

تحديد موقع القناص بمستشعرات صوتية

المهندس مسعود علي علي*

ملخص

تقسم طراق تحديد موقع القناص إلى فئتين فرعيتين متميزتين – التخمين Estimation الذي يحدد مكان إطلاق النار ، والكشف Detection : الذي يحدد ما إذا كانت الإشارة المكتشفة هي نيران قنص أم ضوضاء.

تعتمد كلتا المشكلتين بشكل أساسي على الإشارات الصوتية من طلقة أو عدة طلقات نارية ، والتي يمكن اكتشافها، وتحديد زمن التقاطها بواسطة عُقد المستشعر الصوتي. يمكن بعد ذلك استغلال هذه القياسات لتقدير المكان الذي أطلقت منه الطلقة.

في هذا الدراسة ، استخدمنا MATLAB لتوليد عينة من قياسات وقت وصول إشارة انفجار فوهة السبطانة (Muzzle Blast (MB) ، والتي استخدمناها لحساب فرق وقت الوصول Time difference of arrival (TDOA) بين المستشعرات .

باستخدام نموذج يعتمد على بيانات TDOA ، تمكنا من تحديد زاوية وصول الطلقة (Angles of Arrives (AOA) وتنفيذ طريقة الاحتمال الأقصى Maximum likelihood method لتقدير موقع القناص. ومن ثم قمنا بالتحقيق في تأثير ترتيبات عقدة المستشعر المختلفة، وكذلك تباين المعاملات، على دقة تحديد الموقع. بالإضافة إلى التخمين ، استخدمنا اختبار طريق التثبيت لاستكشاف موقع القناص وفرضية Neyman-Pearson lemma (NPL) لتمييز طلقة القناصة عن الضوضاء.

الكلمات المفتاحية : تحديد الموقع - القناصة - المستشعر الصوتي - فرق وقت الوصول - زاوية الوصول -

* المهندس: مسعود علي علي طالب دكتوراه في جامعة البعث -كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات – بإشراف أ. د. شحادة الموسى

Locate the sniper with sound sensors

M. Masoud Ali Ali*

Summary

Sniper locating methods fall into two distinct subcategories - Estimation, which determines where to fire, and Detection, which determines whether the detected signal is sniper fire or noise. Both problems depend mainly on the acoustic signals from one or several shots, which can be detected, and when captured by the acoustic sensor nodes. These measurements can then be used to estimate where the shot was fired.

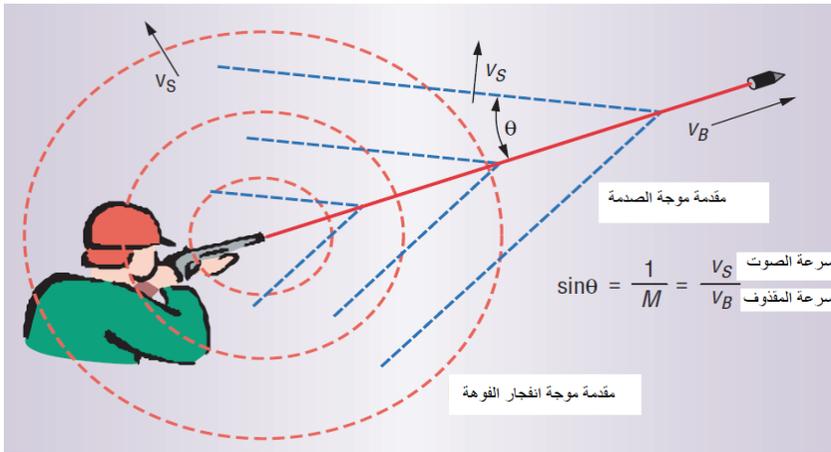
In this study, we used MATLAB to generate a sample of Muzzle Blast (MB) burst signal arrival time measurements, which we used to calculate the time difference of arrival (TDOA) between the sensors. Using a model based on TDOA data, we were able to determine the Angles of Arrives (AOA) shot angle and implement a maximum likelihood method to estimate the sniper's position. We then investigated the effect of different sensor node arrangements, as well as coefficient variance, on positioning accuracy. In addition to guesswork, we used the triangular road test to explore the sniper location and the Neyman-Pearson lemma (NPL) hypothesis to distinguish sniper shot from noise.

Keyword: locating - Sniper - acoustic sensor - time-of-arrival difference (TDOA)

* Engineer: Masoud Ali Ali, PhD student at Al-Baath University - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Department of Electronics and Communications Engineering - under the supervision of Prof. Dr.. Shehada Al-Mousa

