



Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Senzori acustici pentru supravegherea ariilor
geografice izolate**

**Student-doctorand:
Ing. Olimpiu Pop**

**Conducător de doctorat
Prof.dr.ing. Corneliu RUSU**

**- Cluj-Napoca -
2024**

1.Introducere

Pădurea este unul dintre cele mai vechi ecosisteme vii de pe Pământ. Aproximativ 20% din volumul total al emisiilor de carbon se datorează defrișărilor necontrolate, fenomenul infrațional fiind omniprezent în acest domeniu. Autoritățile de control reușeau în 2018 să identifice doar 1% din volumul total al tăierilor ilegale de păduri din România, respectiv aproximativ 200 000 metri cubi din cei 20 de milioane de metri cubi de lemn care dispăreau în fiecare an fără documentație legală din pădurile țării. Prin protejarea pădurilor și a zonelor împădurite, utilizând tehnologii moderne, putem aduce o contribuție semnificativă la lupta împotriva schimbărilor climatice și conservarea biodiversității.

Din cauza condițiilor specifice care caracterizează ariile geografice izolate precum ar fi alimentarea cu energie electrică, acoperirea slabă a rețelelor de date 3G, 4G și condițiile meteorologice, implementarea unei soluții tehnice eficiente și fiabile este o adevărată provocare. În comparație cu senzorii de imagine care pot fi sever limitați și imprecizabili din cauza condițiilor specifice de mediu (lumina, zi/noapte, ceață, vegetație densă), plus cantitatea mare de date generate, datele audio pot fi furnizate robust, folosind un volum mic de informații și canale de comunicație cu capacitate redusă.

Rețeaua de senzori acustici poate fi folosită și pentru studiul și monitorizarea diferitelor specii de animale sălbatice. Detectarea audio implică utilizarea unor senzori suficient de sensibili pentru scopul propus, la un preț rezonabil. Recunoașterea tipurilor de surse de semnal audio este relativ dificil de realizat pentru că într-un astfel de mediu raportul semnal-zgomot al semnalului sonor de regulă are valori mici. De asemenea, mediul acustic monitorizat poate conține un număr mare de alte surse de sunet, care nu sunt neapărat de interes. Metodele care folosesc înregistrarea acustică pasivă au un mare potențial de monitorizare a diferitelor specii de viețuitoare. O provocare majoră în acest caz este varietatea foarte mare de sunete de fond și zgomote în funcție de zona geografică și vegetația specifică în care se realizează monitorizarea.

Interesul este tot mai crescut pentru utilizarea senzorilor dedicați, cu eficiență energetică ridicată, în diferite aplicații de monitorizare pe scară largă și pe termen lung a resurselor naturale și a fenomenelor infraționale cu impact asupra mediului (de exemplu braconajul, tăierile ilegale de arbori). Cercetarea în acest domeniu presupune realizarea de senzori independenți energetic care folosesc tehnici de transformare a surselor regenerabile prin utilizarea panourilor solare sau a turbinelor eoliene. Cantitatea de energie electrică pe care o pot produce aceste tehnici de încărcare este limitată de mediul înconjurător. Acest aspect poate influența major procesul de generare a energiei electrice necesare funcționării senzorului.

În prezent acustica este utilizată în majoritatea proiectelor de cercetare în domeniul ecologiei și conservării mediului. Un exemplu de echipament disponibil în piață este *Acoustic Song Meter*. Datorită calității excepționale a microfoanelor acest dispozitiv are un preț ridicat (800-1000\$), motiv pentru care nu poate fi considerat un produs accesibil, utilizarea lui fiind restrânsă pentru proiectele de cercetare cu buget considerabil de mare. Pentru o serie de aplicații utilizate în proiecte de cercetare sau pentru supraveghere, cu un buget redus, nu este nevoie de o precizie mare a dispozitivului, acesta fiind un aspect care nu influențează semnificativ rezultatele. Un alt dezavantaj al acestor dispozitive comerciale este faptul că sunt realizate cu surse de program închise, motiv pentru care ele sunt dificil sau chiar imposibil de adaptat la cerințele particulare ale hardware-ului sau software-ului specific unei alte aplicații. Din considerentele enumerate există o tendință în creștere în rândul comunităților de cercetare de a proiecta și utiliza echipamente de monitorizare acustică personalizate.

Datorită complexității construcției acestor dispozitive, cercetătorii de mediu, fără abilități considerabile de electronică, nu le puteau realiza. Situația s-a schimbat odată cu apariția microcalculatoarelor modulare, care pot oferi cadrul necesar pentru particularizarea și optimizarea cerințelor unei aplicații.

Ca alternativă există pe piață dispozitive de monitorizare acustică care rezolvă aceste probleme. Sunt dispozitive open source realizate cu costuri reduse, care răspund cerințelor pentru o astfel de platformă deschisă și flexibilă pentru aplicațiile de monitorizare acustică. Un astfel de produs este AudioMoth, cu un hardware și un firmware open source cu licențe permissive, care îi permit să fie actualizat și extins pentru orice aplicație. Cu ajutorul acestui dispozitiv se poate realiza monitorizarea unui areal geografic prin înregistrarea de lungă durată a anumitor sunete filtrate cu un algoritm de identificare a sursei sonore (Deploying Acoustic Detection Algorithms on Low-Cost Open-Source Acoustic Sensors). Dezavantajul acestui dispozitiv este faptul că operează doar un singur microfon omnidirecțional care îi reduce capacitatea și performanța de identificare a sursei sonore și exclude posibilitatea determinării direcției de sosire a semnalului sonor.

2. Rezultate anterioare ale grupului de cercetare

De câțiva ani, efortul echipei de cercetare din care fac parte (Grupul de Prelucrarea Semnalelor din Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca) s-a concentrat pe realizarea unui sistem de monitorizare a habitatelor naturale izolate prin rețele de senzori.

- Oamenii au un rol important în asigurarea integrității pădurilor și a locurilor sălbatice. Deși aceste regiuni sunt protejate prin lege, ele sunt adesea ținta infractorilor și braconierilor pentru tăierea pădurilor și vânătoare. Chiar și perturbarea faunei sălbatice de către unii oameni ar putea deteriora speciile pe cale de dispariție.
- Nu doar rezervațiile terestre împădurite sunt scopul acestor ilegalități, ci și lacurile protejate sau regiunile de coastă (cum ar fi Delta Dunării) sunt locuri de pescuit ilegal sau de vânătoare de specii de păsări strict protejate de legile internaționale.

În general, sistemele de monitorizare a regiunilor sălbatice și de detectare a intrușilor sunt necesare în prezent și ar asigura probabil o mai bună conservare a acestor zone protejate.

În ultimii ani, munca grupului de cercetare s-a concentrat pe proiectarea unui sistem de monitorizare acustic. Utilizarea sa împotriva altor sisteme de monitorizare precum cele de supraveghere video are câteva avantaje:

- simplitatea implementării;
- mai puține informații de prelucrat;
- nu depinde de lumina ambientală;
- reprezintă o soluție mult mai ieftină.

Mare parte din efortul grupului de cercetare s-a focalizat pe dezvoltarea unor procedee de prelucrare a semnalelor audio achiziționate în mediu natural. Rezultatele au fost încurajatoare, concretizate și în câteva teze de doctorat susținute însă a rămas deschisă problema achiziționării semnalului audio din mediu natural în mod eficient. Acestui subiect i se adresează în principal prezenta teză de doctorat.

