



AGENȚIA DE CERCETARE PENTRU TEHNICĂ ȘI TEHNOLOGII MILITARE

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

Activitatea 2 - Realizarea, testarea instalatiei "Infrasound Array". Elaborarea metodelor, soluțiilor și procedurilor pentru evenimentele infrasonice generate de arme în zonele beligerante.

Activitate 2.2 - Proiectarea configuratiei instalatiei pilot de monitorizare a infrasunetelor.

Activitate 2.7. Dezvoltarea metodelor de discriminare a evenimentelor infrasonice

Aplicarea tehnicilor de detecție și identificare a semnalelor infrasonice generate în urma testelor efectuate pe teren în aer liber

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 (viteza efectivă la suprafața Pământului). 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.

Totuși, în cazul surselor acustice locale (monitorizate la intervale de la 0 la 100 km), domeniul de frecvență al semnalelor de infrasunete observate se extinde până la limita inferioară a spațiului de frecvență acustică (100 Hz) (*Stubbs et al. 2005*). În acest caz, predomină fazele troposferice, care se propagă în "zona de tăcere" (*McKenna et al. 2012*), acolo unde traseele geometrice ale razelor nu pot fi descrise prin modele climatologice atmosferice. Propagarea infrasunetelor la altitudine joasă permite pătrunderea semnalelor în "zona de tăcere", fiind afectată doar de condițiile meteorologice locale și de terenul existent de-a lungul căii de propagare, de la sursă la receptor. Din cauza acestor efecte, modelarea acestor sosiri devine complexă. Prin urmare, în vederea detectării lungimilor mici de undă ale frecvențelor superioare, array-urile se senzori de monitarizare a infrasunetelor trebuie să aibă aperturi mici (<60 m), să conțină de obicei între 3 și

5 elemente, iar eșantionarea înregistrărilor să fie de minimum 200 Hz (pentru a capta conținutul de frecvențe înalte) (*McComas et al., 2016*).

Monitorizarea infrasunetelor generate în cadrul aplicațiilor tactice, pe intervale de 0-100 km, este o problemă calitativ diferită, însemnând monitorizarea tactică a energiei acustice la frecvențe peste 100 Hz. Pentru aceasta, senzorii acustici de pe câmpul de luptă se concentrează pe domeniul frecvențe de peste 100 Hz.

Array-urile infrasonice pentru aplicații tactice au fost la început proiectate ca instrumente pentru monitorizarea respectării tratatelor privind armele nucleare. Sensibilitatea lor scade la frecvențe mai mari de 20 Hz. În cazul monitorizării distanțelor sub 100 km, o serie de factori conduc la luarea în considerare a frecvențelor de până la 100 Hz, considerat în mod tradițional ca domeniu acustic. Acești factori includ (*Stubbs et al. 2005*):

(1) Spectrul de putere acustică generat de multe dintre sursele de interes este o funcție cu creștere rapidă a frecvenței, cu energie considerabilă observată la frecvențe de la zeci de Hz la câteva sute de Hz;

(2) Propagarea atmosferică pe distante de până la 100 km generează energie la frecvențe mult peste banda clasică de frecvențe infrasonice;

(3) Zgomotul prezent în înregistrările infrasonice scade rapid cu creșterea frecvenței, avantanjând astfel sistemele de detecție a semnalelor.

În general, frecvențele de interes se găsesc în intervalul de la 0.1 la 100 Hz (respectiv, lungimi de undă de la 3 km la 3 metri), iar calculele de propagare se bazează aproape întotdeauna pe raytracing. Prin urmare, se poate presupune că modificările tuturor parametrilor atmosferici apar pe distanțe mult mai mari decât o lungime de undă. Semnalul de presiune detectat de sistemul de senzori conține combinația dintre spectrul de putere sonică al sursei și distorsiunile introduse de atmosferă atât în spectru cât și în direcția frontului de undă. Pentru a extrage caracteristicile sursei din datele înregistrate și pentru a determina corect informațiile despre direcția de sosire într-o locație, trebuie înțeleasă contribuția atmosferică (*Stubbs et al. 2005*).

