

Performance Evaluation of Acoustic Firing Localization Systems and Sniper Projectile Trajectory Detector

Dr. Shhada Al-Mosa*

Masoud Ali**

(Received 19 / 6 / 2022. Accepted 22 / 1 / 2023)

□ ABSTRACT □

In recent years, in-air acoustic sensing systems have been developed to locate small arms fire, and a number of countries have systems in various stages of development that have used them in operations. These systems are mounted on a soldier's helmet or on vehicles to provide crews with better situational awareness, thus enhancing crew safety and troop protection. The performance measures proposed in this study were derived for open terrain, a typical environment for most test sites around the world. The gauges are for individual matrix systems rather than distributed sensor networks that use triangulation and/or integration with other sensors for detection and recognition.

Due to the increasing number of sniper attacks in crises, estimation of direction of sound wave arrival (DOA) based on time differences between separate sensors is usually applied in order to identify the source of the sound, in this paper, a method is proposed to estimate the state of a sniper shot, i.e. bullet trajectory recognition. The method relies on mathematical modeling of the projectile's shock wave, and the use of simulations, sniper data, caliber, and weather conditions to test and verify the performance of the proposed method.

Keywords: performance evaluation - shooting - snipers - determining location - shock wave - estimating the trajectory of the projectile

* Professor, Department of Electronic and Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

** Ph.D., Department of Electronic and Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-baath University, Homs, Syria.

تقييم أداء أنظمة تحديد موقع مطلق النار الصوتية وكاشف مسار مقذوف القناصة

د. شحادة الموسى*

مسعود علي**

(تاريخ الإيداع 19 / 6 / 2022. قَبْلُ للنشر في 22 / 1 / 2023)

□ ملخص □

حاليا تم تطوير أنظمة استشعار صوتية لتحديد مكان إطلاق نيران الأسلحة الصغيرة، وتملك العديد من البلدان أنظمة متقدمة تستخدمها في العمليات الحربية. تتركب هذه الأنظمة على خوذة الجندي أو على المركبات لتزويد الأطقم بوعي أفضل بالحالة، وبالتالي تعزيز سلامة الطاقم وحماية القوات. وتم اشتقاق مقاييس الأداء المقترحة في هذه الدراسة للتضاريس المفتوحة، وهي بيئة نموذجية لمعظم مواقع التجارب حول العالم. المقاييس مخصصة لأنظمة المصفوفة الفردية بدلاً من شبكات الاستشعار الموزعة التي تستخدم التثليث مع الاندماج مع أجهزة استشعار أخرى للكشف والتعرف. نظراً للعدد المتزايد من هجمات القناصة في الأزمات، يتم عادةً تطبيق تقدير اتجاه وصول الموجة الصوتية (DOA) بناءً على الفروق الزمنية بين المستشعرات المنفصلة من أجل تحديد مصدر الصوت، في هذا البحث، تم اقتراح طريقة لتقدير حالة طلقة القناصة، أي التعرف على مسار الرصاصة، وتعتمد الطريقة على نمذجة رياضية لموجة صدمة المقذوف، واستخدام عمليات المحاكاة وبيانات القناصة وعايرها، والظروف الجوية لاختبار، والتحقق من أداء الطريقة المقترحة.

الكلمات المفتاحية: تقييم أداء - إطلاق النار - القناصة - تحديد الموقع - موجة الصدمة - تقدير مسار المقذوف

*أستاذ -كلية الهمك- جامعة البعث- حمص- سورية.

** طالب دكتوراه - قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات- كلية الهمك - جامعة البعث - حمص- سورية.

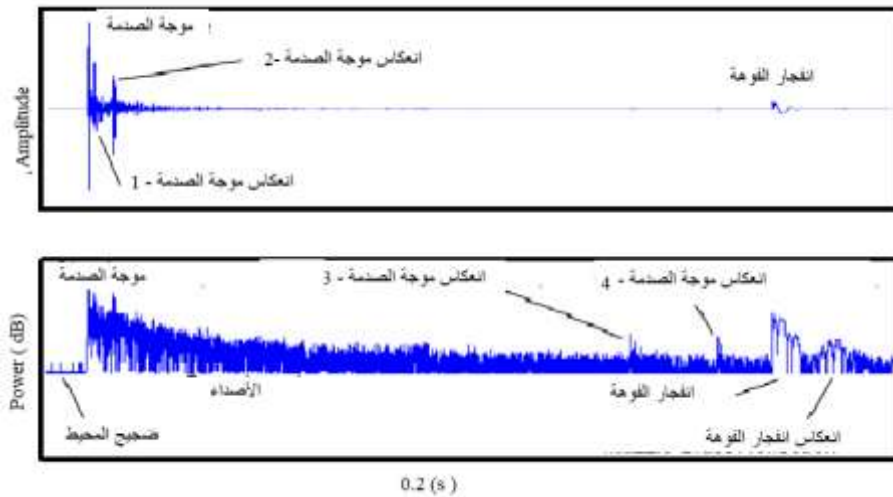
مقدمة:

تلعب الحكومات دورًا رائدًا في وضع معايير الأداء والمعايير لأغراض التقييم والتأهيل. وتقترب بعض الشركات بخبرتها الطويلة في مجال صوتيات الغلاف الجوي، مقاييس أداء لتأهيل أنظمة تحديد موقع الأسلحة الصغيرة الصوتية. والمطلوب هو التنسيق وتوحيد المعايير التي تم تطويرها، لتساهم في تحسين فهم التكنولوجيا الصوتية في الهواء من قبل كل من القطاعين العام والخاص، وخاصة لتلك الوكالات التي لديها القليل من المعرفة في هذا المجال. على المدى الطويل، سيؤدي ذلك إلى إدارة التوقعات على جميع مستويات عملية الشراء وتعزيز نقاط القوة في التكنولوجيا والوعي بحدودها بما يخدم المصالح العليا للقوات في الميدان.

يوفر نظام تحديد موقع الأسلحة الصغيرة الصوتي [1-7] موقع مطلق النار في المدى والزوايا ومسافة تفويت الرصاصة وعبارة الرصاصة. تشير مقاييس الأداء إلى احتمال اكتشاف الطلقة وتحديدها، ودقة الحل المقدم ومستوى الثقة في تلك الدقة. هناك فرق كبير بين نظام يكتشف 90% من الطلقات التي تم إطلاقها ويقدم معلومات جيدة عن مطلق النار في 10% فقط من الطلقات، ونظام يكتشف 10% فقط من الطلقات التي تم إطلاقها، ولكنه يوفر معلومات جيدة عن 90% منها. توفير احتمال الاكتشاف وحده غير كامل؛ يحتاج عامل التشغيل إلى معرفة مستوى الثقة الذي يمكن أن يكون لديه في المعلومات المقدمة.

