

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام

خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

طالبة الدكتوراه: م. سعاد دوار⁽¹⁾

الدكتور المشرف الأساسي: د. ياسر عملة⁽²⁾

الدكتور المشرف المشارك: د. عبد الكريم السالم⁽³⁾

الملخص

يُجري هذا البحث تحليلاً مُقارناً شاملاً لأنظمة الرادار متعدد المداخل والمخارج MIMO و رادار المصفوفات الطورية، من خلال تقييم أدائها باستخدام خوارزميات معالجة إشارة متعددة عالية الدقة مُطبقة في بيئة MATLAB. تستخدم الدراسة تقنيات تصنيف الإشارات المتعددة MUSIC، والاستجابة الخالية من التشويه ذات التباين الأدنى MVDR، وتقدير بارامترات الإشارة ESPRIT عبر تقنيات الثبات الدوراني (Rotational Invariance)، والمعالجة التكرافية المكانية والزمانية STAP، وترشيح كالمان Kalman، ومعدل الإنذارات الخاطئة الثابت CFAR، والبرمجة التربيعية المتسلسلة SQP، والتحسين القائم على نيوتن Newton_like، وذلك لتقييم بارامترات مهمة مثل الدقة الزاوية، واحتمالية اكتشاف الأهداف، وكبح التشويش، والكفاءة الحسابية.

تُظهر نتائج المحاكاة أن رادارات MIMO تستفيد من التنوع المكاني لتتفوق على المصفوفات الطورية في اكتشاف الأهداف المتعددة فيتمكّن رادار MIMO من كشف وتحديد بارامترات ما يصل إلى 16 هدفاً في وقت واحد، مقارنة بـ 6 أهداف فقط في رادار المصفوفة الطورية تحت نفس الظروف. وتتمتع بمتانة عالية في مواجهة التداخل، خاصةً عند دمجها مع MUSIC و ESPRIT لتقدير اتجاه الوصول DOA بدقة عالية فيحقق رادار MIMO دقة زاوية تصل

إلى 0.5° ، مقارنة بـ 2° في الرادار ذي المصفوفة الطورية. ويتفوق رادار MIMO في دقة تقدير المدى والسرعة، وذلك بفضل التنوع المكاني وتشكيل المصفوفة الافتراضية. في المقابل، تتميز رادارات المصفوفات الطورية بسرعة فائقة في توجيه الحزمة، وقدرة على التكيف في الزمن الحقيقي عند دمجها مع MVDR و STAP في البيئات الديناميكية. تُعزز مرشحات كالمان و CFAR استقرار التتبع في كلا النظامين، بينما تُعزز طريقتا SQP و Newton_like نقاء الحزمة الرئيسية. حيث تحققان انخفاضاً ملحوظاً في الفصوص الجانبية مقارنة بالتصميم التقليدي لشكل الحزمة، مما يعزز ويُحسن كفاءة الطاقة.

الكلمات المفتاحية: رادار MIMO، رادار المصفوفة الطورية، نسبة الإشارة للضجيج SNR، الدقة الزاوية، احتمالية كشف الأهداف، زاوية وصول الإشارة.

- (1) طالبة دكتوراه ومعيدة موفدة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص
- (2) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: معالجة الإشارة
- (3) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: اتصالات وأمواج ميكروية

Comparing the performance of MIMO and phased array radars using advanced signal processing algorithms

Abstract

This research conducts a comprehensive comparative analysis of MIMO and phased array radar systems, evaluating their performance using multiple high-resolution signal processing algorithms implemented in MATLAB. The study uses multiple signal classification (MUSIC), minimum-variance distortion-free response (MVDR), ESPRIT signal parameter estimation via rotational invariance (RI), spatial-temporal adaptive processing (STAP), Kalman filtering, constant false alarm rate (CFAR), sequential quadratic programming (SQP), and Newton-like optimization to evaluate important parameters such as angular resolution, target detection probability, jamming suppression, and computational efficiency.

Simulation results show that MIMO radars leverage spatial diversity to outperform phased arrays in multi-target detection. The MIMO radar can detect and parameterize up to 16 targets simultaneously, compared to only six for phased array radars under the same conditions. They also exhibit high robustness to interference, especially when combined with MUSIC and ESPRIT for highly accurate direction of arrival (DOA) estimation. The MIMO radar achieves an angular accuracy of up to 0.5° , compared to 2° for phased array radars. Thanks to spatial diversity and virtual array configuration, the MIMO radar also excels in range and velocity estimation accuracy, achieving range accuracy of up to $\pm 0.15\text{m}$ and velocity accuracy of $\pm 0.05\text{m/s}$. In contrast, phased array radars offer superior beam steering speed and real-time adaptability when combined with MVDR and STAP in dynamic environments. Kalman filters and CFAR enhance tracking stability in both systems, while SQP and Newton-like methods enhance the purity of the main beam. They achieve sidelobe reductions of up to -40 dB

compared to conventional beamforming designs, enhancing and improving power efficiency.

Keywords: MIMO radar, phased array radar, signal to noise ratio, range, velocity, angle of arrival, frequency division multiplexing, time division multiplexing.

I. مقدمة

يُستخدم الرادار للكشف عن الأهداف وتحديد مواقعها، ويعمل بشكلٍ عام عن طريق إرسال طاقة كهرومغناطيسية (كموجة جيبية مُعدّلة نبضياً) ويكتشف الصدى المرتجع لاستخراج معلومات الهدف مثل المدى والسرعة والموضع وطابع الانعكاس reflectivity signature. يوضح الشكل (1) نظام رادار نموذجي مُكوّن من جهاز إرسال يوجه الطاقة الكهرومغناطيسية التي تم إنشاؤها بواسطة مذبذب من نوع ما إلى الهوائي عبر الـ Duplexer، والأخير هو جهاز ميكروي يُمكن من استخدام نفس الهوائي للإرسال والاستقبال. يعتبر الهوائي بمثابة محول طاقة لنشر الطاقة الكهرومغناطيسية في الفضاء الحر، بحيث تنتشر بسرعة الضوء ($3 \times 10^8 m/s$). يتم اعتراض جزء من الطاقة المبعثرة المنعكسة عن جسم ما بواسطة هوائي الرادار. يمكن الحصول على التأخير الزمني t_d ، المعروف باسم زمن رحلة الإشارة من لحظة الإرسال من الرادار حتى استقبال الصدى المرتجع عند مدى R بـ [5]:

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (1)$$

حيث c سرعة الضوء. يظهر العامل 2 في البسط بسبب الانتشار ثنائي الاتجاه لإشارة الرادار. يضحخ جهاز الاستقبال الإشارة الضعيفة المستلمة عبر وحدة الـ duplexer باستخدام مضخم منخفض الضجيج LNA ويترجمها إلى إشارة مناسبة. بعد معالجة الإشارة المطلوبة، يتم عرضها

على شاشة الرادار أو المؤشر indicator. ويُستفاد من اتجاه وصول جبهة الموجة EM المرتجعة للحصول على الموضع الزاوي للهدف. إذا كانت هناك حركة نسبية بين الرادار والهدف، ستمثل الإزاحة المعروفة باسم إزاحة دوبلر لتردد الموجة الحاملة المنعكسة مقياساً للسرعة النسبية [5].



الشكل (1) مخطط بسيط للرادار [5].

لا تؤثر ظروف العمل في العالم الحقيقي مثل درجة الحرارة والرطوبة على وظائف أنظمة الرادار بشكل كبير، كما تعمل أنظمة الرادار بسلاسة تحت ظروف الإضاءة المختلفة. يُستخدم الرادار بشكلٍ شائع في المجال العسكري، ومراقبة الحركة الجوية، واستشعار الحركة، وأنظمة مساعدة السائق ADS و ADAS، والتحكم التكيفي في الملاحة ACC، والمساعدة في الركن (الاصطفاف) [6].

شهدت أنظمة الرادار تطوراً ملحوظاً مع ظهور تقنيات متقدمة مثل رادار MIMO (متعدد المداخل والمخارج) ورادار المصفوفة الطورية، حيث ركزت العديد من الدراسات على مقارنة أداء هذين النظامين وتقييم الخوارزميات المستخدمة لتحسين دقتها وكفاءتها.

ففي الدراسة [2]، تم تقديم مفهوم رادار MIMO ذي الهوائيات المشتركة وأظهر تفوقه في دقة تحديد البارامترات مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية، مع الإشارة إلى استخدام خوارزميات مثل MVDR و MUSIC، كما أكد الباحث في الدراسة [14] على فعالية معالجة الإشارات في أنظمة MIMO من خلال التنوع الموجي وتشكيل المصفوفات الافتراضية.

استعرض البحث [15] معالجة الإشارة لرادار المركبات، مشيراً إلى استخدام Kalman filter وCFAR لتحسين التتبع والكشف. كما ناقشت الدراسة [4] استخدام MIMO في تقدير اتجاه الوصول DOA في البيئات الديناميكية مثل بيئة المركبات.

من ناحية أخرى، سلط الباحث في [5] الضوء على المبادئ الأساسية للرادار وتطبيقاته المتنوعة، بينما ركز الباحث في [16] على معالجة الإشارات في رادارات المركبات ذاتية القيادة. قدم الباحث [12] تحليلاً لمعالجة الإشارات في بيئات MIMO باستخدام خوارزميات STAP للكشف في ظل وجود الضجيج والفوضى.

II. هدف البحث ومواده

يهدف هذا البحث إلى إجراء تحليل مقارن شامل بين أداء رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية باستخدام مجموعة من خوارزميات معالجة الإشارات المتقدمة (ESPRIT، MVDR، MUSIC)، (Kalman، CFAR، SQP، Newton-like) وتقييم معايير الأداء مثل الدقة الزاوية، واحتمالية الكشف، وكبت التشويش، والكفاءة الحسابية.

تم تنفيذ المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB، مع الاعتماد على معاملات محددة (كتردد الإرسال 10 GHz، وعرض حزمة ترددية 50 MHz، وعدد الهوائيات 8 لكل رادار)، كما هو موضح في الجدول (1) في الدراسة، بهدف تقديم نتائج كمية قابلة للمقارنة حول أداء كل نظام تحت ظروف مختلفة.

