



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

1.2 - Elaborarea si testarea in laborator si in situ a unor modele experimentale.

- Sisteme utilizate pentru identificare și localizare a poziției gurilor de foc de calibru mare
- Valoarea adăugată a tehnologiei infrasonice pentru monitorizarea la distanță a exploziilor comparativ cu alte tehnologii
- Algoritmi privind determinarea locației infrasonice pentru gurile de foc și evenimente naturale
- Elaborare și testare în laborator și în situ a unor modele experimentale
- Rezultate si modul de diseminare a rezultatelor
- Gradul de realizarea a obiectivelor
- Bibliografie
-

1. ELABORAREA SI TESTAREA IN LABORATOR SI IN SITU A UNOR MODELE EXPERIMENTALE.

2.

1.1 SISTEME UTILIZATE PENTRU IDENTIFICARE ȘI LOCALIZARE A POZIȚIEI GURILOR DE FOC DE CALIBRU MIC

1.1.1 PILAR

Unul dintre cele mai populare produse din portofoliu este PILAR și are la bază cerințe emise în timpul conflictului din Bosnia, în 1995, pentru detecția armelor cu calibru mic [**Error! Reference source not found.**].

Ultima versiune, PILAR MKII-w nu doar că localizează 3D punctul de unde s-a tras, dar afișează și traiectoria glonțului. În varianta statică, cu fixare pe pământ, sistemul asigură o precizie de 2^0 a direcției față de Nord, de 3^0 în elevație și de $\pm 20\%$ pentru distanță, până la 1000 m.

1.1.2 SEDA

SEDA este sistemul de detecție propus de ASELSAN, o companie din Turcia, pentru a asigura detecția proiectilelor supersonice [1]. Afișarea datelor se realizează pe un display, având ca background harta geografică a locului de operare.

Performanțele sistemului se descriu în funcție de destinație, astfel:

a) Varianta statică, cu fixare pe pământ (ASELSAN SEDA-S) și varianta cu fixare pe un vehicul (ASELSAN SEDA-V)

1.1.3 Boomerang

Varianta Boomerang Warrior-X este destinată luptătorilor, compactitatea sa asigurându-i o masă mică. Este prevăzută cu un display pe care se poate vizualiza azimutul, elevația, distanța și localizarea GPS a trăgătorului inamic, precum și cu o cască audio care transmite mesaje de alertă.

Prevăzut cu software de compensare a mișcării, permite utilizarea din picioare, îngenuncheat, culcat sau din alergare.

1.1.4 ASLS

Produsul se distinge prin cele 8 microfoane ce asigură o acoperire de 360^0 . Pe pagina de prezentare a producătorului sunt oferite doar câteva caracteristici, fără detalii cu privire la performanțe: -poate fi integrat pe toate tipurile de vehicule;- comunicație wireless cu unitatea de control și display, ceea ce asigură o instalare ușoară;

1.1.5 EARS

Cel mai mic și compact dispozitiv ce utilizează senzori acustici pentru a identifica poziția trăgătorilor de infanterie este cel denumit EARS Gunshot Localization System produs de cei de la QinetiQ North America. Acesta se află în dotarea Forțelor Armate ale SUA și a altor 12 state, fiind testat cu succes în condiții specifice teatrelor de război din Irak, Afganistan, dar și în misiuni specifice de securitate națională [4]. Sistemul fix poate fi utilizat pentru localizarea loviturile trase, pentru planificarea unei rute de evacuare sau a unui plan de atac în cooperare cu alte sistem (**Error! Reference source not found.**).

1.1.6 RedOwl

RedOwl (acronim de la Robot Enhanced Detection Outpost with Lasers) produs de iRobot este un echipament care se poate monta pe produsul PackBot. Acest echipament, rezultat al colaborării cu

Centrul de Fonică al Universității din Boston, folosește, pe lângă senzori acustici, camere de zi și pentru niveluri reduse de lumină, senzori termali, telemetru laser, poziționare GPS a trăgătorului ostil, precum și un pointer laser pentru marcarea poziției de tragere a acestuia. În testele din poligon, RedOwl a avut o rată de succes de 94% în localizarea armelor M-16 și AK-47, cu care s-au efectuat trageri, și care erau poziționate la distanțe mai mari de 100 m.

Dezavantajul soluției este dat de lipsa abilității de a distinge tragerile ostile de cele ale trupelor proprii, robotul comportându-se haotic și marcând cu laserul inclusiv trăgătorii proprii [6].