1 - مقدمة

تحديد موقع القناص هو قضية مهمة في كل من الدفاع العسكري والأمن المدني. هناك العديد من الأنواع المختلفة لأنظمة تحديد موقع القناص المستخدمة اليوم، والتي تتكون من عقد استشعار يمكنها اكتشاف الإشارات مثل الصوت والحركة والضوء. يتناول البحث شبكة أجهزة الاستشعار الصوتية، والتي تتعرف على الظواهر الصوتية الناتجة عن طلقة نارية (قناصة) [1]. تعتمد هذه الأنظمة في المقام الأول على المعلومات الواردة من موجة الصدمة (*SW*) *the shot wave*، وهذه الموجة أسرع من الصوت وناتجة عن احتكاك المقذوف السريع مع الهواء. يولد المقذوف الأسرع من الصوت موجة اهتزاز في كل نقطة من مساره، مما ينتج عنه جبهة موجة مخروطية الشكل بافتراض أن سرعة المقذوف ثابتة، كما هو موضح بالشكل (1). وصوت الانفجار *muzzle blast* الناتج عند خروج الطلقة من فوهة السبطانة، وهو الشكل الموجي الناتج عن رصاصة تغادر السبطانة، وتشكل جبهة موجة كروية تنتقل بسرعة الصوت انطلاقاً من فوهة السبطانة ، لا يمكن اكتشاف موجة الصدمة إلا بواسطة أجهزة الاستشعار الموجودة داخل مسار الرصاصة - وهو مخروط سريع التوسع ، يكون محوره هو مسار الرصاصة [2] .



الشكل (1) الأحداث الصوتية الناتجة عن طلقة قناصة

تستخدم الأنظمة الصوتية القياسية مصفوفات من المستشعرات الصوتية، سواء كانت ثابتة أو متحركة، لاكتشاف هاتين الإشارتين وختمهما الزمني. في العمليات العسكرية، غالبًا ما توضع أجهزة الاستشعار على خوذات الجنود أو على مركبات المدفعية؛ ومع ذلك، فإن تنقل المستشعر والتداخل الناتج من الانعكاس في البيئة المحيطة يزيد من تعقيد مشكلة التقدير لدينا، لذلك طبقنا نموذجنا على شبكة استشعار صوتية ثابتة. من خلال النظر في موقع المستشعر بالاقتران مع قياسات الوقت من الظواهر الصوتية لطلقات نارية، من الممكن تقدير موضع القنص بدرجة عالية من الدقة [3].

تستخدم بعض الأنظمة تقنية وقت وصول متقدمة (*Time of Arrival*) *(TOA)* ، والتي تتعامل مع أخطاء المزامنة بشكل فردي عبر شبكة المستشعرات بالكامل. ومع ذلك، تعتمد غالبية الأنظمة على خوارزمية فارق التوقيت في الوصول *(Time difference of arrival)* *(TDOA)* لتحديد موقع منشأ الإشارة. تطبق معظم العمليات العسكرية نموذج *TDOA* الذي يستخدم مزيجًا من إشارات *Muzzle Blast (MB)* و *Shote Wave (SW)* . يؤدي تنفيذ نموذج يعتمد على موجة الصدمة لطلقة نارية إلى زيادة دقة التحديد، ولكنه يتطلب معرفة سرعة الرصاصة ومسارها، وهي معاملات ليس من السهل محاكاتها. لذلك، للتبسيط نظرنا فقط في انفجار *MB* في نموذج الإشارة الخاص بنا [4].

2 - هدف البحث:

تهدف هذه الدراسة، لتحديد موقع قنص يقوم بعملية قنص واحدة، ويختفي لفترة زمنية طويلة نسبيًا، وقد يقوم بتغيير مكانه عند الاطلاق مرة أخرى، وذلك باستخدام مصفوفة مكونة من ثلاث مستشعرات صوتية- لكشف الانفجار الناتج عند فوهة السبطانة *MB* - موضوعة على شكل مثلث قائم الزاوية، ويمكن تركيبها على خوذة الجندي لتشكل عقدة تحديد الاتجاه ، ومن خلال ربطها ضمن

شبكة مكونة من عدة عقد - على الأقل ثلاث عقد - يتم التحديد الدقيق لموقع القنص. ويجب الأخذ بالاعتبار التمييز بين الطلقة والضجيج.

3 - طريقة إجراء البحث:

نستخدم البيانات التي تم إنشاؤها بواسطة *MATLAB* لمحاكاة قياسات وقت الوصول (*TOA*) لإشارة انفجار الفوهة *MB*. نفترض وجود قنص واحد داخل شبكة المستشعرات الصوتية.