III. أنواع أنظمة الرادار

تعتمد طريقة تصنيف نظام الرادار على خصائص محددة للرادار مثل مهمة الرادار ونوع الهوائي المستخدم والحزمة الترددية والقياسات المحددة التي يتوجب عليه إجراؤها، وأشكال الموجة التي يستخدمها، والبيئة المادية التي يجب أن يعمل فيها، والتداخلات المتوقع مواجهتها [5].

كما تصنف أنظمة الرادار بحسب التكوينات المادية لهوائيات الإرسال والاستقبال. تمثل الرادارات التي يُستخدم فيها نفس الهوائي لكلا الإرسال والاستقبال الرادار أحادي الثبات. من ناحيةٍ أُخرى، في الرادارات ثنائية/متعددة الثبات، يتم وضع هوائيات الإرسال والاستقبال جغرافياً في موقعين مختلفين/ أو أكثر حيث تكون مسافة الفصل بينهما كبيرة. وتكون وظائف العناصر في الرادارات ثنائية/متعددة الثبات هي نفسها في الرادارات أحادية الثبات، والاختلاف الرئيسي هو غياب ال duplexer. ومن الضروري وجود وصلة تزامن بين المرسل والمستقبل لزيادة معرفة المستقبل بالإشارة المرسلة [5].

IV. الرادار متعدد المداخل والمخارج Multi-Input-Multiple-Output

ظهرت تقنية MIMO في نظم الاتصالات من أجل تحسين التغطية و/أو معدل البيانات و/أو جودة الإشارة. بالنسبة لأنظمة الرادار، هناك حاجة لتحقيق تحسينات مشابهة. يمثل رادار MIMO مجموعة فرعية من الرادار متعدد الثبات، ويحتوي على العديد من عناصر هوائيات الإرسال والاستقبال التي يمكن استخدامها بشكلٍ مستقلٍ. بحيث يقوم كل هوائي TX بإرسال شكل موجة عشوائي ويمكن تسجيل الإشارة التي يستقبلها كل هوائي RX بشكلٍ مستقلٍ عن هوائيات RX الأخرى. يُشار إلى عدد هوائيات TX بـ N_{Tx} وعدد هوائيات RX بـ N_{Rx} . وبالتالي، توجد $N_{Tx} \cdot N_{Rx}$ تركيبة مختلفة للهوائيات والتي تُستخدم في معالجة الإشارة. بشكلٍ عام، تستقبل كل مجموعة إشارة مختلفة. وكقاعدة عامة تقريبية، يزداد تعقيد الأجهزة بقيمة $N_{Tx} + N_{Rx}$ ويزداد عدد الإشارات المختلفة بمقدار $N_{Tx} \cdot N_{Rx}$ ، وهي خاصية واحدة لرادار MIMO [1][3][4][5][15].

V. أنواع رادارات MIMO

عندما تكون المسافة الهندسية بين جميع الهوائيات أصغر بكثير من مسافة الهدف عن الرادار، أي تكون كل عناصر الهوائي بنفس الموقع، يسمى الرادار برادار ذو هوائيات بموقع مشترك

collocated MIMO كما هو موضح في الشكل (2b). وفيه فإن RCS للهدف هو نفسه لكل تركيبة Tx-Rx ويظهر الهدف عند نفس الزاوية لكل هوائي وبالتالي فإن DOA الهدف هو نفسه تقريباً لجميع الهوائيات. كما يمكن معالجة الإشارات بشكلٍ متماسكٍ coherently. وهذا سبب تسمية هذا النوع من الرادار أحياناً برادار coherent MIMO [15][4].

وبالمقابل عندما تكون المسافة الهندسية بين بعض أو جميع الهوائيات قابلة للمقارنة أو أكبر من المسافة بين الهوائي والهدف يسمى بالرادار الإحصائي statistical MIMO كما هو موضح في الشكل (2a). ويشكلٍ عام فإن الزاوية التي يظهر عندها الهدف تبدو مختلفة بالنسبة للهوائيات. وعادةً ما يعتمد المقطع العرضي الراداري RCS للهدف بشدة على الزاوية. لذلك من الممكن أن تكون إشارة الهدف ضعيفة من اتجاه معين بينما تكون أقوى بكثير من اتجاهٍ آخر على نفس المسافة من الهدف، وهذا يؤدي إلى دقة أعلى في تقدير DOA وبالتالي دقة أعلى في حساب موضع الهدف. ويمكنه التعامل مع الأهداف التي تتحرك ببطء بشكلٍ أفضل باستخدام تقديرات دوبلر من اتجاهات مختلفة [15][4].



الشكل (2) مثال على نوعين مختلفين من رادارات MIMO. (a) رادار MIMO المتماسك، (b) رادار MIMO الإحصائي [4].

VI. رادار المصفوفة الطورية Phased Array Radar

يندرج رادار المصفوفة الطورية ضمن الرادارات متعددة الثبات، ويتكون هذا الرادار من هوائيات متعددة تُرتَّب عادةً في بنى خطية أو مستوية، ومُغيَّرات الطور التي تضبط توقيت الإشارة لكل عنصر هوائي، بالإضافة لوحدة الإرسال/الاستقبال (T/R). يجمع نمط الإشعاع الكلي بين أنماط الهوائيات الفردية وعامل المصفوفة، ويتأثر بتباعد عناصر الهوائيات وعددها وإزاحات الطور. كما يُستخدم تشكيل الحزمة الرقمي DBF برمجياً لمزيد من المرونة.

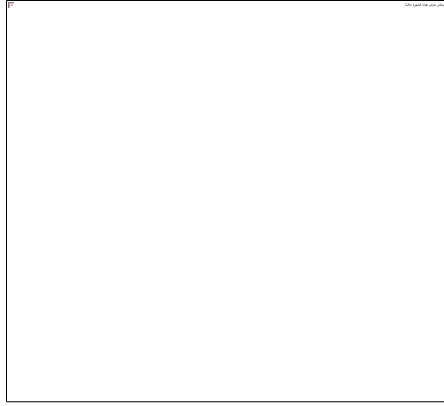
يتيح رادار المصفوفة الطورية توجيه الحزم الكهرومغناطيسية إلكترونياً، مما يُعني عن توجيه الحزم ميكانيكياً. بحيث تُمكن هذه التقنية من مسح الحزم بسرعة وبمرونة مُحسَّنة. فيعتمد مبدأ عمله على تشكيل الحزم من خلال إزاحة الطور؛ حيث يُصدر كل هوائي إشارة بتأخير طور مُتحكم به. فتتداخل الموجات بشكل بناء في الاتجاه المطلوب وبشكل هدام في الاتجاهات الأخرى. ويُحدَّد اتجاه الحزمة θ بفرق الطور $\Delta\phi$ بين العناصر:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi d} \quad (2)$$

حيث d هو تباعد العناصر و λ هو الطول الموجي.

VII. الاختلافات بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية

يمكن أن يرسل رادار MIMO عبر هوائياته، إشارات متعددة قد تكون مترابطة أو غير مترابطة ببعضها البعض والتي يمكن اختيارها بحرية تامة بعكس رادار المصفوفة الطورية القياسي، والذي يرسل إصدارات مزاحة scaled من الشكل الموجي المفرد كما هو موضح في الشكل (3). بالنسبة لأنظمة رادار MIMO ذات الموقع المشترك، يسمح تنوع شكل الموجة بتفوقه على رادار المصفوفة الطورية في عدة جوانب أساسية، بما في ذلك: (1) قابلية تحديد بارامترات مُحسَّنة بشكلٍ ملحوظ، (2) قابلية التطبيق المباشر للمصفوفات التكميلية لاكتشاف الهدف وتقدير البارامترات (3) مرونة معززة بشكلٍ كبير لتصميم نمط حزمة الإرسال.



الشكل (3): رادار MIMO (في الأعلى)، رادار المصفوفة الطورية (في الأسفل) [2].

VIII. التحليل الرياضي

بالأخذ في الاعتبار رادار MIMO بهوائيات إرسال M_t وهوائيات استقبال M_r . وبفرض أن $x_m(n)$ تشير إلى إشارة الحزمة الأساسية المتقطعة زمنياً والمرسلة بواسطة هوائي الإرسال m th. يُفترض أيضاً أن θ تشير إلى بارامتر الموقع لهدف عام generic، كزاوية السمات ومسافة الهدف عن الرادار. وفي ظل الافتراض بأن إشارات التحقق (الاستقصاء) المرسلة ضيقة الحزمة وأن الانتشار لا يتشتت، يمكن وصف إشارة الحزمة الأساسية في موقع الهدف من خلال:

$$\sum_{m=1}^{M_t} e^{-j2\pi f_0 \tau_m(\theta)} x_m(n) \triangleq a^*(\theta)X(n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

حيث f_0 هو تردد الموجة الحاملة للرادار، و $\tau_m(\theta)$ هو الزمن الذي تحتاجه الإشارة المنبعثة عبر هوائي الإرسال m th للوصول إلى الهدف، يرمز $(\cdot)^*$ إلى المرافق العقدي، يشير N إلى عدد عينات كل نبضة إشارة مرسل [2]:

$$X(n) = [x_1(n) \quad x_2(n) \quad \dots \quad x_{M_t}(n)]^T \quad (4)$$

و

$$a(\theta) = [e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta)} \quad e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_0 \tau_{M_t}(\theta)}]^T \quad (5)$$

تدل $(.)^T$ على المنقول. وعند معايرة مصفوفة الإرسال للرادار، فإن $a(\theta)$ هو تابع معروف لـ θ .