1.2 SISTEME UTILIZATE PENTRU IDENTIFICARE ȘI LOCALIZARE A POZIȚIEI GURILOR DE FOC DE CALIBRU MARE

1.2.1 HALO

HALO (Hostile Artillery Locating System) este un sistem produs de LEONARDO Land&Naval Defence Electronics, aflat în serviciul armatei britanice, canadiene și marinei americane [4]. Având implementate tehnologii de detecție bazate pe acustică, HALO are rolul de a identifica poziția artileriei inamice și de a stabili locul de unde se trage

HALO utilizează senzori pentru temperatură și pentru direcția și viteza vântului și o bază de date digitală a terenului pentru a determina efectele factorilor climatici asupra modului de propagare a sunetului.

Precizia HALO este de 50÷100 m pentru distanțe de până la 10 km. În mediul operațional, HALO a demonstrat localizarea artileriei adverse la distanțe de până la 56 km și că a acoperit arii de aproximativ 2000 km². De asemenea, poate fi utilizat în zone topografice diferite și poate asigura identificarea simultană a mai multor poziții de tragere.

1.2.2 BACCARA / SL2A

BACCARA este un prototip dezvoltat de Thales Underwater Systems având ca referință cerințele operaționale stabilite de armata franceză [8]. Ulterior, sistemul a fost omologat sub denumirea de Thales SL2A și a fost destinat să conlucreze cu sistemul radar COBRA.

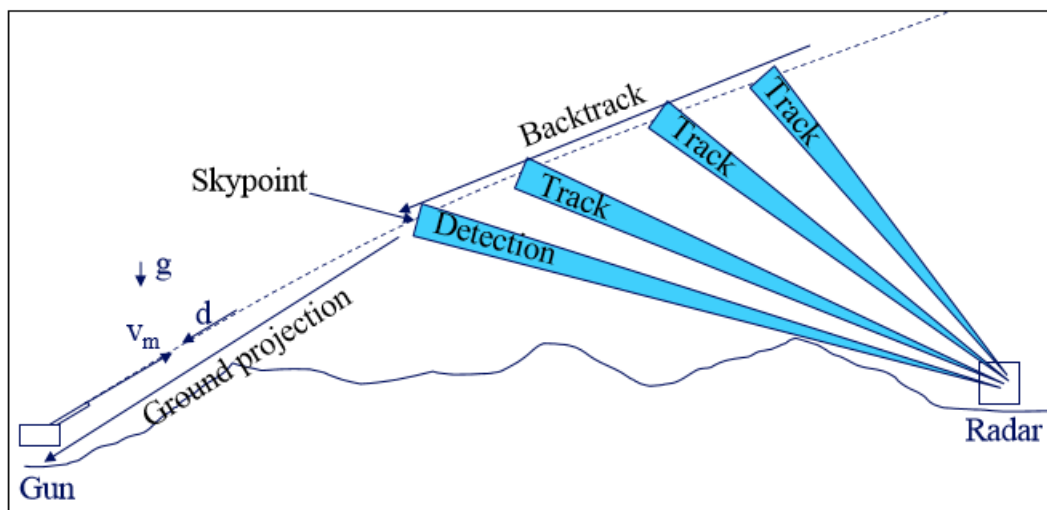
Sistemul este format dintr-un modul pentru senzori și un punct de comandă, a căror interconectare este realizată printr-o transmisie radio VHF NLOS până la 10 km (este posibilă și legătura prin fir). Când este detectat un eveniment de interes, modulul pentru senzori transmite informațiile sintetice (direcție, caracteristici semnal, tip amenințare etc.) către punctul de comandă care le afișează în mod automat pe ecran.

2 VALOAREA ADĂUGATĂ A TEHNOLOGIEI INFRASONICE PENTRU MONITORIZAREA LA DISTANȚĂ A EXPLOZIILOR COMPARATIV CU ALTE TEHNOLOGII

Monitorizarea la distanță a exploziilor și a gurilor de foc este o activitate avută în vedere odată cu apariția acestor evenimente și mijloace de luptă. Metodele de supraveghere au evoluat odată cu tehnologia, plecând de la abilitățile cercetașului bazate pe propriul auz și văz și ajungând până la aportul dat de sistemele optice și optoelectronice, de sistemele radar, de sistemele de supraveghere aeriană și de sistemele bazate pe tehnologii infrasonice.

