

دراسة ومقارنة خوارزميات تحسين وثوقية طريقة

MVDR لتشكيل حزمة الاشعاع

الباحث: د. م. ايلي خليل

ملخص

تعتبر تقنية التباين الأدنى للاستجابة غير المشوهة $\text{minimum variance distortionless response (MVDR) beamformer}$ من أكثر الطرق المستخدمة من أجل تشكيل حزمة الاشعاع، وتتمتع هذه الطريقة بأداء جيد في كبح اشارات التداخل اذا كان شعاع توجيه المصفوفة $\text{Array Steering Vector (ASV)}$ المطابق للإشارة المحددة معروفا بدقة ، وهذا الأمر غير مضمون عملياً بسبب عيوب المصفوفة المتنوعة .

وقد تم استعمال عدة خوارزميات من أجل حل هذه المشكلة منها طريقة التمديد القطري $\text{Diagonal Loading (DL)}$ ، و طريقة الحالة الأسوء، وطريقة التحميل القطري المتغير، وطريقة تخمين شعاع التوجيه .

سوف ندرس في هذا البحث هذه الطرائق وسنستخدم برنامج الماتلاب من أجل محاكاتها ومقارنة أدائها ، وتوضيح سلبيات وإيجابيات كل منها.

Study and compare Improvement The Algorithms of improvement the MVDR Beamforming

Dr. Eng. Elie Khalil

ABSTRACT

The minimum variance distortionless response (MVDR) beamformer is one of the most common method, minimizes the array output power while constraining the gain to be one at the direction of interest, It has high performance in interference suppression if the array steering vector (ASV) corresponding to the target signal is known accurately, that isn't guaranteed practically due to the existence of array imperfections .

therefore the performance of MVDR degrades significantly because MVDR is too sensitive to the steering vector mismatches. To compact with this drawback many approaches have been proposed , such Diagonal Loading Method, Worst –case beamforming, Variable diagonal Loading Method, and steering Vector estimation method.

In this paper, we will study this methods and use the MATLAB program to model and compare its performance.

1- مقدمة:

تعرف عملية تشكيل حزمة الاشعاع بأنها عملية توجيه أو استقبال الاشارة المرغوبة (Signal of Interest) من اتجاه محدد، وكبح التداخلات الأخرى من باقي الاتجاهات ويتم ذلك عبر وزن الاشارات المرسله أو المستقبله عبر عدد من الهوائيات بأوزان محددة، وبما أن نموذج اشعاع المصفوفة يتألف من حزمة رئيسية باتجاه محدد، وعدد من الحزم الجانبية، كما يحوي عدد من الأصفار، فبالتالي تعني عملية تشكيل الحزمة توجيه الحزمة الرئيسية باتجاه الاشارة المرغوبة، ومحاولة وضع أصفار نموذج اشعاع المصفوفة في جهات ورود اشارات التداخل، أي يمكن وصف تشكيل حزمة الاشعاع بأنها عملية ترشيح مكانية لعدد من الحساسات المتباعدة، ونطلق على التحسين الذي نصل اليه بالمقارنة مع الحالة الغير موجهة بريح المصفوفة أو ربح تشكيل الحزمة.

وقد تم استخدام هذه التقنية على نطاق واسع في الاتصالات اللاسلكية والميكروفون وأنظمة الرادار، والسونار، والتصوير الطبي، كحل جذاب للكشف عن الإشارة وتقديرها بشكل جيد في بيئات الخفوت القاسية [1].

أصبح مؤخراً هنالك اهتمام متزايد بهذه التقنية نظراً للطلب الكبير على تطبيقات الاتصالات اللاسلكية، والنمو السريع في عدد المستخدمين لهذه الشبكات اللاسلكية، واحتياجهم الملحة لمعدلات عالية لنقل البيانات.

قُدمت عدة تقنيات من أجل تحقيق تشكيل حزمة الاشعاع المتكيف adaptive beamforming، حيث صممت هذه التقنيات لتأمين الحل الأمثل بالاعتماد على معايير ومحددات معينة مثل الحد الأدنى للتباين minimum variance ، الحد الأقصى للأنتروبيا maximum entropy ، و الحد الأقصى لنسبة الاشارة الى الضجيج مع التداخل maximum signal-to-interference-plus noise ratio (SINR) ، وتعتبر تقنية

التباين الأدنى للاستجابة غير المشوهة minimum variance distortionless response (MVDR) beamformer من أكثر الطرق انتشاراً من أجل تشكيل حزمة الإشعاع، حيث تعتمد على تصغير طاقة خرج المصفوفة الى أكبر قدر ممكن مع الحفاظ على الريح واحدياً في الاتجاه المطلوب [2].

تعد طريقة MVDR حساسة للغاية لعدم التطابق في شعاع توجيه المصفوفة array steering vector (ASV)، وبالتالي فإن أداءها سينخفض بشكل ملحوظ عند عدم معرفة ASV الخاص بالإشارة بدقة، وينجم ذلك عن عيوب المصفوفة المتنوعة مثل الاقتران المشترك لهوائيات المصفوفة mutual coupling effect of the antenna array، و التشتت المحلي local scattering، وعدم تطابق حيز الفراغ near-far spatial، وأخطاء توجيه الشعاع steer direction errors، و عيوب معايرة المصفوفات imperfectly calibrated arrays [3].