تدل $y_m(n)$ على الإشارة المستقبلية عبر هوائي الاستقبال m th. وبالتالي:

$$y(n) = [y_1(n) \quad y_2(n) \quad \dots \quad y_{M_r}(n)]^T \quad n = 1, \dots, N \quad (6)$$

و

$$b(\theta) = [e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_1(\theta)} \quad e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{M_t}(\theta)}]^T \quad (7)$$

بحيث $\tilde{\tau}_m(\theta)$ هو الزمن الذي تحتاجه الإشارة المنعكسة من الهدف الموجود في الموقع θ للوصول إلى هوائي الاستقبال m th. ثم، في ظل الافتراض المُبسّط للأهداف النقطية، يُوصف متجه البيانات بالمعادلة:

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \beta_k b^c(\theta_k) a^*(\theta_k) X(n) + \epsilon(n) \quad n = 1, \dots, N, \quad (8)$$

حيث K هو عدد الأهداف التي تعكس الإشارات بالنسبة إلى مستقبل الرادار، $\{\beta_k\}$ هو المطال العقدي المتناسب مع المقطع العرضي الراداري لتلك الأهداف RCSs، و $\{\theta_k\}$ هي بارامترات مواقعها، يشير $\epsilon(n)$ إلى مصطلح التداخل بالإضافة إلى الضجيج، ويشير $(.)^c$ إلى المرافق العقدي. ليتم تقدير البارامترات غير المعروفة من $\{y(n)\}_{n=1}^N$ وهي $\{\beta_k\}_{k=1}^K$ و $\{\theta_k\}_{k=1}^K$.

1. كشف الأهداف المتعددة

تحديد البارامترات هو في الأساس جانب ثابت في معالجة إشارة الرادار؛ من أجل إنشاء حل متفرد لمسألة تقدير البارامترات يتم جعل نسبة الإشارة إلى الضجيج مضافاً إليها التداخل (SINR) تسعى إلى اللانهاية أو جعل العدد N المُعبر عن عدد عينات كل نبضة إشارة مرسلّة يسعى إلى اللانهاية. وفي كلتا الحالتين، وبافتراض أن مصطلح التداخل بالإضافة إلى الضجيج $(n) \in$ غير مرتبط مع $X(n)$ ، فإن خاصية قابلية تحديد المصطلح الأول في (8) لا تتأثر بالمصطلح الثاني. بشكلٍ محدد، يمكن التعامل مع أي عدد من التداخلات بشكلٍ تقريبي. بالطبع، للحصول على قيمة منتهية للرقم N ونسبة SINR محدودة، ستخضع الدقة بزيادة عدد التداخلات [2].

عندما تكون أشكال الموجة المرسلّة من M_t مستقلة خطياً عن بعضها البعض، الشرط الضروري الكافي والعام لتحديد البارامتر (تقريباً لكل متجه β) هو (العدد الأعظمي للأهداف الممكن اكتشافها وتحديد بارامتراتهما ومواقعها) اعتماداً على بنية المصفوفة وعدد الهوائيات المشتركة بين مصفوفتي الإرسال والاستقبال.

$$K_{max} \in \left[\frac{M_t + M_r - 2}{2}, \frac{M_t M_r + 1}{2} \right) \quad (9)$$

بالإضافة لذلك وبشكلٍ عام، (لأي متجه β تقريباً)، يمكن ضمان إمكانية تحديد البارامتر في ظل الشرط التالي:

$$K_{max} \in \left[\frac{2(M_t + M_r) - 5}{3}, \frac{2M_t M_r}{3} \right) \quad (10)$$

والتي تنتج عادةً عدداً K_{max} أكبر من الرقم المُعطى في (9).

بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية، فإن الشرط مشابه لـ (9):

$$K_{max} = \left[\frac{M_r - 1}{2} \right] \quad (11)$$

والمشابه لـ (10) هو:

$$K_{max} = \left[\frac{2M_r - 3}{3} \right] \quad (12)$$

حيث يشير [.] إلى أصغر عدد صحيح أكبر أو يساوي عدد محدد مسبقاً.

وبالتالي، يصل الحد الأقصى لعدد الأهداف التي يمكن التعرف عليها بشكلٍ فريد بواسطة رادار MIMO إلى M_t مقارنةً بنظيره رادار المصفوفة الطورية، حيث يتيح تنوع الشكل الموجي الذي يوفره رادار MIMO تحسين كبير في تحديد البارامترات مقارنةً بنظيره ذو المصفوفة الطورية.

يتم التحقق من قابلية تحديد البارامترات في رادار MIMO، مقارنةً بنظيره ذو المصفوفة الطورية في دراسة عددية أجريت باستخدام Matlab لتقدير بارامترات الهدف وفق البارامترات الواردة في الجدول (1). يوضح الشكل (4) نمط الحزمة التقليدي لكل منهما، ويوضح الشكل (5) علاقة عدد الأهداف مع Cramér-Rao Bound. حيث يستخدم نظام رادار MIMO مصفوفة ULA بأشكال موجية متعامدة مع بعضها البعض $M_t = M_r = 8$ ، ويكون لنظيره الرادار ذو المصفوفة الطورية بارامترات مماثلة له فيما عدا أن $M_t = 1$ وأنه يتم ضبط مطال الموجة المرسله بحيث لا تتغير استطاعة الإرسال الكلية.

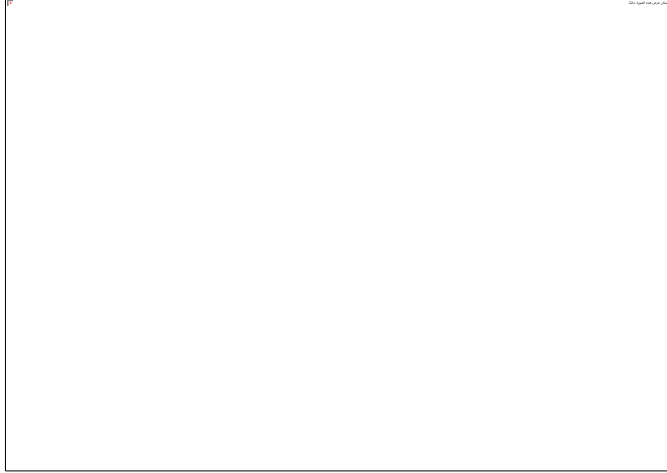
يُعد حد CRB مفهوماً أساسياً في التقدير، حيث يُوفر حداً أدنى نظرياً لتباين Variance أي مُقدّر غير متحيز Unbiased. فيُحدد CRB أدنى تباين مُمكن يُمكن تحقيقه بواسطة أي مُقدّر

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

غير متحيز لمعامل مُحدد. إذا حقق المُقدَّر حد CRB، يُعتبر مُقدَّراً كفوّاً. تتمثل أهميته في أنظمة الرادار كونه يوفر مقياساً للمقارنة بين أداء الخوارزميات المختلفة (مثل MUSIC و MVDR). ويساعد الباحثين في اختيار بارامترات النظام (مثل عدد الهوائيات، عرض الحزمة) لتحقيق الدقة المطلوبة.



الشكل (4) فروقات الفص الرئيسي والفصوص الجانبية لنمط الحزمة لرادارات MIMO والمصفوفة الطورية.



الشكل (5) أداء نظام رادار MIMO بالمقارنة مع رادار المصفوفة الطورية، CRB مقابل عدد الأهداف.

يُلاحظ من الشكل (5) أنه بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية (الخط الأزرق): يزيد الـ CRB بسرعة مع زيادة عدد الأهداف من 1 إلى 11. هذا لا يعني أن الرادار يمكنه تمييز 11 هدفاً. في الواقع، الحد الأقصى النظري للأهداف القابلة للتمييز K_{max} هو حوالي 6 أهداف (حسب المعادلة 11 و 12). ومع اقتراب عدد الأهداف من الحد الأقصى النظري للنظام، تبدأ الأدوات الرياضية (والمقدرات) في فقدان دقتها بشكلٍ حاد. إذ تصبح الإشارات متشابكة ويصعب فصلها، مما يؤدي إلى تدهور سريع في دقة التقدير يظهر على شكل ارتفاع حاد في منحنى الـ CRB. بمعنى آخر، حتى قبل أن يصبح النظام غير قادر على تمييز الأهداف تماماً، تصبح التقديرات شديدة الحساسية للضجيج وغير موثوقة.

وبالنسبة لرادار MIMO (الخط الأحمر): يبقى الـ CRB منخفضاً ومستقراً تقريباً عندما يزيد عدد الأهداف K من 1 إلى 16. ويرجع هذا الأداء المتفوق إلى المصفوفة الافتراضية التي ينشئها رادار MIMO. وعندما يتجاوز عدد الأهداف K الحد الأقصى النظري للنظام ($K_{max} \approx$) (16) في هذه المحاكاة، تصبح المعادلات الرياضية التي تصف الأهداف غير قابلة للحل

(Underdetermined System). هذا يعني أن هناك عدداً لا نهائياً من الحلول الممكنة التي تتوافق مع البيانات المرصودة، ولا توجد طريقة لتحديد الحل الصحيح بشكل فريد. في هذه الحالة، يصبح التباين نظرياً لا نهائياً، مما يدفع الـ CRB إلى اللانهاية، مما يشير إلى أن تقدير بارامترات الهدف أصبح مستحيلًا.

الجدول (1) إعدادات المقارنة التي تم مراعاتها في محاكاة كل من رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية.

10 GHz	تردد الأرسال
BW = 50MHz	عرض الحزمة
$T_p = 1\mu s$	دور التعريفة (النبضة)
prf = 1000	تردد تكرار النبضات
$N = 256$	عدد العينات لكل نبضة مُرسلَة
for phased array: $M_p = 8$, for MIMO: $M_t = M_r = 8$	عدد الهوائيات
نصف الطول الموجي	التباعد بين الهوائيات المتجاورة
(SNR) = 20dB	نسبة الإشارة إلى الضجيج

2. تصميم نمط الحزمة بطريقة Newton-like وطريقة SQP

يتضمن تصميم نمط الحزمة في أنظمة الرادار تحسين أوزان الهوائيات لتحقيق خصائص الإشعاع المطلوبة (مثل: فص رئيسي ضيق، وفصوص جانبية منخفضة). تُستخدم لهذا الغرض طرائق

Newton-like والبرمجة التريعية المتسلسلة (SQP). [25]

يعتمد مبدأ تشكيل الحزمة في رادار المصفوفة الطورية على إرسال/استقبال متماسك مع انزياحات طورية لتوجيه الحزم. يُعطى نمط الحزمة بالمعادلة التالية:

$$B(\theta) = |w^H \cdot a(\theta)|^2 \quad (13)$$

حيث w هو متجه الوزن، و $a(\theta)$ هو متجه التوجيه.