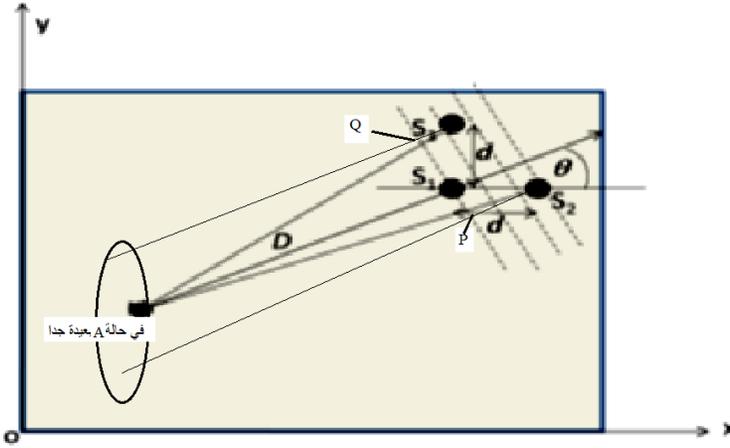
تم اقتراح تقنية تمكننا من تحديد موقع مصدر صوتي في وسط غير ايزوتروبي باعتبار أن وسط انتشار الصوت المراد كشفه يأتي من اتجاه واحد تقريبا لجميع المستشعرات لبعد مصدر الصوت (800 - 3000 متر)، وقرب المستشعرات المستقبلية من بعضها البعض (0.2- 0.3 متر)، والتي تتركب على خوذة الجندي، وبدون معرفة السرعة الدقيقة المعتمدة على الاتجاه في الوسط ومن دون الحاجة حتى لحل جملة معادلات غير خطية، لأننا اعتمدنا على الفرق الزمني لوصول الصوت إلى الحساسات القريبة من بعضه. وقد تم تحقيق هذه التقنية تجريبياً لأوساط مكوّنة من مواد موحّدة الخواص (بأربع حساسات استقبال) [5] ، مع ضرورة التنويه إلى وجود تقنيات أخرى لتحديد موقع المصدر الصوتي في وسط غير موحّد الخواص إلا أنها تحتاج لحل جملة معادلات غير خطية، و بالتالي فهي أكثر تعقيداً من الناحية الحاسوبية [6].

باستخدام ثلاث حساسات استقبال S_1, S_2, S_3 متوّضعة على الخوذة، كما هو في مابين بالشكل (2).

فإذا كانت إحداثيات الحساسات الثلاث S_1, S_2, S_3 هي على الترتيب: (x_3, y_3) و (x_2, y_2) ، (x_1, y_1) عندها يكون: $x_2 = x_1 + d$ ، $x_3 = x_1$ ، $y_2 = y_1 + d$ ، $y_3 = y_1 + d$. إحداثيات المصدر الصوتي A هي (x_A, y_A) والمسافة d بين الحساسات هي أصغر من المسافة D بين المصدر الصوتي، و

الحساس S_i وبالتالي زاوية الميل θ للمستقيمات AS_1, AS_2, AS_3 - كما في الشكل (2) - يمكن افتراضها على أنها متساوية تقريباً، و بسبب هذا الافتراض فإن الإشارات المستقبلية من هذه الحساسات الثلاثة، يجب أن تكون تقريباً متماثلة، ولكن مُزاحة زمنياً بعض الشيء، و سرعة الموجة في الاتجاه من نقطة المصدر A نحو الحساسات S_1, S_2, S_3 يجب أن تكون تقريباً متساوية حتى في حالة كون الوسط غير موحد الخواص، ويمكن التعبير عن الزاوية θ بالعلاقة:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_A}{x_1 - x_A} \right) \approx \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_A}{x_2 - x_A} \right) \approx \tan^{-1} \left(\frac{y_3 - y_A}{x_3 - x_A} \right) \quad (1)$$



الشكل (2) ثلاث حساسات استقبال في المواقع S_1, S_2, S_3 مستخدمة لتحديد الموقع

بعد الوصول إلى الحساس S_1 فإن الزمن اللازم لوصول مقدمة الموجة إلى الحساسين S_2 و S_3 ويسمى $t_{21} = t_2 - t_1$ و $t_{31} = t_3 - t_1$ على التوالي، ويُعطى هذان التأخيران الزمنيان بالعلاقة:

$$t_{21} = \frac{d \cos \theta}{c(\theta)} \quad \& \quad t_{31} = \frac{d \cos \theta}{c(\theta)} \quad (2)$$

حيث $c(\theta)$ هي سرعة الموجة في الاتجاه θ ، ومن المعادلة (2) يمكن استنتاج التالي:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{t_{31}}{t_{21}} \right) \quad (3)$$

و حسب المعادلة (2) يكون:

$$c(\theta) = \frac{d * \cos \theta}{t_{21}} = \frac{d * t_{21}}{t_{21} \sqrt{t_{21}^2 + t_{31}^2}} = \frac{d}{\sqrt{t_{21}^2 + t_{31}^2}} \quad (4)$$

في المعادلة (2) والشكل (2) تم استنتاج $\cos \theta = \frac{t_{21}}{\sqrt{t_{21}^2 + t_{31}^2}}$ باعتبار

أن:

$$(AS_2 - AS_1) = c(\theta)t_{21}$$

$$(AS_3 - AS_1) = c(\theta)t_{31} \text{ و}$$

وبافتراض المستقيمت الثلاثة AS_1, AS_2, AS_3 متوازية، وهي الحالة التي يكون فيها المصدر بعيد عن الحساسات- كما هو موضح بالشكل (2) - نلاحظ أن المثلثين S_1S_2P ، S_1S_3Q يكونا متشابهين في هذه الحالة.

