

الخواص الصوتية للقناصة وكشف طاقته النبضية

د. شحادة الموسى *

م. مسعود علي **

(تاريخ الإيداع 2022/8/11 . قبل للنشر في 2023/1/16)

□ ملخص □

يعالج هذا البحث القضايا العملية والنظرية التي واجهتنا في تحليل التسجيلات الصوتية لطلقات نارية، ويمكن أن توفر هذه التسجيلات معلومات حول سرعة ومسار القذيفة ، والموقع التقديري لمطلق النار، وفي بعض الحالات تحدد نوع السلاح الناري والذخيرة المستخدمة. ومع ذلك ، عادةً ما تحتوي التسجيلات الصوتية للطلقات النارية على ضوضاء خلفية، وصدى بسبب انعكاس صوت الطلقات وانحرافها حول الأسطح القريبة ، وقد تحد هذه التأثيرات من موثوقية التقديرات الصوتية.

تُستخدم التسجيلات في اكتشاف عن الأصوات النبضية (الاندفاعية) ، التي تتطلبها أنظمة الكشف عن القناصة . ويجب على هذه الأنظمة أن تكتشف الطلقات النارية، وتتعرف عليها . فالهدف الرئيسي من هذا البحث هو الكشف عن الأصوات الاندفاعية التي تسببها الطلقات النارية والتعرف عليها. لذلك يتم فحص صوت الطلقات النارية لهذا الهدف. تتميز الطرائق المطورة بمعدلات كشف أعلى، ومعدلات إنذار كاذبة منخفضة مقارنة بأنظمة الكشف عن الأصوات النبضية الأخرى . حيث تتعرف الخوارزمية المقترحة على الطلقة من بين نفس نوع الطلقات باحتمالية عالية. **الكلمات المفتاحية:** موجة الصدمة - انفجار الفوهة (الكمامة) - طلقة فوق صوتية - صوت اندفاعي - كشف طلقة نارية - التعرف على الطلقات - ضوضاء اندفاعية - صوت اندفاعي .

* أستاذ في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهمةك - جامعة البعث

** طالب دكتوراه في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهمةك - جامعة البعث

Acoustic properties of snipers and detection of its impulse energy

Dr. chehada Moussa *
Eng. Masoud Ali **

(Received 11/8/2022 . Accepted 16/1/2023)

□ ABSTRACT

This research addresses the practical and theoretical issues encountered in the analysis of sound recordings of gunshots. These recordings can provide information about the velocity and trajectory of the projectile, the estimated location of the shooter, and in some cases identify the type of firearm and ammunition used. However, sound recordings of gunshots usually contain background noise, echoes due to the sound of shots reflecting and diffracting around nearby surfaces, and these effects may limit the reliability of acoustic estimates. The recordings are used to detect impulse sounds, which are required by sniper detection systems. These systems must detect and recognize gunshots. The main objective of this research is to detect and identify impulsive sounds caused by gunshots. So, the sound of gunshots is checked for this target. The developed methods have higher detection rates and lower false alarm rates compared to other pulsed sound detection systems. Where the proposed algorithm recognizes the bullet among the same type of bullets with high probability.

Keywords : Shock wave - Muzzle Blast - Supersonic Projectile - impulsive sound - gunshot detection- gunshot recognition - impulsive noise, impulsive sound.

* Professor in the Department of Electronics and Communications , Engineering - FMEE - Al-Baath University.

** PhD student in the Department of Electronics and Communications , Engineering - FMEE - Al-Baath University.

1 . مقدمة

تعتبر الأعمال الإجرامية والإرهابية والعسكرية التي تتطوي على أسلحة نارية مصدر قلق متزايد للشرطة والجنود والجمهور . تتوفر مجموعة متنوعة من أنظمة الكشف والتصنيف الصوتية التجارية والتجريبية المصممة لأصوات الطلقات. يمكن أن تهدف هذه الأنظمة إلى اكتشاف "توقيعات الطلقات النارية" الصوتية ، لتصنيف أو تحديد أنواع معينة من الأسلحة النارية ، واكتشاف القناصين وتحديد مواقعهم. عادةً ما تكون الدرجة التي يمكن أن يحقق بها النظام أداءً مرضياً محدودة بالافتراضات المطلوبة لتقدير سلوك السلاح الناري و / أو المقذوف بناءً على الأدلة الصوتية المتاحة.

يتطلب تقييم أنظمة الكشف عن الطلقات الصوتية فهماً شاملاً لخصائص أصوات طلقات الرصاص، وأهمية انعكاس موجة الصوت وامتصاصها، وانحرافها عن الأرض والمباني والأشياء القريبة الأخرى [13].

2 - الهدف من البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أنظمة الكشف عن الطلقات النارية الصوتية، وذلك من خلال عرض واضح لخصائص صوتيات الطلقات، وأهمية انعكاس موجاتها الصوتية، وامتصاصها وانحرافها عن الأرض والمباني والأشياء القريبة الأخرى. كما تهدف إلى الكشف عن توقيعات الطلقات النارية الصوتية، لتصنيف وتحديد أنواع معينة من الأسلحة النارية (القناصة)، واكتشاف القناصين وتحديد مواقعهم استناداً إلى طاقة الموجة النبضية الصادرة من القناصة. وتقدير الدرجة التي يمكن أن يحقق بها النظام أداءً مرضياً محدودة بالافتراضات المطلوبة لتقدير سلوك السلاح الناري والمقذوف بناءً على الأدلة الصوتية المتاحة.

3 . طريقة إجراء البحث

ندرس أولاً الخصائص الصوتية لإطلاق النار، ومن ثم التمييز بين الصوت النبضي لإطلاق النار والضجيج المحيط، وبعدها يستفاد من طاقة النبضة لتحديد موقع مطلق النار

3 - 1 . أصوات إطلاق النار

سنتعرف أولاً على الأصوات الناتجة عن إطلاق النار ومن مسافات بعيدة عن مطلق النار

- صوت انفجار الفوهة Muzzle Blast

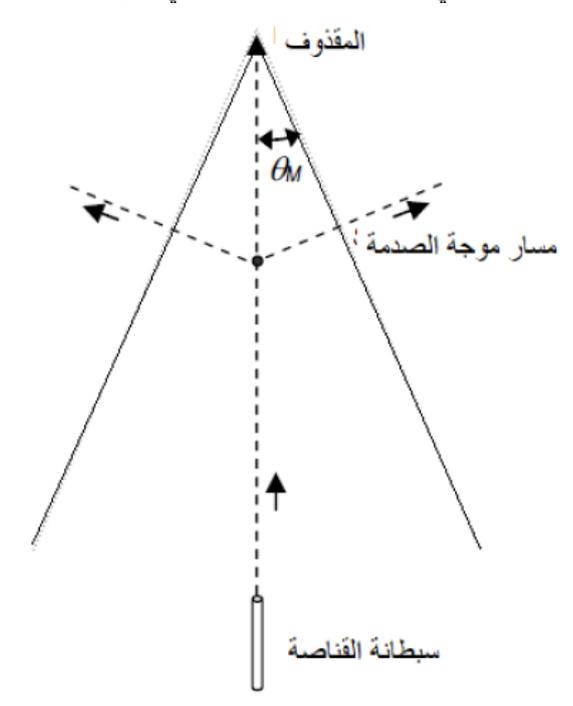
يستخدم السلاح الناري التقليدي عبوة ناسفة محصورة لدفع الرصاصة خارج فوهة البندقية. ينبعث صوت الانفجار من البندقية في جميع الاتجاهات ، ولكن يتم طرد غالبية الطاقة الصوتية في الاتجاه التي تشير إليه سبطانة البندقية [1-5]. يشار إلى موجة الصدمة المتفجرة والطاقة الصوتية المنبعثة من سبطانة البندقية باسم انفجار الفوهة ، وعادة ما تستمر لمدة تقل عن 3 مللي ثانية.