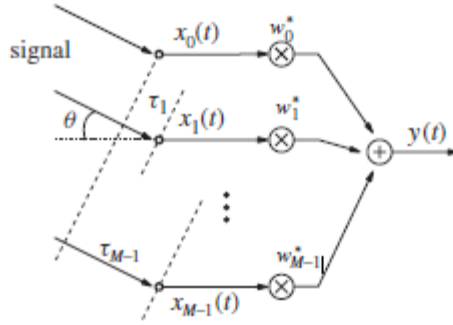
قدمت عدة طرق من أجل ايجاد حل لهذه المشكلة، مثل تقنية التحميل القطري (DL) والتي تعد أحد الأساليب المخصصة الأكثر شيوعاً لتحسين مائة تقنية MVDR وتجنب إلغاء الإشارة الذاتية، الى جانب طريقة القيمة الذاتية لمصفوفة ترابط التداخل مع الضجيج، وتقنية الحالة الأسوأ Worst-Case وتقنية التحميل القطري المتغير.

2- هدف البحث:

يهدف البحث الى دراسة الطرائق المستخدمة لزيادة وثوقية طريقة MVDR لتشكيل حزمة الإشعاع تجاه اخطاء التوجيه وتحسين أداءها، ومقارنة هذه الطرائق عبر محاكاتها باستخدام برنامج الماتلاب وؤسم النموذج الإشعاعي ومخطط SINR مقابل SNR وتوضيح نقاط القوة والضعف لكل خوارزمية .

3- طريقة MVDR:

نفترض لدينا مصفوفة هوائيات خطية مؤلفة من M حساس وبوجود إشارة ضيقة الحزمة narrowband signal قادمة من حقل بعيد.



الشكل (2) البنية العامة لتشكيل حزمة الإشعاع الضيقة الحزمة

يمثل شعاع خرج المصفوفة من أجل K snapshot بالمعادلة التالية:

$$x(k) = a(\theta)s(k) + v(k) \quad (1)$$

حيث: θ هي زاوية الورد DOA

هي شعاع التوجيه المصفوفة ويعطى بالعلاقة [4]:

$$a(\theta) = [1 \quad e^{jKd \sin(\theta)} \quad e^{2jKd \sin(\theta)} \quad \dots \quad e^{(m-1)jKd \sin(\theta)}] \quad (2)$$

و $v(k)$ هو الضجيج مع إشارات التداخل.

يكتب تابع تشكيل الحزمة الإشعاعية الضيقة The narrowband beamforming operation بالشكل التالي:

$$y(k) = w^H x(k) \quad (3)$$

حيث $w \in C^{M*1}$ تشير الى المعاملات العقدية للمرشح.

يصغر MVDR Beamformer طاقة خرج المصفوفة مع الحفاظ على الريح مساوي للواحد في اتجاه الإشارة المطلوب ، وبالتالي عبارة تكبير ال SINR لخرج المصفوفة الى اعظم قدر ممكن يمكن التعبير عنها عبر مشكلة الأمثلية المحدبة التالية[4]:

$$\begin{aligned} \min_w & w^H R_{i+n} w \\ \text{st} & w^H a(\theta) = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

تكون الفائدة العملية للمصفوفات التكيفية في العديد من التطبيقات محدودة بمعدل التبديل حيث يجب أن تتغير الأوزان في هذه الأنظمة بمعدل يساوي أو أكبر من معدل تغيير مجال الضجيج الخارجي (على سبيل المثال المسح في الرادار) .

يغد معدل التقارب هذا المشكلة الأكثر حدة في النظم التكيفية مع عدد كبير من درجات التكيف وفي المواقف التي تكون فيها القيم الذاتية للمصفوفة تتباين الضجيج مختلفة على نطاق واسع .

لذا تم السعي لتوفير تبديل سريع لمصفوفة الوزن وذلك بالاعتماد على مصفوفة التباين البسيطة

$$\hat{R} \text{ Sample covariance Matrix [5] .}$$

حيث تم بالاعتماد على طريقة Maximum Likelihood لتقدير المصفوفة $R_{i+n}(k)$ بمصفوفة التباين البسيطة والتي تحسب وفق العلاقة [6]:

$$\hat{R}_{i+n} = 1/K \sum_{k=1}^K v(k)v^H(k) \quad (5)$$

تقدم طريقة MVDR أداءً عالياً إذا كان شعاع توجيه المصفوفة ASV للإشارة المطلوبة معروف بدقة.

وهذا الأمر غير مضمون في الحياة العملية حيث أن أخطاء ASV قد تحدث نتيجة عيوب المصفوفة المتعددة وينجم ذلك عن عيوب المصفوفة المتنوعة مثل الاقتران المشترك لهوائيات المصفوفة mutual coupling effect of the antenna array، و التشتت المحلي local scattering، و الاضطرابات في مواقع الحساسات sensor position perturbation وعدم التطابق الفراغي بين المجال القريب والبعيد near-far، وأخطاء توجيه الشعاع spatial signature mismatch، و عيوب معايرة المصفوفات imperfectly calibrated arrays مما يسبب مشكلة خطيرة تتمثل بإلغاء الإشارة المطلوبة [7,8].

