

تأثير تغير بارامترات هوائيات المصفوفة الخطية على عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة

د. محمد نصر *

محمد عبد الكريم عبد الله **

(تاريخ الإيداع 3/ 9/ 2020 . قبل للنشر في 20/ 2/ 2021)

□ ملخص □

تدخل الهوائيات المصفوفة في العديد من نظم الاتصالات الحديثة ولاسيما المحطات الرادارية. ونظراً لأهمية هذه الهوائيات فقد تم في هذا العمل دراسة تحليلية مفصلة لهوائيات المصفوفة الخطية المستخدمة بشكل واسع في أنظمة الرادار والتي تدعى (Uniform Linear Antenna) ULA. تم استخدام برنامج الماتلاب من أجل دراسة العلاقة بين بارامترات هذا النوع من الهوائيات وهي عدد العناصر (M) وطول الموجة (λ) والمسافة بين العناصر (d) مع عرض حزمة الإشعاع (Beam width) عند مستوى نصف الاستطاعة (Half-Power) بهدف الحصول على حزمة إشعاع ضيقة من أجل زيادة التوجيهية والدقة في ملاحقة الأهداف. بناء على النتائج التي تم الحصول عليها في هذا العمل تم تحديد أفضل قيم للبارامترات الهوائي المصفوفة الخطي للحصول على حزمة إشعاع ضيقة عند مستوى نصف الاستطاعة.

الكلمات المفتاحية: ULA (هوائي خطي منتظم)، عدد العناصر (M)، طول الموجة (λ)، المسافة بين العناصر (d)، عرض حزمة الإشعاع (Beam width)، مستوى نصف الاستطاعة (Half-Power).

* مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا
** طالب ماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

Effect of changing linear array antennas parameters on the Beam width at half power level

Dr. Mohammad Nasser*

Mohammad abdalkareem abdallah**

(Received 3/ 9/ 2020 . Accepted 20 / 2/ 2021)

□ ABSTRACT □

array antennas are used in many modern communication systems, especially radar stations. According to the importance of these antennas, a detailed analytical study of linear array antennas which are widely used in radar systems called ULA (Uniform Linear Antenna) has been done in this work. Matlab software has been used to study the relationship between parameters of this type of antenna, these parameters are number of elements (M), the wavelength (λ) and distance between the elements (d) with the beam width at the power-half level. The aim is obtaining a narrow beam radiation in order to increase the direction and accuracy of the target pursuit. Based on the results obtained in this work, the best values of the linear array antenna parameters have been determined to obtain a narrow beam radiation at the level of half the power.

Key Words: Uniform Linear Antenna(ULA), Number of elements (M), Wave length(λ), distance between the elements (d), Beam width, Half-Power.

* Teacher, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

** Master student, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

1. المقدمة

تطور دور الرادار في العديد من المجالات ولاسيما التطبيقات العسكرية، وأصبح عاملاً مهماً وخصوصاً مع السرعة العالية والتطور الكبير للطيران الحديث، ومن هنا كان التطور الكبير في تكنولوجيا الرادار من جيل إلى آخر. استخدمت الهوائيات المتحركة من أجل المسح الإلكتروني للفضاء في كل الأنظمة الرادارية تقريباً في الحرب العالمية الثانية وما تزال قيد الاستخدام في غالبيتها. تفرض المتطلبات الجديدة للأنظمة الرادارية شروط صعبة على بنية الهوائي وتتطلب مسح سريع للفضاء بكتلة الهوائي الضخمة متجنبة أي حركة ميكانيكية شاذة له. أدى ذلك إلى زيادة الاهتمام بهوائيات المسح الإلكتروني التي يبقى فيها الهوائي ثابتاً في الفضاء ومخطط الإشعاع يتحرك عن طريق تشكيل تأخير صفحي متزايد في تغذية عناصر المصفوفة المنتالية وقد سميت هذه الهوائيات بالهوائيات الصفحية (Phased Antennas) [1].

في أواسط عام 1970 بدأ استخدام الهوائيات الصفحية الخطية الموجهة (Directional Phased Antennas)، حيث ظهرت الهوائيات التي تقوم بتوجيه مخطط الإشعاع إلكترونياً بالسمت والارتفاع. إن هوائيات المصفوفة المتحكم بها إلكترونياً تعطي الرادار المرونة المطلوبة من أجل القيام بجميع وظائفه المختلفة بأفضل شكل يلائم المهمة المحددة [2].

تمتلك هوائيات المصفوفة الصفحية الخطية مجموعة من المزايا غير موجودة عموماً في أنواع الهوائيات الأخرى [3]. هذه المزايا هي:

- مخطط الإشعاع في هوائي المصفوفة الصفحية قادر على مسح مجال معين من الفضاء دون الحاجة إلى تحريك كتلة الهوائي الضخمة.
- يمكن لهوائي المصفوفة أن يشكل عدة حزم إشعاع مستقلة بشكل لحظي.
- إن هوائيات المصفوفة الصفحية قادرة على إعطاء استطاعة إشعاعية كبيرة باستخدام مرسلات منفصلة لكل عنصر من عناصر المصفوفة.

لقد ترافق التطور في هوائيات المصفوفة بتطور تقنيات وتكنولوجيا معالجة الإشارة الرادارية. إن الهدف من استخدام معالجة الإشارة في رادارات المصفوفة هو إنجاز وظائف لا يمكن إنجازها في الرادارات التقليدية وتتلخص هذه الوظائف بما يلي:

- كشف مجموعة كبيرة من الأهداف ومعرفة عددها.
- دقة عالية في كشف وتحديد بارامترات الهدف بالمقارنة مع رادار تقليدي له نفس حجم الهوائي.
- إمكانية حذف إشارات التشويش (التداخل) القادمة من منابع غير معروفة وإعطاء قيمة عظمى للإشارة المفيدة.