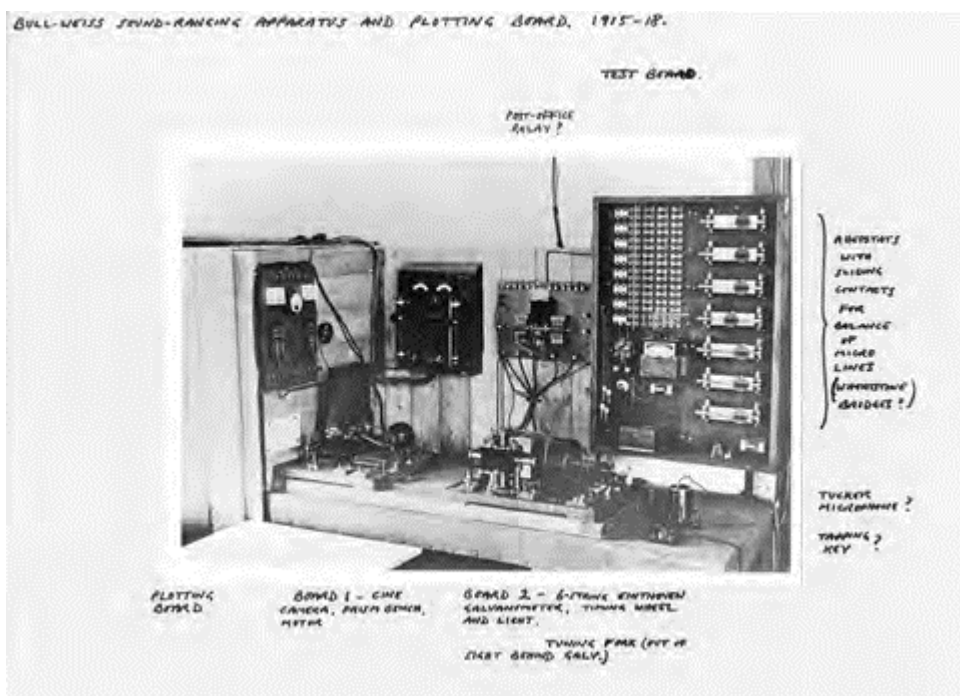
Sistemele optice și optoelectronice sunt utilizate pentru detecție până la linia orizontului (LOS) și au în vedere inclusiv descoperirea țințelor camuflate, pe baza termoviziunii sau a focului apărut la gura țeavii. Aceste sisteme prezintă limitări date de faptul că acoperă doar câmpul vizual până la LOS, astfel încât pentru detectarea artileriei grele, aflate dincolo de LOS, trebuie implicate structuri care să se apropie de liniile inamice, cu riscuri majore pentru cercetași.

Sistemele radar și-au dovedit eficacitatea, cu precădere, în detectarea mijloacelor aeriene. Plecând de la aceleași principii de funcționare, adaptarea lor pentru a localiza artileria adversă nu a adus rezultatele scontate. Proiectilele sunt asimilate unor obiecte zburătoare, iar odată identificate, pe baza traiectoriei se stabilește punctul de lansare (Figura).



Figură Proces aplicat de radar pentru detecție piesă de artilerie [10]

Ideea detectării locației pieselor de artilerie pe baza sunetelor a fost generată de profesorul de astronomie Charles Nordmann la începutul primului război mondial, în 1914. O istorie a evoluției și implicațiilor pe care a avut-o această tehnologie la acea vreme este expusă în [9], iar în Figura este prezentat un sistem din primul război mondial.



Figură Sistem de detecție pe bază de sunete din primul război mondial [9]

3 ALGORITMI PRIVIND DETERMINAREA LOCAȚIEI INFRASONICE PENTRU GURILE DE FOC ȘI EVENIMENTE NATURALE

Algoritmii privind determinarea locației infrasonice pentru gurile de foc și evenimente naturale au fost tratați în diferite lucrări, în funcție de obiective.