4- خوارزميات زيادة وثوقية طريقة MVDR :

ينخفض أداء طريقة MVDR بشكل ملحوظ عند عدم معرفة ASV الخاص بالإشارة بدقة، كما أن استعمال مصفوفة التباين البسيطة Sample covariance Matrix في حساب أوزان طريقة MVDR ستجعل أداء هذه الطريقة ينخفض بشكل واضح، وخاصة في حال وجود إشارة بيانات في اشارات التدريب Snapshot Training، وهو الحال في معظم تطبيقات المصفوفات المتكيفة كالسونار و التصوير الطبي وانظمة الميكروفونات ومعالجة الصوت والاتصالات الخليوية، مما سيجعل من هذه الطريقة غير موثوقة الاستعمال .

قُدِّمت عدة طرائق من أجل ايجاد حل لهذه المشكلة، وتعد تقنية التحميل القطري (DL) إحدى الأساليب الأكثر شيوعاً لتحسين متانة تقنية MVDR تجاه أخطاء التوجيه وتجنب إلغاء الإشارة الذاتية [9]، ولكن طريقة اختيار عامل التحميل القطري غير واضحة عملياً، والفشل الرئيسي في نهج DL التقليدي هو أنه لا توجد طريقة سهلة وموثوقة لاختيار

عامل DL ، ولتجنب العيوب في اعتماد معامل تحميل قطري ثابت تم ايجاد طريقة لإضافة معامل التحميل المتغير [10].

فيما بعد طورت طريقة التحميل القطري [11] حيث اعتبر شعاع التوجيه الحقيقي موجود داخل مجموعة عدم يقين كروية .

ثم لاحقاً تم اقتراح طريقة الأمثلية وفق الحالة الأسوأ worst-case-based adaptive beamforming ، لتحسين متانة طريقة MVDR ضد أخطاء التوجيه المحتملة [12-13] .

الى جانب الطرائق السابقة اقترح في طريقة لتخمين شعاع التوجيه بدقة بهدف تصحيح الخطأ في شعاع التوجيه [14].

A. طريقة التحميل القطري:

تعد طريقة التحميل القطري (DL) Diagonal loading احدى اهم الطرق لزيادة الوثوقنة لطريقة MVDR ولتجنب الحذف الذاتي للاشارة

حيث أن الفكرة المفتاحية لضبط الحل لا MVDR هو بإضافة مصطلح جزائي من الدرجة الثانية $w\lambda w^H$ الى تابع الملاحظة حيث λ هي عامل DL المقترح .

بالتالي يعبر عن مشكلة التشكيل الأمثل لطريقة DL يعبر عنها بالشكل [3]:

$$\begin{aligned} \min w^H (R + \lambda I) w \\ \text{s.t. } w^H a(\theta) = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

حيث I هي $m \times m$ مصفوفة واحدة

λ عامل DL المقترح يجب أن يختار من قبل المستقبل وبشكل ملاحظ فان هذا الاختيار سيأخذ الاهتمام الأكبر لضبط استجابة المرشح.

السؤال الأساسي في هذه الطريقة هو حول اختيار البارامتر، حيث تحقق هذه الطريقة نتيجة جيدة في حال اختيار معامل التخميل بشكل مناسب، ولكن عملية الاختيار غير واضحة في الواقع، وقد قدمت الكثير من الدراسات من أجل الاختيار الأمثل للبارامتر، حيث اقترح Vincent and Besson في [11] قيمة طبيعية تقريبية ل λ معتمدة على التحليل الذاتي eigendecomposition لمصفوفة التباين البسيطة، و عملياً تختار معادلة ل $10\sigma^2$ حيث σ^2 هي تباين الضجيج في هوائي مستقل،

B. طريقة استخدام تخمين شعاع التوجيه - MVDR - SV-estimation:

تحتاج طريقة MVDR إلى معرفة شعاع التوجيه استناداً إلى بعض المعلومات السابقة، وتقدير مصفوفة تباين البيانات، وعندما يكون هناك عدم تطابق بين شعاع التوجيه الفعلي والمقدر، فإن أداء MVDR سيندهور، وهذا حفز باتجاه تطوير تقنية جديدة لتقدير شعاع التوجيه عبر أقل قدر ممكن من المعلومات المسبقة. يتم تخمين شعاع التوجيه من خلال تعظيم قدرة خرج مشكل حزمة الاشعاع تحت شرط أن لا يتقارب التقدير إلى أي من أشعة توجيه التداخل ومجموعاتها الخطية [14]، والمعلومات السابقة الوحيدة المستخدمة هي المعرفة غير الدقيقة للقطاع الزاوي الخاص بالإشارة المرغوبة وهندسة مصفوفة الهوائي، والتي يمكننا الحصول عليها باستخدام طرق تحديد الاتجاه منخفضة الدقة [15]، في حين لا يلزم معرفة شعاع التوجيه المفترض.