قامت العديد من الأبحاث بدراسة الهوائيات المصفوفة الخطية. قام R.L.Haupt [4] بتطبيق الخوارزمية الجينية GA على هوائيات المصفوفة الخطية والمستوية من أجل تخفيض مستوى الوريقات الجانبية. وقام V.Rajyalaksmi [5] بتطبيق الخوارزمية الجينية GA على هوائيات المصفوفة الخطية الرقيقة (thinning).

قام الدكتور السموعل صالح وتاج الدين جركس [6] بإدخال مفهوم الهندسة التجزئية إلى الهوائيات المصفوفة وأوضحوا أن الهوائي المصفوفي التجزئي لديه معاملات تصميمية أكثر، وبالتالي إمكانية أفضل في تحديد الهوائي المطلوب لتطبيق ما، وتم مقارنة الهوائي المصفوفي التجزئي مع الهوائي المصفوفة الخطي. قام Ash.M و Brennan.V.P و Tanha.A.M [7] بتصميم شبكة توزيع طاقة ومحاكاتها باستخدام مقسم الطاقة ويلنكسون لتعيين مقدار الطاقة المطلوبة إلى العناصر المتداخلة، ويمكن استخدام البنية المقترحة فقط في تكوينات المصفوفة الصفحية غير المتماثلة، و بين الباحثون Tanha.A.M و Brennan.V.P و Ash.M [8] أن مقسم الطاقة star-Wilkinson يمكن استخدامه لتغذية العناصر المتداخلة للمصفوفة الصفحية.

قام S. F. Maharimi و M. F. Jamlos و M. F. A.Malek [9] بدراسة تأثير عدد العناصر على معامل المصفوفة في الهوائيات المصفوفة الخطية، وتم الاستنتاج أن معامل المصفوفة يزداد كلما زاد عدد العناصر و أنه يمكن تحسين معامل المصفوفة للهوائيات المصفوفة الخطية لعدد مختلف من العناصر عن طريق تغيير التباعد بين هذه العناصر .

قام Md. Rafiqul Islam و Md. Shazzadul Islam و Asif Jamil Sahad [10] بتصميم وتحليل الهوائيات المصفوفة غير المنتظمة (Non-Uniform Planar Antenna Array) وتم اقتراح تقنية جديدة لتطوير هذا النوع من الهوائيات وهي إزاحة عناصر الصف الثاني من مصفوفة الهوائيات مع تغيير زاوية الطور للصف الأول، وتم التوضيح أنه من خلال هذا الحل المقترح تم تخفيف الاقتران المتبادل بين العناصر .

2. أهمية البحث وأهدافه

تبرز أهمية البحث في دراسة تأثير تغيير بارامترات الهوائي المصفوفة الخطي نظراً للاستخدام الواسع لهذه الأنواع من الهوائيات على عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة، وتكمن أهمية هذا البحث في تحديد أفضل قيم لبارامترات الهوائي الخطي للحصول على حزمة إشعاع ضيقة وبالتالي زيادة في الريح والتوجيهية للهوائي والحصول على دقة كبيرة لأنظمة الرادار في ملاحقة الأهداف.

3. طرائق البحث ومواده

3-1- معالجة الإشارة الرادارية

يرسل الرادار نبضة معدلة على تردد حامل، حيث يدور هوائي الرادار (التقليدي) ليمسح كافة الإتجاهات، وأدى استخدام هوائيات المصفوفة الطورية إلى عدم الحاجة لتحريك الهوائي حيث يتم إعطاء كل عنصر شعاعي في مصفوفة الهوائي قيمة زاوية الطور المطلوبة له وبهذه الطريقة يتم تحريك مجسم الإشعاع من دون

تحريك الهوائي، وعندما تصطدم نبضة الرادار المرسله بالهدف المتحرك بسرعة v ، تتعكس عنه وتتزاخ بالتردد بمقدار تردد دوبلر fd ، وتكون متأخرة زمنياً بمقدار t_0 [11-12].

3-2- المجالات الترددية المستخدمة في الرادارات

تعمل الرادارات على ترددات مختلفة، حيث تعمل رادارات البحث (Search Radars) في المجال الترددي الأدنى

3MHz- 1GHz أما رادارات البحث والملاحقة (Search & Track Radars) فتعمل في المجال

الترددي

1GHz-12GHz، وتعمل رادارات توجيه الصواريخ (Missile Radars) في المجال الترددي العالي

4GHz-40GHz [11-12].

3-3- المصفوفة الخطية:

3-3-1 بنية المصفوفة الخطية:

بشكل عام فإن مخطط الاشعاع لعنصر وحيد يكون واسع نسبياً، وكل عنصر يؤمن قيم منخفضة من التوجيهية (الريح). إن زيادة أبعاد العنصر يمكن أن يزيد من الخصائص التوجيهية، ولكن هناك حل بديل وهو وضع مجموعة من العناصر ذات الأبعاد الصغيرة على طول خط بدون الحاجة لزيادة أبعاد كل عنصر وبالتالي الحصول على توجيهية عالية بالجمع الشعاعي لمخارج العناصر ككل [13].

إن أبسط أشكال المصفوفة هي مصفوفة المشعات النقطية المتساوية البث في كل الاتجاهات (Isotropic) والتي تتوضع في الفراغ على طول خط.

من أجل تبسيط التحليل تعتمد الفرضيات التالية:

نعتبر أن الهدف الراداري يقع في منطقة المجال البعيد للهوائي حيث يتم التعبير عن هذا المجال عموماً عن طريق المدى R ، والذي يجب أن يحقق ما يلي [13]:

$$R \geq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (1)$$

حيث:

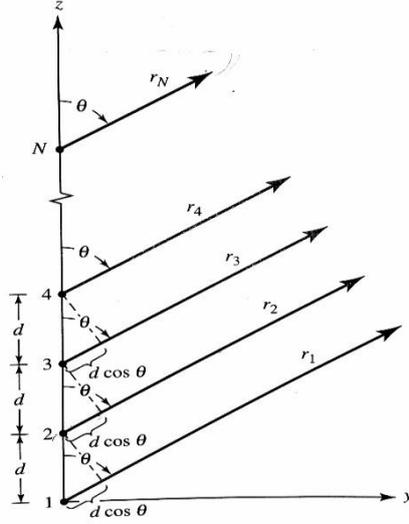
L : هو البعد الأقصى للهوائي.