تنتشر الموجة الصوتية للانفجار عبر الهواء بسرعة الصوت (343 م / ث عند 20 درجة مئوية) ، وتتفاعل مع سطح الأرض المحيط والعقبات ودرجات الحرارة، وتدرجات الرياح في الهواء والانتشار الكروي والغلاف الجوي. إذا كان المستشعر التسجيل موجوداً بالقرب من السلاح الناري ، فإن الصوت المباشر لانفجار الفوهة هو الإشارة الصوتية الأساسية. من ناحية أخرى ، إذا كان المستشعر موجوداً على مسافة أكبر من السلاح الناري ، فقد يتم حجب مسار الصوت المباشر، وستظهر الإشارة المستقبلية تأثيرات انتشار وانعكاسات متعددة المسارات وأثر الصدى.

يمكن تجهيز بعض المسدسات والبنادق بكاتم صوتي لتقليل الصوت المسموع (وغالبًا الوميض المتفجر المرئي) لانفجار الفوهة لتقليل احتمالية الكشف و / أو منع تضرر سمع المستخدم، وبالتالي يجب أن تقبل أنظمة الكشف الصوتي عن الطلقات النارية التي تعتمد على انفجار الفوهة إمكانية استخدام الكاتم من قبل الأفراد المعنيين.

- موجة الصدمة الناتجة عن مقذوف أسرع من الصوت

بالإضافة إلى انفجار الفوهة ، يوجد مصدر ثاني لمعلومات الطلقات الصوتية، إذا كانت الرصاصة تنتقل بسرعة تفوق سرعة الصوت [3 ، 4 ، 6]. يؤدي مرور القذيفة الأسرع من الصوت عبر الهواء إلى إطلاق موجة صدمة صوتية acoustic shock wave تنتشر إلى الخارج من مسار المقذوف. تتوسع موجة الصدمة بشكل مخروطي خلف المقذوف ، مع انتشار مقدمة الموجة للخارج بسرعة الصوت. يحتوي مخروط موجة الصدمة الذي يتبع المقذوف على زاوية داخلية ، $\theta_M = \sin^{-1}(1/M)$ حيث $M = V / c$ هو رقم Mach (V هو سرعة المقذوف ، و c هي السرعة المحلية للصوت). يشار إلى θ_M بزاوية ماخ [1]. يظهر الشكل (1) الشكل الهندسي لانتشار موجة الصدمة في الهواء .



الشكل (1) : هندسة موجة الصدمة لمقذوفات تفوق سرعة الصوت.

تزداد سرعة الصوت (c) في الهواء بازدياد درجة الحرارة وفق العلاقة (1):

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (1)$$

حيث: T هي درجة حرارة الهواء بالدرجات المئوية، و $c_0 = 331 \text{ m / s}$ هي سرعة الصوت عند 0 درجة مئوية. لكل درجة مئوية زيادة في درجة الحرارة ، تزداد سرعة الصوت بنحو 0.61 م / ثا. إذا كان المقذوف يتحرك بشكل أسرع من سرعة الصوت ، فإن زاوية Mach تكون صغيرة، وتنتشر موجة الصدمة بشكل عمودي تقريباً على مسار المقذوف (الرصاصة). الرصاصة التي تتحرك أسرع قليلاً من

سرعة الصوت لها زاوية ماك تقترب من 90 درجة ، مما يعني أن موجة الصدمة تنتشر بشكل مواز لمسار المقذوف. علاوة على ذلك ، نظرًا لأن الرصاصة تتباطأ على طول المسار بسبب الاحتكاك مع الهواء، فإن زاوية Mach المقابلة تتوسع نطاقًا لأسفل.

لاستخدام خوارزمية الكشف عن الصوت المندفع (النبضي Impulse) يلزمنا نظام يتعرف على الطلقات النارية مكون من مرحلتين كما هو موضح بالشكل (2) :

(أ) كشف الصوت الاندفاعي

(ب) التعرف على طلقات نارية



الشكل (2) نظام الكشف عن الصوت المندفع والتعرف على الطلقات النارية

بعد اكتشاف الصوت المندفع ، تنتقل النافذة المكتشفة إلى مرحلة التعرف على الطلقات النارية. يعمل نظام الكشف عن الصوت المندفع طوال الوقت ، ويعمل نظام التعرف على الطلقات النارية بعد الكشف عنها. في الأعمال السابقة ، تم تحقيق معدلات عالية للكشف، والتعرف في بيئة صامتة ولكن في البيئات الصاخبة ، تكون هذه المعدلات منخفضة ومعدلات الإنذار الخاطئ مرتفعة [1]. في هذا البحث ، يتم تقليل تأثير الضوضاء ، لذلك يتم تحقيق معدلات اكتشاف عالية في البيئات الصاخبة. هذا يرجع أساسًا إلى صيغتنا الجديدة للطاقة للعثور على الأصوات المندفعة.

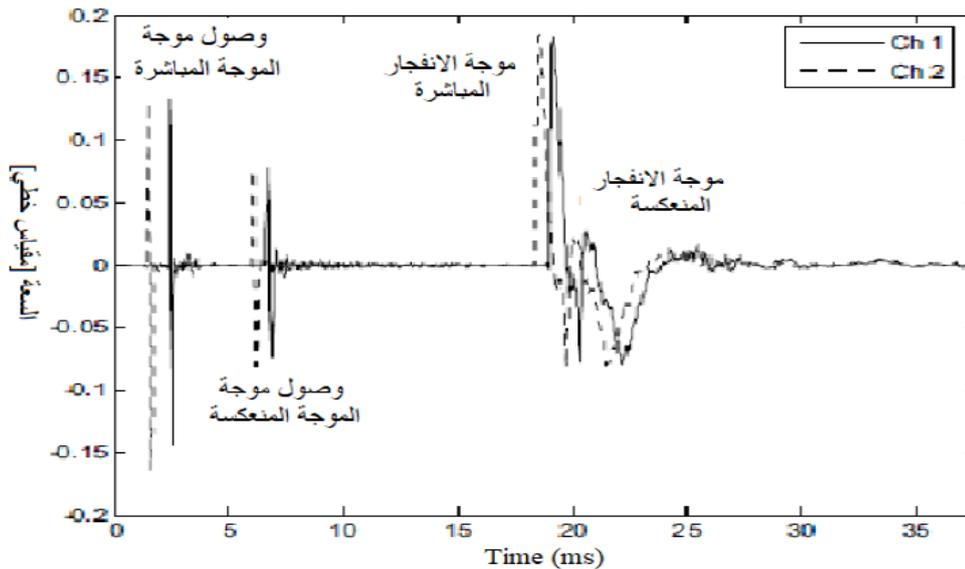
3 - 2 . تحليل تسجيلات إطلاق النار

الخصائص الصوتية للعديد من الطلقات النارية التمثيلية ذات المقذوفات الأسرع من الصوت موضحة في الأشكال (3 - 6) . التي تم الحصول عليها تجريبيا بالتعاون مع مركز الأبحاث ، باستخدام اثنين من المستشعرات عالية الجودة لتسجيل الصوت متعدد الاتجاهات، ومضخم مسبق، وتم تخزينها على شريط صوتي رقمي بدقة 16 بت ومعدل عينة 48 كيلو هرتز لكل قناة. تم تركيب المستشعرات على مسافة 1.6 متر فوق سطح الأرض رملية، يفصل بينهما 30 cm باتجاه مصدر اطلاق النار .

