19(4), p. 251-258, 2009a.
- Chiselev, A. M.**, Moraru, L., A study regarding spatial impulse response of concave transducers with applications on bats, The 3rd International Symposium of Electrical and Electronics Engineering 2010, 2010, Romania.
- Chiselev, A.M.**, Moraru, L., Onose, L., Study of far-field directivity pattern for linear arrays, Physics Conference TIM 10, 2010b, Romania.
- Chiselev, A.M.**, Moraru, L., Consideration regarding echolocation of bats, J. of Sci.Art., vol. 1(14), p. 97-102, 2011.
- de Mey, F., Function follows form: analysis and applications of biological and bio-inspired array sensors, teză doctorat, University of Antwerp, 2010.
- De Mey, F., Reijniers, J., Peremans, H., Otani, M., Firzlaff, U., Simulated head related transfer function of the phyllostomid bat *Phyllostomus discolor*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124(4), p. 2123–2132, 2008.
- Ealo, J. L., Seco, F., Jimenez, A., Broadband EMFit based transducers for ultrasonic air applications, IEEE Trans. Ultrason., vol. 55(4), p. 919 – 929, 2008.
- Firzlaff, U., Schuller, G., Spectral directionality of the external ear of the lesser spear – nosed bat, Hear. Res., vol. 181, p. 27 – 39, 2003.
- Griffin, D., Novick, A., Acoustic orientation of neotropical bats, J. Exp. Zool., vol. 130, p. 251-300, 1955.
- Henson, O.W., Bishop, A., Keating, A., Kobler, J., Henson, M., Wilson, B., Hansen, R., Biosonar imaging of insects by *Pteronotus p. parnellii*, the mustached bat, NATIONAL Geographic Research, vol. 3, p. 82 – 101, 1987.

Hendee, W. R., Ritenour, E.R., Medical Imaging Physics, Fourth Edition, Ed. Wiley – Liss, 2002, New York.

Hickling, R., Marin, S., The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air, Journal of Acoustics Society of America, vol. 79, p. 1151 – 1160, 1986.

Hiryu, S., Katsura, K., Lin, L.K., Watanabe, Y., Radiation pattern on echolocation pulse in Taiwanese leaf-nosed bat, *Hipposideros terasensis*, Acous. Sci. & Tech., vol. 27(2), p.108 – 110, 2006.

Horiuchi, T., Hynna, K., Spike-based modeling of the ILD system in the echolocating bat, Neural Networks, vol. 14, p. 755 – 762, 2001.

Humanski, R., Butler, R., The contribution of the near ear and far ear toward localization of sound in the sagittal plane, J. Acous. Soc. Am., vol. 83(6), p. 2300 - 2310, 1988.

Jensen, J. A., A model for the propagation and scattering of ultrasound in tissue, J. Acoust. Soc. Am., vol. 89, p. 182–191, 1991a.

Jensen, J. A., Field: A program for Simulating Ultrasound System, 10th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Imaging, Medical & Biological Engineering & Computing, p. 351-353, 1996.

Jones, S., Meddis, R., Lim, S.C., Temple, A.R., Toward a digital neuromorphic pitch extraction system, IEEE Trans. Neural Networks, vol. 11(4), p. 978 - 987, 2000.

Kleeman, L., Kuc, R., Mobile robot sonar for target localization and classification, International Journal of Robotics Research, vol. 14(4), p. 295–318, 1995.

Kleeman, L., Advanced sonar with velocity compensation, The International Journal of Robotics Research, vol. 23(2), p. 111–126, 2004.

Kuc, R., Biologically motivated adaptive sonar system, J. Acous. Soc. Am., vol. 100(3), p. 1849 – 1854, 1996.

Kuc, R., Sensorimotor model of bat echolocation and prey capture, J. Acous. Soc. Am., vol. 96, p. 1965 – 1978, 1996b.

Kuc, R., Three-dimensional tracking using qualitative bionic sonar, Robotics and Autonomous Systems, vol. 11(3–4), p. 213–219, 1993.

Kuc, R., Biomimetic sonar recognizes objects using binaural information, J. Acous.Soc.Am., vol. 102(2), p. 689-696, 1997

Kunz, T., Pierson, E.D., Bats of the world, The Johns Hopkins University Press, p. 5-47, 1994, USA.

Lawrence, B., Simmons, J., Echolocation in bats: the external ear and perception of the vertical positions of targets, Science, vol. 218, p. 481 – 483, 1982.

Leonard, J.J., Durrant – Whyte, H.F., Direct sonar sensing for mobile robot navigation, 1992.

Lindstedt, G., Olsson, G., Using ultrasonics for sensing in a robotic environment, In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 671 – 676, 1993.

MATLAB 2010, Matrix Laboratory, The MathWorks, Inc., SUA.