λ : هو طول الموجة العاملة.

تم في هذا البحث دراسة رادارات البحث التي يكون مجالها الترددي 3MHz- 1GHz وبالتالي تكون λ ضمن المجال 100m-0.3m .

من أجل التبسيط فإن الاهتمام سيتركز على استجابة المصفوفة للإشارات المستمرة (CW) .

بفرض أن مصفوفة ذات عناصر متماثلة عددها N متوضعة على طول المحور Z وبفواصل بين العناصر بمقدار d ، كما هو مبين في الشكل (1)



الشكل (1) الشكل الهندسي [13].

نفرض أن جميع العناصر ذات مطال ثابت ولكن الاختلاف الصفحي بين كل عنصر والذي يليه هو β (صفحة التيار) وبالتالي يمكن التعبير عن الجمع الشعاعي لمخارج العناصر النقطية بمعامل المصفوفة. إذا كانت العناصر غير نقطية (عملية)، فإن الحقل الكلي الناتج عن مجموعة العناصر يتم الحصول عليه عن طريق ضرب معامل المصفوفة بالحقل الكهربائي للعنصر. يعطى معامل المصفوفة بالعلاقة [13]:

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{حيث:}$$

يمكن كتابة المعادلة (2) كما يلي [13]:

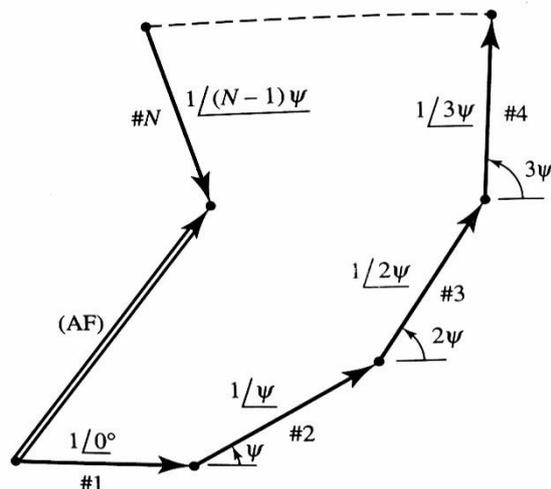
$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (3)$$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta$$

حيث:

بما أن معامل المصفوفة لمصفوفة منتظمة (مطالات العناصر فيها متساوية) يفترض أن يكون أسياً، وبالتالي يمكن التعبير عنه بالجمع الشعاعي لـ N هوائي مصفوفة طور (phased array antenna) وكل واحد بمطال يساوي الواحد وبصفحة β بين العنصر والذي يليه، وهذا موضح بشكل تخطيطي في الشكل (2) الذي يعبر عن مخطط الطور.

الشكل (2) مخطط الطور (phased).



من الواضح من مخطط الطور (phased) أن مطال وشفحة معامل المصفوفة يمكن التحكم بهما عن طريق اختيار الشفحة ψ بين كل عنصر والذي يليه. في حالة المصفوفات غير المنتظمة (مطالات التيارات للعناصر ليست متساوية) وبالتالي يمكن استخدام المطال والشفحة للتحكم بشكل معامل المصفوفة.

يمكن أيضاً التعبير عن معامل المصفوفة (2) كما يلي [13]:

$$AF = e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \quad (4)$$

إذا كانت النقطة المرجعية هي المركز الفيزيائي للمصفوفة، فإن معامل المصفوفة (4) يصبح كما يلي [13]:

$$AF = \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \quad (5)$$

من أجل قيم صغيرة ل ψ فإن العلاقة السابقة يمكن تقريبها لتصبح كما يلي [13]:

$$AF \approx \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (6)$$

إن القيمة الأعظمية ل (5) تساوي N [13].

من أجل الحصول على معامل المصفوفة المسوى تصبح المعادلة السابقة كما يلي [13]:

$$(AF)_n \approx \frac{1}{N} \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \quad (7)$$

ومن أجل قيم صغيرة ل ψ فإن العلاقة (7) تصبح [13]:

$$(AF)_n \approx \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (8)$$

3-3-2- الأنواع الرئيسية للمصفوفة الخطية:

3-3-2-1- المصفوفة العرضانية:

في العديد من التطبيقات من المرغوب الحصول على اشعاع أعظمي للمصفوفة بشكل عمودي على محور المصفوفة

$$\theta = 90^\circ, \text{ الشكل (1).}$$

بالإشارة إلى المعادلتين (7) و (8) فإن القيمة الأعظمية لمعامل المصفوفة تحدث عندما [13]:

$$\psi = kd \cos\theta + \beta = 0 \quad (9)$$

وباعتبار أن القيمة الأعظمية تحدث عند $\theta = 90^\circ$ ، فإن [13]:

$$\psi = kd \cos\theta + \beta|_{\theta=90^\circ} = \beta = 0 \quad (10)$$

وهكذا، للحصول على قيمة أعظمية لمعامل المصفوفة من أجل مصفوفة خطية منتظمة وحيث أن معامل المصفوفة موجه بشكل عمودي على محور المصفوفة، فإنه من الضروري أن تكون جميع العناصر بصفحات تحريض متساوية (بالإضافة إلى أن مطالات التحريض متساوية). كما أن المسافة بين العناصر يمكن أن تكون أية قيمة، ومن أجل ضمان أنه لا توجد قيمة أعظمية أخرى لمعامل المصفوفة باتجاه غير مرغوب والتي تعرف بحزم الاشعاع

الأعظمية المتكررة، فإن المسافة بين العناصر يجب أن لا تكون من مضاعفات طول الموجة ($d \neq n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots$) عندما ($\beta = 0$) وإذا كان
 عندئذٍ [13]:
 $(d = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots)$

$$\psi = kd \cos\theta + \beta |_{d=n\lambda, \beta=0, n=1, 2, 3, \dots} = 2\pi n \cos\theta |_{\theta=0^\circ, 180^\circ} = \pm 2\pi n \quad (11)$$

