

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم هندسة الاتصالات

أطروحة

أعدت لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الاتصالات

تحسين وصلة ملاحقة وتوجيه الطيران المسير في المنظومات التي تستخدم
الهوائيات المصفوفية الطورية

إعداد

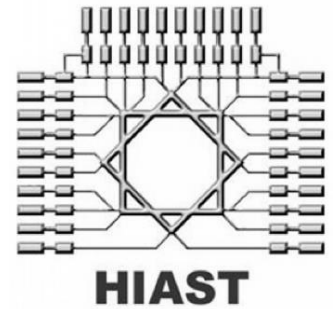
م. علاء سلمان

إشراف

الدكتور شكري المقداد الدكتور محمد الحريري

دمشق ٢٠٢٠

Syrian Arab Republic
Higher Institute for Applied Sciences and Technology
Department of Communication



A dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Ph.D. Degree in Communication Engineering

**Improvement of the link with the Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
based on the Phased Array Antennas**

**BY
Alaa Salman**

**Supervised by
Dr. Shokri Almekdad Dr. Mohamad alhariri**

Damascus 2020

كلمة شكر

مع نهاية هذا العمل لا بد من التوجه بالشكر الجزيل لكل من ساهم وساعد على إنجازهِ.
الشكر الجزيل للأستاذ المشرف الدكتور شكري المقداد على تبنيه لهذا العمل ودعمه و توجيهاته المستمرة.
الشكر الجزيل للأستاذ المشرف الدكتور محمد الحريري على تبنيه لهذا العمل ودعمه و توجيهاته المستمرة.
الشكر الجزيل لإدارة المعهد العالي، وخاصةً أعضاء الهيئة التدريسية في قسم الاتصالات، على إتاحتهم الفرصة لتقديم هذا البحث، و تقديم كل ما يلزم في سبيل إنجازه.
الشكر الجزيل لأعضاء لجنة التحكيم على ملاحظاتهم التي أغنت هذا العمل.
الشكر الجزيل للدكتور شفيق أبو الفخر على دعمه و مساعدته المستمرة.
الشكر الجزيل للدكتور رضوان قسطنطين على توجيهاته القيمة و مساعدته المستمرة.
الشكر الجزيل للدكتور محمد غسان عبد السلام لإيمانه بهذا العمل منذ بدايته.

ملخص البحث

يعتبر خطأ التوجيه لنظام الملاحقة، والذي يرتبط بجودة خوارزمية الملاحقة المستخدمة وقدرة نظام الملاحقة على التوجيه الدقيق للمخطط الإشعاعي باتجاه الهدف، عاملاً مؤثراً على استطاعة الإشارة المستقبلية وهو بدوره يؤثر على جودة المعطيات المستقبلية من الطائرة والذي قد يؤثر على نجاح تنفيذ مهمة الطيران المسير. كما أن سرعة استعادة الملاحقة بعد حدوث انقطاع في إشارة الطائرة المسيرة وارتباط أداء نظام الملاحقة بسرعة الطائرة تعتبر من القضايا الواجب أخذها بالاعتبار عند تصميم نظام ملاحقة في تطبيقات الطيران المسير.

تم في هذا البحث تقديم تركيبة مقترحة لمصفوفة ملاحقة تمتلك القدرة على الملاحقة الاتوماتيكية لإشارة الطائرة بما يضمن إبقاء الطائرة بشكل دائم على قمة الحزمة الرئيسية للهوائي وبالتالي تأمين وصلة هابطة ذات ربح عالٍ بشكل دائم، دون الحاجة إلى خوارزميات معالجة الإشارة المعقدة المستخدمة في المصفوفات التقليدية. كما تم من خلال هذه التركيبة المقترحة تعويض أثر خطأ الطور وتحسين أداء نظام الملاحقة بوجود الضجيج و خطأ الطور.

تعتمد المصفوفة المقترحة على الدمج بين المصفوفة الطورية (phased array) ومصفوفة التوجيه العكسي (retrodirective array) للاستفادة من ميزات كل منها. حيث تم استخدام تقنية مرافق الصفحة المستخدمة في مصفوفات التوجيه العكسي لإيجاد الصفحة الهندسية لكل قناة في المصفوفة الطورية من خلال الضرب العقدي للأشعة الممثلة للإشارات المستقبلية. تم إيجاد الصفحة الهندسية لكل قناة من خلال ضرب الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية مع نسخة مرافق الصفحة للأشعة العقدي الممثلة للإشارات المستقبلية على قنوات المصفوفة الأخرى وبالتالي ستكون صفحة الشعاع العقدي الناتج من كل عملية ضرب مساوية للصفحة الهندسية للقناة المقابلة، بذلك تم ضبط الأوزان العقدي المطلوبة لتوجيه المصفوفة باتجاه مصدر الإشارة المستقبلية بشكل أوتوماتيكي دون الحاجة إلى خوارزمية تحديد اتجاه وخوارزمية ملاحقة. كما أنه نتيجة استخدام تقنية مرافق الصفحة لتشكيل المخطط الإشعاعي للمصفوفة في الاستقبال فقد تم تقليل أثر أخطاء الطور الناتجة عن مصادر الضجيج المختلفة إلى حالة هوائي مفرد، وبالتالي أمكن تحسين أداء مصفوفة الملاحقة بوجود الضجيج بمقابل مصفوفات الملاحقة التي تستخدم المصفوفة الطورية التقليدية.

تم إيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة، ودراسة مواصفاتها ضمن المجال الزاوي $[-90^\circ, +90^\circ]$ حيث تبين أن مصفوفة الملاحقة المقترحة تملك استجابة بعرض حزمة مساوي لحقل الرؤية $[-45^\circ, +45^\circ]$ والمحدد بمواصفات عنصر المصفوفة الداييولي، دون الحاجة لتقليل الربح، حيث يمكن تشبيه هذه الحالة وكأنه تم زيادة عرض الحزمة في المصفوفة التقليدية مع الحفاظ على الربح. قدم هذا التحسين ميزة مهمة في تطبيقات الطيران المسير من حيث إبقاء الطائرة ضمن الحزمة الرئيسية، ولكن ذلك كان على حساب زيادة احتمال استقبال إشارات التشويش مع إشارة الطائرة مما قد يؤدي إلى فشل تنفيذ مهمة الملاحقة وبالتالي فشل تنفيذ مهمة الطائرة المسيرة. لذلك تم دراسة إمكانية تطبيق أصفار على هذه الاستجابة لإلغاء الإشارات غير المرغوبة.

تم في المرحلة الأولى من البحث تحقيق تقنية مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط لتوليد نسخة المرافق العقدي للإشارات المستقبلية على كل قناة، ومن ثم استخدامها لإيجاد الأوزان العقدية المطلوبة لتشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي للمصفوفة باتجاه الموقع الزاوي للطائرة. تم شرح المخطط الصندوقي وإيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة مصفوفة الملاحقة ومن ثم تم إجراء الإختبارات وتوثيق النتائج، حيث تبين أنه من سلبيات استخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط هو الحاجة لاستخدام هزاز رقمي بضعف التردد الوسيط، وهذا يتطلب استخدام معالج رقمي عالي السرعة كما أن العمل على مجال التردد الوسيط في المجال الرقمي يتطلب مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة نسبياً، وهذا سيزيد من تعقيد وتكلفة النظام.

لذلك تم في المرحلة الثانية من البحث اقتراح نموذج محسن لتركيبية المصفوفة المقترحة من خلال إلغاء الحاجة إلى مرحلة التردد الوسيط في الاستقبال. حيث تم تحقيق تقنية مرافق الصفحة برمجياً، وبالتالي أصبح بالإمكان تطبيق كامل المعالجة باستخدام تقنية الراديو المعرف برمجياً SDR. هذا التطوير جعل مصفوفة الملاحقة قابلة للتطبيق على أي نظام هوائيات ذكية معتمد على تقنية الراديو المعرف برمجياً دون أي تعديل في وظيفته الأساسية، كما ساهم في تقليل تعقيد وتكلفة النظام من خلال إلغاء الحاجة إلى مرحلة التردد الوسيط في المستقبل وبالتالي لا حاجة لاستخدام مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة نسبياً وكذلك إلغاء الحاجة لاستخدام معالجات رقمية سريعة.

تم في هذا البحث تقديم دراسة تحليلية موسعة لأداء المصفوفة الطورية التقليدية بمقابل الضجيج بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار. حيث تم تحويل نظام المصفوفة متعدد الأقفنية إلى نظام أحادي

القناة مكافئ وإيجاد المعاملات المكافئة. قدم هذا النموذج المكافئ معاملاً مباشراً لمقارنة الأداء بوجود الضجيج بين مستقبلات مصفوفية مختلفة. من ثم تم دراسة أثر الضجيج على المصفوفة المقترحة بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار، من خلال تطبيق معاملات النموذج المكافئ على المصفوفة المقترحة لإظهار التحسين الذي قدمته المصفوفة المقترحة بالمقارنة مع المصفوفة الطورية التقليدية.

تم مناقشة المصفوفة المقترحة من وجهة نظر الكيان الصلب لتطبيقها على دارة "مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة حقلياً" FPGA من حيث تقليل تعقيد العمليات الحسابية وإلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة وبالتالي تقليل استهلاك الموارد الحسابية لبطاقة الـFPGA.

تم مقارنة المصفوفة المقترحة مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية من خلال معاملات خطأ التوجيه وضياع الربح، وأثر الضجيج لتقييم التحسين الذي قدمته المصفوفة المقترحة.

الكلمات المفتاحية: مصفوفة طورية، تشكيل المخطط الإشعاعي، توجيه المخطط الإشعاعي، الصفحة الهندسية، مصفوفة توجيه عكسي، مرافق الصفحة، خطأ الطور، خطأ التوجيه.

ABSTRACT

The beam pointing error (BPE) of the tracking system, which is related to the quality of the used tracking algorithm and the ability of the tracking system to accurately pointing the radiation pattern of the antenna towards the unmanned aerial vehicle (UAV), is considered a factor affecting the power of the received signal, which in turn affects the quality of the data received from the UAV, so may affect the success of the mission of the UAV. Another factors like, the speed of refinding the UAV angular position after an interruption in the datalink between the UAV and the ground control station (GCS), and the relation of the performance of the tracing system with the speed of the UAV, should be taken into account when designing a tracking system of the UAV signal.

In this research, a proposed structure of tracing array has been presented, that possesses the ability to automatically chase the UAV signal, to ensure that the UAV remains permanently on top of the main beam of the antenna and thus, permanently a secure high gain downlink without the need for sophisticated signal processing algorithms used in conventional tracking arrays. Also with this proposed structure, the effect of the phase error is compensated, so the performance of the tracking system with the presence of noise and phase error is improved.

The proposed tracking array relies on mixing the phased array and the retrodirective array to take advantage of their respective advantages. Where the phase conjugation technique used in the retrodirective array is used to find the geometric phase for each channel in the phased array by the complex multiplication of the complex vectors representing the received signals. The geometric phase of each channel is found by multiplying the complex vector of the received signal on the reference channel with the phase conjugated version

of the complex vectors of the received signals on the other array channels, and thus the phase of the resulted complex vector resulting from each multiplication will be equal to the geometric phase of the corresponding channel, so the phases of the required complex weights to direct the beam pattern toward the source of the received signal are adjusted automatically without the need for a direction-finding algorithm and a tracking algorithm. Also, as a result of using the phase conjugation technique to form the reception beam of the array, the effect of the phase errors resulting from different noise sources has been reduced to the status of a single antenna, and thus it has been possible to improve the performance of the tracking array by the presence of noise compared to the tracking array that use the traditional phased array. The mathematical representation of the proposed tracking array response has been found, and its characteristics have been studied within the angular field $[-90^\circ, +90^\circ]$ where it was found that the proposed tracking array has a response with a beam width equal to the field of view $[-45^\circ, +45^\circ]$ (specified by the dipole antenna array element specifications) without the need to reduce gain, where this situation can be likened as if the bandwidth of the traditional phased array was increased while maintaining gain. This improvement provided an important advantage in the UAV applications in terms of keeping the UAV within the main beam, but that was at the expense of increasing the probability of receiving jamming signals with the UAV signal, which may lead to the failure to carry out the tracking mission and thus the failure of the mission of the UAV. Therefore the study of the possibility of applying nulls to this response to cancel unwanted signals is done.

In the first stage of the research, the phase conjugation technique was achieved by using the digital heterodyne mixing technique in the intermediate frequency (IF) band to generate the phase conjugated version of the received signal on each channel, and then used to find the required complex weights to form and steer the radiation pattern of the tracking array towards the angular position of

the UAV. The block diagram is explained and the mathematical representation of the tracking array response is found. Then tests are performed and the results documented. It is found that one of the downsides of using the heterodyne mixing technique in the IF band technique is the need to use a digital local oscillator of double IF, and this requires the use of a high-speed digital processor as well as relatively a high-speed analogue to digital converter, and this will increase the complexity and cost of the system. Therefore, In the second stage of the research, an improved model for the proposed array structure is proposed by eliminating the need for the intermediate frequency stage in reception. where the phase conjugation technique is achieved by software. It become possible to implement the entire process using the software defined radio (SDR) technique. This improvement make the tracking array applicable to any smart antenna system based on SDR technology without any modification in its basic function. Also it's contributed to reducing the complexity and cost of the system by eliminating the need for the intermediate frequency stage in the receiver, therefore no need to use high speed analog to digital converter and also eliminates the need to use fast digital processors.

In this study, an extended analytical study of the traditional phased array performance after taking phase errors, is presented. Where the multichannel array system has been converted to an equivalent mono channel system and find the equivalent coefficients. This equivalent model provided a direct metric for comparing the performance between different array receivers with the presence of noise. Then the noise performance of the proposed array is studied after taking into account phase errors, by applying the equivalent model coefficients to the proposed array to show the improvement presented by the proposed array compared to the conventional phased array.

The proposed array is then discussed from the point of view of the hardware in order to applying it to a programmable field array (FPGA) in terms of reducing the complexity of mathematical operations and eliminating the need for

floating-point operations and thus reducing the consumption of computational resources for the FPGA card.

The proposed tracking array is compared with a tracking array that use monopulse technology, through beam pointing error, gain-loss, and noise performance coefficients to assess the improvement presented by the proposed array.

Keywords: Phased array, Beamforming, Beam steering, Geometric phase, Retrodirective array, Phase conjugation, Phase error, Beam pointing error.

Table of Contents

فهرس المحتويات

١	فهرس الأشكال
٤	فهرس الجداول
٥	جدول المصطلحات والاختصارات
٧	الهدف من البحث
٨	مراحل تنفيذ البحث
٩	المقدمة
١٢	الفصل الأول: لمحة عن أنظمة الطيران المسير وطرق الملاحقة
١٢	١-١ مقدمة
١٢	٢-١ تصنيف الطيران المسير
١٣	٣-١ أنماط التحكم
١٤	٤-١ نظام الطيران المسير
١٨	٥-١ حماية وصلة المعطيات
١٩	٦-١ ملاحقة إشارة الطيران المسير
٢٢	٧-١ طرق تحقيق الملاحقة
٢٤	١-٧-١ مصفوفة ملاحقة باستخدام تقنية النبضة الأحادية
٢٩	الفصل الثاني: المصفوفات في أنظمة الملاحقة
٢٩	١-٢ مقدمة
٢٩	٢-٢ هوائي المصفوفة الطورية
٣١	١-٢-٢ تشكيل المخطط الإشعاعي

٣٣	٢-٢-٢ استجابة هوائي المصفوفة الطورية.....
٣٨	٣-٢-٢ تطبيق أصفار على المخطط الإشعاعي.....
٤٠	٤-٢-٢ تأثير خطأ الطور على استجابة هوائي المصفوفة الطورية.....
٤٢	٣-٢ هوائي مصفوفة التوجيه العكسي.....
٤٤	١-٣-٢ طرق تحقيق التوجيه العكسي.....
٤٩	٢-٣-٢ بعض تطبيقات مصفوفة التوجيه العكسي.....
٥٢	الفصل الثالث: مصفوفة الملاحقة المقترحة.....
٥٣	١-٣ المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي.....
٥٣	١-١-٣ المخطط الصندوقي.....
٦١	٢-٣ مصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي المحسنة.....
٦٢	١-٢-٣ المخطط الصندوقي.....
٦٥	٢-٢-٣ تقليل تأثير خطأ الطور.....
٦٨	الفصل الرابع: تحليل أثر الضجيج في المستقبلات المصفوفية.....
٦٩	١-٤ النظام احادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية.....
	٢-٤ معاملات النظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية بناء على موديل
٧٢	الإشارة مع خطأ الطور في المصفوفة الطورية.....
٧٤	١-٢-٤ ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج.....
	٣-٤ معاملات النظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية بناء على موديل
٧٨	الإشارة مع خطأ الطور في المصفوفة الهجينة.....
٨٠	الفصل الخامس: الاختبارات والنتائج.....

٨١	.....١-٥ اختبار الأوزان العقديّة
٨٢	.....٢-٥ رسم استجابة المصفوفة المقترحة
٨٤	.....٣-٥ حذف إشارة التشويش
٨٧	.....٤-٥ حساب خطأ التوجيه بوجود الضجيج وخطأ الطور
٩٠	.....٥-٥ تحليل أثر الضجيج على مصفوفة الملاحقة
٩٤	.....٦-٥ الميزات التطبيقية لمصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي
١٠٢	.....الفصل السادس: ملخص البحث والآفاق المستقبلية
١٠٢	.....١-٦ ملخص البحث
١٠٣	.....٢-٦ مزايا الطريقة المقترحة
١٠٣	.....٣-٦ آفاق التطوير المستقبلي
١٠٤	.....١-٣-٦ زيادة حقل الرؤية لنظام ملاحقة واستقبال إشارة الطائرة المسيّرة
١٠٤	.....٢-٣-٦ نظام كشف الطيران المسير باستخدام المصفوفة الهجينة
١٠٧	.....المراجع
١١٤	.....الملحق: المقالات العلمية المنشورة

List of Figures

فهرس الأشكال

- الشكل ١-١: مكونات نظام الطيران المسير ١٤
- الشكل ٢-١: الخيارات المتاحة لوصلات الاتصال بين الطائرة والمحطة الأرضية ١٧
- الشكل ٣-١: الطائرة Pioneer UAV المستخدمة في عملية عاصفة الصحراء ١٩
- الشكل ٤-١: نظام ملاحقة بقياس قوة الإشارة ٢٢
- الشكل ٥-١: نظام ملاحقة وفق تقنية النبضة الأحادية بهوائيات منفصلة ٢٣
- الشكل ٦-١: نظام ملاحقة وفق تقنية النبضة الأحادية بهوائي واحد ومغذيات منفصلة ٢٣
- الشكل ٧-١: نظام ملاحقة باستخدام نظام سيرفو ٢٤
- الشكل ٨-١: نظام مصفوفة أحادي النبضة باستخدام مصفوفة طورية ٢٥
- الشكل ٩-١: حزمة الجمع وحزمة الفرق ٢٥
- الشكل ١٠-١: تأثير الضجيج على توليد إشارة الخطأ في تقنية النبضة الأحادية ٢٧
- الشكل ١-٢: مخطط صندوقي لمكونات مصفوفة طورية رقمية ٣١
- الشكل ٢-٢: الصفحة الهندسية لعناصر مصفوفة خطية ٣٢
- الشكل ٣-٢: مشكل المخطط الإشعاعي لحزمة ضيقة ٣٣
- الشكل ٤-٢: الرسم القطبي لاستجابة مصفوفة خطية ٣٦
- الشكل ٥-٢: مطال استجابة المصفوفة كتابع لزاوية ورود الإشارة. ٣٦
- الشكل ٦-٢: استجابة مصفوفة موجهة باتجاه 45° . ٣٧
- الشكل ٧-٢: تطبيق صفر على المخطط الإشعاعي لهوائي مصفوفة طورية. ٤٠
- الشكل ٨-٢: مسار الإشارة المستقبلية في قناة مفردة من مستقبل مصفوفة طورية. ٤١
- الشكل ٩-٢: مبدأ التوجيه العكسي ٤٣
- الشكل ١٠-٢: العاكس الزاوي ٤٤
- الشكل ١١-٢: مصفوفة "فان أتا" بنمط غير فعال ٤٥
- الشكل ١٢-٢: مصفوفة "فان أتا" بنمط فعال ٤٥
- الشكل ١٣-٢: مصفوفة مرافق الصفحة ٤٦
- الشكل ١٤-٢: تمثيل الإشارات في مصفوفة مرافق الصفحة ٤٧
- الشكل ١٥-٢: مصفوفة مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد ٤٧

الوسيط

- الشكل ٢-١٦ : تمثيل الإشارات في مصفوفة مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين ٤٨
في مجال التردد الوسيط
- الشكل ٢-١٧ : نظام تحصيل معطيات باستخدام مصفوفة توجيه عكسي ٥٠
- الشكل ٢-١٨ : استخدام تقنية التوجيه العكسي لربط الأقمار الصناعية فيما بينها ٥٠
- الشكل ٣-١ : المخطط الصندوقي لقناتين في مصفوفة الملاحقة المقترحة ٥٤
- الشكل ٣-٢ : تمثيل الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية ٥٧
- الشكل ٣-٣ : استجابة المصفوفة المقترحة بدون و مع تطبيق أصفار باتجاه المشوش. ٦١
- الشكل ٣-٤ : المخطط الصندوقي للمصفوفة الهجينة المحسنة ٦٢
- الشكل ٣-٥ : تمثيل الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار ٦٦
- الشكل ٤-١ : (a) التركيبية العامة لنظام مصفوفة ب-N قناة، و (b) النظام المكافئ أحادي القناة ٦٩
- الشكل ٤-٢ : متوسط ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج بدلالة القيمة العظمى لإنحراف الطور ٧٧
- الشكل ٥-١ : استجابة المصفوفة الطورية التقليدية من أجل مواقع زوايا مختلفة للطائرة ٨١
- الشكل ٥-٢ : استجابة المصفوفة الطورية التقليدية بالأحداثيات القطبية، من أجل مواقع زوايا مختلفة للطائرة ٨٢
- الشكل ٥-٣ : ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة ٨٣
- الشكل ٥-٤ : استجابة المصفوفة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة ٨٤
- الشكل ٥-٥ : المخطط الإشعاعي مع إمكانية تطبيق أصفار ٨٥
- الشكل ٥-٦ : الاستجابة الناتجة بعد تطبيق طريقة أصغر تربيعات الخطأ بالإحداثيات القطبية ٨٦
- الشكل ٥-٧ : استجابة المصفوفة المقترحة مع إمكانية تطبيق أصفار ٨٦
- الشكل ٥-٨ : خطأ التوجيه عند (a: SNR=30dB, b: SNR=10dB, c: SNR=5dB) ٨٨
- الشكل ٥-٩ : خطأ التوجيه عند (a: $\sigma_{max} = 5^\circ$, b: $\sigma_{max} = 20^\circ$, c: $\sigma_{max} = 50^\circ$) ٨٩

- الشكل ١٠-٥ : تأثير خطأ الطور على تزايد الربح كتابع لحجم المصفوفة ٩١
- الشكل ١١-٥ : الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج ٩٢
- الشكل ١٢-٥ : استجابة مصفوفة الملاحقة الهجينة واستجابة مصفوفة الملاحقة باستخدام خوارزمية النبضة الأحادية عند $\sigma_{max} = 20^\circ$ (a) $\sigma_{max} = 10^\circ$ (b) $\sigma_{max} = 50^\circ$ (c) $\sigma_{max} = 40^\circ$ (d) ٩٣
- الشكل ١٣-٥ : المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة المصفوفة على خرج بطاقة الـFPGA. ٩٩
- الشكل ١٤-٥ : المخطط الإشعاعي التقليدي باتجاه المشوش. ٩٩
- الشكل ١٥-٥ : المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة على خرج بطاقة الـFPGA مع تطبيق أصفار. ١٠٠
- الشكل ١-٦ : نظام كشف طيران (a: نمط فعال، b: نمط سلبي) ١٠٥
- الشكل ٢-٦ : بصمة الإشارة المستقبلية من طائرة مسيرة على مسافات مختلفة باستخدام نظام كشف سلبي ١٠٥
- الشكل ٣-٦ : مصفوفة توجيه عكسي مع إمكانية التردد الآلي ١٠٦

List of Tables

فهرس الجداول

- الجدول ١-١ : مواصفات بعض وصلات نظام الطيران المسير ١٦
- الجدول ٢-١ : السيناريوهات البديلة الممكنة في حال انقطاع جزئي لوصلة المعطيات ١٧
- الجدول ١-٤ : مقارنة معاملات النظام أحادي القناة المكافئ ٧٩
- الجدول ١-٥ : مقارنة تعقيد حساب الأوزان العقدية في الطريقة المقترحة وبعض الطرق التقليدية. ٩٨

LIST OF ABBREVIATIONS

جدول المصطلحات والاختصارات

Unmanned aerial vehicle (UAV)	طائرة مسيرة
Data downlink	وصلة معطيات هابطة
UAV payload	حمولة الطائرة المسيرة
flight endurance	تحمل الطيران
endurance levels	مستويات التحمل
Field of view (FOV)	حقل الرؤية
Ground control station (GCS)	محطة التحكم الأرضية
Phased array	مصفوفة طورية
Retrodirective array	مصفوفة توجيه عكسي
Mixed phased/retrodirective array	مصفوفة هجينة طورية/توجيه عكسي
Array response	استجابة المصفوفة
Complex weight	وزن عقدي
Array factor (AF)	عامل المصفوفة
Element factor (EF)	عامل العنصر (المخطط الإشعاعي للهوائي المفرد)
Beamforming	تشكيل المخطط الإشعاعي
Beamformer	مشكل المخطط الإشعاعي
Beam steering	توجيه المخطط الإشعاعي
Null steering	توجيه الأصفار (تطبيق الأصفار)
Phase conjugation	مرافق الطور
Phase error	خطأ الطور
Beam pointing error (BPE)	خطأ التوجيه
Complex vector multiplication	ضرب الأشعة العقدية
Phase noise	ضجيج الطور
Noise performance	أثر الضجيج على أداء المصفوفة

Signal to noise ratio (SNR)	نسبة الإشارة إلى الضجيج
SNR loss	ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج
Gain increment	تزايد الربح
Intermideate frequency band (IF)	مجال التردد الوسيط
Base band	المجال القاعدي
Quadrature demodulator	مفكك التعديل الترابعي (توليد مركبات IQ للإشارة المستقبلية)
Analog to Digital Convertor (ADC)	مبدل تماثلي إلى رقمي
Field Programmable Gate Array (FPGA)	مصنوفة البوابات القابلة للبرمجة حقلياً
Software defined radio (SDR)	الراديو المعرف برمجياً
commercial-off-the-shelf (COTS)	المكونات التجارية الجاهزة للاستخدام
Least Squares Error	خطأ المربعات الأصغري
Monopulse technique	تقنية النبضة الأحادية
Monopulse tracking array	مصنوفة ملاحقة باستخدام تقنية النبضة الأحادية
Root Mean Square (RMS)	جذر المتوسط التربيعي
Noise figure (NF)	معامل الضجيج
Uniform distribution	توزيع منتظم

الهدف من البحث

الهدف من هذا البحث هو تأمين وصلة معطيات دائمة ذات ربح عالٍ بين الطائرة المسيرة UAV ومحطة التحكم الأرضية GCS لاستقبال المعطيات المرسله من الطائرة بأكبر استطاعة. وذلك من خلال تقليل خطأ التوجيه، وتأمين سرعة استعادة الملاحقة عند حدوث انقطاع في الوصلة، بالإضافة إلى تحسين أداء مصفوفة الملاحقة بوجود الضجيج.

تقسم المساهمة الأساسية لهذا البحث إلى مستويين:

❖ المستوى الأول هو تقديم تركيبية جديدة لمصفوفة ملاحقة تمتلك القدرة على الملاحقة الآلية لإشارة الطائرة بما يضمن إبقاء الطائرة بشكل دائم على قمة الحزمة الرئيسية للمصفوفة، دون الحاجة إلى خوارزميات معالجة الإشارة المعقدة المستخدمة في الهوائيات الذكية. وبالتالي إمكانية تطبيق هذه المصفوفة باستخدام تقنية الراديو المعرف برمجيا SDR وبالنتيجة تقليل تعقيد وتكلفة النظام.

❖ المستوى الثاني هو تقليل تأثير أخطاء الطور الناتجة عن مصادر الضجيج المختلفة مما ينعكس على تحسين أداء مصفوفة الملاحقة، حيث تم تقديم نموذج (قناة واحدة) مكافئ للنظام المصفوفي متعدد الأقبية يأخذ أخطاء الطور بالاعتبار ويستخدم لمقارنة الأداء بين أنظمة مصفوفية مختلفة بوجود أخطاء الطور.

تعتمد الطريقة المقترحة على الدمج بين المصفوفة الطورية phased array ومصفوفة التوجيه العكسي retrodirective array للاستفادة من ميزات كل منهما.

مراحل تنفيذ البحث

تم تنفيذ البحث وفق الخطوات التالية:

١. دراسة مرجعية عن أنظمة الطيران المسير و أهمية الوصلة الهابطة من الطائرة المسيرة إلى المحطة الأرضية وطرق تأمينها. بالإضافة إلى دراسة مختصرة للمصفوفات المستخدمة في بناء نظام ملاحقة وميزات ومساوئ كل منها.
٢. اقتراح تركيبية جديدة لمصفوفة ملاحقة مبنية على المزج بين المصفوفة الطورية ومصفوفة التوجيه العكسي، وإيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة المصفوفة المقترحة واستخراج مواصفاتها.
٣. إضافة ميزة تطبيق أصفار على استجابة المصفوفة المقترحة لإلغاء الإشارات غير المرغوبة.
٤. اقتراح نموذج محسن لتركيبية المصفوفة المقترحة من خلال إلغاء الحاجة إلى مرحلة التردد الوسيط في الاستقبال، وعرض المخطط الصندوقي والتمثيل الرياضي للنموذج المحسن.
٥. دراسة تأثير خطأ الطور الناتج عن مصادر الضجيج المختلفة على أداء المصفوفة المقترحة رياضياً وإظهار قدرة المصفوفة المقترحة على تقليل أثر خطأ الطور.
٦. تقديم دراسة تحليلية موسعة لأداء المصفوفة الطورية التقليدية بوجود الضجيج بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار، ومن ثم تطبيق هذه الدراسة التحليلية الموسعة على المصفوفة المقترحة وإظهار التحسين الذي قدمته.
٧. إنجاز الاختبارات وتوثيق النتائج.
٨. نشر ثلاث مقالات علمية حول الأعمال المنجزة خلال البحث، المقالة الرابعة قيد النشر، وكتابة الأطروحة.

المقدمة

لابد لنجاح مهمة الطيران المسير من تأمين وصلة معطيات هابطة ذات ربح عالٍ وبشكل دائم بين الطائرة المسيرة والمحطة الأرضية. يرتبط تحقيق هذه الوصلة بشكل أساسي بمواصفات هوائي المحطة الأرضية وقدرته على إبقاء الطائرة قدر الإمكان على قمة الحزمة الرئيسية للهوائي خلال حركة الطائرة ضمن حقل الرؤية. وبالتالي فإن تحقيق عملية الملاحقة يتطلب من نظام الملاحقة تنفيذ مهمتين أساسيتين: **المهمة الأولى** التقاط الإشارة المرسله من الطائرة وتحديد اتجاه الطائرة باستخدام خوارزمية تحديد اتجاه. **المهمة الثانية** ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة خلال حركتها باستخدام خوارزمية ملاحقة. يعتبر خطأ التوجيه لنظام الملاحقة والذي يرتبط بجودة خوارزمية الملاحقة المستخدمة وقدرة نظام الملاحقة على التوجيه الدقيق للمخطط الإشعاعي باتجاه الهدف، عاملاً مؤثراً على استطاعة الإشارة المستقبلية وهو يؤثر على جودة المعطيات المستقبلية من الطائرة والذي قد يؤثر بدوره على نجاح تنفيذ مهمة الطيران المسير. كما أن سرعة استعادة الملاحقة بعد حدوث انقطاع في إشارة الطائرة المسيرة وارتباط أداء نظام الملاحقة بسرعة الطائرة تعتبر من القضايا الواجب أخذها بالاعتبار عند تصميم نظام ملاحقة في تطبيقات الطيران المسير.

تم مؤخراً استخدام الهوائيات المصفوفية الطورية لبناء نظام ملاحقة في أنظمة الطيران المسير لتجاوز مشاكل التحريك الميكانيكي للهوائي في الأنظمة التقليدية، بالإضافة إلى العديد من الميزات الهامة. لكن استخدام الهوائيات المصفوفية الطورية أدى إلى زيادة مصادر الضجيج والذي سيظهر كخطأ طور يؤثر بدوره على التوافق الضروري لتشكيل المخطط الإشعاعي للهوائي المصفوفة الطورية. يعد خطأ الطور في المصفوفة الطورية سبباً رئيسياً وراء انحراف أداء نظام الملاحقة من حيث زيادة خطأ التوجيه والضياع في الريح، وتعتبر خوارزميات تحديد الاتجاه والملاحقة حساسة لأخطاء عناصر المصفوفة مما يتطلب معايرة دقيقة للمصفوفة.

تم في هذا البحث تقديم تركيبة مقترحة لمصفوفة ملاحقة تمتلك القدرة على الملاحقة الاتوماتيكية لإشارة الطائرة بما يضمن إبقاء الطائرة بشكل دائم على قمة الحزمة الرئيسية للهوائي وبالتالي تأمين وصلة هابطة ذات ربح عالٍ بشكل دائم، دون الحاجة إلى خوارزميات معالجة الإشارة

المعقدة المستخدمة في المصفوفات التقليدية. كما تم من خلال هذه التركيبة المقترحة تعويض أثر خطأ الطور وتحسين أداء نظام الملاحقة بوجود الضجيج و خطأ الطور.

تم تقسيم العمل في هذا البحث ضمن مجموعة من الفصول، يمكن تلخيص محتوياتها كمايلي:

يعرض الفصل الأول من هذه الأطروحة مقدمة عن أنظمة الطيران المسير ونوع الوصلات المستخدمة فيها، كما تم توضيح أهمية الوصلة الهابطة من الطائرة المسيرة إلى المحطة الأرضية والطرق المستخدمة لملاحقة الموقع الزاوي للطائرة لتأمين هذه الوصلة، كما تم شرح نظام ملاحقة يطبق تقنية النبضة الأحادية باستخدام المصفوفة الطورية.

في الفصل الثاني، تم الحديث عن المصفوفات المستخدمة في أنظمة الملاحقة، حيث تم شرح ميزات المصفوفة الطورية وأدائها بوجود الضجيج، كما تم توضيح انحراف أدائها نتيجة أخطاء الطور، وفي نهاية هذا الفصل تم الحديث عن مصفوفة التوجيه العكسي وطرق تحقيق تقنية مرافق الصفحة، كما تم التطرق إلى بعض تطبيقات مصفوفات التوجيه العكسي.

في الفصل الثالث، تم عرض مصفوفة الملاحقة المقترحة، حيث تم شرح المخطط الصندوقي و إيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة المصفوفة وبالتالي استخلاص مواصفات استجابة المصفوفة وشرح كيفية إضافة ميزة تطبيق أصفار على استجابة المصفوفة. بعد ذلك تم عرض نسخة محسنة من مصفوفة الملاحقة المقترحة لتقليل التعقيد والتكلفة، حيث تم شرح المخطط الصندوقي وتوضيح ميزات التحسين المطروح و إيجاد استجابة المصفوفة المقترحة بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار لإظهار قدرة المصفوفة المقترحة على تقليل أثر أخطاء الطور.

في الفصل الرابع، تم إجراء دراسة تحليلية لأداء المصفوفة الطورية بوجود الضجيج من خلال إيجاد النموذج أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأفنية، ومن ثم استخدام هذا النموذج لتحليل أداء المصفوفة بوجود الضجيج. و في القسم الأخير من هذا الفصل تم تقديم دراسة تحليلية موسّعة لأداء المصفوفة الطورية التقليدية بوجود أخطاء الطور ومن ثم استخدام هذه الدراسة الموسّعة لمقارنة تأثير الضجيج على أداء المصفوفة المقترحة مع تأثير الضجيج على أداء المصفوفة الطورية التقليدية.

في الفصل الخامس، تم أخذ حالة مصفوفة خطية مؤلفة من ثمانية عناصر كمثال على المصفوفة المقترحة واختبار التصميم من خلال إظهار وتحليل نتائج المحاكاة من حيث مواصفات استجابة المصفوفة وعملية الملاحقة، كما تم مقارنة أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة مع مصفوفة ملاحقة تطبق تقنية النبضة الأحادية على مصفوفة طورية تقليدية. وفي القسم الأخير من هذا الفصل تم

مناقشة مصفوفة الملاحقة المقترحة من وجهة نظر الكيان الصلب لتطبيقها على دارة "مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة حقلًا" FPGA بسيطة، فقد أظهرت النتائج قدرة التحسين الذي أُدخل على المصفوفة على اختزال العديد من العمليات الحسابية المعقدة، كما أمكن الاستغناء أو إلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة وبالتالي تقليل استهلاك الموارد الحسابية في بطاقة الـ FPGA بالمقارنة مع بعض الطرق التقليدية.

في الفصل السادس تم عرض ملخص لنتائج البحث، و عرض مقترحات لآفاق التطوير المستقبلي. كما تم عرض المقالات المنشورة خلال هذا البحث في الملحق.

الفصل الأول

لمحة عن أنظمة الطيران المسير وطرق الملاحقة

١-١: مقدمة

تبرز أهمية الطيران المسير في قدرته على تنفيذ مهام خطيرة حيث المراقبة البشرية غير ممكنة، و حيث يتم التحكم به عن بعد، دون تعريض حياة الطيار للخطر [٥-١].

بدأ تطور الطيران المسير في نهايات ١٩٥٠ مستفيدة من حرب فيتنام و الحرب الباردة، مع استمرار البحث والتطوير على نطاق واسع خلال ١٩٧٠. كانت تسمى الطائرة بدون طيار بنحلة النار [٤] Fire bee. وقد بدأت امريكا بعد حرب فيتنام بتطوير طائرات مسيرة أصغر وأرخص، استخدمت تلك الطائرات محركات صغيرة كانت تستخدم في الدراجات النارية كما تم تحميلها بكاميرات فيديو وأرسلت الصور إلى موقع المشغل. بالتالي مثلت تلك الطائرات النموذج الأولي للطائرات التي تستخدم هذه الأيام [٤]. لقد وضعت الولايات المتحدة الأمريكية الطائرات المسيرة في الاستخدام العملي في حرب الخليج عام ١٩٩١ [٥-٤] [٧]، ومن بعدها تطورت الطائرات المسيرة في التطبيقات العسكرية، وتعد الطائرة المسيرة "المفترس" The Predator [٤]، من أكثر الطائرات المسيرة شهرة في الاستخدامات العسكرية في تلك الفترة.

يستخدم الطيران المسير لتحقيق تنوع كبير في المهام العسكرية والمدنية، مثل المراقبة والاستطلاع، التعرف على الأهداف، الحرب الالكترونية، البحث والانقاذ، ومراقبة الازدحام، وتنفيذ عمليات قتالية [١٠-١]. ويختلف الطيران المسير عن العتاد الحربي والصواريخ بأنها مصممة لتعود إلى القاعدة ويعاد استخدامها من جديد.