يوضح الشكل (3) البيانات الصوتية المسجلة لبندقية قناصة، تم إطلاقها أفقيًا باتجاه المستشعرات عن مسافة 100 متر تقريبًا. كانت سرعة المقذوف (V) للذخيرة المستخدمة حوالي 800m/s ، وسرعة الصوت (c) كانت 342 m/s عند حوالي 20 درجة مئوية. وكان رقم Mach الناتج هو $M = 2.34$ ، مما يعطي زاوية Mach 23 درجة.

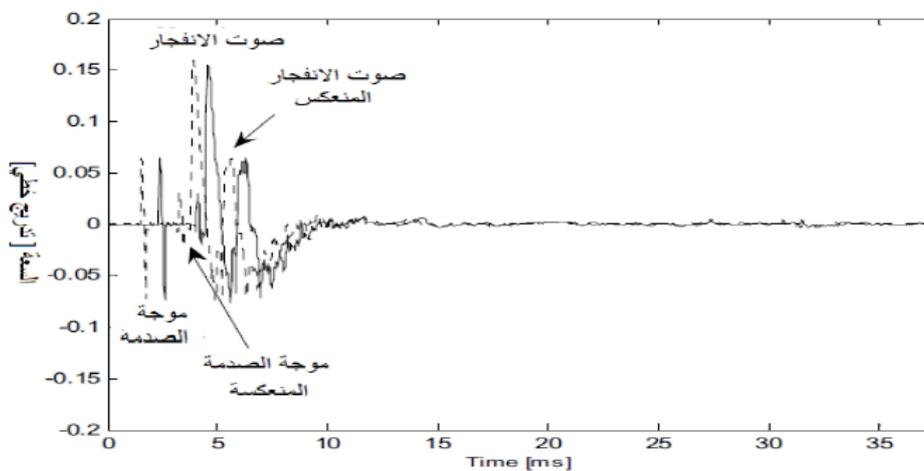
يظهر وصول الموجة الصدمية للرصاصة الأسرع من الصوت في الشكل (3) إلى المستشعر 2 ، ثم إلى المستشعر 1 ، مع تأخير زمني بين القنوات يتوافق مع الوقت اللازم لانتشار موجة الصدمة بسرعة الصوت من المستشعر الأول إلى الثاني. يصل مخروط موجة الصدمة الذي يتمدد خلف المقذوف إلى المستشعرات بسرعة نسبيًا

عندما يكون مسار المقذوف باتجاه المستشعرات لأن المقذوف يتحرك بسرعة تزيد عن (2.34) ضعف سرعة الصوت. الحدث المهم التالي هو وصول انعكاس موجة الصدمة من الأرض. يلاحظ أن الانعكاس ذو سعة أقل قليلاً بسبب امتصاص الأرض ومسار الانتشار الأطول الذي تأخذه الطاقة المنعكسة. بعد ذلك ، يصل التوقيع الصوتي لانفجار الفوهة إلى المستشعرات بعد انتشاره بسرعة الصوت من موضع السلاح الناري إلى المستشعرات. أخيراً ، يصل انعكاس انفجار الفوهة من الأرض إلى المستشعرات بتأخير يقابل مسار انتشار الانعكاس لأسفل وأعلى.



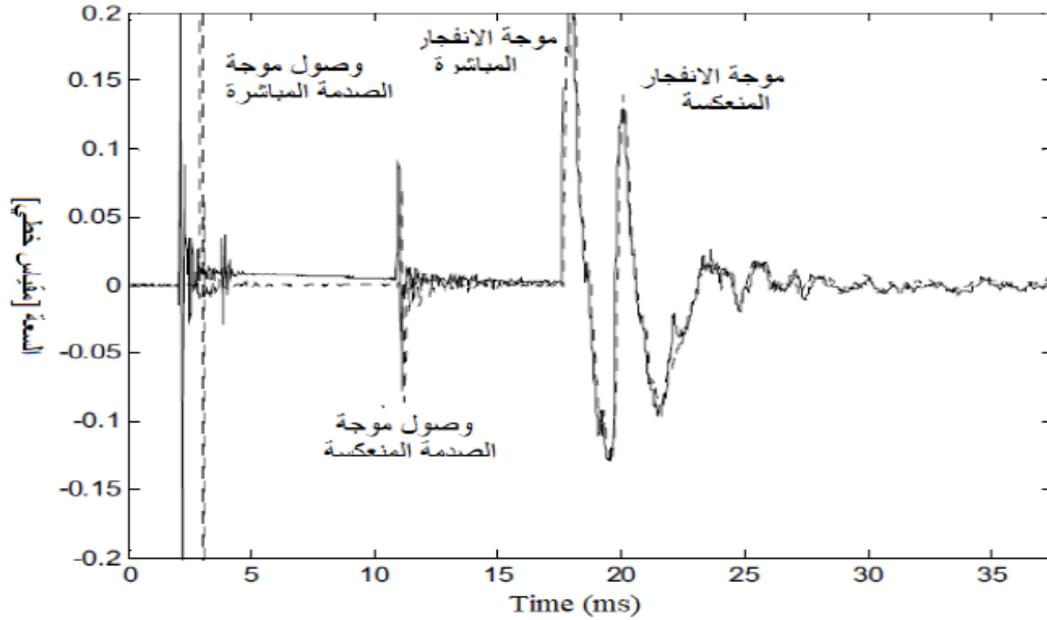
الشكل (3) : تسجيل طلق ناري ثنائي القناة مسار مائل نحو المستشعرين.

يظهر التسجيل الصوتي الناتج في الشكل (4) باستخدام نفس الذخيرة المستعملة سابقاً ، ولكن مسار الإطلاق عمودي على الخط الذي يربط المستشعرين ، ويمر بحوالي 8 أمتار من المستشعر 2. في هذه الحالة، يكون انتشار موجة الصدمة الخلفية للرصاص موازية بشكل أساسي لمسار انفجار الفوهة ، مما يؤدي إلى وصول أكثر تزامناً لصدمة الرصاص وتوقيعات الانفجار.



