

دراسة أداء تشكيل الشعاع المتكيف في الهوائيات الذكّية باستخدام خوارزمية المتوسط التّربيعي الأدنى

د.فرح جنيكه*

(الإيداع:6 تموز 2024، القبول: 17 أيلول 2024)

الملخص:

أدت الزيادة الهائلة في حركة المرور بسبب زيادة عدد المستخدمين وإدخال معدّل البتات المرتفع إلى جعل استخدام الهوائيات المتكيفة ضرورة ملحة مع ارتفاع تنفيذ الاتصالات اللاسلكية، يجمع هذا النوع من الهوائيات والمسمّاة بالهوائيات الذكّية بين مصفوفة الهوائي وقدرة معالجة الإشارة الرقمية، حيث تقوم هذه الهوائيات بتعديل شكل إرسالها بتوجيه الوريقة الرئيسية إلى الاتجاه المطلوب وبنفس الوقت تشكيل الإلغاء باتجاه الإشارة المتداخلة، كما يميّز هذا النظام مجموعات الإشارات العائدة من اتجاهات مختلفة ومن ثمّ يزيد القوة المستقبلية من المستخدم المطلوب. درس هذا البحث تشكيل الشعاع المتكيف باستخدام خوارزمية LMS التي تتميز ببساطتها وانخفاض تعقيدها الحسابي ممّا يجعلها مناسبة لتطبيقات الزمن الحقيقي، كما ركّز هذا البحث على دراسة تأثير عدد عناصر مصفوفة الهوائي على تشكيل الحزم، وكذلك تمت مقارنة أداء هذه الهوائيات من أجل مسافات مختلفة من أطوال الموجة بين عناصر الهوائي.

الكلمات المفتاحية: تشكيل الشعاع المتكيف، اتجاه الوصول، خوارزمية المتوسط التّربيعي الأدنى، الهوائيات الذكّية، عامل المصفوفة.

Studying of Adaptive Beamforming Performance for Smart Antennas by LMS Algorithm

Dr.Farah Jnaikheh*

(Received: 10 June 2024, Accepted: 17 September 2024)

ABSTRACT:

The huge increase in traffic due to an increase in the users number and introduction of the high bits rate made the adaptive antennas use an urgent necessity with the high implementation of the radio communications. This type of the antennas that called smart antennas combines the antenna matrix and digital signal processing capability. These antennas modify their transmission format to direct the main lobe to the desired direction and simultaneously shape null towards the interfering signal. This system also distinguishes the returning signals combinations from different directions and then increases the receiving power of the desired user.

This research studied adaptive beamforming using an LMS algorithm that is simple and low in computational complexity which makes it suitable for real time applications. This research also focused on studying the elements number impact of the antenna matrix on beamforming, as well as comparing these antennas performance for different distances of wave length between antenna elements.

Key words: Adaptive Beamforming , **DOA:** Direction Of Arrival, LMS Algorithm, Smart Antennas, Array Factor.

*Assistant Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering, Al-Rasheed International Private University for Science & Technology, Syria.

المقدمة:

أدى النمو السريع في استخدام التكنولوجيا اللاسلكية والتي أصبحت أكثر تعقيداً وانتشاراً إلى ظهور طلب هائل ليس فقط على القدرات ولكن أيضاً على التغطية الأفضل، وجودة الخدمة الأعلى، وخفض التكاليف الإجمالية للشبكة، وجعل الخدمات في متناول المشتركين. بالإضافة إلى النمو الهائل في عدد المستخدمين، والذي أدى إلى الحاجة إلى عرض نطاق ترددي أكبر، وإمكانية خدمات جديدة، لاستيعاب المزيد والمزيد من مستخدمي الهاتف المحمول، وخلق ضرورة لقدرة أعلى داخل الشبكة الخلوية. وهذا يمكن تحقيقه عن طريق الترشيح المكاني، حيث يعتبر نظام الهوائي الذكي واحد من أكثر التقنيات الواعدة التي تستخدم معالجة الترشيح المكاني التي ستوفر الحل لتحسين قدرة النظام، التغطية الأفضل، كفاءة الطيف الأعلى، تحسين نوعية الخدمات التي تقلل من استهلاك الاستطاعة بشكل فعال، وتخفيض التداخل الناتج عن تعدد المسارات والقنوات المشتركة [1].

للأسباب السابقة فقد تم التفكير في الهوائيات المتكيفة في الاتصالات اللاسلكية في المحطات القاعدية، حيث يتم باستخدام هذه التقنية إرسال إشارة كل مستخدم واستلامها من خلال اتجاه ذلك المستخدم المحدد، أي تركز الهوائيات المتكيفة طاقة النقل في شعاع ضيق على عكس الهوائيات التقليدية التي تنقل الاستطاعة عبر الخلية بأكملها. يحتاج تشكيل الإشارات المتكيفة إلى معالجة إشارة دقيقة، والتي كان يُعتقد حتى هذه الأيام أنها باهظة الثمن للغاية، ولكن انخفضت تكلفة العملية بشكل كبير لتطبيقات الأعمال التجارية، مما جعل تشكيل الحزم مناسباً كحل فعال لإعداد الشبكات اللاسلكية ذات النطاق العريض على نطاق واسع، كما يمكن استخدام تشكيل الحزم بالاقتران مع تقنيات بديلة، مثل التعديل المتكيف، أو تنوع التردد، أو تصحيح الخطأ الأمامي لتعزيز الربح العام للنظام.

أهمية البحث وأهدافه:

يستخدم الجيل الحالي من الخدمات مثل الجيل الخامس (5G: 5 Generation) نطاق ترددي أعلى، ويتطلب اتساع النطاق الترددي، وزيادة قدرة القنوات على نقل البيانات بسرعة عالية. ونظراً لمحدودية الطيف فإن تحقيق هذا الهدف أمر صعب بسبب تدخلات القنوات المشتركة والقنوات المجاورة، ولتحقيق معدل بيانات عالية وقدرات عالية أيضاً في مجال الاتصال هناك حاجة للحد من التداخلات والضجيج التي تؤثر بشكل كبير على أداء النظام الخلوي، كما يتعين على النظام زيادة طاقة الإشارة المطلوبة. لذلك هناك المزيد من التقنيات المتقدمة لتلبية حاجة الجيل القادم من الاتصالات اللاسلكية المتنقلة، ففي العقود الأخيرة فإن هوائيات تشكيل الشعاع في الاتصالات اللاسلكية المتنقلة قد حظيت باهتمام كبير فهي تقنية واحدة تقلل من التداخلات والضجيج [2].

بالإضافة إلى أنه كان يتم توجيه الحزم سابقاً باستخدام هوائيات Omni، وهذا كان يسبب الاستهلاك الأكبر للطاقة، لأن هذه الهوائيات تنشر طاقتها في جميع الاتجاهات، لذا لتجنب هذا نذهب إلى التكنولوجيا الجديدة وهي الهوائيات الذكية، إذ يمكننا باستخدامها توجيه الأشعة فقط في الاتجاه المطلوب، مما يمكن من توجيه الحزم بناءً على خوارزميات اتجاه الوصول (DOA: Direction-of-arrival)، وباستخدام هذا الهوائي الذكي يكون استهلاك الطاقة منخفضاً بسبب وضع الإلغاءات في الاتجاهات غير المرغوب فيها (مصطلح الإلغاء (Nulls) يشير إلى الزاوية التي لا يشع فيها الهوائي أي طاقة أو موجات راديو)، وهذا ما يجعلنا نفضل الهوائيات الذكية لأنها ذات سعة عالية، ولها القدرة على رفض التداخل، والتسليم، والوصول بسهولة إلى التكنولوجيا، والتوجيه الفعال للشعاع.

تجمع هذه التكنولوجيا بين مدخلات الهوائيات المتعددة (من مجموعة هوائيات) لتشكيل حزم ضيقة تجاه مستخدم الهاتف المحمول الأفراد في الخلية، حيث تخلق الاستطاعة المركزة للحزم المستهدفة مكاسب حيوية وتسمح للإشارات بالامتداد لمسافة أبعد، كما تتخلص هذه الحزم الضيقة من التداخل، مما يسمح للعديد من المستخدمين بالاتصال داخل خلية ثابتة بثبات الوقت وبنفس الترددات.

وهذا ما يجعل تقنية الهوائي المتكيف (الذكي) تقدّم استجابة محسّنة بشكل كبير في المجالات التالية مثل: تخفيض مستوى التداخل، تحسين قدرة ونوعية نظام الاتصالات، الحد من التداخل متعدد المسارات، تحسين وثوقية المكالمات، زيادة معدلات البيانات، الكفاءة الطيفية، زيادة سعة الأنظمة اللاسلكية، والتغطية من خلال ملاحقة الهاتف المحمول باستمرار بتوجيه الشعاع الرئيسي نحو المستخدم المطلوب، فمع تشكيل الشعاع المتكيف يمكن زيادة الكفاءة الطيفية للخلية بما لا يقل عن 10 أضعاف [3].