2. Prelucrarea datelor infrasonice

Semnalele acustice pot fi detectate eficient cu rețelele de monitorizare a infrasunetelor de tip array; o astfel de rețea reprezintă o grupare locală de senzori infrasonici cu timp comun de referință/înregistrare și tip uniform de instrumentație. Distanțele dintre senzori trebuie să fie suficient de mici pentru ca înregistrările lor să poată fi corelate. Configurația geometrică a arrayului constrânge capacitatea sa de detecție; apertura limitată reduce capacitatea de a distinge undele propagate; spațierea distinctă și variabilă a senzorilor introduce efectul de aliasing spațial, respectiv de eșantionare insuficientă a datelor în spațiu, conducând la o reprezentare ambiguă a înregistrărilor. Datele înregistrate cu un array pot fi asimilate cu rezultatul unui filtru de bandă spațio-temporal (*Johnson și Dudgeon, 1993*). Banda de filtrare este definită de valorile minime și maxime ale numerelor de undă "rezolvabile" (care se pot distinge de către array). Aceste valori sunt constânse de configurația geometrică a array-ului (*Wang, 2002*).

În cazul unui array neregulat, precizia de măsurare și caracteristicile de aliasing se pot analiza cu ajutorul funcției de transfer a array-ului. Pentru un array dispus în plan orizontal și cu o geometrie dată, acest model este echivalent cu răspunsul în domeniul numărului de undă la o undă plană monocromatică a array-ului asimilat cu un filtru spațio-temporal. Lobul principal din modelul de răspuns determină rezoluția: cu cât apertura rețelei de senzori este mai mare, cu atât acest lob este mai îngust, indicând o bună rezoluție. Lobii laterali, care la numere de undă mari au amplitudine egală sau apropiată de cea a lobului principal semnalează prezența fenomenului de aliasing în spațiul numărului de undă (*Wang, 2002*).

Observațiile de mai sus au fost aplicate sistemului care folosește array de microfoane MEMS folosit pentru înregistarea semnalelor infrasonice generate în urma testelor efectuate pe teren în aer liber dispuse. Pentru acest array MEMS cu configurația geometrică din **figura 1**, s-a reprezentat răspunsul (funcția de transfer) în spațiul numărului de undă k (rad/m), pentru domeniul de frecvențe de interes (0.1 - 200 Hz) (**figura 2**). Scala de culori corespunde valorilor descrescătoare ale densității de putere, în dB (alb – pentru valoarea cea mai mare), și este o măsură a reducerii coerenței semnalului în banda de frecvență analizată.



Figura 1. Configurația array-ului MEMS **Figura 2**. Răspunsul array-ului MEMS Capacitatea unui array de a distinge diverse semnale infrasonice caracterizate de valori diferite ale numărului de undă poate fi estimată folosind criteriul "3-dB drop" (*Johnson şi Dudgeon 1993*, *Wang 2002*), care calculează numerele de undă minim și maxim "rezolvabile" de către array (k_{max} și k_{min}). În urma aplicării metodei *Wang 2002*, s-a obținut graficul din **figura 3**, în coordonate frecvență-viteză; aria cuprinsă între cele două linii paralele definește banda de număr de undă a array-ului. Se observă că pentru această configurație de array, semnalele cu viteze acustice (limitele cu linii albastre, cu roșu – viteza efectivă la suprafață), sunt "rezolvabile" la frecvențe de peste 100 Hz.