Multe dintre problemele prelucrării semnalului audio achiziționat au fost obiectul altor lucrări ale membrilor Grupului de Prelucrarea Semnalelor din Universitatea Tehnică din

Cluj-Napoca. Din acest motiv, nu ne vom concentra pe aceste aspecte, menționându-le în măsura în care sunt importante pentru obiectivele noastre.

3. Obiective

Aplicațiile bazate pe senzori acustici colectează informații prin captarea semnalului sonor care este ulterior utilizat de algoritmi de procesare. Prin adaptarea parametrilor acustici și electrici ai senzorului, respectiv a unui set de senzori, la anumite tipuri de semnale sonore se poate crește gradul de eficiență al sistemului făcând posibilă integrarea unei procesări de date *in situ*. Prin filtrarea și procesarea informației primare se extrag parametrii principali din semnalele acustice înregistrate care vor fi utilizați în prelucrările ulterioare. În acest fel se reduce volumul de date făcând astfel posibilă transmiterea lor într-un punct de colectare pentru procesări ulterioare. Transmiterea unui volum de date optimizat înseamnă un consum mai redus de energie și de bandă radio, un aspect foarte important pentru dezvoltarea unei rețele de senzori inteligenți, autonomi, sustenabili din punct de vedere al alimentării cu energie electrică

Pentru început ne propunem realizarea unui model experimental pentru efectuarea măsurătorilor în laborator și pe teren. Cu ajutorul acestui model de test vom putea determina caracteristicile unor seturi de microfoane în diferite configurații și condiții de mediu, cum ar fi directivitatea, răspunsul în frecvență, raportul semnal/zgomot. Un alt scop propus al tezei este realizarea unui echipament capabil să înregistreze în format fișier audio mai multe semnale (în cazul nostru în final vor fi patru, provenite de la cele patru microfoane ale senzorului cuadrofonic propus) și să transmită acest fișier printr-o rețea de transmisii de date (internet over IP) în primă fază la cerere, urmând să dezvoltăm aplicația pentru a putea realiza acest lucru automat, la apariția unei surse sonore în arealul supravegheat. Funcționarea modelului experimental în stadiul actual al cercetării, presupune existența unei rețele de date în aria geografică supravegheată, această cerință limitând destul de serios eficiența aplicației. În continuare se pot căuta și alte soluții pentru transmiterea datelor cum ar fi o rețea wireless cu un punct central de comunicație care să aibă acces la o rețea de date.

În ultima parte vom analiza rezultatele măsurătorilor efectuate în laborator și pe teren în condiții reale pentru a putea optimiza modelul experimental (tipuri de microfoane, geometria senzorului, filtrarea și eșantionarea semnalelor, optimizarea ratei de transfer și reducerea volumului de date transmise.)

4. Cerințe și constrângeri

Alegerea numărului optim de microfoane pentru aplicația dată trebuie făcută luând în calcul mai multe criterii care de regulă nu pot fi îndeplinite simultan. În funcție de scopul propus trebuie făcut un compromis în alegerea unui set de criterii care să satisfacă cerințele aplicației.

O caracteristică principală a unui senzor acustic este directivitatea. Există o varietate foarte mare de microfoane în funcție de diagrama lor constructivă de directivitate: omnidirecționale, cardioide, dublu cardioide, hipercardioide etc.

Un alt parametru important este sensibilitatea senzorului acustic. Combinația acestor două caracteristici determină un alt parametru, poate cel mai important al microfonului: raportul semnal/zgomot (SNR - Signal to Noise Ratio) pentru semnalul recepționat exprimat pe o scară logaritmică, în decibeli.

Soluția pentru a crește raportul semnal/zgomot pentru semnalul recepționat constă în utilizarea unui număr mai mare de microfoane cu o directivitate bună pentru a limita însumarea zgomotului ambiental cu semnalul util. Practic este fezabil să atenuăm energia fronturilor de undă care vin pe anumite direcții și implicit și a zgomotului decât să le amplificăm prin procedee pasive pe cele care vin pe o direcție de interes.

5. Structura tezei

Pornind de la ipotezele anterior menționate, în cadrul acestei teze de doctorat s-au studiat configurații de senzori capabile să îndeplinească cerințele specifice de funcționare: eficiență, fiabilitate, robustețe și nu în ultimul rând preț convenabil, comparativ cu alte produse aflate pe piață.

Senzorul acustic dispus într-o anumită configurație este celula de bază a rețelei de supraveghere, elementul pe care este construită structura rețelei. În literatura de specialitate sunt catalogate o serie de metode de determinare a direcției de sosire a semnalului sonor și de identificare a sursei sonore. În cadrul acestei teze de doctorat sunt prezentate o parte a acestor metode pe care le-am experimentat cu ajutorul diverselor configurații de microfoane. S-au optimizat parametrii constructivi pentru ca acest senzor să poată fi utilizat eficient la majoritatea metodelor de determinare a direcției de sosire, având permanent în vedere eficiența, fiabilitatea, robustețea, precum și consumul redus (energetic și de material)

În continuare teza este structurată pe două mari părți: o primă parte în care se prezintă anumite rezultate din literatura de specialitate cu caracter preponderent teoretic, iar o a doua parte în care sunt detaliate realizările doctorandului. Capitolul 2 este dedicat metodelor de localizare a surselor sonore, iar capitolul 3 modelării surselor sonore în spațiu. Metodele de localizare ale surselor acustice utilizând sisteme de senzori acustici sunt descrise în capitolul 4.

Senzorul acustic cu patru microfoane este subiectul capitolului 5. Se începe cu o primă implementare a setului de microfoane și a plăcii de achiziție, se discută aplicația bazată pe suportul dat de Raspberry Pi, după care se trece la a doua implementare a senzorului acustic, adică la capul de manechin cu 4 microfoane. Capitolul se finalizează cu un set de rezultate și comentarii.

Capitolul 6 este dedicat modelării și implementării practice a senzorului acustic dispus ortogonal. Pentru început se revăd principiile generale pentru determinarea funcției de transfer a capului uman, se prezintă analiza semnalelor captate utilizând funcția de autocorelație, precum și identificarea surselor sonore și identificarea frecvențelor de interes. Aplicarea algoritmului Goertzel de identificare a surselor sonore încheie acest capitol.

În capitolul 7 sunt prezentate costurile și perspectivele implementării propuse, iar în ultimul capitol sunt sintetizate contribuțiile personale și este detaliată diseminarea rezultatelor.

6. Metode de localizare pasive

Principalele metode de localizare pasive analizate în această lucrare au fost : ILD-Interaural Level Difference, TDE-Time Delay Estimation, ITD-Interaural Time Difference, TDOA-Time Difference Of Arrival, HTRF-Head Related Transfer Function.

La metodele bazate pe TDE și ILD algoritmul de calcul conține două etape:

1. estimarea timpului de întârziere sau a diferențelor de nivel de intensitate;
2. calcularea poziției sursei sonore.

Corelația este cea mai des utilizată metodă de calcul pentru estimarea timpului de întârziere. La această metodă cea mai importantă cerință este aproximarea cu o precizie cât mai mare a timpului de întârziere a unei sonore între perechea de microfoane. De asemenea, la metoda bazată pe ILD cea mai importantă cerință este aproximarea cât mai exactă a diferențelor de intensitate sonoră între cele două microfoane.