طرائق البحث ومواده:

1-الهوائيات الذكية:

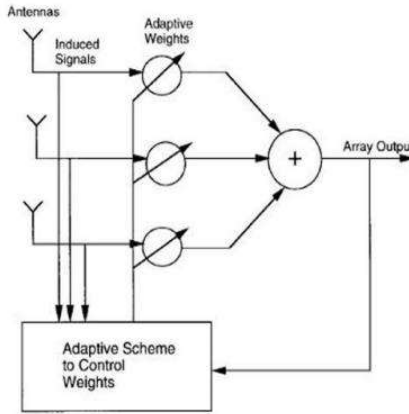
الهوائي الذكي هو نظام هوائي اتصالات لاسلكي رقمي يستفيد من تأثير التتبع في المصدر (جهاز الإرسال) أو الهدف (جهاز الاستقبال) أو كليهما، ينطوي أثر التتبع على إرسال و/أو استقبال موجات التردد اللاسلكي المتعددة (RF) لزيادة سرعة البيانات وتخفيض معدل الخطأ، إذ يعدّ الهوائي الذكي واحد من أكثر التقنيات الواعدة التي ستمكن من الحصول على السعة العظمى في الشبكات اللاسلكية، عن طريق الحدّ بشكل فعال من التداخل متعدد المسارات وتداخل القناة المشتركة، بحيث يمكن أن تؤدي إلى زيادة نطاق الكشف في أنظمة الرادار والسونار (تتبع ومسح الرادار)، بالإضافة إلى إمكانية استخدامها في أنواع القنوات المختلفة مثل ريليه وريسيان، وكذلك تعمل على زيادة قدرة وخصائص الأداء (مثل السعة) لنظم الاتصالات اللاسلكية المتكيفة، كما تستخدم على وجه الخصوص في معالجة الإشارات الصوتية، وعلم الفلك الراديوي، والتلسكوب، وغالباً في الأنظمة الخلوية مثل نظام الاتصالات المتنقلة العام (UMTS: Universal Mobile Telecommunications System)، وأنظمة الوصول المتعدد عبر تقسيم الرموز عريضة الحزمة (WCDMA: Wideband Code-Division Multiple-Access).

تستخدم الهوائيات الذكية مجموعة من العناصر المشعة المرتبة في شكل المصفوفة في هندسة مختلفة (مثل خطّي، دائري، إلخ...)، ويجب أن تجمع جميع عناصر مصفوفة الهوائي المتكيف بطريقة موزّنة من أجل التكيف مع القناة الحالية ومتطلبات حركة المرور المتغيرة وخصائص المستخدم، وهذا التكيف مع الوزن هو الجزء "الذكي" من الهوائي الذكي، الذي يجب أن يسمى بالتالي "الهوائي المتكيف"، إذ يمكن تعريف الهوائي الذكي على أنّه مجموعة من الهوائيات المتعددة أو هوائيات المصفوفات المتكيفة مع وحدة معالجة الإشارات الرقمية (للإرسال أو الاستقبال)، ويكون نمط الإشعاع في الهوائي الذكي وفقاً لخوارزمية متكيفة التي تستخدم لحساب أوزان مصفوفات الهوائي الذكية وتحديثها بشكل متكيف لاستغلال البارامترات المكانية لخصائص القناة اللاسلكية في ظل البيانات المليئة بالضجيج، حيث يمكنها تغيير نمط الحزمة أوتوماتيكياً نحو المستخدم المرغوب فيه، ووضع إلغاء في اتجاه الضجيج والتداخل من أجل معالجة الإشارات لتحديد اتجاه وصول الإشارة واستخدامها لحساب شعاع تشكيل الحزمة، وتتبع وتحديد موقع شعاع الهوائي على الأهداف المتنقلة (يمكن أن يكون الهوائي أي حساس)، وبما أنّه يتم الجمع بين العناصر في المصفوفة بطريقة تتعرّض فيها الإشارات بزوايا معينة إلى التداخل البناء، بينما يتعرّض البعض الآخر منها لتداخلات هدامة، فسيؤدي ذلك إلى تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل، وزيادة مردود الشبكة.

تستخدم الهوائيات الذكية عادة في المحطة القاعدية، وتشعّ الحزم الضيقة إلى المستخدمين المختلفين المخدمين، وطالما أنّ المستخدمين مفصولون جيداً من الناحية المكانية، فيمكن إعادة استخدام نفس التردد حتى لو كان المستخدمون في نفس الخلية، ويتحقّق ذلك من خلال تركيز الإشعاع فقط في الاتجاه المطلوب وتكييف نفسه مع ظروف الحركة المتغيرة أو بيانات الإشارات، وإنّ عملية الجمع بين الإشارات ثم تركيز نمط الإشعاع في اتجاه معين يشير إلى تشكيل الحزم الشعاعية الرقمي، حيث أنّ لتقدير اتجاه الوصول DOA دوراً هاماً في تنفيذ الهوائي الذكي، حيث يعطي هذا التقدير أقصى ذروة للطيف فيما يتعلق بزوايا الوصول التي من المفترض أن يكون المستخدم المطلوب موجوداً عندها.

ويقسم نظام الهوائي الذكي (SAS: Smart Antenna System) إلى جزأين رئيسيين: الأول هو تقدير اتجاه الوصول لجميع الإشارات التي يتلقاها الهوائي بما في ذلك التداخل وإشارات المسارات المتعددة باستخدام خوارزميات تقدير اتجاه الوصول، والجزء الثاني هو تشكيل الشعاع المتكيف والذي يميز إشارة المستخدم المطلوبة ويفصلها عن بقية الإشارات الواردة غير المرغوب فيها، ثم يوجه الإشعاع إلى المستخدم المطلوب ويتبعه أينما يتحرك، وهذا يتم بواسطة تحديث أوزان مصفوفة الهوائي باستمرار وفقاً للتوجيهات المقدرة [4].

كما يمكن تصنيف نظام الهوائي الذكي على أنه إما شعاع مبدل أو نظام المصفوفة المتكيف، ففي نظام الشعاع المبدل يُخدم المستخدمون في الاتجاه المطلوب بواسطة شعاع ثابت متعدد، ونظراً لأن الأشعة ثابتة فعندما يغير مستخدم الهاتف المحمول موقعه عبر الخلية فإن قوة إشارته تتغير، وتحدد المحطة القاعدية الشعاع الذي يتم مواءمته بشكل أفضل مع اتجاه الإشارة المرغوبة بواسطة التبديل بين عدة أشعة ثابتة للاتصال مع المستخدم. أما نظام المصفوفة المتكيف فيستخدم مصفوفة هوائي مع قدرات معالجة الإشارات لتغيير نمط الإشعاع أوتوماتيكياً وفقاً لبيئة التردد الراديوي المتغير، حيث يتغير موقع الإشارة المرغوبة والإشارة المتداخلة، بحيث يكون للنظام القدرة على تتبع وتحديد الأنواع المختلفة للإشارة مثل الإشارة المرغوبة أو الإشارة متعددة المسارات أو الإشارة المتداخلة أو.. وتتميزها، كما أنه يحسب اتجاه وصولها.

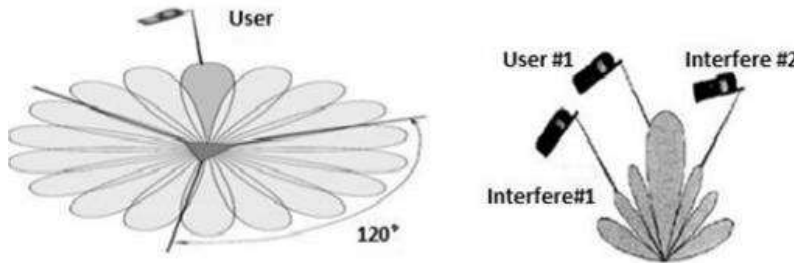


الشكل رقم (1): نظام مصفوفة الهوائي الذكي.

2-أنواع الهوائيات الذكية:

2-1-هوائيات الشعاع المبدل:

تشكل أنظمة هوائي الحزمة المبدلة عدة حزم ثابتة مع حساسية عالية في اتجاهات معينة، وتكشف أنظمة الهوائي هذه عن قوة الإشارة، وتختار واحدة من هذه الحزم الثابتة المحددة مسبقاً، وتتحول من واحدة إلى أخرى مع تحرك الهاتف المحمول في جميع أنحاء القطاع لزيادة ربح الإشارة المستقبلية. بدلاً من تشكيل نمط الهوائي الاتجاهي باستخدام الخصائص المعدنية والتصميم الفيزيائي لعنصر واحد، تجمع أنظمة الشعاع المبدلة بين نواتج الهوائيات المتعددة بطريقة تشكل أشعة ضيقة الاتجاه (اتجاهية) ذات انتقائية مكانية أكثر مما يمكن تحقيقه مع النهج التقليدية ذات العنصر الواحد [5].



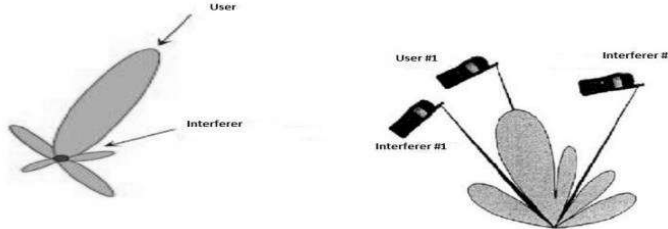
الشكل رقم (2): نمط تغطية نظام الشعاع المبدل.

2-2- هوائيات المصفوفة المتكيفة:

التشكيل المتكيف هو تقنية توجد بها مجموعة من الهوائيات لتحقيق أقصى قدر من الاستقبال في اتجاه محدد بتقدير وصول الإشارة من الاتجاه المطلوب، وبسبب بيئة الضجيج في أنظمة الاتصالات اللاسلكية فإن زوايا وصول الإشارات المطلوبة تتغير مع مرور الوقت، نتيجة لذلك نحن بحاجة إلى تكيف أوزان العنصر الفردي لمصفوفة الهوائيات باستمرار، وهذا يتم إنجازه عن طريق الخوارزميات التكيفية، والتي هي إحدى الطرق المستخدمة لحساب أوزان المصفوفة بشكل متكرر وفقاً لخصائص الإشارات المستقبلية من أجل العثور على الوزن المثالي، وهذا ما يجعل المصفوفات التكيفية قادرة على تحديث أوزانها ديناميكياً وفقاً لظروف الإشارة المتغيرة التي تؤخذ العينات منها بصورة دورية، وهذه القدرة للتحديث الذاتي أمر مرغوب فيه للغاية في العديد من التطبيقات التي تتغير فيها الإشارات، كما هو الحال في نظام الاتصالات المتنقلة، مثل تتبع هدف الرادار وما إلى ذلك.