Figura 3. Banda de număr de undă pentru array-ul MEMS

Pentru prelucrarea datelor de infrasunete înregistrate de array-ul MEMS și detectarea semnalelor utile s-a folosit metoda de corelare încrucișată a formelor de undă, respectiv algoritmul PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation – corelare multi-canal progresivă (*Cansi, 1995*). 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. Principalii parametri de propagare asociați fiecărei detecții obținute prin aplicarea algoritmului PMCC sunt: numărul de senzori care definesc sub-array-urile considerate în calcul, consistența, viteza undei și azimutul acesteia. Pentru prelucrarea și analiza datelor acustice înregistrate de array, s-a folosit 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.

În **tabelul 1** este prezentat setul de configurații folosite în DTK-GPMCC pentru detectarea din înregistrările MEMS a semnalelor infrasonice de interes, generate prin testele efectuate pe teren.

Tabelul 1. Configurațiile DTK-GPMCC (Subnets – numărul de subrețele; Fmin – frecvența de centru minimă; Fax – frecvența de centru maximă; Nb bands – număr de benzi de frecvență folosite la filtrarea semnalului (variație liniară sau logaritmică); Wlength – lungimea ferestrei de timp (variație liniară sau logaritmică cu frecvența))

	Subnet s	Fmi n (Hz)	Fma x (Hz)	Nb		WLength (s)			
Nr. config.				ba Li	nds Lo	Cs t	1/f fro	f to	Reprezentarea grafică a benzilor de frecvență
		(112)	(112)	n	g	Ľ	m	10	

1	56	1	90	30		30			
2	56	1	90		30	30			Tergancy Bench Tergancy Bench
3	56	1	90		30		200	1 0	
4	56	1	90	30			200	1 0	
5	56	1	90		30		100	1 0	
6	56	1	90	30			100	1 0	Treasesy hands

7	56	1	90	30		20	
8	56	1	90		30	20	
9	56	1	90	20		30	
10	56	1	90	20		30	Tensery facels Property facels Propert

4. Rezultatele prelucrării datelor

Rezultatele obținute în urma aplicării celor 10 configurații DTK-GPMCC din **tabelul 1** pentru prelucrarea datelor înregistrate cu array-ul MEMS sunt prezentate în **tabelul 2**:

- Panoul grafic al detecțiilor (timp/frecvență/azimut invers) (DTK-GPMCC)
- Diagramele de detectabilitate a detecțiilor infrasonice (DTK-DIVA)

Tabelul 2. Rezultatele prelucrării datelor înregistrate cu array-ul MEMS

Nr.	DTK CDMCC	DTK DIVA
config.	DIK-GIMCC	DIK-DIVA





Se observă că există detecții care pot fi asociate cu cele 11 evenimente investigate (testele efectuate în teren), ale căror ore aproximative de producere sunt date în **tabelul 3**. Totuși, din cauza distanței mici dintre senzorii înregistratori (între 0.11 și 0.67 m) și ratei insufiente de eșantionare a datelor achiziționate, direcția de sosire (azimutului invers) a semnalului infrasonic nu a putut fi estimată cu precizie, existând variații mari atât între evenimente cât și între configurațiile de calcul.

Nr. ev.	Data	Ora UTC	Ora locală	Tip sursă
1	12/06/2021	07:49	10:49	cartuş
2	12/06/2021	07:53	10:53	petardă
3	12/06/2021	08:01	11:01	cartuş
4	12/06/2021	08:09	11:09	petardă
5	12/06/2021	08:30	11:30	petardă
6	12/06/2021	08:31	11:31	petardă
7	12/06/2021	08:33	11:33	3 petarde
8	12/06/2021	08:35	11:35	petardă
9	12/06/2021	08:53	11:53	petardă
10	12/06/2021	08:54	11:54	petardă
11	12/06/2021	08:57	11:57	petardă

Tabelul 3. Evenimentele investigate (testele efectuate în teren)

În **figura 4** este dat un exemplu de asociere e detecțiilor cu evenimentele din **tabelul 3**. Această asociere s-a făcut pe baza numărului evenimentului. S-au folosit rezultatele obținute în urma aplicării configurației 6 din **tabelul 1**.