بفرض لدينا مصفوفة هوائيات خطية مكونة من M هوائي وبحال وجود خطأ في شعاع التوجيه δ فعندها تعطى معاملات الوزن بطريقة SMI-MVDR بدلالة δ على الشكل:

$$w = \frac{R_y^{-1}(P + \delta)}{(P + \delta)(P + \delta)^H R_y^{-1}} \quad (7)$$

حيث P هو شعاع التوجيه المقدر، عندها تعطى استطاعة خرج ال-Beamformer [14]:

$$P = \frac{1}{(P + \delta)^H R^{-1}(P + \delta)} \quad (8)$$

بالتالي لتكبير استطاعة الخرج لابد من تصغير مقام المعادلة (9-2) ، لذا اقترح [16] تخمين شعاع التوجيه عبر مسألة الأمثلية التالية:

$$\begin{aligned} & \min (P + \delta)^H R^{-1}(P + \delta) \\ & s.t \quad \|\hat{a}\|^2 = M \end{aligned} \quad (9)$$

القيود $\|\hat{a}\|^2 = M$ وضع لإجبار شعاع التوجيه أن يكون له نفس المطال كشعاع التوجيه المفترض.

تم في [14] إضافة قيد جديد لتجنب تقارب شعاع التوجيه المخمن إلى أي من أشعة توجيه اشارات التداخل ومكوناتها الخطية.

فبفرض أن الإشارة المرغوبة متواجدة في قطاع زاوي معروف $\Theta = [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ، عندها يمكن تشكيل مسألة أمثلية لتخمين شعاع التوجيه على النحو التالي:

$$\begin{aligned} & \min \hat{a}^H R^{-1} \hat{a} \\ & s.t \quad \|\hat{a}\|^2 = M \\ & \quad \hat{a}^H C \hat{a} \leq \Delta_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$C = \int_{\Theta} a(\theta)a(\theta)^H \quad \text{حيث}$$

$$\Delta_0 = \max a(\theta)Ca(\theta)^H \quad \text{و}$$

إن المشكلة غير محدبة Non-convex وبالتالي سيكون من الصعب حلها لذا تم تحويلها الى مشكلة محدبة عبر استخدام Semidefinite programming relaxation (SDP) ، حيث بفرض $\mu = \widehat{a}\widehat{a}^H$ يمكن أن نكتب:

$$\begin{aligned} \min \quad & Tr(\mu R^{-1}) \\ & Tr(\mu) = M \\ s.t \quad & Tr(\mu C) \leq \Delta_0 \\ & (\mu) > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

القيد $(\mu) > 0$ وضع لضمان أن تكون المصفوفة μ مصفوفة positive semidefinite.

C. طريقة التحميل القطري المتغير:

اقترحت مؤخراً عدة طريق لتحميل قطري متغير من أجل زيادة الوثوقية لتقنيات تشكيل حزمة الاشعاع المتكيفة (VLSMI) مما يمنع معاملات الوزن لل Beamformer من التقاطع مع مركبات الضجيج [17,18].

اقترح Jing Gu في البحث [10] طريقة لتحميل متغير من أجل زيادة الوثوقية لتقنيات تشكيل حزمة الاشعاع المتكيفة (VLSMI) مما يمنع معاملات الوزن لل Beamformer من التقاطع مع مركبات الضجيج .

حيث انطلاقاً من تحليل القيمة الفردية لمصفوفة التباين R ، يمكن أن نكتب R كمايلي:

$$R = UAU^*$$

حيث U تحوي الأشعة الذاتية للمصفوفة R و A هي مصفوفة قطرية تضم القيم الذاتية

$$U_1 \geq U_2 \geq \dots \geq U_m : R$$

$$z = U\alpha(\theta) : \text{ولنأخذ}$$

عندها يمكن أن نعرف تابع الترتيب التنازلي λ :

$$g(\lambda) = \sum_{m=1}^M \frac{|z_m|^2}{(1 + \lambda v_m)^2} = \varepsilon \quad (12)$$

بحل هذه المعادلة عبر طريقة Newton يمكن إيجاد القيمة المثلى λ

إن قيمة λ مرتبطة بقيمة مصفوفة التباين R أو مصفوفة التباين البسيطة \hat{R} .

بالاعتماد على ما سبق اقترحت طريقة تحميل متغيرة منخفضة التعقيد من أجل زيادة التحسين في

الأداء من دون تعقيد مبالغ فيه عبر إضافة معامل تحميل $\lambda \hat{R}^{-1}$ [17] ، حيث إن إضافة \hat{R}

لمعامل التحميل القطري سيؤمن حلاً وسطاً بين الوثوقية و المتانة من جهة وبين التكيفية من

جهة أخرى، فيصبح لدينا تابع الامثلية على الشكل التالي:

$$\begin{aligned} \min w^H R_i + n w + w^H \lambda R^{-1} w \\ \text{s.t } w^H a(\theta) = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

D. طريقة MVDR باستخدام الحالة الأسوأ worst-case-MVDR :

إن شعاع التوجيه الفعلي غير معروف عملياً، بسبب عدم التطابق Mismatch في زاوية ورود الاشارة SOI وبالتالي، إذا افترضنا عدم التطابق غير المعروف بين شعاع التوجيه الفعلي $a(\theta)$ وشعاع التوجيه المخمن $\tilde{a}(\theta)$:

$$\delta = \tilde{a}(\theta) - a(\theta) \quad (14)$$

يتمثل جوهر هذه الطريقة في إضافة متانة لطريقة MVDR القياسية لتشكيل الحزمة باستخدام قيد استجابة غير مشوه يجب تلبينه مع جميع أشعة توجيه الإشارة غير المتطابقة في مجموعة عدم اليقين الكروية المحددة.

