



SISTEM DE IDENTIFICARE SI LOCALIZARE PRIN AER SI SOL A POZITIEI GURILOR DE FOC IN CAMPURI DE TRAGERE (GUNDETECT)

Activitatea 1 - Studiu privind tehnici, metodologii și instrumente specifice pentru monitorizarea și prelucrarea infrasunetelor, detectabile în atmosfera terestră

1.1 - Studiu privind optimizarea raportului semnal /zgomot al semnalelor infrasonice.

- 1. SCOPUL ACTIVITĂȚII
- 2. STUDIU PRIVIND OPTIMIZAREA RAPORTULUI SEMNAL /ZGOMOT AL SEMNALELOR INFRASONICE

REZULTATE SI MODUL DE DISEMINARE A REZULTATELOR

GRADUL DE REALIZAREA A OBIECTIVELOR

BIBLIOGRAFIE

1. SCOPUL ACTIVITĂȚII

Prezentul raport științific și tehnic este realizat ca urmare a activităților desfășurate în cadrul proiectului experimental-demonstrativ *"Sistem de identificare și localizare prin aer și sol a poziției gurilor de foc în câmpuri de tragere*" din PN III / Programul 2 – Creșterea competitivității economiei românești prin cercetare, devoltare și inovare / Subprogramul 2.1 – Competitivitate prin cercetare, devoltare și inovare (Nr. înregistrare UEFISCDI PN3-P2-850/16.11.2020).

Scopul activității este de a contribui la elaborarea rapoartelor de către coordonator – Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP) conform planului de realizare a proiectului, pentru etapa I – "*Studiu privind tehnici, metodologii și instrumente specifice pentru monitorizarea și prelucrarea infrasunetelor, detectabile în atmosfera terestră*".

Rezultatele estimative verificabile ale activității, pentru această etapă, sunt următoarele:

- Raport privind identificarea parametrilor evenimentelor infrasonice din observațiile infrasonice;
- Raport privind evaluarea valorii adăugate a tehnologiei infrasunetice pentru monitorizarea la distanță a exploziilor comparativ cu alte tehnologii;
- Raport privind determinarea locației infrasonice pentru evenimente naturale;
- Raport proiect pagină de internet proiect (http://gundetect.infp.ro).

Totodată, se are în vedere prezentarea rezultatelor obținute în cadrul activitățiilor 1.1 - Studiu privind optimizarea raportului semnal /zgomot al semnalelor infrasonice și 1.2. "*Elaborare și testare în laborator și în situ a unor modele experimentale*", desfășurate de partenerii – Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului - INCDFP și Ministerul Apărării Naționale prin Agenția de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare (ACTTM).

2. STUDIU PRIVIND OPTIMIZAREA RAPORTULUI SEMNAL /ZGOMOT AL SEMNALELOR INFRASONICE

2.1 Introducere

Infrasunetele sunt unde sonore de frecvențe mici (sub 20 Hz), care se propagă în aer cu viteza sunetului – 343 m/s la 20°C. Această viteză crește cu temperatura și direcția în care bate vântul, din cauza advecției, și viceversa. În plus, această viteză depinde de tipul de gaz din mediul de propagare, respectiv de proprietățile fundamentale ale materialului, care pot ține de starea solidă sau lichidă. Propagarea undei infrasonice este dependentă de compoziția și structura vântului și temperaturii ale atmosferei.

Undele de infrasunete sunt generate de o mare varietate de surse: naturale și provocate de activitatea umană (surse antropogene). Sursele naturale includ: meteori, aurore boreale, furtuni de convecție și fulgere, tornade, valuri oceanice de mare amplitudine, cutremure, crioseisme, alunecări de teren, avalanșe, ruperi de aisberguri și ghețari, erupții vulcanice continue sau explozive, tsunami, cascade și valuri marine costiere. Sursele antropogene de infrasunete includ: explozii nucleare, explozii miniere și chimice, lansări și reintrări în atmosferă de sateliți, nave spațiale și rachete, avioane, surse industriale precum gazele emanate de instalații industriale, flăcările rafinăriilor de petrol și gaze, barajele hidrotehnice, turbinele eoliene etc.