السمة المحددة للصوت في الهواء هي الطبيعة غير الثابتة للغلاف الجوي. تؤثر الرياح والاضطراب والتغيرات في سرعة الصوت مع الارتفاع على انتشار الصوت. يمكن أن يعزز الغلاف الجوي أو يعيق اكتشاف الصوت لبضع ثوانٍ أو بضع ساعات. تؤثر التضاريس والعوائق في المنطقة أيضًا على اكتشاف حدث صوتي والتعرف عليه. من حيث المبدأ، يجب الحصول على الاحتمالات الواردة في مقاييس الأداء من المتوسطات طويلة الأجل المأخوذة في مجموعة متنوعة من البيئات. لأسباب واضحة، السمة المحددة للصوت في الهواء هي الطبيعة غير الثابتة للغلاف الجوي. تؤثر الرياح والاضطراب والتغيرات في سرعة الصوت مع الارتفاع على انتشار الصوت. يمكن أن يعزز الغلاف الجوي أو يعيق اكتشاف الصوت لبضع ثوانٍ أو بضع ساعات. تؤثر التضاريس والعوائق في المنطقة أيضًا على اكتشاف حدث صوتي والتعرف عليه. من حيث المبدأ، يجب الحصول على الاحتمالات الواردة في مقاييس الأداء من المتوسطات طويلة الأجل المأخوذة في مجموعة متنوعة من البيئات.

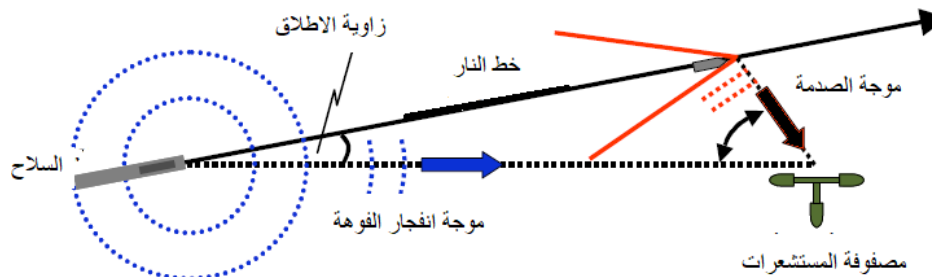
يعطي الشكل (1) مثالاً على الصوت الذي تم قياسه بواسطة مستشعر صوتي في حدث حقيقي لنيران أسلحة صغيرة. يُظهر التتبع العلوي ضغط الصوت بالكامل خلال فترة 0.2 ثانية، بما في ذلك موجة الصدمة وانفجار الفوهة. التتبع الثاني هو القدرة الفورية التي يتم الحصول عليها عن طريق تربيع الضغط، والحد من قيمته الدنيا للأغراض المرئية وأخذ اللوغاريتم.



الشكل (1): إشارة صوتية من نيران ذراع صغيرة: السعة (أعلى) والطاقة الفورية (أسفل)

بسبب صعوبة اختبار نيران الأسلحة الصغيرة في العديد من البيئات، فمن غير المرغوب فيه تحديد مقاييس الأداء التي تتجز وتختبر بجهود معقدة.

تولد معظم نيران الأسلحة الصغيرة صوتين اندفاعيين متميزين: انفجار فوهة السبطانة وموجة الصدمة كما هو موضح بالشكل (2). يتم إنشاء انفجار فوهة السبطانة في السلاح عن طريق التفريغ السريع للوقود والاحتراق السريع الذي يحدث عندما يختلط الجزء غير المحترق من الوقود مع الهواء خارج فوهة السبطانة. يتم إنشاء موجة الصدمة بواسطة رصاصة أسرع من الصوت تنتقل في الهواء، على غرار الدوي الصوتي للطائرة الأسرع من الصوت [8].



الشكل (2): انفجار فوهة السبطانة وانتشار موجة الصدمة بزاوية إطلاق منخفضة γ

تتبع موجة انفجار فوهة السبطانة من مصدر نقطي (فوهة السبطانة)، وتنتشر كروياً من فوهة السبطانة بسرعة الصوت. يمكن اكتشافه من أي مكان حول موقع إطلاق النار. تنتشر موجة انفجار فوهة السبطانة من السلاح مباشرة نحو المستشعر، نظراً لعدم وجود عوائق في مسار الانتشار. بينما يشبه مخروط الموجة الصدمية الناتج عن الرصاصة أعقاب المثلث الذي أنشأه قارب على سطح الماء. يتحرك طرف المخروط على طول خط النار بسرعة الرصاصة، لكن جبهة الموجة الصوتية التي يتم إنتاجها تنتشر بشكل عمودي على مقدمة الموجة الصدمية (باللون الأحمر) بسرعة الموجة الصدمية وانفجار فوهة السبطانة.

أهمية البحث وأهدافه:

1- الهدف من البحث

يهدف البحث: التعرف على الظواهر الصوتية الناتجة عن إطلاق نار من الأسلحة الصغيرة. وتقييم أداء أنظمة تحديد موقع الاطلاق المختلفة، وتحديد نوع السلاح وقياسه وسرعة الرصاصة ومعرفة مسارها (المكان المستهدف). والتركيز على تقدير اتجاه إطلاق النار المعادي بكفاءة. وذلك بإجراء دراسة على مجال موجة صدمة القناصة، وتقدير مسار المقذوف وأقرب مسافة إلى المستشعر، وبالتالي يعرف الجندي الحامل للمستشعر فيما إذا كان هو المستهدف من عملية القنص.

2 - طريقة إجراء البحث

سنستعرض مقاييس الأداء المختلفة لأنظمة تحديد موقع إطلاق النار، والتعرف على مواصفات السلاح المستخدم ومسار المقذوف ومقصده.

2 - 1. التعرف على مقاييس الأداء

تم اقتراح المعاملات التسعة (9) التالية كمقاييس أداء لتقييم وتأهيل أنظمة تحديد موقع الأسلحة النارية المخصصة لأنظمة المصفوفة المفردة المعرضة لطلقات فردية. يمكن اعتبار الطلقات المتعددة التي يتم إطلاقها من رماة مختلفين، أو من نفس مطلق النار على أنها سلسلة من الطلقات الفردية، إذا كان الوقت بين وصول موجات الصدمية أكثر من ثانيتين. هذا يضمن وصول انفجار فوهة السبطانة قبل حدوث موجة الصدمة من الطلقة التالية. هذا يتجنب الارتباك في المعالجة والذي يمكن أن يسبب أخطاء في تقدير المدى.

1 - احتمالية الكشف: يشير احتمال الكشف إلى احتمال اكتشاف طلقة والتعرف عليها. يتميز حدث إطلاق نار بالأسلحة الصغيرة بوجود الموجات الصدمية ونبضات انفجار فوهة السبطانة. انفجار فوهة السبطانة هو في الأساس انفجار. يمكن أن تنتج عدة مصادر صوتاً نبضاً مشابهاً: الذخيرة الفارغة، وأجهزة محاكاة المدفعية، والمفرقات النارية، إلخ. بالإضافة إلى ذلك، مع زيادة المسافة بين مطلق النار والمستشعر، فإن تأثيرات الاضطراب والانكسار تعمل على تعديل ميزات المجال الزمني للنبضات، وبالتالي القدرة على التعرف عليها.