الخطين AS_2, AS_3 يقطعان مقدمة الموجة الذاهبة إلى الحساس S_1 في

النقاط P, Q على التوالي، وبالتالي:

$$\cos \theta = \frac{PS_2}{S_1S_2} = \frac{PS_2}{\sqrt{PS_2^2 + PS_1^2}} = \frac{PS_2}{\sqrt{PS_2^2 + QS_3^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{c(\theta)t_{21}}{\sqrt{c(\theta)^2 t_{21}^2 + c(\theta)^2 t_{31}^2}} = \frac{t_{21}}{\sqrt{t_{21}^2 + t_{31}^2}} \quad (5)$$

من المعادلات (3) و (4) فإن اتجاه انتشار الموجة وسرعتها في هذا

الاتجاه يُستنتجان وفق القيم المُقاسة تجريبياً ل t_{21}, t_{31} .

3 - 1 - وقت الوصول (TOA)

بفرض T_i وقت وصول إشارة انفجار MB ، عبارة عن مصفوفة $m \times 1$ ؛ حيث m : هو عدد المستشعرات في الشبكة باعتبار وجود قنص واحد اطلق رصاصة واحدة . يتم تحديد وقت الوصول إلى المستشعر i بالعلاقة:

$$\tau_i = \frac{r_i}{c} + \tau_0 \quad (6)$$

حيث r_i هي المسافة من مستشعر i إلى مصدر إطلاق النار، و c هي سرعة الصوت، ثابتة عند 343.2 م / ث. τ_0 هو الأصل الزمني لانفجار MB ، ويتم نمذجته كضوضاء باستخدام توزيع غاوسي بمتوسط $\mu = 0$ ، والتباين σ^2 و T_i هو بالضبط الوقت بالثواني التي تستغرقه إشارة انفجار MB للوصول إلى المستشعر i ، بالإضافة إلى مصدر زمني عشوائي للإشارة.

3 - 2 - الفارق الزمني للوصول (TDOA)

بعد إنشاء بيانات TOA ، تمكنا من تحديد الفارق الزمني لقياسات الوصول لاستخدامها في نموذج الإشارة الخاص بنا. سمح لنا تعيين مستشعر واحد كمرجع بإيجاد الفرق بين أوقات الوصول إلى المستشعر المشار إليه وبقيّة المستشعرات في النظام - لكل مستشعر غير مرجعي i ، قمنا بحساب الفرق بين TOA في المستشعر المرجعي و TOA في المستشعر i ، والذي أعطانا إجمالي قياسات $TDOA$ $m-1$ لكل طلقة . تعد بيانات $TDOA$ أقوى بكثير من بيانات TOA لأنها تقلل من خطأ التزامن الزمني، الذي يحدث عندما تكتشف أجهزة استشعار متعددة نفس الإشارة، وبخلاف ذلك، سيتعين التعامل مع هذه المشكلة باستخدام تقنيات تحديد موقع GPS المتقدمة لكل مستشعر فردي. فيما يلي المعادلة الرياضية لـ $TDOA$.

$$TDOA = \tau_i - \tau_1 = \left(\frac{r_i}{c} - \frac{r_1}{c} \right) + (\tau_0^i - \tau_0^1) \quad (7)$$

3-3 - النموذج Model

يمكن كتابة النموذج النهائي للمعالجة على النحو $Y = \theta + e$ ، حيث Y هي البيئية، و θ هو الفرق الزمني الدقيق للوصول، و e هو الخطأ من قياسات أصل الوقت. Y و e مستقلتان وموزعتان بشكل طبيعي [6] بحيث:

$$Y \sim N(\theta, \sigma^2) \quad \& \quad e \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

$$Y = \theta + e = \left(\frac{r_i}{c} - \frac{r_1}{c} \right) + (\tau_0^i - \tau_0^1) \quad (9)$$

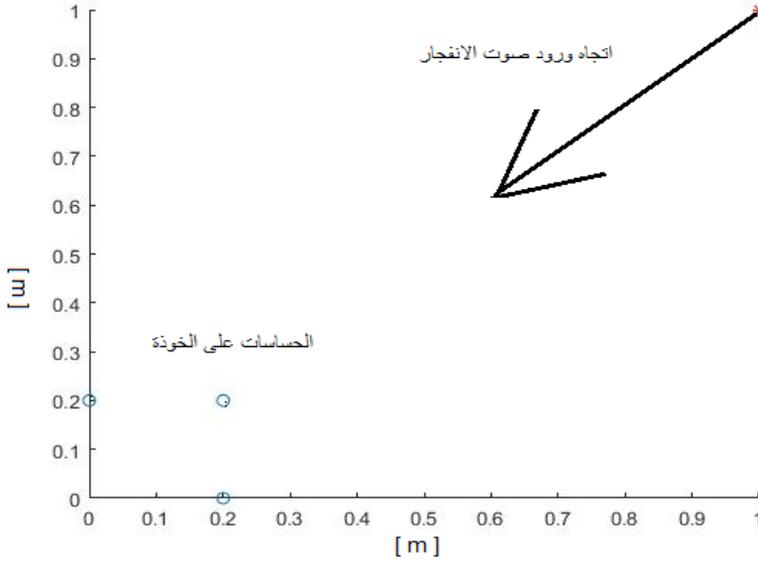
لتقدير موقع القناص، قمنا باستغلال البصمة الزمنية المتولدة للإشارات الصوتية، ثم حسبنا قياسات $TDOA$. افترضنا أن موضع القناص بعيد عن موقع الكشف وموضع عقد الاستشعار معروفان.