يمكن عندئذٍ التعبير عن مشكلة التحسين لهذه الحالة على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \min_w & w^H R_{i+n} w \\ \text{s.t.} & \left| w^H \tilde{a}(\theta) \right| \geq 1 \end{aligned} \quad (15)$$

بتعويض المعادلة (14) في (15) يصبح لدينا:

$$\begin{aligned} \min_w & w^H R_{i+n} w \\ \text{s.t.} & \left| w^H (\delta + a(\theta)) \right| \geq 1 \end{aligned} \quad (16)$$

من الصعب حل هذه المسألة نظرًا لأن القيد هو غير محدب nonconvex ، لذا يجب أن نتحول إلى قيد محدب تحت افتراض أن معيار الخطأ في ناقل التوجيه محدد من طرف ثابت معروف هو ε [12].

$$\|\delta\| \leq \varepsilon \quad (17)$$

بالتالي يكتب القيد في المعادلة (16) على الشكل التالي:

$$|w^H a(\theta) + w^H \delta| \geq 1 \quad (18)$$

باستخدام قاعدة عدم مساواة المثلث (Triangle inequality) و قاعدة عدم مساواة كونشي-شوارتز (Cauchy-Schwarz inequality) يمكن ان نكتب :

$$|w^H a(\theta) + w^H \delta| \geq |w^H a(\theta)| - |w^H \delta| \geq |w^H a(\theta)| - \|w\| \|\delta\|$$

بالتعويض في المعادلة (18) يصبح القيد على الشكل:

$$\begin{aligned} |w^H a(\theta)| - \|w\| \varepsilon &\geq 1 \\ |w^H a(\theta)| &\geq 1 + \|w\| \varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

لاتزال هذا القيد غير محدب بسبب القيمة المطلقة الموجودة في الجهة اليسارية من العلاقة (19) لذا سنجري دوران بالطور لـ $|w^H a(\theta)|$ بحيث تكون ذات قيمة حقيقة بالتالي تصبح مسألة الأمثلية على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \min w^H R_y w \\ \text{s.t. } |w^H a(\theta)| &\geq 1 + \|w\| \varepsilon \\ \text{Im}(w^H a(\theta)) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

وهي مسألة أمثلية محدبة من النوع (SOCP) second-order cone program [19].

نحل هذه المسألة المحدبة رياضياً بالاعتماد على طريقة Lagrange multiplier حيث نحصل على تابع Lagrange كما يلي:

$$H(w, \lambda) = w^H R_y w + \lambda (|w^H a(\theta)| - \|w\| \varepsilon - 1) \quad (21)$$

نشقق العلاقة (21) وجعلها مساوية للصفر ليصبح لدينا:

$$R_y w + \lambda \varepsilon \frac{w}{\|w\|} = \lambda a(\theta)$$

وبالتالي تكون قيمة معاملات الوزن :

$$w = (R_y + \frac{\varepsilon}{\|w\|} I)^{-1} a(\theta) \quad (22)$$

5- النتائج:

سنقوم بإجراء محاكاة باستخدام برنامج الماتلاب للطرائق السابقة و مقارنة أداءها والتحسين الذي تحققه على طريقة MVDR ومعالجتها لأخطاء توجيه الشعاع.

حيث اعتمدنا في دراستنا على مصفوفة خطية ULA مؤلفة من 10 هوائي بتباعد بين الهوائيات يساوي الى نصف طول الموجة وافترضنا وجود اشارة مرغوبة (SOI) واحدة عند زاوية الورد $\theta = 80^\circ$ ، و اشارتي تداخل عند الزوايا $105^\circ, 65^\circ = \theta$ ، وتمت الدراسة من أجل ضجيج غاوسي بمتوسط مساوي للصفر وتفاوت واحد، وافترضنا شدة الاشارة الى الضجيج (SNR) Single to- noise ratio تساوي 10 dB، وشدة اشارة التداخل الى الضجيج (INRs) interference-to-noise ratios تساوي الى 30 dB،

و حددنا قيمة عامل التحميل القطري بـ $\lambda = 10$ واعتمدنا عدد الـ Snapshot يساوي 30.

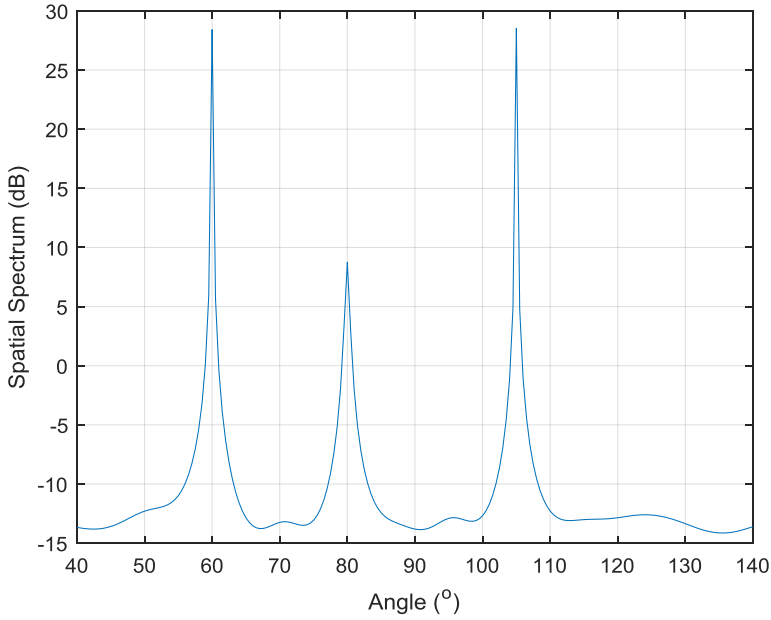
سنستعمل أداة CVX في الـ Matlab المستخدمة لحل مسائل الأمثلية المحدبة [20].