Un obstacol major pentru calcularea poziției sursei sonore îl reprezintă complexitatea ecuațiilor și timpul relativ mare de procesare a informațiilor. Există numeroase metode și tehnici care implică un volum mare de calcul, motiv pentru care ele nu pot fi aplicate în situații reale, mai ales când vorbim de arii geografice izolate unde nu există rețele de energie electrică și de date.

7. Corelarea spațială a semnalelor de microfon

Dacă ne focalizăm pe componenta de zgomot a sunetului captat vom deosebi două componente

1. zgomotul intern necorelat al microfoanelor care este un factor limitator pentru selectivitatea spațială a unei arii de microfoane. Un microfon electret tipic produce un raport semnal zgomot SNR de 60 dB cu un nivel de referință de 96 dB SPL (Sound Pressure Level).

Considerând nivelul normal al vocii umane de 60-65 dB SPL și luând în calcul și zgomotul introdus de cabluri, preamplificatoare și convertoare putem spune că zgomotul necorelat este la un nivel de 30 dB sub nivelul sunetului vocal;

2. zgomotul extern (ambiental) captat de microfoane. Principala diferență față de zgomotul anterior este că acest zgomot este același pentru toate microfoanele din arie, eventual ușor decalat și întârziat. În practică acest lucru nu este adevărat, mai ales în partea superioară a benzii de frecvență.

În concluzie zgomotul este o combinație de componente corelate și necorelate. Raportul dintre ele este dependent de frecvență și variază în funcție de geometria ariei de microfoane și de microfoanele utilizate. Nivelul zgomotului variază între 5-20 dB. În general zgomotul ambiental este cu 10-25 dB peste nivelul zgomotului intern. Din cauza reflexiilor multiple ale semnalului sonor care ajunge atenuat și întârziat, în mod evident reverberația va influența gradul de corelație.

8. Metode de localizare a surselor acustice utilizând sisteme de microfoane.

Localizarea surselor acustice se realizează prin utilizarea mai multor metode care se bazează pe calcularea unor parametri ai semnalului recepționat de la senzorii distribuiți:

- calcularea amplitudinilor diferențiate ale semnalelor recepționate;
- calcularea diferenței de timp pentru semnalele care sosesc la senzori diferiți cu poziție cunoscută (TDOA - Time Difference Of Arrivals);
- determinarea și compararea direcțiilor de sosire (DOA - Direction Of Arrivals);
- calculul energiei acustice.

În funcție de condițiile de mediu și de conformația terenului care poate produce reflexii, reverberații, care poate introduce atenuări, fiecare metodă dintre cele mai sus amintite poate fi mai mult sau mai puțin eficientă. Vom trece în revistă în cele ce urmează pe rând fiecare dintre aceste patru metode și în finalul capitolului vom discuta despre influența valorii ratei de eșantionare în localizarea surselor sonore utilizând rețele de senzori acustici.

Metoda de localizare, bazată pe compararea amplitudinilor semnalelor recepționate, este puternic influențată de condițiile din mediul înconjurător (de exemplu vegetație) și de conformația terenului care se comportă ca niște atenuatoare anizotropice. Fără implementarea unui model complex al atenuării semnalului, valoarea amplitudinii recepționate a semnalului este insuficientă pentru determinarea distanței.

A doua metodă de calcul, bazată pe TDOA, necesită o achiziție precisă a fazei semnalelor care sosesc în nodurile rețelei de senzori acustici. Această metodă presupune procesarea tuturor semnalelor recepționate de la cele i noduri ale rețelei în nodul central pentru determinarea poziției sursei sonore. Metoda se bazează pe calculul diferenței de timp la sosire, în nodul central, al semnalelor din cele i noduri. Această determinare a timpului de sosire se face de cele mai multe ori în domeniul frecvență utilizând GCC-PHAT (Generalized Cross-Correlation POwer PHase Transform). Metoda este destul de precisă, însă necesită transmiterea întregului semnal audio la nodul central de procesare reducându-se în acest fel durata de funcționare a nodului datorită consumului energetic. O cerință importantă a acestei metode este că aceste semnale trebuie să fie sincronizate cu precizie (diferențe de sub $1 \mu s$). Acest deziderat este greu de realizat în cazul în care fiecare nod are un generator de timp independent. Nesincronizarea dintre noduri afectează foarte serios precizia acestei metode.

Creșterea numărului de noduri și a puterii de procesare poate fi limitată făcând o preprocesare a datelor în nodul de achiziție, urmată de transmiterea unui volum redus de date. În acest caz sarcina de procesare a nodului central scade semnificativ.

A treia metodă se bazează pe determinarea direcției de sosire utilizând în nodurile rețelei arii de microfoane care sunt capabile fiecare la rândul lor să determine o direcție de sosire în mod independent de restul nodurilor din rețea. Prin combinarea acestor rezultate se poate estima poziția sursei sonore.

Extragerea caracteristicilor de fază cu o precizie suficient de bună dintr-un semnal de bandă îngustă poate deveni dificilă dacă mediul este zgomotos. În plus tehnica bazată pe procesarea coerentă a semnalelor din diferite noduri ale rețelei (metoda corelației) este limitată de proprietățile de coerență acustică ale mediului înconjurător și nu funcționează bine dacă nodurile sunt la distanță mai mare de 10m. În spații deschise, reverberante, pe suprafețe mari, această metodă de localizare poate deveni ineficientă.

A patra metodă se bazează pe calculul energiei, mai exact pe monitorizarea energiei acustice din jurul nodului. În practică această abordare nu este foarte precisă și de asemenea poate fi afectată de zgomot

9. Influența valorii ratei de eșantionare în localizarea surselor sonore utilizând rețele de senzori acustici

În mod tradițional frecvența de eșantionare utilizată pentru sursele sonore este de 44,1 kHz. Această rată de eșantionare, care respectă legea lui Nyquist pentru intervalul de frecvențe audio (20 Hz-20 kHz) permite reconvertirea semnalului original în semnal acustic de înaltă fidelitate. Această cerință pentru frecvența de eșantionare este necesară pentru a putea realiza de exemplu înregistrări muzicale de înaltă fidelitate, unde domeniul de frecvențe al semnalului acustic este cuprins între 20 Hz și 20kHz.

În cazul unei rețele de senzori acustici care este construită pentru localizarea unor surse acustice banda semnalului captat poate și mai mică. În literatura de specialitate și în standardele internaționale pentru transmisia de date în rețele fără fir (IEEE 802.15.4), rata de eșantionare maximă este de 17,7 kHz. Această valoare poate varia în funcție de numărul de noduri din rețea. Îndeplinirea condiției lui Nyquist în această situație generează un volum mare de date, dar nu și neapărat de informație, lărgimea de bandă ocupată fiind nejustificată.

De exemplu, la o frecvență de eșantionare tipică de 44 100 Hz, cu eșantioane reprezentate pe 16 biți, rata de transfer este de 705,6 kbps. Această valoare, cum am precizat și mai sus, este mult mai mare, aproape de trei ori, decât maximum admis în standard, de 250 kbps.

Mai mulți autori care au ca obiect de cercetare rețelele fără fir de microfoane utilizează valori ale ratei de eșantionare mai mici, fără să argumenteze într-un fel valoarea aleasă. În funcție de algoritmul matematic ales pentru localizarea sursei acustice frecvența optimă a ratei de eșantionare poate să difere.

Ca și o concluzie a acestei secțiuni putem spune că rata de eșantionare influențează precizia calculului diferenței de timp dintre semnalele audio distribuite captate, iar localizarea sursei sonore poate fi realizată prin algoritmi diferiți în domeniul timp sau frecvență.