3-4 - التنفيذ Implementation

باستخدام هذه المعلومات، تمكنا من تحديد فرق زمن الوصول الى المستشعرات وبالتالي تحديد زاوية الوصول θ_i لكل مستشعر وبأخذ المتوسط نحصل على زاوية الورود لهذه العقدة، كما تم تجريب زيادة المسافة بين المستشعرات، وتبين أنه يحسن في دقة تحديد زاوية الورود AOA ، كما أنه باستخدام 5 مستشعرات يزيد دقة تحديد الزاوية AOA ، ولكن لاعتبارات عملية لا يمكن زيادة المسافة عن حد معين وزيادة عدد المستشعرات، لكي تبقى قابلة للتركيب على خوذة الجندي.

يتضح من التحليل أن مواقع القناصة سواء في العمليات العسكرية أو في الأمن المدني، ليست بالضرورة الأكثر ملاءمة لتقدير موقع إطلاق النار بدقة.

تم توضع المستشعرات الصوتية، كما هو موضح بالشكل (3) ، وتم تحديد موقع القناص من قبل كل مجموعة مستشعرات باعتبار أن موقع القناص الدقيق $(XA=3000 \ \& \ YA=3000 \ m)$.



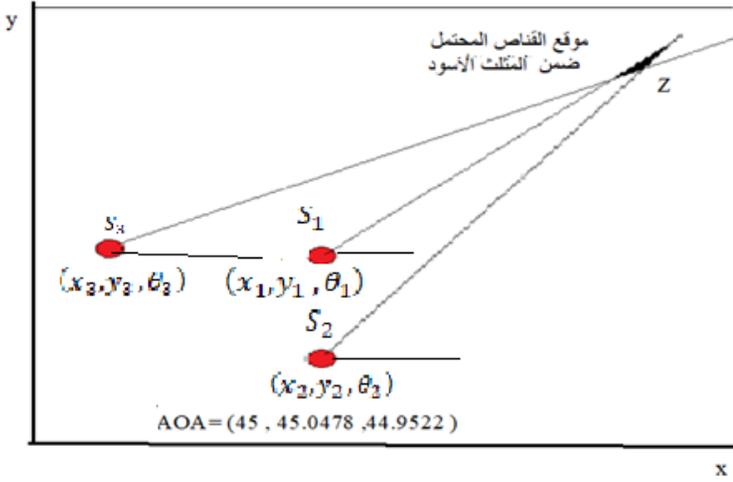
الشكل (3) توضع مجموعة المتشعرات الثلاثة

بحساب الفارق الزمني أو قياسه تجريبيا حصلنا على زوايا ورود الإشارة:

$$AOA = (45, 44.9522, 45.0478)$$

باستخدام طريقة التثليث يمكن حساب موقع القنص بدقة عالية كما هو مبين بالشكل (4). باعتبار كل دائرة تمثل جندي يحمل عقدة تحديد الموقع ومتصلة مع العقد الأخرى لاسلكيا لتبادل معلومات التحديد، والمسافة بين الجنود لا تزيد عن مدى الاتصال اللاسلكي (5 - 10 متر) [7].

لو أن عملية تحديد الزوايا دقيقة كان يجب أن تتقاطع الخطوط الثلاث في نقطة واحدة ، ولكن بسبب الخطأ المرتكب في عملية القياس فأن نقاط التقاطع تشكل مثلث تصغر مساحته كلما زادت دقة القياس. ولكن حسب نظرية الاحتمالات فإن القنص يقع في مركز ثقل المثلث. ولكن بسبب مساحة المثلث الصغيرة يمكن بتقريب جيد اعتبار مركز المثلث يقع في المتوسط الحسابي لرؤوس المثلث [8].



الشكل (4) يوضح طريقة تحديد الموقع بالتثليث

يتم حساب نقطة تقاطع المستقيمين المنطلقين من مكان الجنديين وبزاويتين معروفتين ، تم تحديدها من قبل مجموعة الحساسات المشكلة للعقدة على النحو التالي:

$$(10) \quad \tan \theta_2 = \Omega_2 = \frac{y-y_2}{x-x_2} \quad \tan \theta_1 = \Omega_1 = \frac{y-y_1}{x-x_1}$$

بحل جملة المعادلتين في (10) نحدد موقع التقاطع بالعلاقتين (11) و(12)

(12) التاليتين:

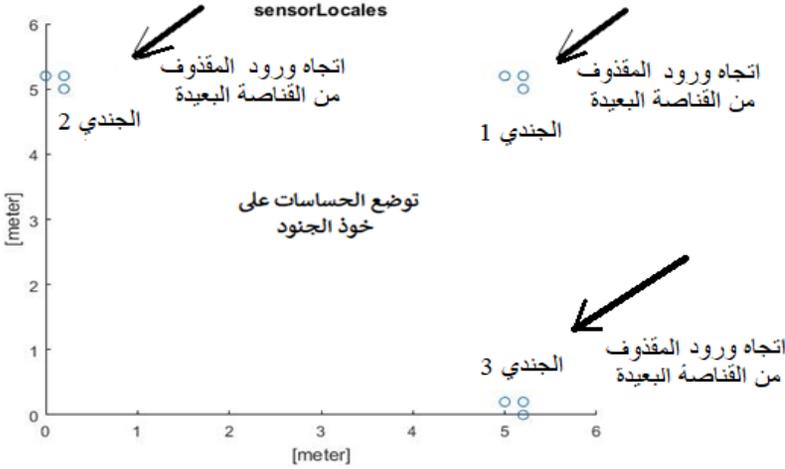
$$(11) \quad \dot{x} = \frac{(y_2-y_1)+\Omega_1 x_1-\Omega_2 x_2}{\Omega_1-\Omega_2}$$

$$(12) \quad \dot{y} = \frac{\Omega_1 \Omega_2 (x_2-x_1)-\Omega_1 y_2+\Omega_2 y_1}{\Omega_2-\Omega_1}$$

وبأخذ العقدة 1 مع 3 نحصل على نقطة التقاطع الثانية ، وبأخذ العقدة 2 مع 3 نحصل على نقطة التقاطع الثالثة . فيحدد عندها الاحتمال الأعظمي لموقع القناص بالعلاقة :

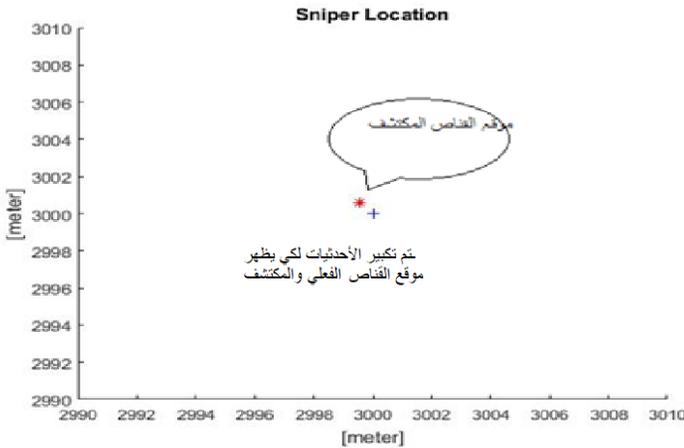
$$x^m = \frac{\dot{x}+\ddot{x}+\ddot{x}}{3} \quad , \quad y^m = \frac{\dot{y}+\ddot{y}+\ddot{y}}{3} \quad (13)$$

أما خطوات الحل فهي: ادخال مواقع الحساسات الموضوعة على خوذة الجندي، وكذلك توضع العقد (الجنود) كما في الشكل (5). وكذلك افتراض موقع القناص.



الشكل (5) توضع الحساسات على خوذة الجنود

كل عقدة على خوذة الجندي تحدد زاوية الورود AOA بعد إضافة الخطأ المرتكب من هذه الزوايا الثلاث يحدد موقع القناص المكتشف. والفرق بين الموقعين هو الخطأ الناتج عن القياس. كما هو موضح بالشكل (6)



الشكل (6) تحديد موقع القناص

3 - 5 - متوسط مربع الخطأ (MSE) Mean Square Error

يقيس متوسط الخطأ التربيعي (MSE) الفرق بين المقدّر وما هو مفاًس؛ بحكم التعريف، فإن MSE هو متوسط مجموع كل مصطلح تربيع خطأ. في نموذجنا، تم حساب متوسط مجموع الأخطاء التربيعية التي تغطي $m-1$ قياسات $TDOA$:

$$(14) \quad MSE = \frac{1}{m-1} * \sum_{i=2}^m (\theta - \theta_i)^2$$

ومع ذلك، نظرًا لأن هدفنا النهائي كان تقدير موضع القناص ، بدلاً من $TDOA$ ، فقد استبدلنا θ بـ x و y على النحو التالي [9]:

$$(15) \quad MSE = \frac{1}{m-1} * \sum_{i=2}^m (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$$

تمثل θ فرق وقت الوصول بين الإشارات في المستشعر المرجعي، ومستشعر آخر في الشبكة لإطلاق طلقة من الموضع (x_A, y_A) .

4 - التنفيذ Implementation

استخدمنا طريقة الاحتمال الأقصى وتعني الأخطاء التربيعية لتقدير موضع القناص. وشمل ذلك البحث في كل نقطة إحداثياتها عدد صحيح في نطاق معين لتحديد النقطة (x, y) ، التي أدت إلى أصغر خطأ مربع متوسط لقياسات $m-1$ $TDOA$ عبر طلاقات T . ومع ذلك ، من أجل تنفيذ هذه الخوارزمية ، كان علينا تحويل كل من إحداثيات (x, y) في مساحة البحث لدينا إلى قياس زمني مكافئ لقياسات TOA الدقيقة المرتبطة بها. تم إجراء هذا الحساب عن طريق إيجاد المسافة من كل نقطة إحداثيات، ومن ثم تم البحث عنها إلى موضع القناص الحقيقي وقسمة هذه المسافة على سرعة الصوت C ، وبمجرد الانتهاء من ذلك، تمكنا من تحويل كل تقدير من تقديرات الوقت إلى فارق زمني لتقديرات الوصول استنادًا إلى نموذج $TDOA$ الذي تمت مناقشته سابقًا.