În prezent, pe teritoriul României, sunt instalate două stații de monitorizare a infrasunetelor:

- IPLOR, instalată de către INCDFP în partea centrală a României, la Ploștina, în județul Vrancea.

- BURARI, instalată în partea de nord a României (lângă localitatea Benea, județul Suceava) Pentru prelucrarea datelor de infrasunete înregistrate de cele două stații românești și detectarea semnalelor utile s-au folosit tehnicile specifice array-urilor și metoda de corelare încrucișată a formelor de undă, respectiv algoritmul PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation – corelare multi-canal progresivă).

2.2. Descrierea științifică și tehnică

I. Caracteristicile și propagarea infrasunetelor

I.1. Caracteristicile fizice ale infrasunetelor

Undele sonore sunt în general unde longitudinale, la care mișcarea particulei sau oscilatorului are loc în aceeași direcție cu cea de propagare. O undă sonoră care trece printr-un gaz perturbă starea de echilibru a acestuia prin compresii și rarefieri. Undele sonore sunt unde elastice; prin umare, când particulele se deplasează, asupra particulelor acționează o forță proporțională cu deplasarea, pentru restabilirea poziției lor originale (*Pain, 1983*). Gazul poate facilita producerea unor deformații într-o gamă largă de frecvențe. Undele sonore din atmosferă devin audibile omului dacă frecvența lor se găsește în domeniul 20-20.000 Hz. Undele ultrasonice sunt inaudibile urechii umane, având frecvențe mai mari de 20.000 Hz. De exemplu, liliecii folosesc ultrasunetele ca sonar în scop de orientare în spațiu. Infrasunetele se propagă cu viteza sunetului: 343 m/s la 20°C în aer.

I.2. Atmosfera ca mediu de propagare

Propagarea undei infrasonice este, în primul rând, dependentă de compoziția și structura vântului și temperaturii ale atmosferei. Viteza efectivă a sunetului incorporează aceste efecte, fiind descrisă prin relația: $c_{eff} = \sqrt{\gamma_g RT} + \hat{n} \cdot \boldsymbol{u}$, unde multiplicarea raportului încălzirii specifice cu constanta gazului pentru aer are valoarea: $\gamma_g R = 402,8 \text{ m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$. Temperatura absolută este *T*, iar $\hat{n} \cdot \boldsymbol{u}$ proiectează vântul \boldsymbol{u} pe direcția sursă – observator \hat{n} , prin acest produs intern. Temperatura scade cu altitudinea în atmosfera inferioară, în condiții atmosferice normale. Ca rezultat, sunetul se curbează ascendent ca funcție de distanța orizontală. Fenomenul de refracție poate apărea în cazul infrasunetelor în regiuni unde c_{eff} devine mai mare decât valoarea sa de suprfață și depinde de orientarea frontului de undă. Acest fapt poate fi cauzat de o creștere a vitezei vântului sau a temperaturii sau unui efect combinat. Refracția urmărește legea lui Snell și va curba unda infrasonică înapoi spre suprfața Pământului (*Mutschlecner și Whitaker 2010*).