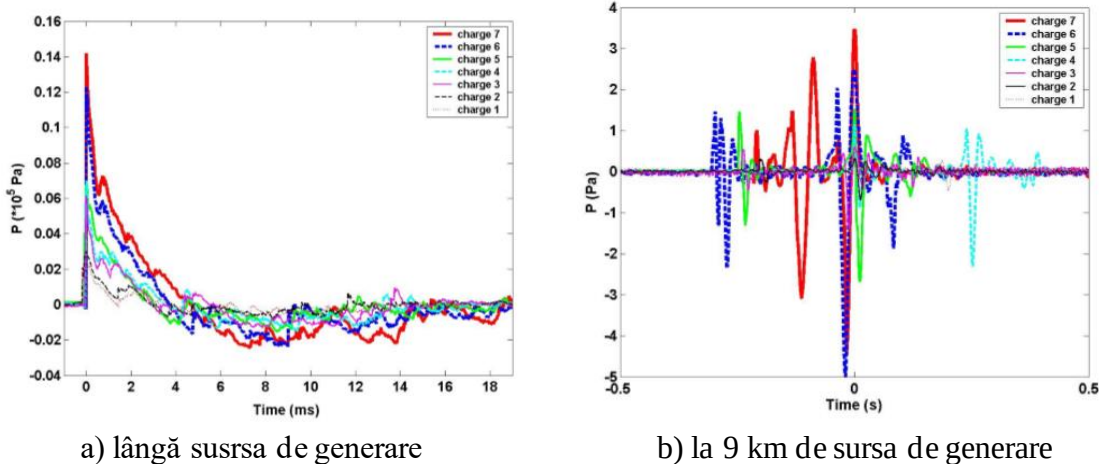
Pentru arme de calibru mic, detalii privind algoritmii se regăsesc în [11, 12] și în lucrările care prezintă sistemele existente. Preponderent, se pune accent pe identificarea, prelucrarea și utilizarea a două tipuri de sunete:

- sunet generat de unda de șoc a proiectilului care se deplasează pe traiectorie (definit în continuare ca sunet generat de proiectil)
- sunet generat de expansiunea gazelor rezultate în urma arderii încărcăturii de avârlire (definit în continuare ca sunet generat de încărcătură).

Unda sunetului generat de proiectil se distribuie sub forma unui con, ceea ce face să poată fi aplicată tehnologia localizării după zgomot doar în situația în care proiectilul trece prin apropierea senzorului de măsurare. Soluția este pretabilă pentru munițiile cu calibru mic, pentru cele cu calibru mare fiind valorificat doar zgomotul generat de încărcătură, a cărei viteză este egală cu viteza sunetului la propagarea prin aer. Pentru cel din urmă se vor prezenta o serie de algoritmi, fiind pretabile pentru toate evenimentele generatoare de zgomot (explozii, trageri, avalanșe, prăbușiri etc.).

Principalul parametru pe care se bazează determinarea locației infrasonice pentru gurile de foc și evenimente naturale este TOA (time of arrival – timpul la care se înregistrează evenimentul urmărit) și care, în situația existenței mai multor senzori de măsurare, generează diferențele de timp dintre momentele înregistrării la fiecare senzor, notate cu τ_{ij} .

Ca interval de măsurare, pentru alegerea corectă a senzorilor, în Figură 1 a) se prezintă valorile înregistrate lângă sursa de generare a zgomotului (obuziere cal. 105 mm și 155 mm, precum și aruncătoare de 120 mm), iar în Figură 1 b) se prezintă valorile înregistrate la 9 km distanță.

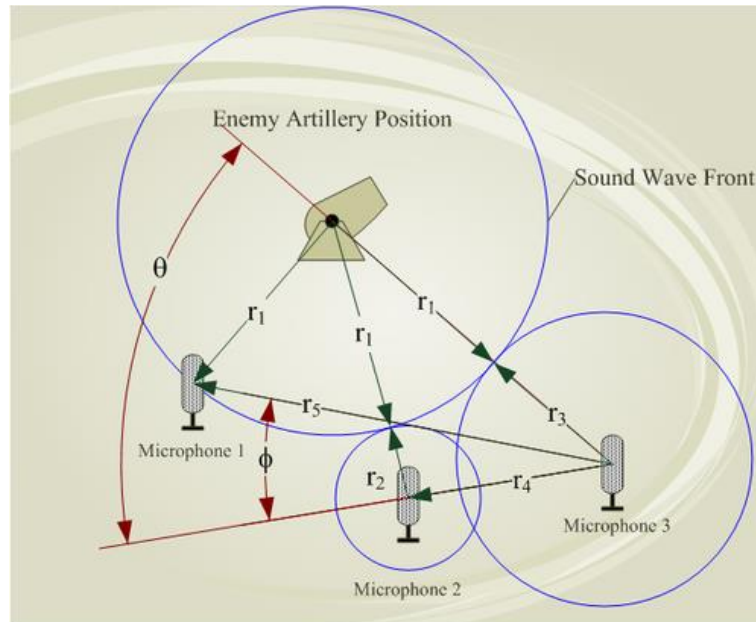


Figură 1 *Magnitudine presiune* [149]

a) Principiul multilateral

Principiul multilateral se bazează pe dispunerea a 3 microfoane sub formă de triunghi, la care se cunoaște mărimea laturilor și a unghiurilor.