Rezultatele experimentale obținute ne arată că algoritmi care lucrează în domeniul timp și utilizează semnale subeșantionate generează rezultate instabile și pierd informație datorită rezoluției scăzute pe axa timp.

Algoritmi care operează în domeniul frecvență (de exemplu algoritmi care utilizează anvelopa spectrelor semnalelor), pot utiliza rate de eșantionare scăzute fără să afecteze semnificativ acuratețea rezultatelor. Acest lucru este posibil deoarece aceste metode depind de conținutul spectral al semnalului și nu de valoarea amplitudinii semnalului.

În urma analizării a mai multor algoritmi putem considera că o frecvență mai mică de eșantionare decât cea obișnuită pentru semnale audio de 44.1 kHz poate fi folosită în funcție de algoritmul utilizat. Această concluzie este foarte importantă și contribuie semnificativ la stabilirea criteriilor care trebuie avute în vedere când construim o rețea de senzori acustici wireless.

10. Prima implementare a setului de microfoane și placa de achiziție

Pentru început, la realizarea setului de microfoane am utilizat un număr de 4 microfoane *shotgun* model ECM -670 amplasate pe o suprafață plană de forma unui pătrat, dispuse pe diagonale la un unghi de 90° între ele. Distanța dintre capsulele microfoanelor poate fi modificată într-o plajă de 10-20 cm. Această posibilitate de modificare a distanței dintre capsulele setului de microfoane este necesară la studierea diferențelor de fază dintre semnalele acustice captate pentru o anumită lărgime de bandă (frecvență maximă detectabilă fără ambiguitate de fază).

Pentru eliminarea confuziilor în timpul măsurătorilor din laborator și din teren am asociat numărului de microfon și un punct cardinal astfel:

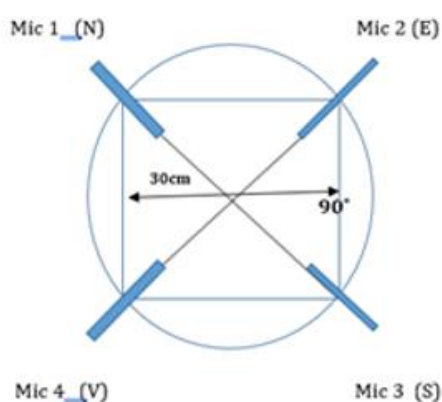


Figura 1. Geometria setului de microfoane

Setul de microfoane s-a conectat la o placă de achiziție audio care dispune de 4 intrări simetrice XLR cu phantom power (48V), necesare pentru alimentarea celor patru microfoane condensator. De asemenea fiecare canal dispune de un amplificator cu nivel reglabil și filtre de frecvență. La realizarea măsurătorilor am utilizat un nivel constant al amplificării și nu am introdus filtrare pe benzi pentru a putea evalua tot spectrul prezent. De asemenea pentru a putea stabili raportul semnal/zgomot în fiecare situație nu am utilizat filtrarea pe benzi de frecvențe. Frecvența de eșantionare pentru toate semnalele înregistrate este de 44 100 Hz. Utilizând portul serial al plăcii de achiziție s-a realizat conexiunea cu aplicația Raspberry Pi, un minicalculator versatil care dispune printre altele și de un port Ethernet pentru conexiunea cu o rețea de date. În continuare semnalul din cele patru canale audio au fost transferate spre un program de prelucrare a semnalelor audio *Audacity*, un program open source utilizat pe scară largă pentru aplicații care necesită captură și prelucrare de semnale audio. O diagramă de principiu simplificată este arătată în Figura 2.

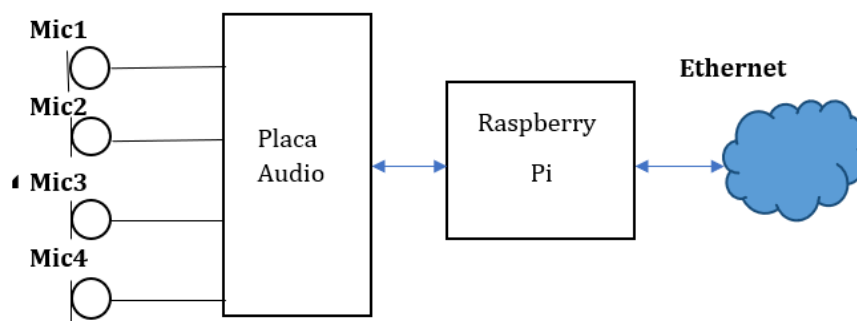


Figura 2. Sistemul de achiziție

11. Senzorul cuadrofonic

Realizarea acestor rețele de microfoane trebuie să țină cont de mai multe considerente:

- În cazul în care această rețea este una distribuită ad-hoc, microfoanele din nodurile rețelei pot să nu fie calibrate și de asemenea poziția lor poate să nu fie bine stabilită sau chiar cunoscută. În acest caz informațiile legate de geometria rețelei nu mai pot fi utilizate.
- În multe aplicații poziția microfoanelor și numărul lor poate varia. În cele mai multe cazuri sunt limitări foarte serioase în ceea ce privește lărgimea de bandă a semnalelor ce urmează să fie transmise între nodurile rețelei. De cele mai multe ori banda disponibilă pentru transmisie este insuficientă, fiind vorba de zeci sau sute de microfoane al căror semnal trebuie să ajungă de la un nod la altul sau într-un punct central. Din acest motiv este foarte important ca această bandă disponibilă pentru transmisie să fie utilizată cât se poate de eficient;
- În cazul acestor rețele distribuite trebuie avut în vedere că datorită constrângerilor legate de banda de transmisie este nevoie de procesarea primară a datelor în nodurile rețelei cât mai eficient fără a afecta pe cât este posibil conținutul lor, pentru a reduce la maxim cantitatea de informație ce trebuie transmisă, făcând astfel și economie de bandă la transmisie. În acest fel se poate reduce consumul energetic, de multe ori limitat, din nodul central de procesare.
- O altă problemă este sincronizarea datelor transmise. Deoarece fiecare senzor din nodurile rețelei are propriul ceas de sistem vor apărea diferențe între ratele de eșantionare ale semnalelor de la microfoanele din rețea. Această problemă va afecta serios prelucrările ulterioare care utilizează algoritmi bazați pe coerența semnalelor.

Aceste cerințe speciale conduc la necesitate unei alte abordări în ceea ce privește procesarea semnalelor, modelarea lor și algoritmi utilizați pentru implementarea rețelelor de microfoane.

12. A doua implementare a senzorului cuadrofonic

În urma analizei metodelor de localizare a surselor acustice mai sus enumerate și ținând cont de parametrii care trebuie determinati și calculați, am experimentat mai multe tipuri de construcții mecanice (platforme, reflectoare, suporturi) și modele de microfoane. Scopul propus a fost să obținem parametri de directivitate, raport semnal/zgomot și liniaritate în bandă apropiată de cele ale microfoanelor utilizate în experimentele inițiale, dar la un cost mult mai scăzut. În acest sens am ales un microfon condensator tip lavalieră, AKG C 417.

13. Capul de manechin cu patru receptori

Cerințele care se impun pentru realizarea celulei de senzori sunt legate de directivitate, liniaritate în banda de interes, fiabilitate, protecție împotriva intemperiilor. La fel de important este ca semnalele captate de senzori să furnizeze date utile care pot fi folosite la metodele de determinare a direcției de sosire sau la localizarea sursei sonore.