Moraru, L., Onose, L., **Chiselev, A. M.**, Simulation of 2-D Linear Array Transducers and Beam Profile Used in Echolocation, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, vol. 12(3), p.13-17, 2010.

Muller, R., A synthetic biosonar-observer, in Proceedings of the 4th Meeting of the German Neuroscience Society 2001; 28th Gottingen Neurobiology Conference, vol. 2, p. 1040, 2001, Thieme.

Muller, R., Peremans, H., Biomimetic integration of neural and acoustic signal processing, 2003.

Muller, R., Hallam, J., Knowledge mining for biomimetic smart antenna shapes, Robotics and Autonomous Systems, vol. 54(4), p. 131 - 145, 2005.

Muller, R., Kuc, R., Biosonar-inspired technology: goals, challenges and insights, *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 2(4), p. 146–161, 2007.

Novick, A., Acoustic orientation, *Biology of Bats*, vol. 3, p. 274-289, 1977.

Obrist, M., Venstrup, J., Hearing and hunting in red bats: audiogram and ear properties, *J. Exp. Biol.*, vol. 180, p. 119 – 152, 1993.

Peremans, H., Audenaert, K., Van Campenhout, J., A high-resolution sensor based on tri-aural perception, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9(1), p. 36–48, 1993.

Peremans, H., Walker, V.A., Hallam, J.C.T., 3d object localisation with a binaural sonarhead, inspirations from biology, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, p. 2795-2800, USA, 1998.

Peremans, H., Muller, R., A comprehensive robotic model for neural and acoustic signal processing in bat, in *Proceedings of The 1st International IEEE EMBS Neural Engineering Conference*, p. 458-461, 2003.

Pye, J., Flinn, M., Pye, A., Correlated orientation sounds and ear movements of horseshoe bats, *Nature*, vol. 196, p. 1186–1188, 1962.

Reijniers, J., Peremans, H., Biomimetic sonar system performing spectrum-based localization, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23(6), p. 1151–1159, 2007.

Sasaki, K., Takano, M., Classification of objects' surface by acoustic transfer function, In *Proc. of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, p. 821- 828, 1992.

Schillebeeckx, F., Peremans, H., Biomimetic sensor: 3D localization of multiple reflectors, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, 2010.

Sherman, C.H., Butler, J.L., *Transducers and arrays for underwater sound*”, Ed. Springer Science, 2007, New York.

Schnitzler, H.-U., Grinnell, A.D., Directional sensitivity of echolocation in the horseshoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum*. I. Directionality of sound emission, *J. Comp. Physiol. Am.*, vol. 116, p. 51–61, 1977.

Simmons, J.A., Perception of echo phase information in bat sonar, *Science*, vol. 204, p. 1336 – 1338, 1979.

Simmons, J.A., Stein, R.A., Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and evolution of echolocation, *J.Comp.Physiol.A.*, vol. 135, p. 61 – 84, 1982a.

Synnervag, J.F., Linear and nonlinear propagation of limited diffraction beams, In *Proceedings Ultrasonic Symposium*, vol. 2, p. 1870 – 1889, 1998, Japan.

Strother, G., Mogus, M., Acoustical beam patterns for bats: some theoretical considerations, *J.Acoust.Soc.Am.*, vol.48, p.1430 – 1432, 1970.

Tardos, J., Neira, J., Newman, P., Leonard, J., Robust mapping and localization in indoor environments using sonar data, *International Journal of Robotics Research*, vol. 21(4), p. 311–330, 2002.

Van Trees, H., *Detection, estimation, and modulation theory, Part I*, Wiley – Interscience, 2001.

Walker, V.A., Peremans, H., Hallam, J.C.T., One tone, two ears, three dimensions: A robotic investigation of pinnae movements used by rhinolophid and hipposiderid bats, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104(1), p. 569-579, 1998.

Williams, E.G., Maynard, J.D., Numerical evaluation of the Rayleigh integral for planar radiators using the FFT, 1982.

- Woo, S., Shi, Y., Three-dimensional beam directivity of phase-steered ultrasound, J. Acoust. Soc. Am., vol. 105(6), p. 3275 – 3282, 1999.
- Wotton, J., Haresign, T., Simmons., J., Spatially dependent acoustic cues generated by the external ear of the big brown bat, J. Acous. Soc. Am., vol. 98(3), p. 1423 - 1445, 1995.
- Wotton, J., Simmons., J., Spectral cues and perception of the vertical position of targets by the big brown bat, J. Acous. Soc. Am., vol. 107(2), p. 1034 - 1041, 2000.
- Young, E., Rice, J., Tong, S., Effects of pinna position on head related transfer function in the cat, J. Acoust. Soc. Am., vol. 99(5), p. 3064 - 3076, 1996.
- Xu, L., Middlebrooks, J., Individual differences in external ear transfer functions of cats, J. Acous. Soc. Am., vol. 107(3), p. 1451 - 1459, 2000.