سنقوم برسم النموذج الإشعاعي للخوارزميات المدروسة

يبين الشكل (2) المخطط الطيفي على مدخل المصفوفة حيث يبين وجود الإشارة المطلوبة عند الزاوية $\theta = 80^\circ$ بشدة 10dB ووجود اشارتي تداخل عند الزاويتين $\theta = 65^\circ, 105^\circ$ بشدة 30dB.

ويبين الشكل (3) النموذج الإشعاعي للخوارزميات المدروسة وهي طريقة التحميل القطري و Diagonal loading (DL) وطريقة الحالة الأسوأ Worst-case-MVDR وطريقة تخمين شعاع التوجيه SV-Estimation-MVDR وطريقة التحميل القطري المتغير VLSM وذلك في الحالة التي لا يوجد فيها خطأ في توجيه الإشعاع.

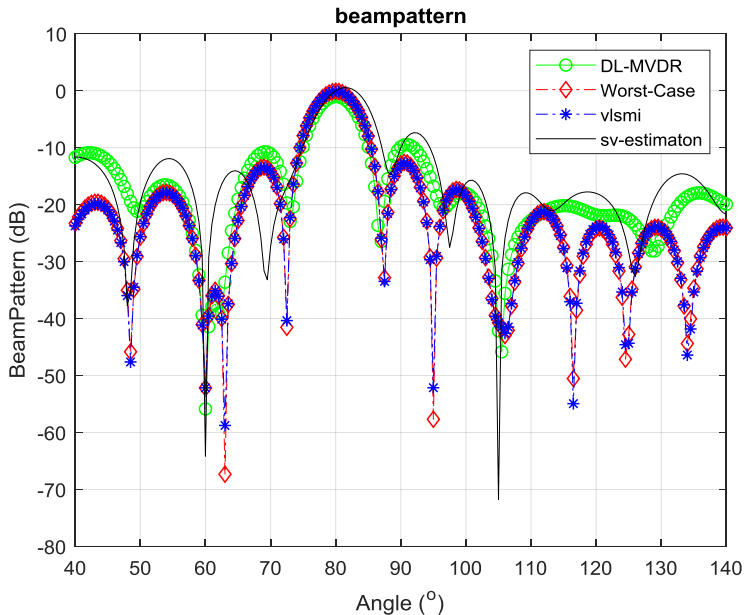
بينما يبين الشكل (4) النموذج الإشعاعي للخوارزميات المدروسة في حالة وجود خطأ في شعاع التوجيه مقداره 2° .



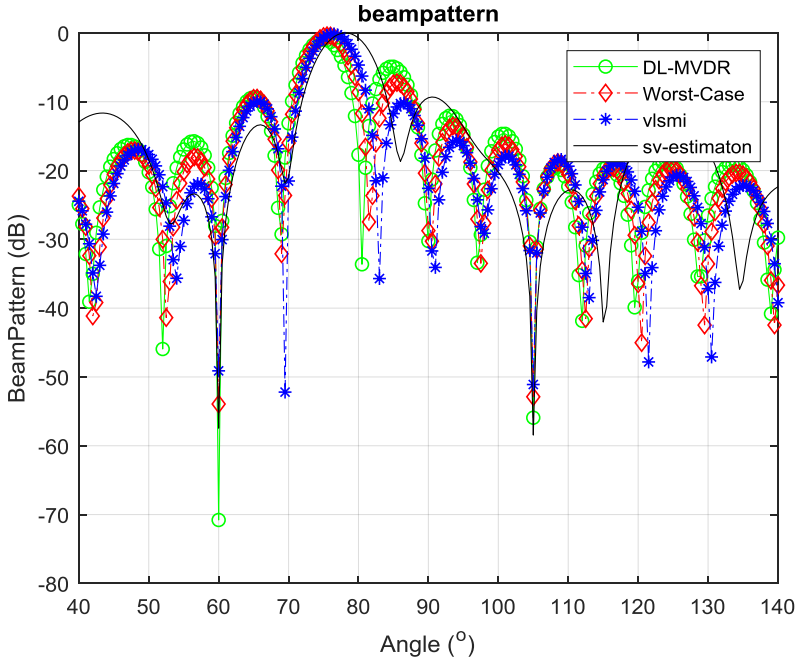
الشكل (2) المخطط الطيفي على مدخل المصفوفة

ونستنتج من الشكل (3) أن طريقة Worst-case-MVDR و طريقة التحميل القطري المتغير VLSM تتميز بأقل حزم جانبية بينما تعاني طريقة SV-Estimation-MVDR من حزم جانبية أعلى من غيرها وهي إحدى العيوب الخاصة بطريقة MVDR.