يستخدم تشكيل الأشعة التقليدية مجموعة ثابتة من الأوزان والتأخير الزمني لدمج الإشارات من الحساسات في المصفوفة، حيث تستخدم أولاً معلومات فقط عن موقع الحساسات في الفضاء والاتجاهات الموجهة ذات الأهمية. على النقيض من ذلك، تجمع تقنيات تشكيل الأشعة التكيفية بشكل عام هذه المعلومات مع خصائص الإشارات التي تم تلقيها بالفعل من خلال المصفوفة لتحسين رفض الإشارات غير المرغوب فيها من الاتجاهات الأخرى، حيث يستفيد النظام المتكيف من قدرته على تحديد وتتبع مختلف أنواع الإشارات لتخفيض التداخل بشكل ديناميكي، وزيادة استقبال الإشارات المرغوبة، ويمكن تنفيذ هذه العملية إما في مجال الزمن أو مجال التردد.

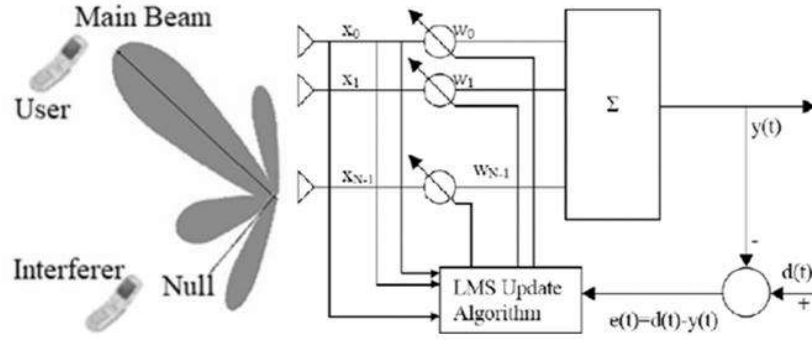
يحاول كلا النظامين زيادة الربح حسب موقع المستخدم، ومع ذلك فإن النظام المتكيف فقط هو الذي يوفر الربح المثالي مع تحديد الإشارات المتداخلة وتتبعها وتخفيضها بنفس الوقت، كما يوفر نظام المصفوفة التكيفية مزيداً من المرونة حيث يتم تركيز الحد الأقصى من الاستطاعة في اتجاه خاص [5].



الشكل رقم (3): نمط تغطية نظام المصفوفة المتكيفة.

3- خوارزميات تشكيل الشعاع المتكيف:

هناك نوعان من الخوارزميات التكيفية هي خوارزمية التكيف الأعمى وغير الأعمى، تتطلب خوارزمية التكيف غير الأعمى المعرفة الإحصائية للإشارة المرسل من أجل التقارب لإيجاد الوزن، ويمكن تحقيق ذلك باستخدام إشارة تجريبية أو مرجعية للكشف عن الإشارة المطلوبة، وتحديث الوزن العقدي لضبط تابع أوزان المصفوفة، كما تعتمد خوارزمية التكيف غير الأعمى على التخفيض من متوسط الخطأ المربع بين الإشارة المستقبلية والإشارة المرجعية، حيث يتم استخدام إشارة الخطأ هذه التي يتم إنتاجها عن طريق مقارنة إشارة الخرج بإشارة مرجعية من أجل الضبط المتكرر لأوزان تشكيل الشعاع إلى قيمها المثلى للحصول على الحد الأدنى من الخطأ المتوسط التربيعي (MSE: Mean Squared Error)، وتعد خوارزمية المتوسط التربيعي الأدنى (LMS: Least Mean Square) مثالاً على هذا النوع من الخوارزميات. أما خوارزمية التكيف الأعمى فلا تحتاج إلى إشارة تجريبية أو إشارة مرجعية لتحديث الوزن العقدي، وغالباً ما توفر دقة أقل ومعدل تقارب أبطأ.



الشكل رقم(4): شبكة تشكيل الشعاع المتكيف باستخدام خوارزمية LMS.

الفكرة الأساسية لمرشح LMS هي تحديث أوزان المرشح بطريقة تتقارب من الوزن المثالي، حيث تبدأ الخوارزمية بافتراض الأوزان الصغيرة (صفر في معظم الحالات)، وفي كل خطوة يتم تحديث أوزان الخطأ التربيعي المتوسط. إن ناتج المصفوفة $y(t)$ مع أوزان العناصر المتغيرة هو المجموع الموزن للإشارات المستقبلية $x_i(t)$ عند عناصر المصفوفة والضجيج $n(t)$ المستقبل المتصل بكل عنصر، حيث تعتمد الأوزان المحسوبة بشكل متكرر على خرج المصفوفة $y(t)$ المرجعي، تقارب الإشارة $d(t)$ الإشارة المطلوبة حيث يتم تقريب الإشارة المرجعية إلى الإشارة المطلوبة باستخدام تسلسل أو شفرة نشر وهو معروف في جهاز الاستقبال. يختلف شكل الإشارة المرجعية ويعتمد على النظام الذي يتم فيه تنفيذ التشكيل المتكيف، عادة ما تكون للإشارة المرجعية علاقة جيدة بالإشارة المطلوبة ودرجة الارتباط التي تؤثر على دقة وتقارب الخوارزمية، وسيتم حساب الأوزان هنا باستخدام خوارزمية LMS استناداً إلى معيار MSE، ونعبر عن خوارزمية LMS بالعلاقات الثلاث الآتية:

$$y(t) = W^T(t) x_i(t) \quad (1)$$

$$e(t) = d(t) - y(t) \quad (2)$$

$$W(t+1) = W(t) + \mu e(t)x_i(t) \quad (3)$$

حيث أن $d(t)$ هي الإشارة المرغوبة، $e(t)$ إشارة الخطأ، $y(t)$ خرج المرشح المتكيف، μ حجم الخطوة للمرشح، ويحدد عن طريق التجريب والمحاكاة، $W(t)$ شعاع الوزن للمرشح، $x_i(t)$ شعاع إشارة دخل المرشح، $W(t+1)$ تحديث شعاع وزن المرشح.

توفر خوارزمية LMS سرعة التقارب، ويرتبط تقارب خوارزمية LMS مباشرة ببارمتر حجم الخطوة μ ، فإذا كان حجم الخطوة صغيراً جداً، فإن التقارب سيكون بطيئاً ويمكن الحصول على حالة مفرطة، وإذا كان التقارب أبطأ من زوايا الوصول المتغيرة فمن الممكن ألا تستطيع المصفوفة المتكيفة الحصول على الإشارة المفيدة بسرعة كافية لتتبع الإشارة الديناميكية. أما إذا كان حجم الخطوة كبيراً جداً فيمكن أن تتجاوز خوارزمية LMS الأوزان المثالية ولن يكون التتبع دقيقاً، ولذلك لا بد من اتخاذ قرار بشأن حجم الخطوة من خلال تجربة قيم مختلفة في الخوارزمية بحيث يتم تأمين الاستقرار بشرط استيفاء الشرط الآتي:

$$0 \leq \mu \leq \frac{1}{\lambda_{max}} \quad (4)$$

حيث λ_{max} : هي القيمة الذاتية الكبرى لمصفوفة الارتباط R_{xx}^A [6].

لإنشاء الشعاع الرئيسي عند الطول الموجي λ نحو اتجاه الشعاع المطلوب من الاتجاه الواسع، تعطى إزاحة الطور التدريجي بين عناصر الهوائي α بالعلاقة:

$$\alpha = \frac{-2\pi d}{\lambda} \cos \theta \quad (5)$$

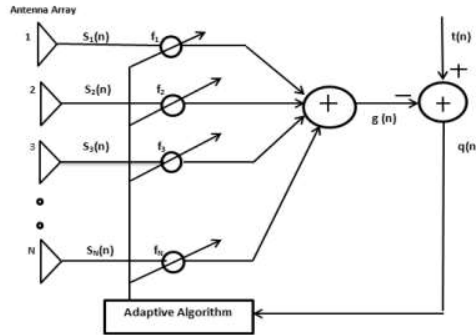
θ : الاتجاه المرغوب للشعاع عند الطول الموجي λ ، بحيث تتوافق إزاحة الطور مع تأخير الوقت الذي سيواجه الشعاع إلى الزاوية θ ، d : التباعد بين عناصر مصفوفة الهوائي [7].

4-تشكيل الشعاع المتكيف:

تشكيل الشعاع المتكيف هو مزيج من العديد من مدخلات عناصر الهوائي في مصفوفة الهوائيات باستخدام قدرة معالجة الإشارات لإنتاج أشعة ضيقة للسماح بنطاق تردد معين للمستخدمين المنفصلين داخل الخلية في نقطة زمنية معينة، مما يؤدي إلى تحسين قدرة النظام، وأحد العوامل التي يجب مراعاتها هو منع تداخل القناة المشتركة باستخدام تشكيل الشعاع المتكيف [8].

يتم تعريف تشكيل الشعاع المتكيف على أنه عملية التكيف لمطال وطور الإشارة عن طريق تعديل الأوزان العقدية لكل عنصر هوائي فيما يتعلق بالوقت، مما يؤدي إلى ضبط الطور والمطال لتحسين الإشارة المستقبلية، وهذا ما يتسبب في تكوين خرج مصفوفة الهوائي لتشكيل أو استقبال اتجاه معين وتخفيض الناتج في الاتجاه الآخر، ويتم حساب الأوزان العقدية بشكل متكرر باستخدام خوارزمية متكيفة لمعالجة الإشارة الرقمية الفعالة معتمدة على معايير مختلفة، حيث أن إحدى وسائل تشكيل الشعاع هي ضرب الإشارات بمعاملات عقدية.