În cazul atmosferei, presiunea medie și densitatea globale scad aproximativ exponențial cu altitudinea. Presiunea descrește de la 105 Pa, la suprafață, la 10% din această valoare, la o altitudine de 15 km. În consecință, 90% din masa atmosferei este concentrată în primii 15 km altitudine. Densitatea scade cu aceeași rată de la o valoare la suprafață de 1,2 kg/m³ (Salby, 1996). Absorbția sunetului în atmosferă este o funcție de frecvență și scade cu micșorarea frecvenței. Absorbția dintr-un gaz molecular este cauzată de două mecanisme diferite, reprezentate de efectele clasice și cele de relaxare. Efectele clasice sunt determinate de procesele de transport într-un gaz. Acestea sunt: difuzia moleculară, frecarea internă și conductia de căldură. Ultimele două au cea mai mare contributie în proces. Din cauza unei scăderi rapide a atenuării cu frecventa, infrasunetele se pot propaga pe distanțe foarte mari, făcând posibilă identificarea sursei pe intervale lungi de distanță. Atmosfera este compusă din mai multe straturi. Denumirea acestor straturi se poate baza, de exemplu, pe gradul de eterogeneitate al porțiunii din atmosferă. Turbulențele conduc la o atmosferă omogenă sub 100 km. Peste 100 km, mișcările turbulențelor sunt puternic atenuate, iar difuzia devine mecanismul predominant al transportului pe verticală a aerului. Peste o altitudine de 500 km, nivelulul critic, coliziunile moleculare sunt foarte rare astfel încât moleculele părăsesc atmosfera densă în spațiu, dacă viteza lor este destul de mare pentru a scăpa din câmpul gravitational al Pământului. Pe baza acestei clarificări, primii 100 km ai atmosferei se numesc homosferă (homosphere). Despărțită prin homopauză (homopause) (figura 1.1), porțiunea dintre 100 și 500 km se numește heterosferă (heterosphere). Regiunea de peste 500 km se numește exosferă (Salby, 1996).



Figura 1. 1 Reprezentarea profilului de temperatură al atmosferei ca funcție de altitudine, pe baza energiei cinetice a atomilor, din U.S. Standard Atmosphere (*NOAA*, *NASA*, *USAF*, 1976) (după Evers și Haak, 2010)

Denumirile pot fi de asemenea bazate pe semnul gradienților de temperatură în diferite părți ale atmosferei. Acest fapt este mult mai convenabil în studiul infrasunetelor, deoarece propagarea acestora este parțial influențată de temperatură. Distribuția temperaturii într-o atmosferă standard este prezentată în **figura1.1**.

I.3. Propagarea infrasunetelor

În **figura 2** sunt prezentate profilele de temperatură și vânt pentru vară și iarnă din De Bilt, Olanda, la 52°N, 5°E. Vântul este împărțit într-o componentă Vest-Est, denumită vânt zonal, și într-o componentă Sud-Nord – vânt meridional. Vântul zonal este direcționat pozitiv atunci când bate dinspre vest spre est, vânt dinspre vest. Vântul meridional are semn pozitiv dacă provine din sud. În ceea ce privește vântul, două regiuni ale atmosferei au importanță pentru propagarea infrasunetelor. Prima, zona jetului de curenți de aer (jet stream), imediat sub tropopauză, este cauzată de diferența de temperatură dintre pol și ecuator, în combinație cu forța Coriolis. Gradientul de temperatură este mult mai mare pe durata iernii decât în timpul verii. Prin urmare, viteza maximă a vântului zonal este mai mare iarna. Celălalt vânt importanță cu gradientul de temperatură iarnă – vară, sunt: un curent dinspre est, în timpul verii, și unul dinspre vest, pe timpul iernii. Vitezele maxime ale vântului ale acestui vortex polar apar în jurul altitudinii de 60 km și, din nou, sunt mai mare pe durata iernii (*Holton, 1979*).



II. Sursele de infrasunete

Undele de infrasunete sunt generate de o mare varietate de surse: naturale și provocate de activitatea umană (surse antropogene) (*Campus, 2004*). Sursele naturale includ: meteori, aurore boreale, furtuni de convecție și fulgere, tornade, valuri oceanice de mare amplitudine, cutremure, crioseisme, alunecări de teren, avalanșe, ruperi de aisberguri și ghețari, erupții vulcanice continue sau explozive, tsunami, cascade și valuri marine costiere. Sursele antropogene de infrasunete includ: explozii nucleare, explozii miniere și chimice, lansări și reintrări în atmosferă de sateliți, nave spațiale și rachete, avioane, surse industriale precum gazele emanate de instalații industriale, flăcările rafinăriilor de petrol și gaze, barajele hidrotehnice, turbinele eoliene etc. (*Campus și Christie, 2010*). În **tabelul 1** este prezentată o listă a celor mai importante tipuri de unde infrasonice observate, inclusiv gama specifică de frecvențe, amplitudinile maxime observate în Pa (1 Pa = 10⁻⁵ bar), domeniul de distanțe maxim estimat pentru detecție. Un număr de surse relativ mici nu a fost inclus în acest tabel – uzine hidroelectrice, turbinele eoliene, crioseisme, micro-explozii, eclipse solare și surse asociate cu activități generatoare de zgomot cultural, precum autostrăzi, trenuri și aeroporturi (*Campus și Christie, 2010*).