Conform notațiilor din Figură 2 reiese că pentru configurația aleasă, se vor folosi valorile măsurate pentru r_5 (distanța dintre microfonul 1 și 3), r_4 (distanța dintre microfonul 2 și 3) și Θ (unghiul dat de laturile r_5 și r_4).



Figură 2 Exemplu pentru determinarea locației gurilor de foc [159]

De asemenea, se consideră că se măsoară la fiecare microfon timpii la care se identifică sunetul generat de încărcătură, rezultând τ_{12} și τ_{13} , implicit $r_2 = \tau_{12} \cdot c$ și $r_3 = \tau_{13} \cdot c$, unde c este viteza sunetului.

Pentru triunghiul format de microfonul 3, microfonul 2 și piesa de artilerie se scrie următoarea relație:

$$(r_1 + r_2)^2 = (r_1 + r_3)^2 + r_4^2 - 2 \cdot (r_1 + r_3) \cdot r_4 \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Pentru triunghiul format de microfonul 3, microfonul 1 și piesa de artilerie se scrie următoarea relație:

$$r_1^2 = (r_1 + r_3)^2 + r_5^2 - 2 \cdot (r_1 + r_3) \cdot r_5 \cdot \cos(\theta - \Phi) \quad (2)$$

Ecuatiile (1) și (2) formează un sistem de ecuații cu 2 necunoscute r_1 și Θ , exact cele de care este nevoie pentru a determina poziția gurilor de foc.

b) Soluția sferică

Principiul se bazează pe distribuția sferică a ultrasunetelor, prin măsurarea diferenței de timp la câte 2 senzori – i și j [10].

$$\tau_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x_j - x_s)^2 + (y_j - y_s)^2}}{c} \quad (3)$$

unde:

- τ_{ij} – diferența de timp dat de senzorul i și j ;
- c – viteza sunetului;
- $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ – coordonatele carteziene ale senzorilor;

- x_s, y_s – coordonatele carteziene ale gurii de foc.

x_s, y_s pot fi determinate prin rezolvarea ec. (3) pentru perechile de senzori de măsurare. În funcție de numărul de perechi de microfoane pot rezulta mai multe soluții, fiind necesară o analiză a distribuției soluției.

Pe lângă aceste metode, o provocare constă în stabilirea distincției între infrasunetele produse la lansarea proiectilului și cele generate de impactul / explozia proiectilului [16], precum și alte sunete provenite de la diverse alte surse. Trebuie stabilite tehnicile de procesare adecvate a semnalelor audio pentru a avea rezultatele scontate.

4 ELABORARE ȘI TESTARE ÎN LABORATOR ȘI ÎN SITU A UNOR MODELE EXPERIMENTALE

În contextul câmpului de luptă modern, informațiile privitoare la contextul poziționării adversarului sunt cruciale în conducerea acțiunilor militare în vederea neutralizării amenințărilor și a evitării pe cât posibil a situațiilor „blue-on-blue”. În acest sens, echipamentele ce oferă „situational awareness” au cunoscut o dezvoltare explozivă în ultimele decenii datorită dezvoltării electronicii și a echipamentelor de calcul minimalizate.

O primă etapă de cercetare în dezvoltarea unui echipament de detecție a poziției de tragere cu sisteme artileristice a constat în elaborarea unui experiment pentru detecția undelor de șoc produse de deplasarea supersonică a unui proiectil în aer și a zgomotului produs de expansiunea rapidă a gazelor rezultate în urma arderii pulberilor de azvârlire, obiectivul fiind caracterizarea în timp a fenomenului tragerii.

Pentru obținerea de date, s-a utilizat un sistem de două microfoane sensibile la unde de șoc, OEHLER 8836, dispuse la distanța de 1m între acestea pe un suport de protecție din oțel de blindaj.



Figura Sistemul de microfoane sensibile la unde de șoc

Sistemul este conectat printr-o serie de cabluri coaxiale la o placă de achiziției de date produsă de National Instruments NI 9233 cuplată printr-un placă de conexiune NI USB-9162 la un laptop.

Placa NI 9233 asigură o achiziției de date cu specific acustic simultan pe 4 canale și este capabilă să asigure o frecvență de eșantionare de 50kHz.

Achiziția și prelucrarea datelor s-a realizat cu ajutorul unei interfețe de control dezvoltată în mediul de programare MATLAB. Interfața permite și controlul caracteristicii de achiziție ale plăcii.