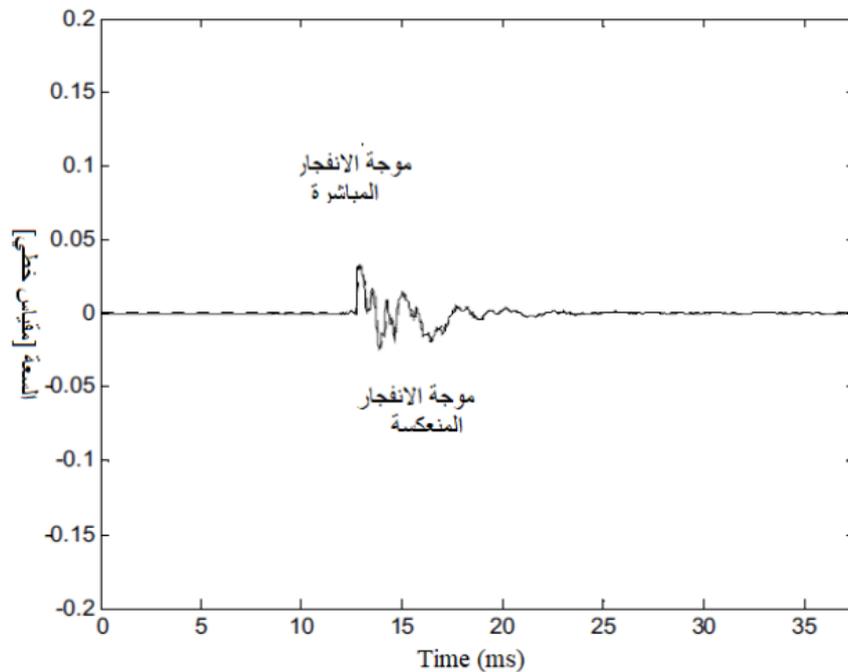
الشكل (4) : تسجيل طلق ناري ثنائي القناة، مسار عمودي ، إزاحة 8 أمتار.

كما يبين التسجيل الصوتي الناتج في الشكل (5) باستعمال نفس الذخيرة ومسار إطلاق النار متعامد مع الخط الذي يربط المستشعرين ، ولكن يمر المسار على بعد أقل من متر واحد من المستشعر 1. مرور الرصاصة قريبة جداً من المستشعرات تعطي موجة صدمة أولية قوية. يصل انعكاس موجة الصدمة في وقت واحد تقريباً إلى المستشعرين، لأن مسارات انعكاس الأرض لهذه الهندسة متطابقة تقريباً. وبالمثل ، يصل انفجار الفوهة في وقت واحد تقريباً إلى المستشعرين بسبب المسارات الصوتية المتزامنة.



الشكل (5) : تسجيل طلق ناري ثنائي القناة ، مسار عمودي ، إزاحة أقل من 1 متر .

يظهر الشكل (6) النتيجة عندما يتم توجيه فوهة البندقية بعيداً عن المستشعرين. في هذه الحالة ، لا يعترض مخروط موجة الصدمة المتوسع للقذيفة المستشعرين. أما اتجاه انفجار الفوهة واضح أيضاً: توقيع الفوهة أقل اتساعاً من اللقطات التي تم إجراؤها مع الفوهة التي تواجه المستشعرين.



الشكل (6): تسجيل إطلاق نار ثنائي القناة، مسار متعارض (فوهة موجهة بعيداً عن المستشعرين)

من مقارنة البيانات الصوتية المقاسة مع المراجع [1 - 6] نستنتج أنه يمكن استخدام إشارات المستشعر الرقمية بمعدل عينة 48 كيلو هرتز لكل قناة ، لإن الفاصل الزمني لأخذ العينات البالغ 20.8 ميكروثانية (1/48000) كافٍ لأغراض التصنيف والتحقق. ومع ذلك ، تتطلب أوقات الصعود والهبوط السريعة للغاية لموجة الصدمة معدلات أعلى لأخذ العينات وعرض نطاق إشارة للتوصيف الكامل.

3 - 3 . العوامل المؤثرة على صوت اطلاق النار

تخضع أصوات موجة الصدمة وانفجار الفوهة ، مثل غيرها من ظواهر الموجات الفيزيائية ، للانعكاس والتوهين والامتصاص والانكسار والحيود والتركيز وتعديلات الموجات الأخرى أثناء انتشارها. سيتلقى المستشعر أو أي جهاز استشعار صوتي آخر موضوع بالقرب من مصدر الصوت موجات ضغط صوتي تصل مباشرة من المصدر وموجات قادمة لاحقاً من اتجاهات أخرى بسبب الانعكاسات والتشتت. إذا لم يتم حساب وجود الانعكاسات وتأثيرات الانتشار الجوي بشكل صريح من خلال تصنيف الطلقات النارية أو نظام تحديد موقع القنص ، فيجب فحص أداء هذا النظام بعناية لتقييم موثوقيته، وفعاليته في الظروف الحقيقية.

فيما يلي ملخص للعديد من الظواهر الهامة لانتشار الصوت وانكساره والتأثيرات البيئية المهمة على أنظمة تحليل الطلقات النارية.

أ- أثر البيئة

قد يختلف انتشار الصوت في الهواء الطلق اختلافاً كبيراً على مسافات تصل إلى مئات الأمتار من المصدر بسبب الظروف الجوية المتغيرة مكانياً ، والانعراج حول الأشياء المعوقة ، والانعكاسات من الأرض والأسطح الأخرى. علاوة على ذلك ، قد يتأثر الانتشار الصوتي بالرياح، وتدرجات درجة الحرارة، وامتصاص الغلاف الجوي المعتمد على التردد. نظراً لأن الظروف البيئية المحددة ستختلف اختلافاً كبيراً من موقع إلى آخر ، فلا يمكن إنشاء نموذج رياضي واحد شامل قابل للتطبيق بشكل عام. وبالتالي ، فإن النماذج التجريبية مطلوبة عمومًا لمراعاة السلوك البيئي [7].

تقع الأصوات المسموعة العادية ضمن نطاق ضغط تم تصميمه جيداً باستخدام معادلات الموجات التفاضلية الخطية ، لكن موجات الصدمة التي تسببها المقذوفات الأسرع من الصوت تؤدي إلى سلوك غير خطي في الهواء. على الرغم من أنه من الممكن التنبؤ بالخصائص الصوتية لبيئة معينة باستخدام تقنيات رياضية قياسية ، إلا أن خصائص الامتصاص والتوهين والانعكاس للأشياء التي يواجهها الاضطراب الصوتي يجب أن تكون معروفة (أو تقدر بدقة) لكل من أنظمة الانتشار الخطية وغير الخطية.

تغطي الأصوات النموذجية المحمولة جواً نطاق التردد من أقل من 10 هرتز إلى أكثر من 40 كيلو هرتز. نظراً لأن $c = f \lambda$ ، قد تتراوح الأطوال الموجية الموجودة في الهواء من أكثر من 34 مترًا عند الترددات المنخفضة إلى أقل من 1 سم لأعلى اضطرابات الموجات فوق الصوتية. يعني هذا النطاق الضخم من الأطوال الموجية أن خصائص الانعراج والامتصاص ستختلف بشكل كبير اعتماداً على طيف مصدر الصوت.