من ناحية أخرى، فإن نبضات **الموجة الصدمية** shot wave هو صوت غير شائع في الطبيعة، ويصعب إعادة إنتاجه. لهذا السبب، يرتبط احتمال الكشف ارتباطاً مباشراً باحتمال اكتشاف وجود الموجة الصدمية. إن وجود الموجة الصدمية ليس الوسيلة الوحيدة للتعرف على إطلاق رصاصة، ولكنه الإشارة الأساسية المستخدمة للتعرف. بسبب تأثيرات الانتشار في الغلاف الجوي، يعتمد التعرف على الموجات الصدمية إلى حد كبير على المسافة الفاشلة (الخاطئة) **miss distance** للرصاصة. في المتوسط، كلما زادت مسافة الخطأ، تقل احتمالية الكشف. هذا لا يمنع حقيقة أن الموجة الصدمية سيتم التعرف عليها من مسافة 200 متر في يوم ما، ولن يتم التعرف عليها من مسافة 50 متراً في يوم عاصف آخر.

نظراً للعلاقة بين مسافة خطأ الرصاصة واحتمال الاكتشاف، يقترح تحديد احتمالية الاكتشاف في عدد من مسافات الخطأ المحددة، مثل 2 و 20 و 200 متر. يمكن الحصول على الاحتمالية عند مسافات الخطأ المتوسطة باستخدام تدرج خطي بسيط (أو ربما لوغاريتمي خطي).

2 - احتمالية التحديد الكلي للموقع: يشير احتمال التحديد الكامل للموقع إلى احتمال تحديد حل كامل، بالنظر إلى اكتشاف الطلقة. يشتمل الحل الكامل على زوايا المدى والسمت والارتفاع والمسافة الخاطئة والعيار. يرتبط احتمال أن يوفر النظام تحديد موقعاً كاملاً باحتمال التعرف على انفجار فوهة السبطانة بين الصدى والانعكاسات والأصوات المحيطة.

من حيث المبدأ، تعتمد قوة ودقة انفجار فوهة السبطانة على المسافة بين مطلق النار والمستشعر. ومع ذلك، أظهرت النتائج التجريبية أن الانكسار والاضطراب في الغلاف الجوي يلعبان دوراً أكثر أهمية من المدى بالنسبة للمسافات التي تزيد عن 200 متر تقريباً. بسبب الطبيعة العشوائية لهذين التأثيرين (المدى والاضطراب)؛ فإن التبعية على المدى ليست كبيرة بشكل عام. لهذا السبب، يمكن استخدام قيمة واحدة لاحتمال التحديد الكامل للموقع، بغض النظر عن المدى.

3 - احتمال الحل الجيد أو الموثوق: يشير احتمال الحل الجيد إلى احتمال أن يقع الحل المقدم من النظام ضمن حدود الدقة المحددة بواسطة دقة زاوية السمات ودقة زاوية الارتفاع ودقة المدى ودقة المسافة الخاطئة ودقة العيار. تحدد الدقة المحددة لزاوية السمات وزاوية الارتفاع والمدى والمسافة الخاطئة والعيار الحل الموثوق.

4 - احتمال إنذار كاذب: إن احتمال الإنذار الخاطئ هو جزء من المعلومات التي يطلبها المشغلون غالباً. إنه يخبرهم بفرص أن يتم تنبيههم بشكل خاطئ إلى نيران الأسلحة الصغيرة. تنجم الإنذارات الكاذبة عن مصدر محدد للصوت يحاكي صوت الموجة الصدمية. ثم يعود السؤال إلى ما هي فرص وجود هذا المصدر. على سبيل المثال، إذا أطلق النظام صوت الرعد، وكان هناك خمس تكرارات لهذا الصوت في عام واحد ولم يكن هناك إطلاق نار من أسلحة صغيرة، فإن نسبة الإنذارات الكاذبة في ذلك العام ستكون 100%. من ناحية أخرى، إذا تعرض النظام لمائة طلقة من أسلحة خفيفة، فإن نسبة الإنذارات الكاذبة ستكون 5%.

يحدث أحد المصادر الشائعة للإنذارات الكاذبة عندما يتم إطلاق رصاصة بعيداً عن المستشعر الصوتي. بمعنى آخر، يوجد النظام الصوتي خلف مطلق النار. في ذلك الموقع، تم الكشف عن انفجار فوهة السبطانة فقط. لا يوجد انتشار للموجات الصدمية خلف مطلق النار. نظراً لأن انفجار الفوهة السبطانة مرتفع وقصير المدى، فإن بعض الأنظمة تتعرف بشكل خاطئ على انفجار فوهة السبطانة على أنه موجة الصدمة. قد يجادل البعض بأن هذا ليس إنذاراً خاطئاً لأنه تم إطلاق رصاصة بالفعل. نعتقد أن هذه الأنظمة يجب أن تستبعد النيران الصديقة. يشمل هذا أيضاً جميع عمليات إطلاق النار في المنطقة المجاورة لجهاز الاستشعار. حتى إذا تم اكتشاف موجة الصدمة في المستشعر، إذا كان مطلق النار ضمن عتبة مدى معينة، على سبيل المثال 5 أو 10 أمتار، فلا ينبغي أن يؤدي الحدث إلى تشغيل النظام الصوتي.

يتم التعرف على حادثة إطلاق الأسلحة الصغيرة من خلال مجموعة معقدة من العتبات والمعايير والقواعد. بالنسبة لبعض أنظمة الكشف، يمكن تطبيق حد بسيط على ضوضاء الإدخال العشوائي لتلبية معدل إنذار خاطئ معين. ليس هذا هو الحال بالنسبة للاعتراف بنيران الأسلحة الصغيرة.

في رأينا، إذا كانت هناك مصادر معينة للضوضاء تخلق إنذارات كاذبة، فيجب أن يعرف المشغلون عنها. إذا تم تحديد احتمال وجود إنذار خاطئ، فيجب أيضاً توفير طريقة للتحقق من هذا الرقم؛ وإلا فإن المواصفات لا معنى لها ولا ينبغي استخدامها ضمن مقاييس الأداء.

5 - دقة زاوية السمات: دقة زاوية السمات هي حد يحدد مدى زوايا السمات لحل جيد. يتم استخدامه بالاقتران مع احتمال حل جيد. على سبيل المثال، تشير دقة زاوية السمات البالغة 5 درجات واحتمال الحل الجيد بنسبة 90% إلى أنه إذا قدم النظام حلاً، فإن خطأ زاوية السمات سيكون أقل من 5 درجات بنسبة 90% من الوقت.