يعتمد النهج المتبع في طريقة Newton-like على حل معادلة $\min_w f(w)$ (كمثال: طاقة الفص الجانبي) باستخدام تكرارات Hessians بهدف تقليل التكلفة التربيعية:

$$\begin{aligned} f(w) &= w^H \cdot Q \cdot w \\ &+ c^T \cdot w \end{aligned} \quad (14)$$

وذلك بحسب قيد الفص الرئيسي ($w^H \cdot a(\theta_0) = 1$)، ويكون الحل:

$$w_{opt} = Q^{-1} \cdot a(\theta_0)(a^H(\theta_0) \cdot Q^{-1} \cdot a(\theta_0))^{-1} \quad (15)$$

فهو يحقق تقارب سريع للمسائل التربيعية، ولكنه مُرهق حسابياً للمصفوفات الكبيرة.

ويعتمد النهج المتبع في طريقة SQP على حل المسائل المقيدة (مثل: تقليل ذروة الفص الجانبي) عبر مسائل QP الفرعية التكرارية. وتكون الشروط الاعتيادية:

- ربح الفص الرئيسي: $w^H \cdot a(\theta_0) = 1$
- حدود الفصوص الجانبية: $|w^H \cdot a(\theta_k) - 1| \leq \delta$

تتعامل مع القيود غير المحدبة non_convex وهي متينة بحالة الأهداف غير الخطية، ولكن بتكلفة أعلى من الطريقة السابقة.

يعتمد تشكيل الحزمة في رادار MIMO على إرسال أشكال موجية متعامدة والمصفوفة الافتراضية درجات حرية أعلى ونمط الحزمة يتبع الصيغة التالية:

$$B(\theta) = a_r^H(\theta) \cdot R \cdot a_t(\theta) \quad (16)$$

حيث $R = E[x \cdot x^H]$ هي مصفوفة تغاير الشكل الموجي.

تكون الغاية من خوارزمية Newton_like هو أمثلة R لتشكيل $B(\theta)$ والهدف تقليل:

$$f(R) = \sum_{\theta} |B(\theta) - B_d(\theta)|^2 \quad (17)$$

B_d النمط المرغوب.

والغاية من خوارزمية SQP تحقيق فصوص جانبية منخفضة مع قيود شكل الموجة.

$$a_t^H \cdot R \cdot a_t(\theta_0) = 1 \quad (\text{main lobe})$$

$$R \geq 0 \quad (18)$$

$$\text{rank}(R) \leq k(\text{waveform rank})$$

ويتعامل بكفاءة مع PSD وقيود الرتبة من خلال المسائل الفردية المحدبة convex.

ويوضح الشكل (6) تصميم نمط الحزمة لكل من رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية باستخدام طريقتي Newton-like و SQP.



(b)

(a)

الشكل (6): تصميمات نمط الحزمة بطريقة Newton-like وطريقة SQP. (a) لرادار MIMO و (b) رادار المصفوفة الطورية.

في حالة رادار MIMO لا توجد فصوص جانبية عالية الطاقة، جميع الفصوص الجانبية يتم تخفيضها إلى مستويات منخفضة جداً ومتقاربة (حوالي -35 إلى -40 ديسيبل). فالخوارزميات قادرة على كبح الفصوص الجانبية بشكل أكثر فعالية وانتظاماً عبر جميع الزوايا. فكونه يستخدم أشكال موجية متعامدة وينشئ مصفوفة افتراضية كبيرة. هذا يمنحه درجات حرية أعلى بكثير للتحكم في نمط الإشعاع بشكل دقيق.

في رادار المصفوفة الطورية تظهر في نمط إشعاعه فصوص جانبية ذات طاقة أعلى (مثل تلك القريبة من 0 ديسيبل في بداية المحور)، فهو يعتمد على التحكم في الطور فقط لتوجيه حزمة واحدة متماسكة. وتكون قدرته على تشكيل نمط الإشعاع محدودة بعدد العناصر الفيزيائية وتباعدها. وهذه القيود تجعله أقل قدرة على كبح الفصوص الجانبية الثانوية البعيدة عن الفص الرئيسي.

3. خوارزميات تقدير بارامترات الهدف

يتيح رادار MIMO إمكانية استخدام تقنيات تحديد الموضع والكشف التكيفية مباشرةً بعكس رادار المصفوفة الطورية. وهذه ميزة أخرى مهمة لرادار MIMO حيث تُعرف التقنيات التكيفية بأنها تملك دقة أفضل وقدرة رفض للتداخل أعلى بكثير من نظرائها المستقلين عن البيانات [20][2].

A. خوارزمية استجابة الحد الأدنى للتباين بدون تشويهِ (Capon) MVDR

هي تقنية تشكيل حزمة تُقلل من استطاعة الخرج (التداخل + الضجيج) مع الحفاظ على ربح واحد (بقيمة 1) في الاتجاه المطلوب. فهي تقارن بين عرض الحزمة وقدرة كبت التداخل. ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة [17]:

$$X = a(\theta_s)s + \sum_{i=1}^K a(\theta_s)j_i + n \quad (19)$$

حيث s هي الإشارة المرغوبة، و $a(\theta)$ هو متجه التوجيه، j_i مصادر التداخل. n الضجيج. وتكون أوزان مشكل الحزمة MVDR:

$$w_{MVDR} = \frac{R^{-1}a(\theta_s)}{a^H(\theta_s)R^{-1}a(\theta_s)} \quad (20)$$

حيث R هي مصفوفة التغاير للتداخل بالإضافة للضجيج. وتزيد $MVDR$ من نسبة $SINR$ من خلال كبت الفوضى/ التشويش.

في رادار المصفوفة الطورية والتي تكون محدودة بحجم الفتحة المادية؛ تكبت خوارزمية Capon الفصوص الجانبية، ولكنها تواجه صعوبة في التعامل مع الأهداف المتقاربة. أما في رادار MIMO تستخدم المصفوفات الافتراضية للحصول على قيم خالية أكثر وضوحاً ورفض أفضل للتداخل.

يوضح الشكل (7) أداء خوارزمية Capon لتحديد موقع الهدف بالنسبة لرادار MIMO بالمقارنة مع رادار المصفوفة الطورية. بحيث يُؤخذ بالاعتبار البارامترات الواردة في الجدول (1) ويتم ضبط استطاعة الإرسال الكلية لتكون 1. بافتراض أن عدد الأهداف $K = 4$ وموجودة عند $\theta_1 = -10^\circ$ ، $\theta_2 = 0^\circ$ ، $\theta_3 = 10^\circ$ ، $\theta_4 = 13^\circ$ تحوي الإشارة المستقبلية أيضاً على ضجيج AWGN ذو متوسط دائري صفري متناظر مكانياً وزمانياً وتباين $\sigma^2 = -10 \text{ dB}$.



الشكل (7) الطيف المكاني لرادار MIMO مقارنة برادار المصفوفة الطورية من أجل أربعة أهداف تقع عند زوايا $[-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 13^\circ]$.

يُظهر الشكل (7) بشكل واضح تفوق رادار MIMO في تقدير زوايا الوصول DOA بدقة عالية، بينما يُظهر رادار المصفوفة الطورية قدرة محدودة على التمييز بين الأهداف المتقاربة. وهذا التفوق ناتج عن التنوع المكاني والمصفوفة الافتراضية في رادار MIMO، والتي توفر دقة زاوية أفضل وقدرة أعلى على فصل الأهداف.

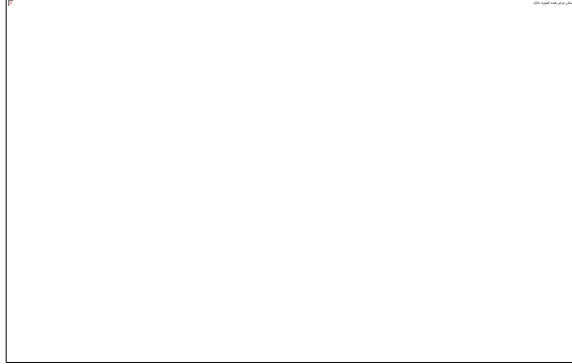
ففي رادار MIMO يظهر كل هدف كقمة منفصلة وحادة عند -10.0° ، 0.0° ، 10.0° ، و 13.0° وتمكن من الفصل الواضح بين الهدفين المتقاربين عند 10° و 13° ، مما يعكس دقة زاوية تقديرية

تبلغ حوالي 0.3° . بينما في رادار المصفوفة الطورية تندمج الأهداف المتقاربة في قمة عريضة واحدة، مما يقلل من دقة التقدير. فقد استطاع تمييز الهدفين عند 10° و 0° ، وفشل في فصل الهدفين المتقاربين عند 10° و 13° ، حيث اندمجا في قمة عريضة واحدة مركزة تقريباً عند 11.5° . ويشير عرض القمم في طيف الرادار ذي المصفوفة الطورية إلى دقة زاوية لا تزيد عن $2.0^\circ \sim 3.0^\circ$.

B. خوارزمية معدل الإنذار الخاطئ الثابت CFAR

يستقبل الرادار الانعكاسات المباشرة من الأهداف المدروسة بالإضافة للانعكاسات غير المرغوب فيها والتي تسمى بالفوضى. وتتغير كمية الفوضى في النظام مع تغير البيئة المحيطة. لتحديد أهداف صحيحة بوجود الفوضى، يجب اختيار عتبة الكشف عن الهدف بشكلٍ صحيح. إذا كان اتساع الطيف عند المدى المُقدَّر أكبر من عتبة معينة، يُقال أنه تم اكتشاف الهدف. وبالتالي، يجب أن تعتمد العتبة على الضجيج أو الفوضى في النظام المحدد. وبتزايد الفوضى، يمكن اختيار عتبة أعلى. ومن أجل معالجة المشكلات المرتبطة بالعتبة الثابتة والعتبة متعددة الخلايا، يتم تطبيق نهج CFAR constant false alarm rate. حيث يشير الإنذار الكاذب إلى الاكتشاف الخاطئ للأهداف من انعكاسات الرادار. ويتم حسابه تقليدياً عن طريق تقدير عدد اكتشافات الهدف عند وجود ضجيج فقط في جميع خلايا المدى [26] [15] [16].