٢-١: تصنيف الطيران المسير

بذلت جهود مهمة لزيادة مدة الطيران (flight endurance) و حمولة الطائرة المسيرة، لينتج تشكيلات متنوعة للطائرات بأحجام، و مستويات تحمل (endurance levels)، و إمكانيات مختلفة [٢-١] [٤]. تصنف الطائرات من حيث الحجم وفترة الطيران ضمن أحد التصنيفات الأربعة التالية [٤]:

١. طائرة مسيرة بجناح ثابت (Fixed-wing UAV): تشير إلى الطيران المسير (الذي يملك أجنحة) وهو يحتاج إلى مدرج للإقلاع والهبوط، وهي تتصف بقدرتها على الطيران لفترات طويلة وبسرعات عالية.
٢. طائرة مسيرة بمراوح (Rotary-wing UA): تدعى أيضا بطائرات الإقلاع والهبوط العمودي (VTOL UAVs) وهي تمتلك القدرة على التحويم والمناورة العالية وتعد هذه الميزات مفيدة جداً للعديد من المهام الآلية خاصة في التطبيقات المدنية.
٣. المناطيد (Blimps): مثل البالونات والمناطيد (منطاد ذو محرك) ، والتي تكون أخف من الهواء وتمتلك فترة طيران طويلة، تطير بسرعات منخفضة، وعادة تكون بحجم كبير.
٤. طائرة مسيرة بأجنحة رفاقة (Flapping-wing UA): لديها أجنحة صغيرة مرنة قابلة للرفرفة مستوحاة من الطيور والحشرات الطائرة. يتم تزويد الطائرة المسيرة بأحمال (payloads)، هذه الأحمال يمكن أن تكون كاميرات فيديو أو صور أو معدات استطلاع ليلي أو تقنيات حرب إلكترونية أو أسلحة وبشكل عام أي معدات مطلوبة لتنفيذ المهمة المصممة من أجلها الطائرة.

٣-١: أنماط التحكم

يتمثل المبدأ الأساسي لنظام الطائرات بدون طيار في إزالة المشغل من قمرة القيادة، وبالتالي تتم السيطرة على الطائرة بوسائل أخرى. يمكن للمشغل أن يتحكم بالطائرة من خلال أحد أشكال التحكم التالية [٣-٥]:

أولاً: التحكم الأرضي أو القيادة عن بعد

تدعى الطائرة المسيرة المتحكم بها من المحطة الأرضية بالطائرة المقادة عن بعد (remotely Piloted Vehicle (RPV)، وهي تتطلب تدخل ثابت من المشغل. علماً أن عدد الطائرات الحديثة التي تقاد كلياً عن بعد قليل جداً. بدأت في الثمانينات وأوائل التسعينات أنظمة مثل "Pointer and Sky Owl" باستخدام كلتا تقنيتي التحكم عن بعد وأنظمة التوجيه المبرمج (الصيغة الأساسية من الطيران الذاتي). وبالتالي اتجهت أنظمة الطيران المسير نحو أنظمة أكثر استقلالا.

ثانياً: التحكم شبه المستقل

يمكن تعريف الرحلة شبه المستقلة على أنها عند الطلب، أي أن التدخلات الأرضية تتم خلال الأجزاء المهمة من الرحلة مثل الإقلاع والهبوط وتوظيف الأسلحة وبعض مناورات المراوغة.

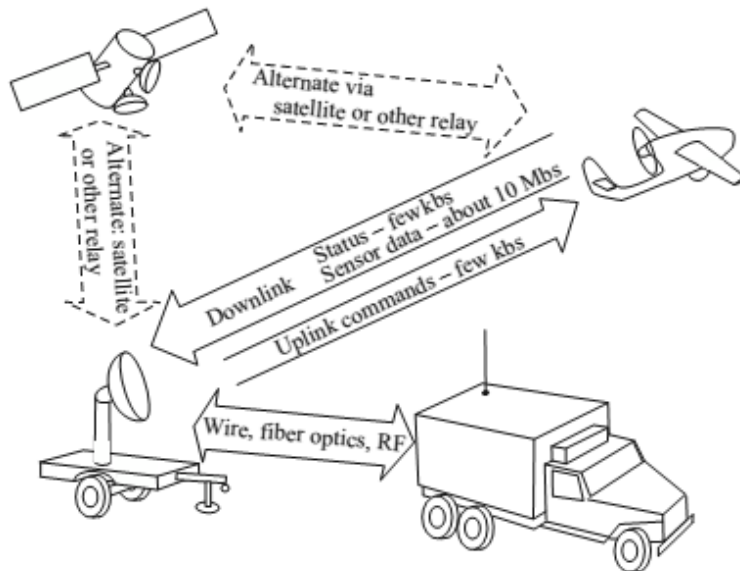
ويتوجب على المشغل أن يتحمل السيطرة الكاملة على الطائرة قبل الإقلاع وعند الإقلاع والهبوط وعند التشغيل بالقرب من القاعدة ، ولكن بمجرد الطيران يمكن تشغيل وظيفة الطيار الآلي وستتبع الطائرة مجموعة من نقاط الطريق (waypoints) المبرمجة مسبقاً، ومع ذلك، يمكن أن يتدخل المشغل للتحكم في أي وقت.

ثالثاً: الاستقلال الكامل

من الناحية النظرية ، لا يتطلب الطيران المستقل أي مساهمة بشرية من أجل تنفيذ الهدف من مهمة الطيران المسير بعد قرار الإقلاع. يمتلك الطيران المسير ذو الاستقلال الكامل القدرة على مراقبة وتقييم صحته وحالته وتكوينه وموجودات القيادة والسيطرة على متن الطائرة ضمن حدودها المبرمجة. وهكذا، فإنه في حالة الاستقلال الكامل، يعد جهاز الكمبيوتر على متن الطائرة هو الذي يتحكم على أرض الواقع وليس الانسان.

٤-١ : نظام الطيران المسير

تم في السنوات الاخيرة استبدال المصطلح UAV بـ (Unmanned Aircraft System(UAS)) للدلالة على أن محطة التحكم الأرضية GCS هي جزء من نظام الطيران المسير [١][٤-٥]. يظهر الشكل ١-١ مكونات نظام طيران مسير.



الشكل ١-١: مكونات نظام الطيران المسير [٥].

وبالتالي يمكن توضيح مكونات نظام الطيران المسير كمايلي:

أولاً: الطائرة المسيرة

كما ذكرنا سابقاً فإن الطائرة المسيرة تتوفر بأشكال وأحجام مختلفة، حيث يتم تزويد الطائرة المسيرة بمعدات مختلفة حسب المهمة المصممة من أجلها الطائرة. يمكن أن تكون هذه المعدات على شكل:

الحمولة (Payload): يمكن أن تكون الحمولة عبارة عن كاميرات فيديو عالية أو منخفضة الدقة، كاميرة صور ثابتة، معدات استطلاع نهاري وليلي، رادار عالي الطاقة، معدات حرب إلكترونية، أسلحة، مؤن، وعادة أي معدات ضرورية لتنفيذ المهمة المصممة من أجلها الطائرة. تتطلب الرغبة في زيادة مدة الطيران (endurance) في كثير من الطائرات ارتفاع نسبة (جزء) الوقود وبالتالي تخفيض جزء الحمولة، عادة يحدد ١٠% إلى ٢٠% من الوزن الإجمالي [٤].

الحساسات (Sensors): تستخدم الحساسات لتوفير الوظيفة الأساسية وهي القدرة على الحفاظ على الطيران دون تدخل بشري.

الذكاء على متن الطائرة (التوجيه، الملاحة، والتحكم) (Aircraft onboard intelligence): يرتبط الذكاء الذي يمكن تخصيصه في الطائرة المسيرة ارتباطاً مباشراً بمدى تعقيد المهمة التي يمكنه التعامل معها، ويرتبط عكساً بكمية الرقابة التي تتطلبها العوامل البشرية.

أنظمة الاتصال: تمثل جزء وصلة المعطيات من جهة الطائرة (air datalink terminal)، وهي تتألف من مرسل ومستقبل راديوي، هوائي، وموديم لوصول هذه الاجزاء مع نظام الحساسات.

ثانياً: وصلة المعطيات والتحكم

يحتوي نظام الطيران المسير على أنواع مختلفة من الوصلات الراديوية لكل منها مواصفات ووظيفة محددة، يبين الجدول ١-١ بعض هذه الوصلات ومواصفاتها [٢]:

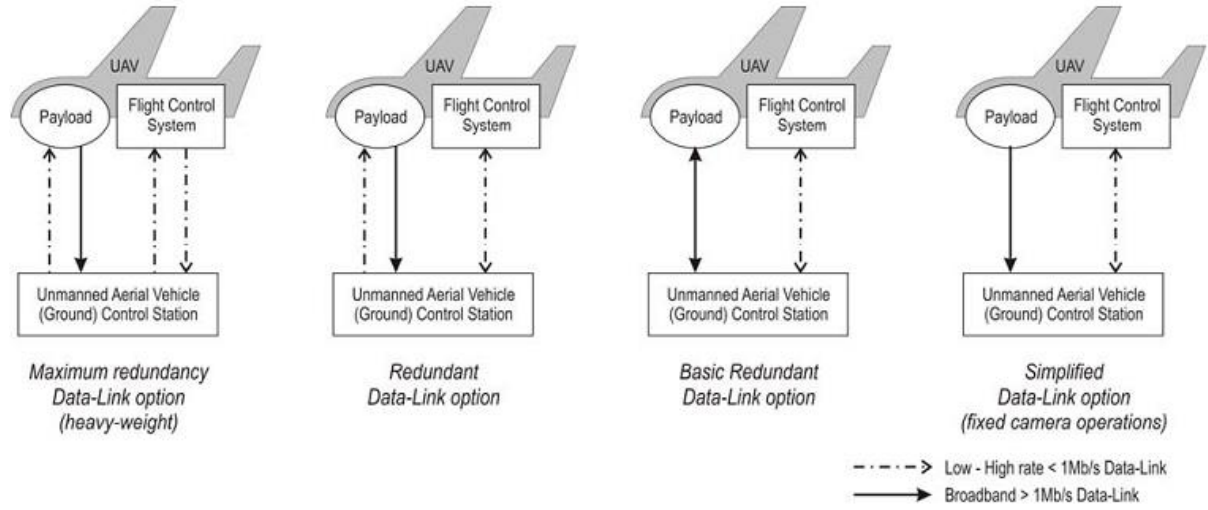
الجدول ١-١: مواصفات بعض وصلات نظام الطيران المسير [٢].

		Data-link					
		function	connection	direction	application type	rate requirement	operating frequency
Communication Stream To & From	The UAV	Flight Control	UCS→Autopilot	up	TC	Low<30 kb/s	HF, VHF/UHF
		Task-Payload Control	UCS→Payload	up	TC	Low<30 kb/s	HF, VHF/UHF
		Flight Status	Autopilot→UCS	down	TM	High<1 Mb/s	VHF/UHF
		Task-Payload Data	Payload→UCS	down	TM, TV	Broadband>1 Mb/s	L,S,C,X,Ku
		UAV Flight Progress Reporting	UAV→ATC	down	TM	High<1 Mb/s	VHF/UHF, L, S
	UAV↔Traffic		Two-way	High<1 Mb/s		VHF/UHF, L, S	
	The UAV Operator	Traffic Coordination	UAV Operator↔ATC	Two-way	WM	Low<30 kb/s	HF, VHF/UHF
					Voice		
	Mission Task Coordination	UAV Operator↔Command Post	Two-way	WM	Low<30 kb/s	HF, VHF/UHF, L, S, C, X, Ku	
				Voice			

Legend			
TC	Tele-Command	HF	1-30 MHz
TM	Telemetry	VHF/UHF	30-1000 MHz
TV	Television (visual & IR Spectrum)	L, S-Band	2-4 GHz
WM	Written Message	C-Band	5 GHz
		X-Band	10 GHz
		Ku-Band	15 GHz

تُؤمن وثوقية ودوام وصلات الاتصال للطائرة بواسطة مصدر تغذية منفصل على متن الطائرة (الشكل ١-٢). بالتالي كلما كانت ميزانية الطاقة (budget) المحجوزة أعلى هذا يضمن دوام الوصلة ضد تناقص قوة الحقل الكهربائي. كما أن تعدد الوصلات من وإلى الطائرة والمحطة الأرضية [٢]، يضمن استمرارية توفر وصلة معطيات وتبادل كافي في الاتصال بين الطائرة والمحطة الأرضية. على سبيل المثال: تعدد وحدات المرسل/المستقبل، المستقبلات، المرسلات، و

تعدد ترددات الاتصال.. يظهر الشكل ٢-١ الخيارات المتاحة لوصلات الاتصال بين الطائرة والمحطة الأرضية.



الشكل ٢-١: الخيارات المتاحة لوصلات الاتصال بين الطائرة والمحطة الأرضية [٢]

يعتبر الاتصال بين الطائرة ومحطتها الأرضية أساسي لتنفيذ المهمة. يحلل الجدول ٢-١ السيناريوهات البديلة في حال فقدان جزئي لوصلة المعطيات. حيث يظهر الجدول أنه سيتم إحباط تنفيذ المهمة، فقط في حال ضياع وصلة المعطيات الهابطة (معطيات الفيديو أو الصور)، بينما في الحالات الأخرى لضياع وصلة المعطيات فإن المهمة يمكن أن تستمر ويمكن توقع تحقيق جزئي لأهداف المهمة.

جدول ٢-١: السيناريوهات البديلة الممكنة في حال انقطاع جزئي لوصلة المعطيات [٢].

		Mission Continuation		
		Autonomous Flight	Remotely Controlled Flight	Mission Abortion
Data-Link Loss	Flight Control up-link			
	Flight Status down-link			
	Payload-Task Control up-link			
	Task-Payload Data down-link			
	Flight Control up-link & Payload-Task Control up-link			
	Payload-Task Control up-link & Flight Status down-link			

ثالثاً: المحطة الأرضية

هي عبارة عن مركز تحكم أرضي أو بحري والذي يقدم الإمكانيات للتحكم البشري بالطائرة المسيرة. تحتوي محطة التحكم الأرضية النموذجية للطائرات بدون طيار على وحدتي تحكم - واحدة للتحكم بالطائرة والأخرى للتحكم بالحمولة النافعة. وهي يمكن أن تحتوي كومبيوتر، بطاقات القياس عن بعد (telemetry)، بطاقات تحصيل الفيديو، والهوائيات للتحكم بوصلات المعطيات والفيديو مع الطائرة. غالباً ما يكون مشغلو الطائرات بدون طيار طيارين سابقين أو حاليين حيث يتم تدريبهم على عمليات مراقبة الحركة الجوية وديناميات الطيران.

يتم تشغيل برمجيات محطة التحكم الأرضية GCS عادةً على جهاز كمبيوتر أرضي يُستخدم لتخطيط المهمة وطيرانها، وهو يوفر خريطة على شاشة الحاسب حيث يمكن للمستخدم تحديد نقاط الطريق للرحلة، ورؤية تقدم المهمة. وهي تخدم كقمرة قيادة افتراضية، والتي تبين العديد من الأدوات نفسها كما هو الحال في الطائرات المأهولة. بالتالي تعتبر محطة التحكم الأرضية GCS عنصر مهم في تحقيق الهدف من المهمة المصممة من أجلها الطائرة المسيرة من خلال قدرتها على الحفاظ على وصلة معطيات دائمة وذات ربح عالٍ مع الطائرة والذي يرتبط من جهة ثانية بشكل أساسي بمواصفات المخطط الإشعاعي لهوائيات المحطة الأرضية وقدرة المحطة الأرضية على الحفاظ على الطائرة على قمة المخطط الإشعاعي وبالتالي الحصول على أعظم استطاعة مستقبلية من الطائرة.

١-٥: حماية وصلة المعطيات

تعتبر حماية وصلة المعطيات وسرية المعطيات من أكثر المواضيع أهمية بالنسبة لأنظمة اتصالات الطيران المسير. حيث يمكن حماية وصلة المعطيات بتطبيق ميزات حماية معقدة وغالية الثمن [٢] مثل:

١. تقنيات ترميز مع إمكانية كشف وتصحيح الأخطاء.
٢. بروتوكولات متينة ضد الخطأ (error robust protocols).
٣. التقليل من التعرض للتشويش الكهرومغناطيسي باستخدام هوائيات حزمة موجهة وضيقة.
٤. طرق القفز الترددي.
٥. تقنيات الطيف المنتور.
٦. معالجة الإشارة بشكل ذكي لحذف إشعاع الضجيج معروف الإتجاه.

علينا أن نواجه الحقيقة أنه عند استخدام أنظمة اتصال مبنية باستخدام المكونات التجارية المتوفرة COTS سيكون لدينا دائما بعض التداخل والانقطاع للإشارة [٢-٣]. من هنا نجد أهمية المحافظة على وصلة المعطيات بين الطائرة ومحطة التحكم الأرضي، وهذا يتطلب أن تمتلك هوائيات المحطة الأرضية إمكانية تحصيل وملاحقة إشارة الطائرة بدون طيار [٦-١١]. حيث أن أي خلل في الوصلة نتيجة التشويش أو عدم جودة خوارزمية الملاحقة المتبعة يمكن أن يؤثر على جودة المعطيات المستقبلية، مما قد يؤدي إلى فشل المهمة أو حتى فقدان الاتصال بالطائرة. على سبيل المثال في عملية عاصفة الصحراء في حرب العراق تم استخدام الطائرة "Pioneer UAV" (الشكل ١-٣)، حيث تم فقدان ١٢ طائرة في تلك العملية، واحدة منها فقط سقطت بالنيران المعادية و ١١ نتيجة فقدان وصلة المعطيات مع القاعدة [٤][٧].



الشكل ١-٣: الطائرة "Pioneer UAV" المستخدمة في عملية عاصفة الصحراء [١٢].

بناءً على ما سبق سنركز البحث في الجزء المتبقي من الأطروحة على تحسين بارامترات الوصلة من جهة المحطة الأرضية لتحسين ربح الإشارة المستقبلية، وتقليل أثر التشويش، بالإضافة إلى سرعة إعادة التقاط إشارة الطائرة عند حدوث انقطاع في الوصلة.

١-٦: ملاحقة إشارة الطيران المسير

يعد الاستشعار عن بعد من أكثر المهام التي يستخدم فيها الطيران المسير، وهذا يتطلب أن تقوم الطائرة بإرسال المعلومات التي يتم جمعها من قبل الحساسات إلى محطة التحكم الأرضي ليتم تحليل هذه المعطيات من قبل محطة التحكم الأرضية واتخاذ القرار [٢][٤][٧-١١]. لذلك فإنه من

المهم المحافظة على وصلة المعطيات والتحكم مع قاعدة التحكم الأرضية خلال العمل وهذا يتطلب أن يكون هوائي المحطة الأرضية قادراً على ملاحقة إشارة الطائرة [٧-١٠]، وبالتالي يجب أن يكون المخطط الإشعاعي موجه بشكل مناسب إلى الطائرة. ولتحقيق هذه المهمة يجب أن تقوم المحطة الأرضية بالتقاط إشارة الطائرة ومن ثم ملاحقتها خلال حركة الطائرة ضمن حقل الرؤية .FOV

استخدمت الأنظمة التقليدية هوائيين منفصلين لتحقيق هذه المهمة، هوائي لالتقاط الإشارة وآخر للملاحقة من خلال قياس قوة الإشارة المستقبلية والتحكم الميكانيكي للهوائيات، وبالتالي وجود معالجين منفصلين لتحقيق هذه الغاية [١٠-١١][١٣-١٤].

يمكننا القول أن وظيفة نظام ملاحقة الطيران المسير هو الحفاظ على وصلة معطيات دائمة وبربح عالٍ بين الطائرة والمحطة الأرضية من خلال الحفاظ على الطائرة على قمة الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة الأرضية، وهذا يقتضي تنفيذ مهمتين أساسيتين:

المهمة الأولى: التقاط الإشارة المرسله من الطائرة المسيرة، ومن ثم استخدام خوارزمية تحديد اتجاه لتحديد اتجاه الطائرة ومن ثم توجيه الهوائي نحو الطائرة.

المهمة الثانية: ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة، من خلال استخدام خوارزمية ملاحقة لتوجيه الهوائي بشكل دائم نحو الطائرة لإبقائها على قمة الحزمة الرئيسية للهوائي وبالتالي الحفاظ على الوصلة بربح عالٍ.

نستطيع القول أن جودة نظام الملاحقة تظهر من خلال قدرته على تأمين استقبال أكبر استطاعة مرسله من الطائرة بشكل دائم، حيث أن الاستطاعة المستقبلية في أنظمة الملاحقة ترتبط بربح هوائي الاستقبال و يمكن إيجاد هذه العلاقة من معادلة الرادار الأساسية (معادلة Friis [١٥]):

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1-1)$$

حيث أن P_R هي الاستطاعة المستقبلية، P_T هي استطاعة المرسل على الطائرة، G_T و G_R هي ربح كل من هوائي الإرسال على الطائرة وهوائي الاستقبال في المحطة الأرضية، λ طول الموجة، R المسافة بين الطائرة والمحطة الأرضية.

من جهة ثانية إن انحراف الموقع الزاوي للطائرة بالنسبة لقمة الحزمة الرئيسية للهوائي والذي يسمى **بخطأ التوجيه** سينتج عنه تناقص في ربح هوائي الاستقبال. يسمى هذا التناقص في الربح

نتيجة خطأ التوجيه بضياح العبور (crossover loss) [٩][١٦]. يحسب تناقص الربح بالنسبة للحزمة الغوسية (Gaussian beam) بالعلاقة:

$$G(\Delta\theta) = G_0 e^{-k \frac{(\Delta\theta)^2}{(\theta_B)^2}} \quad (2-1)$$

حيث أن θ_B تمثل عرض حزمة نصف الاستطاعة للهوائي، $\Delta\theta$ هي الإنحراف الزاوي بين زاوية توجيه الحزمة الرئيسية والموقع الزاوي للطائرة بالنسبة لمحور الهوائي، و k ثابت يساوي $k=4\ln(2)=2.773$.

ويكون ضياح العبور:

$$L_{Co} = 10 \log \left(\frac{G(\Delta\theta)}{G_0} \right) \quad (3-1)$$

حيث G_0 هي ربح الهوائي عند قمة المخطط الإشعاعي، و L_{Co} هو ضياح العبور يقدر بـ dB. كما أن انخفاض الربح سيؤدي إلى انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج والتي تحسب من المعادلة التالية:

$$SNR = \frac{P_R}{N} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \frac{1}{k_B T_s B} \quad (4-1)$$

حيث N هي ضجيج النظام، k_B ثابت بولتزمان، T_s حرارة النظام، و B عرض المجال الترددي للمستقبل.

تظهر هذه المعادلة أنه كلما كان الربح أصغر فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج أقل. كما أن تناقص الربح سيسبب ضياح في الاستطاعة المستقبلية. و كما هو معروف أنه إذا لم يمتلك المستقبل استطاعة كافية فإنه لن يمتلك معدل نقل المعطيات الضروري للحفاظ على وصلة المعطيات وستعاني من ضياح في المعلومات. كذلك يمكننا من المعادلة السابقة حساب المدى الأعظمي لنظام الملاحقة من أجل نسبة الإشارة إلى الضجيج محددة، وفق العلاقة:

$$R_{max}^2 = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 (SNR)_{min}} \frac{1}{k_B T_s B} \quad (5-1)$$

وبالتالي إن أي ضياع في الريح سيقلل مدى النظام ويسبب ضياع في الملاحة. بالتالي يمكن الملاحظة أن المجال الحقيقي للطائرة محدود بمدى الوصلة الراديوية، بحيث تكون استطاعة الإشارة المستقبلية كافية للحصول على المعلومات المفيدة المرسله من الطائرة. بناء على ذلك ستركز البحث في تحسين أداء نظام الملاحة على دراسة العوامل المؤثرة على خطأ التوجيه لتقليله.

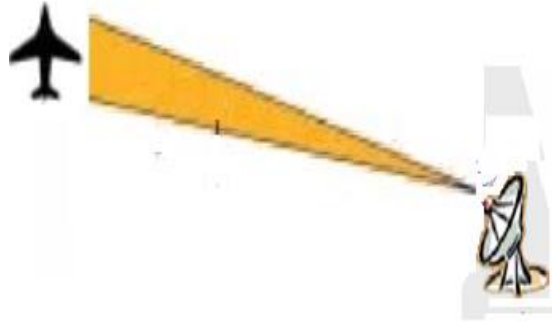
يتم تمييز أنظمة الملاحة من خلال:

١. أداء خوارزميات تحديد الاتجاه والملاحة المستخدمة.
٢. التكلفة الحسابية للخوارزميات المطبقة.
٣. ارتباط أداء النظام بسرعة الطائرة عبر سرعة استعادة الملاحة بعد حدوث انقطاع في الوصلة.

٧-١: طرق تحقيق الملاحة

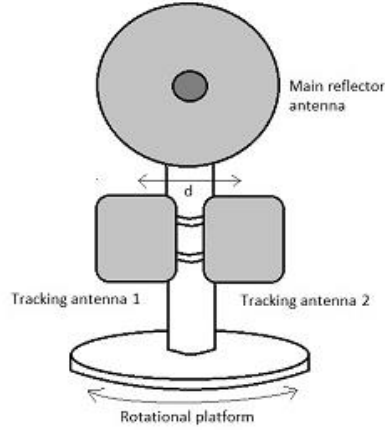
استخدمت الأنظمة التقليدية التحريك الميكانيكي للهوائي لملاحقة الموقع الزاوي للطائرة والتقاط إشارتها، والتي طبقت بعدة أشكال:

❖ استخدام هوائي صحن، حيث يقوم بملاحقة إشارة الطائرة وفق قوة الإشارة [٩] و تحريك ميكانيكي للهوائي. يظهر الشكل ٤-١ نظام ملاحقة بقياس قوة الإشارة.



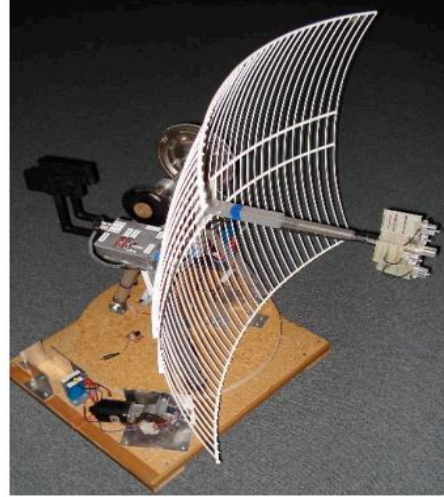
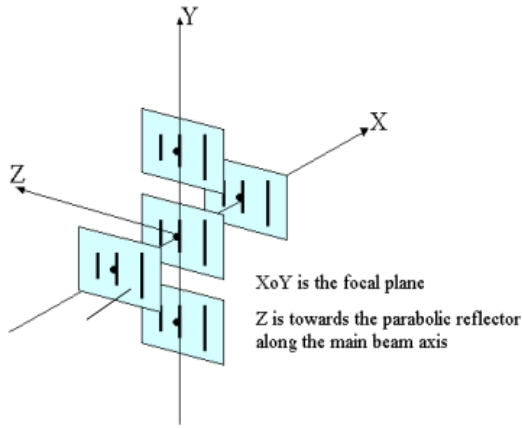
الشكل ٤-١: نظام ملاحقة وفق قوة الإشارة

❖ استخدام هوائيين للملاحقة وفق تقنية النبضة الأحادية (Monopulse) و هوائي منفصل للإستقبال، حيث يكون التحريك ميكانيكي. كما في الشكل ٥-١.



الشكل ٥-١: نظام ملاحقة وفق تقنية النبضة الأحادية بهوائيات منفصلة [١٠]

❖ استخدام هوائي واحد بأربع مغذيات للملاحقة ومغذي مركزي للاستقبال، حيث تم تحقيق الملاحقة إما بقياس قوة الإشارة المستقبلية على المغذيات الأربعة وحساب اتجاه ورود الإشارة [١٣]، أو بتطبيق تقنية النبضة الأحادية [١١]. كما في الشكل ٦-١.



الشكل ٦-١: نظام ملاحقة وفق تقنية النبضة الأحادية بهوائي واحد ومغذيات منفصلة [١١]

❖ استخدام نظام سيرفو لتحريك هوائي موجه نحو موقع الطائرة بناء على معطيات الـ GPS لتحديد موقع الطائرة [١٤]. يظهر الشكل ٧-١ نظام السيرفو المستخدم.



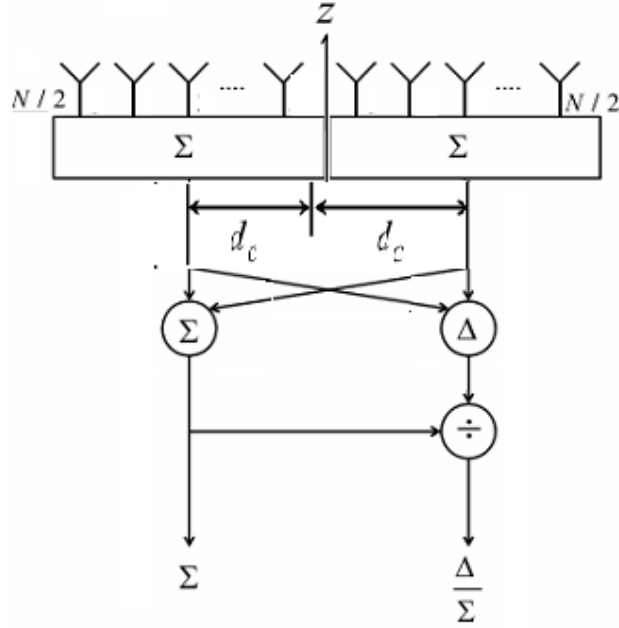
الشكل ١-٧: نظام ملاحقة باستخدام نظام سيرفو [١٤]

تم تجاوز مشاكل التحريك الميكانيكي للهوائي من خلال استخدام الهوائيات المصفوفية الطورية (phased array antennas) والتي تتيح إمكانية التحريك الإلكتروني للمخطط الإشعاعي للهوائي دون الحاجة للتحريك الفيزيائي للهوائي، بالإضافة إلى سرعة المسح، وإمكانية إلغاء إشارة التشويش بتصفير ربح الهوائي باتجاه محدد، وغيرها من الميزات.

تعد مصفوفة الملاحقة باستخدام تقنية النبضة الأحادية (Monopulse tracking array) من أكثر مصفوفات الملاحقة المبنية باستخدام هوائيات المصفوفات الطورية شيوعاً.

١-٧-١: مصفوفة ملاحقة باستخدام تقنية النبضة الأحادية

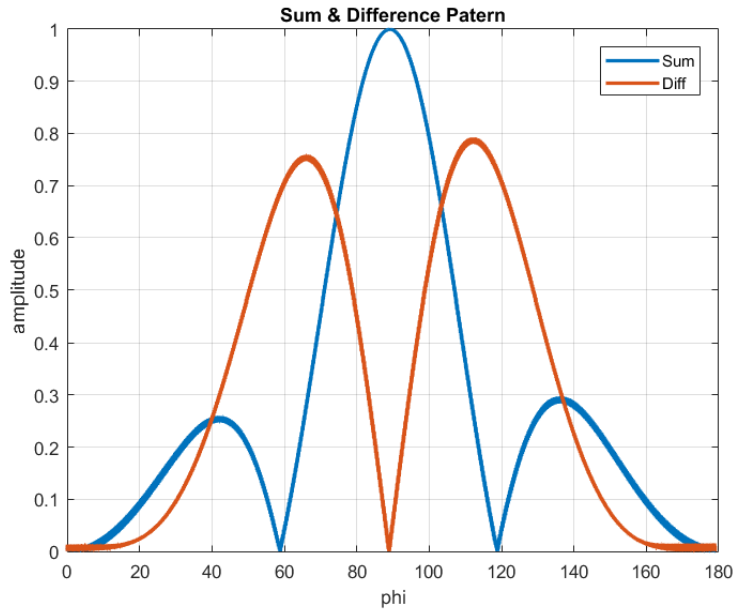
تعتمد هذه المصفوفة على مستقبل هوائي مصفوفة طورية لملاحقة إشارة الهدف، من خلال تقسيم المصفوفة إلى مصفوفتين جزئيتين ومن ثم تشكيل حزمة الجمع وحزمة الفرق للإشارة المستقبلية لتوليد إشارة الخطأ وملاحقة الهدف لإبقائه على محور المصفوفة [٦-٩]. يظهر الشكل ١-٨ نظام مصفوفة وفق تقنية النبضة الأحادية.



Sum and difference beamforming of monopulse

الشكل ٨-١: نظام مصفوفة وفق تقنية النبضة الأحادية باستخدام مصفوفة طورية [٧]

حيث يتم توليد حزمتين منحرفتين عن بعضهما بما يتناسب مع المسافة بين مركزي المصفوفتين الجزئيتين، من ثم يتم إيجاد حزمة الجمع وحزمة الفرق للإشارة المستقبلية من كلا المصفوفتين الجزئيتين [٩-٦][١٦]، كما في الشكل ٩-١:



الشكل ٩-١: حزمة الجمع وحزمة الفرق

فعندما تكون الطائرة على محور المصفوفة فإن إشارة حزمة الفرق ستكون مساوية للصفر وتكون متطابقة مع إشارة حزمة الجمع التي ستكون مساوية لقمة استجابة المصفوفة. وعندما تنحرف الطائرة عن محور المصفوفة فإن إشارة الفرق ستتحرف عن الصفر، وسيتم توليد إشارة الخطأ لتصحيح توجيه الحزمة الرئيسية.

يتم توليد إشارة الخطأ من خلال إيجاد معادلة حزمة الجمع وحزمة الفرق كما يلي:
باعتبار ان كل مصفوفة جزئية هي عبارة عن مصفوفة طورية خطية متساوية الأبعاد فإن استجابة كل مصفوفة جزئية تعطى بالعلاقة التالية

$$SF = \frac{\sin \left[\frac{Nkd(\sin\theta - \sin\theta_s)}{4} \right]}{\sin \left[\frac{kd(\sin\theta - \sin\theta_s)}{2} \right]} \quad (6-1)$$

حيث N تمثل عدد عناصر المصفوفة الكلية، d هي المسافة بين عناصر المصفوفة، θ_s هي زاوية المسح، θ هي زاوية ورود الإشارة، و k هو ثابت الانتشار ويساوي $\frac{2\pi}{\lambda}$.
تكون إشارة الجمع

$$\begin{aligned} \sum &= SF e^{-jkd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)} + SF e^{jkd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)} \\ \sum &= SF \cdot 2 \cdot \cos(kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)) \end{aligned} \quad (7-1)$$

حيث d_c تمثل المسافة بين مركز المصفوفات الجزئية وتساوي

$$d_c = \frac{N}{4}d$$

بالتالي تكون حزمة الفرق

$$\begin{aligned} \Delta &= SF e^{-jkd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)} - SF e^{jkd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)} \\ \Delta &= SF \cdot 2 \cdot j \sin(kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)) \end{aligned} \quad (8-1)$$

بالتالي يتم الحصول على إشارة الخطأ من خلال تقسيم إشارة الطرح إلى إشارة الجمع:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{\sum} &= \frac{SF(2j)\sin[kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)]}{SF(2)\cos[kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)]} \\ &= j \tan[kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)] \end{aligned} \quad (9-1)$$

بفرض أن كل من θ و θ_s زاوية صغيرة، عندئذ يمكن اعتبار $\sin\theta - \sin\theta_s \approx \theta - \theta_s$ وبالتالي يمكن كتابة $\tan[kd_c(\sin\theta - \sin\theta_s)] \approx kd_c(\theta - \theta_s)$ عندها يمكن تبسيط نسبة الطرح إلى الجمع لتصبح:

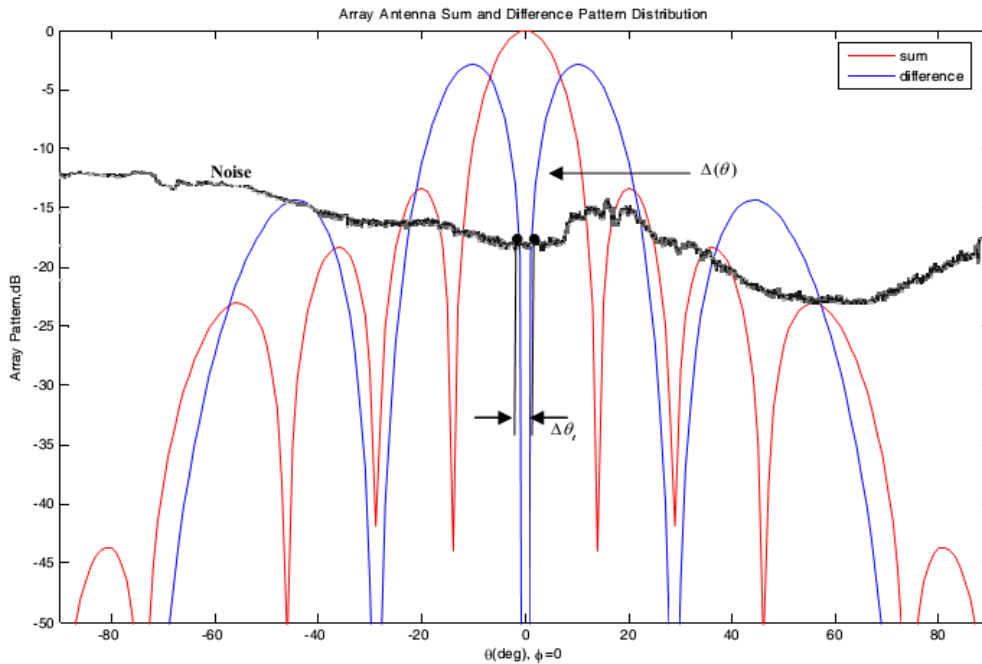
$$\left| \frac{\Delta}{\Sigma} \right| \approx kd_c(\theta - \theta_s) = K(\theta - \theta_s) \quad (10-1)$$

حيث أن K تسمى بثابت الانحدار (slope constant)، يمكن حسابه في المصفوفة الطورية بالعلاقة:

$$K = kd_c = \frac{2\pi N}{\lambda} \frac{d}{4} = \frac{0.88\lambda}{\theta_B} \left(\frac{\pi}{2\lambda} \right) = \frac{1.38}{\theta_B} \quad (11-1)$$

حيث أن θ_B هي عرض حزمة الهوائي (HPBW) وهي تساوي $\theta_B = 0.887 \frac{\lambda}{Nd}$ (rad).

تعتبر هذه المعادلة صحيحة قرب محور توجيه المصفوفة. حيث أن ثابت الانحدار يتناقص بشكل كبير نتيجة تزايد عرض الحزمة عند زوايا مسح عريضة. كما أن مصفوفة الملاحقة باستخدام تقنية النبضة الأحادية حساسة لضجيج المستقبل الذي سيؤثر على الدقة الزاوية لنظام الملاحقة [١٦]-٦. [٩][١٦], ففي حالة وجود الضجيج فإنه سيملى صفر حزمة الفرق ويمنع القياس الدقيق للزاوية، يظهر الشكل ١٠-١ تأثير الضجيج على توليد إشارة الخطأ في تقنية النبضة الأحادية.



الشكل ١٠-١: تأثير الضجيج على توليد إشارة الخطأ في تقنية النبضة الأحادية [١٦]

كما هو معروف في الهوائيات المصفوفية فإن الدقة الزاوية أو دقة التوجيه ترتبط بنسبة الإشارة إلى الضجيج [١٥-١٦] حيث يمكن كتابة الخطأ في قياس الزاوية وفق العلاقة

$$\delta\theta = \frac{0.628\theta_B}{(SNR)^{1/2}} \quad (12-1)$$

وبالتالي يمكن الحصول على دقة زاوية عالية بتقليل عرض الحزمة وبنسبة الإشارة إلى الضجيج عالية. يمكن إيجاد علاقة الدقة الزاوية لمصفوفة طورية تستخدم تقنية النبضة الأحادية بدلالة نسبة الإشارة إلى الضجيج وثابت الانحدار لتقنية النبضة الأحادية باستخدام المعادلة (12-1)، لتصبح:

$$\delta\theta = \frac{0.868}{K\sqrt{SNR}} \quad (13-1)$$

كما أن تقنية النبضة الأحادية تتأثر بأخطاء عناصر المصفوفة والتي تطلب معايرة دقيقة لعناصر المصفوفة، وسيتم شرح هذه الأخطاء في الفصل التالي.