تعتمد دقة زاوية السمات في الغالب على مستوى الاضطراب في وقت الطلقة. يتم الحصول على زاوية السمات من اتجاه وصول نبضة انفجار الفوهة الصوتية. غالباً ما يؤدي الغلاف الجوي المضطرب إلى انتشار متعدد المسارات، مما ينتج عنه العديد من الأشعة الصوتية التي تتحد عند المستشعر. هذا لا يغير اتجاه الانتشار فحسب، بل يقلل أيضاً من

تزامن النبضات بين المستشعرات داخل المصفوفة الصوتية. يتمثل أحد الآثار الجانبية للاضطراب في تقليل التشابه بين الأصوات المقاسة في كل مستشعر. يؤدي هذا التشابه المنخفض إلى ظهور أخطاء في تقدير الاختلاف في أوقات الوصول، والتي بدورها تُترجم إلى أخطاء في تقدير السم.

6 - دقة زاوية الارتفاع: يتم الحصول على زاوية ارتفاع مطلق النار من اتجاه انتشار انفجار فوهة السبطانة. انتشار موجة الانفجار لفوهة السبطانة يتأثر بشدة بالجو. تؤدي التغيرات في سرعة الصوت مع الارتفاع الناجم عن الرياح وتغير درجة حرارة الأرض أثناء النهار إلى الانكسار، مما يؤدي إلى انحناء مسار الانتشار الصوتي إلى أسفل أو أعلى. بمعنى آخر، لا تنتشر الأصوات في خط مستقيم. وإنما ينتشروا لأعلى ثم لأسفل مثل الكرة، أو لأسفل ثم لأعلى. لاحظ أن زاوية السم لا تتأثر بانكسار الغلاف الجوي، بل تتأثر فقط زاوية الارتفاع.

يحتوي الغلاف الجوي الشعاع الصوتي إلى حد ما، لكن تقديرات زاوية الارتفاع لا تزال صالحة في المسافات قصيرة.

7 - دقة المدى: دقة المدى هي مقدار يحدد مسافات مطلق النار (المدى) للحصول على حل جيد. يتم استخدامه بالاقتران مع احتمال حل جيد. على سبيل المثال، تشير دقة المدى البالغة 10% واحتمال الحل الجيد بنسبة 90% إلى أنه، إذا قدم النظام حلاً، فسيكون خطأ المدى بنسبة 90% من الوقت أقل من 10%. دقة المدى مرتبطة بتقدير المدى، وبالتالي يتم التعبير عنها كنسبة مئوية. على عكس خطأ السم، يزداد خطأ المدى خطياً تقريباً مع المدى. هذا يرجع بشكل أساسي إلى أخطاء في المقذوفات المفترضة للرصاصة، وتعتمد دقة المدى على هندسة إطلاق النار، والدقة في قياس اتجاه ووقت وصول موجة الصدمة وانفجار فوهة السبطانة، وميزة الوقت لنبض الموجات الصدمية، والمعرفة المسبقة لمقذوفات الرصاصة. يتطلب تقدير المدى إعادة بناء هندسة الرماية بأكملها. عندما تكون المسافة بين مطلق النار ونقطة فصل الموجة الصدمية صغيرة، فإن أهم المعاملات في تقدير المدى هي الفرق في زوايا وصول انفجار فوهة السبطانة وموجة الصدمة، وخصائص الوقت لموجة الصدمة: المدة والسعة. في الطرف الآخر، عندما تكون المسافة بين مطلق النار ونقطة فصل الموجة الصدمية كبيرة مقارنة بمسافة الخطأ، فإن المعامل الأكثر أهمية في تقدير المدى هي المعرفة المسبقة بمسار الرصاصة.

8 - دقة المسافة الخاطئة Miss distance accuracy: دقة المسافة الخاطئة هي الحد الذي يحدد مدى مسافات الخطأ للحصول على حل جيد. يتم استخدامه بالاقتران مع احتمال حل جيد. على سبيل المثال، تشير دقة المسافة الخاطئة بنسبة 30% واحتمال الحل الجيد بنسبة 90% إلى أنه إذا قدم النظام حلاً، فإن 90% من الوقت سيكون خطأ المسافة الخاطئة أقل من 30%. دقة المسافة الخاطئة تتعلق بتقدير المسافة الخاطئة، وبالتالي يتم التعبير عنها كنسبة مئوية. ترتبط دقة المسافة الخاطئة ارتباطاً مباشراً بميزة الوقت لموجة الصدمة. يكون لمدى إطلاق النار ومقذوفات الرصاصة تأثير ضعيف على تلك المعاملات من خلال تغيير سرعة الرصاصة عند نقطة الفصل، مما يؤدي بدوره إلى تغيير مدة الموجة الصدمية وسعتها. من أجل تبسيط مقاييس الأداء، لا يتم التعبير عن دقة المسافة الخاطئة من حيث المدى أو عيار الرصاصة. وإنما يجب أن تأخذ القيمة المعطاة للدقة في الاعتبار هذه التأثيرات.

9 - دقة العيار Caliber accuracy: تحدد مدى الحصول على احتمال حل جيد. على سبيل المثال، تشير دقة العيار البالغة 30% واحتمال الحل الجيد بنسبة 90% إلى أنه إذا قدم النظام حلاً، فسيكون خطأ العيار 90% من الوقت أقل من 30%. ترتبط دقة العيار بتقدير العيار، وبالتالي يتم التعبير عنها كنسبة مئوية. ترتبط دقة العيار ارتباطاً مباشراً بميزة الوقت لموجة الصدمة. يكون لمدى إطلاق النار ومقذوفات الرصاصة تأثير ضعيف على تلك المعاملات من خلال تغيير سرعة الرصاصة عند نقطة الفصل (عند انفصالها عن مسارها)، مما

يؤدي بدوره إلى تغيير مدة الموجة الصدمية وسعتها. من أجل تبسيط مقاييس الأداء، لا يتم التعبير عن دقة المسافة الخاطئة من حيث المدى أو عيار الرصاصة. يجب أن تأخذ القيمة المقدمة للدقة هذه التأثيرات في الاعتبار.

2 - 2. التعرف على موجة الصدمة

في مجال الأمن وحفظ السلام، من الضروري تقدير اتجاه مطلق النار المعادي بكفاءة. تم إجراء دراسات في مجال موجات صدمة الرصاص وتقدير المسار [10 - 13]. في هذه البحوث، تكون النمذجة الرياضية لحدث إطلاق النار متطابقة، بينما تختلف طرائق اكتشاف توقيعات شكل الموجة وخوارزميات توطين مصدر الصوت. يتم استخدام بعض أنظمة مكافحة القناصة (14 - 16) بالفعل في حالة أزمات معينة، ولكن لا تزال هناك حاجة لتحسين موثوقية التقدير.

يمكن تقسيم طرائق تقدير مسار الرصاصة الصوتية إلى ثلاث فئات:

(1) طرائق باستخدام موجات الصدمة.