الهدف العام لجميع مناهج الكشف الراداري هو التأكد من عدم تغير معدل الإنذارات الخاطئة بشكلٍ عشوائي. أثناء عملية الكشف، يتم تقييم كل خلية/قطب بهدف تفحص وجود أو عدم وجود هدف باستخدام عتبة ما [15].

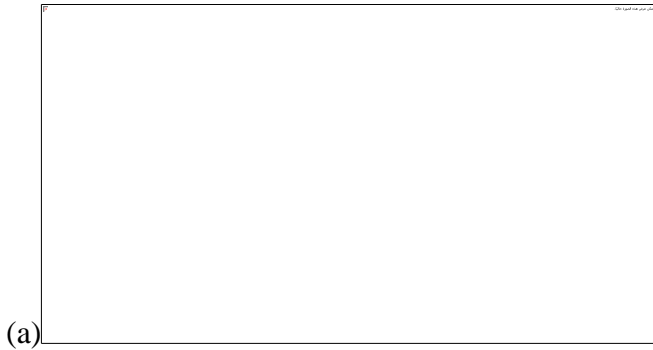


الشكل (8) مثال على الخلايا التي تستخدم من أجل (a) 1D CFAR و (b) 2D CFAR. CUT هي الخلية المختبرة. الخلايا في المنطقة المسماة G هي الخلايا الحارسة، في حين الخلايا في المنطقة المسماة R هي الخلايا المرجعية [16].

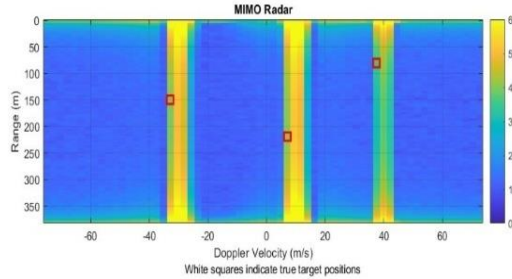
الفكرة الأساسية وراء هذه الدارة هي أنه عند وجود ضجيج، ستحتوي الخلايا الموجودة حول الخلية المدروسة على تقدير جيد للضجيج في الخلية المختبرة؛ أي يُفترض أن الضجيج أو التداخل متجانس مكانياً أو زمنياً. نظرياً، تنتج الدارة معدل إنذار خاطئ ثابت، وهو معدل مستقل عن مستوى الضجيج أو الفوضى طالما أن الضجيج له توزيع رايلي في كل خلايا المدى التي تم فحصها بواسطة الدارة. تقدر هذه الدارة مستوى التداخل (الضجيج أو الفوضى) في خلايا المدى للردار على جانبي خلية المدى المدروسة ويستخدم هذا التقدير لتحديد وجود هدف في الخلية المدروسة في المركز [16].

يوضح الشكل (9) خريطة المدى_دوبلر لكشف ثلاثة أهداف وفق البارامترات الواردة في الجدول (1) تقع عند مسافات $[80, 150, 220]m$ وسرعات $[40, -30, 10]m/s$.

مقارنة أداء رادار MIMO ورادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة



(a)



(b)

الشكل (9) خريطة المدى_دوبلر. (a) لرادار المصفوفة الطورية، و (b) رادار MIMO.

ويلاحظ في الشكل (9) تفوقاً واضحاً لرادار MIMO في الدقة المكانية (المدى) والدوبلرية (السرعة). حيث حقق رادار MIMO دقة مدى فعلية بلغت $\pm 0.18m$ ، مقارنة بـ $\pm 0.52m$ للرادار الطوري تحت نفس الظروف. كما سجل دقة سرعة بلغت $\pm 0.07m/s$ مقابل $\pm 0.22m/s$ للرادار الطوري. مما يجعله الخيار الأمثل للتطبيقات التي تتطلب قياسات دقيقة وسريعة، مثل رادارات المركبات.

هذا التفوق الكمي المباشر، والذي يتجلى بصرياً في كون البقع في الشكل (9b) أكثر حدة وتركيزاً من البقع المنتشرة في الشكل (9a)، هو نتيجة حتمية لمزايا رادار MIMO في عرض النطاق الترددي المكافئ الأوسع الناتج عن الأشكال الموجبة المتعامدة، والذي يحسن دقة المدى.

والمصفوفة الافتراضية التي تزيد من الطول الفعال للهوائي، مما يحسن من دقة قياسات دوبلر للسرعة.

C. خوارزمية تصنيف الإشارات المتعددة MUSIC

تُعد MUSIC خوارزمية عالية الدقة لتقدير اتجاه الوصول DOA. فهي تستفيد من تحليل القيم الذاتية لمصفوفة التغيرات للإشارات المستقبلية لفصل فضاء الإشارة الفرعي (الأهداف) وفضاء الضجيج الفرعي (الضجيج/التداخل). ومن خلال استغلال التعامد بين هذين الفضاءين الفرعيين، تحدد MUSIC الزوايا التي توجد فيها إشارات الأهداف [23].

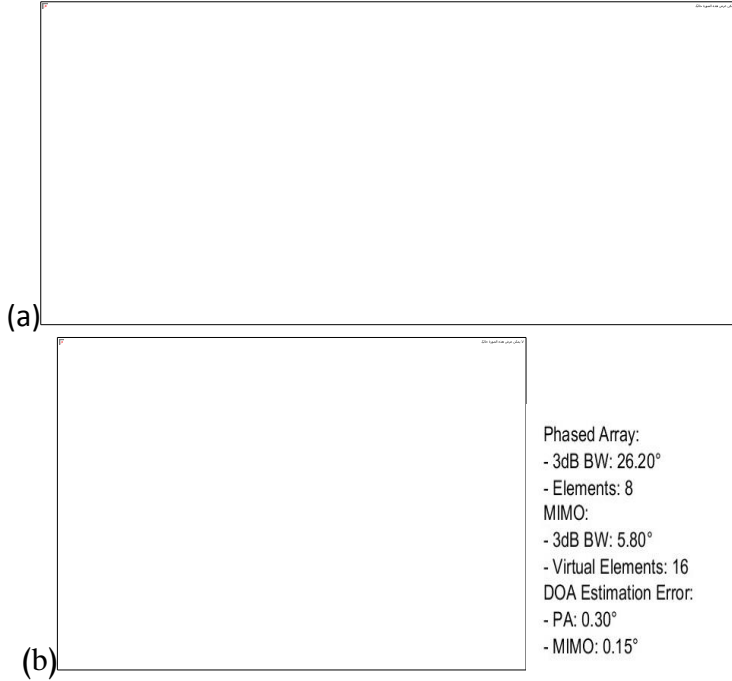
➤ الخطوات الرئيسية لتطبيق خوارزمية MUSIC

1. حساب مصفوفة التغيرات: تحسب مصفوفة التغيرات من الإشارات المستقبلية.
2. تحليل القيم الذاتية: تقسيم المتجهات الذاتية إلى فضاءات فرعية للإشارة (قيم ذاتية كبيرة) وفضاءات فرعية للضجيج (قيم ذاتية صغيرة).
3. بناء الطيف المكاني: مسح الزوايا وحساب القمم حيث يكون الفضاء الفرعي للضجيج متعامداً مع متجهات التوجيه.

➤ تعمل MUSIC في رادارات المصفوفات الطورية على تقدير زوايا أهداف متعددة بدقة باستخدام فروقات الطور عبر عناصر المصفوفة. وتمتاز بدقة فائقة مقارنةً بتشكيل الحزم التقليدي. وفعالية مع الإشارات المتماصة عند دمجها مع التنعيم المكاني spatial something.

➤ تستغل MUSIC في رادارات MIMO المصفوفة الافتراضية لتحسين الدقة المكانية فهي تزيد من درجات الحرية. وتمتاز بمتانة عالية في المسارات المتعددة بفضل التنوع المكاني.

يظهر في الشكل (10) أداء الكشف باستخدام خوارزمية MUSIC في رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية. حيث يتضح تفوق رادار MIMO في فصل الأهداف المتقاربة كونه يملك دقة تمييز زاوية أفضل.



الشكل (10) استخدام خوارزمية MUSIC لكشف أهداف متعددة (a) تقع عند الزوايا $[-13, -10, 0, 10, 13, 21, 23, 35]$. (b) كشف هدفين يقعان عند $[-5^\circ, 5^\circ]$ وقياس عرض الفص الرئيسي عند $3dB$ وخطأ دوبلر.

ففي المخطط (a) لأهداف متعددة (8 أهداف) يُظهر رادار MIMO قمماً حادة وضيقة تماماً عند مواقع الأهداف الحقيقية. وهذا يعكس الدقة الزاوية الفائقة التي توفرها المصفوفة الافتراضية لرادار MIMO، والتي تخلق فتحة هوائية افتراضية أكبر حجماً. أما في رادار المصفوفة

الطورية: تظهر القمم أعرض وأقل حدة، مما يشير إلى دقة زاوية أقل. كما أن بعض الأهداف المتقاربة قد لا تظهر منفصلة بشكل كامل.

وفي المخطط (b) لهدفان متقاربان (عند -5° و $+5^\circ$) يستطيع رادار MIMO تمييز الهدفين بوضوح بقمم منفصلة. أما رادار المصفوفة الطورية قد يفشل في فصل الهدفين ويظهرهما كقمة واحدة عريضة بسبب عرض الحزمة الرئيسي الأوسع.