أما التشكيل أو الترشيح المكاني فيعرف بأنه عملية الجمع ثم تركيز الإشعاع في اتجاه معين، إنها التقنية التي يتم من خلالها استغلال مصفوفة الهوائي لتحقيق الاستقبال الأعظمي في الاتجاه المطلوب من خلال تقدير وصول الإشارة، بينما يتم رفض الإشارات ذات التردد نفسه من اتجاهات أخرى. فعلى الرغم من أنه يتم إرسال الإشارات التي تستخدم نفس التردد بواسطة مرسلات مختلفة، فإنها ستصل من خلال زوايا مختلفة، ويستخدم الفصل المكاني هذا للتمييز بين الإشارات المرغوب فيها والإشارات غير المرغوب فيها، وهذا يمكن إنجازه عن طريق مراحل التغذية لكل عنصر من عناصر المصفوفة بحيث تكون الإشارة المستقبلية أو المرسل من جميع العناصر بنفس الطور في اتجاه معين، وتستخدم الخوارزميات المتكيفة لتعديل الأوزان وبالتالي تخفيض الخطأ المتوسط التربيعي بين الإشارة المرغوبة وخرج المصفوفة [9].



الشكل رقم (5): المخطط الصندوقي لشبكة تشكيل الأشعة المتكيفة.

يظهر الشكل (5) أن نظام الهوائي الذكي يتكون من مصفوفة خطية موحدة بـ N هوائي متباعدة خطياً، ثم يتم ضرب الإشارة المستقبلية $s(n)$ التي يتلقاها عنصر الهوائي المتعدد بالمعاملات في شعاع الوزن العقدي (سلسلة من مركبات المطال والطور) التي تعدل طور ومطال الإشارة المستقبلية من كل هوائي، ثم تدمج لإنتاج خرج النظام بحيث تكون الإشارة الموزنة الناتجة في خرج المصفوفة $g(n)$ هي المجموع الموزن للإشارة المستقبلية $s(n)$ عند عنصر الهوائي مضروبة بوزن المصفوفة $f(n)$ ، كما يستقبل المعالج مصفوفة الإشارات واتجاه الإشارة المرغوبة كمعلومات إضافية، وتستخدم هذه من قبل المعالج لحساب الأوزان التي ستستخدم لكل قناة، أما الأوزان المثالية لعناصر مصفوفة الهوائي فيتم حسابها باستخدام خوارزمية للتمييز بين الإشارة المطلوبة وإشارة التداخل، حيث يتم اختيار الوزن العقدي ذي الترتيب K لعناصر الهوائي بعناية لإعطاء القيم والإلغاءات المطلوبة في نمط إشعاع المصفوفة، حيث تُستخدم الخوارزمية المتكيفة لتخفيض الخطأ

$q(n)$ بين الإشارة المرغوبة $t(n)$ ومخرجات المصفوفة $g(n)$ ، وتخفيض إشارة الخطأ يتم تحديث شعاع الوزن، يمكن بعد ذلك تغيير الأوزان ببطء لتوجيه الشعاع حتى الحصول على الحد الأقصى من قوة الإشارة، وبالتالي العثور على اتجاه مصدر الإشارة ونمط الشعاع المطلوب في إشارة الخرج، بحيث تكون الريقة الرئيسية باتجاه المستخدم المطلوب من خلال زيادة الربح وبنفس الوقت يكون الإلغاء باتجاه المستخدمين غير المرغوبين، بحيث يتم رفض إشارات الحامل الترددي نفسه من الاتجاهات الأخرى (الإرسال والاستقبال للإشارات الاتجاهية). لا توجه المصفوفة المتكيفة الحد الأقصى من الإشعاع في اتجاه الإشارة المرغوبة فقط، إنما تدخل الإلغاء أيضاً في اتجاه الإشارة المتداخلة والتي ترمز إلى تداخل القناة المشتركة من مستخدمي الهواتف المحمولة في الخلايا المجاورة، مما يحقق الهدف الرئيسي لخوارزمية تشكيل الشعاع المتكيف وهو تشكيل شعاع متعدد نحو المستخدم المرغوب فيه أثناء إلغاء التداخل في نفس الوقت من اتجاهات أخرى وذلك من خلال تعديل متجه الوزن [10].

يمكن تلخيص الخوارزمية في هذه الخطوات في كل تكرار:

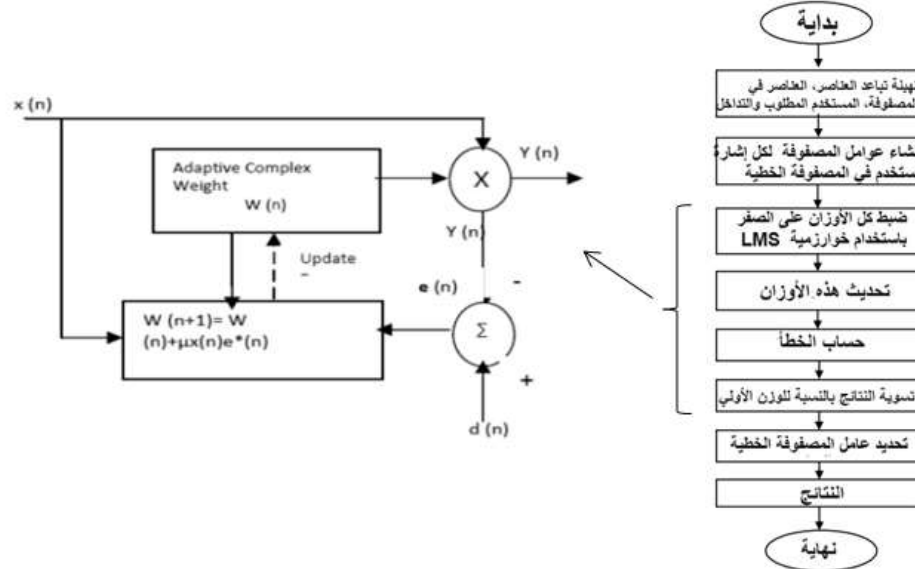
- تحديد اتجاه وصول جميع الإشارات الواردة بما في ذلك الإشارات المتداخلة وإشارات المسارات المتعددة المقدرة باستخدام خوارزميات اتجاه الوصول، وكذلك تحديد إشارة المستخدم المرغوب فيها، وفصلها عن بقية الإشارات الواردة غير المرغوب فيها.

- حساب الإشارة المعالجة عن طريق الأوزان الحالية.

- توليد الخطأ بين الإشارة المعالجة والإشارة المرغوبة.

- توجيه الشعاع في اتجاه الإشارة المطلوبة، حيث يتم تتبع المستخدم أثناء تحركه، بينما يتم وضع إلغاء في اتجاهات الإشارة المتداخلة من خلال تحديث الأوزان العقدية باستمرار باستخدام معلومات الخطأ الجديدة بواسطة طريقة التدرج.

يظهر الشكل (6) المخطط التدفقي لخوارزمية LMS [1]:



الشكل رقم (6): المخطط التدفقي لخوارزمية LMS المستخدمة لتشكيل الشعاع المتكيف.

يتم اشتقاق الخوارزميات الأكثر تكيفاً من خلال المعيار الذي يتضمن الحد الأدنى من MSE، الحد الأقصى من نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج (SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio)، الحد الأدنى من تباين الضجيج، الحد الأقصى للربح. فقبل تشكيل الشعاع المتكيف يستخدم تقدير اتجاه الوصول لتحديد الاتجاهات الرئيسية للمستخدمين والمتداخلين، ثم يتم توليد مجموعة من المعادلات التكرارية لضبط الأوزان. وفي الحالة البسيطة يمكن اختيار

الأوزان لإعطاء شعاع مركزي واحد في اتجاه ما، كما هو الحال في تطبيقات تحديد الاتجاه. ونظراً لتعديل الأوزان بشكل متكرر فإنّ تابع كلفة الإشارة يصبح أصغر وأصغر في الحساب، حيث يتم تعديل متجهات الوزن بحساب العوامل مثل معدل التقارب والملاحقة والقوة والمتطلبات الحسابية، وعندما يتم تخفيض تابع الكلفة إلى الحد الأدنى يتم الحصول على معيار الأداء، ويقال أنّ الخوارزميات قد تقاربت [11].

توفّر خوارزمية LMS تقارباً سريعاً، حيث تعمل تقنية الهوائي الذكي بواسطة هذه الخوارزمية على تعقب مستخدم الهاتف المحمول باستمرار بواسطة زيادة قوة الريقة الرئيسية وتوجيه الشعاع الرئيسي نحوه، وبنفس الوقت تشكيل الإلغاء في اتجاهات الإشارة المتداخلة، وهذا يتفوق عما كان متبع سابقاً في نظام هوائي المحطة القاعدية الخلوية اللاسلكية والمعتمد على تقنية تبديل الشعاع والتي تعاني من عدم الكفاءة لتتبع المستخدم ومحدودية القدرة.

يمكن القيام بذلك باستخدام مرشح خط تأخير بسيط مكون من مرشح استجابة غير محدودة (Filter Infinite Response:FIR)، ويمكن تغيير أوزان مرشح FIR أيضاً بطريقة متكيفة واستخدامها لتوفير التشكيل الأمثل للحزمة وتكوين نمط الحزمة الفعلي النموذجي [1,7].