الفصل الثاني

المصفوفات في أنظمة الملاحقة

١-٢: مقدمة

قدّم استخدام الهوائيات المصفوفية في أنظمة الملاحقة تطويراً مهماً على أنظمة الملاحقة التقليدية. حيث تمتلك الهوائيات المصفوفية ميزات فريدة من حيث إمكانية المسح الإلكتروني للمخطط الإشعاعي وبالتالي إلغاء الحاجة للتحريك الميكانيكي للهوائي كما هو الأمر في الأنظمة التقليدية، بالإضافة إلى ميزات أخرى كثيرة مثل إمكانية تشكيل عدة حزم لملاحقة عدة أهداف في نفس الوقت [٢٠-١٧]. من الهوائيات المصفوفية المستخدمة في الملاحقة مصفوفة باتلر (Butler matrix)، و المصفوفة الطورية (phased array)، و مصفوفة التوجيه العكسي (retrodirective array).

عند استخدام هوائي مصفوفي لبناء نظام ملاحقة فإنه عادة يطلق على هذا الهوائي المصفوفي بمصفوفة الملاحقة، لذلك سنستخدم هذا المصطلح خلال هذه الأطروحة. بالنتيجة إن الغرض الأساسي من مصفوفة الملاحقة في أنظمة الطيران المسير هو الحفاظ على الإشارة المستقبلية من الطائرة بربح عالٍ وهذا يعني إبقاء الطائرة على قمة الحزمة الرئيسية لاستجابة المصفوفة بشكل دائم، وبالتالي فإنه قد يكون من الجيد في بعض الأحيان زيادة عرض حزمة الهوائي المصفوفي لإبقاء الطائرة ضمن الحزمة الرئيسية للهوائي ولكن هذا سيكون على حساب تقليل الربح [٢٠-٢١]، كما أنه سيزيد من احتمال استقبال إشارات التشويش مع إشارة الطائرة مما قد ينتج عنه فشل تحقيق الوصلة المطلوبة بين الطائرة والمحطة الأرضية. سنشرح في هذا الفصل هوائيات المصفوفة الطورية و هوائيات مصفوفة التوجيه العكسي كأكثر هوائيات مصفوفية استخداماً في بناء أنظمة الملاحقة، حيث سنشرح ميزات ومشكلات هذه المصفوفات.

٢-٢: هوائي المصفوفة الطورية (Phased Array Antenna(PAA))

يتألف هوائي المصفوفة الطورية من عدد من عناصر الهوائيات توزع بطريقة هندسية محددة. تتميز هذه الهوائيات بقدرتها على توجيه الحزمة الرئيسية بشكل الكتروني بفعالية عالية. بدأ

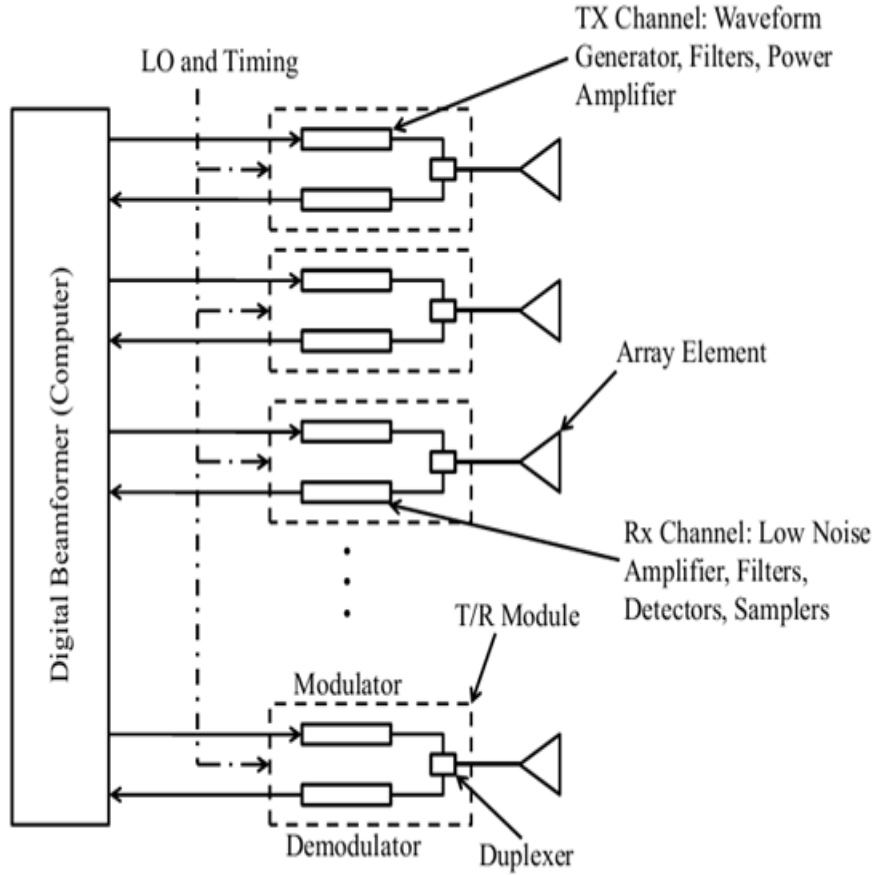
استخدام هوائي المصفوفة الطورية خلال الخمسينات من القرن الماضي، وكانت هذه الهوائيات تعتمد بشكل أساسي في تشكيل و توجيه المخطط الإشعاعي على استخدام عناصر تماثلية مثل مزيجات الصفحة و المضخمات المتغيرة. هذه العناصر التماثلية تعاني من تغيرات في عملها نتيجة عوامل الحرارة و الزمن و والاهتزاز الميكانيكي وبالتالي فهي بحاجة لعملية معايرة مع الزمن.

الطريقة البديلة في تصميم هوائي المصفوفة الطورية هو استخدام مشكّل المخطط الإشعاعي الرقمي (digital beamformer)، حيث أن عمليات إزاحة الصفحة وتقييس المطال وعملية الجمع تطبق بشكل رقمي. سنستخدم مصطلح هوائي المصفوفة الطورية الرقمي (digital phased array antenna (DPAA)) للدلالة على استخدام مشكل المخطط الإشعاعي الرقمي لتشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي، لكن مازال هوائي المصفوفة الطورية يحتوي على العناصر التماثلية المستخدمة في مراحل التردد الراديوي (RF stages).

يعتبر هوائي المصفوفة الطورية الرقمي مرشح كبير للاستخدام في بناء مصفوفة ملاحقة لإشارة الطيران المسير [6-10]. وذلك لأنها تسمح باستخدام توابع معالجة الإشارة لمعالجة إشارة الهوائيات وتحقيق تشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي [20-22].

يظهر الشكل ٢-١ مخطط صندوقي لمكونات هوائي مصفوفة طورية رقمي ، حيث نلاحظ أن كل عنصر من عناصر المصفوفة يمتلك وحدة مرسل/مستقبل مستقلة. ويتم تشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي باتجاه محدد باستخدام مشكل مخطط إشعاعي رقمي.

يقوم مشكّل المخطط الإشعاعي الرقمي بضرب كل من الإشارات المستقبلية (أو المراد إرسالها) عبر عناصر هوائيات المصفوفة بوزن عقدي، حيث يتم تشكيل المخطط الإشعاعي من خلال ضبط مطال هذه الأوزان العقدية، ويتم توجيه المخطط الإشعاعي من خلال ضبط طور هذه الأوزان العقدية.



الشكل ٢-١: مخطط صندوقي لمكونات مصفوفة طورية رقمية [٧].

١-٢-٢: تشكيل المخطط الإشعاعي

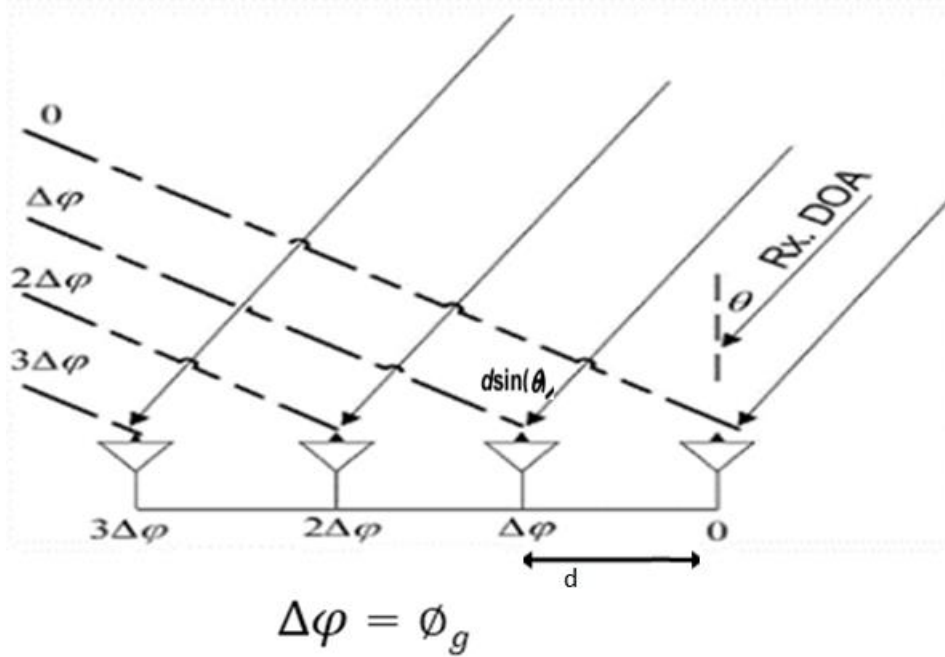
سنأخذ في هذه الدراسة فرضية أن الإشارة هي ذات حزمة ضيقة أي أن التأخير في زمن وصول الإشارة على عناصر هوائي المصفوفة سينعكس على شكل إزاحة في الطور [٢١-٢٣]، وأن هوائي المصفوفة يقع في منطقة الحقل البعيد. تقوم فلسفة هوائيات المصفوفة الطورية على اعتبار أحد عناصر هوائي المصفوفة كقناة مرجعية ومن ثم تعويض إزاحة الطور للإشارات المستقبلية على هوائيات عناصر (أقنية) المصفوفة الأخرى بحيث تصبح هذه الإشارات متوافقة بالصفحة ومن ثم جمع هذه الإشارات.

يمكن كتابة الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية بالشكل العقدي

$$S_{ref} = |S|e^{j\phi_{ref}} \quad (1-2)$$

حيث أن $|S|$ تمثل مطال الإشارة المستقبلية، و ϕ_{ref} طور الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية.

بناءً على ذلك فإنه عند ورود الإشارة المستوية إلى مصفوفة فإن الإشارة المستقبلية عند كل قناة من المصفوفة ستكون مزاحة بالصفحة عن الإشارة الواردة على القناة المرجعية بصفحة تتناسب مع الموقع الهندسي لعناصر المصفوفة وزاوية ورود الإشارة، هذه الصفحة تسمى بالصفحة الهندسية. يوضح الشكل ٢-٢ الصفحة الهندسية لعناصر مصفوفة خطية.



الشكل ٢-٢: الصفحة الهندسية لعناصر مصفوفة خطية

بالتالي فإنه يمكن التعبير عن الصفحة الهندسية لكل قناة في حالة مصفوفة خطية بالعلاقة:

$$\phi_{gn} = \frac{2\pi}{\lambda} d_n \sin \theta \quad (2-2)$$

حيث n تمثل رقم القناة (عنصر هوائي المصفوفة) وهي تأخذ قيم ضمن المجال $0..N-1$ و N تمثل عدد عناصر المصفوفة، d_n هي المسافة بين عناصر المصفوفة، و θ هي زاوية ورود الإشارة. وبما أن الصفحة الهندسية لكل قناة تحتوي على معلومات زاوية ورود الإشارة. فهنا تكمن فلسفة المصفوفة الطورية بأنها تعمل على تعزيز الإشارة الواردة من اتجاه معين وتضعيف الإشارات الواردة من اتجاهات أخرى.

يرتبط طور الإشارة المستقبلية على كل قناة بطور الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية بالعلاقة:

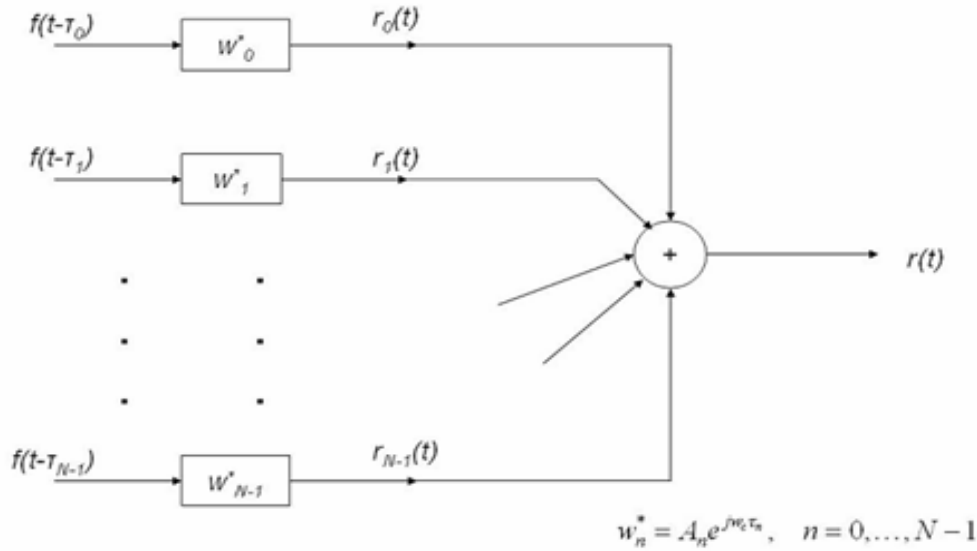
$$\phi_n = \phi_{ref} + \phi_{gn} \quad (3-2)$$

حيث ϕ_{ref} تمثل طور الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية.

بالتالي يمكن كتابة الإشارة على خرج كل قناة بدلالة الإشارة على خرج القناة المرجعية بالشكل العقدي:

$$S_n = S_{ref} e^{j\phi_{gn}} \quad (4-2)$$

بالتالي سيتم تشكيل المخطط الإشعاعي لهوائي المصفوفة باتجاه ورود الإشارة من خلال تعويض هذه الإزاحة في الطور وجمع الإشارات المستقبلية على كل قناة بشكل متراكب. كما ذكرنا سابقاً، يتم تعويض هذه الإزاحة في الصفحة في المصفوفات الرقمية باستخدام أوزان عقدية على خرج كل قناة ومن ثم جمع الإشارات الناتجة. يوضح الشكل ٣-٢ استخدام الأوزان العقدية في مشكل المخطط الإشعاعي لحزمة ضيقة [٢١-٢٣]:



الشكل ٣-٢: مشكل المخطط الإشعاعي لحزمة ضيقة [٢٢].

يمثل خرج مشكل المخطط الإشعاعي استجابة المصفوفة، حيث يتم التحكم بشكل المخطط الإشعاعي من خلال ضبط مطال هذه الأوزان العقدية للمصفوفة، ويتم توجيه المخطط الإشعاعي من خلال ضبط صفحة الأوزان العقدية [١٨-٢٧].

٢-٢-٢: استجابة هوائي المصفوفة الطورية

تم أخذ حالة مصفوفة خطية بمسافة متساوية بين عناصر المصفوفة (uniform linear array (ULA)) لإيجاد استجابة هوائي المصفوفة الطورية لإشارة مستوية واردة على المصفوفة. وتم إيجاد استجابة هذه المصفوفة باستخدام مشكل المخطط الإشعاعي الرقمي الذي تم

توضيحه في الفقرة السابقة. حيث سنأخذ التمثيل العقدي للإشارات المستقبلية على كل قناة ونكتبها بصيغة مصفوفة (Matrix).

يمكننا كتابة الإشارة المستقبلية على خرج قنوات هوائي المصفوفة الطورية بشكل مصفوفة (Matrix) باستخدام المعادلة (1-2) و (4-2) (لغرض التبسيط سنأخذ الرمز S للتعبير عن الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية $S_{ref} = S$).

$$R = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Se^{j\phi_{g0}} \\ Se^{j\phi_{g1}} \\ \vdots \\ Se^{j\phi_{gN-1}} \end{bmatrix}$$

لتسهيل الحساب سنعتبر مركز المصفوفة هو مبدأ الإحداثيات وبالتالي يمكن تمثيل موقع العناصر بالنسبة لمركز المصفوفة بدلالة المسافة بين عناصر المصفوفة كما يلي:

$$d_n = \left(n - \frac{N-1}{2}\right)d \quad (5-2)$$

حيث d تمثل المسافة بين عناصر المصفوفة.

بتعويض (5-2) في (2-2) يمكن التعبير عن الصفحة الهندسية لكل قناة

$$\phi_{gn} = \left(n - \frac{N-1}{2}\right) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (6-2)$$

يمكن تعريف المصفوفة $V_\theta(\theta)$ والتي تسمى بمصفوفة توجيه الهوائي المصفوفي:

$$V_\theta(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j\phi_{g0}} \\ e^{j\phi_{g1}} \\ \vdots \\ e^{j\phi_{gN-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta} \\ e^{j\left(\frac{N-3}{2}\right) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta} \\ \vdots \\ e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta} \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

سنكتب أيضا الأوزان العقدية بصيغة مصفوفة

$$W = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{N-1} \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

بالتالي باستخدام مشكل المخطط الإشعاعي في الشكل ٢-٣ تكون استجابة المصفوفة هي حاصل ضرب مصفوفة الأوزان العقدية مع مصفوفة توجيه الهوائي:

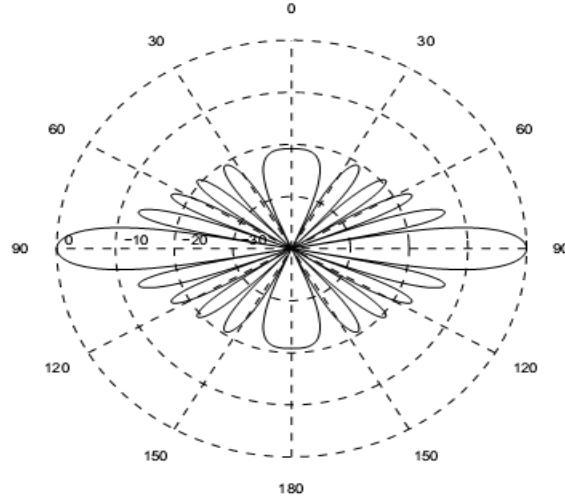
$$\begin{aligned}
 B(\theta) &= W^H V_\theta(\theta) \\
 &= [w_0^* \ w_1^* \ \cdots \ w_{N-1}^*] \begin{bmatrix} e^{j-(\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \\ e^{j-(\frac{N-3}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \\ \vdots \\ e^{j(\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \end{bmatrix} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* e^{j(n-\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta}
 \end{aligned} \tag{9-2}$$

بإعطاء أوزان متساوية $w = \frac{1}{N}$ ، وتعويضها في (9-2) ينتج استجابة هوائي المصفوفة باتجاه محورها:

$$\begin{aligned}
 B(\theta) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(n-\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \\
 &= \frac{1}{N} e^{j-(\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \\
 &= \frac{1}{N} e^{j-(\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta} \left[\frac{1 - e^{jN\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta}}{1 - e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta}} \right]
 \end{aligned} \tag{10-2}$$

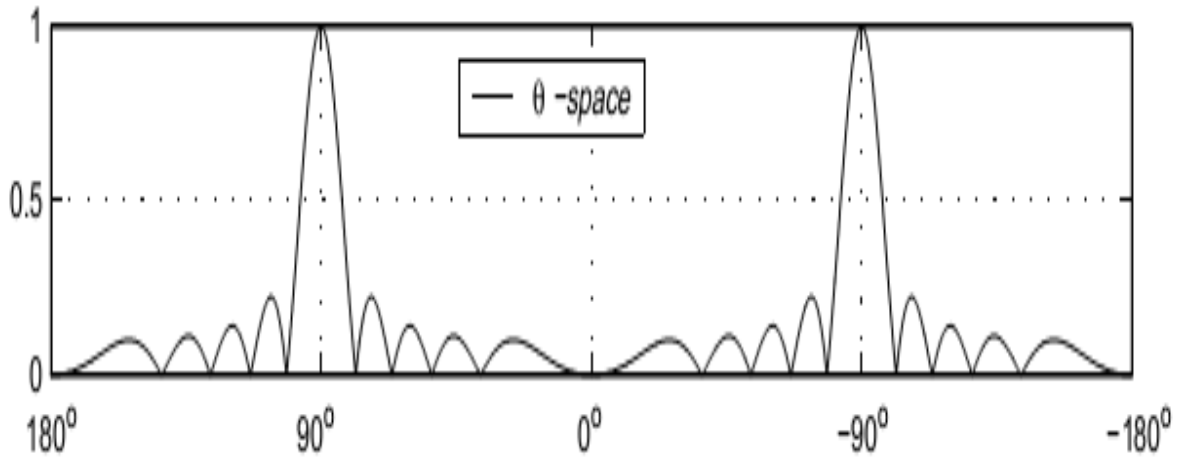
$$\Rightarrow B(\theta) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{\pi Nd}{\lambda}\sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \tag{11-2}$$

يسمى هذا التابع بعامل المصفوفة Array Factor. يظهر الشكل ٢-٤ الرسم القطبي لهذا التابع.



الشكل ٢-٤: الرسم القطبي لاستجابة هوائي مصفوفة خطية [٢١].

حيث نلاحظ أن قمة عامل المصفوفة موجهة نحو محور المصفوفة وبالتالي فإن المصفوفة قادرة على استقبال الإشارات الواردة إلى المصفوفة من محورها وإلغاء الإشارات الواردة من الاتجاهات الأخرى. يظهر الشكل ٢-٥ مثال استجابة المصفوفة كتابع لزاوية ورود الإشارة.



الشكل ٢-٥: مثال استجابة المصفوفة كتابع لزاوية ورود الإشارة [٢١].

لتوجيه استجابة المصفوفة باتجاه معين يمكن إعطاء أوزان عقدية تساوي لشعاع توجيه المصفوفة بهذا الاتجاه:

$$W = \frac{1}{N} V_o(\theta_s) \quad (12-2)$$

حيث أن θ_s هي زاوية المسح.

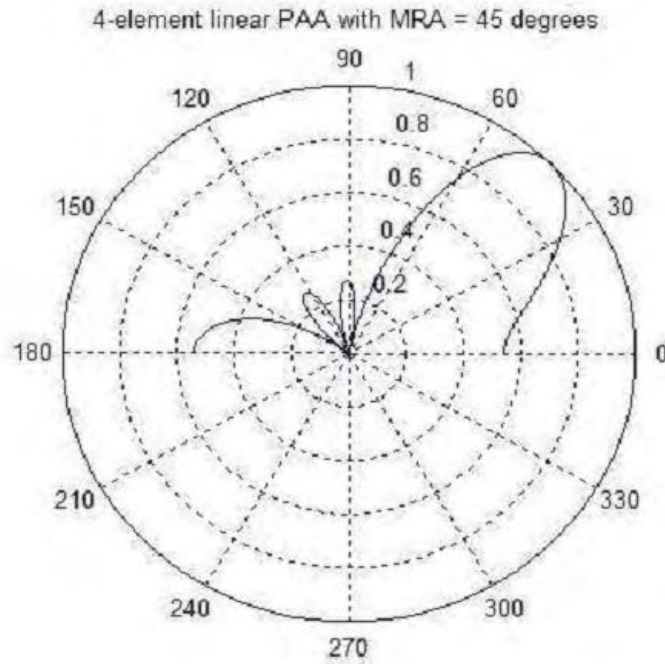
وبالتالي تكون استجابة المصفوفة:

$$B(\theta) = W^H V_\theta(\theta) = \frac{1}{N} V_\theta^H(\theta_s) V_\theta(\theta)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j(n-\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_s} e^{j(n-\frac{N-1}{2})\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta}$$
(13-2)

$$B(\theta) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{\pi N d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_s)\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_s)\right)}$$
(14-2)

نلاحظ من هذه المعادلة أن قمة عامل المصفوفة (استجابة المصفوفة) ستكون موجهة باتجاه زاوية ورود الإشارة إلى المصفوفة. يظهر الشكل ٦-٢ استجابة مصفوفة موجهة باتجاه 45° .



الشكل ٦-٢: استجابة مصفوفة موجهة باتجاه 45° [٢٢].

نلاحظ مما سبق أنه من خلال ضبط الأوزان العقدية يتم تشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي لهوائي المصفوفة الطورية بحيث يستقبل الإشارات الواردة من اتجاه محدد، لكن قد نحتاج في بعض التطبيقات لأن يتم حذف الإشارات الواردة من اتجاه محدد، لذلك سنناقش في الفقرة التالية كيفية تطبيق اصفار على استجابة هوائي المصفوفة الطورية.

٢-٢-٣: تطبيق أصفار على المخطط الإشعاعي

قد نحتاج في كثير من التطبيقات لأن يمتلك المخطط الإشعاعي صفر باتجاه معين، مثلاً لحذف إشارة تشويش واردة من اتجاه محدد.

كما لاحظنا سابقاً أنه يتم ضبط عملية تشكيل المخطط الإشعاعي من خلال قيم مطال وصفحة الأوزان العقدية لعناصر المصفوفة، فمثلاً إذا أردنا أن يمتلك المخطط الإشعاعي صفر باتجاه معين فإنه يجب اختيار الأوزان العقدية لتحقيق

$$B(\theta_i) = W^H V_\theta(\theta_i) = 0$$

تسمى هذه المعادلة بقيود التصفير (Null constraints)، وبالتالي يجب البحث عن الأوزان العقدية الأمثلية لتشكيل المخطط الإشعاعي المرغوب مع الأخذ بالاعتبار قيود التصفير، أي أنه بالنتيجة يجب الحصول على مخطط إشعاعي يمتلك قمة باتجاه مصدر الإشارة المرغوبة وأصفار باتجاه مصادر الإشارة غير المرغوبة.

هناك عدة طرق لتطبيق محددات الأصفار، سنطبق طريقة "خطأ التربيعات الأصغرية لتشكيل المخطط الإشعاعي مع تصفير" "Least Squares Error Pattern Synthesis with Nulls" [٢١-٢٤]. حيث ستصبح المسألة هنا هي إيجاد أوزان عقدية بأصغر تربيعات خطأ لتشكيل المخطط الإشعاعي المرغوب مع الأخذ بالاعتبار قيود التصفير. بفرض أن المخطط الإشعاعي المرغوب هو

$$B_d(\theta) = W_d^H V_\theta(\theta) \quad (15-2)$$

سنقارب هذا المخطط الإشعاعي مع مخطط إشعاعي طبقت عليه القيود السابقة، بفرض هذا المخطط الإشعاعي هو

$$B(\theta) = W_o^H V_\theta(\theta) \quad (16-2)$$

بالتالي سنسعى لتقليل تربيعات الخطأ بين المخطط الإشعاعي المرغوب والمخطط الإشعاعي الخاضع للقيود المذكورة:

$$\varepsilon = \int |B_d(\theta) - B(\theta)|^2 d\theta \quad (17-2)$$

بتعويض المعادلات السابقة وإجراء التكامل تصبح العلاقة

$$\varepsilon = \|W_d - W_o\|^2 \quad (18-2)$$

بفرض وجود عدد من المشوشات M_0 عندها ستكون القيود على المخطط الإشعاعي هي

$$W_o^H V_\theta(\theta_i) = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, M_0 \quad (19-2)$$

تسمى هذه القيود بالقيود من الدرجة صفر، وهي تشكل مصفوفة $N \times M_0$ من القيود

$$C = [V_\theta(\theta_1) : V_\theta(\theta_2) : \dots : V_\theta(\theta_{M_0})] \quad (20-2)$$

يتم الحصول على الأوزان العقدية الأمثلية التي تحقق المخطط الإشعاعي المرغوب مع الأخذ بالاعتبار قيود التصفير $W_o^H C = 0$ ، من خلال إيجاد خطأ التربيعات الأصغري للأوزان العقدية الخاضعة لقيود التصفير.

بالنتيجة يمكن التعبير عن الأوزان العقدية الأمثلية [٢٤-٢١] بالعلاقة:

$$\begin{aligned} W_o^H &= W_d^H - (W_d^H C [C^H C]^{-1}) C^H \\ &= W_d^H - a C^H \end{aligned} \quad (21-2)$$

باعتبار أن $a = W_d^H C [C^H C]^{-1}$ نجد أن الأوزان العقدية الأمثلية تساوي الأوزان العقدية المرغوبة مطروح منها مجموع موزن من مصفوفة القيود.

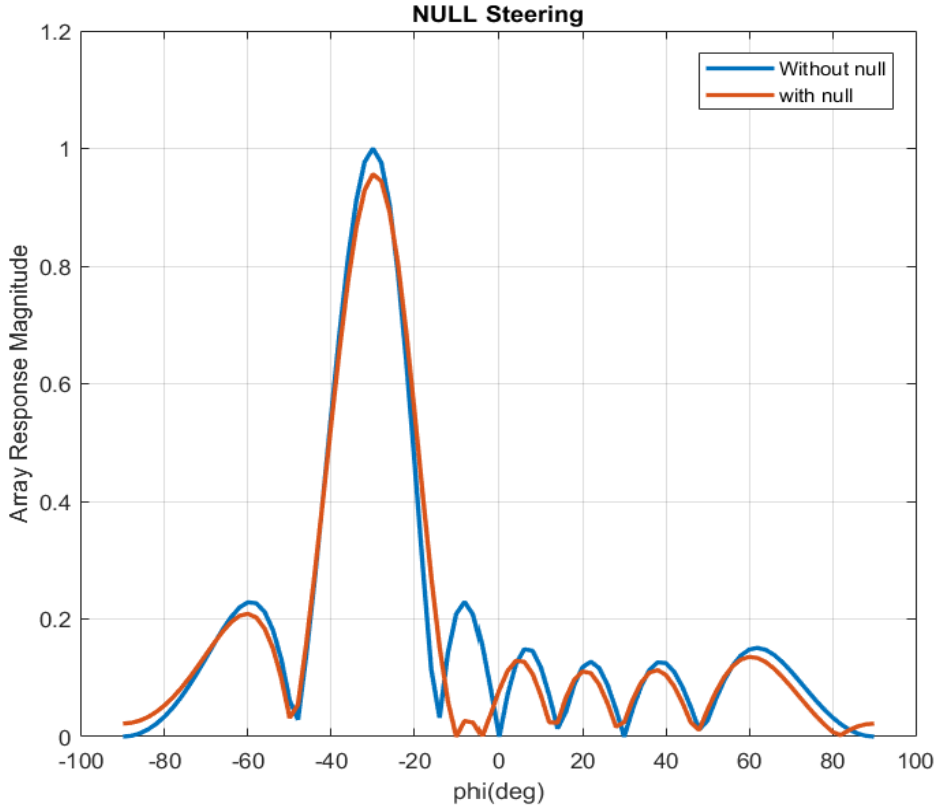
يتم الحصول على المخطط الإشعاعي باستخدام هذه الأوزان العقدية كما يلي:

$$\begin{aligned} B_o(\theta) &= W_o^H V_\theta(\theta) \\ &= [W_d^H - a C^H] V_\theta(\theta) \\ &= B_d(\theta) - a C^H V_\theta(\theta) \end{aligned} \quad (22-2)$$

يمكن أن نلاحظ أن الحد الثاني في المعادلة السابقة هو مجموع المخططات الإشعاعية التقليدية الموجهة باتجاه المشوشات، ويمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$B_o(\theta) = B_d(\theta) - \sum_{m=1}^{M_0} a_m B_c(\theta - \theta_m) \quad (23-2)$$

وبالتالي فإن المخطط الإشعاعي الناتج عبارة عن مخطط إشعاعي يملك قمة بالاتجاه المرغوب وأصفار باتجاه المشوشات. يظهر الشكل ٢-٧ استجابة مصفوفة طورية تملك قمة باتجاه $30^\circ -$ ، و صفر ربح باتجاه $5^\circ -$.



الشكل ٧-٢ تطبيق صفر على المخطط الإشعاعي لهوائي مصفوفة طورية.

٢-٢-٤: تأثير خطأ الطور على استجابة هوائي المصفوفة الطورية

حقق استخدام الهوائيات المصفوفية الطورية مرونة كبيرة في الملاحة والاستقبال لإشارة الطائرة، لكن أدى استخدام هذه المصفوفات في الملاحة إلى زيادة مصادر الضجيج التي تساهم في زيادة خطأ التوجيه والذي يؤثر بدوره على عملية الملاحة [٢٠][٢٨-٣٣]، حيث يؤثر خطأ الطور على التوافق الضروري لإيجاد استجابة المصفوفة، و بالتالي يجب أن يتركز البحث على تحليل مصادر الخطأ الموجودة في المصفوفات الطورية وطرق تعويضها لزيادة دقة التوجيه.

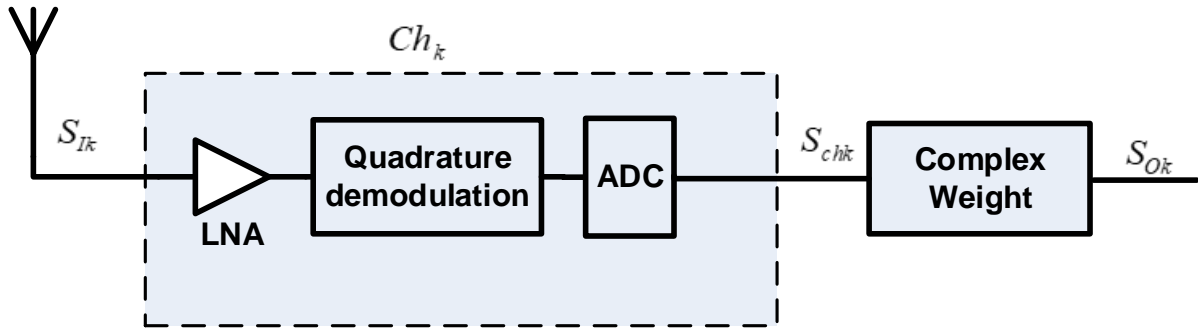
هناك عدة مصادر لخطأ الطور فبالإضافة إلى أن ضجيج المستقبل سيظهر كضجيج طور، فإن كل مكونات النظام تساهم بشكل مباشر أو غير مباشر بزيادة هذه الأخطاء [٢٨-٣٣].

يعتبر الهزاز المحلي المساهم الأساسي في أخطاء الطور، كما أن دارات التعديل وفك التعديل الترابعي تولد خطأ طور. إضافة إلى ذلك فإن انحراف توضع العناصر عن المواقع المصممة بأجزاء من طول الموجة ستقدم مصدر إضافي لخطأ الطور [٢٨][٣٠-٣١].

إن أغلب مصادر خطأ الطور عشوائية، ولا يمكن تعويضها باستخدام المعايير المسبقة للمصفوفة أو باستخدام تقنيات معالجة الإشارة التكيفية. وقد أجريت الكثير من الدراسات حول أخطاء الطور لتوصيف أداء المصفوفة بسبب هذه الأخطاء ولمساعدة مصممي المصفوفات في وضع حدود مقبولة للتسامح مع هذه الأنواع من الأخطاء [30-33].

لدراسة تأثير أخطاء الطور على أداء المصفوفة لا بد من تعديل معادلة استجابة المصفوفة بحيث تأخذ أخطاء الطور بالاعتبار.

سنقوم أولاً بإيجاد موديل (Model) الإشارة المستقبلية على أقينية المصفوفة بدلالة خطأ الطور، ليتم بعد ذلك إيجاد استجابة المصفوفة وفقاً لهذه الإشارة. يوضح الشكل (2-8) مسار الإشارة المستقبلية في قناة مفردة من مستقبل مصفوفة طورية.



الشكل 2-8: مسار الإشارة المستقبلية في قناة مفردة من مستقبل مصفوفة طورية.

كما ذكرنا سابقاً إن الإشارة المستقبلية على خرج كل هوائي في المصفوفة ستكون مزاحة عن الإشارة المستقبلية على هوائي القناة المرجعية بصفحة تتناسب مع الموقع الهندسي للهوائيات و زاوية ورود الإشارة، وهو ما أطلق عليه بالصفحة الهندسية للقناة. بالتالي يمكن كتابة الإشارة على خرج الهوائي (دخل المضخم منخفض الضجيج LNA) للقناة k ، بشكلها العنقدي كما في المعادلة التالية:

$$S_{Ik} = S_{ref} e^{j\phi_{gk}} \quad (24-2)$$

لغرض التحليل، فإننا سنعتبر عن خطأ الطور الكلي الناتج عن مصادر الضجيج المختلفة كمتحول عشوائي والذي سيظهر في الإشارة على خرج القناة كإزاحة عشوائية في الطور. وبالتالي فإن طور الإشارة المستقبلية على خرج كل قناة في المصفوفة سيكون مزاحاً بمقدار الصفحة الهندسية لهذه القناة مضافاً لها الإزاحة العشوائية الناتجة من خطأ الطور. وبالتالي فإنه سيتم تعديل عبارة طور الإشارة المستقبلية على كل قناة في المعادلة (2-3) لتصبح:

$$\phi_k = \phi_{ref} + \phi_{gk} + \varepsilon_k \quad (25-2)$$

حيث أن ε_k تمثل خطأ الطور الكلي لكل قناة الناتج عن مكونات القناة الممثلة في البلوك "Ch_k" من الشكل (٨-٢).

وبالتالي ستصبح الإشارة على خرج كل قناة وقبل الضرب بالوزن العقدي في الشكل (٨-٢):

$$S_{ch_k} = S_{ref} e^{j(\phi_{gk} + \varepsilon_k)} \quad (26-2)$$

بالنتيجة فإن شعاع توجيه المصفوفة في (7-2) سيصبح:

$$V_\theta(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j(\phi_{g0} + \varepsilon_0)} \\ e^{j(\phi_{g1} + \varepsilon_1)} \\ \vdots \\ e^{j(\phi_{gN-1} + \varepsilon_{N-1})} \end{bmatrix} \quad (27-2)$$

بتعويض (8-2) و(27-2) في (9-2) ستصبح استجابة المصفوفة بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار:

$$B(\theta) = W^H V_\theta(\theta) = \sum_{k=0}^{N-1} w_k^* e^{j(\phi_{gk} + \varepsilon_k)} \quad (28-2)$$

عند توجيه المصفوفة باتجاه ورود الإشارة فإنه سيتم تعويض إزاحة الطور الناتج عن الصفحة الهندسية في كل قناة باعتبار الوزن العقدي $w_k^* = e^{-j\phi_{gk}}$ وبالتالي ستصبح استجابة المصفوفة:

$$B(\theta) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\varepsilon_k} \quad (29-2)$$

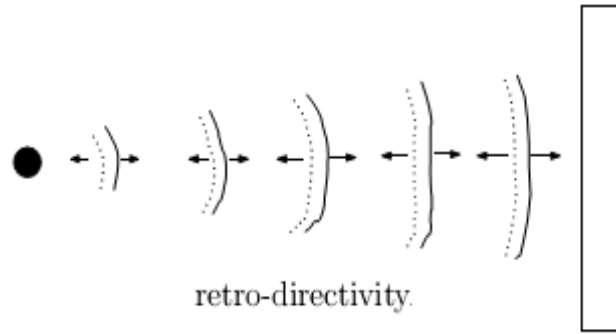
نلاحظ هنا أنه نتيجة عدم تعويض الإزاحة في الصفحة الناتجة عن خطأ الطور فإن استجابة المصفوفة قد أصبحت عبارة عن مقدار عشوائي تابع لخطأ الطور.

٣-٢: هوائي مصفوفة التوجيه العكسي (RDA) Retrodirective Array Antenna

كما شرحنا سابقاً فقد قدمت هوائيات المصفوفة الطورية إمكانية المسح الإلكتروني للحزمة. لكن على أي حال فإنه من أجل توجيه الحزمة باتجاه الهدف فإن موقع الهدف المقصود يجب أن يكون معروفاً وهذا يتطلب استخدام طرق لتحديد اتجاه الهدف إما عن طريق المسح الإلكتروني للحزمة وهذا يستغرق زمن أو باستخدام خوارزميات تحديد اتجاه وهذا يزيد تعقيد النظام، ومن ثم توجيه الحزمة باتجاه الهدف. الحل لذلك هو استخدام مصفوفة بإمكانية التوجيه الذاتي (self-steering array).