تُعدّ خوارزمية MUSIC خوارزمية أساسية لتقدير زوايا الوصول للأهداف DOA بدقة عالية. في رادارات المصفوفات الطورية، تُحسّن هذه الخوارزمية دقة التتبع، بينما في رادارات MIMO، تُوظّف المصفوفات الافتراضية لتحقيق دقة غير مسبوقه. على الرغم من تحديات مثل التعقيد الحسابي، لا تزال خوارزمية MUSIC حيوية لأنظمة الرادار الحديثة في تطبيقات الدفاع والمركبات والاتصالات.

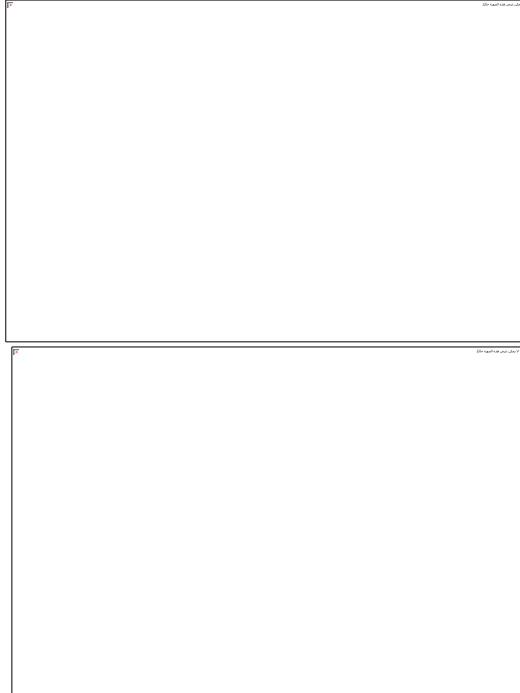
D. خوارزمية ESPRIT (تقدير بارامترات الإشارة عبر تقنيات الثبات الدوراني)

ESPRIT هي خوارزمية عالية الدقة لتقدير اتجاه الوصول DOA، تستفيد من الثبات الدوراني بين فضاءات الإشارة الفرعية المشتقة من مصفوفتين فرعيتين متداخلتين. على عكس MUSIC، تتجنب هذه الخوارزمية عمليات البحث الطيفي الشاملة، مما يجعلها فعالة حسابياً. فهي تعتمد على الفضاءات الفرعية للإشارة/الضجيج. وغير تكرارية (أي تقدر الزوايا مباشرةً باستخدام عمليات المصفوفة). ولا تتطلب معايرة (تعمل مع بنية مصفوفة معروفة). ويتجنب حسابات MUSIC مع الحفاظ على الدقة العالية، يعمل نظام ESPRIT على سد الفجوة بين الأداء والعملية في أنظمة الرادار المتقدمة.

المبادئ الأساسية لخوارزمية ESPRIT:

1. تحليل المصفوفات الفرعية: تقسيم المصفوفة إلى مصفوفتين فرعيتين متطابقتين ومتداخلتين.

2. ثبات الدوران: ترتبط فضاءات الإشارة للمصفوفات الفرعية بمصفوفة دوران تحتوي على معلومات DOA.
3. استخلاص القيم الذاتية: إيجاد القيم الذاتية لمصفوفة الدوران، والتي تُطابق زوايا الأهداف. فهي تُحوّل انزياحات الطور بين المصفوفات الفرعية إلى تقديرات زاوية.



(b)

(a)

الشكل (11) الطيف المكاني لرادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية. (a) من أجل هدفين يقعان عند الزوايا $[-3^\circ, 3^\circ]$ ، (b) من أجل هدفين يقعان عند زوايا $[-3^\circ, -1^\circ]$.

يظهر الطيف المكاني في الشكل (11) أن لرادار المصفوفة الطورية قمم أعرض وبدقة تمييز أقل فيما يحقق MIMO قمم أضيق وأدق ودقة تمييز أفضل ويتضح قدرة خوارزمية ESPRIT's فائقة

دقة التمييز. ونلاحظ أن رادار MIMO يتفوق على رادار المصفوفة الطورية في قدرته على التفريق بين هدفين متجاورين فهو يملك دقة تمييز زاوية أفضل.

E. خوارزمية STAP (المعالجة التكيفية المكانية الزمانية)

STAP هي تقنية لمعالجة الإشارات تجمع بين الأبعاد المكانية (مصفوفة الهوائي) والزمانية (نبضة إلى نبضة) للحد من الفوضى والتداخل في أنظمة الرادار لتحسين تقدير موقع الهدف من خلال ترشيح الإشارات تكيفياً. الفكرة الرئيسية فيها هي استخدام مرشح متكيف يحدد الهدف وسط الفوضى المحيطة به. وتتغير أوزان المرشح تبعاً لإحصائيات الفوضى. يتم تسجيل إحصائيات الفوضى مع مصفوفة تغاير التداخل $C_{LP \times LP}$ ، والتي يتم حسابها من متوسط أقطاب المدى المحيطة بالهدف المدروس [21][22]. بجعل $e_{LP \times 1}(\theta_t, f_{d_t})$ ، هو متجه التوجيه المكاني_الزمني مشيراً إلى الهدف المحتمل. يتم إعطاء أوزان المرشح التكيفي للزمن بمشكل حزمة MVDR ك:

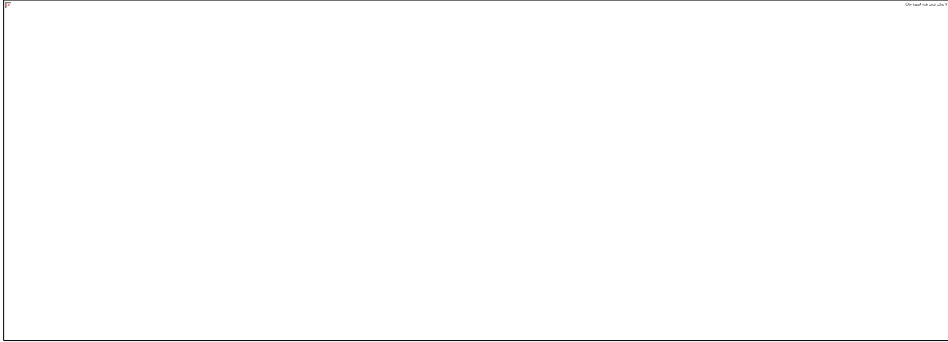
$$w(\theta_t, f_{d_t}) = \frac{C^{-1}e(\theta_t, f_{d_t})}{\sqrt{e^H(\theta_t, f_{d_t})C^{-1}e(\theta_t, f_{d_t})}} \quad (21)$$

ثم يتم اختبار وجود الهدف عن طريق تمرير البيانات الزمانية_المكانية من خلال المرشح ذو المعاملات $w(\theta_t, f_{d_t})$. يتم إجراء هذه العملية لجميع الأهداف المدروسة المحتملة [15].

تعمل خوارزمية STAP في رادارات المصفوفات الطورية على المعالجة المكانية فهي تستخدم عناصر الهوائي المتعددة لتشكيل حزم تكيفية. كما تحلل انزياحات دوبلر عبر نبضات الرادار (المعالجة الزمنية). بالإضافة للترشيح التكيفي عبر حساب الأوزان لتقليل الفوضى/التداخل مع الحفاظ على إشارات الهدف. وتمتاز هذه الخوارزمية بفعالية في كبح الفوضى بحالات انتشار دوبلر (مثل الفوضى الأرضية للمنصات المتحركة). كما أنها تحافظ على مرونة الحزمة في بيئات التهديد الديناميكية. ولكنها تواجه عبء حسابي مرتفع عند حساب معكوس مصفوفة التغاير.

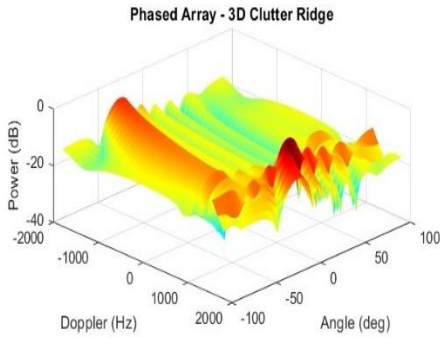
مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

وتقدم خوارزمية STAP عند تطبيقها في رادار MIMO دقة أعلى لأن المصفوفات الافتراضية تُحسّن الدقة الزاوية ودقة دوبلر، بالإضافة للمتانة لأن تنوع أشكال الموجات يخفف من تداخل المسارات المتعددة والتداخل المتماusk. ولكنها تتطلب مزامنة دقيقة لأجهزة الإرسال/الاستقبال الموزعة. وتسبب زيادة التعقيد الحسابي بسبب مصفوفات التباين الأكبر.

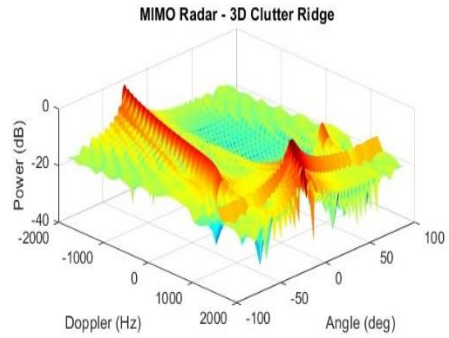


(b)

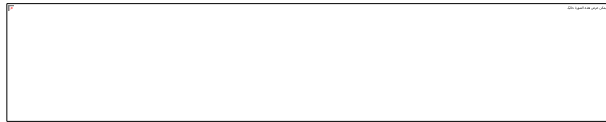
(a)



(d)



(c)



(e)

الشكل (12) تقدير حافة الفوضى باستخدام خوارزمية STAP. تُظهر خرائط دوبلر 2D توزيع الفوضى (a) لرادار MIMO و (b) رادار المصفوفة الطورية، بالإضافة لمخططات سطحية 3D لإدراك العمق (c) لرادار MIMO و (d) رادار المصفوفة الطورية. و (e) قيم الدقة الزاوية لرادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية.