Numeroase metode de localizare a surselor sonore au la bază un model construit pe structura corpului uman, respectiv a cutiei craniene și al organelor auditive umane (auriculă, canal auditiv, timpan, distanța interauriculară etc).

Una din metodele anterior enumerate se bazează pe funcția de transfer a capului uman (HRTF). HRTF este transformata Fourier al HRIR și reprezintă astfel caracteristicile de filtru al ansamblului format din cap, urechi, spate și umeri, datorită fenomenelor de difracție și reflexive ale undelor sonore.

În cazul nostru acest filtru a trebuit să fie astfel construit și optimizat ca să corespundă cerințelor și scopului propus. Mai exact "țintele" sonore, datorită faptului că sunt la o distanță relativ mare (de ordinul sutelor de metri) și la mică distanță de sol pot fi considerate ca fiind într-un plan, adică într-un spațiu bidimensional. Din acest motiv diagrama de directivitate a sensorului trebuie limitată relativ la acest plan. De asemenea informațiile venite pe alte direcții trebuie atenuate maxim posibil, deoarece ele contribuie doar la scăderea raportului semnal/zgomot. Unghiul de deschidere al diagramei de directivitate în plan trebuie limitat la un unghi mai mic de 90° , pentru un sistem compus din 4 microfoane. În acest fel se poate construi o rețea cu senzori în colturile unui patrulater (de exemplu, un pătrat). Precizia localizării nu este critică, ea poate fi făcută cu erori de ordinul zecilor de metri fără să afecteze rezultatul său. Scopul nostru este mai ales identificarea cât mai exactă și o localizare cu o precizie suficient de bună într-o arie delimitată.

Ținând cont de cele enumerate mai sus am construit următoarea configurație compusă din 4 microfoane inserate într-o structură mecanică. Cele 4 microfoane sunt poziționate la un unghi de 90° unul față de celălalt în interiorul unui canal de tip *feed horn*, la o distanță aproximativ egală cu distanța dintre timpane (8-10 cm). Pe cele două direcții N-S și E-V există un canal de legătură astfel încât sunetul recepționat pe o direcție să fie captat și de microfonul situat pe direcția opusă, desigur la alt nivel și cu întârziere. Acest canal are cărui dimensiuni și formă se vor stabili experimental are rolul de a atenua compoziția spectrală a semnalului captat de microfonul situat pe direcția opusă pe care se află sursa sonoră (Figura 3). Dimensiunea lor trebuie astfel aleasă încât să introducă o atenuare în spectru în zona care nu prezintă interes din punctul de vedere al poziționării armonicilor fundamentale ale surselor sonore ce se doresc a fi identificate și localizate. Se va stabili experimental că această zonă spectrală este situată în intervalul 1kHz-3kHz.



Figura 3: Capul de manechin cu 4 receptori-secțiune orizontală și execuție

În experimentul nostru am realizat o dispunere ortogonală a celor patru senzori. De asemenea am implementat un sistem de tubulaturi ortogonale în interiorul capului de manechin prin care am interconectat cei patru senzori (Figura 4). Rolul acelor tubulaturi este de a elimina efectele nedorite de tipul reflexiilor și reverberațiilor care ar apărea dacă cavitățile unde sunt amplasate microfoanele ar fi închise. În același timp tuburile în care sunt amplasate microfoanele au și rolul de filtru al semnalului acustic. Dimensiunea tuburilor ne permite să amplasăm capsulele celor 4 microfoane la distanțe variabile. În acest fel putem optimiza diagrama de directivitate a microfoanelor în sensul minimizării lobilor secundari care apar în funcție de această distanță dintre microfoane și care pot genera rezultate eronate la determinarea direcției de sosire a semnalului sonor.



Figura 4: Capul de manechin cu 4 receptori-realizare practică

14. Rezultate obținute

Pentru modelarea parametrilor capului de manechin cu 4 receptori s-au efectuat mai multe serii de măsurători în medii diferite și utilizând diferite surse sonore. Înregistrările au fost importate într-o aplicație de prelucrare și analiză a semnalelor audio menționată anterior (Audacity). Acest program permite înregistrarea simultană a 4 sau a mai multor canale audio. De asemenea există posibilitatea procesării acestor informații oscilogramă, analiză spectrală etc). Cu ajutorul acestui program am generat graficele care atestă rezultatele măsurătorilor.

Primul set de măsurători a fost realizat într-o încăpere amenajată acustic (sală de concert cu un nivel de zgomot sub 30dB) pentru care s-a utilizat un generator de semnal sinusoidal amplificat. S-au realizat o serie de măsurători utilizând mai multe valori de frecvențe în intervalul 50 Hz-5kHz și s-a determinat caracteristica de răspuns în frecvență a capului de manechin cu 4 receptori în aceste condiții.

În toate măsurătorile efectuate am presupus că sursele sonore sunt la o distanță suficient de mare pentru a le putea considera coplanare cu planul determinat de setul de microfoane, un plan paralel cu planul orizontal terestru. Această ipoteză o putem considera în majoritatea cazurilor corectă, deoarece tipurile de surse sonore pe care dorim să le autentificăm și să le determinăm direcția sunt la nivelul solului (fierăstraie cu lanț, utilaje de transport, arme, animale de interes cinegetic etc). Poziția spațială a surselor sonore va fi determinată într-un plan și va fi dată de unghiul vectorului direcției de sosire față de axele unui sistem de coordonate cartezian.

O altă ipoteză pe care trebuie să o luăm în calcul este că viteza de deplasare a sursei sonore este mult mai mică în raport cu viteza sunetului, astfel încât precizia determinării direcției de sosire să fie între limitele de eroare stabilite. Această ipoteză este de altfel corectă dacă ne raportăm la tipurile de surse sonore mai sus menționate.

Pentru determinarea caracteristicii de frecvență a setului de microfoane s-a generat un semnal multiburst în intervalul 50 Hz -5 kHz pe care l-am amplificat și difuzat în încănta acustică menționată în care se afla și setul de microfoane, la o distanță de 10 metri, poziționat în plan paralel cu podeaua. S-a ales acest tip de încăntă acustică pentru a elimina efectele produse de reverberația sunetului emis de sursa sonoră, mai exact suprapunerea fronturilor de undă reflectate peste unda directă, fenomen care ar produce diferențe de fază și diferențe de amplitudine aleatoare între cele 4 semnale captate de cei 4 senzori acustici, afectând în acest fel precizia măsurărilor.

Analizând datele obținute observăm o caracteristică de frecvență liniară cu variații de nivel al semnalului de 3-5 dB în intervalul 50 Hz-1400 Hz. Observăm că la frecvențe ale semnalului cuprinse în intervalul 1400 Hz-1600 Hz setul de microfoane se comportă ca un sistem rezonant. Deoarece acest interval de frecvențe nu este în zona în care ne așteptăm să găsim surse sonore pe care dorim să le monitorizăm (după cum vom vedea ulterior), rezonanța nu ne va afecta precizia determinării direcției de sosire prin generarea armonicilor care se evidențiază în spectru și care ar putea să se suprapună peste un semnal util.