يعد الهوائي الذكي (smart antenna) أحد أنماط الهوائيات القادر على التوجيه الذاتي. حيث يقوم الهوائي الذكي بتحديد الموقع من خلال تحليل الإشارة الواردة من الهدف، ومن ثم تقوم خوارزميات معالجة الإشارة الرقمية بتحديد زاوية الهدف، ليتم بعد ذلك تشكيل الحزمة باتجاه الهدف. الجانب السيئ لهذه الخوارزميات هي أن عمليات المعالجة تتطلب كمية كبيرة من طاقة المعالجة والتي يمكن ان تزيد من تعقيد و تكلفة النظام [٢١-٢٧]. لذلك تعتبر الهوائيات الذكية غير مناسبة للأنظمة منخفضة التكلفة حيث تكون عمليات تشكيل الحزمة المعقدة غير مرغوبة. يعتبر هوائي مصفوفة التوجيه العكسي بديل عن الهوائي الذكي [١٨]. تمتلك هذه الهوائيات المصفوفية خاصية فريدة وهي أنه عند تحريضها، فإن المصفوفة ستوجه بشكل أوتوماتيكي، أو تعيد توجيه الحزمة باتجاه المحرض. بشكل مختلف عن الهوائي الذكي الذي يستخدم خوارزميات معالجة إشارة رقمية (DSP algorithms) كما ذكرنا سابقا. وبالتالي يمكن القول أن مصفوفة التوجيه العكسي تمتلك القدرة على إعادة إرسال الإشارة الواردة إلى الاتجاه الذي وردت منه بشكل أوتوماتيكي. وبدون أي معرفة مسبقة باتجاه ورود الإشارة.

تعتبر تقنية مرافق الصفحة هي التقنية الأساسية في هوائيات التوجيه العكسي، حيث أن مبدأ هذه التقنية قد أخذ من تقنيات انتشار الضوء [٣٤-٣٥]، حيث نلاحظ أنه إذا تم تأمين مرافق الصفحة للشعاع الضوئي الوارد فإنه سينعكس بنفس الاتجاه الذي ورد منه. يبين الشكل ٩-٢ مبدأ التوجيه العكسي.



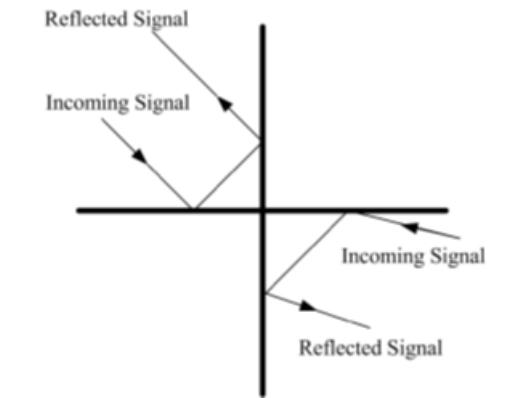
الشكل ٩-٢: مبدأ التوجيه العكسي

فيمايلي سنتعرف على طرق تحقيق التوجيه العكسي في الهوائيات المصفوفية.

٢-٣-١: طرق تحقيق التوجيه العكسي

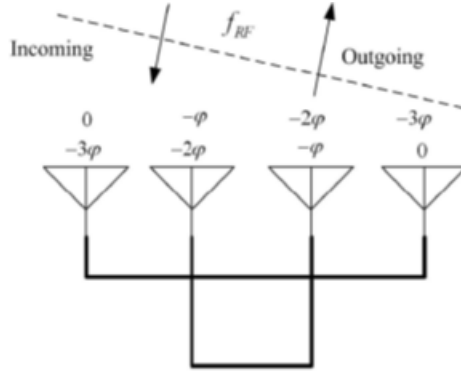
يمكن استخدام عناصر غير فعالة لتحقيق التوجيه العكسي، بهذه الحالة فإنه سيتم إعادة إرسال الإشارة المستقبلية بنفس المواصفات ودون إضافة أي ربح إضافي للإشارة المعاد إرسالها. أو يمكن استخدام عناصر فعالة لتحقيق التوجيه العكسي، بهذه الحالة فإنه يمكن إضافة ربح إضافي للإشارة المعاد إرسالها كما يمكن تعديلها بمعطيات جديدة [٣٤-٣٩]. يمكن تحقيق مرافق الصفحة وبالتالي التوجيه العكسي بعدة طرق، مثل:

١. العاكس الزاوي (Corner Reflector): إن العاكس الزاوي 90° هو أبسط مثال على جهاز توجيه عكسي. كما هو واضح في الشكل ٢-١٠، يتألف العاكس الزاوي من صفيحتين معدنيتين متعامدتين، تعكس الإشارة الواردة على الوجهين بحيث يتم توجيه الإشارة المنعكسة بالاتجاه الذي وردت منه. وهي مناسبة من أجل تطبيقات الأهداف الرادارية، حيث أنها تمتلك سطح مقطع راداري كبير بالمقارنة مع حجمها الفيزيائي. لكن مشكلة الحجم وصعوبة مكاملتها مع الأنظمة الإلكترونية جعلت العاكس الزاوي غير مناسب للاتصالات اللاسلكية.



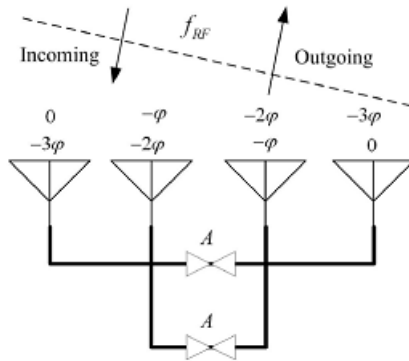
الشكل ٢-١٠: العاكس الزاوي

٢. مصفوفات (Van Atta): والتي تتألف من أزواج من عناصر الهوائيات متساوية المسافة عن مركز المصفوفة وذات خطوط نقل متساوية الطول أو مختلفة بمقدار عدد صحيح من أطوال الموجة. يظهر الشكل ٢-١١ مصفوفة "فان أتا" بنمط غير فعال، نلاحظ أنه تم ترتيب عناصر المصفوفة بطريقة ينعكس فيها تدرج الإزاحة بالطور للإشارة المعاد إرسالها مما ينتج عنه إعادة إرسال الإشارة إلى اتجاه المصدر الذي وردت منه.



الشكل ٢-١١: مصفوفة "فان أتا" بنمط غير فعال.

نلاحظ من الشكل ١١-٢ أن كل هوائي يعمل كمرسل ومستقبل، وبالتالي فإن الإشارة المستقبلية من قبل أي هوائي سيعاد إرسالها من قبل زوج الهوائي المرافق له مما سيتسبب بقلب ترتيب الإشعاع بالنسبة لمركز المصفوفة. كذلك فإن مصفوفات "فان أتا" يمكن أن تصمم بنمط فعال كما في الشكل ١٢-٢.



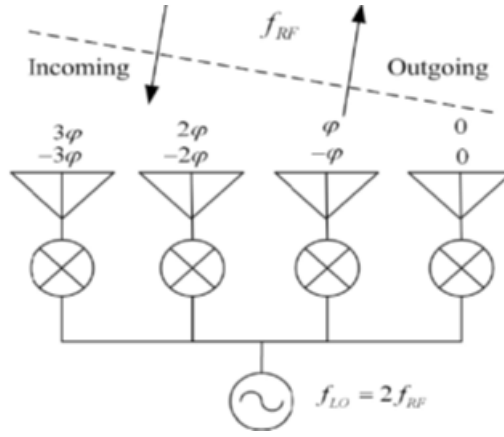
الشكل ٢-١٢: مصفوفة "فان أتا" بنمط فعال.

حيث يتم استخدام مضخمات في خطوط الإرسال لتعزيز الإشارة المرسلة.

تعتبر هذه المصفوفة هي أبسط أشكال مصفوفات التوجيه العكسي، لكن حجم المصفوفة محدود نتيجة تعقيد شبكة خطوط النقل بين أزواج عناصر الهوائيات من أجل المصفوفات الكبيرة.

٣. مصفوفة مرافق الصفحة (phase conjugation array): تحقق مصفوفة مرافق الصفحة أو مصفوفة بون (Pon array) التوجيه العكسي باستخدام مازج الهيترودين. كما هو واضح من الشكل ١٣-٢. تعتمد هذه الطريقة أيضا في تحقيق التوجيه العكسي على عكس تدرج الصفحة للإشارة الواردة كما هو الحال في مصفوفة "فان أتا" ولكن هنا سيتم

تحقيق عكس الصفحة عند كل عنصر هوائي في المصفوفة بدلا من الاعتماد على خط تأخير واصل إلى العنصر المقابل في مصفوفة "فان اتا"، حيث سيتم مزج الإشارة الواردة من كل هوائي مع إشارة هزاز محلي، تردده يساوي ضعف التردد الراديوي للإشارة الواردة، فإن إشارة التردد الوسيط الناتجة على خرج المازج ستكون نسخة من الإشارة الراديوية المستقبلية ولكن بصفحة معكوسة. وبالتالي فإن الإشارة المرسله على عناصر هوائيات المصفوفة ستمتلك عكس تدرج الصفحة للإشارة الواردة، بذلك يتم إعادة توجيه الإشارة بنفس الاتجاه الذي وردت منه.



الشكل ٢-١٣: مصفوفة مرافق الصفحة

يمكن التعبير عن هذه العملية رياضيا كما يلي:

باعتبار تردد الهزاز المحلي يساوي ضعف التردد الراديوي للإشارة المستقبلية $w_{LO} = 2w_{RF}$ وأن الإشارة الواردة تمتلك صفحة ϕ , فإن الإشارة على خرج المازج

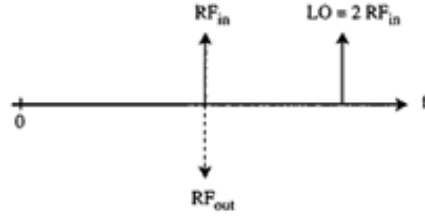
$$V = V_{LO} \cos(w_{LO}t) V_{RF} \cos(w_{RF}t + \phi)$$

$$V = \frac{1}{2} V_{RF} V_{LO} [\cos(w_{RF}t - \phi) + \cos(3w_{RF}t + \phi)] \quad (30-2)$$

وبالتالي تكون الإشارة على خرج المرشح تملك نفس تردد الإشارة الراديوية المستقبلية ولكن بصفحة معكوسة (وهي عادة تسمى بإشارة التردد الوسيط IF):

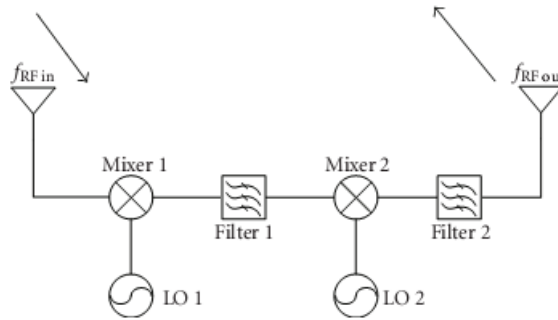
$$V_{IF} = V_0 \cos(w_{RF}t - \phi) \quad (31-2)$$

حيث V_0 يمثل مطال الإشارة على خرج المرشح. يظهر ٢-١٤ تمثيل الإشارات في كل مرحلة:



الشكل ٢-١٤: تمثيل الإشارات في مصفوفة مرافق الصفحة.

من ميزات هذه الطريقة أنه يمكن تعديل الإشارة الواردة لتحميلها المعطيات المراد إرسالها، لكن من مساوئ هذه الطريقة هي صعوبة تأمين هزاز محلي بضعف التردد الراديوي للإشارة المستقبلية. لقد تم تجاوز هذه المشكلة في بعض التطبيقات باستخدام تقنية مازج الهيترودين في مجال التردد الوسيط (IF band)، في هذه الطريقة يتم تخفيض الإشارة المستقبلية إلى التردد الوسيط باستخدام هزاز محلي أعلى من التردد الراديوي، و يتم توليد مرافق الصفحة من إشارة الفرق على خرج المازج الأول، يتم استخدام هزاز محلي ثاني لرفع إشارة مرافق الصفحة إلى التردد الراديوي، حيث يتم أخذ إشارة الجمع على خرج المازج الثاني للحصول على الإشارة بنفس التردد الراديوي وبطور معكوس ليتم إعادة إرسالها، الشكل (٢-١٥) يوضح توليد مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط.



الشكل ٢-١٥: مصفوفة مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط

يتم الحصول على الإشارات على خرج المازج الأول كما يلي.

$$V = V_{LO1} \cos(\omega_{LO1} t) V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \phi) \quad (32-2)$$

$$V = \frac{1}{2} V_{RF} V_{LO1} [\cos(w_{IF}t - \phi) + \cos((w_{LO1} + w_{RF})t + \phi)]$$

بالتالي بأخذ إشارة الفرق على خرج مرشح تمرير حزمة حول التردد الوسيط، يتم الحصول على مرافق الصفحة، حيث تكون الإشارة على خرج المرشح:

$$V_{O_IF} = V_{IF} \cos(w_{IF}t - \phi) \quad (33-2)$$

من ثم سيتم رفع هذه الإشارة إلى التردد الراديوي بواسطة المازج الثاني، حيث تكون الإشارات على خرج المازج الثاني:

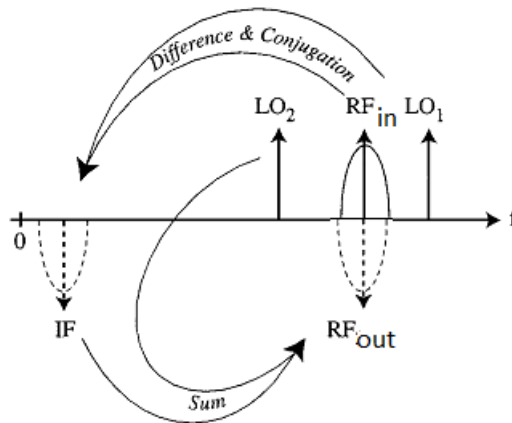
$$V = V_{LO2} \cos(w_{LO1}t) V_{IF} \cos(w_{IF}t - \phi)$$

$$V = \frac{1}{2} V_{LO2} V_{IF} [\cos(w_{RF}t - \phi) + \cos((w_{LO2} - w_{IF})t + \phi)] \quad (34-2)$$

بأخذ إشارة الجمع على خرج مرشح تمرير حزمة حول التردد الراديوي، يتم الحصول على إشارة تملك نفس التردد الراديوي ولكن بصفحة معكوسة، حيث ستكون الإشارة على خرج المرشح:

$$V_{O_RF} = V_O \cos(w_{RF}t - \phi) \quad (35-2)$$

يظهر الشكل ١٦-٢ تمثيل الإشارات في كل مرحلة:



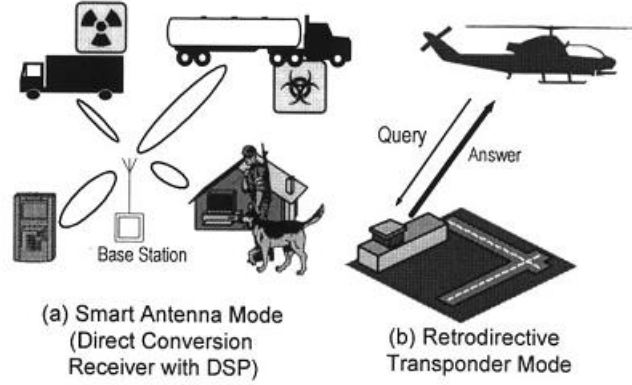
الشكل ١٦-٢: تمثيل الإشارات في مصفوفة مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط.

تعتبر هذه الطريقة هي الأكثر قابلية للتطبيق من أجل تحقيق التوجيه العكسي (retrodirectivity) دون الحاجة إلى مزيحات الصفحة المستخدمة في المصفوفات الطورية، ودون الحاجة إلى عمليات معالجة إشارة رقمية معقدة المستخدمة في الهوائيات الذكية.

بعد دراسة طرق تحقيق التوجيه العكسي، يمكن ملاحظة ان الميزة الفريدة لمصفوفة التوجيه العكسي في إمكانية إعادة إرسال الإشارة الواردة باتجاه مصدر الإشارة (الهدف) دون أي معرفة مسبقة باتجاه الهدف، كان على حساب أن هذه المصفوفة لا تملك توجيهية في الاستقبال (أي أنه يتم استقبال الإشارة الواردة بربح منخفض)، سيتم توضيح هذه الفكرة أكثر عند الحديث عن تطبيقات مصفوفات التوجيه العكسي في القسم الأخير من هذا الفصل. كما سيتم في الفصل التالي خلال هذه الأطروحة البحث في طرق الاستفادة من تقنيات مرافق الصفحة (phase conjugation) المستخدمة في مصفوفة التوجيه العكسي لبناء مصفوفة ملاحقة مع توجيهية عالية في الاستقبال لتكون مناسبة لتطبيقات الطيران المسير حيث الوصلة الهابطة هي المهمة.

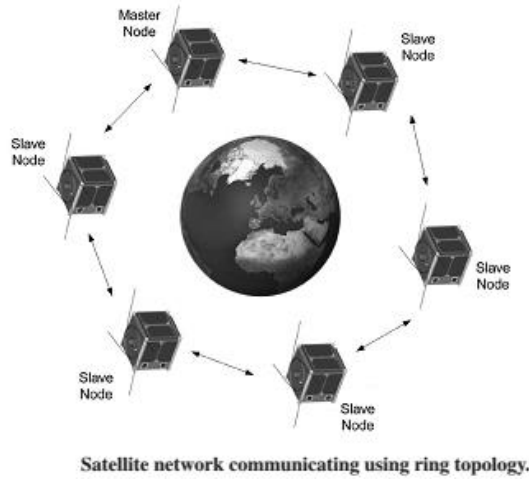
٢-٣-٢: بعض تطبيقات مصفوفة التوجيه العكسي

❖ **نظام تحصيل معطيات [٤٠-٤٣]:** يمتلك هذا النظام المبين في الشكل ١٧-٢ هوائي مصفوفة متعدد الوظائف قابل لإعادة التهيئة بحيث يعمل في نمط الاستقبال بتقنية الهوائي الذكي (الشكل (١٧-٢) a)، بينما يعمل في نمط الإرسال بتقنية التوجيه العكسي (الشكل (٢) -b). تتم عملية تغيير نمط العمل فقط بتغيير تردد الهزاز المحلي. مثلاً عند العمل بنمط تجميع المعطيات من الحساسات الموزعة فإنه سيعمل كنظام هوائي ذكي حيث يقوم باستقبال المعطيات المرسله لاسلكياً من حساسات مجاورة و تخزينها في وحدات تخزين ضمن النظام، ومن ثم عند استقبال إشارة التحريض المرسله من طائرة تحصيل المعطيات يتم تهيئة النظام ليعمل في نمط الإرسال من خلال تحويل الهوائي المصفوفي إلى مصفوفة توجيه عكسي (الشكل (١٧-٢) b) ويرسل المعطيات المخزنة باتجاه المحرض (طائرة تحصيل المعطيات) دون الحاجة لمعرفة مكان الطائرة، كما أنه لا حاجة لثبات الطائرة في موقعها أثناء تحصيل المعطيات.



الشكل ٢-١٧: نظام تحصيل معطيات باستخدام مصفوفة توجيه عكسي [٤٣].

❖ **القمر الصناعي المكعب** [٤٤-٤٦]: قامت ناسا بالتعاون مع جامعة هواي بتصنيع القمر المكعب والذي هو عبارة عن عدة أقمار صناعية صغيرة بأبعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ بوزن 1 kg بدلا من استخدام قمر واحد كبير يتم التخاطب فيما بينها بموجب تقنية التوجيه العكسي, حيث أنه لا ضرورة لضبط مواقع الأقمار فيما بينها. يظهر الشكل ٢-١٨ توضع الأقمار الصناعية فيما بينها.



الشكل ٢-١٨: استخدام تقنية التوجيه العكسي لربط الأقمار الصناعية فيما بينها [٤٤].

نلاحظ مما سبق أنه تم استخدام مصفوفة التوجيه العكسي في هذه الأنظمة لتأمين وصلة صاعدة ذات ربح عالٍ بينما الوصلة الهابطة ذات ربحٍ منخفضٍ نتيجة عدم وجود توجيهية في حزمة الاستقبال لهذه المصفوفة [٤١-٤٢].

تم في الجزء التالي من هذا البحث الدمج بين المصفوفة الطورية ومصفوفة التوجيه العكسي والاستفادة من ميزات كل منهما لبناء نظام ملاحة يتمتع بميزة التوجيه الذاتي مع توجيهية عالية في الاستقبال مع إمكانية تطبيق أصفار لحذف الإشارات غير المرغوبة.

يعتبر النجاح باستخدام تقنية مرافق الصفحة لأتمتة عملية التقاط وملاحقة مصدر الإشارة لاستقبال الإشارة المرسله منه بربح عالٍ، تطويراً مهماً على استخدام الهوائيات المصفوفية لملاحقة الطيران المسير من حيث دقة وسرعة الملاحقة ووثوقية الوصلة مع الطائرة.

الفصل الثالث

مصفوفة الملاحقة المقترحة

نتج عن هذا البحث تقديم بنية مقترحة لمصفوفة ملاحقة، تعتمد هذه البنية المقترحة على المزج بين المصفوفة الطورية ومصفوفة التوجيه العكسي، وسميت هذه المصفوفة باسم **المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي**. بحيث تكون هذه المصفوفة قادرة على:

- حل المشاكل الناتجة عن الضياع في الربح الناتج عن خطأ التوجيه لحزمة الاستقبال في المصفوفات الطورية.
- تقليل التكلفة الحسابية لنظام الملاحقة نتيجة استخدام خوارزميات تحديد الاتجاه والملاحقة.
- وتجنب المشكلات الناتجة عن تأثير الضجيج وأخطاء الطور الناتجة عن عناصر المصفوفة.

الفكرة الأساسية هي إيجاد الصفحة الهندسية لكل قناة من قنوات المصفوفة بشكل أوتوماتيكي ودون الحاجة إلى الخوارزميات المعقدة المستخدمة في الهوائيات الذكية، وإيجاد آلية لتعويض أخطاء الطور الناتجة عن مصادر الضجيج المختلفة في المصفوفة لتحسين دقة التوجيه وتقليل ضياع الربح، من خلال استخدام تقنية مرافق الصفحة بالإضافة إلى ضرب الأشعة العقدية لتوليد الصفحة الهندسية لكل قناة من قنوات المصفوفة. تم تحقيق تقنية مرافق الصفحة باستخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط لتوليد نسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة، ومن ثم أخذ الأشعة العقدية الممثلة لهذه الإشارات وضربها مع الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية. إن صفحة الشعاع العقدي الناتج من كل عملية ضرب تساوي مرافق الصفحة الهندسية للقناة المقابلة. بالتالي بتحديث صفحة الوزن العقدي المرافق لكل قناة بهذه الصفحة الناتجة، سيتم تشكيل المخطط الإشعاعي باتجاه الطائرة دون الحاجة لاستخدام خوارزمية تحديد اتجاه. كذلك فإنه عند حركة الطائرة ضمن حقل الرؤية فإن صفحة الشعاع العقدي الناتج من عملية ضرب الأشعة العقدية ستتغير وفق تغير الموقع الزاوي للطائرة وبالتالي سيتم بشكل آلي توجيه المخطط الإشعاعي باتجاه الطائرة ودون الحاجة لاستخدام خوارزمية ملاحقة.

دمجت هذه الطريقة المقترحة خوارزمية تحديد الاتجاه وخوارزمية تشكيل المخطط الإشعاعي وخوارزمية الملاحقة بخوارزمية واحدة، أي نستطيع القول ثلاث خوارزميات بواحدة. كما أنه نتيجة التشكيل الآلي للمخطط الإشعاعي في الاستقبال باتجاه الموقع الزاوي للطائرة، فإن الطائرة ستبقى على قمة استجابة المصفوفة (قمة الحزمة الرئيسية) أي أنه يتم استقبال أعظم استطاعة مرسلة من الطائرة بشكل دائم وبالتالي تأمين وصلة هابطة ذات ربح عالٍ بشكل دائم.

تم في الفقرة الأولى من هذا الفصل الحديث بالتفصيل عن المصفوفة الهجينة طورية/توجيه-عكسي المقترحة من خلال تقديم المخطط الصندوقي وشرح مكوناته، ومن ثم إيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة هذه المصفوفة و استخراج ميزات هذه الاستجابة و إضافة إمكانية تطبيق الأصفار على استجابة المصفوفة. وأخيراً في هذه الفقرة تم تقييم أثر استخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط لتوليد مرافق الصفحة على تعقيد وتكلفة النظام.

في الفقرة الثانية تم طرح نسخة محسنة من المصفوفة الهجينة بحيث تكون قادرة على توليد مرافق الصفحة في المجال القاعدي (base band) وبالتالي إلغاء الحاجة إلى مرحلة التردد الوسيط، من ثم تقديم المخطط الصندوقي وشرح مكوناته وتوضيح التحسين الذي قدمته النسخة المحسنة.

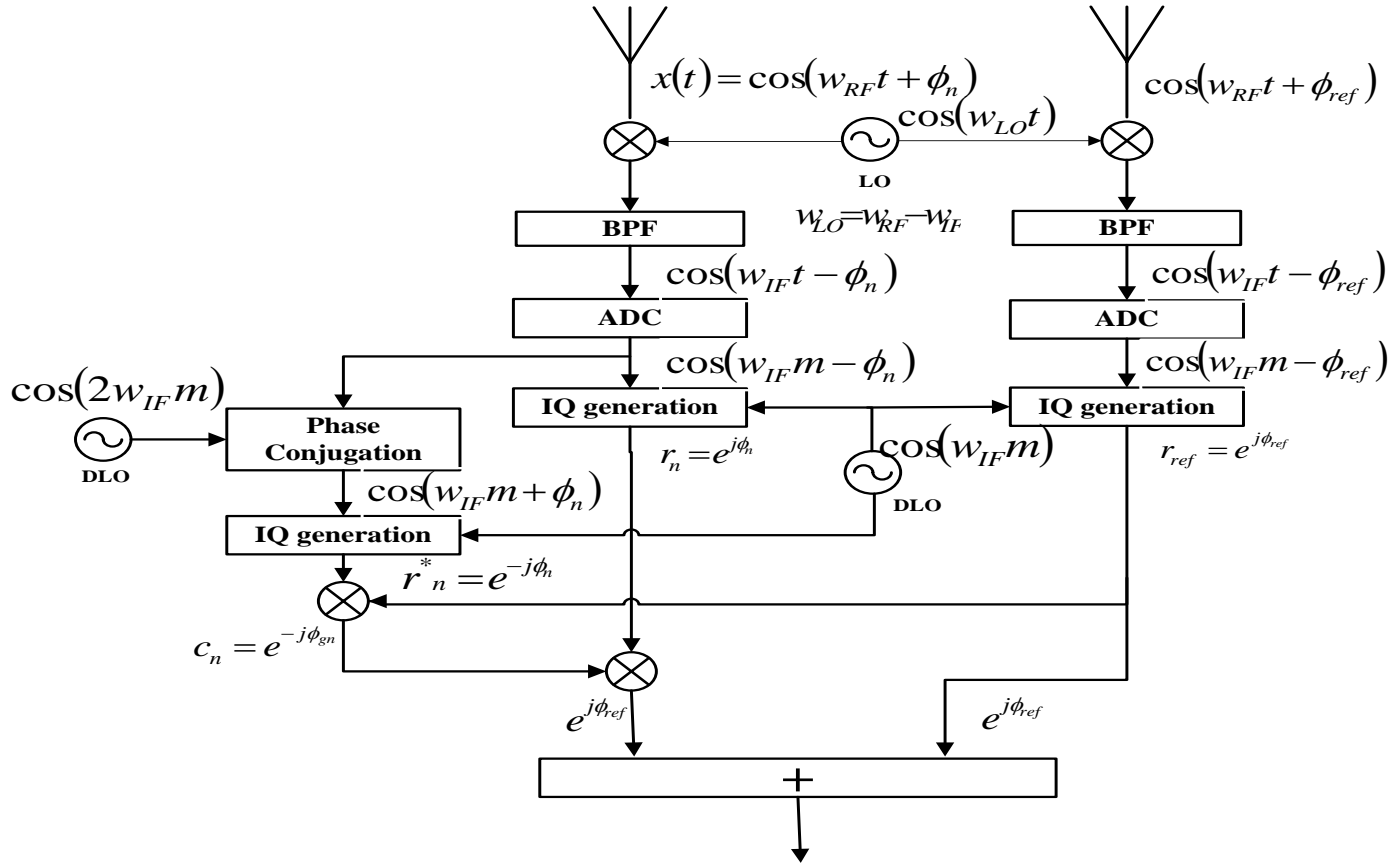
في الفقرة الثالثة تم دراسة تأثير أخطاء الطور على أداء المصفوفة المقترحة من خلال إيجاد استجابة المصفوفة بوجود أخطاء الطور لإظهار قدرة المصفوفة على تقليل تأثير أخطاء الطور.

٣-١: المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي

تعتمد هذه المصفوفة المقترحة على المزج بين المصفوفة الطورية ومصفوفة التوجيه العكسي للاستفادة من ميزات كل منهما وتلافي السلبيات الناتجة من استخدام أي منهما بشكل منفصل. إن المساهمة الأساسية لهذا البحث هي النجاح باستخدام تقنية مرافق الصفحة المستخدمة في مصفوفات التوجيه العكسي لأتمتة عملية تحديد الاتجاه و الملاحقة لمصدر الإشارة (الطائرة)، من أجل استقبال الإشارة المرسلة منه بربح عالٍ والذي يعتبر تطويراً مهماً على استخدام الهوائيات المصفوفية لملاحقة الطيران المسير من حيث دقة وسرعة الملاحقة ووثوقية الوصلة مع الطائرة.

٣-١-١: المخطط الصندوقي

يظهر الشكل ٣-١ المخطط الصندوقي لقناتين في المصفوفة المقترحة.



الشكل ٣-١: المخطط الصندوقي لقناتين في مصفوفة الملاحظة المقترحة

نتيجة استخدام فك التعديل الترابعي (quadrature demodulator) في المستقبل، فإنه يمكن تمثيل الإشارات المستقبلية على قنوات المصفوفة بشكل عقدي. حيث أن كل قناة تملك مستقبل منفصل يتم من خلاله تحويل الإشارة إلى مجال التردد الوسيط ومن ثم إلى المجال الرقمي ليتم بعد ذلك توليد المركبات المتعامدة (In-phase and quadrature (IQ) components).

بأخذ الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية تكون الإشارات على خرج مفكك التعديل الترابعي:

$$\begin{aligned} I_{ref} &= \cos(\phi_{ref}) \\ Q_{ref} &= \sin(\phi_{ref}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

وبالتالي يكون التمثيل العقدي للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية

$$\begin{aligned} r_{ref} = S &= I_{ref} + jQ_{ref} \\ &= e^{j\phi_{ref}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

أما بالنسبة للإشارة المستقبلية على القنوات الأخرى يمكن أن نلاحظ من المخطط الصندوقي أنه تم إضافة تركيبية إضافية لتوليد نسخة مرافق الصفحة للإشارة المستقبلية على كل قناة، لذلك تم استخدام وحدتي مفكك تعديل ترابيقي في كل قناة، واحدة لتوليد مركبات IQ للإشارة المستقبلية والأخرى لتوليد مركبات IQ لنسخة مرافق الصفحة لهذه الإشارة. وبالتالي فإن الإشارات على خرج مفكك التعديل الترابيقي الأول لكل قناة:

$$\begin{aligned} I_n &= \cos(\phi_n) \\ Q_n &= \sin(\phi_n) \end{aligned} \quad (3-3)$$

و التمثيل العقدي لهذه الإشارة:

$$\begin{aligned} r_n &= I_n + jQ_n \\ &= e^{j\phi_n} \end{aligned} \quad (4-3)$$

حيث أن ϕ_n هي طور الإشارة المستقبلية على قنوات المصفوفة وهي تكون كما ذكرنا سابقاً مزاحة عن طور الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية بمقدار الصفحة الهندسية لهذه القناة $\phi_n = \phi_{ref} + \phi_{g_n}$ حيث أن ϕ_{g_n} تمثل الصفحة الهندسية للقناة.

يمكن كتابة هذه الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية ضمن مصفوفة (Matrix) كما يلي

$$R = [e^{j\phi_{ref}} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g1})} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g2})} \dots e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g_{N-1}})}] \quad (5-3)$$

بالنسبة لنسخة مرافق الصفحة للإشارات المستقبلية على قنوات المصفوفة، يمكن أن نلاحظ من المخطط الصندوقي أنه تم استخدام تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط لتوليد نسخة مرافق الصفحة ، حيث تم استخدام هزاز محلي رقمي إضافي بتردد يساوي ضعف التردد الوسيط المستخدم بحيث تكون الإشارة على الخرج هي إشارة لها نفس التردد الوسيط للإشارة المستقبلية على القناة وبطور معكوس. يمكن التعبير عن هذه العملية بشكل رياضي كما يلي

$$w_{DLO'} = 2w_{IF} \quad (6-3)$$

$$V_o = \cos(w_{DLO'}m) \cos(w_{IF}m - \phi_n)$$

$$V_o = \frac{1}{2} [\cos(w_{IF}m + \phi_n) + \cos(3w_{IF}m - \phi_n)] \quad (7-3)$$

حيث أن w_{DLO} تمثل تردد الهزاز الرقمي الإضافي وهو يساوي ضعف تردد الهزاز الرقمي الأساسي، و V_0 تمثل الإشارة على خرج المازج وهي تملك مركبتين تردديتين الأولى بتردد يساوي التردد الوسيط و الثانية بثلاث أضعاف التردد الوسيط. وبالتالي تكون الإشارة على خرج مرشح تمرير الحزمة

$$V_0 = \cos(w_{IF}m + \phi_n) \quad (8-3)$$

وهي نفس الإشارة على دخل المازج ولكن بصفحة معكوسة. المسألة هنا، هي أننا لن نقوم بإعادة إرسال الإشارة كما هو الحال في مصفوفات التوجيه العكسي ولكن سنستخدم هذه الصفحة المعكوسة لإيجاد الصفحة الهندسية لهذه القناة واستخدامها لتحسين التوجيهية في حزمة الاستقبال.

وبالتالي فإن الإشارات على خرج مفكك التعديل الترابعي الثاني لكل قناة:

$$\begin{aligned} I_n' &= \cos(\phi_n) = I_n \\ Q_n' &= -\sin(\phi_n) = -Q_n \end{aligned} \quad (9-3)$$

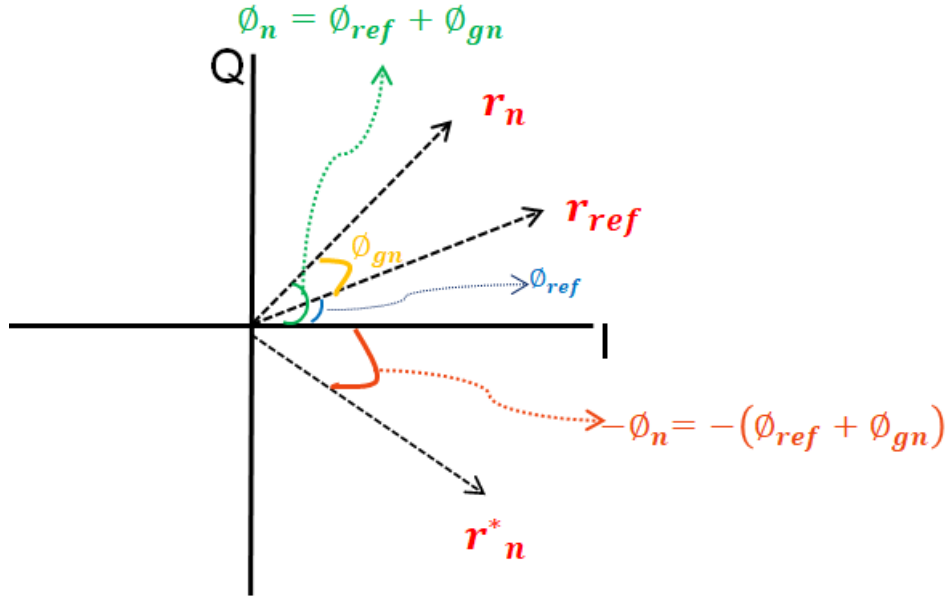
و التمثيل العقدي لهذه الإشارة:

$$\begin{aligned} r_n^* &= I_n' + jQ_n' \\ &= I_n - jQ_n = e^{-j\phi_n} \end{aligned} \quad (10-3)$$

يمكن كتابة هذه الأشعة العقدية لنسخة مرافق الصفحة للإشارات المستقبلية ضمن مصفوفة (Matrix) كمايلي:

$$R^* = \left[e^{-j\phi_{ref}} \quad e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g1})} \quad e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g2})} \quad \dots \quad e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g_{N-1}})} \right] \quad (11-3)$$

يظهر الشكل ٣-٢ تمثيل الأشعة العقدية للإشارات السابقة.



الشكل ٣-٢: تمثيل الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية.

بعد توليد نسخة مرافق الصفحة للإشارة المستقبلية في كل قناة يتم ضرب الشعاع العقدي الممثل للإشارة على القناة المرجعية مع نسخة مرافق الصفحة للإشارة المستقبلية في كل قناة، كما في المعادلة التالية

$$C_n = r_{ref} \times r_n^* = e^{j(\phi_{ref} - \phi_n)} \quad (12-3)$$

بتعويض قيمة طور إشارة القناة "n" ($\phi_n = \phi_{ref} + \phi_{gn}$) في (12-3) نجد:

$$C_n = e^{j(\phi_{ref} - (\phi_{ref} + \phi_{gn}))} = e^{-j\phi_{gn}} \quad (13-3)$$

نلاحظ أن طور الشعاع العقدي الناتج يساوي مرافق الصفحة الهندسية للقناة المقابلة، وهي تمثل الطور المطلوب لتوجيه حزمة هوائي المصفوفة الطورية باتجاه مصدر الإشارة. يمكن كتابة الشعاع العقدي في (13-3) بالصيغة المتثلثية:

$$C_n = C_{n_re} + jC_{n_im} \quad (14-3)$$

$$C_n = |C_n| \cos(\phi_{gn}) - j|C_n| \sin(\phi_{gn})$$

حيث أن $|C_n|$ تمثل مطال الشعاع العقدي الناتج من عملية الضرب (في الحالة العامة عندما يتم أخذ مطال الإشارات المستقبلية بالاعتبار) وبالتالي يمكن إيجاد الوزن العقدي المرافق لهذه القناة من المعادلة السابقة:

$$w_n^* = A_n \frac{(C_{n_re} + jC_{n_im})}{|C_n|}$$

$$w_n^* = A_n (\cos(\phi_{g_n}) - j\sin(\phi_{g_n})) \quad (15-3)$$

$$w_n^* = A_n e^{-j\phi_{g_n}}$$

حيث أن A_n تمثل مطال الوزن العقدي.