يمكن أن تلعب درجة الحرارة والرطوبة النسبية دوراً مهماً في تحديد مستويات الصوت. عادة لا يتسبب هطول الأمطار (المطر أو الثلج أو الضباب) في إحداث تأثير كبير على مستويات الصوت ، على الرغم من أن هذه الظواهر تؤثر على تدرجات الرطوبة والرياح ودرجات الحرارة ، وتولد ضوضاء صوتية بسبب قطرات المطر أو الاضطرابات.

ب- أثر الرياح

إذا كان الهواء نفسه يتحرك بسبب الرياح ، فسيتم نقل الصوت المنتشر عبر الهواء في كتلة الهواء المتحركة. إذا كانت البندقية ثابتة ، فإن الموجات الصوتية لانفجار الفوهة ستنتبع بشكل كروي. وبالتالي ، فإن الحركة المكانية لجبهة موجة الانفجار تتكون من مجموع متجه لمتجه الصوت المتوسع كروياً ومتجه الرياح. وبالمثل ، شكل مخروط موجة الصدمة للمقذوفات الأسرع من الصوت ستتغير بفعل الرياح.

يمكن اعتبار تأثير الرياح بمثابة تحول في أصل انتشار الصوت. بعبارة أخرى ، فإن مقدمة الموجة التي يتم إطلاقها من المصدر تحملها الرياح أثناء انتشارها نحو المستقبل. يتم إزاحة مقدمة الموجة المنتشرة بشكل منهجي بسبب الرياح؛ بحيث يتم تغيير الموقع الظاهري لمصدر الصوت (أو مسار المقذوف) بحلول الوقت الذي تصل فيه إلى موضع المستقبل.

تكون حركة الرياح مصحوبة عموماً بتدرج للرياح ، وتكون سرعة الرياح عادةً أسرع في الارتفاع وأبطأ بالقرب من الأرض. والنتيجة هي أن الموجات الصوتية التي تنتشر عكس اتجاه الريح تتحني لأعلى وتلك التي تنتشر في اتجاه الريح تتحني لأسفل.

على الرغم من أن سرعات الرياح تمثل جزءاً صغيراً من سرعة الصوت ، إلا أن تغيير الرياح يتسبب في تغيير يعتمد على الاتجاه في سرعة الصوت ، وتحول تردد مماثل يشبه دوبلر.

ج- أثر درجة الحرارة

درجة حرارة الهواء في الغلاف الجوي ليست موحدة بشكل عام ، وكما يتضح من المعادلة (1) ، سيكون هناك اختلافات مكانية في سرعة الصوت (سرعة أعلى في الهواء الدافئ ، وسرعة أقل في الهواء البارد).

في النهار ، خاصة في أشهر الصيف ، غالباً ما يكون سطح الأرض أكثر دفئاً من الهواء العلوي. في هذه الحالة ، يميل انتشار الصوت إلى الانحناء لأعلى قليلاً بسبب التدرج الحراري: تنتشر مقدمة الموجة في الهواء الدافئ بالقرب من السطح بشكل أسرع من مقدمة الموجة في الهواء البارد الأعلى فوق الأرض. على العكس من ذلك ، في الشتاء أو في الليل عندما تكون درجة الحرارة بالقرب من الأرض أقل من درجة حرارة الهواء العلوي ، تميل الموجات الصوتية إلى الانحناء لأسفل.

يمكن أن تتسبب التأثيرات المجمعمة لتدرجات الرياح ودرجات الحرارة في أن تكون مستويات الصوت المقاسة على مسافة من المصدر مختلفة تمامًا عن التوقعات القائمة على الانتشار الهندسي واعتبارات امتصاص الغلاف الجوي وحدها. قد تكون هذه الاختلافات 20 ديسيبل أو أكثر على مسافات تصل إلى بضع مئات من الأمتار.

د - أثر سطح الأرض

ستواجه أصوات الطلقات النارية المنتشرة فوق الأرض توهينًا بفقد الطاقة الصوتية بسبب التشتت. وينتج عن الأرض الملساء والصلبة امتصاص أقل من الأسطح الخشنة مثل الغطاء النباتي. عادة ما تكون الترددات الأعلى (أطوال موجية أقصر) دائمًا أكثر توهينًا من الترددات المنخفضة. تظهر القياسات في مناطق الغابات أن الامتصاص والتشتت يمكن أن يحقق توهينًا كبيرًا. يمكن أن يكون هناك أيضًا توهين كبير من خلال التظليل الصوتي عندما يحجب عائق صلب "خط الرؤية" بين المصدر والمستشعر الصوتي.

هـ - أثر الرطوبة

تسبب الرطوبة النسبية للهواء امتصاص الصوت المعتمد على التردد بسبب الاسترخاء الحراري الجزئي. وجد أن التوهين يزداد بشكل رتيب مع زيادة التردد ، وهو أعظمي للرطوبة النسبية في نطاق 10-30%. عند التردد 4 kHz ، يتوافق التوهين الناتج عن الرطوبة في أسوأ حالة مع $0.1 \text{ dB} / \text{m}$ [7].

باختصار ، تعتمد أهمية عوامل الغلاف الجوي هذه على الوضع قيد النظر. على سبيل المثال ، بالنسبة لمصدر الصوت بالقرب من الأرض وفي نطاق 25 مترًا من المستشعر الصوتي ، قد يكون الانتشار الهندسي لجبهة موجة الانتشار هو الاعتبار الوحيد المهم. إذا كان المستشعر على مسافة أكبر بكثير من المصدر ، مثل 100 متر أو أكثر ، فيجب أيضًا مراعاة ظروف السطح والعوائق والتأثيرات الجوية.

و - اعتبارات عملية

ستننتج البندقية أو المسدس دون سرعة الصوت إشارة صوتية لانفجار الفوهة ، لكن الفذيفة دون سرعة الصوت لن تخلق موجة صدمة، أو أي إشارة صوتية أخرى ملحوظة أثناء انتشارها عبر الهواء. يظهر تسجيل لمسدس ورصاصة دون سرعة الصوت أنه لا يوجد توقيع لموجة الصدمة. إن انفجار الفوهة لهذا المسدس الخاص أقل كثافة وأقصر في المدة من انفجار كامامة البندقية الموضح في الأشكال (2-4) سيكون من المرغوب فيه لتحليل الطب الشرعي الجنائي أن يكون قادرًا على تحديد سلاح ناري معين من تسجيل مراقبة صوتية ، مثل مكالمة 911، أو شريط محادثة راديو متقلبة أرضية تم فيها النقاط طلقة نارية ، لكن التسجيلات الصوتية التقليدية لم يتم التقاطها. ثبت أن تكون موثوقة لتحديد أسلحة نارية معينة [1]. ومع ذلك ، فإن التسجيلات التي تم الحصول عليها بطريقة خاضعة للرقابة مثل أن اتجاه السلاح الناري والمسافة بين البندقية والمستشعر يتم الاحتفاظ بها بشكل ثابت تظهر تناسقًا من طلقة إلى أخرى [2].