إن قيمة ψ هذه عند تعويضها بالمعادلة (7) تجعل معامل المصفوفة يبلغ قيمته الأعظمية. وبالتالي فإن المصفوفة المنتظمة مع $\beta = 0$ و $d = n\lambda$ ، بالإضافة إلى أن معامل المصفوفة له قيمة أعظمية عند ($\theta = 90^\circ$)، هناك قيم أعظمية إضافية موجهة باتجاه ($\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ$) بالنسبة لمستوي المصفوفة. أحد أهم الأهداف التصميمية هو تجنب القيم الأعظمية المتعددة ويتم ذلك عن طريق اختيار المسافة بين العناصر ($d_{max} < \lambda$).

3-2-2-3- المصفوفة الطرفية الاعتيادية:

في هذا النوع من المصفوفات بدلاً من أن يكون لوب الاشعاع متعامداً مع مستوى توضع المصفوفة، في بعض الحالات يكون مرغوباً أن يكون لوب الاشعاع باتجاه محور المصفوفة. حيث يمكن أن يكون الاتجاه الأعظمي لمخطط الاشعاع عند ($\theta = 0^\circ$ أو $\theta = 180^\circ$) كما هو موضح في الشكل (1).
 في حالة الاتجاه الأعظمي عند $\theta = 0^\circ$ [13]:

$$\psi = kd \cos\theta + \beta |_{\theta=0^\circ} = kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -kd \quad (12)$$

وفي حالة الاتجاه الأعظمي عند $\theta = 180^\circ$ [13]:

$$\psi = kd \cos\theta + \beta |_{\theta=180^\circ} = -kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = kd \quad (13)$$

وبالتالي فإن الاشعاع الطرفي يتم عندما [13]:

$$\beta = -kd(\text{for } \theta = 0^\circ) \text{ or } \beta = kd(\text{for } \theta = 180^\circ)$$

إذا كانت المسافة بين العناصر من مضاعفات طول الموجة ($d = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots$) بالإضافة إلى وجود اشعاع أعظمي طرفي ينتج لدينا أيضاً اشعاع أعظمي عمودي فضلاً عن وجود اتجاهين أعظميين طرفيين عند ($\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ$).

إذاً، عندما ($d = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots$) يوجد أربعة حزم اشعاع أعظمية اثنين باتجاه عمودي على محور المصفوفة واثنين آخرين باتجاه محور المصفوفة كما في حالة المصفوفة العرضانية، يمكن تجنب ظاهرة تعدد الاشعاعات الأعظمية عن طريق تحديد المسافة بين العناصر وفق العلاقة [13]:
 $(d_{max} < \lambda)$

3-2-3-3- المصفوفة الصفحية (مصفوفة المسح الإلكتروني) :

تم التوضيح سابقاً كيف يتم توجيه الاشعاع الرئيسي الناتج عن المصفوفة. يتم ذلك عن طريق التحكم بالتحريض الصفحي بين عناصر المصفوفة في اتجاهين، إما عمودياً على مستوى المصفوفة أو متوافقاً مع ذلك المستوي.

هذا يعني أنه من المنطقي أن نفترض أن الاشعاع الأعظمي يمكن أن يتم في أي اتجاه لتشكيل مصفوفة ذات مسح الكتروني.

الاجراءات المتبعة في هذه الحالة مشابهة لما سبق في توجيه لوب الاشعاع عمودياً أو أفقياً. يفرض أن الاشعاع الأعظمي يتم بزاوية $(0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ)$ ضمن المجال λ من أجل تحقيق ذلك، يجب ضبط التحريض الصفحي بين العناصر بحيث أن [13]:

$$\psi = kd \cos\theta + \beta|_{\theta=\theta_0} = kd \cos\theta_0 = 0 \Rightarrow \beta = -kd \cos\theta_0 \quad (14)$$

إذاً عن طريق التحكم بالاختلاف الصفحي بين العناصر المتتالية في المصفوفة فيمكن توجيه لوب الاشعاع الأعظمي إلى أي اتجاه مرغوب لتشكيل عملية مسح الكتروني للمصفوفة وهذا هو المبدأ الأساسي لعملية المسح الالكتروني.

بما أن تكنولوجيا المصفوفة الصفحية (المسح الالكتروني) ينبغي أن يكون مستمراً وبالتالي يجب أن تكون عملية تغيير الاختلافات الصفحية بين العناصر مستمرة، في المجال العملي، يتم تحقيق ذلك الكترونياً باستخدام مزيجات الصفحة ذات الديودات أو باستخدام الفريت.

3-3-3- البارامترات الأساسية للمصفوفة الخطية:

(a) النقاط الصفحية للمصفوفة:

من أجل إيجاد النقاط الصفحية لمعامل المصفوفة المعادلة (7) أو (8) يتم وضع معامل المصفوفة مساوياً للصفر، وبالتالي [13]:

$$\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) = 0 \Rightarrow \frac{N}{2}\psi|_{\theta=\theta_n} = \mp n\pi \Rightarrow \theta_n = \cos^{-1}\left[\frac{1}{2\pi d}(-\beta \mp \frac{2n}{N}\pi)\right] \quad (15)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

بينما : $n \neq N, 2N, 3N, \dots$ في العلاقة (7)

إن قيم n (عدد العناصر) تحدد ترتيب الأصفار (أولاً، ثانياً،.....الخ).

لكي يكون الصفر موجوداً، فإن القيمة المطلقة للدالة \arccosine يجب أن لا تزيد عن الواحد، وبالتالي

فإن عدد النقاط الصفحية سوف يكون تابعاً للمسافة بين العناصر بالإضافة إلى الاختلاف الصفحي β .