ملاحظة:

يتم في الحالة العملية دراسة حالة الإشارات المستقبلية على أفنية المصفوفة مصحوبة مع ضجيج أبيض. حيث يمكن كتابة نموذج الإشارة المستقبلية على هوائيات المصفوفة مصحوبة بالضجيج الأبيض وفق العلاقة:

$$x_{ref} = \cos(w_{rf}t + \phi_{ref}) + N_0(t) \quad (16-3)$$

$$x_n = \cos(w_{rf}t + \phi_n) + N_n(t)$$

حيث أن $N_n(t)$ تمثل الضجيج الأبيض المصحوب مع الإشارة المستقبلية. باستخدام نموذج الإشارة المستقبلية مع الضجيج، تصبح المركبات المتعامدة للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية كما يلي:

$$I'_{ref} = \cos(\phi_{ref}) + N_{I_{ref}}$$

$$Q'_{ref} = \sin(\phi_{ref}) + N_{Q_{ref}} \quad (17-3)$$

$$r'_{ref} = r_{ref} + r_{N_{ref}}$$

و المركبات المتعامدة للإشارة المستقبلية على أفنية المصفوفة كما يلي:

$$I'_n = \cos(\phi_n) + N_{I_n}$$

$$Q'_n = \sin(\phi_n) + N_{Q_n} \quad (18-3)$$

$$r'_n = r_n + r_{N_n}$$

نلاحظ من المعادلات (3-17) و (3-18) أن فرق الصفحة بين الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية والشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على أفنية المصفوفة لم يعد يعبر عن الصفحة الهندسية للقناة المقابلة، وبالتالي فإنه لن يتم الحصول على الصفحة الهندسية المطلوبة بتطبيق عملية ضرب الأشعة العقدية في المعادلة (3-12) إلا إذا كان مطال الضجيج أصغر بكثير من مطال الإشارة المستقبلية بحيث يمكن إهماله. وبالتالي فإن تطبيق الطريقة المقترحة يفترض أن يكون في بيئة غير مضججة حيث تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج مرتفعة.

بالعودة إلى المعادلة (3-15) يمكن كتابة الأوزان العقدية بشكل مصفوفة (Matrix) كمايلي:

$$W^H = A_n [e^{j0} e^{-j\phi_{g1}} e^{-j\phi_{g2}} \dots e^{-j\phi_{gN-1}}] \quad (19-3)$$

بتعويض (3-5) و (3-16) في (2-13) يمكن إيجاد استجابة المصفوفة.

$$\begin{aligned} B(\theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-j\phi_{gn}} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{gn})} \\ &= NA_n e^{j\phi_{ref}} \end{aligned} \quad (20-3)$$

بأخذ حالة أن مطالات الأوزان العقدية متساوية $A_n = 1$ بالتالي فإن مطال استجابة المصفوفة

$$|B(\theta)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\phi_{ref}} \right| = N \quad (21-3)$$

نلاحظ أن مطال استجابة المصفوفة مساوي لقمة عامل المصفوفة. وهو بذلك سيكون دائماً مساوي لقمة عامل المصفوفة خلال حركة الطائرة ضمن حقل الرؤية.

ومنه فإنه نتيجة استخدام تقنية مرافق الصفحة مع الأشعة الممثلة للإشارات المستقبلية تم الحصول على مصفوفة طورية بإمكانية التوجيه الذاتي مع توجيهية عالية في الاستقبال. أي أن مصفوفة الملاحقة ستمتلك وصلة معطيات هابطة (بين الطائرة والمحطة الأرضية) دائمة وبربح عالٍ. وبالنتيجة نستطيع القول أنه تم تعريض حزمة استجابة المصفوفة المقترحة ليكون مساوي لحقل الرؤية ودون تخفيض الربح. لكن سينتج عن زيادة عرض حزمة الاستقبال في المصفوفة المقترحة مشكلة، وهي زيادة احتمال استقبال الإشارات غير المرغوبة مما سيؤثر على الإشارة المستقبلية من الطائرة وبالتالي فشل عملية الملاحقة.

تم حل هذه المشكلة بإضافة ميزة تطبيق الأصفار على استجابة المصفوفة لحذف الإشارات غير المرغوبة، وذلك بتطبيق طريقة "خطأ التربيغات الأصغري لتشكيل المخطط الإشعاعي مع تصفير" على الأوزان العقدية الناتجة من عملية الضرب السابقة.

بالعودة إلى الفقرة (٢-٢-٣) لحساب الأوزان العقدية الأمثلية التي تحقق توجيه المخطط الإشعاعي نحو الهدف مع تصفير باتجاه الإشارة غير المرغوبة، يمكن تطبيق هذه الدراسة على حالة المصفوفة المقترحة كمايلي:

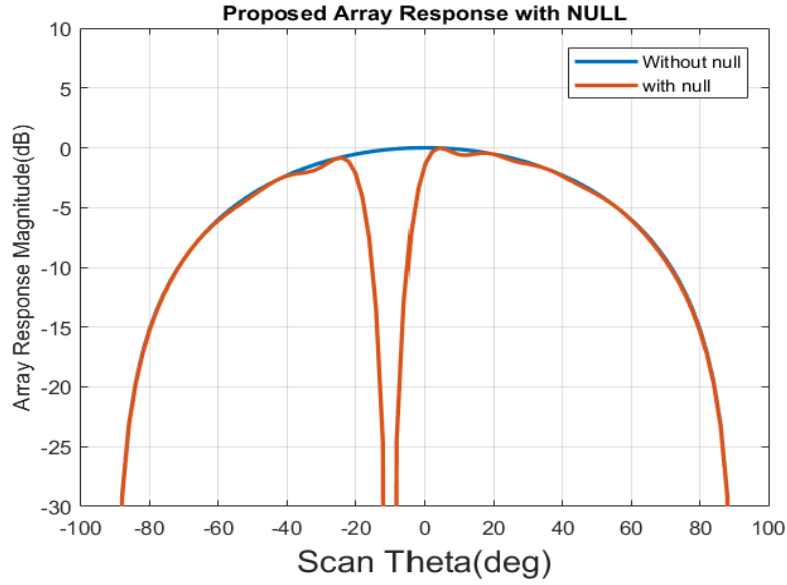
باعتبار الأوزان العقدية الناتجة من عملية الضرب الممثلة في المعادلة (3-14) هي الأوزان العقدية المرغوبة، يمكن كتابة

$$W_d^H = r_{ref} \times R^*$$

ومن ثم تعويضها في المعادلة (2-21) ليتم الحصول على الأوزان العقدية الأمثلية التي تقارب الأوزان العقدية المرغوبة مع أوزان عقدية خاضعة لقيود التصفير، كمايلي:

$$W_o^H = W_d^H - aC^H$$

تعطي هذه المعادلة الأوزان العقدية المطلوبة لتشكيل استجابة المصفوفة بحيث تمتلك قمة موجهة باتجاه الطائرة وصفر باتجاه المشوش من أجل كل موقع زاوي للطائرة. وفي النتيجة سنحصل على استجابة مصفوفة تمتلك عرض حزمة مساوي لحقل الرؤية مع إمكانية تطبيق أصفار باتجاه إشارات التشويش. أي أنه تم تحقيق إمكانية التوجيه الذاتي self-steering بالنسبة للإشارة المرغوبة وإمكانية تطبيق أصفار بالنسبة للإشارة غير المرغوبة. يظهر الشكل ٣-٣ استجابة المصفوفة المقترحة مع تطبيق أصفار وبدون تطبيق أصفار.



الشكل ٣-٣: استجابة المصفوفة المقترحة بدون و مع تطبيق أصفار باتجاه المشوش.

إيجابيات وسلبيات المصفوفة المقترحة:

بالنتيجة نجد أن استخدام تقنية مرافق الصفحة لتوليد الصفحة الهندسية لأقنية المصفوفة ساعد في تحقيق عملية الملاحقة بشكل آلي بحيث أصبحت مصفوفة الملاحقة قادرة على إبقاء الطائرة على قمة الحزمة الرئيسية للمصفوفة بشكل دائم خلال حركتها ضمن حقل الرؤية ودون الحاجة لاستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المعقدة (تحديد الإتجاه، الملاحقة) مما قلل التكلفة الحسابية للنظام و بالتالي أصبح بالإمكان تحقيق عملية المعالجة باستخدام دارة FPGA مما أعطى النظام مرونة من حيث إمكانية إعادة التهيئة دون الحاجة لأي تغييرات في بنية النظام. لكن تحقيق تقنية مرافق الصفحة باستخدام مازج الهيرودين في مجال التردد الوسيط لها سيئة من حيث الحاجة إلى هزاز رقمي بتردد يساوي ضعف التردد الوسيط وهذا يتطلب استخدام معالج إشارة رقمي عالي السرعة، كما أن الحاجة إلى العمل على التردد الوسيط في المجال الرقمي يتطلب استخدام مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة نسبياً، مما يزيد من تكلفة النظام. لحل هذه المشكلة تم تقديم بنية محسنة لمصفوفة الملاحقة المقترحة حيث تم إلغاء الحاجة إلى مرحلة التردد الوسيط.

٣-٢: مصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي المحسنة

جرى تحسين بنية المصفوفة المقترحة من خلال توليد نسخة مرافق الصفحة للإشارات المستقبلية على أقنية المصفوفة في الحزمة القاعدية (baseband) بدلاً من تطبيقها في مجال التردد الوسيط (IF band)، الأمر الذي أدى إلى تقليل تعقيد النظام من خلال إلغاء الحاجة إلى مرحلة ال-IF في

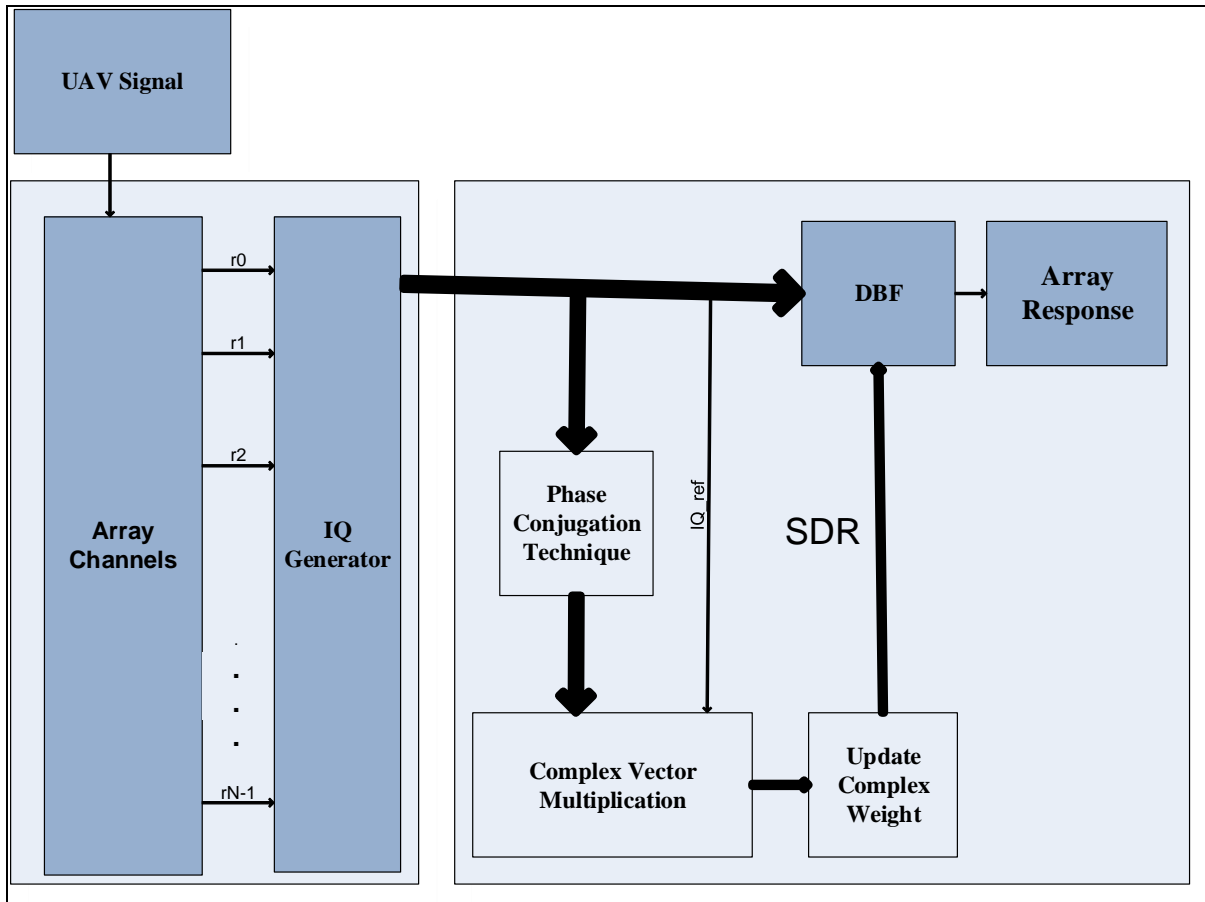
المُستقبل أي أنه لاجابة لاستخدام هزاز رقمي بتردد يساوي ضعف التردد الوسيط وبالتالي أمكن الاستغناء عن استخدام معالجات رقمية سريعة وكذلك لاجابة لاستخدام مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة نسبياً.

أعطى العمل في المجال القاعدي إمكانية لتحقيق كامل المعالجة بشكل برمجي، حيث أصبح بالإمكان الاستفادة من تقنية الراديو المعرف برمجياً (SDR) لتنفيذ عملية الملاحظة. تعد بيئة البرمجة الراديوية GNU من اكثر البرمجيات الراديوية المستخدمة في تقنية ال-SDR فهي تملك ادوات مناسبة للعمل مع الهوائيات المصفوفية [٤٧-٥٢].

هذا التحسين الذي أُدخل على المصفوفة جعل منها نموذجاً قابلاً للتطبيق على أي نظام هوائي ذكي معتمد على تقنية الراديو المعرف برمجياً دون أي تعديل في وظيفته الأساسية.

٣-٢-١: المخطط الصندوقي

يظهر الشكل ٣-٤ المخطط الصندوقي للمصفوفة المقترحة المُحسنة.



الشكل ٣-٤: المخطط الصندوقي للمصفوفة الهجينة المحسنة

نجد من المخطط الصندوقي أنه تم تبسيط عملية توليد نسخة مرافق الصفحة للإشارات المستقبلية على أفضية المصفوفة بشكل كبير من خلال إيجاد مرافق الصفحة في المجال القاعدي بدلا من إيجادها في مجال التردد الوسيط، حيث أصبح من الممكن تحقيق كامل عملية الملاحظة بعد مرحلة توليد مركبات الـ IQ في المجال القاعدي.

أتاح لنا إلغاء الحاجة إلى تقنية الهيترودين في مجال التردد الوسيط لتوليد مرافق الصفحة الخيار إما باستخدام دائرة **FPGA بسيطة**، نتيجة عدم الحاجة لسرعة معالجة عالية، أو تطبيق كامل المعالجة بواسطة الحاسب باستخدام **تقنية الراديو المعرف برمجيا (SDR)**. سنناقش كل من هذين الخيارين على حدى.

الخيار الأول: استخدام دائرة "مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة حقليا" FPGA لتحقيق عملية الملاحظة. يمكن استخدام دائرة FPGA بسيطة لتنفيذ كامل عملية الملاحظة، نظراً لعدم الحاجة للسرعة العالية نتيجة إلغاء مرحلة التردد الوسيط و تقليل حجم العمليات الحسابية المطلوبة، فقد أصبح بالإمكان وببساطة توليد نسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة من خلال ضرب كل مركبة متعامدة Q component بالمقدار (-1).

سنعبر عن هذه العملية رياضياً من خلال كتابة الإشارات المستقبلية بالصيغة العقدية. يمكن التعبير عن الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية بالعلاقة:

$$r_{ref} = I_{ref} + jQ_{ref} \quad (22-3)$$

حيث أن I_{ref} و Q_{ref} هي مركبات الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية على خرج مفكك التعديل الترابعي لهذه القناة.

كما يمكن التعبير عن الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على أفضية المصفوفة الأخرى بالعلاقة:

$$r_n = I_n + jQ_n \quad (23-3)$$

حيث أن I_n و Q_n هي مركبات الإشارة على خرج مفكك التعديل الترابعي للقناة n. يتم توليد نسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة من خلال ضرب المركبة المتعامدة لهذه الإشارة بالمقدار (-1) كما في المعادلة التالية

$$\begin{aligned} r_n^* &= I_n + j(-1)Q_n \\ &= I_n - jQ_n \end{aligned} \quad (24-3)$$

من ثم يتم إيجاد الأوزان العقدية المطلوبة لتوجيه المصفوفة باتجاه مصدر الإشارة من خلال ضرب العقدي للشعاع العقدي الممثل للإشارة على القناة المرجعية مع الشعاع العقدي الممثل لنسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة، كما يلي:

$$\begin{aligned} w_n^* &= r_{ref}^* \times r_n^* \\ &= (I_{ref} I_n + Q_{ref} Q_n) + j(I_n Q_{ref} - I_{ref} Q_n) \end{aligned} \quad (25-3)$$

تأتي أهمية هذا التحسين بأنه تم تبسيط عملية توليد الأوزان العقدية المطلوبة لكل قناة إلى عملية ضرب وجمع لمركبات الإشارات المستقبلية ودون الحاجة لاستخدام خوارزمية تحديد اتجاه وخوارزمية ملاحقة. سنناقش في الفصل الخامس من هذا البحث أهمية هذا التحسين من خلال المقارنة مع الأنظمة التقليدية التي تستخدم بطاقة FPGA، حيث تظهر النتائج قدرة التحسين الذي أُدخل على المصفوفة على اختزال العديد من العمليات الحسابية المعقدة، كما أمكن إلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة وبالتالي تقليل استهلاك الموارد الحسابية لبطاقة الـFPGA.

الخيار الثاني: يمكن إرسال إشارات الخرج لمرحلة توليد المركبات المتعامدة (IQ) للإشارات المستقبلية (الشكل ٣-٤) إلى الحاسب، عندها يمكن تنفيذ كامل عملية الملاحقة بشكل برمجي. كما ذكرنا يمكن استخدام بيئة البرمجة الراديوية GNU المستخدمة في تقنية الـSDR لتنفيذ المعالجة من خلال تمثيل الإشارات المرسل إلى الحاسب بشكلها العقدي ومن ثم تجميعها ضمن مصفوفة (matrix) وتنفيذ العمليات على المصفوفات (التي تدعمها بيئة البرمجة GNU) لتنفيذ عملية الملاحقة بشكل برمجي كما يلي:

التمثيل العقدي لشعاع الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية:

$$r_{ref} = I_{ref} + jQ_{ref} = e^{j\phi_{ref}} \quad (26-3)$$

حيث ϕ_{ref} تمثل صفحة الإشارة المستقبلية على القناة المرجعية.

و التمثيل العقدي لشعاع الإشارة المستقبلية على القناة n:

$$r_n = I_n + jQ_n = e^{j\phi_n} \quad (27-3)$$

حيث ϕ_n تمثل صفحة الإشارة المستقبلية على القناة n ، وهي تكون مزاحة عن صفحة القناة المرجعية بمقدار الصفحة الهندسية لهذه القناة وفق العلاقة $\phi_n = \phi_{ref} + \phi_{gn}$.
بالتالي ستكون مصفوفة الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية:

$$R = \left[e^{j\phi_{ref}} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g1})} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g2})} \dots e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g_{N-1}})} \right] \quad (28-3)$$

وبالتالي يمكن ببساطة توليد نسخة المرافق العقدي للإشارات المستقبلية عن طريق إيجاد مرافق المصفوفة (23-3) برمجيا باستخدام تابع توليد مرافق الصفحة في بيئة البرمجة الراديوية GNU، لتكون:

$$R^* = \left[e^{-j\phi_{ref}} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g1})} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g2})} \dots e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g_{N-1}})} \right] \quad (29-3)$$

عندها يمكن إيجاد مصفوفة الأوزان العقدية المطلوبة لتوجيه المخطط الإشعاعي باتجاه مصدر الإشارة من خلال ضرب الشعاع العقدي الممثل للإشارة المستقبلية على القناة المرجعية (21-3) مع المصفوفة (24-3) لتصبح:

$$\begin{aligned} W^H &= e^{j\phi_{ref}} \times R^* \\ &= e^{j\phi_{ref}} \left[e^{-j\phi_{ref}} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g1})} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g2})} \dots e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g_{N-1}})} \right] \\ &= \left[e^{j0} e^{-j\phi_{g1}} e^{-j\phi_{g2}} \dots e^{-j\phi_{g_{N-1}}} \right] \end{aligned} \quad (30-3)$$

بالنتيجة يمكن أن نلاحظ أن هذا التحسين المقدم على بنية مصفوفة الملاحقة المقترحة ساهم في تبسيط العمليات المطلوبة لتحقيق عملية تشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي لمصفوفة الهوائيات، كما ساهم في تقليل تكلفة النظام من خلال إلغاء الحاجة إلى معالج رقمي سريع و مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة نسبيا.

٣-٢-٢: تقليل تأثير أخطاء الطور

كما ذكرنا سابقا، لتقييم تأثير خطأ الطور على أداء مصفوفة الملاحقة لا بد من إيجاد استجابة مصفوفة الهوائيات بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار، بناءً على ذلك تم إيجاد استجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة وفقا لموديل الإشارة المستقبلية بعد أخذ خطأ الطور بالاعتبار و الذي تم إيجاده في الفقرة (٢-٢-٤).

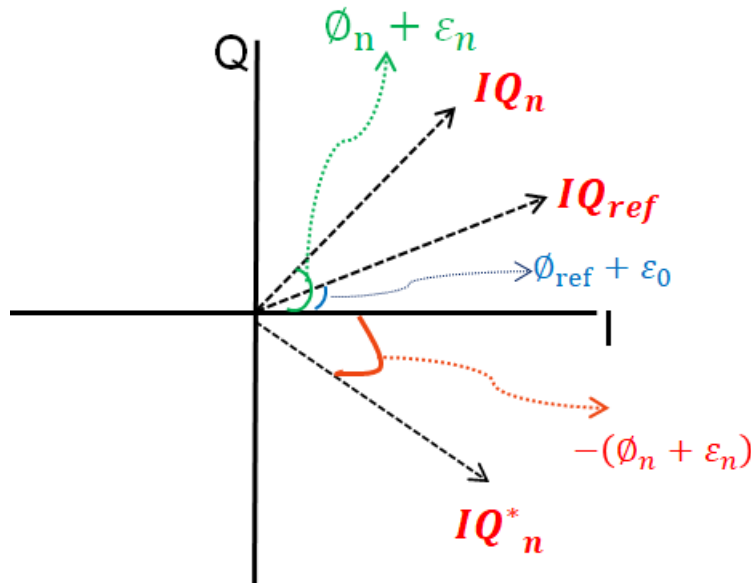
بأخذ موديل الإشارة مع خطأ الطور في المعادلة (26-2)، وتعويضها في معادلة مصفوفة (matrix) الإشارات المستقبلية (28-3) سنحصل على مصفوفة الاستقبال بدلالة خطأ الطور كما يلي:

$$R = \left[e^{j(\phi_{ref} + \varepsilon_0)} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g1} + \varepsilon_1)} e^{j(\phi_{ref} + \phi_{g2} + \varepsilon_2)} \dots e^{j(\phi_{ref} + \phi_{gN-1} + \varepsilon_{N-1})} \right] \quad (31-3)$$

من ثم يمكن الحصول على نسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة لتصبح

$$R^* = \left[e^{-j(\phi_{ref} + \varepsilon_0)} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g1} + \varepsilon_1)} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g2} + \varepsilon_2)} \dots e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{gN-1} + \varepsilon_{N-1})} \right] \quad (32-3)$$

يظهر الشكل ٣-٥ تمثيل الأشعة العقدية للإشارات السابقة بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار.



الشكل ٣-٥: تمثيل الأشعة العقدية للإشارات المستقبلية بعد أخذ أخطاء الطور بالاعتبار

وبالتالي ستكون الأوزان العقدية الناتجة من عملية ضرب الأشعة العقدية في (30-3) كما يلي:

$$\begin{aligned} W^H &= e^{j(\phi_{ref} + \varepsilon_0)} * R^* \\ &= e^{-j(\phi_{ref} + \varepsilon_0)} \left[e^{-j(\phi_{ref} + \varepsilon_0)} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g1} + \varepsilon_1)} e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{g2} + \varepsilon_2)} \dots e^{-j(\phi_{ref} + \phi_{gN-1} + \varepsilon_{N-1})} \right] \\ &= \left[e^{j0} e^{j(-\phi_{g1} - \varepsilon_1 + \varepsilon_0)} e^{j(-\phi_{g2} - \varepsilon_2 + \varepsilon_0)} \dots e^{j(-\phi_{gN-1} - \varepsilon_{N-1} + \varepsilon_0)} \right] \end{aligned} \quad (33-3)$$

نلاحظ أنه تم تضمين خطأ الطور لكل قناة في الوزن العقدي المرافق، وبالتالي سيتم تعويض خطأ الطور لكل قناة في استجابة مصفوفة الملاحقة. باستخدام (30-3) و (33-3) يمكن الحصول على استجابة مصفوفة الملاحقة كما يلي:

$$\begin{aligned} B &= W^H R \\ &= N e^{j\phi_{ref}} e^{j\epsilon_0} \end{aligned} \quad (34-3)$$

بمقارنة استجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة بدلالة خطأ الطور الناتجة في المعادلة (29-3) مع استجابة المصفوفة التقليدية بدلالة خطأ الطور الناتجة في المعادلة (29-2)، نجد أنه تم تقليل أثر خطأ الطور في المصفوفة المقترحة إلى حالة الهوائي المفرد، حيث لا يتأثر مطال الإشارة بينما يتم تدوير طور الإشارة المستقبلية، في حين أن استجابة المصفوفة الطورية التقليدية هي عبارة عن مقدار عشوائي تابع لخطأ الطور.

سيتم في الفصل التالي دراسة أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة (كمستقبل مصفوفي) بوجود الضجيج بعد أخذ خطأ الطور بالاعتبار، حيث سنبدأ بدراسة الحالة العامة لمستقبل مصفوفة طورية تقليدية حتى نتمكن من إيجاد نموذج قناة واحدة مكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأضوية، ومن ثم نطبق هذا النموذج على مصفوفة الملاحقة المقترحة لإظهار التحسين الذي قدمته بالمقارنة مع المصفوفة الطورية التقليدية. تجدر الإشارة على أنه تم استخدام مصطلح أثر الضجيج (noise performance) [٥٢] للدلالة على أداء المستقبل المصفوفي بوجود الضجيج.

الفصل الرابع

تحليل أثر الضجيج في المستقبلات المصفوفية

كما رأينا من الدراسة السابقة أن أهم استخدام للهوائي المصفوفي هو بناء مرشح فراغي (spatial filter) لاستقبال الإشارة الواردة من اتجاه معين من خلال تعزيز الإشارة المرغوبة وإضعاف الإشارات الواردة من الاتجاهات الأخرى [١٧][٢٠-٢٣]، هذا الأمر سينعكس على تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج بالمقارنة مع حالة الاستقبال من هوائي مفرد غير موجه.

تم في هذا الفصل تحليل أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة (كمستقبل مصفوفي) بوجود الضجيج بعد أخذ خطأ الطور بالاعتبار من خلال البدء بدراسة الحالة العامة لمستقبل مصفوفة طورية تقليدية (phased array receiver) وإيجاد نموذج قناة واحدة مكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية، و من ثم استخدام هذا النموذج لإظهار قدرة مستقبل المصفوفة الطورية على تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج بالمقارنة مع مستقبل القناة المفردة وبالتالي تحسين حساسية المستقبل. تم إجراء هذه الدراسة استناداً إلى الدراسة التحليلية المقدمة في المرجع [٥٣].

لا يمكننا استخدام الأسلوب التقليدي (المتبع في المستقبل أحادي القناة) لحساب نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج نظام المصفوفة، وذلك لأن رقم الضجيج والربح المرافق تم تعريفها تقليدياً لنظام أحادي القناة، وبالتالي فإنها لا يمكن أن تطبق بوضوح على نظام متعدد الأقبية (عدة مداخل وخرج واحد) مثل الهوائي المصفوفي.

لتجنب هذه الصعوبة، قمنا بتحويل مستقبل المصفوفة متعدد الأقبية إلى نظام أحادي القناة مكافئ. حيث أن النظام أحادي القناة الناتج مكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية من حيث أن كليهما ينتجان استطاعة إشارة وضجيج متطابقة على الخرج تحت نفس شروط بيئة الدخل (استطاعة الإشارة والضجيج الواردة).

لقد أصبحنا في النظام المكافئ قادرين على تعريف ربح مكافئ، رقم ضجيج مكافئ، و نسبة إشارة إلى الضجيج مكافئة كما يفعل عادة متجنبيين الإشكال المذكور سابقاً.

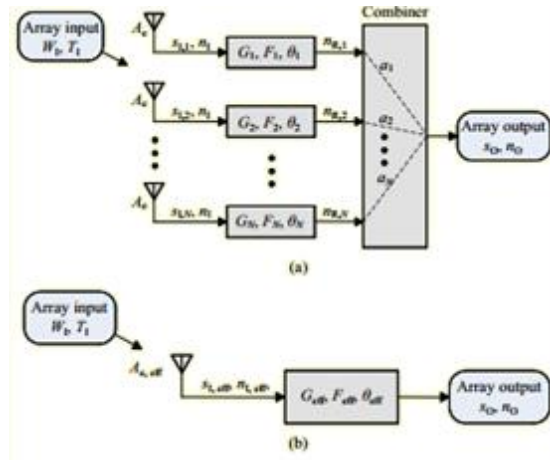
لاتوضح هذه الطريقة فقط تحسن أثر الضجيج على نظام المصفوفة بالمقارنة مع القناة المفردة، ولكن أيضاً تقدم معامل مباشر والذي يمكن استخدامه لمقارنة أثر الضجيج بين مستقبلات مصفوفية مختلفة.

كما شرحنا في الفقرات السابقة بما أن خطأ الطور من العوامل الهامة التي تؤثر على استجابة المصفوفة، لذلك قمنا بدراسة تأثير خطأ الطور على معاملات الربح المكافئ و رقم الضجيج المكافئ و نسبة الإشارة إلى الضجيج المكافئ للنظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقفية، بحيث يتم أخذ خطأ الطور بالاعتبار عند دراسة أثر الضجيج على أداء المصفوفة.

جرى في الفقرة الأولى من هذا الفصل تحويل نظام المصفوفة متعدد الأقفية إلى نظام مكافئ أحادي القناة وإيجاد معاملات هذا النظام المكافئ. في الفقرة الثانية تم إعادة بناء معاملات النظام المكافئ بناءً على موديل الإشارة مع خطأ الطور (من الفقرة ٢-٢-٤) واستخدامها لتحليل أداء المصفوفة الطورية التقليدية. في الفقرة الثالثة تم إيجاد معاملات النظام المكافئ للمصفوفة المقترحة واستخدامها لتحليل أداء المصفوفة لإظهار التحسين الذي قدمته بالمقارنة مع المصفوفة الطورية التقليدية.

٤-١: النظام احادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقفية

يظهر الشكل ٤-١ (a) التركيبة العامة لنظام مصفوفة ب-N قناة:



الشكل ٤-١: (a) التركيبة العامة لنظام مصفوفة ب-N قناة، و (b) النظام المكافئ أحادي القناة [٥٣].

يتم استقبال الإشارة في المستقبل المصفوفي من قبل N هوائي بإزاحة في الصفحة بين أي هوائيين (قناتين) متجاورين، هذه الإزاحة في الصفحة تساوي الصفحة الهندسية للقناة المقابلة. عندئذ يتم معالجة كل إشارة مستقلة بشكل مستقل عبر قناة منفصلة. حيث تقوم قنوات المصفوفة بضبط مطال و صفحة الإشارة المستقبلية بهدف تعويض الإزاحة في الصفحة الناتجة عند كل قناة ومن ثم يتم جمع هذه الإشارات بشكل مترابك.

بهدف التحليل، تم تمييز كل قناة k بربح G_k و صفحة هندسية Θ_{gk} و معامل ضجيج F_k عند تردد العمل. ومن ثم يتم دمج هذه القنوات من خلال جامع N قناة تتميز بمطالات a_k و هي بشكل عام تمثل مطالات الأوزان في شبكة تشكيل المخطط الإشعاعي (beamforming network). تم حساب الربح المكافئ و عامل الضجيج المكافئ بموجب بارامترات النظام الأصلي. بحيث يعطي كلا النظامين نفس الخرج s_o, n_o تحت نفس شروط بيئة الدخل (الاستطاعة الواردة و الضجيج). بفرض أن كل عناصر القنوات متماثلة، في الشكل (٤-١) (a) ، فإن استطاعة الإشارة على خرج الهوائي لكل قناة تساوي

$$S_{Ik} = \left| \sqrt{W_I A_e} e^{j\phi_{gk}} \right|^2 = W_I A_e \quad (1-4)$$

حيث W_I تمثل كثافة الاستطاعة الواردة، و A_e تمثل السطح الفعال للهوائي، و k رقم القناة وهي تأخذ قيم $1 \leftarrow N$.

كما أن استطاعة الإشارة على خرج المصفوفة

$$s_o = \left| \sum_{k=1}^N \sqrt{W_I A_e G_k} e^{j(\phi_{gk} - \phi_k)} \cdot a_k \right|^2 \quad (2-4)$$

تم في هذه المعادلة أخذ الحالة العامة قبل ضبط المصفوفة وبالتالي فإن ϕ_k تمثل صفحة الوزن العقدي في القناة k بالحالة العامة.

أما استطاعة الضجيج على خرج هوائي

$$n_I = k_B T_a B \quad (3-4)$$

حيث B هي عرض المجال الترددي للعمل، T_a هي درجة حرارة الضجيج للهوائي، و k_B هو ثابت بولتزمان [٥٣-٥٥].

وبالتالي تصبح استطاعة الضجيج على خرج كل قناة (عند مدخل الجامع) [٥٦-٥٧]

$$\begin{aligned} n_{Rk} &= n_I G_k F_k \\ &= k_B T_a B G_k F_k \end{aligned} \quad (4-4)$$

بالنتيجة يمكن التعبير عن استطاعة الضجيج على خرج المصفوفة بالعلاقة

$$n_o = \sum_{k=1}^N (k_B T_a B G_k F_k |a_k|^2) \quad (5-4)$$

سنقوم بإيجاد معاملات نظام القناة المفردة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية بحيث يعطي نفس قيم استطاعة الإشارة والضجيج على الخرج عندما يطبق عليه نفس استطاعة الإشارة والضجيج على الدخل.

يمكن أن نلاحظ من النظام المكافئ في الشكل (٤-١) (b) إن الهوائي المفرد المكافئ يمثل الهوائي الكلي لنظام المصفوفة الأصلي في الشكل (٤-١) (a) وهذا يقتضي أن يكون السطح الفعال للهوائي المكافئ يساوي

$$A_{e,eff} = N A_e \quad (6-4)$$

وبالتالي فإن استطاعة الإشارة المستقبلية الفعالة واستطاعة الضجيج عند خرج الهوائي المكافئ تعطى بالعلاقة [٥٣][٥٦]

$$S_{I,eff} = W_I A_{e,eff} = N W_I A_e \quad (7-4)$$

$$n_{I,eff} = k_B T_a B \quad (8-4)$$

يمكن الآن باستخدام (2-4) و (7-4) حساب الربح الفعال لنظام المستقبل المكافئ

$$G_{eff} = \frac{S_o}{S_{I,eff}} = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N (\sqrt{G_k} e^{j(\phi_{gk} - \phi_k)} a_k) \right|^2 \quad (9-4)$$

وكذلك باستخدام (5-4) و (8-4) و (9-4) يمكن إيجاد معامل الضجيج الفعال لنظام المستقبل المكافئ

$$F_{eff} = \frac{n_o}{G_{eff} n_{I,eff}} = \frac{N \cdot \sum_{k=1}^N (G_k F_k |a_k|^2)}{\left| \sum_{k=1}^N (\sqrt{G_k} e^{j(\phi_{gk} - \phi_k)} a_k) \right|^2} \quad (10-4)$$

يقدم كل من الربح الفعال و معامل الضجيج الفعال لنظام المستقبل المكافئ المحسوبين من المعادلات السابقة، طريقة فعالة لتحليل أثر الضجيج على أداء المصفوفة من أجل أي طريقة تطبيق أوزان لأقبية المصفوفة.

كما ذكرنا أنه عادة ما يتم اعتبار عناصر المصفوفة متماثلة، أي أن كل قناة في المصفوفة ستمتلك نفس الربح ومعامل الضجيج. و بالتالي عندما تكون المصفوفة موجهة باتجاه ورود الإشارة، فإن الربح الفعال و معامل الضجيج الفعال لنظام المستقبل المكافئ في المعادلات السابقة تصبح

$$G_{\text{eff}} = \frac{G}{N} \left| \sum_{k=1}^N a_k \right|^2 \quad (11-4)$$

$$F_{\text{eff}} = F \cdot N \frac{\sum_{k=1}^N |a_k|^2}{\left| \sum_{k=1}^N a_k \right|^2} \quad (12-4)$$

حيث أن كل من G و F تمثلان الربح ومعامل الضجيج لكل قناة من أقنية المصفوفة. يمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضجيج على الخرج

$$\text{SNR}_{o,\text{eff}} = \frac{S_{I,\text{eff}}}{n_{I,\text{eff}} F_{\text{eff}}} \quad (13-4)$$

بتعويض قيم استطاعة الإشارة و الضجيج في (12-4) يمكن تمثيل نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة بدلالة نسبة الإشارة إلى الضجيج على قناة مفردة، حيث تصبح

$$\text{SNR}_{o,\text{eff}} = \text{SNR}_o \frac{\left| \sum_{k=1}^N a_k \right|^2}{\sum_{k=1}^N |a_k|^2} \quad (14-4)$$

حيث SNR_o تمثل نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج كل قناة مفردة من أقنية المصفوفة. باستخدام هذا النموذج المكافئ أصبح بالإمكان توصيف أداء المصفوفة بالمقارنة مع أداء القناة المفردة من المصفوفة من أجل طريقة تطبيق أوزان معينة. كذلك يمكن استخدام هذا النموذج المكافئ لمقارنة أداء المصفوفات فيما بينها.

٤-٢: معاملات النظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقنية بناء على موديل الإشارة مع خطأ الطور في المصفوفة الطورية

لقد لاحظنا أن عدم القدرة على تعويض إزاحة الطور الناتج عن أخطاء الطور في المصفوفة الطورية التقليدية سيؤثر على استجابة المصفوفة، وبالتالي ستصبح المعاملات التي تم حسابها في

الفقرة السابقة غير معبرة عن أداء المصفوفة، لذلك تم حساب معاملات النموذج المكافئ في الشكل (٤-١-١) بناء على موديل الإشارة مع خطأ الطور الذي تم إيجاده في الفقرة (٢-٢-٤).

بأخذ موديل الإشارة في المعادلة (26-2) على خرج القناة k من الشكل (٢-٨) فإنه يمكن تعديل معادلة استطاعة الإشارة على خرج المصفوفة في المعادلة (4-2) لتصبح:

$$s_o = \left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{W_l A_e G_k} e^{j(\phi_{gk} + \varepsilon_k - \phi_k)} a_k \right) \right|^2 \quad (15-4)$$

أي أن استجابة المصفوفة أصبحت تابع لخطأ الطور، وهذا يعني أن الربح الفعال للنظام المكافئ سيكون تابع لخطأ الطور. بتعويض المعادلة (4-7) والمعادلة (4-15) في المعادلة (4-9) فإن الربح الفعال للنظام المكافئ سيصبح:

$$G_{eff} = \frac{s_o}{s_{l,eff}} = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{G_k} e^{j(\phi_{gk} + \varepsilon_k - \phi_k)} a_k \right) \right|^2 \quad (15-4)$$

كما أن معامل الضجيج الفعال للنظام المكافئ هو أيضا سيكون تابع لخطأ الطور. بتعويض قيمة الربح الفعال للنظام المكافئ الناتجة فإن معامل الضجيج الفعال للنظام المكافئ يصبح:

$$F_{eff} = \frac{n_o}{G_{eff} n_{l,eff}} = \frac{N \sum_{k=1}^N \left(G_k F_k |a_k|^2 \right)}{\left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{G_k} e^{j(\phi_{gk} + \varepsilon_k - \phi_k)} a_k \right) \right|^2} \quad (16-4)$$

تقدم قيم الربح و معامل الضجيج الفعالين للنظام المكافئ الجديدة، طريقة فعالة لتحليل أثر الضجيج على أداء المصفوفة بوجود أخطاء الطور الناتجة من عناصر المصفوفة المختلفة.