(2) طرائق استخدام انفجار الفوهة الذي تسببه البندقية نفسها

(3) طرائق باستخدام كلتي الميزتين.

تحتوي الطرائق التي تنتمي إلى الفئة 3 على قدر أكبر من عدم اليقين المتضمن في التقدير؛ حيث تزداد مصادر الأخطاء. يمكن أن تمنع كواتم الصوت ومسافات التصوير الطويلة وجود انفجار كاماة، مما يتسبب في أن تصبح طرائق الفئة 2 عديمة الفائدة. ومع ذلك، يتم استخدامها في بعض البيئات المضطربة [9]. الطريقة المقترحة هنا تنتمي إلى الفئة 1، مما يعني أنه لا يلزم مراقبة انفجار الفوهة. ومع ذلك، نظراً لأن الرصاص دون سرعة الصوت لا يسبب موجات صدمة، يمكن تقدير حالات الرصاص الأسرع من الصوت فقط. لا تزال أساليب الفئة 1 مناسبة ضد القناصين، الذين يفضلون عموماً البنادق التي تنتج طلاقات تفوق سرعة الصوت لضمان الدقة.

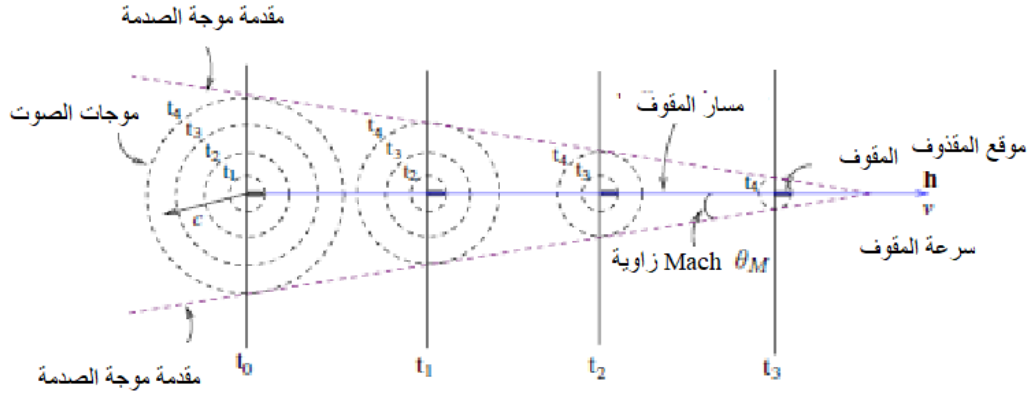
1. نمذجة موجة الصدمة

عندما ينتشر المقذوف (الرصاصة) في وسط متجانس بسرعة تفوق سرعة الصوت، تتولد موجات صوتية منتشرة في جميع الاتجاهات، والتي تشكل معاً مقدمة موجة صدمة صوتية. نتيجة لذلك، يتشكل نمط مخروطي الشكل خلف الرصاصة، كما هو موضح بالشكل (3). تتناسب زاوية مقدمة موجة الصدمة بالنسبة لمسار الرصاصة مع سرعة

القذيفة [10]:

$$\theta_M = \sin^{-1} \left(\frac{1}{M} \right) \quad (1)$$

حيث M : هو رقم ماخ Mach ، والذي يتم تعريفه على أنه $M = v / c$ ؛ حيث v و c هما سرعة المقذوف والصوت ، على التوالي.



الشكل (3). عندما تنتشر الرصاصة من اليسار إلى اليمين، يتشكل مخروط موجة الصدمة خلف الرصاصة، وعليه خط متقطع. تنتشر مقدمة موجة الصدمة بسرعة الصوت c ، في حين أن الرصاصة لها سرعة متناقصة نعتبرها هنا أنها ثابتة $1 < M < 4$

شكل موجة الصدمة هو دالة لقطر المقذوف ϕ ، وسرعته v ، والمسافة بين المسار وموضع المستشعر m_i (أقرب نقطة بين المسار وموقع المستشعر). يتم قياس مسافة الخطأ هذه من نقطة التي يرمز لها بـ a (CPA) على المسار، والمشار إليها هنا على أنها a . الخط المرسوم من هذه النقطة إلى موقع المستشعر m_i يكون دائماً عمودياً على المسار. يتم تعريف شكل موجة الصدمة رياضياً باستخدام (2) و (3)، اللذين يشكلان نموذج ويتمان: [13]

$$A0_i = \frac{0.53 P_0 (M^2 - 1)^{1/8} \phi}{d_{m,a}^{3/4} \iota^{1/4}} [Pa] \quad (2)$$

$$A0_i = \frac{1.82 M \phi d_{m,a}^{1/4}}{c (M^2 - 1)^{3/8} \iota^{1/4}} \quad (3)$$

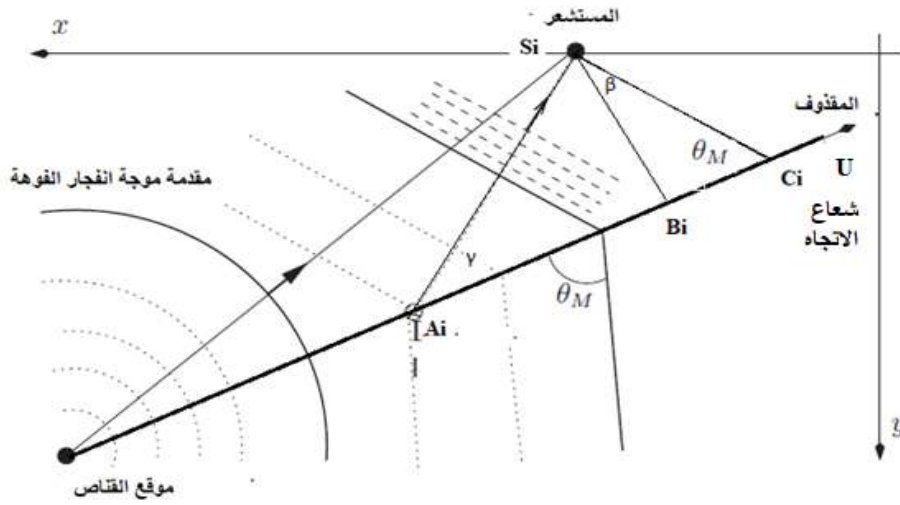
حيث P_0 هو ضغط الهواء الجوي، $d_{m,a}$ هو خطأ المسافة، و ι طول الرصاصة المرتبطة بقطرها [3]

$$\iota \approx 4.35 \phi [m] \quad (4)$$

وفقاً للشكل (4)، فإن وقت وصول موجة الصدمة τ_i إلى مستشعر معين m_i من نقطة معينة S من المسار ضروري لنمذجة موجة الصدمة التي تسببها رصاصة. يتم تعريف المصطلح τ_i على أنه:

$$\tau_i = \frac{\|m_i - S\|}{c} = \frac{d_{m_i,S}}{c} [s] \quad (5)$$

حيث: $d_{m_i,S}$ هي المسافة بين المستشعر m_i ونقطة S .