Ca o primă concluzie observăm că nivelul semnalelor recepționate pe cele 4 direcții este diferit, cu diferențe de 3-4 dB. Direcția Nord a fost aleasă ca direcție de sosire pentru semnalul test. Observăm că pe direcția opusă avem o diferență de nivel de 9-10 dB, iar pe axa Est- Vest de 3-4 dB. În condiții ideale și cu această ipoteză de lucru ar trebui să avem același nivel de semnal pe senzorii Est și Vest. Diferența de nivel se datorează erorii de calibrare a lanțului de amplificare pentru cele două semnale. Pentru a avea o precizie bună și la niveluri mici de semnal, mai ales, este nevoie ca aceste calibrări ale canalelor de amplificare să fie executate cât mai precis.

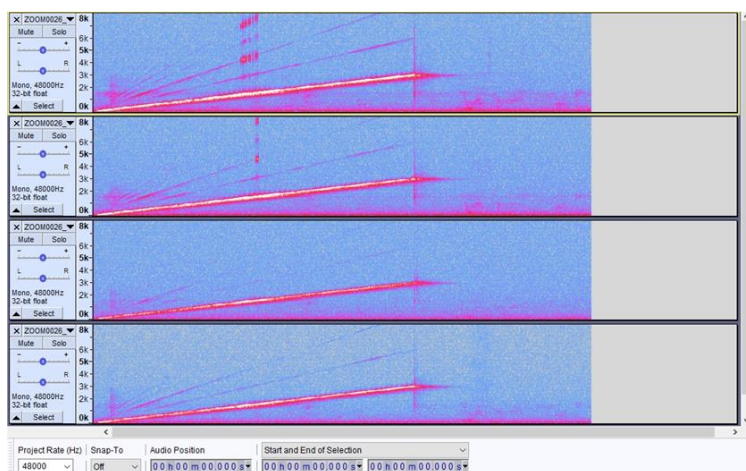


Figura 5: Semnal multiburst captat cu setul de 4 microfoane ,din direcția Nord

În spațiul exterior zgomotul va fi compus din cel corelat, de obicei generat chiar de sursa de sunet și o componentă necorelată, zgomotul ambiental (vînt, foșnet de frunze, insecte etc). Nivelul energetic al zgomotului corelat, de regulă generat chiar de sursa sonoră, poate să fie evaluat prin calcularea funcției de autocorelație a semnalului recepționat și poate să contribuie la determinarea direcției de sosire. Zgomotul necorelat însă, în funcție de nivelul său, poate afecta sau chiar compromite determinarea direcției de sosire pentru surse de semnal aflate la distanțe mai mari. Printr-o construcție mecanică adaptată pentru reducerea zgomotului necorelat se poate scădea nivelul acestuia (de exemplu utilizarea de paravânturi din burete special dedicat acestui scop).

În continuare am înregistrat semnale sonore în intervalul 50 Hz - 4kHz pentru a putea analiza și mai precis caracteristicile de frecvență ale senzorului cuadrofonic, punând accent pe banda de frecvențe în care vom avea semnale sonore de interes. Un exemplu este prezentat în Figura 6.

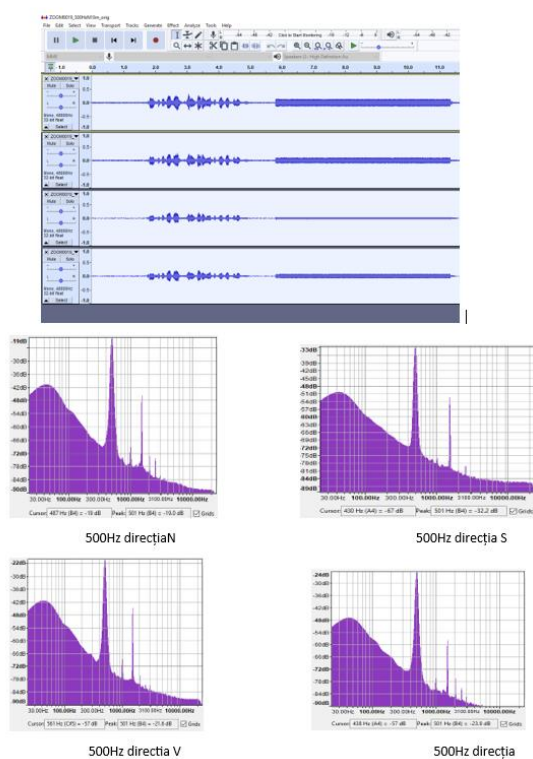


Figura 6. Caracteristicile de frecvență pentru o sursă sonoră de 500 Hz.

După analizarea rezultatelor experimentale și a metodelor de calcul pentru determinarea direcției de sosire a semnalului acustic am construit un model optimizat al senzorului cuadrofonic. S-a pornit de la modelul capului uman pentru care am adăugat un număr suplimentar de doi senzori dispuși ortogonal. S-au înlocuit microfoanele directive (scumpe) cu microfoane omnidirecționale (ieftine) și s-a modelat diagrama lor de directivitate prin construcția mecanică adaptată pentru domeniul de frecvențe în care se situează sursele sonore de interes în cazul supravegherii arealelor geografice izolate. De asemenea la construcția acestuia s-a ținut cont și de eliminarea cât mai eficientă a zgomotului necorelat.

15. Analiza semnalelor captate folosind funcția de autocorelație

Pentru identificarea sursei sonore și determinarea direcției de sosire a semnalului sonor s-a aplicat funcția de autocorelație pentru cele patru semnale de la cele patru microfoane dispuse ortogonal în tubulaturile din capul de manechin. Pentru a reproduce condițiile cât mai apropiate de Realitatea din teren s-a utilizat un semnal compus dintr-un semnal cu spectru larg, asemănător unui zgomot alb, și un semnal sinusoidal de 500 Hz. Pentru a evita ambiguitatea, la început s-a apelat doar la o singură sursă sonoră care generează acest semnal.

Prin aplicarea funcției de autocorelație s-au obținut următoarele rezultate pe care le-am reprezentat în forma grafică în Figura 7

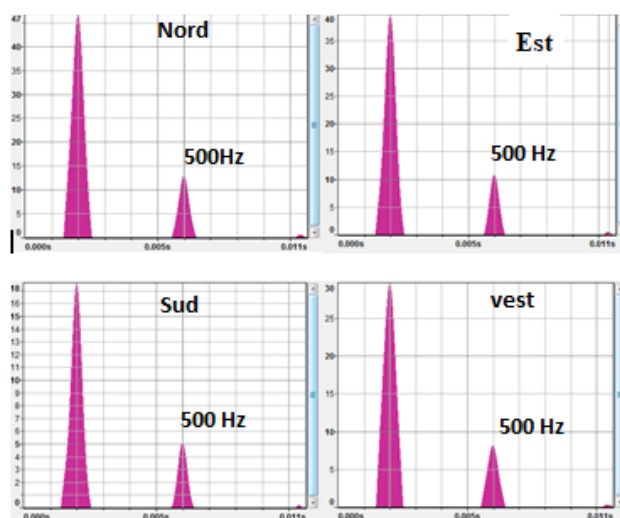


Figura 7: Graficul funcției de autocorelație al semnalului sinusoidal de 500 Hz cu zgomot alb

După cum am precizat în capitolul anterior analiza semnalului prin aplicarea funcției de autocorelație evidențiază două aspect importante: valoarea și direcția zgomotului corelat. Valoarea funcției de autocorelație apropiată de origine evidențiază nivelul zgomotului corelat după cum reiese și din graficul funcției. De asemenea putem observa valoarea energiei semnalului sinusoidal de 500 Hz. Valorile citite din grafic sunt prezentate în Tabelul 1.