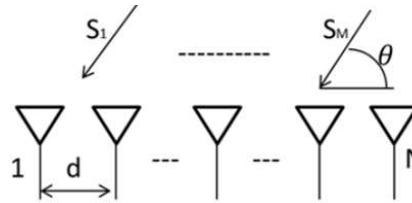
5-هندسة المصفوفات الخطية:

عامل المصفوفة هو تابع للأوزان والمواضع وشعاع التوجيه المستخدم في مصفوفة الهوائي أو المصفوفة الطورية، يحدّد هذا العامل تأثير الجمع بين العناصر المشعة في المصفوفة بدون نمط إشعاع عنصر محدد مأخوذ في الاعتبار. أمّا نمط الإشعاع فهو تمثيل رسومي أو رياضي للقوة المشعة (شعاع الموجة الكهرومغناطيسية) من الهوائي، ويرسم نمط الإشعاع من أجل عامل المصفوفة الطبيعي وفقاً لاتجاه الإشارات، ويساعد نمط الإشعاع في فهم كيفية توجيه الشعاع الرئيسي بالضبط (الاتجاهية) حيث تتشكل الإلغاءات لإلغاء التداخل [12].

يُعطى نمط الإشعاع لمصفوفة الهوائي بضرب عامل المصفوفة وعامل العنصر، وإذا افترضنا جميع العناصر تشع في جميع الاتجاهات بالتساوي، ونمط الإشعاع يساوي عامل المصفوفة، وبافتراض ظروف الحقل البعيد مثل $r > d$ ، يمكننا استخلاص عامل المصفوفة $AF(\theta)$ على النحو التالي:

$$AF(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n e^{jnkdcos(\theta)} \quad (6)$$

w_n : وزن المصفوفة العقدي عند العنصر n ، θ : زاوية وصول مستوى الموجة الكهرومغناطيسية على طول محور المصفوفة، K : ثابت الطور المرتبط بالانتشار وهو مرتبط بطول الموجة ويسمى العدد الموجي $(2\pi/\lambda)$ ، λ : طول الموجة الحامل.



الشكل رقم (7): هندسة المصفوفة الخطية.

تتكوّن المصفوفة الخطية كما هو موضح في الشكل (7) من عدد من عناصر الهوائي مثبتة على خط مستقيم ومفصولة بمسافة مكانية، ويتم تحقيق المصفوفة الطورية الخطية الموحدة عن طريق وضع كل عنصر هوائي على طول خط مستقيم بحيث تكون الهوائيات متباعدة بالتساوي بمقدار d ، ويعتمد التباعد بين كل عنصر وآخر على الطول الموجي للإشارة الواردة المطلوبة [13].

باستخدام خوارزمية LMS تكون الإشارة المستقبلية عند العنصر ذو الترتيب n معطاة بالعلاقة:

$$x_n(t) = \sum_{i=1}^M S_i(t) e^{-j(i-1)nkdsin(\theta_i)} + n_n(t) \quad (7)$$

$S_1(t)$: هي الإشارة المرغوبة، $S_M(t)$: هي إشارة التداخل، $n(t)$: هي إشارة الضجيج المستقبلية عند العنصر ذو الترتيب n (الضجيج الغوسي الأبيض المضاف).
النتائج والمناقشة:

تتكون المصفوفة الخطية الموحدة من 8 عناصر مع تباعد نصف طول الموجة بين العناصر ($d = 0.5 \lambda$)، وقبل إجراء تشكيل الحزم المتكيف يجب الحصول على اتجاهات المستخدمين والتداخل أيضاً باستخدام خوارزمية تقدير اتجاه الوصول (DOA)، حيث يكون التداخل ثنائي وتؤخذ إشارة واحدة مرغوبة، ويصل المستخدم المطلوب عند الزاوية $DOA = 25^\circ$ (DOA: Direction Of Arrival)، بينما تصل إشارتي التداخل عند الزاويتين $DOI = 0^\circ, -40^\circ$ (DOI: Direction Of Interference)، ونطبق خوارزمية LMS ذات حجم الخطوة $\mu = 0.01$ ، وعدد العينات مساوٍ لـ 800 عينة، كما نفرض أن الضجيج هو من النوع الغوسي الأبيض المضاف ذو قيمة الانحراف $\sigma = 0.1$ ، وأن الإشارة المرغوبة القادمة هي إشارة جيبية بسيطة عقدية معدلة طورياً من الشكل التالي $s(t) = e^{j\sin(wt)}$.

نلاحظ من الشكل (8) أن تشكيل الشعاع يزداد باتجاه المستخدم المطلوب، كما أن معدل التقارب واستجابة الإشارة (خرج المصفوفة) يتحسن، ويتم تحديث الوزن بطريقة تخفض التداخل وتوجه الشعاع بالاتجاه المطلوب، بحيث يكون الشعاع الرئيسي (إشارة الذروة) نحو اتجاه الإشارة المطلوب عند الزاوية 25° ، والإلغاء في الاتجاه المتداخل، حيث نلاحظ أن خوارزمية LMS لديها عمق فارغ -46 dB عند الزاوية 0° نحو المتدخل الأول و -48 dB عند الزاوية -40° نحو المتدخل الثاني (الورقة الأساسية تمثل المطال الأعلى وهي الإشارة المطلوبة، وتمثل الوريقات الصغيرة إشارات التداخل). تبدأ الخوارزمية بافتراض الأوزان الصغيرة (صفر)، وعندما يزداد عدد التكرارات تتقارب الأوزان من القيمة المثلى، أي أنه في كل خطوة يتم تحديث الأوزان وفقاً لـ MSE، وبمجرد الوصول إلى القيمة المثلى فإن متجه الوزن يبقى ثابتاً، كما نلاحظ من الشكل (9) أنه يتم تعديل الوزن العقدي لتخفيض خطأ MSE بين خرج مشكل الحزم وشكل موجة الإشارة المتوقع، ثم تستقر الخوارزمية بعد حوالي 80 تكرار، حيث نلاحظ انخفاضاً في متوسط قيمة الخطأ المتوسط المربع (MSE) مع الزيادة في عدد التكرارات وصولاً إلى قيمة مساوية لـ (0.035)، وهذا متوافق مع الدراسات المرجعية التي تستقر فيها الخوارزمية بعد حوالي (60-110) تكراراً، وتكون قيم MSE أيضاً بين 1-5%.

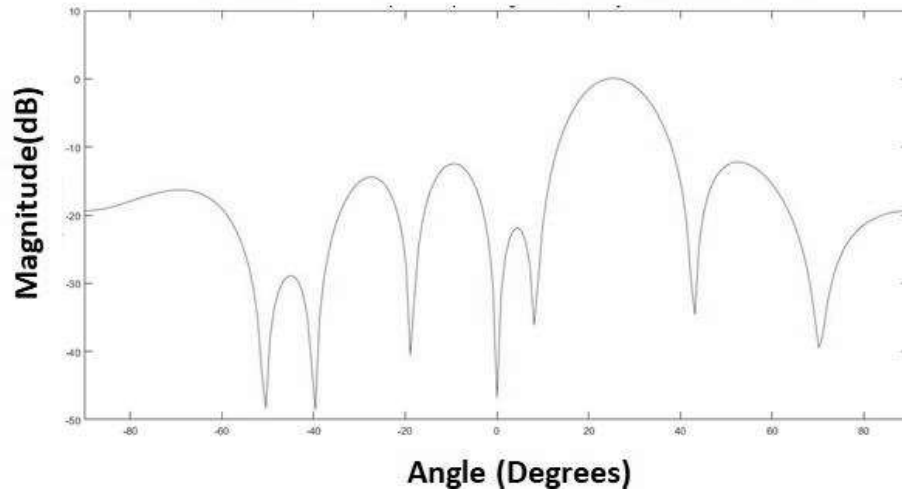
كما يوضح الشكلين (10)، (11) الفرق بين مطال الإشارة المرغوبة ومطال إشارة خرج خوارزمية LMS، الفرق بين طور الإشارة المرغوبة وطور إشارة خرج خوارزمية LMS على التوالي.

عندما يتناقص عدد عناصر الهوائي ليصبح 4 (الشكل (12))، فنلاحظ أن عرض الحزمة يزداد وتصبح أوسع وهذا يؤدي إلى تخفيض اتجاه مصفوفة الهوائي، كما أن مستوى الحزم الجانبية يزداد بتخفيض عدد عناصر مصفوفة الهوائي، وبالتالي تظهر نتيجة المحاكاة أنه بزيادة عناصر المصفوفة فإن عرض الشعاع عند الزاوية المرغوبة يصبح أضيق، والتوجيه أفضل، والاستجابة أفضل لسعة الخرج من خلال تشكيل الشعاع الرئيسي الأكثر ضيقاً نحو الإشارة المطلوبة، وهذا أمر مهم في بعض التطبيقات التي تتطلب تتبعاً دقيقاً، كما تتحسن استجابة الخوارزميات هنا أيضاً، في حين أن لزيادة عدد العناصر تأثيراً سلباً على زيادة مستوى التداخل عن طريق زيادة عدد الحزم الجانبية، ولكن مستوى هذه الحزم الجانبية يكون منخفضاً مقارنة بتلك التي تولدها الأعداد الصغيرة من العناصر، كما أنه ينتج عن العدد المتزايد لعناصر مصفوفة الهوائي زيادة في ضجيج النظام [14,15,16].