لأخذ حالة خاصة من هذه الدراسة، سنعتبر كل أفضية المصفوفة متماثلة، وسنفترض مطالات الأوزان في شبكة تشكيل المخطط الإشعاعي $a_k = 1$ ، وبالتالي عند ضبط المصفوفة لتكون موجهة باتجاه مصدر الإشارة، فإن معاملات الربح ومعامل الضجيج الفعالين للنظام المكافئ ستصبح:

$$G_{eff} = \frac{G}{N} \left| \sum_{k=1}^N e^{j\varepsilon_k} \right|^2 \quad (17-4)$$

$$F_{eff} = F \cdot N^2 \frac{1}{\left| \sum_{k=1}^N e^{j\varepsilon_k} \right|^2} \quad (18-4)$$

و نسبة الإشارة إلى الضجيج المكافئة ستصبح:

$$SNR_{0,eff} = SNR_0 \frac{\left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2}{N} \quad (19-4)$$

من الواضح من المعادلات (17-4)، (18-4)، و (19-4) أن خطأ الطور سيؤثر على بارامترات النظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة الطورية التقليدية، حيث أنه سيؤدي إلى تقليل الربح المكافئ وزيادة معامل الضجيج الفعال للنظام المكافئ وبالنتيجة تناقص نسبة الإشارة إلى الضجيج مما سيؤثر على جودة المعطيات المستقبلية.

تؤكد المعادلة (19-4) أنه نتيجة عدم القدرة على تعويض خطأ الطور في المصفوفة الطورية التقليدية فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج لنظام المصفوفة تصبح عبارة عن مقدار عشوائي، لذلك لابد من إجراء دراسة إحصائية لهذا المقدار العشوائي لتوصيف الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج كتابع لخطأ الطور.

٤-٢-١: ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR Loss

تُعرّف المعادلة (19-4) نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج مستقبل المصفوفة الطورية كتابع لخطأ الطور، والذي هو عبارة عن مقدار عشوائي. تم في هذه الفقرة إجراء دراسة إحصائية لتقييم تأثير خطأ الطور على نسبة الإشارة إلى الضجيج من خلال تعريف مقدار باسم "ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج L_{SNR} "، يعبر عن الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج كتابع لخطأ الطور. يمكن تعريف ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج نتيجة خطأ الطور بالنسبة إلى الحالة المثالية (عندما لا يوجد خطأ الطور)، بالعلاقة التالية:

$$L_{SNR} = \frac{SNR_{0,eff}}{SNR_{id}} \quad (20-4)$$

حيث أن SNR_{id} هي نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة في الحالة المثالية (عندما لا يوجد خطأ طور). بتعويض المعادلة (19-4) في (20-4) فإن علاقة ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج تصبح:

$$L_{SNR} = \frac{SNR_o \left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2}{SNR_o N} \quad (21-4)$$

$$= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2$$

يظهر من المعادلة (21-4) أنه من أجل حجم مصفوفة ثابت فإن الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج هو مقدار عشوائي مرتبط بخطأ الطور، لذلك سنقوم بإيجاد متوسط ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج عبر حساب التوقع الرياضي له وذلك بهدف تقديم تعبير رياضي لتوصيف أداء نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة كتابع لخطأ الطور. حيث سنفترض أن خطأ الطور هو متحول عشوائي بتوزيع منتظم $\epsilon_k \sim U[-\delta_{max}, \delta_{max}]$ uniform distribution ، حيث أن $0^\circ \leq \delta_{max} \leq 180^\circ$ تعبر عن الحد الأعلى لانحراف الطور. مع الأخذ بالاعتبار حالة الإستقلال العشوائي لخطأ الطور بين أقدية المصفوفة.

يمكن التعبير عن متوسط ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج كمايلي:

$$E[L_{SNR}] = \frac{E \left[\left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2 \right]}{N^2} \quad (22-4)$$

لإيجاد التوقع الرياضي للمقدار $\left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2$ في البسط للمعادلة (22-4) سنفترض المتحولات

$$Z = \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} = \sum_{k=1}^N \cos(\epsilon_k) + j \sum_{k=1}^N \sin(\epsilon_k) \quad (23-4)$$

$$X_k = \cos(\epsilon_k) \quad (24-4)$$

$$Y_k = \sin(\epsilon_k) \quad (25-4)$$

بالتالي تصبح المعادلة (23-4) كمايلي:

$$Z = \sum_{k=1}^N X_k + j \sum_{i=1}^N Y_k \quad (26-4)$$

بأخذ مربع طولية المتحول Z:

$$|Z|^2 = \left(\sum_{k=1}^N X_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N Y_k \right)^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N (X_k X_l + Y_k Y_l) \quad (27-4)$$

يكون التوقع الرياضي لمربع المطال:

$$E[|Z|^2] = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N E(X_k X_l) + E(Y_k Y_l) \quad (28-4)$$

بالاخذ بالاعتبار الاستقلال العشوائي:

$$E[X_k X_l] = \begin{cases} E[X_k]E[X_l] = \mu_X^2 & k \neq l \\ E[X_k^2] = \mu_{X^2} & k = l \end{cases} \quad (29-4)$$

$$E[Y_k Y_l] = \begin{cases} E[Y_k]E[Y_l] = \mu_Y^2 & k \neq l \\ E[Y_k^2] = \mu_{Y^2} & k = l \end{cases} \quad (30-4)$$

يمكن حساب القيم μ_X و μ_{X^2} من أجل التوزيع المنتظم لمتحول خطأ الطور العشوائي، كما يلي:

$$\begin{aligned} \mu_X = E[X_k] &= E[\cos(\varepsilon_k)] = \frac{1}{2\delta_{max}} \int_{-\delta_{max}}^{\delta_{max}} \cos x dx \\ &= \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} \cos x dx = \frac{\sin \delta_{max}}{\delta_{max}} \end{aligned} \quad (31-4)$$

$$\begin{aligned} \mu_{X^2} = E[X_k^2] &= \frac{1}{2\delta_{max}} \int_{-\delta_{max}}^{\delta_{max}} \cos^2 x dx = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} \cos^2 x dx \\ &= \frac{1}{2\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} [1 + \cos 2x] dx = \frac{1}{2} + \frac{\sin 2\delta_{max}}{4\delta_{max}} \end{aligned} \quad (32-4)$$

كذلك يمكن حساب القيم μ_Y و μ_{Y^2} من أجل التوزيع المنتظم لمتحول خطأ الطور العشوائي، كما يلي:

$$\mu_Y = E[Y_k] = E[\sin(\delta_k)] = 0 \quad (33-4)$$

$$\mu_{Y^2} = E[Y_k^2] = \frac{1}{2\delta_{max}} \int_{-\delta_{max}}^{\delta_{max}} \sin^2 x dx = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} \sin^2 x dx \quad (34-4)$$

$$= \frac{1}{2\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} [1 - \cos 2x] dx = \frac{1}{2} - \frac{\sin 2\delta_{max}}{4\delta_{max}}$$

الآن أصبح بالإمكان إيجاد المقدار $E[|Z|^2]$ ليصبح:

$$E[|Z|^2] = (N^2 - N)(\mu_X^2 + \mu_Y^2) + N(\mu_X^2 + \mu_Y^2)$$

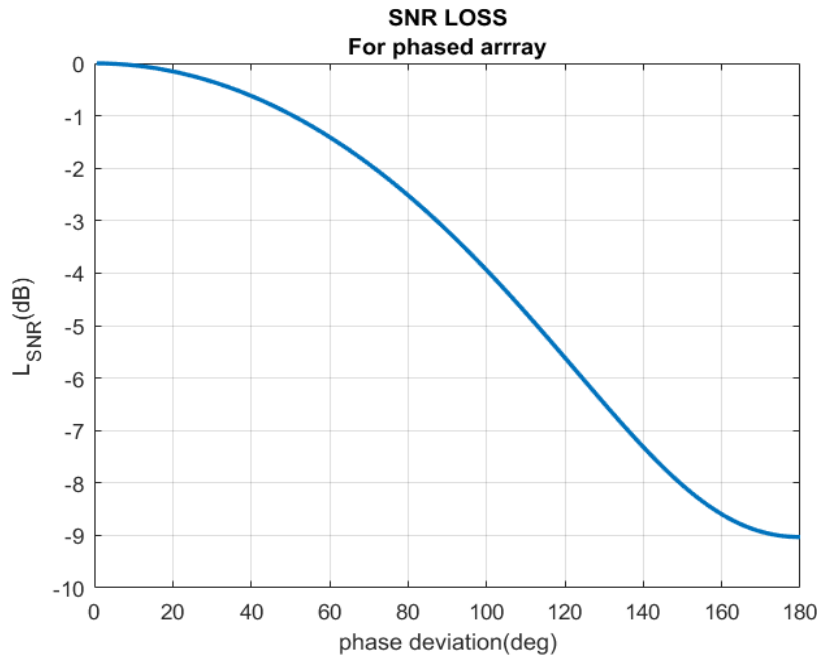
$$E[|Z|^2] = (N^2 - N) \left(\frac{\sin^2(\delta_{max})}{\delta_{max}^2} \right) + N$$

$$E[|Z|^2] = N^2 \left(\frac{\sin^2(\delta_{max})}{\delta_{max}^2} \right) + N \left(1 - \frac{\sin^2(\delta_{max})}{\delta_{max}^2} \right) \quad (35-4)$$

بناء على ذلك فإن متوسط ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج في المعادلة (22-4) سيصبح:

$$E[L_{SNR}] = \frac{E[|Z|^2]}{N^2} = \frac{\sin^2(\delta_{max})}{\delta_{max}^2} + \frac{1}{N} \left(1 - \frac{\sin^2(\delta_{max})}{\delta_{max}^2} \right) \quad (36-4)$$

يظهر الشكل (٢-٤) انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج في خرج المصفوفة مع تزايد القيمة العظمى لخطأ الطور، والذي يؤثر على انخفاض حساسية المستقبل. سيتم استخدام هذه العلاقة في الفصل الخامس للحديث عن قيود استخدام المصفوفة الطورية في بناء مصفوفة ملاحقة عند أخذ خطأ الطور بالاعتبار.



الشكل ٢-٤: متوسط ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج بدلالة القيمة العظمى لانحراف الطور

٤-٢: معاملات النظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية بناء على موديل الإشارة مع خطأ الطور في المصفوفة الهجينة (المقترحة)

قمنا بتحليل أثر الضجيج على أداء المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي بوجود أخطاء الطور من خلال إيجاد بارامترات النظام أحادي القناة في الشكل (٤-١) (b) المكافئ لنظام المصفوفة الهجينة متعدد الأقبية، كما يلي:

باستخدام قيمة الوزن العقدي في المعادلة (3-28) للقناة k ، يمكن الحصول على الإشارة على خرج القناة (دخل الجامع في الشكل (٤-١) (a)) بحيث يصبح:

$$S_{ok} = w_k^* S_k = S e^{j\epsilon_0} \quad (37-4)$$

وبالتالي فإن معادلة استطاعة الإشارة على خرج المصفوفة ستصبح:

$$s_o = \left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{W_l A_e} G e^{j\epsilon_0} \right) \right|^2 \quad (38-4)$$

كما ذكرنا سابقاً، أنه نتيجة لاستخدام تقنية مرافق الصفحة لتوليد الأوزان العقدية فإنه سيتم تعويض أثر خطأ الطور في استجابة المصفوفة المقترحة، وهذا سيؤثر على تحسين معاملات الربح المكافئ ورقم الضجيج المكافئ للمصفوفة المقترحة والذي سينعكس على تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة.

بتعويض المعادلة (4-7) والمعادلة (38-4) في المعادلة (4-9) فإن الربح الفعال للنظام المكافئ يصبح:

$$G_{eff} = \frac{s_o}{s_{1,eff}} = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{G} e^{j\epsilon_0} \right) \right|^2 = NG \quad (39-4)$$

يمكن إيجاد معامل الضجيج الفعال للنظام المكافئ باستخدام قيمة الربح الفعال للنظام المكافئ الناتجة ليكون:

$$F_{eff} = \frac{n_o}{G_{eff} s_{1,eff}} = \frac{N \sum_{k=1}^N (GF)}{\left| \sum_{k=1}^N \left(\sqrt{G} e^{j\epsilon_0} \right) \right|^2} = F \quad (40-4)$$

يمكن ملاحظة أن تعويض أثر خطأ الطور في استجابة المصفوفة انعكس على أن كل من معاملات الربح المكافئ ورقم الضجيج المكافئ لم تعد تابعة لخطأ الطور والذي سينعكس بدوره على تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة بالنتيجة فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج المكافئة تصبح:

$$SNR_{o,eff} = N * SNR_o \quad (41-4)$$

نلاحظ أن نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة أصبحت ترتبط فقط بحجم المصفوفة وبنسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج القناة المفردة على الرغم من وجود خطأ الطور. وبالتالي بتعويض (41-4) في (20-4) يمكن الحصول على ضياع نسبة الإشارة إلى الضجيج للمصفوفة الهجينة نتيجة خطأ الطور:

$$L_{SNR} = \frac{SNR_{o,eff}}{SNR_{id}} = 1 \quad (42-4)$$

يمكن أن نلاحظ من المعادلات (39-4)،(40-4)، و (42-4) أن المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي ألغت تأثير خطأ الطور على أدائها، بالمقارنة مع المعادلات (17-4)،(18-4)، و(21-4) بالنسبة للمصفوفة الطورية التقليدية حيث أن أداء المصفوفة الطورية التقليدية هو تابع لخطأ الطور.

يظهر الجدول التالي مقارنة معاملات النظام أحادي القناة المكافئ للمصفوفة الطورية التقليدية، مع المعاملات لحالة المصفوفة الهجينة.

الجدول ٤-١ مقارنة معاملات النظام أحادي القناة المكافئ

Used Array	F_{eff}	G_{eff}	L_{SNR}
Hybrid array	F	N.G	1
Phased array	$F.N^2 \frac{1}{\left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2}$	$\frac{G}{N} \left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2$	$\frac{\left| \sum_{k=1}^N e^{j\epsilon_k} \right|^2}{N^2}$

الفصل الخامس

الاختبارات والنتائج

تم أخذ حالة مصفوفة خطية مؤلفة من ثمانية عناصر هوائيات دايبول، كمثال على المصفوفة المقترحة واختبار التصميم من خلال إظهار وتحليل نتائج المحاكاة من حيث مواصفات استجابة المصفوفة وعملية الملاحقة، كما تم مقارنة أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة مع مصفوفة ملاحقة تطبق تقنية النبضة الأحادية على مصفوفة طورية تقليدية.

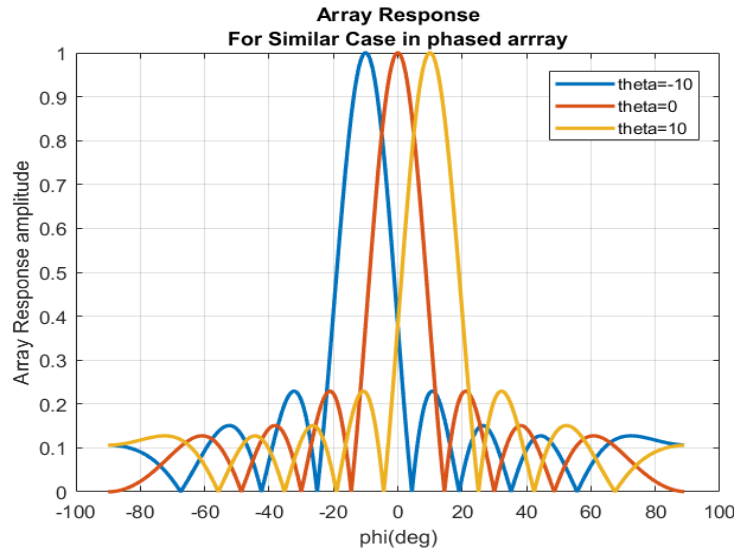
تم تقسيم عملية المحاكاة إلى عدة مراحل:

- في المرحلة الأولى، اختبار الأوزان العقدية الناتجة من الطريقة المقترحة، وذلك للتحقق من أن الطريقة المقترحة تعطي الأوزان العقدية المطلوبة لتشكيل وتوجيه الحزمة باتجاه الطائرة دون الحاجة إلى خوارزميات تحديد اتجاه وملاحقة.
- في المرحلة الثانية، رسم استجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة.
- في المرحلة الثالثة، اختبار عملية تطبيق أصفار على استجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة لحذف إشارة التشويش.
- في المرحلة الرابعة، تقييم التحسين الذي قدمته مصفوفة الملاحقة المقترحة من خلال تحسين خطأ التوجيه بوجود الضجيج وخطأ الطور و مقارنة أدائها مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية للملاحقة.
- في المرحلة الخامسة، استخدام معاملات النموذج أحادي القناة المكافئ بعد أخذ خطأ الطور بالاعتبار، لتحليل أثر الضجيج على أداء المصفوفة الطورية التقليدية وإظهار محددات استخدامها في بناء مصفوفة ملاحقة وتم أخذ حالة النبضة الأحادية كمثال ومقارنتها مع مصفوفة الملاحقة المقترحة.
- في المرحلة الأخيرة، مناقشة مصفوفة الملاحقة الهجينة (المقترحة) من وجهة نظر الكيان الصلب لتطبيقها على بطاقة FPGA. حيث تم استخدام برنامج Quartus II لإظهار استجابة المصفوفة المقترحة في هذه المرحلة. بناءً على ذلك تم طرح إمكانية بناء نظام ملاحقة قليل

التعقيد باستخدام دارة "مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة حقليا" Cyclone II التي تعتبر دارة بسيطة بالمقارنة مع الدارات المستخدمة لبناء أنظمة الملاحقة.

١-٥: اختبار الأوزان العقديّة

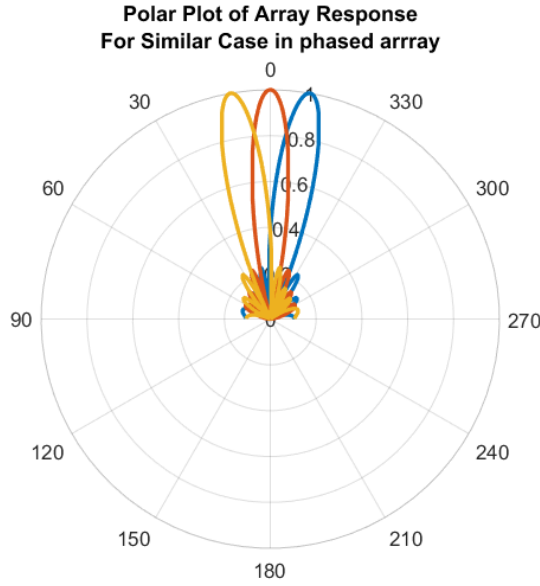
تم في هذه الفقرة فرض ثلاث مواقع زاوية مختلفة للطائرة المسيرة، ومن ثم تطبيق تقنية مرافق الصفحة وضرب الأشعة العقديّة لإيجاد الأوزان العقديّة عند كل موقع زاوي للطائرة. ثم تم تطبيق كل من هذه الأوزان الناتجة، بشكل منفصل، على مصفوفة طورية تقليدية مشابهة للمصفوفة المختبرة (تمتلك نفس عدد العناصر ونفس المسافة بين العناصر)، و من ثم رسم استجابة المصفوفة من أجل كل موقع زاوي على حدى. يظهر الشكل (١-٥) استجابة المصفوفة الطورية التقليدية المشابهة للمصفوفة المختبرة من أجل مواقع زاوية مختلفة للطائرة.



الشكل ١-٥: استجابة المصفوفة الطورية التقليدية من أجل مواقع زاوية مختلفة للطائرة.

يظهر الشكل ١-٥ أنه تم توجيه المخطط الإشعاعي الناتج من كل مجموعة أوزان عقديّة نحو الموقع الزاوي المقابل للطائرة، كما أن استجابة المصفوفة تساوي قمة المخطط الإشعاعي عند هذا الموقع الزاوي، أي أنه سيتم استقبال الإشارة الواردة من الطائرة عند كل موقع زاوي من قمة المخطط الإشعاعي. وبالتالي نستطيع القول أن الطريقة المقترحة أعطت الأوزان العقديّة المطلوبة لتشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي نحو الطائرة واستقبال أكبر استطاعة واردة على المصفوفة من الطائرة، ودون الحاجة لاستخدام خوارزمية تحديد اتجاه.

تم في الشكل ٢-٥ رسم استجابة المصفوفة التقليدية المشابهة للمصفوفة المقترحة بالاحداثيات القطبية.



الشكل ٢-٥: استجابة المصفوفة الطورية التقليدية بالاحداثيات القطبية، من أجل مواقع زاوية مختلفة للطائرة.

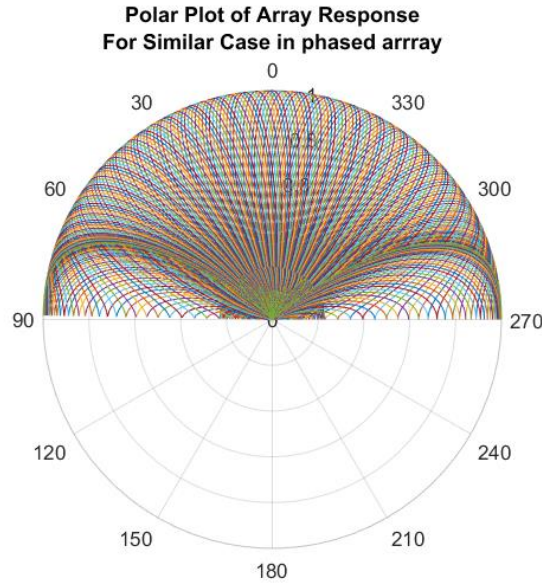
٢-٥: رسم استجابة المصفوفة المقترحة

تم في هذه الفقرة رسم استجابة المصفوفة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة. حيث تم محاكاة حركة الطائرة ضمن القطاع الزاوي $[-90^\circ + 90^\circ]$ ، من ثم جرى تطبيق السيناريو في الفقرة السابقة، بحيث تم أخذ الأوزان العقدية الناتجة من كل موقع زاوي وتطبيقها على المصفوفة الطورية التقليدية المشابهة و من ثم رسم استجابة المصفوفة عند هذا الموقع الزاوي. سنثبت أيضا من خلال هذه الخطوة قدرة المصفوفة على ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة. تجدر الملاحظة إلى أنه من أجل عناصر هوائيات غير أيزوتروبية (non-isotropic) فإنه يجب أخذ عامل العنصر element factor بالاعتبار عند حساب استجابة المصفوفة، كما في العلاقة:

$$H(\theta) = EF(\theta) * B(\theta) \quad (1-5)$$

حيث أن $B(\theta)$ هي استجابة المصفوفة المحسوبة في المعادلة (2-9) من أجل عناصر إيزوتروبية، و $EF(\theta)$ هي عامل العنصر وهو يساوي $EF(\theta) = \cos(\theta)$ من أجل عنصر هوائي دايبول في الحالة المثالية.

يظهر الشكل (٣-٥) استجابة المصفوفة الطورية التقليدية بالإحداثيات القطبية، من أجل الأوزان العقديّة الناتجة من المصفوفة المقترحة عند تغيير الموقع الزاوي للطائرة على كامل المجال الزاوي الموافق لـ $[-90^\circ, +90^\circ]$.

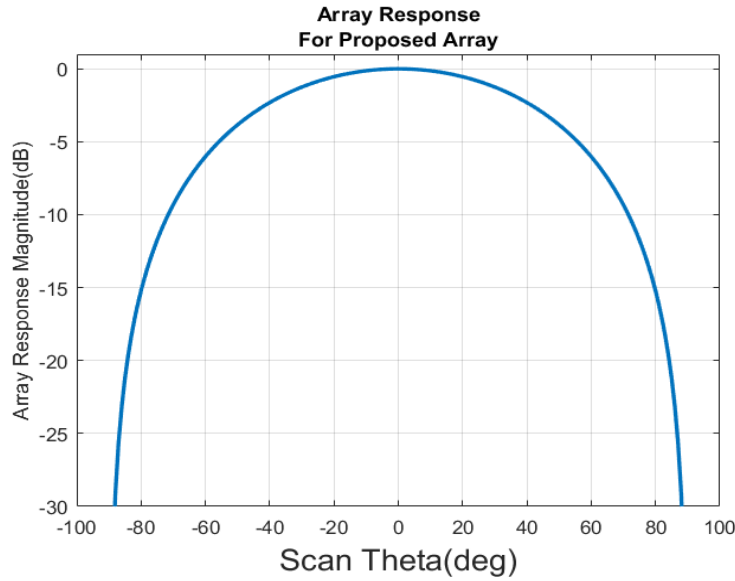


الشكل ٣-٥: ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة.

نلاحظ من الشكل أن المصفوفة المقترحة تولد الأوزان العقديّة المطلوبة لملاحقة الموقع الزاوي للطائرة بشكل أوتوماتيكي ودون الحاجة لاستخدام خوارزمية ملاحقة. أي سيتم الاستقبال بشكل دائم من قمة المخطط الإشعاعي خلال حركة الطائرة وهذا سيضمن تأمين وصلة معطيات هابطة ذات ربح عالي وبشكل دائم.

يمكن من الشكل السابق استنتاج استجابة المصفوفة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة، حيث أنها تمثل قمة المخطط الإشعاعي عند كل موقع زاوي، وهذا يتطابق مع استجابة المصفوفة المقترحة المعطاة بالعلاقة (3-15) بعد أخذ عامل العنصر بالاعتبار.

يظهر الشكل ٤-٥ استجابة المصفوفة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة.



الشكل ٤-٥: استجابة المصفوفة المقترحة كتابع للموقع الزاوي للطائرة.

يمكن أن نلاحظ أن استجابة المصفوفة المقترحة تمتلك عرض حزمة $[+45^\circ, -45^\circ]$ وهو مساوي لحقل الرؤية، وبربح مساوٍ لربح المصفوفة التقليدية ضمن هذا المجال. وبالتالي يمكن تمثيل هذه الحالة كما لو أنه تم تعريض حزمة المصفوفة دون تقليل الربح.

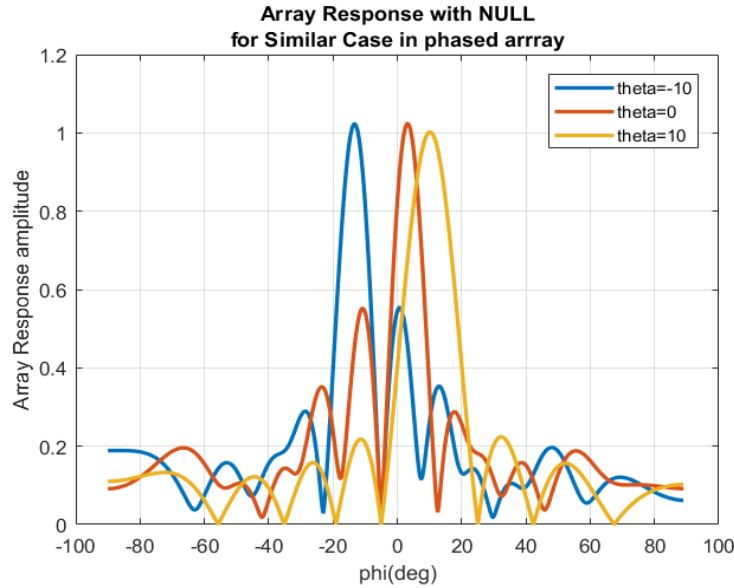
٣-٥: حذف إشارة التشويش

تمكنا من خلال تعريض استجابة المصفوفة لتساوي حقل الرؤية من الحصول على ميزة في غاية الأهمية ألا وهي إبقاء الطائرة ضمن الحزمة الرئيسية للمصفوفة خلال حركتها ضمن حقل الرؤية، ولكن ذلك كان على حساب زيادة احتمال استقبال إشارات التشويش مع إشارة الطائرة، مما قد يسبب فشل تحقيق الوصلة بين الطائرة والمحطة الأرضية وبالتالي فشل تحقيق مهمة الطيران المسير. لذلك قمنا بتلافي هذه المشكلة عن طريق استخدام طريقة "خطأ التربيعات الأصغري لتشكيل المخطط الإشعاعي مع تصفير" Least Squares Error Pattern Synthesis with Nulls لحذف إشارة التشويش الواردة من مصدر معروف.

سيتم في هذه الفقرة اختبار قدرة المصفوفة المقترحة على حذف إشارة التشويش من خلال استخدام نفس سيناريو الاختبار السابق للتحقق من الأوزان العقدية الناتجة من تطبيق طريقة أصغر تربيعات الخطأ على الأوزان العقدية (للمصفوفة المقترحة) الممثلة بالمعادلة (3-25).

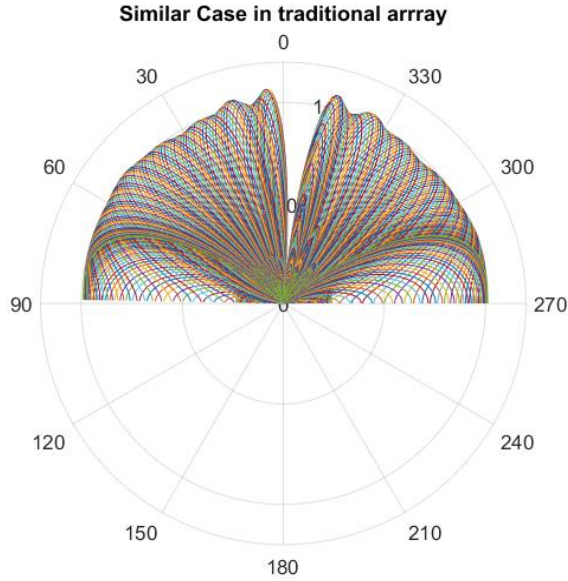
تم فرض وجود مشوش على الموقع الزاوي 5° ، ثم تم أخذ الأوزان العقدية (للمصفوفة المقترحة) الناتجة من المعادلة (3-25) من أجل مواقع زاوية مختلفة للطائرة ومن ثم تطبيقها في المعادلة

(21-2) لحساب الأوزان العقدية المطلوبة لتشكيل المخطط الإشعاعي باتجاه الطائرة مع صفر باتجاه المشوش. تم التحقق من هذه الأوزان الناتجة بتطبيقها على مصفوفة تقليدية مشابهة. يظهر الشكل ٥-٥ المخطط الإشعاعي الناتج من كل من هذه الأوزان العقدية لكل موقع زاوي للطائرة على حدى.



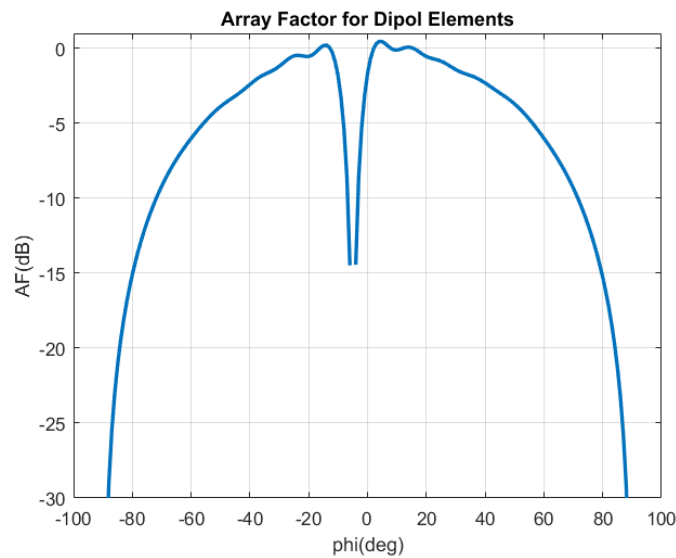
الشكل ٥-٥: المخطط الإشعاعي مع إمكانية تطبيق أصفار.

نلاحظ أن المخطط الإشعاعي الناتج يمتلك قمة موجهة نحو الموقع الزاوي للطائرة، وصفر باتجاه المشوش، من أجل مواقع زاوية مختلفة للطائرة. سنقوم في الخطوة التالية برسم استجابة المصفوفة المقترحة بعد إضافة إمكانية تطبيق أصفار على استجابة المصفوفة. فقد تمت محاكاة حركة الطائرة ضمن القطاع الزاوي $[-90^\circ + 90^\circ]$ ، و تطبيق السيناريو في الفقرة السابقة، بحيث تم أخذ الأوزان العقدية الناتجة من كل موقع زاوي بعد تطبيق طريقة خطأ التربيعات الأصغري عليها من أجل مشوش على الموقع الزاوي 5° - وتطبيقها على المصفوفة الطورية التقليدية المشابهة، و من ثم رسم استجابة المصفوفة من أجل هذه الأوزان العقدية. يظهر الشكل (٦-٥) الاستجابة الناتجة.



الشكل ٦-٥: الاستجابة الناتجة بعد تطبيق طريقة أصغر تربيعة الخطأ بالإحداثيات القطبية.

يمكن من خلال الشكل ٦-٥ استنتاج استجابة المصفوفة المقترحة من جهة أنها تساوي قمة المخطط الإشعاعي عند كل موقع زاوي وبالتالي استقبال إشارة الطائرة بريح عالٍ بشكل دائم، و تساوي صفر باتجاه المشوش وبالتالي حذف الإشارة الواردة من الموقع الزاوي للمشوش. يظهر الشكل ٧-٥ استجابة المصفوفة المقترحة من تطبيق الأوزان العقدية الناتجة من طريقة أصغر تربيعة الخطأ على معادلة استجابة المصفوفة (3-15) بعد أخذ عامل العنصر الدايبولي بالاعتبار.



الشكل ٧-٥: استجابة المصفوفة المقترحة مع امكانية تطبيق أصفار.

يمكن أن نلاحظ أن استجابة المصفوفة المقترحة تملك عرض حزمة مساوٍ لحقل الرؤية مع إمكانية تطبيق أصفار ضمن الحزمة الرئيسية.

٥-٤: حساب خطأ التوجيه بوجود الضجيج وخطأ الطور

تم في هذه الفقرة اختبار تأثير الضجيج وخطأ الطور على دقة التوجيه للمصفوفة المقترحة ومقارنته مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية بناءً على المصفوفة الطورية التقليدية. حيث تم تعريف خطأ التوجيه (BPE) هنا على أنه الفرق بين زاوية توجيه الحزمة لمصفوفة الملاحقة والموقع الزاوي للطائرة المسيرة.

يمكن تعريف زاوية توجيه الحزمة على أنها الزاوية التي تمتلك عندها استجابة المصفوفة أكبر قيمة، وهي تعطى بالعلاقة:

$$B(\theta_{\max}) = \max(|B(\theta)|^2) \quad (2-5)$$

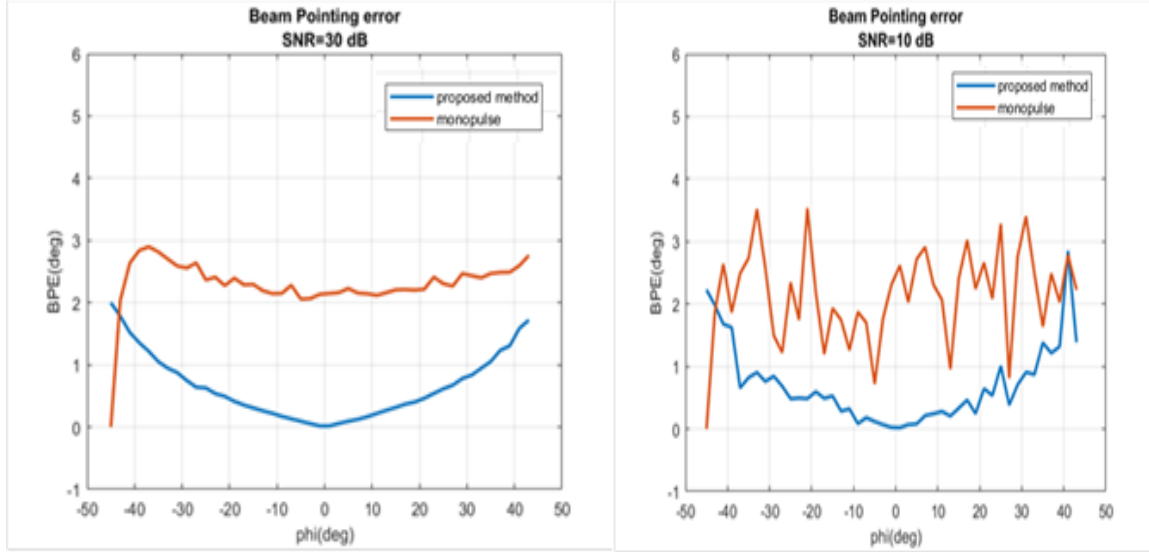
وبالتالي يكون خطأ التوجيه:

$$BPE = |\theta_{\max} - \theta_{UAV}| \quad (3-5)$$

تم حساب θ_{\max} للمصفوفة المقترحة من أجل كل موقع زاوي للطائرة، بأخذ الأوزان العقدية الناتجة عند هذا الموقع الزاوي وتطبيقها على مصفوفة تقليدية مشابهة كما في الفقرة (٥-١)، ومن ثم إيجاد الزاوية التي يملك عندها المخطط الإشعاعي أكبر قيمة.

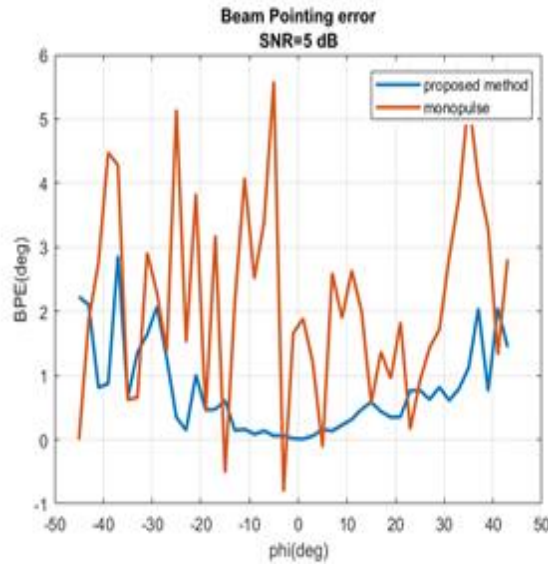
تم في هذه الفقرة محاكاة حركة الطائرة ضمن حقل الرؤية $[+45^\circ, -45^\circ]$ وإجراء الملاحقة من قبل كل من المصفوفة المقترحة ومصفوفة النبضة الأحادية من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى الضجيج، وكذلك من أجل قيم مختلفة لانحراف خطأ الطور.

تظهر الأشكال (٥-٨) ((a,b,c) خطأ التوجيه خلال عملية الملاحقة لكل من المصفوفة المقترحة ومصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى الضجيج، حيث تم اعتبار انحراف خطأ الطور يساوي الصفر والمصفوفة مؤلفة من ثمانية عناصر بمسافة بين عناصرها تساوي نصف طول الموجة.