Lista lucrărilor publicate

❖ Articole categoria ISI Thomson

1. Moraru Luminița, Onose Laura, **Chiselev Ana-Maria**, Simulation of 2-D Linear Array Transducers and Beam Profile Used in Echolocation, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, vol.12(3), p.13-17, 2010, <http://ceai.srait.ro/index.php/ceai/article/view/956>
2. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, A study of far field directivity pattern of bio-inspired EMFit emitters, acceptat spre publicare IEEE Sensors.

❖ Articole categoria ISI Proceedings

1. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, A study regarding spatial impulse response of concave transducers with applications on bats, The 3rd International Symposium of Electrical and Electronics Engineering 2010 (ISEEE), p. 201-203, 2010, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5628513
2. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Laura Onose, Study of far-field directivity pattern for linear arrays, AIP Conf. Proc. vol. 1387, p. 262 – 269, 2011 <http://scitation.aip.org/proceedings/confproceed/1387.jsp>

❖ Articole categoria BDI

1. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Gogu Anisia, Localization of an object using a bat model, inspired from biology, in Romanian Journal of Biophysics, vol. 19(4), p. 251-258, 2009, <http://www.biophysicsnet.ro/rjb/articles/257/amchi.pdf>.
2. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Pressure field of acoustic sensor of order q, Annals of the University of Craiova, Mathematics and Computer Science Series, vol. 37(3), pag.110-115, 2010, <http://inf.ucv.ro/~ami/index.php/ami/article/view/364>
3. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Consideration regarding echolocation of bats, Journal of Science and Arts, vol. 1(14), p. 97-102, 2011, http://www.icstm.ro/DOCS/josa/josa_2011_1/c.04_CONSIDERATIONS_REGARDING_ECHOLOCATION_OF_BATS.pdf.
4. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, A study of the far field directivity pattern of a hemicylindrical array, acceptat spre publicare în Journal of Engineering Studies and Research.

❖ Articole categoria B

1. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminita, Measurement and characterization of a piston reflector, in Proceedings of the Scientific Workshop Session, Doctoral School of Applied Sciences Galati, p. 13-18, 2009

http://www.phys.ugal.ro/Annals_Fascicle_2/Year2009/summary%20Annals%202009%20Supplement%20simbad.htm#L2

2. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Biomimetic sonar for object localization Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics Fascicle II, Year I (XXXII), p. 112 – 118, 2009,

http://www.phys.ugal.ro/Annals_Fascicle_2/Year2009/summary%20Annals%20Fasc%202_2009.htm#L20

❖ Participare la conferințe internaționale

1. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Some consideration on localization using ultrasonic transducers and sonar map, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics and Symposium of Acoustics SISOM 2009, București, România.

2. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Localization of an object using a bat model, International Balkan Workshop on Applied Physics, 2009, Constanta, România.

3. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Szendrei Florina, Nicolae Mariana, Study of porosity formation and evolution in aluminium, Euromat 2009, 2009, Glasgow, Scoția.

4. **Chiselev Ana-Maria**, Răducan Elena, Moraru Luminița, Supercapacitors beyond common capacitors, Euromat 2009, 2009, Glasgow, Scoția.

5. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Onose Laura, Nicolae Mariana, Modeling and analysis of ultrasound propagation in layered medium, Euromat 2009, 2009, Glasgow, Scoția.

6. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Praisler Mirela, Szendrei Florina, Domnisoru Daniela, Porosity and turtousity of Romanian ancient, Euromat 2009, 2009, Glasgow, Scoția.

7. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Biomimetic sonar for object localization, International Symposium on Applied Physics, noiembrie 2009, Galați, România.

8. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Pressure field of acoustic sensor of order q , Highly Oscillatory Problems: From Theory to Applications Conference, 12-17 septembrie 2010, Cambridge, Marea Britanie.

9. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, A study regarding spatial impulse response of concave transducers with applications on bats, The 3rd International Symposium of Electrical and Electronics Engineering 2010, 16-18 septembrie 2010, Galați, România.

10. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Laura Onose, Study of far-field directivity pattern for linear arrays, Physics Conference TIM 10, 25-27 noiembrie 2010, Timișoara, România.

11. Moraru Luminița, Onose Laura, **Chiselev Ana-Maria**, Characterization of annular array transducer, Physics Conference TIM 10, 25-27 noiembrie 2010, Timișoara, România.

12. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, A study of the far field directivity pattern of a hemicylindrical array, 9th International Conference OPROTECH 2011, Bacău, România.

❖ Participare la conferințe naționale

1. **Chiselev Ana-Maria**, Moraru Luminița, Considerations regarding echolocation of bats, The 2nd National Conference on Applied Sciences in Environmental and Materials Studies, 28-30 aprilie 2010, Târgoviște, România.