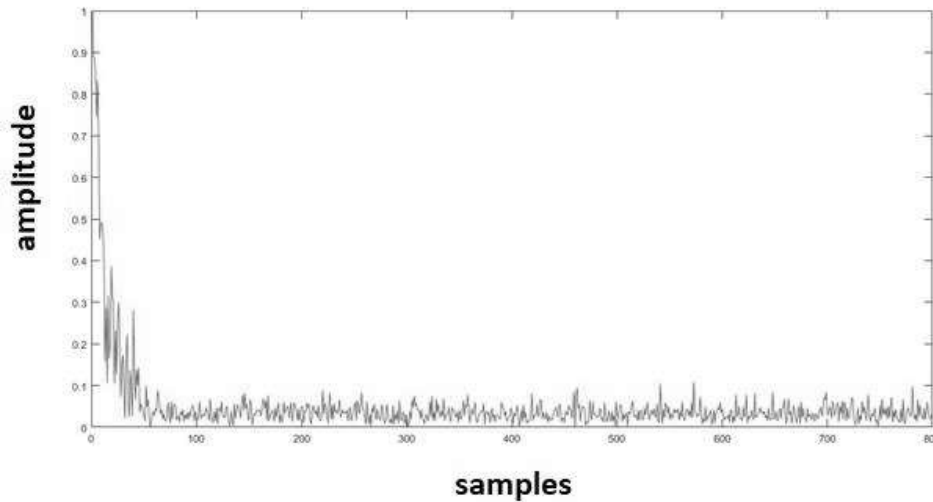
أما بزيادة المسافة بين عناصر الهوائي لتصبح $d = \lambda$ ، مع بقاء $N = 8$ (الشكل (13))، فإن عرض حزمة الهوائي سيصبح أضيق عما كان عليه في حالة $d = 0.5\lambda$ ، مما يؤدي إلى اتجاهية أعلى، ولكن قيم الحزم الجانبية ستكون أعلى (الحزم الجانبية هنا هي المشكلة)، حيث يسبب الشعاع الرئيسي أخطاء في الإشارة المستقبلية بسبب التداخلات وضياح الاستطاعة.

أما عندما يصبح تباعد عناصر الهوائي أقل من 0.5 من الطول الموجي (λ) وليكن $d = 0.25\lambda$ مع بقاء $N = 8$ (الشكل (14))، فإن الوريقات الجانبية ستصبح أوسع وذات قيم أعلى عما كان عليه في حالة $d = 0.5\lambda$ ، مما يجعلنا نستنتج أنه يجب اختيار المسافة d بين العناصر بدقة، حيث أن تخفيض المسافة يؤثر على شكل استجابة الخرج ودقتها عن طريق جعل النطاق العابر عريضاً مقابل القيم الصغيرة لـ d ، كما تظهر نتيجة المحاكاة أن زيادة التباعد بين عناصر المصفوفة ينتج حزم ضيقة، ولكن هذا يزيد أيضاً عدد الحزم الجانبية. أما عندما يكون $d = 0.5\lambda$ فإن مستوى الوريقات الجانبية يكون منخفضاً، ويكون عمق الإلغاء مرتفعاً، مما يؤدي إلى قدرات أكبر لتخفيض التداخل، وبالتالي فإن $d = 0.5\lambda$ هي مسافة الفصل المثلى بين عنصرين هوائيين (التباعد الأمثل في تصميم عناصر هوائي المصفوفة في الهوائي الذكي)، والذي يعطي أفضل النتائج فيما يتعلق بالتوجيه وتحسين كفاءة النظام.

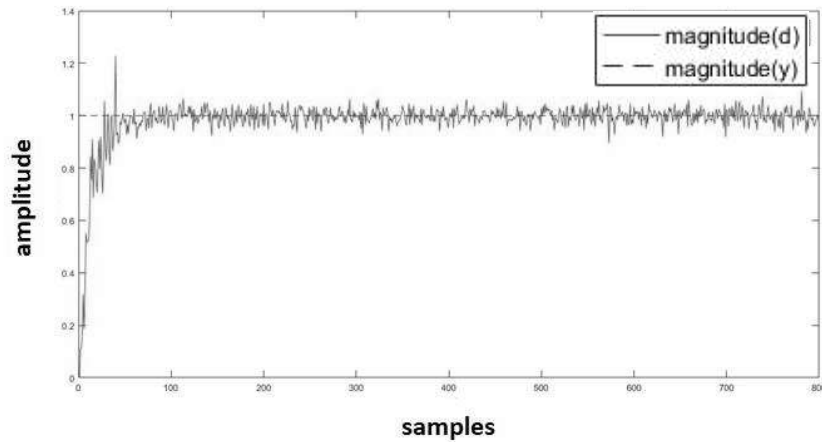
Amplitude Response for given Antenna Array



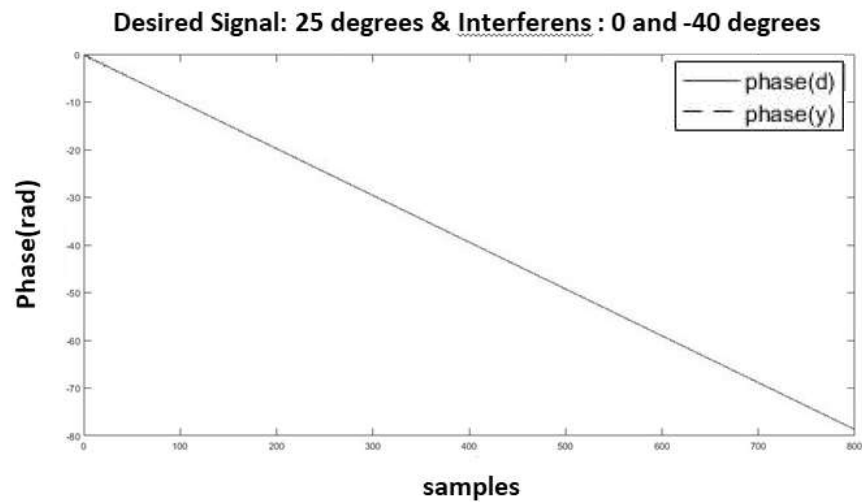
الشكل رقم (8): نموذج الإشعاع لتشكيل الشعاع باستخدام خوارزمية LMS المتكيفة من أجل 8 عناصر، $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°



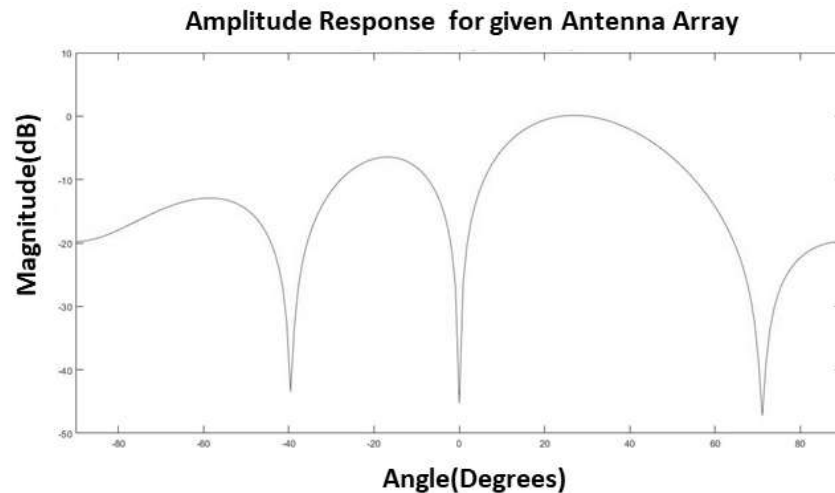
الشكل رقم (9): الخطأ بين الإشارة المرغوبة وخرج خوارزمية LMS من أجل 8 عناصر، $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°



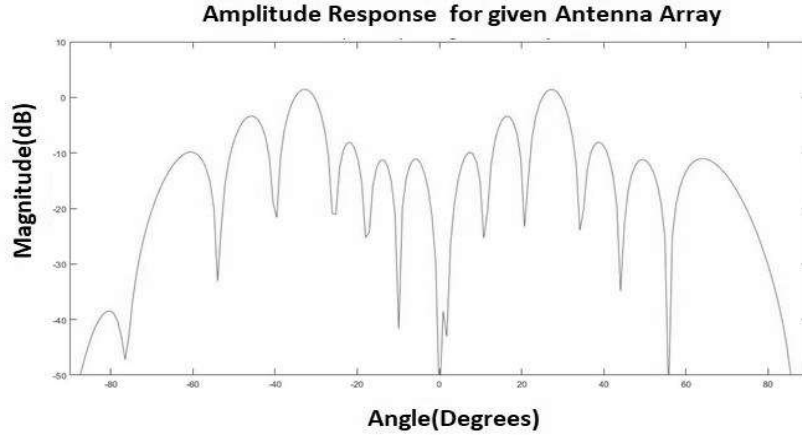
الشكل رقم (10): الفرق بين مطال الإشارة المرغوبة ومطال إشارة خرج خوارزمية LMS من أجل 8 عناصر،
 $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40° ، عدد العينات = 800 عينة، $\sigma = 0.1$.



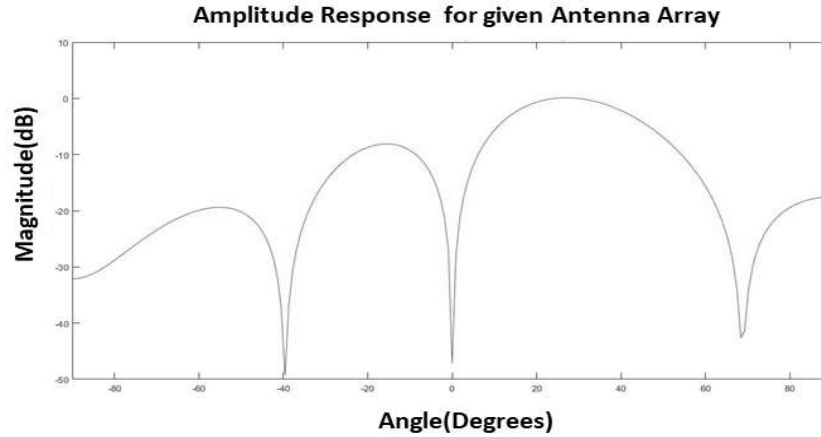
الشكل رقم (11): الفرق بين طور الإشارة المرغوبة وطور إشارة خرج خوارزمية LMS من أجل 8 عناصر،
 $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°



الشكل رقم (12): نموذج الإشعاع لتشكيل الشعاع باستخدام خوارزمية LMS المتكيفة من أجل 4 عناصر،
 $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°