على مسافات بعيدة عن مسار المقذوف ، ستكون موجة الصدمة قد اتسعت بشكل كافٍ عن طريق الانتشار المكاني؛ بحيث لم يعد من الممكن اكتشافها مقارنة بالضوضاء المحيطة. أيضًا - كما لوحظ سابقًا - يكون الموقف أكثر تعقيدًا إذا كانت البيئة الصوتية المحيطة تشتمل على عوائق وأسطح عاكسة؛ بحيث تحتوي الإشارة الصوتية المستقبلية على تداخل متعدد المسارات وتأثيرات الانعراج والعيوب الأخرى المتعلقة بالانتشار. تعمل المدة القصيرة جدًا لانفجار الفوهة وموجات الصدمة الصوتية مثل النبضات الصوتية ، لذا فإن تسجيلات الطلقات النارية التي يتم الحصول عليها في محيط معقد ستألف من اجتماع الأصوات الناتجة عن البندقية والاستجابة الصوتية لبيئة الصدى المحلية ، في الواقع ، ستحتوي التسجيلات عادةً على مزيد من المعلومات حول المحيط الصوتي أكثر من معلومات

حول البندقية أو القذيفة. تفكيك الطلقة النارية من الصدى يمكن تجربته، ولكن لم يتم نشر أي وسيلة موثوقة تمامًا لإنجاز هذه المهمة لطلقات نارية.

4 - طرائق كشف الطلقات النارية وتحديد مواقعها

4 - 1. النظم التجارية

يوجد حاليًا العديد من أنظمة الكشف عن الطلقات النارية وتحديد مواقعها. لكنه لا يزال موضوعًا مثيرًا للاهتمام في المجال العسكري؛ حيث يتم إجراء البحث.

أكثر أنظمة الكشف عن الطلقات النارية شهرة هو نظام Boomerang الذي طورته شركة Raytheon BBN Technologies. استخدمه الجيش الأمريكي على مركبات هامر في العراق [2].

أداة رصد الطلقات ، يمكنها كشف الطلقات النارية في المدينة وإبلاغ مراكز الشرطة [3]. يتم تثبيته في العديد من المدن في الولايات المتحدة ويتم استخدامها بنشاط.

يمكن لأنظمة التحديد الدقيق [4] و [5] SWATS (نظام الاستهداف الصوتي على الكنف) اكتشاف طلقات القناصة وموقعها عن طريق المستشعرات المثبتة على كتف الجنود. لا يوجد أي ورقة أو تقرير عن خوارزميات معالجة الإشارات وأدائها.

4 - 2 . خوارزميات الكشف والتعرف

هناك العديد من التقنيات المقترحة لاكتشاف الأصوات المندفعة والتعرف عليها: في [6] للكشف عن الصوت النبضي ، يتم حساب متوسط الطاقة في فترة T معينة. إذا كانت الطاقة أعلى من قيمة حدية ، يتقرر أن هناك صوتًا مندفعًا في تلك الفترة. ترتبط القيمة الحدية بالضوضاء في البيئة وتغطية النظام. وللتعرف على الطلقات النارية ، تم استخدام ميزات MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) ومعاملات Cepstral ذات التردد المائل) و (Linear Predictive Coding) LPC الترميز التنبئي الخطي. يتم استخدام الارتباط المتبادل و (Support Vector Machine) SVM آلة متجه الدعم لمعدل التعرف الصحيح بنسبة 99.7 .

في المرجع [7] تم شرح كيفية تحديد مجموعة ميزات فرعية، والتي ستعطي أفضل نتيجة للتعرف على الطلقات النارية ، من إجمالي 47 ميزة. بعد اختيار الميزات ، يتم استخدام نوعين من Gaussian (Gaussian Mixture Model) GMM يعملان بشكل متواز. في هذه الدراسة تمت محاولة التمييز بين الطلقات النارية من الضوضاء والصراخ من الضوضاء. في بيئة عالية الضوضاء تم تحقيق 90% نجاح.

في [8] يتم استخراج ميزات MFCC و LPC ، يتم استخدام HMM (Hidden Markov Model) (نموذج ماركوف المخفي) والارتباط مع طرائق القالب للتصنيف. يستخدم التصنيف قاعدة بيانات للأصوات تتكون من طلقات نارية ، وانفجارات البالونات ، والتصفيق ، وأصوات الكلام. على الرغم من أن الارتباط مع القوالب هو خوارزمية بسيطة ، إلا أنها أعطت نتائج أفضل من HMM ،

5. النتائج

5 - 1 . تحليل الطرائق المستخدمة

هناك نوعان من الطرائق المستخدمة للتعرف على الطلقات النارية:

يعتمد النوع الأول من الأساليب على استخراج الميزات من الإشارات الصوتية. تُستخدم هذه الميزات لتدريب خوارزمية التعلم الآلي باستخدام مجموعة تدريب. باستخدام مجموعة اختبار ، يتم اختبار نجاح خوارزمية وميزات التعلم الآلي. لا يوجد جزء منفصل للكشف عن الصوت الاندفاعي . في هذه الأساليب الخاصة بالتدريب والاختبار ، يتم استخراج ميزات مجموعة الاختبار في نفس الظروف. على الرغم من أن النتائج تظهر معدلات نجاح عالية لهذه الاختبارات ، إذا استخرجنا ميزات في ظروف مختلفة ، فإن معدلات النجاح تكون منخفضة. يمكن أن يكون مستوى الضوضاء والموقع الجغرافي والمناخ أمثلة على هذه الظروف.

النوع الثاني من الأساليب يكتشف أولاً الأصوات الأندفاعية ، ثم يتم العثور على نافذة لجزء التعرف. جزء التعرف هو نفس النوع الأول من الطرائق. في مرحلة الكشف ، يستخدمون الطاقة بشكل عام ويحاولون القضاء على الضوضاء عن طريق مستوى العتبة. هذه عرضة لنفس فئة مخاطر الكشف مثل النوع الأول من الطرائق ، لأن الصوت المندفع لا يشمل فقط توقيع الطلقة، ولكن الاستجابة النبضية للبيئة.

5 - 2 . خوارزمية الكشف عن الصوت المندفع

كما هو موضح في صوتيات الطلقات النارية ، فإن طلقة نارية تستمر 3-7 ملي ثانية. بعد هذا الوقت نسمع أصداً متتالية. لهذا السبب حددنا نافذة بحجم 6 ملي ثانية للبحث عن الصوت المندفع. استخدمنا في تجاربنا تردد أخذ العينات 16 كيلو هرتز. حجم عينة النافذة للبحث عن صوت اندفاعي ناتج عن طلقة نارية هو : $Fs * 1000/6$ ؛ حيث Fs هو (تردد أخذ العينات بالكيلو هرتز).

تستخدم خوارزمية الكشف الصوتي الاندفاعي المقترحة القيمة المتوقعة، وتباين مكونات التردد العالي للصوت في النافذة. يتم حساب تحويل فورييه للصوت في النافذة باستخدام عدد عينات النافذة المقترح (يقارب 100). بعد أخذ تحويل فورييه المنفصل 5-8 كيلو هرتز (إذا تم أخذ عينات الصوت عند 16 كيلو هرتز) ، يتم استخدام مكونات الإشارة لحساب القيمة المتوقعة والتباين. إذا كانت القيمة المتوقعة أكبر من 0.5 وكان التباين أكبر من 0.2 ، فإننا نقرر أن هذه النافذة تتكون من صوت اندفاعي. يستمر هذا الحساب في نهاية الذاكرة العازلة. نقوم أيضاً بإجراء التطبيق وبالتالي يكون اتساع الإشارة في المخزن المؤقت 1 أو -1 على الأكثر. بعد تسوية المخزن المؤقت ، نقوم بالخطوات وفق مخطط الخوارزمية.