(a)

(b)

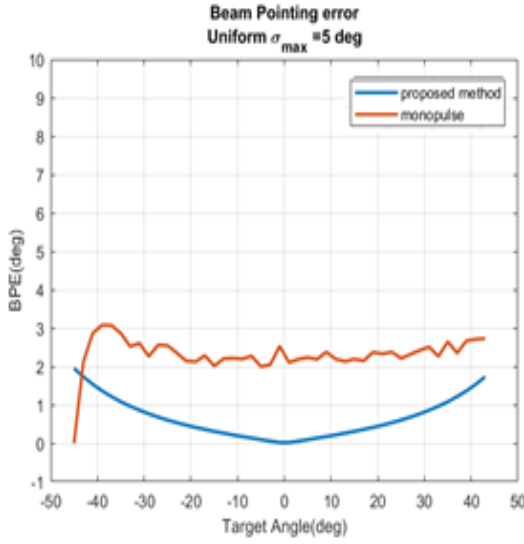


(c)

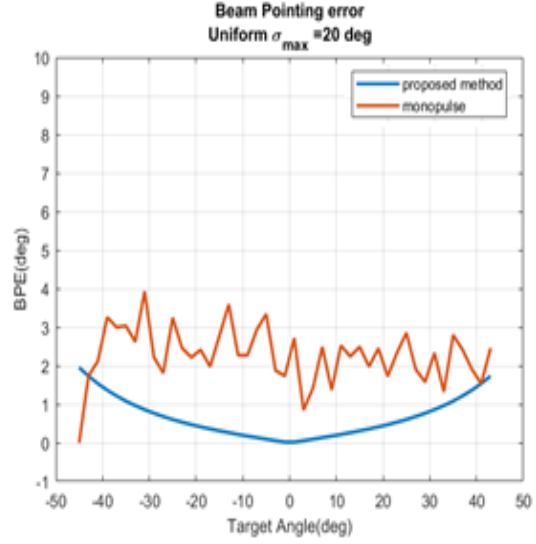
الشكل ٥-٨: خطأ التوجيه عند (a:SNR=30dB, b: SNR=10dB, c: SNR=5dB)

تؤكد هذه النتائج ما ذكرناه سابقاً أن تقنية النبضة الأحادية حساسة لزيادة مستوى الضجيج [٧]- [٩][١٦] مما سيؤدي إلى زيادة خطأ التوجيه. من هنا تأتي أهمية الطريقة المقترحة فهي أقل تأثراً بزيادة مستوى الضجيج. مع ملاحظة أنه من أجل قيمة SNR=5dB فإن أداء مصفوفة الماحقة المقترحة سيبدأ بالانحراف نتيجة الاقتراب من حدود الفرض أن الحل المقترح يعمل من أجل قيم منخفضة للضجيج.

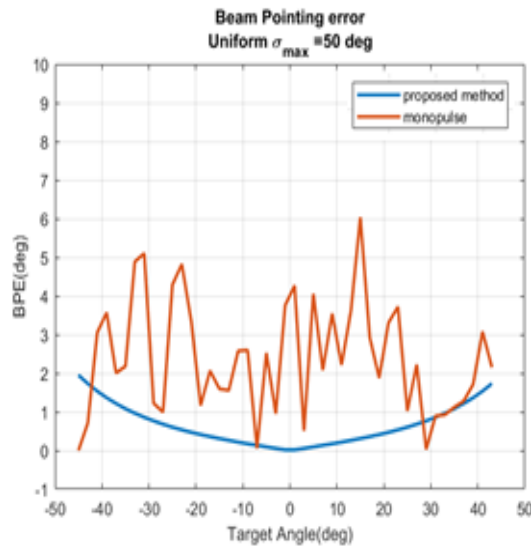
لتقييم أثر خطأ الطور على خطأ التوجيه، تم اعتبار خطأ الطور كمتحول عشوائي يملك توزيع منتظم. تظهر الأشكال (9-5) ((a,b,c) خطأ التوجيه خلال عملية الملاحقة لكل من المصفوفة المقترحة ومصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية من أجل قيم مختلفة لانحراف الطور وعند $SNR=30dB$.



(a)



(b)



(c)

الشكل 9-5: خطأ التوجيه عند ($a: \sigma_{max} = 5^\circ$, $b: \sigma_{max} = 20^\circ$, $c: \sigma_{max} = 50^\circ$)

نلاحظ مما سبق أن خطأ التوجيه للمصفوفة المقترحة لا يتأثر بخطأ الطور لأنه سيتم تعويض خطأ الطور لكل قناة في المصفوفة نتيجة تضمين خطأ الطور في الوزن العقدي المرافق، بينما يتأثر خطأ التوجيه بشكل كبير بخطأ الطور في مصفوفة الملاحقة التي تستخدم تقنية النبضة الأحادية.

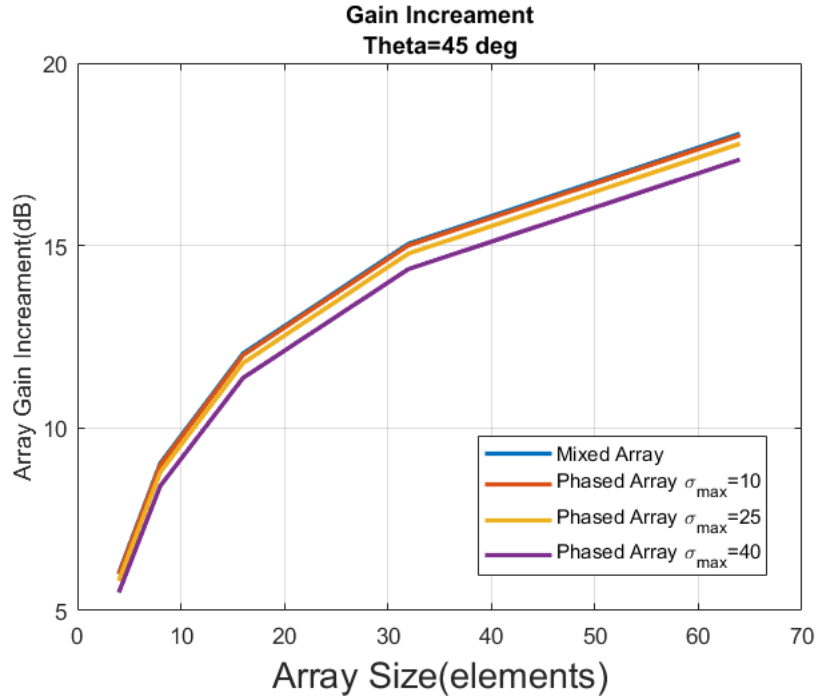
٥-٥: تحليل أثر الضجيج الحراري على مصفوفة الملاحقة

تم في هذه الفقرة استخدام نتائج الدراسة التحليلية التي أنجزت في الفصل الرابع لتحليل أثر الضجيج على أداء كل من المصفوفة المقترحة والمصفوفة الطورية التقليدية. كما تمت مناقشة محددات استخدام المصفوفة الطورية التقليدية لبناء مصفوفة ملاحقة. حيث تم في المرحلة الأولى اختبار تأثير خطأ الطور على معامل الربح للنظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأنتية، ثم في المرحلة الثانية تم اختبار تأثير خطأ الطور على الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج للنظام المكافئ لكل من المصفوفة المقترحة والمصفوفة التقليدية. و من ثم تم أخذ حالة مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية كمثال.

جرى اختبار تأثير خطأ الطور على الحد من أثر زيادة حجم المصفوفة (عدد عناصر المصفوفة) على الربح للنظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأنتية، باستخدام المعادلات (4-17) و (4-39) لكل من المصفوفة المقترحة و المصفوفة الطورية التقليدية، تم هذا الاختبار وفق السيناريو التالي: بفرض أن المصفوفة موجهة نحو الموقع الزاوي 45° و أن خطأ الطور هو عبارة عن متحول عشوائي يملك توزيع منتظم و $SNR=30dB$. يظهر الشكل ٥-١٠ تأثير خطأ الطور على تزايد الربح كتابع لحجم المصفوفة، حيث تم تعريف تزايد الربح وفق العلاقة التالية:

$$G_{inc} = 10 \log \left(\frac{G_{eff}}{G} \right) \quad (4-5)$$

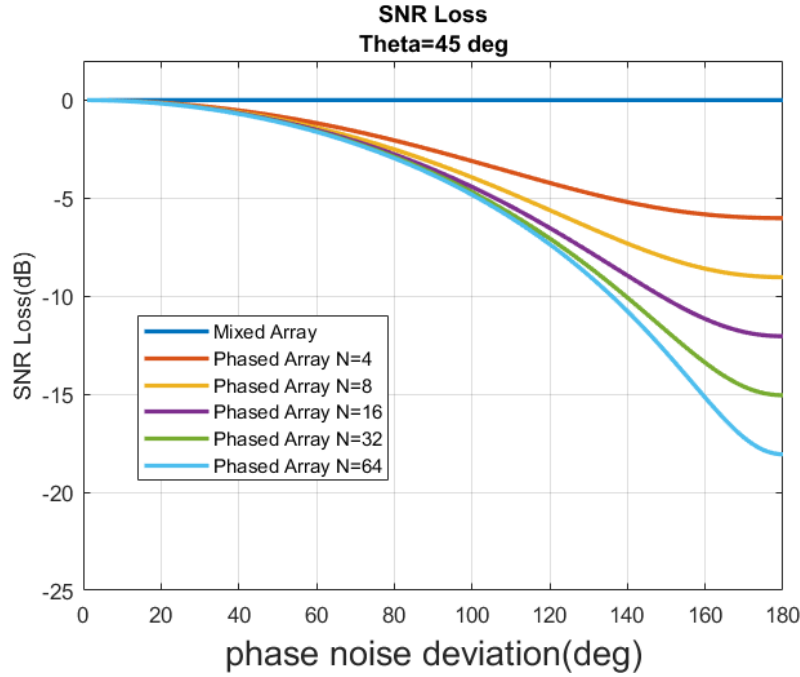
حيث G تمثل الربح في القناة المفردة للمصفوفة و G_{eff} هو معامل الربح للنظام أحادي القناة المكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأنتية.



الشكل ١٠-٥: تأثير خطأ الطور على تزايد الربح كتابع لحجم المصفوفة

نلاحظ انه نتيجة تعويض اثر خطأ الطور في المصفوفة الهجينة (المقترحة) فإن تابع تزايد الربح يملك منحنى واحد من أجل كل قيم انحراف خطأ الطور في الشكل ١٠-٥، وبالتالي فإن الربح المكافئ يتزايد بشكل متناسب مع عدد عناصر المصفوفة. بينما بالنسبة للمصفوفة التقليدية فإن خطأ الطور سيؤدي إلى تقليل الربح بالنسبة لنفس عدد العناصر، ومن جهة أخرى سيحد خطأ الطور من تأثير زيادة حجم المصفوفة على تزايد الربح.

تُستخدم الهوائيات المصفوفية عادة في الاستقبال لتعزيز الإشارة الواردة من اتجاه معين بمقابل الضجيج وبالتالي تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة، ولكن هذا الأداء سينحرف نتيجة لوجود خطأ الطور الذي سيؤثر كما ذكرنا على الربح للمصفوفة وكذلك على رقم الضجيج. يظهر الشكل ١١-٥ الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة نتيجة خطأ الطور من أجل قيم مختلفة لحجم المصفوفة. تم هنا أيضا فرض أن خطأ الطور هو متحول عشوائي يملك توزيع منتظم.

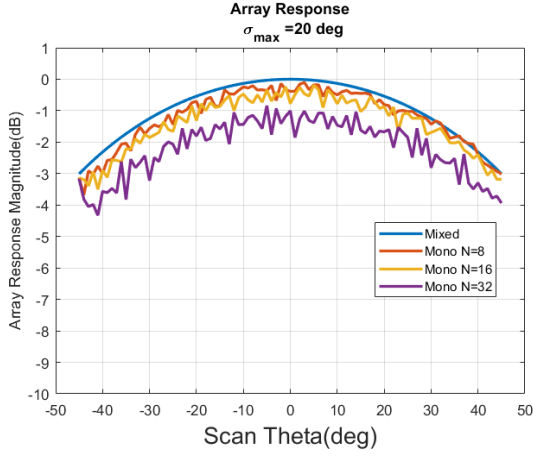


الشكل ١١-٥: الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج.

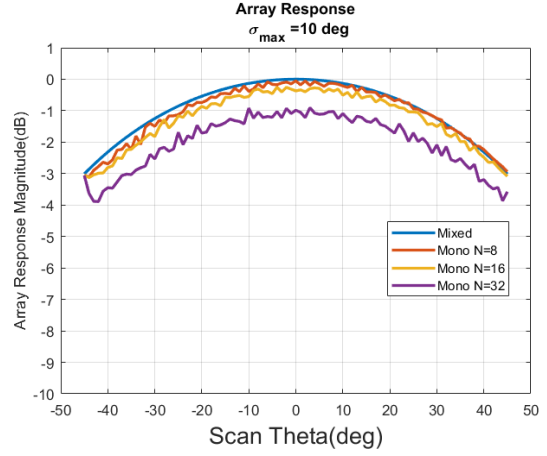
نلاحظ هنا أيضا أنه نتيجة تعويض خطأ الطور في استجابة المصفوفة الهجينة فإنه تم إلغاء تأثير خطأ الطور على نسبة الإشارة إلى الضجيج، وبالتالي فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج المصفوفة الهجينة ستناسب مع نسبة الإشارة إلى الضجيج على خرج القناة المفردة من المصفوفة وفقا لعدد عناصر المصفوفة. بينما بالنسبة للمصفوفة التقليدية فإن وجود خطأ الطور سيؤدي إلى تناقص نسبة الإشارة إلى الضجيج من أجل نفس عدد عناصر المصفوفة، ومن جهة ثانية فإن زيادة عدد عناصر المصفوفة سوف يزيد من تأثير خطأ الطور على الضياع في نسبة الإشارة إلى الضجيج. من هنا فإن استخدام مصفوفات كبيرة يتطلب درجة عالية من المعايرة لعناصر المصفوفة لتقليل خطأ الطور.

بالتالي يمكن أن نرى من النتائج السابقة أن استخدام المصفوفة الطورية التقليدية لبناء مصفوفة ملاحقة يضيف مصدر إضافي لتناقص نسبة الإشارة إلى الضجيج، فبالإضافة إلى قيمة خطأ التوجيه لخوارزمية الملاحقة المطبقة والتي تؤدي إلى انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج على الخرج كما ناقشنا في المعادلة (4-1)، فإن تناقص نسبة الإشارة إلى الضجيج نتيجة أخطاء الطور سيكون عامل إضافي يؤثر على المدى الأعظمي للملاحقة والذي قد يؤدي إلى الضياع في وصلة المعطيات بين الطائرة المسيرة والمحطة الأرضية وبالتالي فشل تحقيق مهمة الطيران المسير.

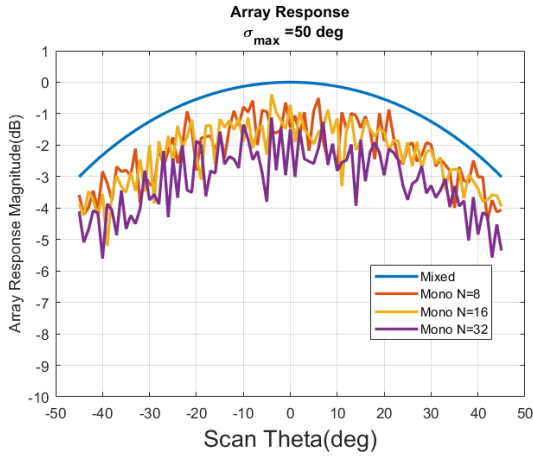
يظهر الشكل (١٢-٥) مقارنة استجابة المصفوفة الهجينة (المقترحة) مع استجابة مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية مبنية باستخدام المصفوفة الطورية التقليدية، عند ملاحقة طائرة تتحرك ضمن حقل الرؤية $[-45^\circ, +45^\circ]$ ، من أجل قيم مختلفة للانحراف المعياري لخطأ الطور وعند قيم مختلفة لحجم المصفوفة و من أجل $\text{SNR}=30\text{dB}$.



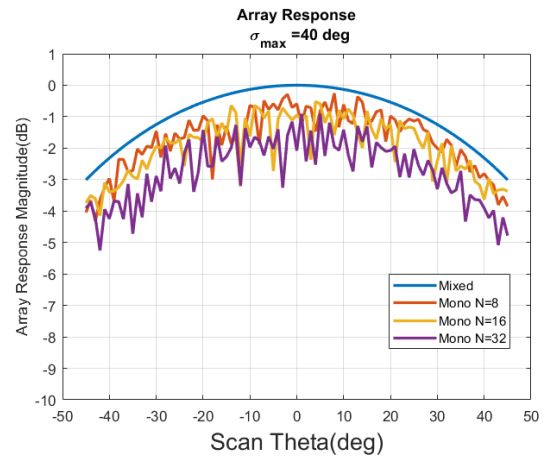
(a)



(b)



(c)



(d)

الشكل ١٢-٥: استجابة مصفوفة الملاحقة الهجينة واستجابة مصفوفة الملاحقة باستخدام خوارزمية النبضة الأحادية عند ($\text{a: } \sigma_{max} = 20^\circ$, $\text{b: } \sigma_{max} = 10^\circ$, $\text{c: } \sigma_{max} = 50^\circ$, $\text{d: } \sigma_{max} = 40^\circ$)

يمكن أن نلاحظ أن أداء الملاحقة لمصفوفة الملاحقة التي تستخدم تقنية النبضة الأحادية يتأثر نتيجة الضياع في الربح الناتج عن كل من خطأ التوجيه وتناقص نسبة الإشارة إلى الضجيج بسبب أخطاء الطور الذي يزداد تأثيره مع زيادة عدد عناصر المصفوفة، بينما أداء مصفوفة الملاحقة الهجينة مستقر وبالتالي فإن زيادة عدد عناصر المصفوفة سيحسن نسبة الإشارة إلى الضجيج. يظهر جليا بنتيجة هذه المقارنة بأن المصفوفة الهجينة قد أظهرت دقة توجيه وأداء أفضل بالمقارنة مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية بناءً على المصفوفة الطورية التقليدية.

٦-٥: الميزات التطبيقية لمصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي

تم في هذه الفقرة مناقشة مصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي من وجهة نظر الكيان الصلب لتطبيقها على بطاقة FPGA من حيث تقليل العمليات الحسابية المطلوبة وإلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة، وبالتالي تقليل استهلاك الموارد الحسابية في بطاقة FPGA. تم بعد ذلك مقارنة هذه الطريقة المقترحة مع الطرق التقليدية المستخدمة من حيث تعقيد الكيان الصلب واستهلاك الموارد في بطاقة FPGA، ومن ثم تم عرض استجابة المصفوفة باستخدام برنامج Quartus II من أجل تطبيقها على بطاقة FPGA. وفي القسم الأخير تم طرح إمكانية بناء نظام ملاحقة قليل التعقيد باستخدام الدارة Cyclone II FPGA التي تعتبر دارة بسيطة بالمقارنة مع الدارات المستخدمة لبناء أنظمة الملاحقة.

تشكيل المخطط الإشعاعي باستخدام بطاقة FPGA:

تقدم بطاقة الـ FPGA موارد حسابية من أجل تطبيق مجال واسع من خوارزميات تشكيل المخطط الإشعاعي. تتطلب أغلب هذه الخوارزميات حساب مصفوفة الترابط الذاتي للمعطيات المستقبلية، كما تتطلب حساب مقلوب مصفوفة وغيرها من العمليات الرياضية المعقدة والتي تتطلب عمليات الفاصلة العائمة [٥٨-٦٤]، وبالتالي يتم تقسيم المعالجة إلى وحدات (كتل) تطبق على الدارات المنطقية باستخدام لغة VHDL ووحدات (كتل) تطبق على معالجات مدمجة (embedded processors) والتي تقدم إمكانيات الفاصلة العائمة والبرمجة بلغة عالية المستوى. كذلك قد تتطلب الخوارزميات معطيات خارجية، مثل DOA للمرسل والتي قد ترد من جهاز خارجي (قد يكون حاسب).

تميزت الطريقة المقترحة بقدرتها على تشكيل المخطط الإشعاعي دون الحاجة إلى تلك العمليات المكلفة حسابيا. تم في هذه الفقرة توضيح هذه المسألة من خلال مناقشة عملية حساب الأوزان العقدية في الطريقة المقترحة، من وجهة نظر الكيان الصلب، ومقارنتها مع عملية حساب الأوزان العقدية في الطرق التقليدية.

تم في الفقرة (٣-٢-١) إثبات أنه تم تبسيط عملية توليد الأوزان العقدية المطلوبة لكل قناة في مصفوفة الملاحقة المقترحة، إلى عملية ضرب وجمع لمركبات الإشارات المستقبلية. باستخدام المعادلة (3-20) يمكن كتابة المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية للوزن العقدي لكل قناة كما يلي:

$$w_{n_re}^* = \cos(\phi_{gn}) = I_0 I_n + Q_0 Q_n \quad (5-5)$$

$$w_{n_im}^* = \sin(\phi_{gn}) = Q_0 I_n - I_0 Q_n \quad (6-5)$$

نجد من هذه المعادلات انه يمكن حساب مركبات الوزن العقدي المطلوب دون الحاجة إلى تقدير زاوية الورد، ودون الحاجة إلى حساب التوابع المثلثية $\sin()$ و $\cos()$ (عادة تحسب باستخدام جداول معرفة مسبقا)، وبالتالي يمكن تنفيذها على بطاقة FPGA باستخدام الخلايا المنطقية logic cells الأساسية (ضواري وجوامع) والتي تبرمج باستخدام لغة توصيف الكيان الصلب VHDL ودون الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة المطلوبة عادة لحساب مقلوب مصفوفة أو لتنفيذ عمليات القسمة والتي تستهلك كمية كبيرة من الموارد الحسابية للبطاقة [٦٥-٦٦].

تم اختيار البطاقة Cyclone II كمثال على بطاقة بسيطة نسبيا ومنخفضة التكلفة لتنفيذ خوارزمية الملاحقة المقترحة من أجل مصفوفة هوائيات خطية بأربع أمتية، حيث تبين من خلال المحاكاة باستخدام برنامج Quartus II، أن عملية حساب الأوزان العقدية تستهلك فقط ٥٤٥ خلية منطقية ودون الحاجة إلى استخدام جداول معرفة مسبقا أو معطيات خارجية. كما أنه تم استخدام نمط المعطيات "معطيات صحيحة" (Integer type) لإنجاز العملية.

يمكن إظهار الفرق الذي قدمته الطريقة المقترحة من خلال المرور على عملية حساب الأوزان العقدية في بعض الطرق التي تطبق تقنيات تشكيل المخطط الإشعاعي على بطاقة FPGA وهي كالتالي:

❖ حساب شعاع الأوزان weight vector بطريقة المسح الإلكتروني للحزمة

الرئيسية [١٨][٢٦]: يتم إيجاد الأوزان العقدية من خلال مسح كل الزوايا الممكنة ضمن المجال $[-90^\circ, +90^\circ]$ وقياس استطاعة خرج المصفوفة بحيث يملك طيف الاستطاعة

(power spectrum) قمة عندما يكون شعاع الأوزان المعطى هو شعاع الأوزان العقديّة الموافقة لزاوية الوصول للإشارة، يعطى طيف استطاعة خرج المصفوفة بالعلاقة.

$$P(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |B_k|^2 \quad (8-5)$$

حيث B_k هي استجابة المصفوفة من أجل العينة k من إشارات الدخل.

تتطلب هذه الطريقة تكرار حساب استجابة المصفوفة عند كل زاوية مسح والذي يستهلك ٦٢١ خلية منطقية في المرة الواحدة. وهي عملية تستغرق زمن وتتطلب استخدام جداول معرفة مسبقاً لتخزين قيم شعاع الأوزان عند كل زاوية المسح، وبالتالي تستهلك موارد إضافية من بطاقة الـFPGA.

❖ حساب شعاع الأوزان بطريقة بارتليت لتقدير الاتجاه Bartlett DoA

Estimator [٥١] [٦٢]: يتم الحصول على طيف الاستطاعة كتابع لزاوية الورد والذي يسمى بالطيف الفراغي (spatial spectrum) وفق العلاقة.

$$P(\theta) = \frac{a(\theta)^H \hat{R}_{xx} a(\theta)}{N^2} \quad (9-5)$$

حيث أن $a(\theta)$ هو شعاع التوجيه عند الزاوية θ ، و R_{xx} تمثل مصفوفة الترابط الذاتي

للإشارات المستقبلية على أفضية الهوائي المصفوفي وهي تعطى بالعلاقة $\hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K XX^H$.

يتم اعتبار شعاع الأوزان المطلوب هو الشعاع الموافق للقمة المحلية لطيف الاستطاعة، وتعطى الأوزان العقديّة وفق العلاقة.

$$W = \frac{a(\theta)}{\sqrt{a(\theta)^H a(\theta)}} \quad (10-5)$$

نلاحظ أن هذه الطريقة تحتاج إلى حساب مصفوفة الترابط الذاتي بالإضافة لحاجتها إلى استخدام جداول معرفة مسبقاً لأخذ قيم شعاع التوجيه عند زوايا المسح، على سبيل المثال عند تطبيقها على مصفوفة خطية من أربع أفضية (في المرجع [٥١]) فقد استهلكت ٨٤٦٧ خلية منطقية.

❖ حساب شعاع الأوزان باستخدام خوارزمية **minimum variance distortionless response (MVDR)** لتشكيل المخطط الإشعاعي [٦١-٦٣]: يعطى طيف الاستطاعة

كتابع لزاوية الورود (الطيف الحيزي spatial spectrum) وفق العلاقة.

$$P(\theta) = \frac{1}{a(\theta)^H \hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)} \quad (11-5)$$

وتعطى الأوزان العقدية وفق العلاقة.

$$W = \frac{\hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H \hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)} \quad (12-5)$$

نلاحظ أن هذه الطريقة تحتاج إلى حساب مصفوفة الترابط الذاتي ومقلوب هذه المصفوفة وهي عمليات مكلفة حسابيا وتتطلب إما عدد كبير من البتات أو عمليات الفاصلة العائمة [٦٢]. يتم تنفيذ هذه العملية بالتشارك بين الدارات المنطقية ضمن الـ FPGA لحساب مصفوفة الترابط الذاتي التي تبرمج باستخدام VHDL، والمعالج المدمج (embedded microprocessor) والذي يقدم إمكانية حسابات الفاصلة العائمة لحساب مقلوب المصفوفة، كما انها تحتاج إلى خوارزمية تقدير اتجاه لحساب شعاع التوجيه. على سبيل المثال تم في المرجع [٦٢] تحقيق هذه الخوارزمية من اجل هوائي مصفوفي من ثمان أقدية بتقسيم العمل بين كتلة مبرمجة باستخدام لغة VHDL لحساب مصفوفة الترابط الذاتي وكتلة مبرمجة ضمن المعالج المدمج MicroBlaze والذي يحجز كمية كبيرة من الموارد الحسابية للبطاقة لحساب مقلوب مصفوفة الترابط الذاتي، كما تحتاج هذه الخوارزمية إلى معلومات خارجية مثل معلومة زاوية الورود و التي تحسب باستخدام مستقبل معرف برمجيا (software-defined receiver)، وبالتالي زيادة تعقيد النظام.

أظهرت الأمثلة السابقة التبسيط الذي قدمته الطريقة المقترحة لحساب الأوزان العقدية المطلوبة لتشكيل وتوجيه المخطط الإشعاعي لمصفوفة الهوائيات نحو الطائرة لإبقاء الطائرة على قمة المخطط الإشعاعي وبالتالي تأمين وصلة هابطة ذات ربح عالٍ بشكل دائم.

يظهر الجدول (٥-١) مقارنة تعقيد حساب الأوزان العقدية في الطريقة المقترحة وبعض الطرق التقليدية.

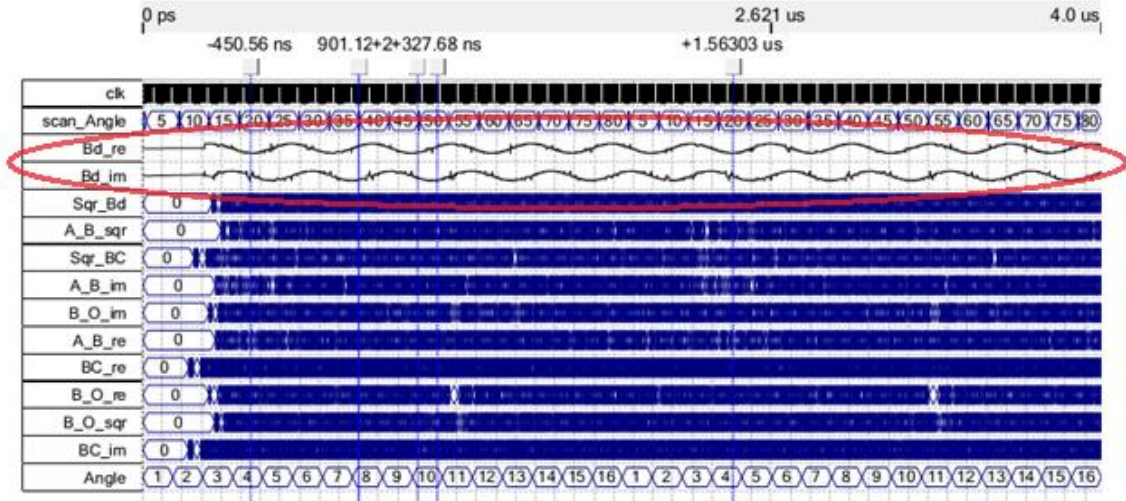
الجدول ٥-١ مقارنة تعقيد حساب الأوزان العقدية في الطريقة المقترحة وبعض الطرق التقليدية.

طريقة الملاحظة	طريقة حساب شعاع الاوزان العقدية	الحاجة إلى		استهلاك الخلايا المنطقية (خلية منطقية)
		معطيات خارجية	عمليات الفاصلة العائمة	
المصفوفة الهجينة (الطريقة المقترحة)	$w_{n,re}^* = I_{ref}I_n + Q_{ref}Q_n$ $w_{n,im}^* = Q_{ref}I_n - I_{ref}Q_n$	×	×	٥٤٥
المسح الالكتروني	$P(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^N |B_k|^2$	√	×	٦٢١ في المرة الواحدة
بارتليت	$P(\theta) = \frac{a(\theta)^H R_{xx} a(\theta)}{N^2}$ $W = \frac{a(\theta)}{\sqrt{a(\theta)^H a(\theta)}}$	√	×	٨٤٦٧
MVDR	$P(\theta) = \frac{1}{a(\theta)^H R_{xx}^{-1} a(\theta)}$ $W = \frac{R_{xx}^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H R_{xx}^{-1} a(\theta)}$	√	√	embedded micro-processor

استجابة المصفوفة المقترحة باستخدام بطاقة FPGA:

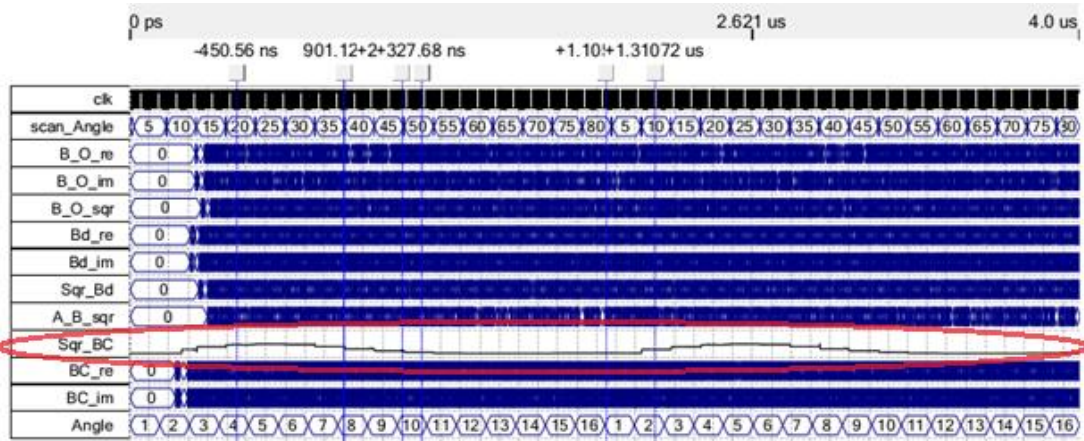
تم استخدام بيئة البرمجة Quartus II لمحاكاة تنفيذ طريقة الملاحظة المقترحة، حيث تم بناء الكتل اللازمة لتنفيذ عملية الملاحظة باستخدام لغة توصيف الكيان الصلب (VHDL).

يظهر الشكل ٥-١٣ المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة المصفوفة المقترحة المحسوبة وفق المعادلة (3-15) عند تغير زاوية الورود ضمن المجال $[0^\circ + 90^\circ]$.



الشكل ٥-١٣: المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة المصفوفة على خرج بطاقة الـFPGA.

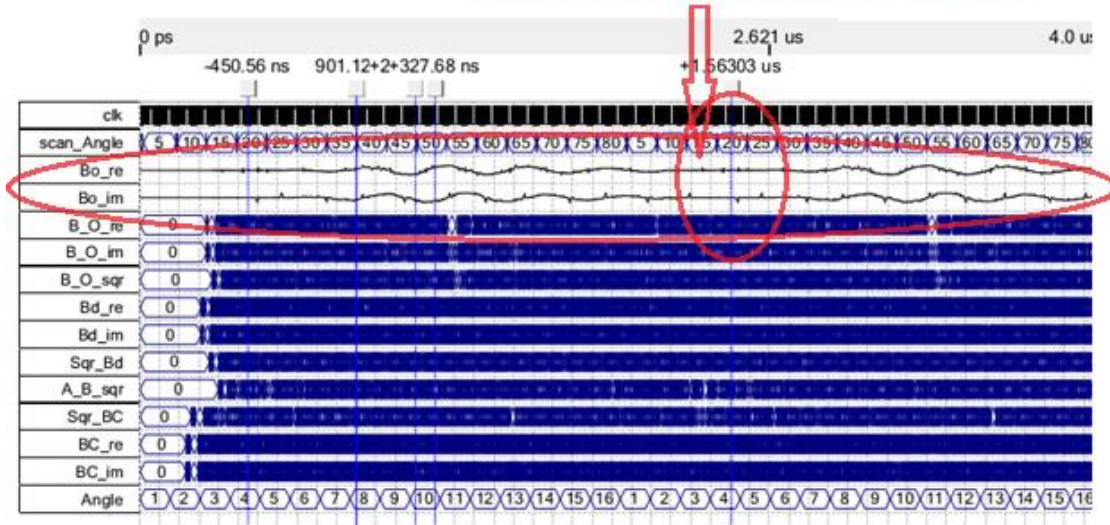
تم أيضا اختبار عملية تطبيق الأصفار على استجابة المصفوفة المقترحة عند تنفيذها على بطاقة FPGA، حيث تم فرض وجود مشوش عند الزاوية ٢٠°. يظهر الشكل ٥-١٤ المخطط الإشعاعي التقليدي باتجاه المشوش والذي يستخدم في المعادلة (2-23). لتوليد صفر باتجاه المشوش.



الشكل ٥-١٤: المخطط الإشعاعي التقليدي باتجاه المشوش.

يظهر الشكل ٥-١٥ المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة مع تطبيق أصفار و المحسوبة وفق المعادلة (2-23).

NULL towards the interference source



الشكل ١٥-٥ المركبة الحقيقية والمركبة التخيلية لاستجابة مصفوفة الملاحقة المقترحة على خرج بطاقة الـ FPGA مع تطبيق أصفار.

نظام الملاحقة المقترح:

تم بناءً على الدراسة السابقة طرح إمكانية بناء نظام ملاحقة قليل التعقيد باستخدام الدارة Cyclone II FPGA التي تعتبر دارة بسيطة ومنخفضة الثمن بالمقارنة مع غيرها من دارات الـ FPGA المستخدمة لبناء أنظمة الملاحقة [٥١][٦٢-٦٣].

من الناحية العملية نحن بحاجة إلى عدد من المبدلات التماثلية الرقمية يساوي ضعف عدد عناصر مصفوفة الهوائيات لتحصيل المركبات المتعامدة للإشارات المستقبلية على هوائيات المصفوفة بشكل متزامن، وهذا سيزيد من تعقيد وتكلفة النظام وهو مانسعى لتجنبه. لذلك تم الاستفادة من تقنية المبدلات التماثلية الرقمية متعددة الأقدية. تعمل أقدية هذه المبدلات بشكل متزامن وترسل الإشارات الرقمية إلى بطاقة الـ FPGA بشكل تسلسلي وفق تقنية الإشارة التفاضلية ذات الجهد المنخفض (Low Voltage Differential Signaling (LVDS)). يؤمن نقل المعطيات بشكل تسلسلي تقليل عدد خطوط النقل بشكل كبير، ولكن ذلك سيكون على حساب الحاجة لمعدل نقل بتات عالٍ. وهذا أيضا في الحالة العامة يتطلب استخدام بطاقة FPGA معقدة نوعا ما، وهو أيضا ما نسعى لتجنبه.

تم اختيار المبدل التماثلي الرقمي ADS5294 الذي يملك ثمانية أقدية وهو مناسب لتحصيل الإشارات من مصفوفة مؤلفة من أربع هوائيات. يملك هذا المبدل إمكانية إرسال الإشارات الرقمية التسلسلية لكل قناة على خطين ضمن ما يسمى 2-wire LVDS وهذا يحقق تخفيض معدل نقل

البتات بدرجة كبيرة، حيث تم تهيئة المبدل ليعمل بنمط 2-wire LVDS و بسرعة تبديل (80 MSample/sec) وبدقة (12 bit)، وبالتالي فإن معدل نقل البتات المطلوب هو

$$80 \times 3 = 240 \text{ Mbit/sec}$$

هذا الرقم يعتبر مناسب للبطاقة Cyclone II التي تم اختيارها من حيث عدد الخطوط التفاضلية المتوفرة ومعدل نقل البتات.

الفصل السادس

ملخص البحث والآفاق المستقبلية

٦-١: ملخص البحث

تم في هذا البحث دراسة أنظمة ملاحقة الطيران المسير و تعريف وصلة المعطيات الهابطة المطلوب تحقيقها بين الطائرة المسيرة والمحطة الأرضية ، وتحديد المعاملات المحددة لجودة تحقيق الوصلة وهي خطأ التوجيه، استطاعة الإشارة المستقبلية، وسرعة إعادة التقاط إشارة الطائرة عند حدوث انقطاع في الوصلة (الفصل الأول).

تمت دراسة المصفوفات المستخدمة لتحقيق نظام ملاحقة بشكل عام (المصفوفة الطورية و مصفوفة التوجيه العكسي) وتم شرح ميزات ومساوى كل منهما (الفصل الثاني).

تم اقتراح طريقة جديدة لتحقيق ملاحقة إشارة الطيران المسير من خلال ملاحقة الموقع الزاوي للطائرة في المنظومات التي تستخدم المصفوفات الطورية، حيث تم عرض المخطط الصندوقي وإيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة المصفوفة المقترحة، كما تم استنتاج ميزات استجابة المصفوفة المقترحة من حيث زيادة عرض الحزمة والحفاظ على الربح عالي، تعويض تأثير خطأ الطور، والقدرة على تطبيق الأصفار ضمن الحزمة الرئيسية (الفصل الثالث).

تم تقديم دراسة تحليلية لأثر الضجيج على أداء مستقبل المصفوفة الطورية التقليدية وتطبيق هذه الدراسة على المصفوفة المقترحة لتقييم أدائها وإظهار التحسين الذي تقدمه (الفصل الرابع).

تم اختبار البنية المقترحة لمصفوفة الملاحقة من خلال محاكاة ملاحقة طائرة مسيرة تتحرك ضمن حقل الرؤية $[+45^\circ -45^\circ]$ ومن أجل قيم مختلفة للضجيج وانحراف الطور، حيث تمت مقارنة أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية على مصفوفة طورية تقليدية. لإظهار التحسين الذي قدمته المصفوفة المقترحة على معاملات تحقيق الوصلة (الفصل الخامس).