يعرض الشكل (12) مقارنة بين أداء خوارزمية STAP في كل من رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية باستخدام مفهوم حافة الفوضى Clutter Ridge. حيث تعبر حافة الفوضى عن مكان تركيز طاقة الفوضى في فضاء دوبلر الزاوية وتتبع منحنى cosine وتتيح الحواف الأكثر وضوحاً إلغاء أفضل للفوضى، مما يحدد الحد الأدنى للسرعة القابلة للكشف (MDV) وتتبع حافة الفوضى الصيغة:

$$fd = \frac{2v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (22)$$

تكون حافة الفوضى Clutter Ridge في (a) و (b) بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية عريضة وغير حادة، بينما في رادار MIMO ضيقة وحادة جداً لأن الدقة الزاوية الأعلى لـ MIMO تسمح له بفصل أفضل لمكونات الفوضى بناءً على زاويتها، مما يجعل حافة الفوضى أكثر وضوحاً وتركيزاً في مجال دوبلر-الزاوية.

النقاط الصفيرية (Nulls) في (c) و (d) بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية أقل عمقاً واتساعاً بينما في رادار MIMO أعمق وأوسع لأن المصفوفة الافتراضية لـ MIMO توفر درجات حرية أعلى، مما يمكن خوارزمية STAP من إنشاء نقاط صفيرية Nulls أعمق وأكثر دقة لكبت الفوضى من اتجاهات متعددة دون التأثير على إشارة الهدف.

يثبت الشكل (12) أن دمج تقنية MIMO مع خوارزمية STAP يولد أقوى أداء لكبت الفوضى. فهو لا يوضح الفوضى بشكل أدق فحسب، بل ويوفر الأدوات (درجات الحرية) اللازمة لإلغائها بشكل أكثر فعالية، مما يزيد من حساسية الرادار تجاه الأهداف الضعيفة والمتحركة ببطء.

F. تتبع الهدف باستخدام مرشح Kalman

يعد تتبع الهدف جزءاً أساسياً من أنظمة الرادار مثل ADAS لتجنب الاصطدام والمساعدة في اختيار المسار. في التتبع، تشير الحالة (x, y, z, v_x, v_y, v_z) ، إلى الموضع ثلاثي الأبعاد للهدف في الإحداثيات الديكارتيّة والسرعات الاتجاهية المقابلة بناءً على الملاحظة الحالية (R, θ, ϕ) ومعلومات الحالة السابقة [18] [15].

الخطوة الأساسية في التعقب هو اقتران البارامترات المقدرة بشكلٍ منفصل لـ K هدف، خاصة السرعات (v_1, v_2, \dots, v_k) والمسافات (R_1, R_2, \dots, R_k) مع بعضها البعض $[(R_1, v_1)(R_2, v_2), \dots, (R_k, v_k)]$. بعد ربط البارامترات المقدرة مع الأهداف، يتم ربط الأهداف بالمسارات. فمثلاً، إذا كان كل هدف يتبع مساراً منفصلاً، إذن هناك K مسار في النظام [15].

بعد اقتران البيانات، يمكن إجراء التتبع باستخدام خوارزميات مثل مرشح Kalman. بحيث لكل مسار، يتم تنفيذ مرشح منفصل. وهذه المرشحات تعمل بالتوازي. بحيث يُعد مرشح Kalman أساسياً في أنظمة الرادار الحديثة، حيث يُتيح تتبعاً دقيقاً للهدف، وتقليل الضجيج، والتكيف الفوري. وهو عبارة عن خوارزمية تكرارية مصممة لتقدير حالة نظام ديناميكي من سلسلة من القياسات المشوشة. يعمل المرشح بخطوتين:

1. التنبؤ: تقدير الحالة المستقبلية بناءً على نموذج النظام.

2. التحديث: تعديل التنبؤ باستخدام قياسات جديدة، مرجحة (موزونة) بعدم اليقين.

وتشمل المكونات الرئيسية لمرشح Kalman ما يلي:

- متجه الحالة: يحتوي على متغيرات مثل الموقع والسرعة والتسارع.
- نموذج العملية: يصف كيفية تطور الحالة بمرور الوقت (مثل السرعة الثابتة).
- نموذج القياس: يربط القياسات بالحالة (مثل عوائد الرادار).
- مصنفات التباين: تحديد عدم اليقين في التنبؤات والقياسات.

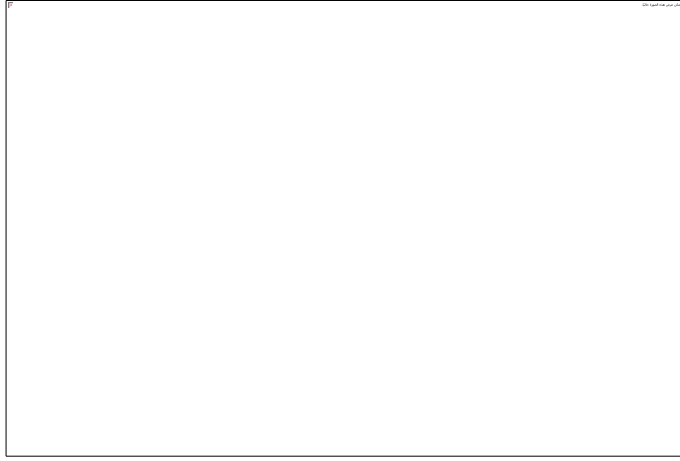
نظراً لأن متجه المراقبة (R, θ, \emptyset) له علاقة غير خطية مع متجه الحالة (x, y, z, v_x, v_y, v_z) . ويتم تمثيل معادلة الحالة التي تُعبر عن تأثير حالة الانتقال بمرور الزمن بـ [15]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x[n] \\ y[n] \\ v_x[n] \\ v_y[n] \end{bmatrix}}_{S[n]} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} x[n-1] \\ y[n-1] \\ v_x[n-1] \\ v_y[n-1] \end{bmatrix}}_{S[n-1]} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_x[n] \\ u_y[n] \end{bmatrix}}_{\substack{\text{State} \\ \text{Perturbation}}} \quad (23)$$

حيث T هي فترة المراقبة. متجه المراقبة يرتبط بمتجه الحالة عبر:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R[n] \\ \theta[n] \end{bmatrix}}_{x[n]} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{x^2[n] + y^2[n]} \\ \arctan \frac{y[n]}{x[n]} \end{bmatrix}}_{h(S[n])} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_R[n] \\ \omega_\theta[n] \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Observation} \\ \text{noise}}} \quad (24)$$

من معرفة الحالة السابقة، يتم التنبؤ بالحالة الحالية بناءً على معادلة الحالة (23). باستخدام المعادلة (24) والملاحظات الحالية، يتم تحديث القيمة المتوقعة. يعتمد مقدار التصحيح على نسبة SNR للملاحظات [15].



الشكل (13) خطأ التتبع الناتج في رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية عند استخدام مرشح Kalman.

ويتضح من الشكل (13) تفوق رادار MIMO في تتبع الهدف بأخطاء أقل من رادار المصفوفة الطورية. وذلك عند اختبار رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية وفق البارامترات الواردة في الجدول (1) وعندما يكون عرض المجال الترددي $BW = 500MHz$ ، ومن أجل هدف ذو مسافة ابتدائية $R = 100m$ وسرعة ابتدائية $v = 20m/s$.

تستخدم رادارات المصفوفة الطورية أشعة موجهة إلكترونياً لتتبع الأهداف. ويُحسّن مرشح كالمان أداء هذه الأنظمة في توجيه الحزمة فهو يتنبأ بموقع الهدف المستقبلي للحفاظ على تركيز الحزمة عليه، حتى أثناء المناورات السريعة. بالإضافة لتتبع أهداف متعددة نتيجة الحفاظ على مسارات منفصلة للأهداف من خلال ربط القياسات بالحالات المتوقعة.

تستخدم رادارات MIMO أجهزة إرسال واستقبال متعددة لتحقيق دقة عالية. ويشكل استخدام مرشح كالمان إضافة قيمةً كونه يستفيد من التنوع المكاني لتقنية MIMO لتتبع الأهداف المتقاربة (مثل المركبات للحفاظ على مسافات آمنة في المسارات المتجاورة) فيجمع البيانات من قنوات متعددة لتحسين تقديرات الحالة، حتى في البيانات متعددة المسارات.

بناءً على ما سبق دراسته يمكن إجراء مقارنة بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية وتلخيصها في الجدول (2)، مع تسليط الضوء على الاختلافات الرئيسية في البنية والأداء والتطبيقات.

الجدول (2) مقارنة بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية.

الميزة	رادار المصفوفة الطورية	رادار MIMO
البنية	مصفوفة متماسكة ذات عناصر مُزاحة بالطور. يرسل أشكال موجية متماسكة من كل العناصر.	أجهزة إرسال/استقبال متعددة بأشكال موجية متعامدة. يرسل أشكال موجية متعامدة من كل هوائي.
تشكيل الحزمة	تماثلي (إزاحة بالطور) لحزمة واحدة قابلة للتوجيه. تشكيل حزمة لجهة الاستقبال فقط.	تشكيل الحزمة رقمي: يُنشئ فتحة افتراضية.
الدقة	تعتمد على حجم الفتحة الفعلي (الفيزيائي).	مُحسنة نتيجةً للفتحة الافتراضية ذات عناصر $N \times M$ وتنوع شكل الموجة.
تخفيف التداخل	يعتمد على تركيز الحزمة باتجاه محدد؛ ويقدم معالجة محدودة للتشويش (الفوضي) وهو محدود بعدد العناصر الفيزيائية للمصفوفة.	يُحسن تنوع شكل الموجة من رفض التشويش (الفوضي).
التكلفة/التعقيد	تكلفة أجهزة عالية (يتطلب تحكم دقيق في الطور). بالإضافة لمُحولات طور ومعايرة باهظة الثمن.	تكلفة أجهزة أقل، لكن معالجة الإشارة معقدة.
التطبيقات	مثالي لتتبع الأهداف بسرعة كالتتبع العسكري (الصواريخ والطائرات). مراقبة الحركة الجوية، رادار الطقس.	رادار المركبات، البحث والإنقاذ، البيئات الحضرية/الكثيفة.