Sursa de infrasunete sau tipul de unde infrasonice	Gama de frecevențe (Hz)	Amplitudinea maximă observată (Pa)	Distanța estimată pentru detecție (km)
Explozii nucleare atmosferice	0,002-20	> 20	>20.000
Explozii nucleare subterane	~1-20	~1	~1.000
Explozii în mină	0,05-20	~5	>5.000
Alte explozii chimice	0,05-20	~10	>5.000
Poduri și alte structuri	0,5-20	~0,5	<100

Tabelul 1. Caracteristicile câtorva tipuri de unde infrasonice (după Campus și Christie, 2010)

Emanări de gaze din activități industriale	1-20	~0,5	~1.000
Lansări de rachete și navete spațiale	0,01-20	~5	~3.000
Reintrarea în atmosferă a sateliților și a navetelor spațiale	0,1-10	~1	>2.000
Avion subsonic	0,3-20	~2	<100
Avion supersonic	0,3-20	~10	~5.000
Meteoriți	0,01-20	>10	>20.000
Infrasunete generate de aurora boreală	0,008-20	~2	~4.000
Rupere de aisberguri și ghețari	~0,5-8	~1	~200
Erupții vulcanice	0,002-20	>20	>20.000
Furtuni severe (convective)	0,01-0,1	~0,5	~1.500
Cutremure	0,005-10	~4	>10.000
Incendii forestiere; incendii industriale majore	2-20	~2	~4.000
Alunecări de teren; avalanșe	0,1-20	~1	~1.000
Unde microbarometrice	0,12-0,35	~5	~10.000
Unde asociate cu zonele muntoase	0,007-0,1	~5	~10.000
Valuri	1-20	~0,2	~250
Trăsnete	0,5-20	~2	~50
Tornade	0,5-20	~0,5	~300
Tsunami	0,5-2	~0,1	~1.000
Cascade	0,5-20	~0,2	~200

Cascade0,5-20~0,2~200Distanța maximă de detecție, specifică fiecărei stații, depinde de un număr mare de factori, printre
care: componentele vântului din stratul superior al atmosferei de pe direcția de propagare a undei,
gradul de atenuare a semnalului pe direcția de propagare între sursă și receptor, nivelele de zgmot
ambiental și eficiența algoritmilor de detecție (*Campus și Christie, 2010*).~200

În **figura de mai jos** sunt prezentate câteva surse geofizice și artificiale care reprezintă emit infrasunete într-un domeniu de frecvențe cuprins între 0,02 și 4 Hz. În prezent, aceste infrasunete sunt înregistrate cu microbarometre cu o rezoluție de ~0,1 mPa.



Figura . Surse de infrasunete: explozii, erupții vulcanice, avalanșe, aurora boreală, orografie, vreme severă, bolizi (explozii de meteoriți în atmosferă), unde marine, baraje hidro-energetice, turbine eoliene

III. Monitorizarea semnalelor infrasonice generate de fenomenele geofizice naturale și artificiale III.1. Stațiile de monitorizare a infrasunetelor din România

În prezent, pe teritoriul României, sunt instalate două stații de monitorizare a infrasunetelor (**figura**). Datele înregistrate continuu sunt trimise în timp real la INCDFP, unde sunt prelucrate și analizate. Una dintre principalele motivații ale monitorizării infrasunetelor la INCDFP constă în discriminarea dintre sursele care provoacă vibrații în interiorul Pământului (cutremure) și în atmosferă (explozii).