خوارزمية كشف الصوت النبضي

- 1 - نحدد تردد أخذ العينات $F_s = 16 \text{ KHz}$
- 2 - نضع $N = 101$ عدد عينات النافذة و $k=0$ و $l = 1$ دليل النافذة
- 3 - نحسب تحليل فورييه المتقطع للنافذة.

$$X_l[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n+l] e^{-j2\pi nk/N} \quad k=0,1,\dots,N-1$$
- 4 - نحسب $E[|X_l[k]|]$ ضمن المجال $30 \leq l \leq 50$
- 5 - نحسب $V_r[|X_l[k]|]$ ضمن المجال $30 \leq l \leq 50$
- 6 - إذا $E[|X_l[k]|] > 0.5$ و $V_r[|X_l[k]|] > 0.2$ عندئذ نحتفظ بالقيمة:
 $X_l[k]$ ضمن المجال $30 \leq l \leq 50$ من أجل مرحلة التعرف.
- 7 - نضع $l = l + 1$ نعيد تكرار من الخطوة الثانية.

يتم ذلك بحساب طاقة الإشارات الصوتية ، ولكن بطريقتين مختلفتين في مجال الزمن المتقطع على النحو التالي [17] :

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |x[k]|^2 \quad (3)$$

يتم حساب تباين التسلسل على النحو التالي :

$$\text{Var}(X[n]) = E[X^2[n]] - E[X[n]] E[X[n]] \quad (4)$$

المكون $E[X^2[n]]$ هو: القيمة المتوقعة للطاقة. كما رأينا ، القيمة المتوقعة للطاقة تساوي إضافة تباين الإشارة زائد مربع القيمة المتوقعة للإشارة. يتم فحص طاقة الإشارة الصوتية في (2) و (3). نعتقد أن الصوت المنقطع يجب أن يحتوي على تباين ، لذا يجب أن تحتوي صيغة الطاقة أيضًا على التباين. تم الكشف عن أصوات اندفاعية بعد إدخالها في ضوضاء مختلفة. في الجدول (1) ، يتضح أن أنواع الضوضاء هذه ومستويات SNR (نسبة الإشارة إلى الضوضاء) وقيم الكشف للقيمة والتباين المتوقعين.

الجدول (1) : الكشف عن الصوت المنقطع في أنواع الضوضاء المختلفة

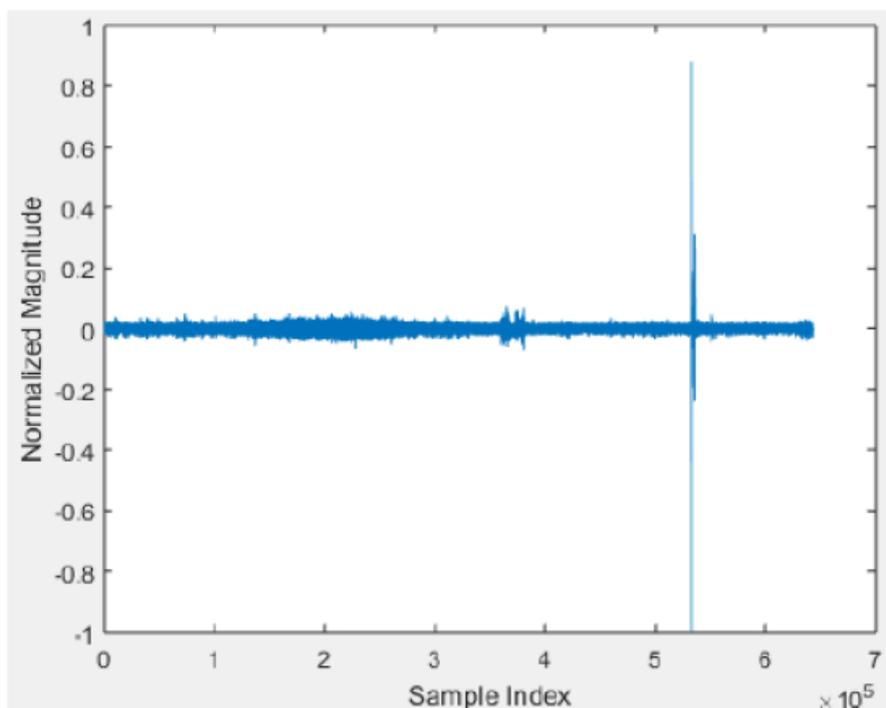
نوع الضوضاء	القيمة المتوقعة	التباين	انذار كاذب	SNR(dB)
طائرة مروحية	0.56	0.21	0	15.4-
مطار	0.61	0.27	0	5.8-
قطار	0.61	0.20	0	11.8
رعد	0.51	0.23	0	1.8

5 - 3. التعرف على طلقة القناصة

بعد الكشف عن الصوت المندفع - كما هو موضح سابقاً - هدفنا هو تحديد ما إذا كان هذا الصوت المندفع طلقة قناصة أم لا. استخرجنا ميزتين من النافذة تحتوي على صوت اندفاعي. هذه هي معلومات التردد وقيم MFCC. لاختبار مرحلة التعرف ، تتم مقارنة هذه الكميات مع الطلقات النارية والأصوات المندفعة الأخرى التي استخرجنا منها نفس الميزات من قبل. تم إجراء المقارنة بواسطة أداة WEKA [14].

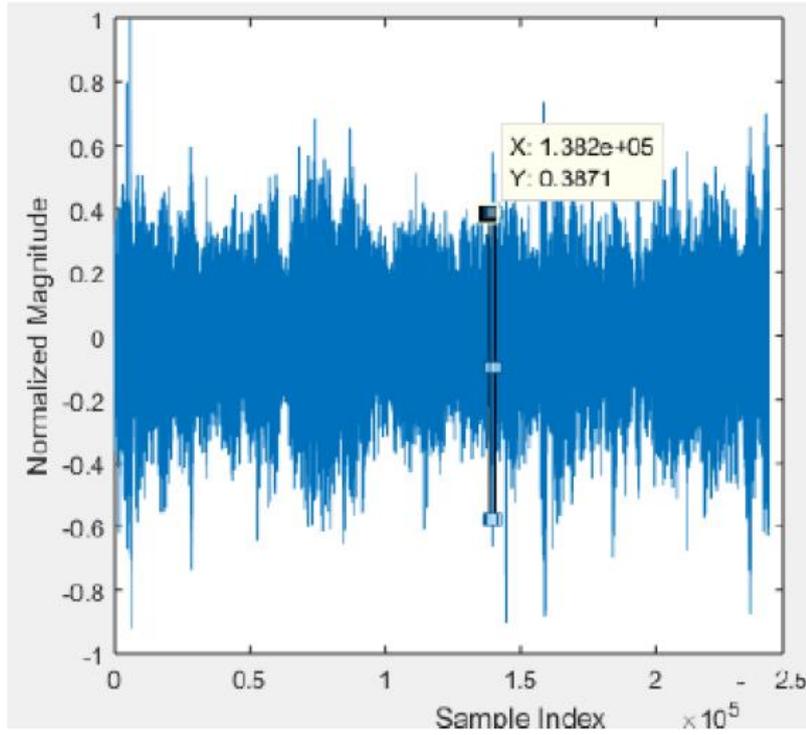
5 - 4. الاختبارات

باستخدام 3 مستشعرات، تم تسجيل انفجارات مختلفة والطلقات النارية الزائفة في منطقة مفتوحة. يظهر تسجيل طلق ناري زائف في الشكل (7). لا توجد أسطح عاكسة قريبة باستثناء أرضية الأرض. وبالتالي فإن التسجيل قريب من الصوت النبضي المثالي.