مقارنة أداء رادار MIMO ورادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

سرعة المسح	مسح سريع أحادي الحزمة. وتوجيه إلكتروني سريع (يقدر بالميللي ثانية).	أبطأ بسبب المعالجة، ولكن المسح متعدد الاتجاهات.
كفاءة الاستطاعة	عالية (طاقة مركزة في اتجاه واحد).	منخفضة (طاقة موزعة عبر أجهزة الإرسال).
تقدير بارامترات الهدف	جيد لتتبع السرعة/الزاوية.	دقة فائقة في تقدير السرعة (إزاحة دوبلر)، والزاوية، والمدى.
المرونة	شكل موجة ثابت؛ توجيه حزمة مرن.	أشكال موجية متكيفة لسيناريوهات متنوعة.

IX. نتائج البحث والمناقشة

قارنت هذه الدراسة بشكل منهجي بين أنظمة رادار MIMO ورادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات متقدمة (SQP، CFAR، Kalman، STAP، ESPRIT، MVDR، MUSIC) في بيئة MATLAB، وتوصلت إلى الاستنتاجات الرئيسية التالية:

أظهر رادار MIMO قدرة استثنائية على تمييز ما يصل إلى 16 هدفاً بشكل فريد، بينما بدأ أداء الرادار ذي المصفوفة الطورية في التدهور بعد 6 أهداف، حيث ارتفع حد CRB لديه بشكلٍ حاد. ويعود هذا التفوق إلى المصفوفة الافتراضية في نظام MIMO، والتي توفر درجات حرية (Degrees of Freedom) أكبر بكثير ($Mt \times Mr$) مقارنة بالرادار الطوري الذي يعتمد على الفتحة الفيزيائية المحدودة. وتعمل خوارزميات مثل MUSIC و ESPRIT على استغلال هذه الدرجات الإضافية لتقدير زاوية الوصول (DOA) بدقة بلغت 0.5° لرادار MIMO مقابل 2° للرادار الطوري، مما يجعله الخيار الأمثل لسيناريوهات الأهداف المتعددة.

حققت خوارزميات التحسين Newton-like و SQP تحسناً ملحوظاً في أنماط الإشعاع لكلا النظامين، كما أظهر رادار MIMO أداءً أعلى في كبت التداخل باستخدام خوارزمية MVDR (Capon).

أسفر التحليل الكمي المُفصّل لخرائط المدى_دوبلر عن نتائج دامغة تُبرز التفوق الواضح لأداء رادار MIMO. حيث تم قياس دقة المدى، المُعرّفة بالانحراف المعياري لتقدير موقع الهدف، فبلغت $\pm 0.18m$ لرادار MIMO مقابل $\pm 0.52m$ لرادار المصفوفة الطورية. وبشكلٍ مماثل، بلغت دقة السرعة $\pm 0.07m/s$ لرادار MIMO مقابل $\pm 0.22m/s$ لرادار المصفوفة الطورية.

قدم رادار MIMO فصل أوضح للأهداف مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية. حيث يستفيد MIMO من عرض النطاق الترددي المكافئ الأوسع الناتج عن الأشكال الموجية المتعامدة لتحسين دقة المدى. كما أن المصفوفة الافتراضية تزيد من الطول الفعال للهوائي، مما يحسن دقة دوبلر.

أظهر تطبيق خوارزمية STAP على رادار MIMO حافة فوضى (Clutter Ridge) أكثر حدة وضيقة مقارنة بالرادار الطوري، مما يشير إلى كبت متفوق للفوضى. فالدقة الزاوية الفائقة لـ MIMO تسمح له بفصل مكونات الفوضى بكفاءة أكبر.

سجل رادار MIMO خطأ تتبع أقل باستمرار عند استخدام مرشح كالمان مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية. وهذا يسمح للمرشح بإنتاج تقديرات حالة أكثر استقراراً وتقليل الخطأ التراكمي في التتبع، خاصة للأهداف متعددة المسارات أو في ظروف الضجيج العالية.

X. الاستنتاجات والتوصيات

بناءً على النتائج والمناقشة أعلاه، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- يتفوق رادار MIMO في الدقة وسعة الأهداف، بينما يتفوق رادار المصفوفة الطورية في السرعة والكفاءة.

- تعمل الخوارزميات المتقدمة (MUSIC, STAP, Kalman) على تعزيز أداء كلا النظامين، لكن القيمة المضافة تكون أعلى في أنظمة MIMO بسبب مرونتها ودرجات الحرية الإضافية.
- يأتي الأداء المتفوق لـ MIMO مصحوباً بتعقيد حسابي أعلى في معالجة الإشارات، مما يتطلب منصات معالجة ذات قدرات عالية.
- يعتمد الاختيار بين أنظمة MIMO وأنظمة المصفوفة الطورية على المتطلبات التشغيلية، مثل سرعة المسح والدقة ومعالجة التداخل. ومن المفيد استكشاف ودراسة أنظمة رادار هجينة تجمع بين مزايا كلتا التقنيتين أي أنظمة MIMO-Phased Array المدمجة.
- يمكن دراسة خوارزميات التعلم الآلي في تحسين أداء كلا الرادارين. فمن أجل زيادة دقة وسرعة التقديرات من الممكن استبدال الخوارزميات التقليدية (مثل MUSIC/ESPRIT) بمقدرات DOA القائمة على التعلم العميق لتحقيق معالجة أسرع.

- [1] W. Wiesbeck *et al.*, "RADAR 2020: THE FUTURE OF RADAR SYSTEMS" 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/272027572>
- [2] J. Li and P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 106–114, 2007. doi: 10.1109/MSP.2007.904812.
- [3] E. Cardillo and A. Caddemi, "A review on biomedical mimo radars for vital sign detection and human localization," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9. MDPI AG, pp. 1–15, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/electronics9091497.
- [4] K. Rambach, "Direction of Arrival Estimation Using a Multiple-Input-Multiple-Output Radar with Applications to Automobiles," 2017.
- [5] H. Rahman, "Fundamental Principles of Radar." by Taylor & Francis Group, 2019.
- [6] Abhilash Kashyap and Ashwin Madanmohan, "Identifiable Radar Reflectors For Automotive Pedestrian Safety", Master thesis, Halmstad university, 2020.
- [7] H. Deng and Z. Geng, "Radar Networks." First edition published 2020 by CRC Press. [Online]. Available: <http://taylorandfrancis.com>
- [8] S. Shome, A. K. Singh, S. N. Sur, R. Bera, and & B. Maji, "PHASED MIMO RADAR USING RECONFIGURABLE HARDWARE FOR TARGET CHARACTERIZATION," 2019.
- [9] V. V. Chudnikov, B. I. Shakhtarin , A. V. Bychkov, S. M. Kazaryan "DOA Estimation in Radar Sensors with Colocated Antennas", IEEE, 2020.

- [10] A. Reza, H. Muttaqin, and U. Miftachul, "Phased-MIMO Radar: Angular resolution," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1125, no. 1, p. 012046, May 2021.
- [11] M. Hefnawi, J. Bray, J. Bathurst, and Y. Antar, "MIMO radar using a vector network analyzer," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 12, Dec. 2019.
- [12] C. Yuan Chong, "Signal processing for MIMO radars: detection under gaussian and non-gaussian environments and application to STAP." [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00772006>
- [13] J. Li and Petre. Stoica, *MIMO radar signal processing*. Canada,2009.
- [14] Bergin and Guerci, "MIMO Radar: Theory and Application." Artech House, U.S,2018.
- [15] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, "Automotive Radars: A review of signal processing techniques," *IEEE Signal Process Mag*, vol. 34, no. 2, pp. 22–35, Mar. 2017.
- [16] J. Gamba, "Signals and Communication Technology Radar Signal Processing for Autonomous Driving." Japan ,2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/4748>.
- [17] E. Khalil, "Study and compare improvement algorithms for the reliability of the MVDR beamforming method". Homs University Journal, Volume 43, Issue 24, 2020.
- [18] S. Al-Qantar et al., "Design and implementation of a UAV detection and tracking system". Master thesis in communications engineering. Homs University, 2020.
- [19] Robert Gilpin, Joey Bray, and Mostafa Hefnawi, "Real-Time Multiple Input Multiple Output (MIMO) Radar Using Software Defined Radio", 2022.

- [20] Jiang, Y.; Lan, X.; Shi, J.; Han, Z.; Wang, X. "Multi-Target Parameter Estimation of the FMCW-MIMO Radar Based on the Pseudo-Noise Resampling Method. *Sensors* 2022.
- [21] Xingyu Lu , "Co-Located MIMO Radar Target Detection in Cluttered and Noisy Environment Based on 2D Block Sparse Recovery", *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, VOL. 69, 2021.
- [22] Xudong Zhang , "Multi-Aperture Space-Time Transmit and Receive Design for MIMO Radar", *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, VOL. 28, 2021.
- [23] Borko B. Đakovića, Slobodan M. Simićb, Lidija M. Trivundžac, Aleksandar G. Ristićd, "Digital signal processing in MIMO radars with time-multiplexed transmit signals, *VOJNOTEHNIČKI GLASNIK / MILITARY TECHNICAL COURIER*, 2025, Vol. 73, Issue 2.
- [24] MathWorks. 2024. *Radar Data Cube* [online]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/phased/gs/radar-data-cube.html> [Accessed: 24 May 2024].
- [25] Sun, H.. "Introduction to MIMO Radar Waveforms. *IEEE AESS*, 13 April [online]. Available at: <https://ieeaeess.org/presentation/lecture/introduction-mimo-radar-waveforms> [Accessed: 25 April 2024].
- [26] Han, K., Bauduin, M., & Bourdoux, A. 2024. "Beamspace Matrix Completion in Subarray-Based Sparse Linear Array for High-Resolution Automotive MIMO Radar". In: *2024 IEEE Radar Conference*

(*RadarConf24*), Denver, CO, USA, pp.1-6, May 06-10. Available at:
<https://doi.org/10.1109/RadarConf2458775.2024.10549360>.