Figura . Amplasarea geografică a celor două stații românești (IPLOR și BURARI) de monitorizare a infrasunetelor infrasonice

• Stația infrasonică de tip array IPLOR a fost instalată de către INCDFP, începând cu anul 2009, în partea centrală a României, la Ploștina, în județul Vrancea. În prezent, configurația stației este compusă din 4 elemente distribuite într-o apertură de 0,6 km.



Stația infrasonică IPLOR: geometria array-ului (stânga); răspunsul array-ului ca funcție de număr de undă k [1/km] (mijloc); sistemul de reducere a zgomotului provocat de vânt de tip filtru cu tuburi flexibile conectate în rozetă (dreapta)

• Stația infrasonică de tip array BURARI a fost instalată, începând cu anul 2016, în partea de nord a României (lângă localitatea Benea, județul Suceava) în cadrul unei colaborări dintre INCDFP și Centrul pentru Aplicații Tehnice al Forțelor Aeriene (AFTAC – Air Force Tehnical Application Center) al SUA. În prezent, configurația stației este compusă din 6 elemente distribuite într-o apertură de 0,7 km (figura 8).



Figura 8. Stația infrasonică BURARI: geometria array-ului (stânga); răspunsul array-ului ca funcție de număr de undă k [1/km] (mijloc); sistemul de reducere a zgomotului provocat de vânt de tip filtru cu tuburi flexibile conectate în rozetă (dreapta)

III.2. Prelucrarea și analiza datelor înregistrate de stațiile de monitoizare a infrasunetelor III.2.1. Metodologia de prelucrare a datelor în vederea detectarii semnalelor de infrasunete

Pentru prelucrarea datelor de infrasunete înregistrate de stațiile românești și detectarea semnalelor utile s-au folosit tehnicile specifice array-urilor și metoda de corelare încrucișată a formelor de undă, respectiv algoritmul PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation – corelare multi-canal progresivă) (*Cansi, 1995; Cansi și Klinger, 1997; Cansi și Le Pichon, 2008; Le Pichon și Cansi,* 2003). Această metodă specifică array-urilor, care a fost inițial dezvoltată pentru prelucrarea datelor seismice, s-a dovedit eficientă în identificarea semnalelor coerente de amplitudine mică din zgomotul de fond incoerent al înregistrării. Undele infrasonice pot fi reprezentate de un set de unde plane folosind relația: $f(\vec{r},t) = e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$, unde $||\vec{k}|| = 2\pi f/V$ este vectorul numărului de undă, f este frecvența, V este viteza de fază, iar $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ este frecvența unghiulară. În timp ce pentru estimarea conținutului de frecvențe a unei unde sunt suficiente datele înregistrate de o stație singulară, parametrul \vec{k} se poate determina numai pe baza datelor provenite de la un array de cel puțin trei senzori (**figura 9**), în acest caz folosindu-se gradul mare de coerență a semnalului pentru calculul diferențelor dintre timpii de sosire la fiecare senzor (dt). Numărul de undă k a unei anumite unde plane cu frecvența f și care traversează array-ul este caracterizat de viteza V și azimutul de sosire la stație θ (calculat față de nord și denumit azimut invers).



Figura 9. Calculul numărului de undă pentru semnalele înregistrate de un array de senzori Propagarea undei plane peste array este descrisă de relația: $p(x, t) = A\cos(kx - \omega t + \phi_0)$, unde ϕ_0 este faza inițială a undei. În acest caz, se calculează :

- transformata Fourier: $S_i(f) = TF(p(x_i, t)) = \widehat{A}_i e^{i(\phi_0 - 2\pi f t)}$ - diferența de fază: $\phi_{ii}(f) = \text{Faza}[S_i(f)\overline{S_i(f)}]$

Dacă $\phi_{ij}(f)$ este o funcție aleatoare de f (faza este foarte instabilă), atunci semnalul este zgomot incoerent (**figura 10a**), iar dacă $\phi_{ij}(f)$ este o funcție de f care respectă relația de închidere: $\phi_{12} + \phi_{23} + \phi_{31} = 0$, atunci semnalul este unul coerent (**figura 10b**).