(b) القيم الأعظمية للمصفوفة:

القيم الأعظمية للمعادلة (8) تحدث عند [13]:

$$\frac{\psi}{2} = \frac{1}{2}(kd \cos\theta + \beta)|_{\theta=\theta_m} = \mp m\pi \Rightarrow \theta_m = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm 2m\pi)\right] \quad (16)$$

معامل المصفوفة في المعادلة (8) لديه فقط قيمة أعظمية تحدث عند $m=0$ كما في المعادلة (16) وهذا يعني أن [12]:

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda\beta}{2\pi d}\right) \quad (17)$$

حيث:

θ_m : تعبر عن زاوية النظر التي تجعل $\psi = 0$.

(c) نقطة ال 3dB للمصفوفة:

إن نقطة 3dB لمعامل المصفوفة (8) يحدث عند [13]:

$$\frac{N}{2}\psi = \frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)|_{\theta=\theta_n} = \pm 1,391 \quad (18)$$

$$\Rightarrow \theta_h = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (19)$$

والتي يمكن أن يعبر عنها كما يلي [13]:

$$\theta_h = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (20)$$

من أجل قيم كبيرة جداً ل ($d \gg \lambda$)، يتم اختصار العلاقة إلى [13]:

$$\theta_h \approx \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (21)$$

(d) عرض الحزمة عند منتصف الاستطاعة:

يمكن إيجاد عرض الحزمة عند منتصف الاستطاعة θ باستخدام زاوية القيمة الأعظمية الأولى (θ_m) وزاوية نقطة منتصف الاستطاعة (θ_h) وذلك من أجل مخطط اشعاع متناظر كما يلي [13]:

$$\theta = 2|\theta_m - \theta_h| \quad (22)$$

(e) القيم الأعظمية الثانوية:

بالعودة لمعادلة معامل المصفوفة (8)، هناك قيم أعظمية ثانوية (حزم اشعاع أعظمية أو أصغرية) التي تحدث تقريباً عندما يبلغ بسط المعادلة (8) قيمته الأعظمية، أي أن [13]:

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) &= \sin\left[\left(\frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)\right)\right]_{\theta=\theta_s} \approx \pm 1 \Rightarrow \\ \frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)|_{\theta=\theta_s} &\approx \pm \left(\frac{2s+1}{2}\right)\pi \Rightarrow \\ \theta_s &\approx \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}, \quad s=1,2,3,\dots \end{aligned} \quad (23)$$

والتي يمكن التعبير عنها كما يلي:

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N} \right) \pi \right] \right], \quad s=1,2,3,\dots \quad (24)$$

من أجل قيم كبيرة جداً لـ d ($d \gg \lambda$)، يمكن اختصار المعادلة (24) لتصبح كما يلي:

$$\theta_s \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d} \left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N} \right) \pi \right] \quad (25)$$

القيمة الأعظمية للوريقة الجانبية الأولى (المعادلة (7)) تحدث تقريباً عندما [13]:

$$\frac{N}{2} \psi = \frac{N}{2} (kd \cos \theta + \beta)_{\theta=\theta_s} \approx \pm \left(\frac{3\pi}{2} \right) \quad (26)$$

أو عندما:

$$\theta_s \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d} \left[-\beta \pm \left(\frac{3\pi}{N} \right) \right] \quad (27)$$

في هذه النقطة، فإن مطال المعادلة (8) يعطى كما يلي [13]:

$$(AF)_n \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\left(\frac{N}{2}\psi\right)} \right]_{\theta=\theta_s, s=1} = \frac{2}{3\pi} = 0.212 \quad (28)$$

والتي تساوي إلى -13.46 dB [13]

أي أن القيمة الأعظمية للوريقة الجانبية الأولى تقل بمقدار 13.46 عن القيمة الأعظمية للوريقة الرئيسية. يعبر الجدول (1) عن النقاط الصفرية، القيم الأعظمية، نقطة منتصف الاستطاعة والقيم الأعظمية للوريفات الجانبية والوريقة الرئيسية من أجل مصفوفة عرضانية منتظمة [13].

Nulls	$\theta_n = \cos^{-1} \left(\pm \frac{n\lambda}{Nd} \right)$ $n = 1, 2, 3, \dots$ $n \neq N, 2N, 3N, \dots$
Maxima	$\theta_m = \cos^{-1} \left(\pm \frac{m\lambda}{d} \right)$ $m = 0, 1, 2, \dots,$
Half-power points	$\theta_h = \cos^{-1} \left(\pm \frac{1.391\lambda}{\pi Nd} \right)$ $\pi d \lambda \ll 1$
Minor lobe	$\theta_s = \cos^{-1} \left[\pm \frac{\lambda}{2d} \left(\frac{2s+1}{N} \right) \right]$ $S = 1, 2, 3, \dots$ $\pi d \lambda \ll 1$

الجدول (1)