Directia	N	S	E	V
Zgomot corelat	47	19	40	30
Semnal sinusoidal	13	5	10	7

Figura 8: Valoarea energiei semnalului sinusoidal de 500 Hz captat pe cele 4 direcții

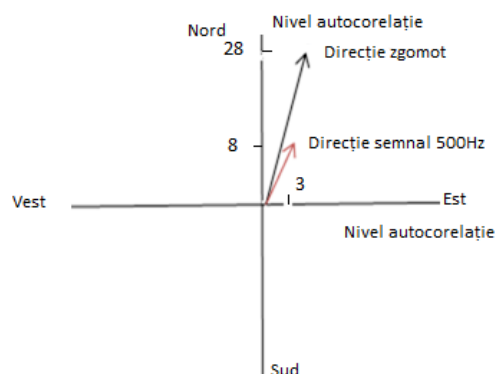


Figura 9: Vectorul direcției de sosire

În cazul în care există mai multe surse de semnal în același perimetru vom avea o situație de ambiguitate. În exemplul care urmează în perimetrul supravegheat există trei surse de semnal/zgomot: două motocoase situate în direcții diferite și o mașină electrică de tuns iarba. Valorile citite ale nivelelor semnalelor sunt trecute în Tabelul 2

Directia	N	S	E	V
155 Hz	2	2	2	3
134 Hz	1	1,5	1	1
101 Hz	1,5	1	1,5	1,2
Zgomot	14	17	15	5

Tabela 2: Valoarea energiei semnalului de la două motocoase și o mașină electrică captat pe cele 4 direcții

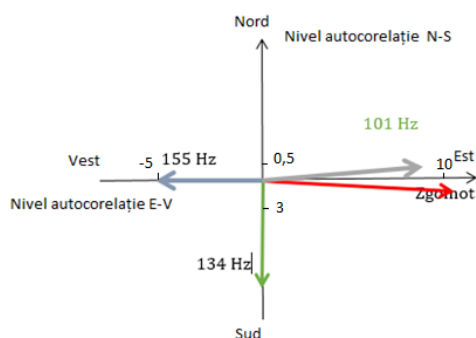


Figura 10: Vectorii de direcție pentru trei surse sonore și zgomot

Alte rezultate ale măsurătorilor la diferite distanțe pentru o sursă audio tip ferăstrău cu lant, pe direcția N N-E, la un unghi estimat între 80-90° sunt prezentate în Tabelele 3 și 4

Distanță		50 m	100 m	300 m	500 m	1000 m
Direcție						
N	Nivel intensitate [dB]	-25,5	-20,9	-30,4	-20,8	-19,76
	Nivel autocorelație	15,83	100,12	58,94	181,95	251,27
S	Nivel intensitate [dB]	-45,6	-43,4	-54,92	-34,2	-32,56
	Nivel autocorelație	1,43	7,10	3,5	38,78	23,12
E	Nivel intensitate [dB]	-40,1	-28,4	-40,95	-30,1	-40,88
	Nivel autocorelație	6,62	42,27	19,66	62,31	58,02
V	Nivel intensitate [dB]	-30,1	-27,9	-38,14	-26,5	27,43
	Nivel autocorelație	7,07	44,77	23,79	93,69	104

Tabela 3: Rezultate măsurători la diferite distanțe pentru o sursă audio tip ferăstrău cu lant - varianta 2.

Distanță		50 m	100 m	300 m	500 m	1000 m
Unghi de sosire						
ILD		87°	88,72°	83,45°	74,95°	43°
Autocorelație		88°	88,44°	85,7°	83,5°	79°

Tabela 4: Unghiul de sosire pentru diferite distanțe pentru ferăstrău cu lant - varianta 2.

16. Evaluarea soluției propuse

După cum am văzut în capitolele anterioare, în această teză de doctorat am utilizat o structură de senzori audio adaptați scopului propus pornind de la forma, dimensiunile și funcționarea capului uman. Prelucrarea datelor înregistrate de rețeaua de senzori a fost realizată prin implementarea unui software open source Audacity. Acest program de prelucrare a semnalelor audio a fost instalat pe un minicalculator Raspberry Pi 5. Pentru transmisia datelor s-a utilizat un Modul LoRa RFM96, 868MHZ, ultra long range, 3.3V pentru Raspberry Pi, cu banda de frecvență 868 MHz (pentru Europa) și o antena directivă Yagi. Pentru alimentarea cu energie electrică a dispozitivului am utilizat un kit solar cu panou fotovoltaic de 100W și un acumulator cu o capacitate de 17 Ah. În concluzie, pentru întregul echipament costul ajunge undeva la câteva sute de euro. În acest calcul nu am luat în considerare costurile suplimentare datorate resursei umane și cele specifice oricărui produs în faza de dezvoltare, producție și desfacere, și ne-am limitat pentru început doar la cheltuielile materiale.

Prin transferul datelor recepționate și prin neutilizarea unui echipament de prelucrare a lor *in situ*, scade consumul energetic, făcând posibilă utilizarea unor elemente de captare și înmagazinare a energiei electrice de dimensiuni mai mici sau asigurarea funcționării continue a celulei de senzori. Costul pentru o singură celulă pentru utilizarea rețelei de date a telefoniei mobile, în funcție de furnizor este de aproximativ 5 euro/lună.

Pentru supravegherea unei arii de 1 km², utilizând celule de senzori la distanță de 500 de metri, dispuse în colțurile unui pătrat ar fi nevoie de 9 celule. Costul transferului de date în acest caz ar fi de 45 euro/km².

În situația în care aria ce se dorește a fi supravegheată nu este acoperită de o rețea de date și transmisia unui volum mare de informație poate fi o misiune dificilă, chiar imposibilă, este nevoie de reducerea la minim a acestuia. Soluția este prelucrarea datelor *in situ* utilizând în locație un minicalculator de tip Raspberry Pi. În acest caz se utilizează o tehnică de transmisie de tip punct la punct utilizând unul din protocoalele de comunicație fără fir (LoRa). Cu ajutorul acestui protocol de comunicație se pot realiza transferuri de date de ordinul zecilor de kbiți/s, la o distanță de 5-10 km, utilizând un sistem radiant directiv. În acest caz rata de transfer a datelor ar avea costuri apropiate de zero, în schimb ar crește semnificativ costul unei celule de senzori prin adăugarea în structură a minicalculatorului și mărirea capacității energetice necesar pentru menținerea funcționării senzorului, în condițiile în care ar crește semnificativ consumul (aproximativ de 5 ori).

În urma măsurărilor efectuate în condiții reale, în câmp deschis, zone colinare, zone împădurite, am stabilit că distanța medie eficientă a senzorului este de aproximativ 250 m. În concluzie pentru acoperirea unei suprafețe de 1km² ar fi nevoie de 9 celule de senzori. În cazul în care suprafața supravegheată crește, numărul de senzori necesari pe km² va scădea. Astfel pentru 2km², am avea nevoie de 15 senzori, pentru 4 km² sunt necesari 25 de senzori.