Figura 10. Semnal incoerent (a) și semnal coerent

În plus, dacă diferențele dintre timpii de sosire (întârzieri) la fiecare senzor sunt date de relația: $\Delta t_{ij} = \frac{1}{2\pi f} \left(\Phi_j(f) - \Phi_i(f) \right), \text{ atunci pentru fiecare array de trei senzori, suma acestor întârzieri$ (consistența) în cazul unei unde plane trebuie să respecte relația de închidere: $\Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} = 0.$

Se calculează funcția de corelare încrucișată $C_{ij}(\tau)$ dintre înregistrările senzorilor S_i and S_j în domeniul timp; acesta este normalizat la valori între -1 și 1. Luând în considerare toate frecvențele, funcția de corelare calculată pentru o fereastră de lungime W, va oferi o măsură a similarității semnalelor între care există o diferență de timpi de sosire τ . Maximul funcției de corelare $\Delta t_{ij} = max(C_{ij}(\tau))$ reprezintă deci întârzierile între semnale. Prin urmare, criteriul de detecție a unui semnal util (coerent) observat cu un array de senzori este ca să fie respectată relația de închidere pentru întârzierile la senzori.

Pe baza soluției celor mai mici pătrate (2D) calculată din funcția trasformatei Fourier: $S = (A^T A)^{-1} A^T \Delta T$, se calculează viteza: $V = \frac{1}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}$ și azimutul invers: $\theta = atan\left(\frac{S_x}{S_y}\right)$ caracteristice

semnalului.

Etapa de preprocesare din algoritmul PMCC, în urma căreia se obțin detecțiile elementare (pixelii PMCC), este urmată de postprocesare, care constă din crearea familiilor de pixeli (**figura 11**) prin gruparea detecțiilor elementare cu valori similare ale timpului de sosire, frecvenței, azimutului invers și vitezei. Această grupare se face în spațiul (*t*, *f*, *V*, θ) prin calculul unei distanțe ponderate

dintre doi pixeli
$$P_i$$
 și P_j : $d(P_i, P_j) = \sqrt{\frac{(t_j - t_i)^2}{\sigma_t} + \frac{(f_j - f_i)^2}{\sigma_f} + \frac{(v_j - v_i)^2}{\sigma_V} + \frac{(\theta_j - \theta_i)^2}{\sigma_\theta}}$ (unde σ_t , σ_f , σ_V , σ_θ)

sunt factori de ponderare care permit compararea mărimilor de același fel) și compararea ei cu o valoare maximă, dMax. Astfel, cei doi pixeli P_i și P_j aparțin aceleași familii PMCC dacă $d(P_i, P_j) < dMax$.



Figura 11. Crearea familiilor de pixeli PMCC

În aceeași fereastră de timp pot exista mai multe unde cu parametrii de propagare diferiți, dar în diferite benzi de frecvență. Analiza PMCC timp-frecvență permite identificarea fiecărui semnal individual, furnizând informații detaliate, în special asupra evoluției în timp a parametrilor de propagare și a conținutului de frecvențe.

III.2.2. Programele utilizate pentru prelucrarea datelor înregistrate cu stațiile infrasonice românești

Pentru prelucrarea și analiza datelor acustice înregistrate de stațiile IPLOR și BURARI, la INCDFP, se folosește un grup de două aplicații software orientate spre detectarea semnalelor de infrasunete, care a fost dezvoltat recent de către Departamentul de analiză, supraveghere și mediu al Comisariatului de Energie Atomică din Franța (CEA/DASE): DTK-GPMCC și DTK-DIVA. Aceste aplicații au fost integrate în pachetul standard extins de programe (NDC-in-a-BOX) dezvoltat în cadrul Centrului Internațional de Date (IDC) al CTBTO. Prin utilizarea combinată a celor două aplicații se poate realiza:

- configurarea algoritmului PMCC de detecție a semnalelor de infrasunete și studierea detaliată a acestor detecții (DTK-GPMCC)

- studierea cu exactitate a detecțiilor asociate zgomotului coerent și interacțiunea lor cu semnalele de interes (DTK-GPMCC & DTK-DIVA)

- reprezentarea grafică a detecțiilor obținute pentru fiecare stație în funcție de parametrii calculați (azimut invers, viteză de parcurs, amplitudine, frecvență etc.), respectiv obținerea diagramelor de detectabilitate și identificarea parametrilor care influențează capacitatea de detecție a stației (condițiile meteorilogice locale, sursele de zgomot, transportul de mase de aer din stratosferă etc.) (DTK-DIVA)

DTK-GPMCC utilizează ca instrumente de detecție a semnalelor infrasonice din datele IPLOR și BURARI sistemele GPMCC (modul interactiv) sau PMCC (modul automat). Aceste detecții sunt stocate în fișiere text de tip buletine, care conțin informațiile esențiale pentru caracterizarea semnalelor de infrasunete: timp de detecție, valorile minimă, maximă și medie a frecvență valoarea medie a amplitudinii, valoarea medie a azimutului invers, valoarea medie a vitezei orizontale a fazei infrasonice etc.

> DTK-DIVA este un instrument generic de vizualizare a detecțiilor în vederea analizei lor interactive de către operator.

III.2.3. Diagramele de detectabilitate

Datele înregistrate cu cele două stații infrasonice instalate pe teritoriul României au fost prelucrate în mod automat cu programul PMCC. S-au folosit fișiere de de configurare a parametrilor specifici fiecărei stații (apertură, număr de senzori, distanța dintre senzori, modelul de microbarometre, nivelului de zgomot de fond al stației), cu scopul optimizării raportului semnal/zgomot SNR al semnalelor infrasonice și obținerii unei imagini de înaltă rezoluție a câmpului coerent de unde acustice în spațiul timp-frecvență. S-a urmărit astfel maximizarea capabilității stației de a detecta semnalele tranzitorii în bandă largă de frecvență, precum și semnalele continue în bandă îngustă cu raport SNR variabil, respectiv: (1) estimarea cât mai precisă a parametrilor frontului de undă (azimut invers, viteză de parcurs), și (2) separarea în frecvență a diferitelor tipuri de surse infrasonice (tranzitorii (ex.: explozii), mobile (ex.: bolizi, furtuni), continue (ex.: microbaroame (interacțiunea valurilor marine cu atmosfera), flăcări rezultate din arderea gazelor în rafinării). a) Diagramele X/Y/Z de dispersie a detecțiilor infrasonice zilnice (timp/azimut invers/frecvență medie)



b) Histogramele 1D X/Y/Z a numărului de detecții infrasonice (timp/număr de detecții/frecvență medie)





III.2.4. Exemple de surse acustice antropogenice cu caracter impulsiv/exploziv detectate de stațiile de monitorizare a infrasunetelor IPLOR și BURARI

S-a observat că cele două stații infrasonice sunt eficiente în observarea semnalelor acustice produse de surse specifice de tip impulsiv/exploziv (cu conținut de frecvențe mai mari): explozii accidentale și controlate, bolizi (explozii de meteoriți în atmosferă), boom-uri sonice. Această observație este în concordanță cu caracteristicile senzorilor instalați la array-ului de Ploștina (răspuns în frecvență, domeniu dinamic etc.) și aperturile stațiilor. Sunt prezentate mai jos câteva exemple sugestive de detecții ale semnalelor infrasonice produse evenimente de acest tip și observate cu stațiile IPLOR și BURARI.