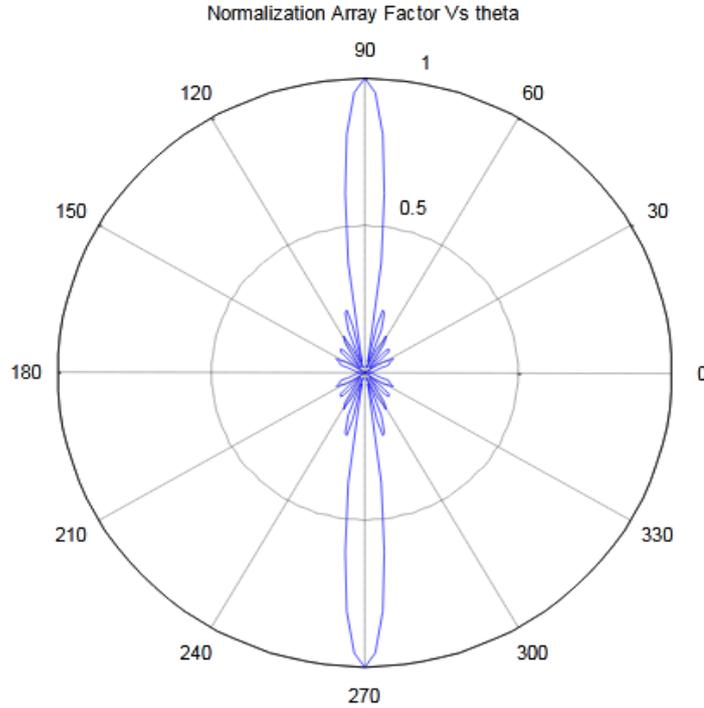
4. النتائج والمناقشة

يوضح هذا الجزء من العمل تأثير تغيير بارامترات الهوائي المصفوفة الخطي حيث تم دراسة تغير عدد العناصر وطول الموجة والمسافة بين العناصر على عرض حزمة الإشعاع وبالتالي تأثيرها على التوجيهية، حيث تم تنفيذ العمل باستخدام البيئة البرمجية MATLAB(R2018b) كما يلي :

1-4 رسم مخطط الإشعاع

تم التركيز في هذا البحث على العمل ضمن ترددات رادارات البحث، وتم استخدام البيئة البرمجية الماتلاب لرسم مخطط الإشعاع للهوائي، اعتماداً على المعادلة (7) مع استخدام المعطيات التالية:

- المجال الزاوي $[0, 2\pi]$
 - عدد العناصر $N=10$
 - $\lambda = 0.5m$ فيكون التردد 600 ميغاهرتز
 - المسافة بين العناصر $d = \lambda/2$
- تم الحصول على الشكل (2) كما يلي :



الشكل (2) يمثل مخطط الأشعاع في الإحداثيات القطبية

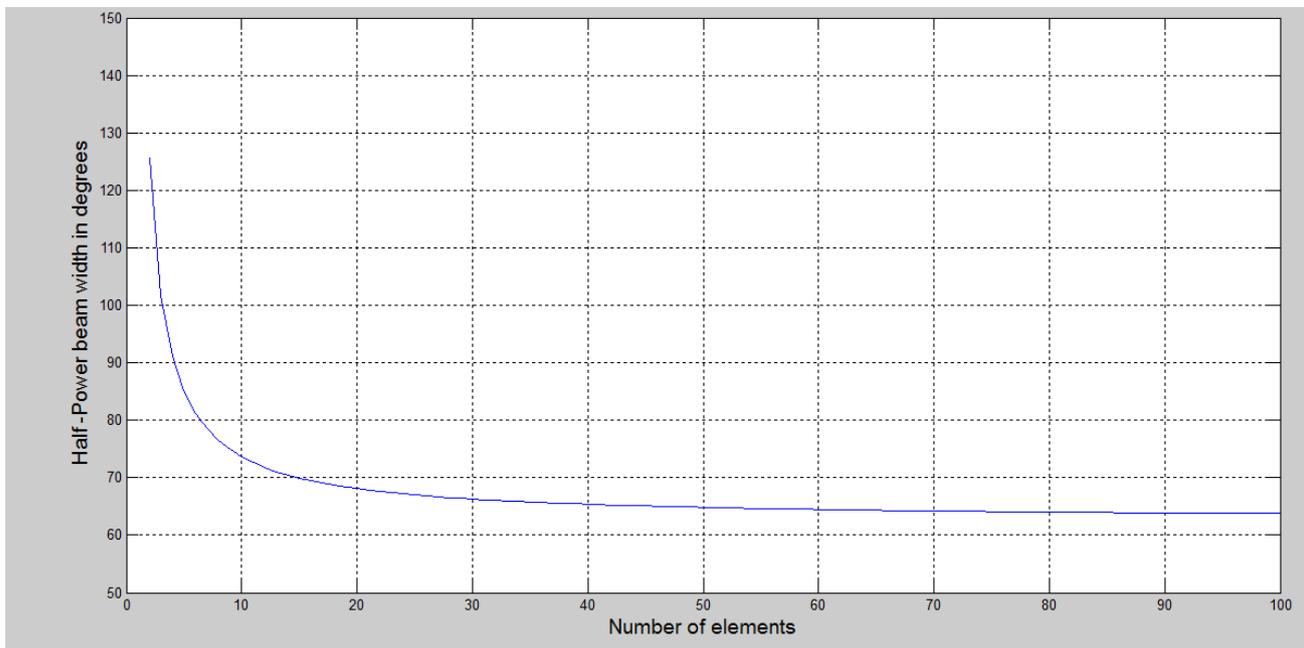
يبين الشكل (2) أن القيمة الأعظمية (الرياح الأعظمي) تكون باتجاه الزاوية $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ وتبلغ قيمتها الواحد والتي تشكل الوريقة الرئيسية لمخطط الإشعاع، كما يبين الشكل (2) الوريقات الجانبية لمخطط الإشعاع عند الزوايا

الزاويتين $\theta = 26^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 154^\circ, 206^\circ, 240^\circ, 300^\circ, 334^\circ$ بينما يلاحظ انعدام مخطط الإشعاع عند

$$\theta = 0^\circ, 180^\circ$$

2-4 تأثير زيادة عدد العناصر على عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة

تم الاعتماد على العلاقات (17) و(19) و(22) من أجل الحصول على أفضل عدد لعدد عناصر المصفوفة، وعلى افتراض أن طول الموجة $\lambda = 0.5\text{m}$ والمسافة بين العناصر d تساوي $\frac{\lambda}{2}$ ومن خلال برنامج الماتلاب حصلنا على الشكل (3) كما يلي :