ونستنتج من الشكل (4) أن طريقة SV-Estimation-MVDR تعيد تخمين شعاع التوجيه وتصحيح الخطأ وتوجيه الإشارة بدقة غير أنها تتميز بحزم جانبية أعلى من باقي الخوارزميات المدروسة، كما نلاحظ أن طريقة التحميل القطري سيتأثر أداءها مع وجود خطأ في شعاع التوجيه حيث يتضح من الشكل أن لها صفر قريب من الإشارة المرغوبة عند الزاوية 80 بينما تتمكن طريقة Worst-case-MVDR و طريقة التحميل القطري المتغير VLSM من تلافي الحذف بصورة أفضل حيث إن صفرها أبعد عن الإشارة المطلوبة عند الزاوية 80.

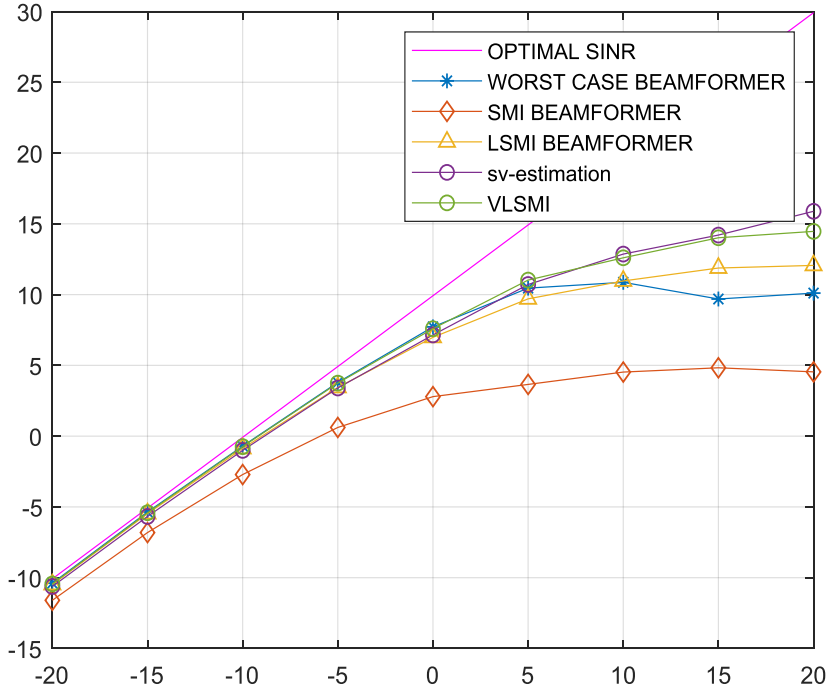


الشكل (3) النموذج الإشعاعي للخوارزميات المدروسة في حالة No mismatch



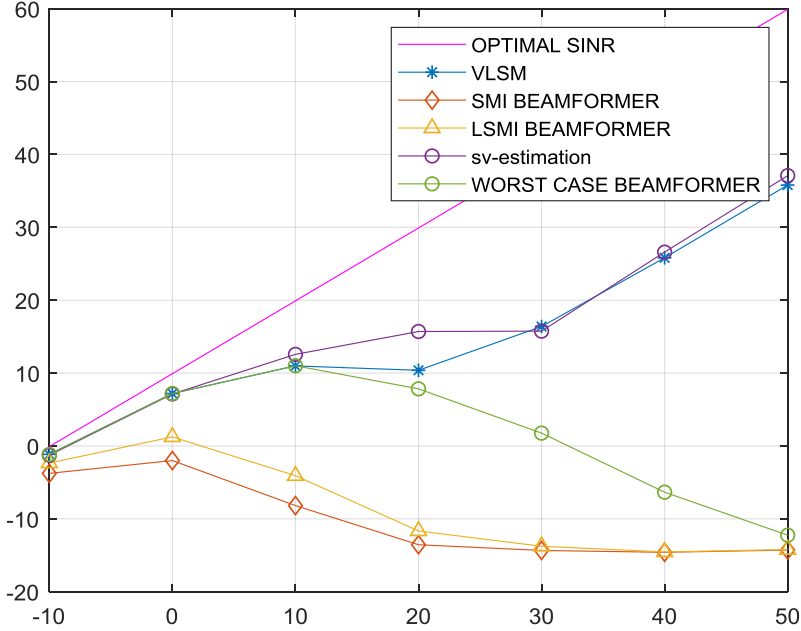
الشكل (4) النموذج الإشعاعي للخوارزميات المدروسة في حالة $2^\circ = \text{mismatch}$

يبين الشكل (5) خرج ال SINR للخوارزميات المدروسة ولطريقة SMI-MVDR مقابل ال SNR للإشارة المرغوبة في حالة عدم وجود خطأ في شعاع التوجيه ويتضح من هذا المخطط أن طريقة SV-Estimation -MVDR و طريقة التحميل القطري المتغير تقدمان الأداء الأفضل وتتفوق طريقة SV-Estimation -MVDR من أجل قيم ال SNR العالية عند 20dB ، بينما تقدم طريقة التحميل القطري أداء جيد وأفضل من بخوارزمية Worst-case-MVDR .