Figura 4. Exemplu de asociere e detecțiilor cu evenimentele din **tabelul 3**. Sus - diagrama de detectabilitate a detecțiilor infrasonice (DTK-DIVA); jos – Panoul grafic al detecțiilor (DTK-GPMCC)

5. Sursele de interes și semnăturile lor acustice

Pentru o cât mai bună înțelegere a informațiilor acustice utile în aplicațiile tactice, este importantă investigarea caracteristicilor surselor de interes. Astfel, pentru optimizarea sistemelor de detecție a semnalelor, este necesară cunoașterea distribuția spectrală de energie acustică generată de fiecare tip de sursă precum și semnătura ei acustică.

Mai jos sunt prezentate spectrogramele energiei acustice emise în cadrul testelor efectuate pe teren, precm și principalele caracteristici ale formelor de undă infrasonice asociate evenimentelor studiate.

În **figura 5** este prezentată spectrograma normalizată a semnalului continuu (pentru toată durata testelor) înregistrat de punctul GUN1.BDF; evenimentele sunt marcate în spectrogramă prin numărul lor din **tabelul 3**. Se observă prezența energiei la frecvențe mari (peste 50 Hz).



Figura 5. Spectrograma semnalului continuu (pentru toată durata testelor) înregistrat de punctul GUN1.BDF

În continuare sunt prezentate spectrogramele normalizate a semnalului acustic asociat fiecărui a dintre cele 11 evenimente (**figura 6**); s-au folosit înregistrările punctului GUN1.BDF.







6

08:01:55

08:09:10

1 1

08:01:45 08:01:50

1 1 1 0

08:01:50

Time (hr:min:sec)

Time (hr:min:sec)

.13

0

08:02:00

08:02:00

3

2



Time (hr:min:sec)

08:09:00

4

08:08:50

10-

0 08:01:32.74

Ċ.

1000000 . 0. -1000000 08:01:40

ï

08:01:40

GUN1/BDF 2021Jun12 08:29:50.9 window-length 1.5 overlap 1.4



5

6

7







Figura 6. Spectrogramele normalizate individuale pentru fiecare dintre cele 11 evenimente din tabelul 3

Din analiza celor 11 spectrograme individuale de mai sus, se observă o semnătură acustică de bandă largă pentru frecvențe sub 50 Hz, cu un semnal puternic sub 10 Hz (domeniul infrasonic tradițional), dar și peste în unele cazuri, când probabil explozia a fost mai puternică.

Ca urmare a conținutului important de energie spectrală la frecvențe joase, se poate presupune că, în anumite condiții atmosferice favorabile, semnalele infrasonice emise de aceste surse pot fi detectabile pe distanțe mult mai mari decât în cazul de față.

Bibliografie

• Cansi Y. (1995), An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. Geophys Res Lett 22:1021–1024

• Johnson, D. H. and D. E. Dudgeon (1993), Array signal processing, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice- Hall Inc., 512 pp

• McComas, S. L., M. E. Pace, H. Diaz Alvarez, C. Simpson, and M. H. McKenna. 2016. Persistent monitoring of urban infrasound phenomenology. Report 2: Investigation of structural infrasound signals in an urban environment. ERDC/GSL TR-15-5. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center

• McKenna, M. H., R. G. Gibson, B. E. Walker, J. McKenna, N. W. Winslow, and A. S. Kofford (2012), Topographic effects on infrasound propagation. J. Acoust. Soc. Am. 131:35-46

• Stubbs, C., Brenner, M., Bildsten, L., Dimotakis, P., Flatte, S., Goodman, J., Hearing, B., Max, C., Schwitters, R., & Tonry, J. (2005), "Tactical Infrasound." The MITRE Corporation, JASON group, Technical Report JSR-03-520. McLean, Virginia

• Wang, J. (2002), A scheme for initial beam deployment for the International Monitoring System arrays. PAGEOPH, 159, 1005-1020