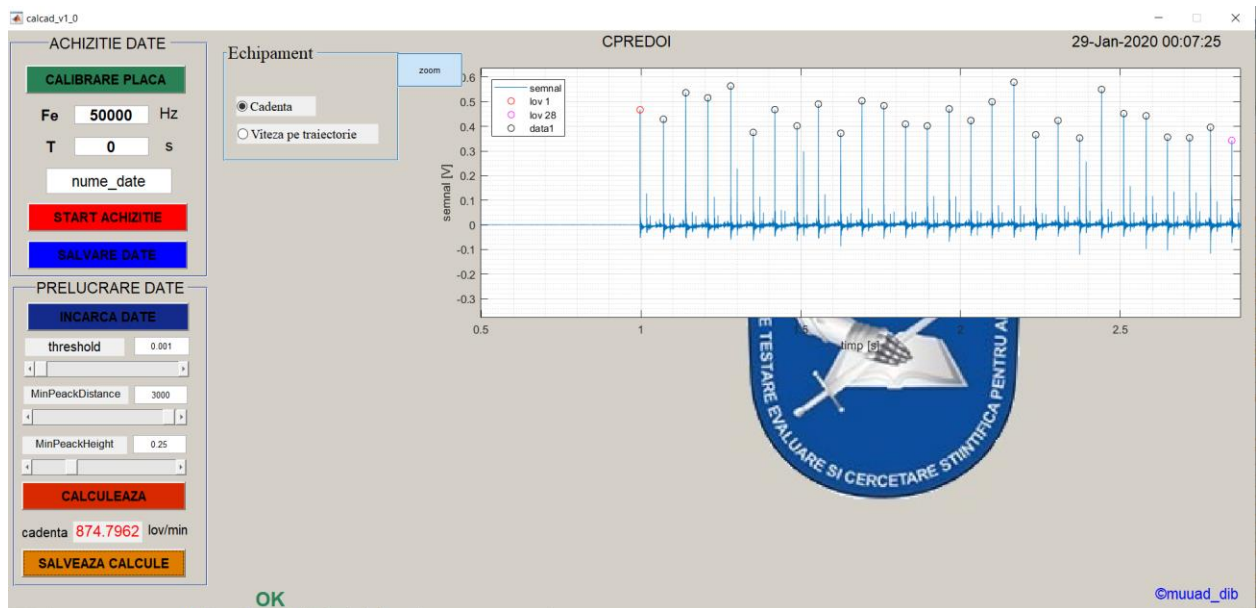


Figura Interfața de control a experimentului

În vederea realizării experimentului, sistemul a fost dispus la distanța de 2 metri în fața țevii, conform figurii de mai jos, tragerea s-a executat atât cu muniție 5,56x45 mm SS109 cât și cu muniție de manevră. Totodată, în fața armei a fost dispus și un cronograf pentru măsurarea vitezei glonțului la gura țevii.



Figura Realizarea experimentului

Loviturile detectate sunt prezentate în figura de mai jos, observându-se că la apariția undei de șoc, nivelul semnalului achiziționat devine sensibil mai mare decât semnalul generat de zgomotul de fond. În înregistrarea de mai jos au fost captate un număr de 10 lovituri trase.

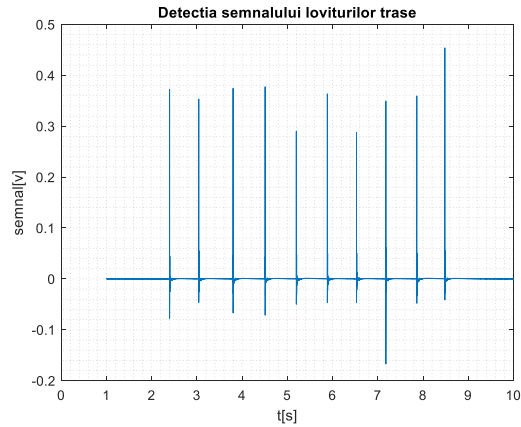


Figura *Semnalul înregistrat*

La o analiză atentă a semnalului achiziționat putem distinge unde de șoc ce apar ca urmare a fenomenului tragerii, acestea fiind unda de șoc generată de deplasarea supersonică a glonțului în aer, reflexia undei de șoc a glonțului, unda de șoc generată de expansiunea rapidă a gazelor de ardere generate de deflagrația pulberii de azvârlire și unda reflectată a acesteia.