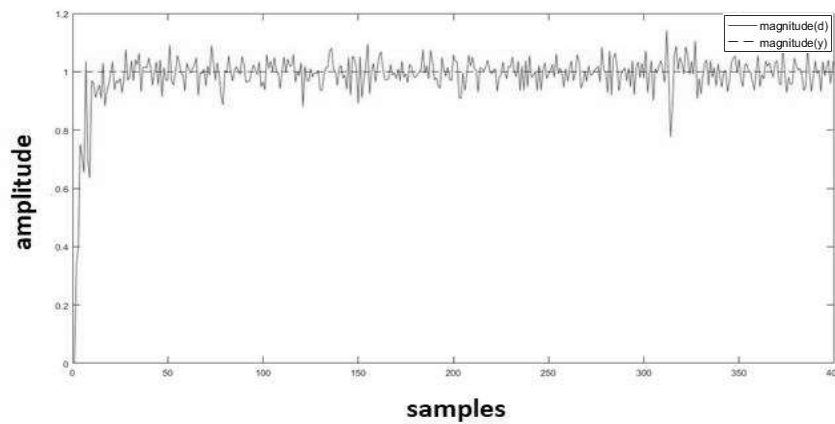


الشكل رقم (13): نموذج الإشعاع لتشكيل الشعاع باستخدام خوارزمية LMS المتكيفة من أجل 8 عناصر، $d = \lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°



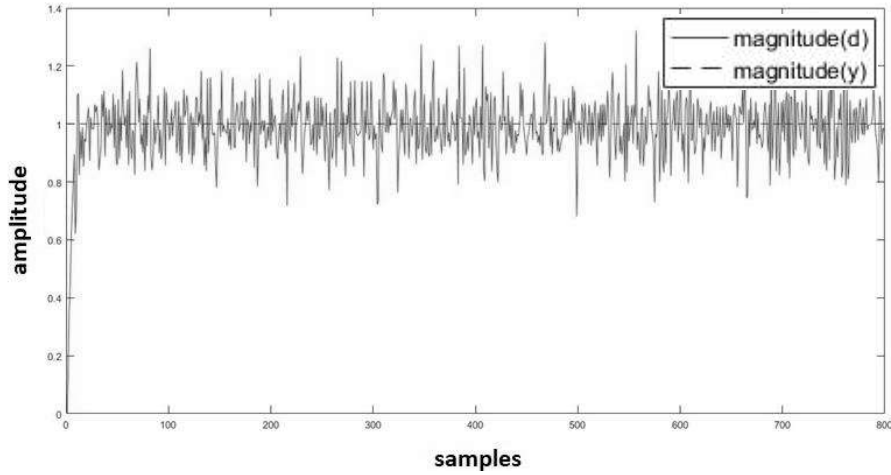
الشكل رقم (14): نموذج الإشعاع لتشكيل الشعاع باستخدام خوارزمية LMS المتكيفة من أجل 8 عناصر، $d = 0.25\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40°

إذا انخفض عدد العينات إلى 400 عينة فهذا سيؤثر سلباً على أداء الخوارزمية من خلال ارتفاع قيمة MSE كما هو موضح في الشكل (15)، وكذلك الأمر فإن زيادة عدد العينات سيؤدي إلى تخفيض قيمة MSE .

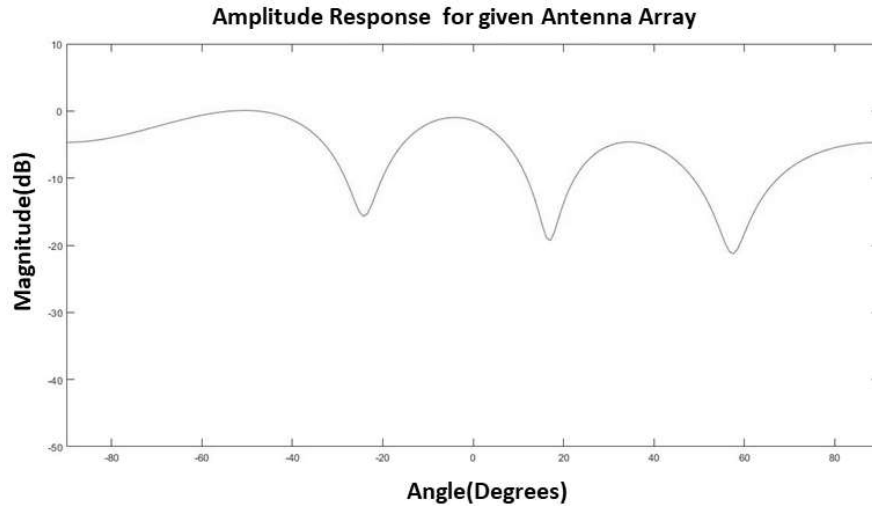


الشكل رقم (15): الفرق بين مطال الإشارة المرغوبة ومطال إشارة خرج خوارزمية LMS من أجل 8 عناصر، $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40° ، عدد العينات = 400 عينة، $\sigma = 0.1$.

وإذا أعدنا المحاكاة مع تغيير قيمة الانحراف المعياري للضجيج لتصبح ($\sigma = 0.2$) فنلاحظ أن الفرق بين مطال الإشارة المرغوبة ومطال إشارة خرج خوارزمية LMS سيصبح أكبر كما هو موضح في الشكل (16)، وسيصبح أداء الخوارزمية سيئاً نتيجة زيادة قيم MSE [17,18].



الشكل رقم (16): الفرق بين مطال الإشارة المرغوبة ومطال إشارة خرج خوارزمية LMS من أجل 8 عناصر، $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 25° ، وإشارتي التداخل 0° ، -40° ، عدد العينات = 800 عينة، $\sigma = 0.2$.
وأخيراً إذا أعدنا الدراسة السابقة مع افتراض أن الإشارات الثلاث مترابطة مع بعضها وقادمة من اتجاهات زوايا متقاربة جداً، حيث يصل المستخدم المطلوب عند الزاوية $DOA = 35^\circ$ ، بينما تصل إشارتي التداخل عند الزاويتين $DOI = 30^\circ, 40^\circ$ (مع الاحتفاظ بجميع البارامترات المستخدمة في بداية النتائج)، فنلاحظ أن خوارزمية تشكيل الشعاع المتكيف غير قادرة على رفض التداخل في حالة الإشارات المترابطة مع الإشارة المرغوبة [19,20,21]، كما هو موضح في الشكل (17).



الشكل رقم (17): نموذج الإشعاع لتشكيل الشعاع باستخدام خوارزمية LMS المتكيفة من أجل 8 عناصر، $d = 0.5\lambda$ ، والإشارة المرغوبة 35° ، وإشارتي التداخل $30^\circ, 40^\circ$

الاستنتاجات والتوصيات:

تتميز المصفوفة المتكيفة باستخدام الخصائص الإشعاعية لها على قدرتها على تغيير الإشعاع تبعاً للتغيرات في متطلبات النظام، وتختلف هذه المصفوفة عن الهوائيات التقليدية من خلال قدرتها على أن تعمل بأداء عالٍ في بيئات ديناميكية تتميز بإشارات سواء أكانت مرغوبة أو غير مرغوب فيها من اتجاهات مختلفة ومستويات استطاعة مختلفة. يستفيد النظام المتكيف من قدرته على تحديد وتتبع أنواع مختلفة من الإشارات بشكل فعال باستخدام طرق تقدير اتجاه الوصول، حيث يكون لجميع الإشارات الواردة اتجاه الوصول الذي تحدده خوارزمية DOA، ومن خلال خوارزمية معالجة الإشارة الذكية يتم ضبط اتجاه عملية الوصول بانتظام لاستيعاب التغيرات المستمرة في مواقع إشارات التداخل، حيث تحاول الخوارزمية تقدير الإشارة المطلوبة مثل اتجاه وصولها، وتستخدم نفس المعلومات لتحديث متجهات تشكيل الحزمة، والتي سيتم استخدامها بعد ذلك لتتبع وتحديد موقع الإشعاع الرئيسي للهوائي نحو الهدف المتنقل، ثم يتم تحديث إعدادات النظام باستخدام تقنية تشكيل الشعاع المتكيف، عن طريق أوزان العناصر المؤثرة في كل من إزاحة الطور وتوهين المطال. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام المصفوفات المتكيفة في نظام الاتصالات سيوفر وثوقية وجودة أفضل مقارنة بالنظم التقليدية، بالإضافة إلى الحاجة إلى زيادة عدد العناصر الموجودة في مصفوفة الهوائيات لتوفير أداء أفضل.

يمكن استخدام تقنية تشكيل الحزم في كل من الإرسال والاستقبال لتحسين الانتقائية المكانية، حيث يتم استخدام تشكيل الشعاع المتكيف لأنه يتحكم في نمط الإشعاع عن طريق التخفيض من الخطأ المتوسط التربيعي إلى أدنى حد، زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج، تخفيض التباين، توجيه الوريقة الرئيسية إلى الزاوية المطلوبة، وتخفيض الحزم الجانبية في نمط الإشعاع من أجل التحقق من صلاحية التقنية لرفع مستوى توجيه الهوائي، كما يمكن فصل الإشارات المتداخلة من نفس التردد لتحقيق رفض التداخل في القنوات المشتركة.

وبما أن المشكلة الرئيسية للتقنية المتكيفة هي العثور على الأوزان العقدية، لذلك هناك عدة طرق تنتج هذه الأوزان مثل استخدام الخوارزمية المتكيفة (مثل LMS) التي تقوم بضرب تحديث الأوزان بالإشارة المستقبلية، وهذا يقلل من عرض الشعاع ويحسن الاتجاهية بدقة عالية إلى المستخدم المرغوب فيه عن طريق إلغاء المستخدمين المتداخلين. هذه التقنية بسيطة وتكون فعالة بشكل أساسي عندما تكون الإشارات المتداخلة أضعف مقارنة بالإشارة المرغوبة، نظراً لأنه كلما زادت قوة الإشارة المطلوبة (نسبياً) أصبحت مساهمتها أكبر، وهذا يزيد مجموع الاستطاعة الناتجة، ويزيد بدوره النسبة المئوية للإلغاء.