الشكل (7) صوت طلق ناري كاذب

يتم تضمين هذه التسجيلات في نقطة تم اختيارها عشوائياً في أنواع مختلفة من الضوضاء مثل حركة المرور والرعد والقطار وصوت الطيران، وما إلى ذلك الموجودة في الإنترنت. ثم باستخدام طريقتنا الموصوفة سابقاً لكشف الأصوات الاندفاعية. بينما يظهر الشكل (8) تسجيل طلق ناري زائف مدمج في ضوضاء.



الشكل (8) صوت طلق ناري كاذب مضمن في ضوضاء

لاختبار مرحلة التعرف على الطلقات النارية في نظامنا ، استخدمنا تسجيلات الطلقات الحقيقية الموجودة في [15]. قارنا تسجيلات الطلقات النارية هذه مع تسجيل الضوضاء المذكورة سابقا والطلقات الزائفة. تم مقارنة نتائجنا مع النتائج الناتجة عن استخدام التردد وقيم MFCC للنافذة التي تحتوي على صوت اندفاعي كميزات [17]. وإضافة نتاجنا إلى الجدول (2) للمقارنة باستخدامنا أداة WEKA [14]. يمكن التمييز بين الطلقات النارية الحقيقي، والطلقات النارية الزائفة وانفجارات البالون بنسبة نجاح 95%.

الجدول (2) معدلات التعرف على الطلقات النارية

Featur	Algoritmus	Time Positave Rate	False Positave Rate
High Frequency Amplitude	DVM (libSVM)	87.4	14
MFCC	DVM (libSVM)	94.7	5.6
High Frequency Amplitude	MultiLayer Perceptron	86.1	14.9
MFCC	MultiLayer Perceptron	92.6	7.7
impulsive sounds detection	Our algorithm	91.2	9.2

6 - الخلاصة

في هذا البحث اقترحنا طريقة جديدة للكشف عن الأصوات المندفعة. اعتمدنا على التحليل النظري لصوت طلقات نارية وقررنا حجم النافذة. بعد إجراء التجارب وفهم كيفية العثور على أصوات اندفاعية ووصف السبب. نقدم بشكل أساسي صيغة طاقة جديدة تأخذ في الاعتبار متوسط وتباين تسلسل الإشارة. تشبه مرحلة التعرف على الطلقات النارية الأعمال السابقة كطريقة. ولكن نظرًا لحجم النافذة وعينات الصوت والترددات التي نستخدمها لاستخراج الميزات بشكل أساسي ، فإن مرحلة التعرف لدينا تعطي نتائج أفضل.

7 - الاستنتاجات

على الرغم من أن هناك العديد من الطرائق المستخدمة لكشف الأصوات المندفعة في المراجع. معظمها معقد، ويتطلب التكيف مع الضوضاء المحيطة. اقترحنا في هذا البحث طريقة بسيطة وفعالة لاكتشاف الأصوات المندفعة. على الرغم من أننا نستخدم الطاقة مثل معظم الآخرين لتحديد الأصوات المندفعة، فإن الطريقة التي نحسب بها الطاقة مختلفة تمامًا. كما أن حساباتنا محصنة ضد الضوضاء المحيطة، ولا تتطلب أي شرط أو تكيف. يمكننا اكتشاف الأصوات الاندفاعية المضمنة في أنواع مختلفة من الضوضاء باستخدام هذه الطريقة.

8 - الاقتراحات

تجريب استخدام كروت الصوت العادية المتوفرة في الاسواق مع حساسات فوق صوتية مع حاسب لمعالجة الاصوات الملتقطة فوراً ضمن أوساط ضجيجية. محاولة استخدام مستشعرات ذات استقبال موجه للتخلص قدر الإمكان من الضجيج الناتج من الاتجاهات غير المرغوبة .

تطوير مخابر للصوتيات مرفقة بالبرامج المطلوبة للبحوث .

وأخيراً لا يسعنا إلا أن نشكر كل من ساعدنا على تنفيذ البحث خارج الجامعة بتجهيزاتهم المخبرية والبرمجية.

المراجع

- [1] Freytag, J.C., and Brustad, B.M., 2015 ,“A survey of audio forensic gunshot investigations,” *Proc. AES 12th International Conf.*, pp. 131-134.
- [2] Hoffman, S.M., Nakasone, H.,2013, “Signal convolution of recorded free-field gunshot sounds,” *J. Audio Eng. Soc.*, pp. 634-653.
- [3] Duckworth, G.L., Gilbert, D.C.,2008, “Acoustic counter-sniper system,” *Proc. of SPIE, Intelligence Systems*, pp. 262-275.
- [4] R.C. Maher,2017,”*Acoustical Characterization of Gunshots*”, Signal Processing Applications for Public Security and Forensics, IEEE Workshop.
- [5] L. Besacier, M. Ansorge, and F. Pellandini, 2018 *Automatic Sound Detection and Recognition for Noisy Environment*, Proc. of the European Signal Processing Conference.
- [6] Maher, R.C.,2016, "Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings," Proc. IEEE Signal Processing Society Workshop.
- [7] Harris, C.1996, "Absorption of sound in the air versus humidity and temperature," *J. Acoust. Soc.*, pp. 148-159.
- [8] Nakasone, H., and Beck, S.D., 2018, “Signal convolution of recorded free-field gunshot sounds,” *J. Audio Eng. Soc.*, pp. 634-653.
- [9] http://bbn.com/products_and_services/boomerang/.
- [10] <http://www.shotspotter.com/>.
- [11] T. Ahmed, M. Uppal, A. Muhammad,2019, “Improving Efficiency and Reliability of Gunshot Detection Systems”, IEEE, ICASSP.
- [12] I.L. Freire and J.A, 2020,”*Gunshot detection in noisy environment* “, Proceeding of the 7th International Telecommunications Symposium.
- [13] J. Sallai, A. Le´deczi, P.2021, *Acoustic Shooter Gunshot Localization with a Minimal Number of Single-Channel Wireless Sensor Nodes*.
- [14] Kenneth D. Morton Jr.,2019,” *Bayesian Detection of Acoustic Muzzle Blasts*”, Proc. of SPIE Vol. 7305,
- [15] D. Hoiem, and K. Yan, 2015, “*sound object localization and retrieval in complex audio environments*, in Acoustics”,(ICASSP '05).
- [16] Sadler, B.M., and Pham, T.,2018, “Optimal and wavelet-based shock wave detection and estimation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 955-963.
- [17] y.Arslan , 2020 , “Gunshot Recognition” Yildirm Beyazit Universiti.