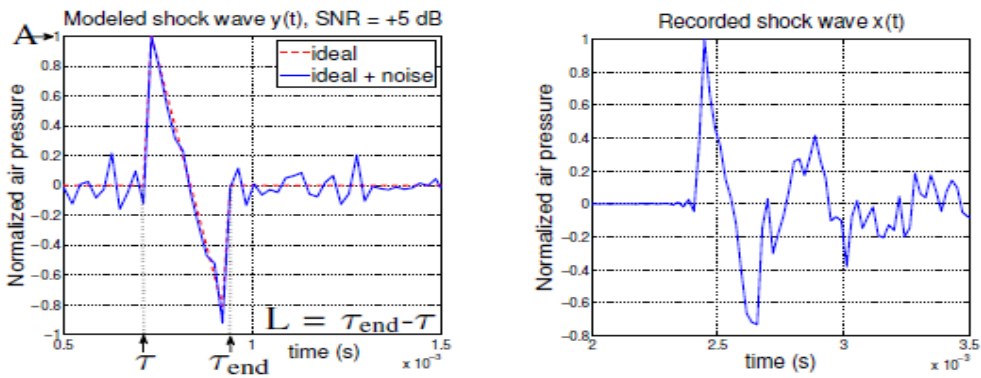


الشكل (4). مسار موجة الصدمة من النقطة s إلى المستشعر m.

يشبه شكل موجة الصدمة الفعلية بشكل عام الحرف N (أو ببساطة موجة N). هذا لأن الشكل الموجي للمجال الزمني له حواف صاعدة وهابطة مثيرة للغاية، مما يجعلها حرفياً تبدو وكأنها حرف "N". يمكن تشكيل هذا النوع من التوابع من خلال العلاقة (6)؛ حيث تمثل القيمة المنسوبة لـ A_i في المعادلة (2) [13]:

$$y_i(t) = \begin{cases} \tilde{A}_i \left(1 - 2 \frac{t - \tau_i}{L}\right) & , \tau_i \geq t \geq \tau_i + L_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

من الواضح أن اتساع موجة الصدمة يزداد مع انخفاض مسافة الخطأ. كما يختلف طول موجة الصدمة كدالة للمسافة إلى المسار. يمكن رؤية ذلك من المعادلة (3)؛ حيث يصبح شكل موجة الصدمة أطول، كلما تحرك المسار بعيداً عن المستشعر. في الشكل 3، في الصورة اليسرى، يمكن رؤية مثال لشكل موجة N مع جميع المعاملات الضرورية. لمقارنة الإشارة النموذجية بموجة صدمة حقيقية، يظهر أيضاً شكل موجة لإشارة موجة صدمة مسجلة في الصورة اليمنى.



الشكل (5). موجات الصدمة النمذجة والمسجلة والمعاملات الضرورية، A و L، للنمذجة. يمثل الخط الأحمر المتقطع في الصورة اليسرى موجة صدمة مثالية بمستوى ضوضاء صفري

2 - نقطة انطلاق الموجة الصدمية

تختلف نقطة a الخاصة بالمسار عن النقطة التي تنطلق منها بالفعل موجة صدمة المقذوفة، أي النقطة S . من أجل تقدير مسار المقذوف، يجب استنتاج النقطة a باستخدام النقطة S . يوضح الشكل 4 رسماً توضيحياً للنقطة S فيما يتعلق بالنقطة a . ويمثل الخط العريض خط النار، أي المسار المراد تقديره. المتجه g هو متجه الموقع للسلاح، بينما المتجه h يشير إلى اتجاه الهدف للرصاصة. يتم تحديد متجهات الموقع في الإحداثيات الديكارتيّة لنقطة معينة، على سبيل المثال: $g = [g_x, g_y, g_z]^T$

يتم تقدير زاوية θ_m Mach بين مقدمة موجة الصدمة ومسار المقذوفة. يمكن أن تختلف زاوية Mach بشكل كبير، اعتماداً على سرعة المقذوفة (1). بالنسبة للمقذوفات التي تكون أسرع قليلاً فقط من سرعة الصوت، تبلغ θ_m ما يقرب من 90 درجة، بينما بالنسبة للرصاصات السريعة جداً، يمكن أن تكون θ_m صغيرة مثل 20 درجة [15]. يتم الحصول على الزوايا والمقاييس المختلفة للشكل (4) بطرائق هندسية، كما سيتضح من المحاكاة اللاحقة؛ حيث يمكن استنتاج العلاقات بين النقاط المختلفة لتحديد بعد المستشعر عن مسار القذيفة.

3 - تقدير مسار المقذوفة

من المفترض أن موجة الصدمة - الناجمة عن نوع معين من البندقية وعتار المقذوفة - قد التقطت بواسطة مجموعة من المستشعرات. علاوة على ذلك، يُفترض أن إحداثيات المستشعرات معروفة. يمكن بعد ذلك حساب اتجاه واضح لوصول موجة الصدمة (DOA)، عندما التقطت مجموعة المستشعرات على الأقل موجة الصدمة. يعتمد تقدير DOA لموجة الصدمة على الفروق الزمنية بين موجة الصدمة الملتقطة من كل مستشعر. مع هذه الافتراضات، يتم اقتراح فكرة استخدام طرائق الاستدلال الاحتمالي.

أ. تقدير احتمالية وجود مسار

تعطي دالة الاحتمالية احتمالات لنتائج مختلفة للنظام، بالنظر إلى أن النتيجة المرصودة تتشكل وفقاً لبعض المعاملات المعروفة. من الممكن بناء دالة احتمالية لتقدير احتمالات موجة الصدمة المرصودة، التي تسببها رصاصة ذات مسار وسرعة وعتار مختار بشكل عشوائي. يتم هنا حساب قيم دالة الاحتمالية باستخدام طريقة الارتباط المتبادل المعمم (GCC). $generalized\ cross\ correlation$ يتم حساب CPA بين لحظة التقاط موجة الصدمة وموجات الصدمة النموذجية بناءً على (6). يتم حساب الارتباط بشكل منفصل لجميع أجهزة المستشعرات، كما يتم استخدام ما يسمى بوزن تردد تحويل الطور (PHAT) phase transform مع GCC:

$$C_i(t) = IFFT \left(\frac{X_i Y_i^*}{|X_i| |Y_i^*|} \right) \quad (7)$$

حيث يرمز IFFT إلى تحويل فورييه معكوس، X_i و Y_i هما متحولات فورييه لموجات الصدمة المرصودة والمولدة X_i و $Y_i(t)$ هي دالة الارتباط لقناة المستشعر i في اللحظة t ، حيث t يمكن أن تأخذ القيم: $t \in (-t_{max}, t_{max})$ ، t_{max} هو أقصى تأخير بين اثنين من المستشعرات. يجعل تحويل الطور المستخدم أطياف الحجم لإشارات موجة الصدمة مسطحة، بحيث يتم استخدام معلومات الطور فقط في حساب وظائف الارتباط [14]. يتم تحديد قيمة الاحتمالية لحالة الرمز النقضي p بالعلاقة:

$$P(P|O) = \max \left(\prod_{i=1}^n C_i(t) \right) , \quad t \in (-\tau_{max}, \tau_{min}) \quad (8)$$