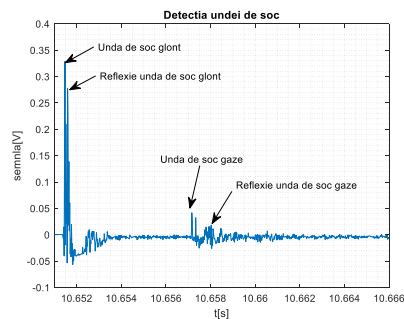


Figura *Caracterizarea unei unde de șoc*

Comparativ cu zgomotul tragerii înregistrat de un microfon și prezentat în [18], fenomenul tragerii detectat cu ajutorul microfoanelor sensibile la unde de șoc asigură o delimitare mai clară a undelor generate de gloanțe care se deplasează cu viteză supersonică, comparativ cu undele generate de expansiunea gazelor care se deplasează cu viteza sunetului, de asemenea nivelul semnalului este mult mai ridicat în cazul proiectilelor.

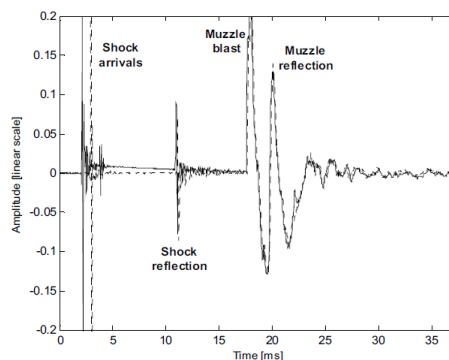


Figura Înregistrarea cu microfoane normale a tragerii cu un pistol

Dat fiind faptul că interfața asigură detecția loviturilor și momentul apariției acestora, s-a dezvoltat și un modul capabil să asigure determinarea cadenței de tragere a armei precum și a vitezei proiectilului în aer. Instrumentul matematic utilizat pentru detecția peak-urilor produse de apariția undei de șoc a glonțului și rejecția undelor reflectate și cele produse de gaze a fost implementarea în MATLAB a algoritmului propus în de către Girish Palshikar [19]. Pentru validarea algoritmului și a soluției implementate de măsurare a cadenței de tragere a unei arme s-au utilizat o serie de camere de filmare ultrarapidă capabile să surprindă momentul ieșirii glonțului din țeavă.



Figura 24 Experimentul de validare a sistemului dezvoltat

Rezultatele obținute prin calcul pe baza semnalului achiziționat cu microfoanele sensibile la unde de șoc demonstrează faptul că potrivirea dintre valoarea cadenței măsurată acustic și vizual are o eroare de 0.01 m/s.

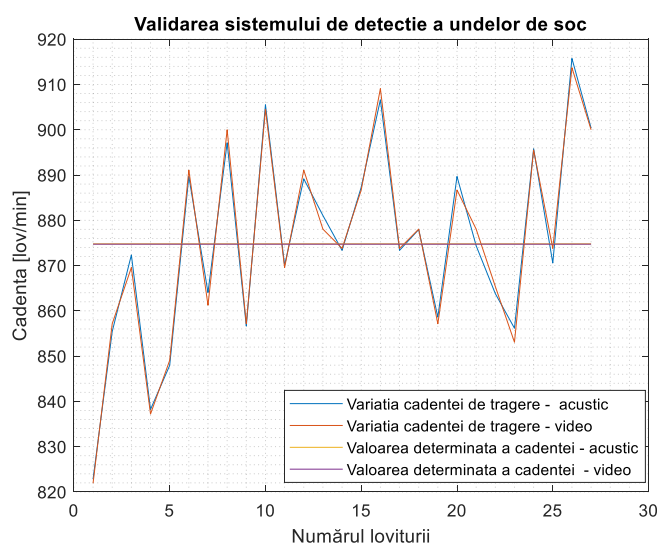


Figura 25 Validarea sistemului de măsurare a cadenței

În ceea ce privește determinarea vitezei glonțului pe traiectorie, din cauza frecvenței de eșantionare reduse, rezultatele obținute nu sunt concludente, variația așa de mare a vitezei unui glonț dintr-o serie de 150 nefiind plauzibilă. Pentru o măsurare exactă, frecvența de eșantionare a plăcii de achiziției de date ar trebui să fie de minim 1.5MHz, pentru a asigura precizia necesară.