Bolid deasupra Sloveniei şi Croației (5 kt of echivalent TNT), 28.02.2020, 09:25:49 UTC (REB IDC)



IPLOR ($\Delta = 1050$ km)

BURARI ($\Delta = 1020$ km)

Explozia accidentală în zona portuară a orașului Beirut (Liban) a 2.750 de tone de azotat de amoniu (0.5 - 1.1 kT echivalent TNT), 04.08.2020, 15:08:19 UTC (REB IDC)
IPLOR ($\Delta = 1520 \text{ km}$)
BURARI ($\Delta = 1745 \text{ km}$)



Boom sonic produs de zborul unui avion supersonic deasupra graniţei dintre Ucraina şi Rusia, 07.08.2020 (LEB IDC)

IPLOR ($\Delta = 810$ km)

BURARI ($\Delta = 780$ km)



7. Rezultate si modul de diseminare a rezultatelor

- Prezentarea tehnicilor, metodologiilor și instrumentelor specifice pentru monitorizarea și prelucrarea infrasunetelor, detectabile în atmosfera terestră

- Prezentarea metodelor optime de prelucrare și analiza datelor înregistrate cu stațiile românești de monitorizare a infrasunetelor

- Metode de optimizare a raportului semnal /zgomot al semnalelor infrasonice

- Diagrame de detectabilitate - evaluarea capacității de detecție a stațiilor infrasonice românești

- Raport de cercetare

- Lucrări științifice și comunicări științifice la conferințe și simpozioane de profil pe baza rezultatelor științifice ale temei de cercetare.

8. Gradul de realizarea a obiectivelor

Obiectivele fazei au fost îndeplinite în totalitate, iar rezultatele obținute sunt în concordanță cu țintele propuse.

L1.1: Raport privind identificarea parametrilor evenimentelor infrasonice din observațiile infrasonice

L1.3: Raport privind determinarea locației infrasonice pentru evenimente naturale

L1.4: Raport proiect pagina de internet proiect (http://gundetect.infp.ro)

BIBLIOGRAFIE

- 1. Campus P. (2004), The IMS infrasound network and its potential for detection of events: examples of a variety of signals recorded around the world. Inframatics 6:14–22
- Campus P., Christie, D.R. (2010), Worldwide Observations of Infrasonic Waves, In: A. Le Pichon et al. (eds.), Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Chapter 6, pp 181-230, © Springer Science + Business Media B.V. 2010
- 3. Cansi Y. (1995), An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. Geophys Res Lett 22:1021–1024
- 4. Cansi Y., Klinger Y. (1997), An automated data processing method for mini-arrays, CSEM/EMSC European-Mediterranean Seismological Centre. News Lett 11:1021–1024
- Cansi Y., Le Pichon A. (2008), Infrasound event detection using the progressive multi-Channel correlation algorithm. Handbook of signal processing in acoustics, chap. 77, Springer, New York, pp 1425-1435
- de Groot-Hedlin C.D., Hedlin M.A.H., Drob D.P. (2010), Atmospheric variability and infrasound monitoring., In: A. Le Pichon et al. (eds.), Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Chapter 15, pp. 469–504, © Springer Science + Business Media B.V. 2010
- Evers L.G., Haak H.W. (2010), The Characteristics of Infrasound, its Propagation and Some Early History. In: A. Le Pichon et al. (eds.), Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Chapter 1, pp 3-27, © Springer Science + Business Media B.V. 2010
- 8. Garcés M., Hansen R., Lindquist K. (1998), Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. Geophys J Int 135:255–263
- 9. Garces M.A. (201,). On infrasound standards, part 1 time, frequency, and energy scaling. InfraMatics 2(2):13–35. https://doi.org/10.4236/inframatics. 2013.22002
- 10. Holton J.R. (1979), An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, London
- 11. Le Pichon A, Antier K, Drob D (2006a) Multi-year validation of the NRL-G2S wind fields using infrasound from Yasur. Inframatics 16:1–9
- 12. Le Pichon A., Matoza R.S., Brachet N., Cansi Y. (2010), Recent Enhancements of the PMCC Infrasound Signal Detector, Inframatics Newsletter, http://www.inframatics.org/