حيث O عبارة عن مصفوفة $n \times N$ تحتوي على الإشارات المرصودة بطول N بواسطة n من المستشعرات المختلفة، و p عبارة عن متجه حالة يحتوي على قيم المعاملات المختلفة:

$$P = [a^T, \emptyset, v]^T \quad (9)$$

يمكن أيضاً النظر في طرائق أخرى لتحديد قيمة الاحتمالية، مثل متوسط الخطأ التربيعي (MSE) بين الإشارات المرصودة والنموذج، ولكن هنا تم الحصول على أفضل النتائج باستخدام GCC.

$$P(P_j^*, P_j^t) = \min \left(\frac{w(P_j^*)}{w(P_j^t)} \right) \quad (10)$$

ب - خوارزمية تقدير بعد مسار الطاقة عن المستشعر CPA

الإدخال: موجة الصدمة المرصودة بواسطة كل n من المستشعرات

الإخراج: CPA

1 - قم بتهيئة معلومات موجة الصدمة وفقاً للمعارف السابقة.

2 - من 1 إلى k

3 تكرار لمعلومات نبضة الصدمة 1 إلى m

4 تشقّق A-point باستخدام CPA لكل حالة

5 من أجل كل قناة مستشعر تحسب :

6 نموذج لموجة الصدمة الناتجة عن المقذوف الحالي p_j باستخدام المعادلات (2) ،

$$(3) ، (5).$$

7 والارتباط المتبادل بين موجة الصدمة المكتشفة والنموذج (7).

8 تضرب نتائج الارتباط، وتحصل على أقصى قيمة (8).

9 تحديث p_j باستخدام خوارزمية Metropolis (10).

10 إعادة حساب العينة $P1: m$ باستخدام خوارزمية إعادة التشكيل.

أفضل قيمة P_{best} هي متوسط $p1: m$ وهي قيمة (CPA) a

4 . نتائج المحاكاة

في النمذجة يتم تحديد موقع البندقية ومواقع كل المستشعرات، جنباً إلى جنب مع اتجاه المقذوفة وسرعتها وعايرها.

يمكن اختيار جميع المعاملات بحرية؛ بحيث يمكن اعتبار بيئة الاختبار متنوعة نسبياً. يتم حساب المسافات بين

المستشعرات المثبتة والمسار بواسطة [15]

$$Si Ai = \frac{|(Si-gi)*U|}{|U|} \quad (11)$$

حيث $|| h ||$ هو طولية المتجه h ، ويمثل \times الضرب الشعاعي للمتجهين، او بالعلاقة :

$$Si Ai = |Si - gi|. \sin \gamma \quad (12)$$

حيث: الزاوية γ زاوية خطأ التصويب بين اتجاه الهدف ومسار القذيفة، وتم وصف بقية الرموز سابقاً.

بالنظر إلى الشكل (6) ، يمكن العثور على العلاقة بين a والنقطة S من خلال حل جميع المتغيرات الهندسية.

الزاوية $\beta = 90^\circ - \theta_m$ ، بينما تحسب كل من $Si Ai$ & $Ai Bi$ من قاعدة الجيب:

$$SiAi = \frac{SiBi}{\sin \beta} , \quad AiBi = \frac{SiBi \sin \gamma}{\sin \beta} \quad (13)$$

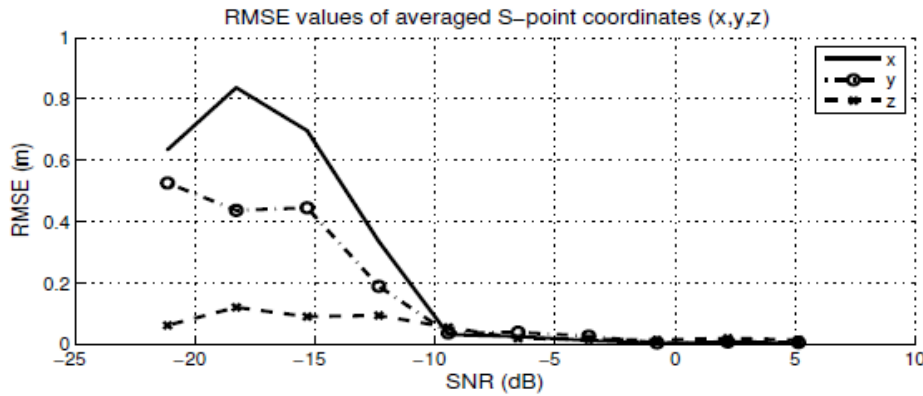
الآن يمكن نمذجة مراقب موجة الصدمة $x_i(i)$ وفقاً لإعدادات المحاكاة المختارة. كما تمت إضافة بعض الضوضاء الغوسية إلى الإشارات "المرصودة" لاختبار أداء التقدير بمستويات مختلفة من نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، والتي يتم حسابها لكل قناة i بالعلاقة:

$$SAN_i = 10 \log_{10} \frac{E_{x_i}}{E_{n_i}} \quad (14)$$

حيث: E_{x_i} و E_{n_i} هما طاقات الإشارات المرصودة (t) x_i والضوضاء المضافة لكل قناة على التوالي. يتم حساب الطاقة للإشارة (t) x_i من الطول N بالعلاقة:

$$E_{x_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)^2 \quad (15)$$

يتم رسم أخطاء جذر متوسط التربيع المعيارية (RMSE) لتقديرات متوسط النقطة S كدالة ل SNR في الشكل (6).



الشكل (6). قيم RMSE الطبيعية لتقديرات متوسط النقطة S كدالة لمستوى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR).

ويُعرّف خطأ RMS لتسلسل مراقبة بطول S على النحو التالي:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{ind}^S (\hat{\theta}_{ind} - \theta_{ind})^2} \quad (16)$$

حيث $\hat{\theta}_i$ و θ_i هي معاملات المتجه المقدر والمراقبة على الطول S المنسوبة إلى قيمة المتجه عند S، مما يبسط المقارنة بين أداء التقدير عند مستويات SNR المختلفة. مع انخفاض قيمة SNR، يبدأ خطأ RMS في الزيادة، كما يتوقع المرء. ومع ذلك، لا يزال الأداء جيداً عند مستوى SNR البالغ 8dB، وبعد ذلك يحدث ارتفاع مفاجئ في قيم الخطأ. تم حساب CPA وفق الخطوات التالية:

- ادخال خواص البارودة Mach والعيار (قطر الطلقة)
- تحديد أماكن مصفوفة الحساسات m_i وافترض موقع الأولي للقنص g
- نفترض خطأ التصويب الأولي $\gamma = 0.01$ راديان
- باستخدام العلاقتين (11 - 13) نحدد أقرب نقطة لمسار القذيفة من المستشعر.