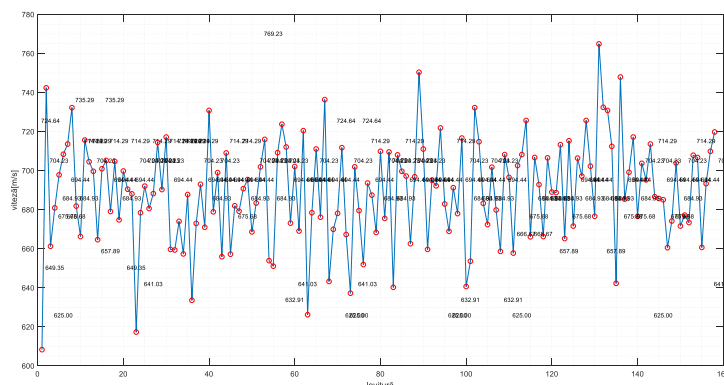


Figura *Determinarea vitezei glonțului folosind unde de șoc*

Rezultate si modul de diseminare a rezultatelor

- Prezentarea unui prototip de
- Raport de cercetare privind evaluarea valorii adăugate a tehnologiei infrasonetelor
- 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.

L1.2: Raport privind evaluarea valorii adăugate a tehnologiei infrasonetelor pentru monitorizarea la distanță a exploziilor comparativ cu alte tehnologii

BIBLIOGRAFIE

1. SEDA Gunshot Detection System, ASELSAN Integrated Security Systems, Technical paper, https://www.aselsan.com.tr/KNATS_Gunshot_Detection_System_8786.pdf
2. Boomerang Gunshot Detection, Raytheon Intelligence & Space, Approved for Public Release. Public release # 20-S-1722, Approved 07/24/2020
3. https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/c4i_systems/reconnaissance_and_sensor_systems/asls_akustisches_schuetzen_lokalisierungssystem/index.php
4. <http://www.qinetiq.com/en-us/what-we-do/services-and-products/ears-gunshot-localization-systems>

5. http://www.qinetiq-na.com/wp-content/uploads/EARS_11x17_Updated_Brochure_2019.pdf
6. Nicholas Grossman, *Drones terrorism and asymmetric warfare and the threat to global security*, 2018, i.b.tauris & co. ltd.
7. Hostile Artillery Locating System, Optronics Systems, LEONARDO Land&Naval Defence Electronics, Technical paper, www.aselsan.com
8. Lemer, A.; Ywanne, F. (2006) Acoustic/Seismic Ground Sensors for Detection, Localization and Classification on the Battlefield. In *Battlefield Acoustic Sensing for ISR Applications* (pp. 17-1 – 17-12). Meeting Proceedings RTO-MP-SET-107, Paper 17. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
9. Richard Daniel Costley Jr., Battlefield Acoustics in the First World War: Artillery Location, Acoustical Society of America, Volume 16, issue 2, Summer 2020, <https://doi.org/10.1121/AT.2020.16.2.31>.
10. Stephen A Harman, Vincent P Calloway, Andrew Hume, Dean Beale, *Sensor Network Performance Modelling for Weapon Locating, Capabilities of Acoustics in Air-Ground and Maritime Reconnaissance, Target Classification and Identification*, RTO SET Symposium held in Lerici, Italy, 26-28 April 2004, and published in RTO-MP-SET-079
11. Andrea Simone Pinna, Shooter Localization in Wireless Acoustic Sensor Networks: experiments, design and algorithm implementation on a centralized gateway, Master Degree Thesis, University of Pisa, April 2015.
12. Mäkinen, T., Pertilä, P. & Auranen, P. 2009. Supersonic bullet state estimation using particle filtering. In: Ming, I.S. (ed.). Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications, ICSIP, Kuala Lumpur, Malaysia, 18-19 November 2009.
13. <https://www.saab.com/products/arthur>
14. P. Naza, J. Bouguereaub, A. Lemerc, F. Ywannec, Acoustic Detection and Localization of Artillery Guns, Unattended Ground Sensor Technologies and Applications VII, edited by Edward M. Carapezza, Proceedings of SPIE Vol. 5796 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) · 0277-786X/05/\$15 · doi: 10.1117/12.607005.
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Artillery_sound_ranging
16. Hohil, M.E.; Desai, S.; Morcos, A. (2006) Classifying Launch/Impact Events of Mortar and Artillery Rounds Utilizing DWT Derived Features and Feedforward Neural Networks. In *Battlefield Acoustic Sensing for ISR Applications* (pp. 25-1 – 25-14). Meeting Proceedings RTO-MP-SET-107, Paper 25. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
17. Maher, R.C., (2007), Acoustical characterization of gunshots, Signal Processing Applications for Public Security and Forensics, 2007. SAFE '07.
18. Palshikar, G.K., Simple algorithms for peak detection in time-series, 2009.