În concluzie pentru acoperirea unei suprafețe de 4 km², numărul de senzori poate varia între 13 și 25. Costul unui sistem de supraveghere poate varia între 3600 Euro și 7500 Euro. Prețul mediu pe km² ar fi 800 euro-1870 euro, în funcție de numărul de celule utilizat

Materialele utilizate la construcția acestui senzor au o bună rezistență în condiții de umiditate crescută și temperaturi extreme. Amplasarea microfoanelor în interiorul structurii, în tuburi PVC la o distanță de 4 cm de suprafața exterioară de care sunt separate de un burete antivânt le conferă o protecție crescută față de ploaie sau praf. Suprafața exterioară a senzorului este tratată cu o vopsea siliconică cauciucată, la fel rezistentă la intemperii. Echipamentele electronice sunt amplasate într-o carcasă etanșă, cu garnitura de cauciuc pentru a împiedica pătrunderea umezelii și a prafului. O problemă pe timp de iarnă poate fi acoperirea panoului solar cu zăpadă, motiv pentru care ar fi utilă utilizarea unui panou solar cu sistem de încălzire.

17. Evaluare finală

Cei 4 senzori acustici, în cazul nostru, sunt microfoane electret omnidirecționale (ieftine), dar a căror diagramă de directivitate a fost modelată prin construcția mecanică a senzorului și prin caracteristicile acustice, fonoabsorbante, ale materialelor utilizate. Scopul propus a fost de a obține un senzor relativ ieftin cu foarte bune caracteristici de directivitate pe un interval de frecvență și un raport semnal/zgomot ridicat. Toate aceste caracteristici determină o calitate bună a semnalului sonor înregistrat fără a fi nevoie de metode sofisticate de reducere a zgomotului și a altor tipuri de interferențe care necesită prelucrări complexe de semnal. În acest fel se poate utiliza un algoritm care nu necesită o putere mare de calcul, acesta fiind un foarte mare avantaj din punct de vedere al hardware-ului utilizat și al consumului energetic, ambele fiind limitate pentru un astfel de senzor.

Prin utilizarea acestui tip de senzor și metodei autocorelației pentru determinarea maximului de semnal pe cele 4 direcții și stabilirea unghiului de sosire a semnalului am obținut o precizie de estimare a direcției cuprinsă între 5° și 15°. Precizia determinării direcției de sosire este influențată de distanța la care se situează sursa sonoră și de raportul semnal/zgomot.

Rezultatele obținute prin metoda autocorelației au fost mai precise decât cele obținute prin celelalte metode (calcularea amplitudinii), știut fiind faptul că această metodă are o imunitate ridicată pentru zgomot, aceasta fiind indicată pentru filtrarea semnalelor din medii puternic zgomotoase.

Distanța maximă pentru care se pot realiza evaluări corecte, în limita toleranței admise în funcție de aplicație, a fost cuprinsă între 300 -500m, desigur această distanță variind puternic în funcție de natura sursei sonore și intensitatea acesteia.

În urma experimentelor realizate precizia estimării direcției de sosire în funcție de distanță este reprezentată grafic în Figura 11. Conform măsurărilor efectuate în condiții reale (zgomot ambiental, vânt etc.), precizia determinării direcției de sosire, cu ambele metode de măsurare (amplitudine și autocorelație) este bună până la o distanță de 250 m, după care metoda autocorelației devine superioară celeilalte metode. Acest fapt se datorează faptului că metoda autocorelației are o imunitate crescută la zgomot, rezultatele obținute chiar și în condiții de raport semnal/zgomot scăzut fiind mai bune decât cele obținute prin alte metode.

18. Concluzii

Elementul cheie al tehnicii de supraveghere este **setul de microfoane dispus ortogonal**. În literatura de specialitate există o serie de metode utilizate pentru determinarea direcției de sosire a semnalului sonor și pentru identificarea sursei acustice. În cadrul acestei lucrări s-au studiat aceste metode și s-au experimentat majoritatea algoritmilor cu ajutorul senzorului cuadrofonic construit. În urma acestor experimente s-a reușit **optimizarea parametrilor constructivi ai senzorului cuadrofonic** pentru a putea fi utilizată cu maximă eficiență la majoritatea metodelor de determinare a direcției de sosire și de identificare a sursei sonore.

Punctul de pornire pentru construcția senzorului a fost capul uman. S-au studiat și adaptat caracteristicile constructive și dimensionale ale capului uman, care s-au utilizat la construcția mecanică a senzorului. Prin studierea caracteristicii de transfer a capului uman s-a optimizat dimensiunile constructive ale senzorului cuadrofonic, poziționarea mecanică a senzorilor, compoziția materialelor utilizate în așa fel încât să poată fi utilizat la majoritatea metodelor de determinare a direcției de sosire și de identificare a sursei sonore.

Acuratețea captărilor surselor sonore cu cele 4 microfoane care compun senzorul cuadrofonic **au permis utilizarea unor metode de calcul de complexitate medie spre mică**, care nu necesită o putere mare de procesare, cu rezultate foarte bune în ceea ce privește precizia determinării.

Prin utilizarea acestei construcții mecanice s-a obținut o **directivitate cu un F/B Ratio** (Front to Back Ratio) **optim, utilizând microfoane ieftine** (omnidirective de tip condensator sau electret). În acest fel s-a evitat utilizarea metodelor care necesită o procesare complexă sau care impun utilizarea semnalelor sincronizate la recepție, un deziderat greu de îndeplinit și care presupune utilizarea unor echipamente cu grad de complexitate ridicat. Tot prin adaptarea parametrilor constructivi mecanici s-au **reduc considerabil influențele nedorite ale reflexiilor și reverberațiilor**, doi factori importanți care pot altera sau chiar compromite rezultatele determinării.

Pentru prelucrarea semnalelor sonore captate de senzorul cuadrofonic *in situ* s-a utilizat un minicalculator (Raspberry Pi) care utilizează un sistem de operare open source (Linux) și o aplicație de prelucrare a semnalelor audio, implementată pe această platforma Audacity (open source). Volumul de date necesar de transmis pentru determinarea direcției este de dimensiunea a 8-10 octeți /eșantion.

Funcția de identificare a semnalului sonore se realizează cu un algoritm simplificat (algoritmul Goertzel). Utilizarea acestui algoritm este suficient de precisă pentru scopul propus, fără să genereze un volum de date inutil pentru aplicație. Vectorul de identificare al sursei sonore generat pe eșantion analizat este de dimensiunea unui octet. Utilizând aceste metode de determinare, **volumul de date care trebuie transmis este foarte mic**, motiv pentru care se pot utiliza metode și tehnici de transmisii de date cu bandă îngustă de transfer, pe distanțe mari, de ordinul kilometrilor, de exemplu LoRa.

Alimentarea celulei de senzori s-a realizat prin transformarea unei surse regenerabile (panou solar de 10W) cu stocare în acumulator de 12V, 7Ah. Energia medie acumulată în timpul unei zile cu iluminare medie de 6 ore pe zi a fost suficientă pentru funcționarea neîntreruptă a celulei. O optimizare posibilă ar fi atașarea unei turbine eoliene de mici dimensiuni, capabilă să producă energie și în intervalele cu iluminare scăzută, spre exemplu timp noros sau noapte.

Pe scurt, contribuțiile principale ale acestei teze de doctorat pot fi sintetizate astfel:

1. setul de microfoane dispus ortogonal într-o carcasă asemănătoare capului uman;
2. optimizarea parametrilor constructivi ai senzorului cuadrofonic;
3. obținerea unor semnale audio cu mare acuratețe prin captarea surselor sonore cu cele 4 microfoane care compun senzorul cuadrofonic;
4. obținerea unei localizări cu o directivitate și cu un raport F/B optim, utilizând microfoane ieftine;
5. reducerea considerabilă a influențelor nedorite ale reflexiilor și reverberațiilor prin construcția mecanică a senzorului propus.