بعد ذلك، وجدنا الفرق بين قياسات $TDOA$ المقدرة لدينا في مساحة البحث وأوقات $TDOA$ المتولدة ، وقمنا بتربيع كل من هذه الاختلافات أو الأخطاء ، ثم قمنا بتلخيصها عبر قياسات $TDOA$ $m-1$.

من أجل تقليل قيم MSE التي حسبناها ، أعلننا عن الحد الأدنى لمجموع متغير الأخطاء التربيعية (SSE) $Sum of Squared Errors$ ، والذي قمنا بمقارنة كل من القيم المحسوبة به. أثناء قيامنا بالتكرار من خلال مساحة البحث ، تم حفظ كل قيمة SSE جديدة تم الوصول إليها على أصغر قيمة سابقة ، بحيث كانت القيمة النهائية المعينة للمتغير الأولي هي القيمة الحقيقية للخطأ التربيعي الأدنى على مساحة البحث بأكملها.

ثم تم تحويل كل قيمة SSE إلى قيمة MSE عن طريق القسمة على قياسات

$m-1$ $TDOA$ لطلقة واحدة. أخيرًا ، من أجل إنتاج مخطط توطين كفاف ، تم إرفاق كل قيمة MSE بنقطة الإحداثيات المرتبطة بها (x, y) حتى نتتمكن من الرجوع إليها مرة أخرى إلى موقع القنص المقدر.

5 - النتائج Results

خلال التنفيذ تم تقدير الاحتمالية القصوى على نموذج الإشارة لدينا بفحص تأثير اختلاف المعاملات المختلفة في نظامنا. وتم استخدام المعاملات التالية في إعداد النظام الأساسي لدينا:

$$m \text{ (عدد المستشعرات): } 9 \quad \sigma \text{ (ضوضاء): } 0.01$$

$$\text{مساحة البحث: } [x_A-50, y_A-50], [x_A+50, y_A+50]$$

$$\text{موقع القنص الدقيق: } (x_A, y_A)$$

اختبرنا نموذجنا على مجموعة متنوعة من ترتيبات العقد التي يحملها

الجنود المتوقفين عشوائياً أو على خط مستقيم أو على محيط دائرة ، وفحصنا أداء تحديد الموضع لإعدادات الشبكة المختلفة. وكانت النتائج متشابهة بـ 98%.
 قمنا أيضاً بفحص ثلاثة أشكال هندسية للحساسات - دائرة من المستشعرات حول القنص، وأخرى تقع على مستقيم ، وأخرى ذات ترتيب عشوائي لأجهزة الاستشعار.

ينتج عن الترتيب الدائري تحديد مكان القنص بشكل دقيق للغاية ، ومع ذلك ، فإن هذا الترتيب غير واقعي في العمليات العسكرية. يحقق الترتيب العشوائي لعقد المستشعرات تقديراً دقيقاً أيضاً ، ولكن هذا يرجع على الأرجح إلى موقع القنص المركزي في النظام. على الرغم من دقته ، إلا أنه غير واقعي إلى حد ما ، على الرغم من أن هذا الترتيب يمكن اعتباره صفيين ثابتين مركبين على جوانب المباني المقابلة. ربما يكون ترتيب عقدة المستشعر على خط مستقيم أكثر صلة بتطبيقات الواقع الحقيقي لأنه يحاكي بشكل وثيق مجموعة ثابتة من أجهزة الاستشعار ، أو حركة مجموعة من الجنود في انسجام تام.

في محاكاتنا الأولية ، تم وضع المستشعرات على بعد خمسة أمتار ، مما أدى إلى أن تقديرنا بعيد قليلاً عن الهدف. حيث أن زيادة التباعد بين المستشعرات، أدى إلى زيادة قيم $TDOA$ الفعلية ، وزاد بشكل كبير من قدرة نموذجنا على تقدير الموقع الحقيقي للقنص. وبالمثل ، أدى تقليل المسافات البينية إلى متر واحد إلى توطين غير دقيق، على الرغم من أن هذا السيناريو أكثر واقعية في القتال.