الشكل (5) Output SINR مقابل ال SNR في حالة No mismatch

ويبين الشكل (6) خرج ال SINR للخوارزميات المدروسة مقابل ال SNR للاشارة المرغوبة في حالة وجود خطأ في شعاع التوجيه 2° ويتبين تراجع أداء طريقة SMI- MVDR و طريقة التحميل القطري بشكل كبير بينما تبقى طريقة طريقة SV- Estimation- MVDR و طريقة التحميل القطري المتغير تقدمان الأداء الأفضل مع تفوق بسيط لطريقة SV-Estimation- MVDR



الشكل (6) Output SINR مقابل الـ SNR في حالة عدم وجود خطأ mismatch = 2°

بالتالي تبين معنا أن طريقة Steering Vector Estimation تقدم أفضل قيم SINR كما أنها تتلافى الحذف الذاتي للإشارة حيث أنها تعيد تخمين شعاع التوجيه للإشارة المطلوبة غير أنها تعاني من مشكلة الحزم الجانبية العالية

بينما تقدم طريقة التحميل القطري المتغير أداءً قريباً من طريقة Steering Vector Estimation وتتمتع بمرونة في تلافى الحذف الذاتي للإشارة وتقدم أفضل أداء من ناحية الحزم الجانبية، أما طريقة Worst-case فنقدم أداءً متوسطاً في تلافى حذف الإشارة المطلوبة وفي قيم الـ SINR بينما تقدم طريقة التحميل القطري أقل قيم SINR غير أنها تعد من أبسط الخوارزميات وأقلها كلفة ويمكن تحسين أداؤها عبر زيادة عدد اللقطات التدريبية Snapshot حيث ستزداد وثوقته هذه الطريقة عبر زيادتها

6- المراجع

- [1] H. L. Van Trees, Optimum Array Processing. New York, USA: Wiley, 2002.
- [2] J. E. Hudson, Adaptive Array Principles. Stevenage, U.K.: Peregrinus, 1981.
- [3] J. Li and P. Stoica, Eds, Robust Adaptive Beamforming. New York: Wiley, 2006.
- [4] Wei Liu, University of Sheffield, Stephan Weiss, University of Strathclyde, "WIDEBAND BEAMFORMING CONCEPTS AND TECHNIQUES," This edition first published 2010, UK
- [5] L. J. Griffiths, "A simple adaptive algorithm for real-time processing in antenna arrays," in Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 10, pp. 1696-1704, Oct. 1969.
- [6] J. Benesty, I. Cohen, Jingdong Chen, "Fundamentals of Signal Enhancement and Array Signal Processing", IEEE, 2018, pp. 283-320
- [7] B. Liao, S.-C. Chan, and K.-M. Tsui, "Recursive steering vector estimation and adaptive beamforming under uncertainties," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 49, no. 1, pp. 489-501, 2013
- [8] W. Zhang, S. Wu, and J. Wang, "Robust Capon beamforming in presence of large DOA mismatch," Electron. Lett., vol. 49, no. 1, pp. 75-76, Jan. 2013.
- [9] H. Cox, R. M. Zeskind, and M. H. Owen, "Robust adaptive beamforming," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. 35, pp. 1365-1376, Oct. 1987.
- [10] J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading," IEEE Trans. Signal Process., vol. 51, no. 7, pp. 1702-1715, Jul. 2003.
- [11] Vincent, Francois, and Ulivier Besson. "Steering vector uncertainties and diagonal loading." Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, 2004. IEEE, 2004.
- [12] S. Vorobyov, A. B. Gershman, and Z.-Q. Luo, "Robust adaptive beamforming using worst-case performance

- optimization: A solution to the signal mismatch problem,” IEEE Trans. Signal Processing, vol. 51, pp. 313–324, Feb. 2003
- [13] M. Rübsamen, A. El-Keyi, A. B. Gershman, and T. Kirubarajan, “Robust broadband adaptive beamforming using convex optimization,” in *Convex Optimization in Signal Processing and Communications*, D. Palomar and Y. C. Eldar, Eds. Cambridge, MA: Cambridge Univ. Press, 2010, ch. 9, pp. 315–337.
- [14] A. Khabbazibasmenj, S.A. Vorobyov, and A. Hassanien, „Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information,” IEEE Transactions on Signal Processing. vol. 60, pp. 2974-2987, 2012.
- [15] Jie Yang, Yixin Yang, Bo Lei,” An Efficient Robust Adaptive Beamforming Method Using Steering Vector Estimation and Interference Covariance Matrix Reconstruction” IEEE conference 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO).
- [16] A. Hassanien, S. A. Vorobyov, and K. M. Wong, “Robust adaptive beamforming using sequential programming: An iterative solution to the mismatch problem,” IEEE Signal Process. Lett., vol. 15, pp. 733–736, 2008.
- [17] Jie Zhuang, “Low-complexity variable loading for robust adaptive beamforming”, ELECTRONICS LETTERS, vol. 52, no. 5, pp. 338- 340, 2016.
- [18] Wenxing Li, Bin Yang, Yu Zhao, “Low-Complexity Non-Uniform Diagonal Loading for Robust Adaptive Beamforming”, International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), 2017.
- [19] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [20] M. Grant and S. Boyd, “CVX: Matlab software for disciplined convex programming,” version 1.22. <http://cvxr.com/cvx>, Feb. 2015.