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم استعراض مقاييس تقييم أداء الأنظمة الصوتية ذات المصفوفة الواحدة المستخدمة في تحديد موقع نيران الأسلحة الصغيرة. واستنتجنا أن عمل المقاييس الجيد ليس بالضرورة إعطاء حساباً حقيقياً لأداء النظام في ظروف التشغيل الفعلية. ولكنه يوفر وسيلة لقياس الأداء مقبول عند إعادة تطبيقه أكثر من مرة وبجهد معقول.

- تنتج الأسلحة الصغيرة أصواتا مثل الموجة الصدمية وانفجار فوهة السبطانة، بالإضافة إلى أصوات الانعكاسات والصدى. يتم التعرف على إطلاق الرصاص من خلال التعرف على الموجة الصدمية التي تصل لمسافات بعيدة باتجاه الاطلاق. بينما موجة انفجار الفوهة تتلاشى مع المدى، لذلك فإن الكشف يعتمد على مسافة الخطأ. على الرغم من أن التعرف على وجود انفجار واضح من فوهة السبطانة يساعد في التعرف على إطلاق رصاصة، لكن هذا حدث نادر. غالبًا ما يكون الرماة بعيدًا عن المستشعر، وقد يطلقون النار من بين المباني أو من داخلها.
- تستند مقاييس الأداء إلى تحديد مجال الخطأ لكل معامل: المدى وزاوية السمات وزاوية الارتفاع ومسافة الخطأ والعيار. يعتبر الحل جيدًا إذا كان الخطأ في كل من هذه المعاملات ضمن الحدود المحددة مسبقًا. احتمال الحل الجيد هو احتمال أن يكون الحل الذي تم إبلاغه إلى المشغل ضمن الحدود المحددة لجميع المعاملات.
- احتمال وجود إنذار كاذب ليس له معنى يذكر في سياق تحديد موقع نيران الأسلحة الصغيرة. إذا كانت ضوضاء الخلفية عشوائية حقًا، فمن المحتمل أن يتمكن المرء من ضبط الخوارزميات لتلبية احتمال معين للإنذار الخاطئ. بالنسبة إلى النظام الصوتي الذي يعمل في الهواء الطلق، فإن الأصوات المحيطة ليست عشوائية، ولكنها عبارة عن مجموع ضوضاء يمكن التعرف عليها مثل: حديث الناس، وغلق الأبواب، وتشغيل المحركات، وضوضاء المرور، وما إلى ذلك. قد يتسبب أحد هذه الأصوات في حدوث إنذارات كاذبة. إذا كانت الشركة المصنعة تعرف ذلك، فيجب إبلاغ المشغلين. كيف يمكن تجنب الأصوات المسببة لهذه الإنذارات الكاذبة.
- يظهر أن نهج التقدير المقترح قادر على حل مشكلة الاستدلال متعدد الأبعاد لتقدير حالة المقذوفة. لا يعتمد الارتباط المتبادل على اتساع الإشارة، والذي يعد، مرة أخرى، الأكثر موثوقية لتحديد مسافة الخطأ للمسار. لذلك، تركز المزيد من الأبحاث على تحسين المخطط المقترح، حيث يقترح بعض التسجيلات الجديدة باستخدام المستشعرات التي تمت معايرتها. يعد اختبار طريقة فصل مصادر الضوضاء مهمة مستقبلية أخرى يجب دراستها.

References:

- [1] Donzier, A., Cadavid, S., "Small arm fire acoustic detection and localization systems: gunfire detection system", 2015, Proc. SPIE Vol. 5778, p. 245–253.
- [2] Mazurek, J.A., Barger, J.E., Brinn, M., Mullen, R.J., Price, D., Ritter, S.E., Schmitt, D., "Boomerang mobile counter shooter detection system", 2005 , Proc. SPIE Vol. 5778, p. 264–282.
- [3] Bédard, J. Paré, S., Ferret, "A small arms fire detection system: Localization concepts", 2003 , Proc. SPIE Vol. 5071, p. 497–509.
- [4] Toni M. , Pasi P, and Pasi A , 2016 , " Supersonic Bullet State Estimation Using Particle Filtering", Department of Signal Processing, Tampere University of Technology
- [5] Bédard, J. Paré, S., Martin, B., G , 2019 , "An Acoustic Sniper Detection System", Proceedings of the 3rd NATO-IRIS Joint Symposium, Québec, Canada.
- [6] Carapezza, E.M., Law, D.B., Csanadi, C.J., DARPA, 2017, "counter-sniper program": Phase 1 Acoustic Systems Demonstration Results, Proc. SPIE Vol. 2938, p. 299–310.
- [7] Duckworth, G.L., Gilbert, D.C., Barger, J.E., 2016, "Acoustic counter-sniper system", Proc. SPIE Vol. 2938.
- [8] Bédard, J. 2019, "Performance Metrics for Acoustic Small Arms Localization Systems", 39th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS
- [9] Brian M. Sadler et al., "Optimal and wavelet-based shock wave detection and estimation," 1998, in J. Acoust. Soc. Am., pp. 955–963.

- [10] Brian G. Ferguson et al. 2017 , “Acoustic sensing of direct and indirect weapon fire,” in *Intelligent Sensors Sensor Networks and Information Processing*”, pp. 167–172.
- [11] P. Volgyesi et al., 2017 , “Shooter localization and weapon classification with soldier-wearable networked sensors,” in *Proceedings of the 5th International conference on Mobile systems, Applications and services,*
- [12] G. Whitman, 2009, “The flow pattern of a supersonic projectile,” in *Communications on Pure and Applied Mathematics*, pp. 301–348.
- [13] M. Sanjeev et al.,2021 “A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking,” in *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, VOL. 50, NO. 2, February, pp. 174– 187.
- [14] Edward M. et al.,2019 “Darpa counter-sniper program: Phase acoustic systems demonstration results,” , Eds., vol. 2938, no. 1. pp. 299–310.
- [14] R. Maher,2016, “Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings,” in *IEEE Signal Processing Society 12th DSP Workshop*, pp. 257–261.
- [15] T. Chen and H. Wu, 2009, “Adaptive impulse detection using center-weighted median filters,” in *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 8, No. 1, pp. 1–3.
- [16] A. Dufaux et al.,2020, “Automatic sound detection and recognition for noisy environment,” in *EUSIPCO 2020: European signal processing conference No. 10*, pp. 1033–1036.
- [17] T. Mäkinen, 2018, “Detection and direction estimation of impulsive sound sources using a microphone array.” Tampere University of Technology, Master of Science Thesis.