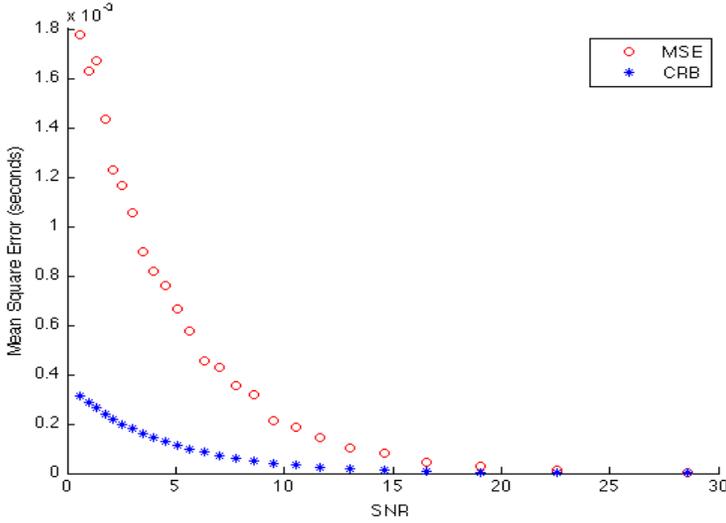
لتقييم أثر نسبة الإشارة إلى الضوضاء SNR ، اعتبرت إشارتنا هي متوسط أوقات وصول انفجار الطلقة MB على مستشعرات m . والشكل العام لـ SNR هو:

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left[\frac{P_s}{P_N} \right] = 10 * \log_{10} \left[\frac{avg(r)/c}{\sigma^2} \right] \quad (16)$$

نظراً لأن CRB و MSE و SNR تعتمد جميعها بشكل أساسي على مستوى الضوضاء σ ، تم تغيير σ لتحديد ما إذا كانت طريقة التقدير لدينا قادرة على تحقيق الخطأ التربيعي الأمثل أو الأدنى. يمكن رؤية هذه المقارنة في الشكل (7).

تم رسم كلاً من MSE كتابع لـ θ بالثنائي، و CRB مقابل SNR لـ 100 تجربة حيث $\sigma = 0: 0.01: 0.25$. مع انخفاض σ تزداد نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، ويتقارب متوسط الخطأ التربيعي مع $Cramér - Rao Bound$.

استخدمنا نظرية الكشف للتحقيق في الاختلاف بين نيران القنص والضوضاء واختبار الفرضيات المطبقة في دراستنا لتأكيد ما إذا كانت الإشارات المولدة ناتجة عن مطلق النار في نظام استشعار واحد، أو مجرد ضوضاء. لتقدير هذا التمييز، استخدمنا اختبار $Neyman-Pearson (NP)$ وهو "أفضل اختبار ممكن" لحجم محدد α [10].



الشكل (7) تابعة MSE و CRB لـ SNR

وأخيراً يمكن تلخيص الغرض من بحثنا هو تخمين موقع القنص باستخدام شبكة من وحدات الاستشعار الصوتية، التي يمكنها اكتشاف انفجار فوهة طلاقة نارية. قمنا بمحاكاة قياسات وقت الوصول في *MATLAB* ، واستخدمنا طريقة تقدير الاحتمالية القصوى في نموذج الإشارة الخاص بنا لتحديد موضع القنص. تشير نتائجنا إلى أننا بنينا نموذجاً قوياً، والذي يمكن أن يخمن بدقة موقع القنص من خلال نماذج متنوعة في ترتيبات عقد المستشعرات المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، أسفر تنفيذنا لاكتشاف القنص عن نتائج عالية الدقة للإشارة المولدة من طلاقة واحدة لقنص واحد وشبكة مستشعرات واحدة.

المراجع References

- 1) D. Lindgren, O. Wilsson, F. Gustafsson and H Habberstad, 2019 " shooter Localization in Wireless Sensor Networks," Information Fusion, vol. 12th, pp. 404- 411.
- 2) G.T. Whipps, L.M. Kaplan, and R. Damarla, 2015 " Analysis of sniper localization for mobile, asynchronous sensors," Signal Processing. Sensor Fusion and Target Recognition, vol. 7336, no. XVIII.
- 3) P. Bestagini, M. Compagnoni, F. Antonacci, A. arti, S. Tubaro, 2013, " TDOA- based acoustic source localization in the space- range reference frame,"Multidimensional Systems and Signal Processing, no. March .
- 4) G.L. Duckworth, D.C. Gilbert, J.E. Barger, 2019, " Acoustic counter- sniper system," Command, Control, Communications and Intelligence Systems for Law Enforcement, vol. 3938,
- 5) D.Lanning and M.Swarzenski , 2019 ,” Sniper Localization Using Acoustic Sensors”,Final Report, Brian
- 6) A.K. Tellakula, 2017 ,” Acoustic Source Localization Using Time Delay Estimation” Indian Institute of Science, 82p.
- 7) T. Bokareva, W. Hu, K. Salil, B. Ristic, N. Gordon, 2006, " Wireless Sensor Networks for Battlefield Surveillance," Land Warfare Conference (Brisbane), no.October.
- 8) Susan Holmes, " Maximum Likelihood Estimation , 2018, " (Class Notes and Useful Defintions), no. 156.
- 9) P.Volgyesi, G. Balogh, A. Nadas, Ch.B. Nash and A. Ledecz, 2021, “ Shooter Localization and Weapon Classification with Soldier-Wearable Networked Sensors”, Vanderbilt University Nashville, TN, USA.
- 10) G. Simon, M. Maróti and etc.,2017,” Sensor Network-Based Countersniper System”, Baltimore, Maryland, USA.
- 11) مواقع انترنت بالعشرات معظمها دعايات لأنظمة توطين أنظمة إطلاق النار