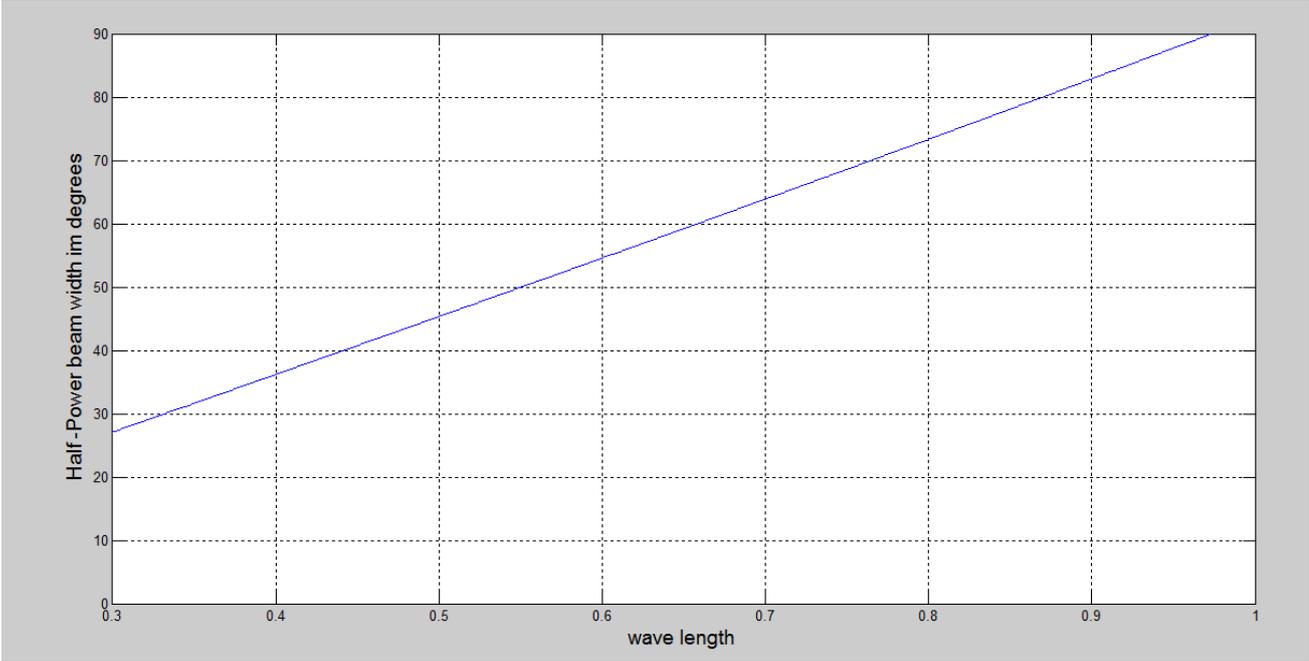
الشكل (3) يمثل العلاقة بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع عدد العناصر

يبين الشكل (3) إنخفاض عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة كلما زاد عدد العناصر، ويؤدي ذلك إلى زيادة في التوجيهية، لكن هذه الزيادة لا تبقى مستمرة، حيث نلاحظ أنه بعد عدد عناصر $N=40$ تبقى عرض حزمة الإشعاع ثابتة.

وبالتالي أفضل قيمة لعدد العناصر في الهوائي المصفوفة الخطي هي $N=40$.

3-4 العلاقة بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة وطول الموجة

تم توضيح تأثير تغير طول الموجة على عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة من خلال الاعتماد على العلاقات (17) و(20) و(22) وعلى افتراض أن عدد العناصر يساوي $N=40$ والمسافة بين العناصر $d=0.25\text{m}$ تساوي ومن خلال البيئة البرمجية الماتلاب حصلنا على الشكل (4) .



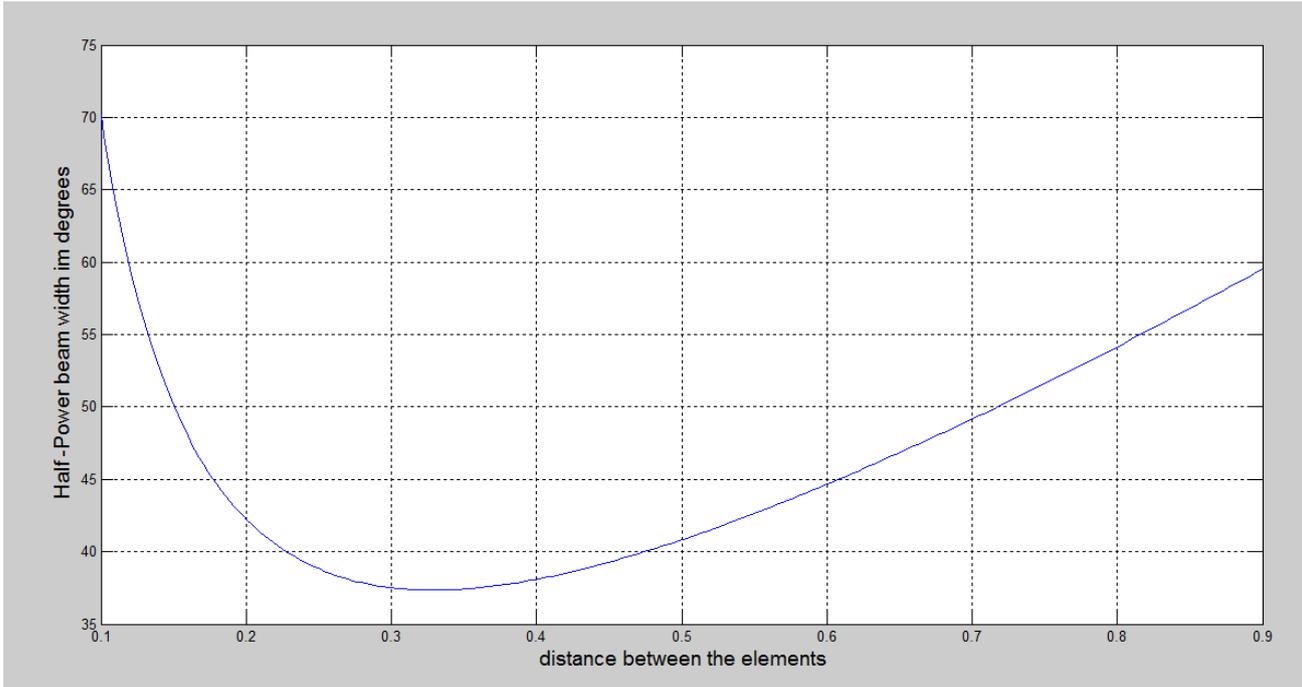
الشكل (4) يمثل العلاقة بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع طول الموجة

يبين الشكل (4) وجود علاقة طردية بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع طول الموجة، حيث يزداد عرض حزمة الإشعاع مع ازدياد طول الموجة ويؤدي ذلك إلى انخفاض في التوجيهية بالتالي لزيادة التوجيهية يجب اختيار طول موجة أقل من ضمن مجال الترددات المعمول بها للرادار وأفضل قيمة لطول الموجة ضمن رادارات البحث هي 0.3m ويكون عند التردد 1GHz.