٦-٢: مزايا الطريقة المقترحة

- ١- تمتاز الطريقة المقترحة بسهولة تطبيقها، فهي لا تحتاج إلى عمليات معالجة إشارة معقدة. كما أنه يمكن تطبيقها على أي نظام مستقبل مصفوفة طورية، نظراً لعدم حاجتها إلى مكونات خاصة لتحقيق عملية الملاحقة.
- ٢- أعطى استخدام تقنية مرافق الصفحة إمكانية لإيجاد الصفحة الهندسية لكل قناة في المصفوفة من خلال الضرب العقدي للأشعة العقدية الممثلة للإشارات المستقبلية لاغيا الحاجة إلى استخدام خوارزميات معالجة معقدة (تحديد الإتجاه والملاحقة) مما ساهم في تقليل تعقيد نظام الملاحقة.
- ٣- ألقى استخدام مركبات الإشارة IQ في المجال القاعدي الحاجة لاستخدام معالجات رقمية عالية السرعة وكذلك مبدلات رقمية ذات سرعة عالية نسبياً، مما ساهم بتقليل تكلفة وتعقيد النظام، وأعطى الإمكانية لتطبيق كامل المعالجة إما باستخدام بطاقة FPGA بسيطة أو باستخدام تقنية الراديو المعرف برمجياً SDR.
- ٤- تمتلك مصفوفة الملاحقة الناتجة استجابة بعرض حزمة مساوٍ لحقل الرؤية نتيجة التشكيل الآلي للمخطط الإشعاعي نحو الموقع الزاوي للطائرة، وبالتالي تحقيق وصلة معطيات هابطة دائمة وذات ربح عالٍ.
- ٥- أمكن حذف الإشارات غير المرغوبة ضمن الحزمة الرئيسية لمصفوفة الملاحقة المقترحة وذلك عن طريق إضافة ميزة تطبيق الأصفار على استجابة المصفوفة المقترحة ، وبالتالي تم تحقيق تعريض الحزمة مع الحفاظ على الربح والقدرة على حذف إشارات التشويش.
- ٦- تم تضمين أخطاء الطور الناتجة عن مصادر الضجيج المختلفة لكل قناة في الوزن العقدي المرافق لهذه القناة نتيجة التوصل للأوزان العقدية باستخدام تقنية مرافق الصفحة وبالتالي تم تقليل أثر أخطاء الطور في نظام المصفوفة إلى حالة نظام هوائي مفرد.
- ٧- أعطى توليد نسخة المرافق العقدي للإشارة المستقبلية على كل قناة بشكل منفصل، الإمكانية لتطبيق هذه الطريقة على حالة مصفوفة غير خطية.

٦-٣: آفاق التطوير المستقبلي

يعتبر النجاح باستخدام تقنية مرافق الصفحة لأتمتة عملية ملاحقة الطيران المسير لاستقبال الإشارة المرسله منه بربح عالٍ تطويراً مهماً على استخدام الهوائيات المصفوفية لملاحقة الطيران المسير

من حيث دقة وسرعة الملاحقة ووثوقية الوصلة مع الطائرة، وبالتالي يمكن التوجه مستقبلاً للاستفادة أكثر من ميزات مصفوفة التوجيه العكسي (Retrodirective Array) لبناء نظام ملاحقة أكثر مرونة ومتعدد الوظائف.

سنقدم في هذه الفقرة منحيين للتطوير المستقبلي على مصفوفة الملاحقة المقترحة، للحصول على ميزات أكثر وبالتالي توسيع مجالات تطبيق هذه المصفوفة.

المنحى الأول: هو زيادة حقل الرؤية للمصفوفة من خلال استخدام مصفوفة دائرية، أو مصفوفة متطابقة (conformal array) [٦٦].

المنحى الثاني: هو تعديل تركيبية المصفوفة الهجينة من خلال إضافة ميزة التردد الآلي (frequency autonomous) [٤١-٤٢] المستخدمة في مصفوفة التوجيه العكسي، بحيث تصبح المصفوفة الهجينة قادرة على استقبال الإشارة الواردة بريح عالٍ دون أي معرفة مسبقة باتجاه مصدر الإشارة وكذلك دون أي معرفة مسبقة بتردد الإشارة. بإضافة هذه الميزة تصبح المصفوفة الهجينة مناسبة لبناء نظام كشف طيران مسير بناءً على تحليل الإشارة المستقبلة من الطائرة [٦٧-٦٩] للدلالة على وجود طائرة مسيرة وإمكانية تحديد نوعها بناءً على بصمة الإشارة المستقبلة ومقارنتها مع بصمة الهدف المخزنة في قاعدة المعطيات لدى النظام.

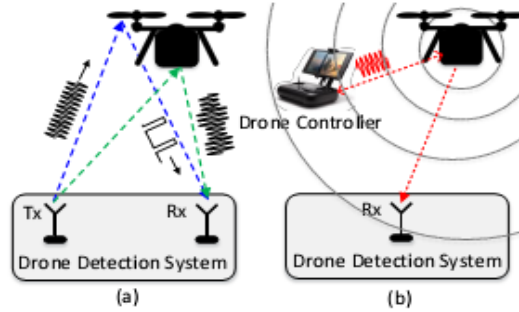
٦-٣-١: زيادة حقل الرؤية لنظام ملاحقة واستقبال إشارة الطائرة المسيرة

أعطى استخدام تقنية مرافق الصفحة لتوليد الصفحة الهندسية لكل قناة بشكل منفصل إمكانية لتحقيق الملاحقة الآلية لإشارة الطائرة المسيرة باستخدام مصفوفة غير خطية. مثلاً يمكن استخدام مصفوفة متطابقة (conformal array) بحيث تثبت على سطح العربة وتأخذ شكل جسم العربة، مما يعطي مرونة في بناء نظام الملاحقة وكذلك يزيد من حقل الرؤية. كما يمكن تطبيق المصفوفة الهجينة على مصفوفة دائرية (circular array) وبالتالي يمكن الحصول على إمكانية كشف ٣٦٠°.

٦-٣-٢: نظام كشف الطيران المسير باستخدام المصفوفة الهجينة

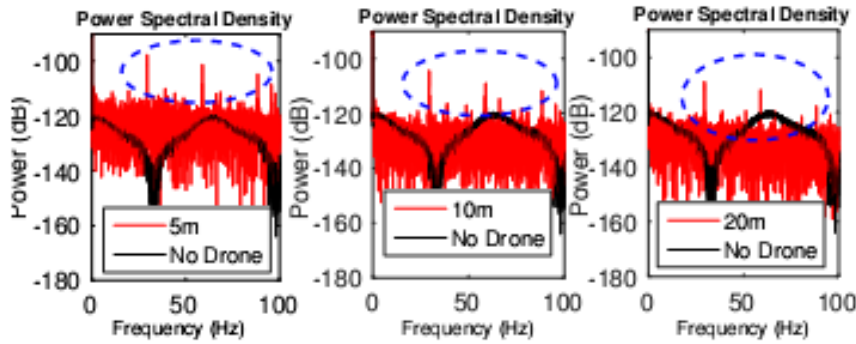
يعتمد نظام كشف الطيران المسير على استقبال الإشارات الراديوية المرسله من الطائرة المسيرة وتحليلها لتحديد مواصفات هذه الإشارة ومقارنتها مع بصمة الطائرة المخزنة في قاعدة المعطيات لدى النظام. يمكن لنظام كشف الطيران المسير أن يعمل إما بنمط فعال على مبدأ النظام الراداري، حيث يرسل النظام إشارة ويراقب الإشارة المنعكسة عن الطائرة، أو يمكن ان يعمل بالنمط السلبي

من خلال التنصت على الاتصالات بين الطائرة المسيرة ومحطتها الأرضية، يظهر الشكل ١-٦ نظام كشف طيران بالنمط الفعال والنمط السلبي [٦٧-٦٩].



الشكل ١-٦: نظام كشف طيران (a: نمط فعال، b: نمط سلبي) [٦٧].

في كلا النمطين فإن النظام بحاجة لاستقبال إشارة الطائرة بريح عالٍ حتى يستطيع تحليل الإشارة واستنتاج بصمة الإشارة لمقارنته مع بصمة الطائرة المخزنة في قاعدة المعطيات لدى النظام. يظهر الشكل ٢-٦ بصمة الإشارة المستقبلية من طائرة مسيرة عند مسافات مختلفة في نظام كشف طيران مسير سلبي.

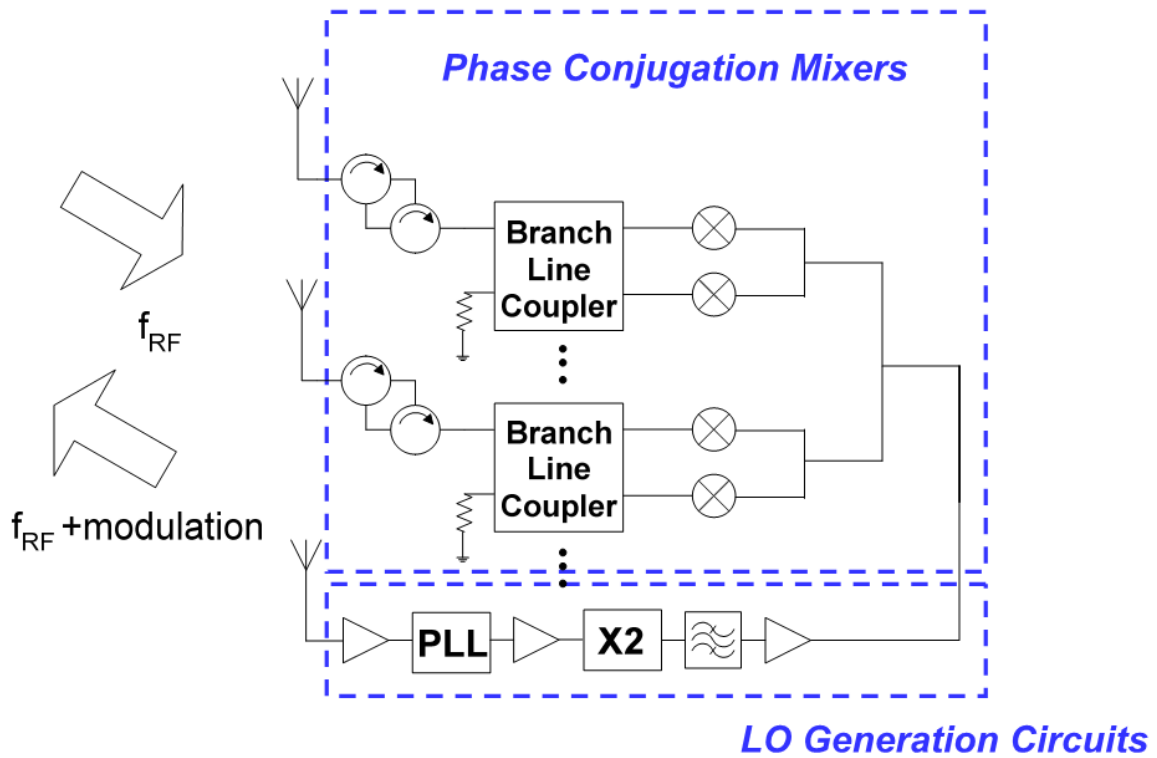


الشكل ٢-٦: بصمة الإشارة المستقبلية من طائرة مسيرة على مسافات مختلفة باستخدام نظام كشف سلبي [٦٧].

في هذا الإطار يقدم استخدام المصفوفة الهجينة في نظام كشف الطيران المسير إمكانية تحسين ربح استقبال الإشارة ودون الحاجة لعمليات معالجة معقدة مع إمكانية تطبيق أصفار باتجاه الإشارات غير المرغوبة.

لكن التنصت على الاتصالات اللاسلكية بين الطائرة المسيرة ومحطتها الأرضية يتطلب معرفة التردد الذي يعمل عليه نظام اتصالات الطائرة. بالتالي يمكن الاستفادة من ميزة التردد الآلي

(frequency autonomous) المستخدمة في مصفوفة التوجيه العكسي لجعل المصفوفة الهجينة قادرة على الملاحقة الأوتوماتيكية لمصدر الإشارة دون معرفة مسبقة بتردداتها. يمكن توضيح ميزة التردد الآلي المستخدمة في مصفوفة التوجيه العكسي من خلال الشكل ٣-٦ الذي يظهر تركيبية مصفوفة توجيه عكسي مع إمكانية التردد الآلي، حيث يتم توليد إشارة الهزاز المحلي من الإشارة المستقبلية باستخدام دائرة استعادة التردد الحامل. تجعل ميزة التردد الآلي مصفوفة التوجيه العكسي قادرة على إعادة إرسال الإشارة باتجاه مصدر الإشارة دون أي معرفة مسبقة بموقع الهدف ودون الحاجة إلى معرفة تردد الإشارة [٤١-٤٢].



الشكل ٣-٦: مصفوفة توجيه عكسي مع إمكانية التردد الآلي [٤١].

يعتبر تطبيق هذه الميزة على المصفوفة الهجينة طورية/توجيه عكسي تطويراً مستقبلياً مهماً لجهة تأمين وصلة هابطة ذات ربح عالٍ بشكل دائم دون أي معرفة مسبقة بتردد الإشارة وبموقع الطائرة وبالتالي يتم استقبال أكبر استطاعة واردة من الطائرة مما يساعد في استخلاص بصمة الإشارة المستقبلية لمقارنتها مع بصمة الطائرة المخزنة في قاعدة المعطيات وكشف الطائرة.

Bibliography

- 1: Hüseyin Okcu: 'Operational Requirements of Unmanned Aircraft Systems Data Link and Communication Systems', Journal of Advances in Computer Networks, Vol. 4, No. 1, March 2016.
- 2: Franc Dimc, Tone Magister: 'Mini UAV communication link systems', Conference: ICTS 2006, International Conference on Traffic Science, December 2006.
- 3: Kimon P. Valavanis George J. Vachtsevanos: 'Handbook of Unmanned Aerial Vehicles', Editors, SpringerScience+BusinessMediaDordrecht 2015.
- 4: Suraj G. Gupta, Mangesh M. Ghonge, Dr. P. M. Jawandhiya: 'Review of Unmanned Aircraft System (UAS)', International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), Volume 2, Issue 4, April 2013.
- 5: Paul Gerin Fahlstrom, Thomas James Gleason: 'Introduction To Uav Systems', 4th ed ©2012 John Wiley & Sons, Ltd.
- 6: Rakesh Kumar Sharma, Braj Bihari Soni: 'Analysis of a Radar system for UAV Tracking using MATLAB', International Journal of Engineering and Technical Research(IJETR)., June 2017, ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P) Volume-7, Issue-6.
- 7: ShihYuan Yeh: 'Development of a Digital Tracking Array with Single-Channel RSNS and Monopulse Digital Beamforming', Naval Postgraduate School, Master's Thesis, December 2010.
- 8: I-Hsiang Leslie Tan, Devicash James Pandya: 'UAV Digital Tracking Array Design, Development and Testing', Naval Postgraduate School, Master's Thesis, December 2009.
- 9: Berat Levent GEZER: 'Multi-Beam Digital Antenna For Radar, Communications, and UAV Tracking Based On Off-The-Shelf Wireless Technologies', Naval Postgraduate School, Master's Thesis, September 2006.
- 10: Lars-Eirik Dalbakk: 'Antenna System for Tracking of Unmanned Aerial Vehicle', Norwegian University of Science and Technology, Master's Thesis, June 2014.
- 11: Stewart Jenvey, Jonas Gustafsson, Fredrik Henriksson: 'A Portable

- Monopulse Tracking Antenna For Uav Communications’, 22nd International Unmanned Air Vehicle Systems Conference – 16-18 April 2007.
- 12: Photo by Photographer’s Mate 2nd Class Daniel J. McLain, “RQ-2B Pioneer UAV,” December 22, 2006. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/18/RQ-2B_pioneer_uav.jpg, [Accessed July 11, 2010].
 - 13: Jonas Gustafsson, Fredrik Henriksson: ‘UAV Tracking Device using 2.4 GHz Video Transmitter’, Luleå University of Technology, Department of Computer Science and Electrical Engineering Division of EISLAB, Master's Thesis 2005:296 CIV.
 - 14: Md Fahmi Abd Samad, Mohd Izhar Harun: ‘In-House Development Of Unmanned Aerial Vehicle Automatic Antenna Tracking System’, Jurnal Teknologi, 76:4 (2015) 113–119.
 - 15: M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", 2nd ed., USA, McGraw-Hill, 1980.
 - 16 David C. Jenn, Notes from EC4610 (Microwave Devices & Radar), Naval Postgraduate School, California, 2010.
 - 17: Caleb Fulton , Mark Yeary , Daniel Thompson ,John Lake , Adam Mitchell: ‘Digital Phased Arrays: Challenges and Opportunities’, Proceedings of the IEEE, Vol. 4, No. 1, March 2016.
 - 18: Iyemeh Uchendu, James Kelly: ‘Survey of Beam Steering Techniques Available for Millimeter Wave Applications’, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 68, 35–54, 2016.
 - 19: Gouri Nayana N, Nishesh Tiwari, Rama Rao: ‘An Overview on Beamforming and its Issues for 60 GHz Wireless Communications’, ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering (ITSI-TEEE), ISSN (PRINT) : 2320 – 8945, Volume -1, Issue -4, 2013.
 - 20: Robert J. Mailloux: ‘Phased Array Antenna Handbook’, 2nd ed —(Artech House antennas and propagation library), 2005.
 - 21: Harry L. Van Trees ‘Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory’, John Wiley & Sons, Inc, New York 2002.
 - 22: Juan A. Torres-Rosario: ‘Implementation Of A Phased Array Antenna Using Digital Beamforming’, University Of Puerto Rico Mayagüez Campus. Master Of Sciences 2005.

- 23 Wim Aerts, Peter Delmotte, and Guy A. E. Vandenbosch, "Conceptual Study of Analog Baseband Beam Forming: Design and Measurement of an Eight-by-Eight Phased Array", IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 57, NO. 6, June 2009.
- 24 Barsa Samantaray, Kunal Kumar Das, Jibendu Sekhar Roy: 'Beamforming in Smart Antenna using Some Variants of Least Mean Square Algorithm', 2nd National Conference on Mechatronics Computing and Signal Processing (MCSP-2017), pp:23-26.
- 25: Jeffrey Foutz, Andreas Spanias, and Mahesh K. Banavar.: 'Narrowband Direction of Arrival Estimation for Antenna Arrays' (Morgan & Claypool Publishers, 2008).
- 26: Youssef Khmou, Said Safi, Miloud Frikel: 'Comparative Study between Several Direction of Arrival Estimation Methods', Journal Of Telecommunications And Information Technology 2014.
- 27: Yogesh P Sajjan, Krishna R, Shahul H: 'FPGA Based Digital Beam Forming For Phased Array Radar', International Journal of Engineering Research and General Science, Volume 3, Issue 5, September-October, 2015.
- 28: Thomas H'ohne, Member IEEE, Ville Ranki:'Phase Noise in Beamforming', IEEE Transactions On Wireless Communications, VOL. 9, NO. 12, December 2010.
- 29: K Ch Sri Kavya, Sarat K Kotamraju, B. Naveen Kumar, M. D. N. S. Mounika, Srote Singh, Ajay Sidda:' Beam Pointing Accuracy Of Phased Arrays For Satellite Communication', Journal of Theoretical and Applied Information Technology, May 2017. Vol.95. No 10.
- 30: Marcos Chi Lim Siu:' Effects Of Local Oscillator Errors On Digital Beamforming', Naval Postgraduate School, Master's Thesis, March 2016.
- 31: Omar Bakr, Mark Johnson:' Impact of phase and amplitude errors on array performance', Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, Technical Report No. UCB/EECS-2009-1, January 1, 2009.
- 32: Mike Golio:' The RF and microwave handbook', CRC Press LLC,2001.
- 33: Mohammad Fakharzadeh, Pedram Mousavi, Safieddin Safavi-Naeini, Syyed Hamidreza Jamali:' The Effects of Imbalanced Phase Shifters Loss on Phased Array Gain', IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, VOL. 7, 2008.

- 34: Y. C. Guo, X. W. Shi, and L. Chen: 'Retrodirective Array Technology', Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 5, 153–167, 2008.
- 35: Lei Chen, Yu Chun Guo, Xiao Wei Shi, and Tian Ling Zhang.: 'Overview on the Phase Conjugation Techniques of the Retrodirective Array', International Journal of Antennas and Propagation, Article ID 564357, 2010.
- 36: Chuo Yang, Ai-xin Chen.: 'A direct conversion phase conjugation arithmetic for retrodirective antenna array system', IEEE, 4th International Symposium on, 2011.
- 37: C. Loadman, Zhizhang Chen: 'A Retrodirective Array Using Direct Down-Conversion and Fixed Point DSP for Duplex Digital Communications', IEEE Radio and Wireless Symposium, 2006.
- 38: So-Ra Kim, Heung-Gyoon Ryu: 'System Design of Digital Retrodirective Array Antenna for the Fast Tracking Performance', 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013.
- 39: Kevin M. K. H. Leong, Yuanxun Wang, Tatsuo Itoh: 'A Full Duplex Capable Retrodirective Array System for High-Speed Beam Tracking and Pointing Applications', IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, VOL. 52, NO. 5, MAY 2004.
- 40: R.Y. Miyamoto, Yongxi Qian, T. Itoh.: 'A Reconfigurable Active Retrodirective/Direct Conversion Receiver Array for Wireless Sensor Systems', IEEE, Microwave Symposium Digest, 2001.
- 41: Kevin M. K. H. Leong, Ryan Y. Miyamoto, Tatsuo Ito: 'Ongoing Retrodirective Array Research at UCLA', Technical Report Of IEICE, SPS2002-08.
- 42: D.S.Goshi, K.M.K.H.Leong, T.Itoh: 'Recent advances in retrodirective system technology', Radio and Wireless Symposium, 2006 IEEE.
- 43: Ryan Y. Miyamoto, Kevin M. K. H. Leong, Seong-Sik Jeon, Yuanxun Wang, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh : 'Digital Wireless Sensor Server Using an Adaptive Smart-Antenna/Retrodirective Array', IEEE Transactions On Vehicular Technology, VOL. 52, NO. 5, September 2003.
- 44: Balaine Murakami: 'Retrodirective antenna Array Design For CUBSAT Applications And CUBESAT Program Management', Department of Electrical Engineering, University of Hawai'i at Manoa, 2002.

- 45: 12. S. Gao, K. Clark, M. Unwin, J. Zackrisson, W. A. Shiroma, J. M. Akagi, K. Maynard, P. Garner, L. Boccia, G. Amendola, G. Massa, C. Underwood, M. Brenchley, M. Pointer, M. N. Sweeting: 'Antennas for Modern Small Satellites', IEEE Antennas and Propagation Magazine, Volume: 51 , Issue: 4 , Aug. 2009.
- 46: Blaine T. Murakami, Aaron T. Ohta, Michael A. Tamamoto, Grant S. Shiroma, Ryan Y. Miyamoto, Wayne A. Shiroma: 'Self-Steering Antenna Arrays for Distributed Picosatellite Networks', 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC03-XI-1, 2003.
- 47: Massimo Donelli, Claudio Sacchi: 'Implementation of a Low-Cost Reconfigurable Antenna Array for SDR-based Communication Systems', 2012 IEEE Aerospace Conference.
- 48: Sung-Hoon Oh, James T. Aberle: 'Reconfigurable Antennas As An Enabling Technology For SDR', Proceeding of the SDR 04 Technical Conference and Product Exposition, Copyright © 2004 SDR Forum.
- 49: P. Ragasudha, B. R. Vikram, K. Sridhar: 'Digital Beam Forming Using Software Defined Radio Based Adaptive Algorithm', International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), ISSN: 2394-3661, Volume-2, Issue-6, June 2015.
- 50: Markku Jokinen, Marko Sonkki, Erkki Salonen: 'Phased Antenna Array Implementation with USRP', 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps).
- 51: Fahri M. Unlersen, Ercan Yaldiz, Sehabeddin T. Imeci: 'FPGA Based Fast Bartlett DoA Estimator for ULA Antenna Using Parallel Computing', Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), Vol. 33, No. 4, April 2018.
- 52: Sarankumar Balakrishnan, Lay Teen Ong: 'GNU Radio Based Digital Beamforming System: BER And Computational Performance Analysis', 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 978-0-9928626-3-3/15/\$31.00©2015 IEEE.
- 53: Junghyun Kim, Jinho Jeong, and Sanggeun Jeon: 'Improvement of Noise Performance in Phased-Array Receivers', ETRI Journal, Volume 33, Number 2, April 2011.
- 54: Saeed V. Vaseghi: 'Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition', Copyright © 2000 John Wiley & Sons Ltd.
- 55: Mohit Kumar, Dileep, K.Sreenivasulu, D.Seshagiri, Durga Srinivas, S.Narasimhan: 'Receive Signal Path Design for Active Phased Array

- Radars’, 9th International Radar Symposium India - 2013 (IRSI - 13).
- 56: Karl F. Warnick , Brian D. Jeffs: ‘Efficiencies and System Temperature for a Beamforming Array’, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, ©2008 IEEE.
- 57: Weimei Li, Bo Liu: ’ A New Method To Measure The Noise Figure Of Multi-Channel Radar Receiving System’, 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2017),Advances in Computer Science Research, volume 62.
- 58 Btissam Boustani, Abdennaceur Baghdad, Aicha Sahel, Abdelmajid Badri, ‘Performance analysis of direction of arrival algorithms for smart antenna’, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 6, 2019.
- 59 Okorogu V.N, Nwalozie G.C, Okoli K.C, Okoye E.D, ‘Design and Simulation of a Low Cost Digital Beamforming (DBF) Receiver for Wireless Communication’, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Volume-2, Issue-2, January 2013.
- 60 Emmanuel Seguin, Russell Tessier, Eric Knapp, and Robert W. Jackson,” A Dynamically-Reconfigurable Phased Array Radar Processing System”, Conference Paper· October 2011.
- 61 Brock J. LaMeres, Raymond J. Weber, Yikun Huang, Monther Abusultan, Sam Harkness, ‘Design and Test of FPGA-Based Direction-of-Arrival Algorithms for Adaptive Array Antennas’, 2011 Aerospace Conference, 2011.
- 62 Carles Fernandez–Prades, Pau Closas, Javier Arribas, ‘Implementation Of Digital Beamforming In GNSS Receivers’, RFCSET, December 2009.
- 63 Xin Guan, Henry Zmuda, Jian Li, Lin Du, “FPGA Implementation of Robust Capon Beamformer”, Proc. of SPIE Vol. 8320 83200G-1, © 2012 SPIE.
- 64 Siavash Amin-Nejad, Katayoon Basharkhah, Tayyebeh Asgari Gashteroodkhani, “Floating Point versus Fixed point Tradeoffs in FPGA Implementations of QR Decomposition Algorithm”, European Journal of Electrical and Computer Engineering (EJECE), Vol. 3, No. 5, September 2019.
- 65 Sarmad F. Ismael, Basil Shukr Mahmood, “A Novel Way to Design and Implement Statistical Operations based on FPGA”, International Journal of Computer Applications, Volume 167 – No.9, June 2017.

-
- 66: Jim S. Sun, Darren S. Goshi, Tatsuo Itoh: 'A Sparse Conformal Retrodirective Array for UAV Application', 2008 IEEE.
 - 67: Phuc Nguyen, Mahesh Ravindranathan, Anh Nguyen, Richard Han, Tam Vu: 'Investigating Cost-effective RF-based Detection of Drones', DroNet'16, Singapore, June 26 2016.
 - 68 Martins Ezuma, Fatih Erden, Chethan Kumar Anjinappa, Ozgur Ozdemir, Ismail Guvenc:'Micro-UAV Detection and Classification from RFFingerprints Using Machine Learning Techniques', IEEE Aerospace Conference 2019.
 - 69 Liming Tang, Hao Wang, Zhengkang Feng, Dalong Xu, Yan Wang, Shuanglong Quan, Wenwen Xu:' Small Phased Array Radar Based on AD9361 For UAV Detection', IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC), 29 July 2019.

الملحق

المقالات العلمية المنشورة

تم خلال العمل في هذا البحث نشر المقالات العلمية التالية في مجلات عالمية محكمة:

- [1]: "Auto Angular Tracking of UAV Based on Mixed Phased/Retrodirective Array" . A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 92, 215-226, 2019.
- [2]: "Forming high gain wide beam with NULL steering ability to receive UAV signal based on phased array antenna", A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri. Journal of Communications Software and Systems(JCOMSS), Vol 15, No 2 (2019).
- [3]: "Improvement of Phase Noise Performance in Tracking Array of UAV Signal Based on Mixed Phased/Retrodirective Array", A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. x, 195-207, 2019.
- [4]: " Low Complex digital tracker of UAV Signal Based on Mixed Phased/Retrodirective Array".

تمّ في المقالة الأولى الحديث عن الدمج بين المصفوفة الطورية ومصفوفة التوجيه العكسي لتحقيق ملاحقة آلية للموقع الزاوي للطائرة بدون طيار وذلك باستخدام تقنية مرافق الصفحة مع ضرب الأشعة العقدية الممثلة للإشارات المستقبلية وذلك لإيجاد الصفحة الهندسية لكل قناة لاغيا الحاجة لاستخدام خوارزمية تحديد اتجاه وخوارزمية ملاحقة، وبالتالي تم تخفيض التكلفة الحسابية لنظام الملاحقة. تم توليد نسخة المرافق العقدي للإشارات المستقبلية باستخدام تقنية مازج الهيرودين في مجال التردد الوسيط. تم دمج خوارزميات تحديد الاتجاه وتشكيل المخطط الإشعاعي والملاحقة بخوارزمية واحدة. تم تقليل تأثير أخطاء الطور إلى حالة هوائي مفرد من خلال تضمين أخطاء الطور لكل قناة في الوزن العقدي المرافق لها. تم أخذ خطأ التوجيه لتقييم أداء مصفوفة الملاحقة المقترحة ومقارنته مع مصفوفة ملاحقة تستخدم تقنية النبضة الأحادية لتشكيل المخطط الإشعاعي الرقمي من أجل مستويات مختلفة للضجيج ومن أجل قيم مختلفة لإنحراف خطأ الطور.

في المقالة الثانية، تم عرض بنية جديدة لمصفوفة ملاحقة تمتلك عرض حزمة استقبال مساوي لحقل الرؤية دون الحاجة لتخفيض الريح، وبالتالي تأمين وصلة معطيات هابطة دائمة ذات ربح عالٍ. ودون الحاجة لاستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المعقدة المستخدمة في الهوائيات الذكية. تعتمد المصفوفة المقترحة على تقنية مرافق الصفحة والضرب العقدي من أجل تشكيل المخطط الإشعاعي. تم إضافة إمكانية حذف الإشارات غير المرغوبة بتطبيق طريقة أصغر تربيعات الخطأ لتشكيل المخطط الإشعاعي مع تصفير. كما تم مقارنة استجابة المصفوفة المقترحة مع استجابة مصفوفة ملاحقة تستخدم خوارزمية النبضة الاحادية لتشكيل المخطط الإشعاعي الرقمي، من أجل قيم مختلفة لانحراف خطأ الطور.

في المقالة الثالثة، تم عرض نسخة محسنة لمصفوفة الملاحقة الهجينة طورية/توجيه عكسي. حيث تم إلغاء مرحلة التردد الوسيط من خلال تحقيق عملية مرافق الصفحة في المجال القاعدي. إن إلغاء مرحلة التردد الوسيط قلل تعقيد وتكلفة النظام. حيث أصبح بالإمكان تنفيذ كامل وظيفة مصفوفة الملاحقة باستخدام تقنية الراديو المعرف برمجا SDR. وبالتالي يمكن تطبيق عملية الملاحقة هذه على أي نظام هوائيات ذكية يعتمد على تقنية الراديو المعرف برمجا ، ودون أي تغيير في وظيفته الأساسية. كما نعرض في هذه المقالة دراسة تحليلية موسعة لأداء المصفوفة بوجود الضجيج حيث تم أخذ خطأ الطور بالاعتبار وبناء نموذج قناة واحدة مكافئ لنظام المصفوفة متعدد الأقبية. تم استخدام معاملات هذا النموذج المكافئ لإظهار التحسين الذي تقدمه المصفوفة المقترحة بالمقارنة مع المصفوفة الطورية التقليدية.

في المقالة الرابعة، تم مناقشة مصفوفة الملاحقة الهجينة الرقمية من وجهة نظر الكيان الصلب لتطبيقها على بطاقة FPGA من حيث تقليل العمليات الحسابية المطلوبة وإلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة، وبالتالي تقليل استهلاك الموارد الحسابية في بطاقة FPGA. حيث تم إيجاد التمثيل الرياضي لاستجابة هذه المصفوفة من وجهة نظر الكيان الصلب من أجل تحقيق عملية الملاحقة باستخدام بطاقة FPGA كما تم إثبات الميزات التطبيقية لمصفوفة الملاحقة المقترحة كحل لمشكلة التعقيد الموجودة في الطرق التقليدية من حيث تقليل كمية العمليات الحسابية المطلوبة وإلغاء الحاجة إلى عمليات الفاصلة العائمة أو الثابتة لتحقيق استجابة المصفوفة بأقل استهلاك لموارد

بطاقة الـ FPGA المستخدمة. تم بعد ذلك مقارنة هذه الطريقة المقترحة مع الطرق التقليدية المستخدمة من حيث تعقيد الكيان الصلب واستهلاك الموارد في بطاقة الـ FPGA، بعد ذلك تم مناقشة إمكانية تحقيق نظام الملاحقة بناءً على هذه المصفوفة باستخدام كيان صلب قليل التكلفة وغير معقد من خلال استخدام البطاقة Cyclone II والمبدل التماثلي الرقمي AD5294. تم استخدام برنامج Quartus II لإظهار استجابة المصفوفة المقترحة مع تطبيق أصفار.

[Home](#) > [Vol. 92](#) > pp. 215-226

AUTO ANGULAR TRACKING OF UAV BASED ON MIXED PHASED/RETRODIRECTIVE ARRAY

By A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri

[Full Article PDF \(537 KB\)](#)

Abstract:

A mixed phased array and retrodirective array providing auto tracking of the angular position of the unmanned aerial vehicle (UAV) is presented. The phase conjugation technique and complex vector multiplication are used together to find the geometric phase of each channel canceling the need to use direction finding algorithm (DOA). After generating the phase conjugated version of the received signal on each channel, its complex vector representation will be multiplied by the complex vector representation of the received signal on the reference channel. The UAV will stay on the beak of the array factor during its movement within the field of view (FOV), and a permanent high gain data link is obtained without the need of the tracking algorithm. The beamwidth of the resulted array is widened to be equal to the FOV. The computational cost of the tracking system will be reduced due to canceling the need of using the complex processing algorithms (DOA, and tracking) used in smart antenna. Direction finding algorithm, beamforming algorithm, and tracking algorithm are combined in one algorithm. The least square error pattern synthesis with nulls method is used to eliminate the predefined interference signals and add null steering ability to the resulted array. The effect of the phase errors is reduced to the case of single antenna due to including the phase errors of each channel in its complex weights. The beam pointing error is taken as a metric to evaluate the performance of the resulted array compared with the BPE of a phased array using the monopulse tracking method.

Citation:

A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri, "Auto Angular Tracking of UAV Based on Mixed Phased/Retrodirective Array," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 92, 215-226, 2019.
doi:10.2528/PIERC19012501



References:

1. Okcu, H., "Operational requirements of unmanned aircraft systems data link and communication systems," *Journal of Advances in Computer Networks*, Vol. 4, No. 1, March 2016.
[doi:10.18178/JACN.2016.4.1.199](#)
2. Dime, F. and T. Maester, "Mini UAV communication link systems," *Conference: ICTS 2006, International Conference on Traffic*

Journal of Communications Software and Systems, Vol. 15 No. 2, 2019.

Izvorni znanstveni članak
<https://doi.org/10.24138/jcomss.v15i2.673>

Forming High Gain Wide Beam with NULL Steering Ability to Receive UAV Signal Based on Phased Array Antenna

Alaa Nadim Salman  orcid.org/0000-0003-3108-7033 ; Higher Institute for Applied Science and Technology, Damascus, Syria 

Shokri Almekdad ; Higher Institute for Applied Science and Technology, Damascus, Syria

Mohamad Alhariri ; Higher Institute for Applied Science and Technology, Damascus, Syria

Puni tekst: engleski, pdf (2 MB)

str. 186-192

preuzimanja: 36*

citiraj

Sažetak

Successfully achieving the mission of the unmanned aerial vehicle (UAV) requiring a high gain data link between the UAV and the ground control station (GCS). The antenna of the ground station must have a narrow, precisely guided beam towards the UAV. Widening the beamwidth in phased array will be on the expense of reducing the gain and increasing the possibility of receiving the interference signal, this may lead to the failure in achieving the desired link. This paper presents a new method to achieve an automatic forming of the reception beam and automatic tracking of the UAV's signal in the digital phased array without the need of the complex digital signal processing algorithms used in smart antenna. The proposed approach is based on the complex vector multiplication and phase conjugation technique. The UAV will stay on the beak of the array factor. The resulted array is a combination between retrodirective array and phased array, with beamwidth equal to the field of view without reducing the gain and with null steering ability.

Ključne riječi

Phased Array; phase conjugation; Retrodirective Array; geometric phase; complex vector multiplication; null steering

Hrčak ID: 220971

URI

<https://hrcak.srce.hr/220971>

[Home](#) > [Vol. 95](#) > pp. 195-207

IMPROVEMENT OF PHASE NOISE PERFORMANCE IN TRACKING ARRAY OF UAV SIGNAL BASED ON MIXED PHASED/RETRODIRECTIVE ARRAY

By A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri

[Full Article PDF \(425 KB\)](#)

Abstract:

An improved mixed phased/retrodirective array is presented. The phase conjugation technique will be achieved in base band instead of in intermediate frequency (IF) band. Canceling the need to the intermediate frequency stage in the receiver will reduce the complexity and cost of the system. The ability to the entire processing of the tracking array function to be applied using software defined radio (SDR) system is added. The effect of the phase errors at each channel is compensated phased array, and the noise performance of the tracking array is improved. Also an expanded analytical study of the noise performance of the array to include the impact of the phase errors on the array performance is presented. The proposed equivalent one-channel model of the N-channel array provides a clear and efficient way to characterize the noise performance of array receiver systems with any amplitude tapering and also considering the phase errors. The improvement provided by the mixed phased/retrodirective array compared to the traditional phased array is evaluated. The of array size on the tracking array performance in the presence of phase error is discussed. A monopulse tracking array is taken as an example.

Citation:

A. Salman, S. Almekdad, and M. Alhariri, "Improvement of Phase Noise Performance in Tracking Array of UAV Signal Based on Mixed Phased/Retrodirective Array," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 95, 195-207, 2019.

References:

Low Complex Digital Tracker of UAV Signal Based on Mixed Phased/Retrodirective Array

Alaa Salman¹, Shokri Almekdad², Mohamad Alhariri³

^{1,2,3}Department of communication engineering, Higher Institute for Applied Sciences and Technology, Damascus, Syria

Article Info

Article history:

Keywords:

Phased Array
Retrodirective Array
Geometric Phase
FPGA
Beamforming

ABSTRACT

Data downlink from the unmanned aerial vehicle (UAV) to the ground control station (GCS) is the most influential in the success of UAV mission. The achievement of a high gain downlink is related to the ability of the GCS antenna to keep the UAV on the peak of the radiation pattern. Any tracking and receiving system using phased array antennas, depends on the beamforming techniques based on the angle of arrival estimation. Most of the beamforming techniques require computation of the auto-correlation matrix and the cross-correlation matrix of the received data, as well as the computation of the inverse matrix that require floating-point operation. The complexity of the tracking system is reduced by proposing a tracking array based on mixing phased array and retrodirective array to achieve automatic tracking of the UAV signal and without the need for the sophisticated signal processing algorithms used in smart antennas. This proposed tracking array has the ability to keep the UAV on the peak of the radiation pattern with null steering ability due to investing the phase conjugation technique to find the geometric phase of the array channels. In this paper, the digital mixed phased/retrodirective tracking array is discussed from the point of view of the hardware in order to applying it to an FPGA in terms of reducing the required mathematical operations and eliminating the need for floating point operations, thus reducing the consumption of the computational resources in FPGA. A low-complex tracking system has proposed using a simple cycloneII FPGA card with an eight-channel analog to digital converter that works simultaneously and communicates with FPGA using 2-wire low-voltage differential signals (2wire LVDS). Quartus II is used to show the response of the proposed tracking array with the null steering ability.

Corresponding Author:

Alaa Salman,
Department of communication engineering,
Higher Institute for Applied Sciences and Technology (HIAST),
Damascus, Syria.
Email: alaa.salman@hiast.edu.sy