تساهم هذه التقنية في تشغيل الإشارات بنجاح حتى عندما يكون هناك تداخلات من مصادر خارجية مختلفة التي تجعل الإشارات تفقد سلامتها مع عوامل خارجية مثل الضجيج، إلا أنها تستطيع فقط كبت إشارات التداخل غير المترابطة مع الإشارة المرغوبة وتقتل في حالة المترابطة معها.

بزيادة عدد عناصر الهوائي لوحظ أن الأداء يصبح أفضل، حيث أن عرض الحزمة سيصبح أضيق، وتخفض الوريقات الجانبية، وتحسن الاتجاهية في الاتجاه المرغوب، وبالتالي يتحسن تشكيل الحزم، كما تؤدي زيادة عدد عناصر الهوائي إلى إظهار التحسن في معدل خطأ البت (BER: Bit Error Rate)، حيث أن معدل البيانات يمكن زيادته إذا كانت قيمة BER أقل.

أما عند زيادة عدد عناصر المصفوفة مع تغيير عناصر المصفوفة فسيتم تعديل نمط الإشعاع وسيؤثر في خصائص الإشعاع.

وقد وجدنا أيضاً أن مسافة الفصل المثلى بين الهوائيات هي 0.5λ ، وهذه النتيجة مخصصة لخوارزمية LMS، ولكنها في الواقع صحيحة لجميع الخوارزميات، لذلك تعتبر $d = 0.5\lambda$ في جميع عمليات المحاكاة الأخرى، كما أن هذه القيمة

المثلي لمسافة الفصل بين العناصر والمساوية لنصف الطول الموجي تجعل MSE تعطي خطأً مثالياً في اتجاه معين، كما تؤدي إلى زيادة قيمة SNR للإشارة المطلوبة.

تستخدم خوارزمية LMS على نطاق واسع في المرشح المتكيف بسبب الانخفاض التسيي للتقيد الحسابي لها، والاستقرار الجيد، والقوة الجيدة نسبياً في مواجهة أخطاء التنفيذ، وإلغاء التداخل، مما يجعلها خيار مثالي للعديد من التطبيقات التي تحتاج إلى المتانة والبساطة، إذ يمكن تحليل هذه الخوارزميات من أجل تطبيقات الزمن الحقيقي مثل إلغاء الصدى، كما يمكن أيضاً تحسين أداء خوارزمية LMS باستخدام الشبكات العصبونية ضمن أنظمة WiMAX التي توفر بيانات عالية السرعة على مساحة واسعة من أجل إعطاء قيم أوزان بدائية تمكّننا من الحصول على أقل خطأ ممكن، إذ تمكن الهوائيات الذكية المتكيفة من إعادة الاستخدام المكاني، وتزيد الإنتاجية ومجال الاتصال بسبب زيادة اتجاهية مصفوفة الهوائي وبالتالي تحسين خرج الهوائي الذكي مما ينعكس على أداء النظام، وهنا تبرز أهمية هذه الأبحاث في الاتصالات الحديثة. وبشكل عام فإن أداء خوارزمية LMS جيد جداً ويتحسن هذا الأداء أيضاً من خلال زيادة عدد العينات، وكذلك انخفاض قيمة الانحراف المعياري للضجيج، وكل العاملين يساهم في تحسين قيمة MSE.

في حال تغير خصائص الإشارة بسرعة بسبب معدل التثقل العالي للمستخدم، فإن خوارزمية LMS قد لا تكون قادرة على تتبع الإشارة بسرعة بسبب بطء معدل تقاربها الناتج عن ثبات حجم الخطوة، وهذا ما يجعلها تحتاج إلى عدد كبير من التكرارات قبل التقارب، لذلك فهي ليست الخيار الأفضل فيما يتعلق بالسرعة، وهذا يحد من فائدة هذه الخوارزمية في بيئة ديناميكية، وهو العيب الرئيسي لها.

يمكن إعادة الدراسة السابقة من أجل أنواع أخرى من الخوارزميات مثل خوارزمية المربعات الصغرى التكرارية: RLS (Recursive Least Squares)، والتي تعاني من التقيد الحسابي الذي يحد من استخدامها في بعض التطبيقات، ومقارنة النتائج مع خوارزمية LMS.

وبما أن المقارنة في هذا البحث تمت عند تغيير عدد عناصر المصفوفة، وتغيير المسافة بين عناصر المصفوفة، لذلك يمكن إعادة الدراسة أيضاً عند تغيير هندسة المصفوفة (المواقع المكانية لعناصر الهوائي بأشكال مختلفة)، ومقارنة النتائج.

المراجع:

- [1] M.M.ISMAIL; S.B.BASHAR; Q.B. ELIAS; V.V.PYLIAVSKYI; (2020): Study and Analysis of an Adaptive Beamforming for Smart Antenna Using LMS Algorithm. Telecommunications and Radio Engineering, Vol.79.
- [2] A.S. ALI; U. SINGH; V.SINGH; K.S.MAURYA; (2023): An Adaptive Beam Forming Algorithm for Reduction of Coexistence– Interference and Improved Performance in 5G Communication Systems. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol.11, N°.V, 7004–7007.
- [3] S.B.BASHAR; M.M.ISMAIL; (2022): Study and Analysis of Beamforming Algorithm between LMS and SMI. Journal of Communications, Vol.17, N°.6, 472–477.
- [4] A.SENAPATI; S.J.ROY; (2017): Adaptive Beamforming in Smart Antenna Usingtchebyscheff Distribution and Variants of Least Mean Square Algorithm. Journal of Engineering Science and Technology, Vol.12, N°.3 ,716–724.
- [5] A.J.THOMAS; P.R.MINI; M.N.ANIL; (2017): DOA Estimation and Adaptive

- Beamforming using MATLAB and GUI. International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, 1890–1896.
- [6] S.BISWAL; K.D.BARIK; (2016): Analysis of Adaptive Beam forming Algorithms using LMS and RLS Scheme. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE),26–30.
- [7] N.S.SHINDE; G.U.SHINDE; (2016): Performance Based Comparison of Adaptive Beamforming Algorithms for Smart Antenna. International Journal of Advance Research in Sience and Engineering (IJARSE), Vol.5, N°.1, 487–498.
- [8] S.A.OLUWOLE; M.V.SRIVASTAVA; (2018): Analysis and Synthetic Model of Adaptive Beamforming for Smart Antenna Systems in Wireless Communication. Journal of Communications, Vol.13, N°.8, 436–442.
- [9] N.MALLAIAH; V.N.KOTESWARA; D.RAMAKRISHNA; (2024): Investigation of Beam Forming Algorithms Using Smart Antenna for Modern Wireless Communication. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering ,615–620.
- [10] D.A.PANDHARE; KH.ZALAWADIA; (2018): Performance Analysis of LMS Adaptive Beamforming Algorithm for Smart Antenna System. International Journal of Computer Applications, Vol.179, N°.28, 34–37.
- [11] L.M.WANG; A.SINGHVI; G.NYIKAYARAMBA; B.MURMANN; A.ARBABIAN; (2022): Adaptive Beamforming for Wireless Powering of a Network of Ultrasonic Implants. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS).
- [12] R.P.JERIPOTULA; A.C.KUMAR; M.RAJU; R.B. NAIK; (2020): A Novel Algorithm Design For Adaptive Beamforming In Uniform Linear Array Antenna. Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, Vol.15, N°.3, 102–113.
- [13] V.DAKULAGI; R.DAKULAGI; H.K.YEAP; H.NISAR; (2021): Improved Adaptive Beamforming for Smart Antennas. Research Square.
- [14] V.DAKULAGI; M.ALAGIRISAMY; (2020): Adaptive Beamformers for High–Speed Mobile Communication. Wireless Personal Communications, Malaysia.
- [15] M.ATZEMOURT; A.FARCHI; Y.CHIHAB;Z.HACHKAR; (2022): Performance Evaluation of LMS and CM Algorithms for Beamforming. Advances in Materials Science and Engineering.
- [16] R.SHARMA; A.SENAPATI; S.J.ROY; (2018): Adaptive Beamforming in Planar Array Using Leaky LMS and Variable Step Size Leaky LMS Algorithms. International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), Vol.6, 980–986.

- [17] K.D.PANDA; (2018): DRLMS Adaptive Beamforming Algorithm for Smart Antenna System. International Journal of Applied Engineering Research, Vol.13, N°.8, 5585–5588.
- [18] U.Z.RAHMANA;T.PRIYANKA;P.YASHMITHA;V.SAMRAJYAM;R.MOUNICHANDRIK A;Y.S.FATHIMA;N.F.BASHA; (2017): Efficient Adaptive Beamforming Algorithms for Smart Antennas. International Journal of Control Theory and Applications, Vol.10, N°.35,173–181.
- [19] P.DEVI; P.JAIN,K; (2021): Adaptive Beamforming Algorithm for Smart Antenna: An Literature Survey. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), Vol.8, N°.8, 552–557.
- [20] R.AMELLAL; (2024): Adaptive Beamforming Based on Artificial Neural Networks. American journal of computer science and technology, Vol.7, N°.1, 13–23.
- [21] N.J.AZEBAZE; E. MWANGI; B.D. KONDITI; (2017): Performance Analysis of the LMS Adaptive Algorithm for Adaptive Beamforming. International Journal of Applied Engineering Research, Vol.12, N°.22, 12735–12745.