4-4 العلاقة بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة والمسافة بين

العناصر

لتوضيح تأثير المسافة بين العناصر على عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة، تم الاعتماد على المعادلات (17) و(19) و (22) ويفرض أن عدد العناصر $N=40$ وطول الموجة $\lambda = 0.3m$ ومن خلال المحاكاة تم الحصول على الشكل (5).



الشكل (5) يمثل العلاقة بين عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع المسافة بين العناصر

يبين الشكل (5) انخفاض عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع ازدياد المسافة بين العناصر وبالتالي تزداد التوجيهية حتى نصل إلى مسافة تساوي 0.3m وهي تساوي طول الموجة وبعد هذه المسافة تزداد عرض حزمة الإشعاع وبالتالي تنخفض التوجيهية بعد هذه المسافة . وتعتبر مسافة $d=0.3m$ هي المسافة المثلى بين العناصر في الهوائيات المصفوفة الخطية.

5. الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذا البحث دراسة بعض العلاقات الرياضية الخاصة بالهوائي المصفوفة الخطي، وبينت النتائج أنه يوجد علاقة طردية بين عدد العناصر والرياح للهوائي، حيث أنه مع زيادة عدد العناصر ينخفض عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة وبالتالي يزداد الرياح والتوجيهية، وأفضل قيمة لعدد العناصر هي $N=40$.

وأوضحت النتائج أيضاً أنه يوجد علاقة عكسية بين طول الموجة والرياح للهوائي، حيث أنه يزداد عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع ازدياد طول الموجة وبالتالي ينخفض الرياح والتوجيهية وأفضل قيمة لطول الموجة هي $\lambda = 0.3m$

وبينت النتائج أيضاً أنه ينخفض عرض حزمة الإشعاع عند مستوى نصف الاستطاعة مع ازدياد المسافة بين العناصر حتى تصل إلى مسافة تساوي 0.3m ومع ازدياد المسافة أكثر يزداد عرض حزمة الإشعاع وينخفض الرياح وبالتالي أفضل قيمة للمسافة بين العناصر هي $d=0.3m$.

ومن خلال ماسبق تم الاستنتاج أن هوائيات المصفوفة الخطية تعطي الرادار المرونة المطلوبة لتنفيذ جميع المهام بدقة عالية مع اختيار بارامترات مناسبة للهوائي المصفوفة الخطي.

ومن التوصيات المستقبلية:

تم في هذا البحث بدراسة تحليلية ونمذجة رياضية لهوائي مصفوفة خطي، ويمكن في أبحاث قادمة أن يتم دراسة الهوائيات المصفوفة المستوية، وثلاثية الأبعاد كما يمكن أن يتم دراسة تحليلية لتقنيات خفض التشويش على الوريقة الرئيسية وخفض الوريقات الجانبية من أجل تقليل التشويش على المحطة الرادارية.

المراجع

- [1] Von Aulock , W. H. “ *Properties of Phased Arrays* ”, Proc . IRE, vol. 48, pp. 37-39, March, 1960.
- [2] E.Brookner, “*Aspects of Modern Radar* ”, Artech House Boston, London 1988.
- [3] E.Brookner, J.M.Howell"Adaptive-Adaptive Array Processing". Proc.IEEE 74 602-607 (1986).
- [4] H.Unz (1956), “Linear arrays with arbitrarily distributed elements,” Rep. Serial no. 60, Electron. Res. Lab., Univ. California, Berkele
- [5] H.Unz (1960), “Linear arrays with arbitrarily distributed elements,” IRE Trans.Antennas Propagat., vol. AP-8, pp. 222–223.
- [6] صالح، السموم، جركس، تاج الدين . تحليل وتصميم مصفوفة الهوائيات التجزئية ومقارنتها بالمصفوفة الخطية منتظمة المسافات والتغذية، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث ،30، العدد 4، 2008، 113-128، العلمية. سوريا ، المجلد
- [7] M. A. Tanha, P. V. Brennan, and M. Ash, “Phased array antenna foravalanche fmcw radar,” in2013 Loughborough Antennas PropagationConference (LAPC), Nov 2013, pp. 51–55
- [8] M. A. Tanha, M. Ash, and P. V. Brennan, “Phased-array antenna feednetwork for geophysical fmcw radar,” inAntennas and Propagation(EuCAP), 2014 8th European Conference on.IEEE, 2014, pp. 1847–1851.
- [9] S. F. Maharimi, M. F. Jamlos, and M. F. A.Malek, “Impact of number elements on array factor in linear array antenna,” Signal Processing and its Applications, 2012 8th International Colloquium on IEEE, 2012, pp. 296–299
- [10] A. J. Sahad, S. Islam, and R. Islam, “Design and Analysis of a Non-Uniform Planar Antenna Array”, 2020 Region 10 Symposium (TENSYP) on IEEE, 2020, pp. 1140-1143
- [11] Dr. Robert M. O’Donnell.: 'Radar Systems Course', ©IEEE New Hampshire Section 2009
- [12] Skolnik, M.: 'Introduction to Radar Systems', McGraw-Hill, New York,3rd Ed., 2001.
- [13] Constantine A.Balanis,"Antenna Theory", John Wily & Sons 1997.