

استخدام مزيج الطور في تصميم مصفوفة هوائيات ثنائية التردد لأنظمة اتصالات الجيل الخامس

المهندسة لميس حسن *

(تاريخ الإيداع ١٥/١٠/٢٠٢٣ - تاريخ النشر ٣/١٢/٢٠٢٣)

□ ملخص □

تعد أنظمة اتصالات الجيل الخامس ثورة في سوق الاتصالات اللاسلكية، حيث تحتاج الأجهزة الذكية إلى نطاق واسع من الترددات. هذه الثورة السريعة دفعت الباحثين إلى تطوير التكنولوجيا في مجالي البرمجيات والمعدات. ومن بين المجالات الأساسية التي تحتاج إلى تطوير مستمر لخدمة أنظمة اتصالات الجيل الخامس هو تصميم الهوائيات. هدف هذا البحث إلى تصميم هوائي يعمل على ترددين هما 28 GHz و 38 GHz ويحقق جميع الخصائص الهامة لأنظمة اتصالات الجيل الخامس، بما في ذلك ثنائية الاستقطاب وتوفير نطاق تردد واسع. تم تصميم الهوائي المقترح في هذا العمل للعمل على ترددات عالية (موجات قصيرة ذات طول موجي يقاس بالمليمترات)، وتم تحقيق ثنائية الاستقطاب.

تم تصميم الهوائي على شكل مصفوفة مكونة من أربعة عناصر وذلك من أجل تحسين الاتجاهية وزيادة الكسب إلى أكثر من 12 dB وتوسيع نطاق التردد إلى أكثر من 1 GHz، ويمكن استخدام مصفوفة الهوائيات هذه في تصميم محطات الإرسال ولوحات الأجهزة الذكية التي تدعم أنظمة اتصالات الجيل الخامس. تم تحقيق خاصية توجيه الإشعاع من الهوائي عن طريق إضافة محول لاتجاه الإشارة إلى التصميم الرباعي. هذا التحسين يسمح بإمكانية ميل الإشعاع الرئيسي في اتجاهات مختلفة على كلا الترددين.

تم استخلاص نتائج المحاكاة باستخدام البرنامج (CST Microwave Studio (CST MWS)

الكلمات المفتاحية: هوائي الرقعة الشرائحي، مصفوفة هوائيات، عرض النطاق الترددي، معامل الانعكاس، الريح، مزيج الطور.

* مهندسة حاصلة على درجة الماجستير في هندسة تكنولوجيا الاتصالات _ كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات _ جامعة طرطوس _ طرطوس _ سوريا

Using phase shifter in designing a dual-frequency antenna array for 5G communications systems

Eng. Lames Hasan *

(Received 15/10/2023.Accepted 3/12/2023)

□ABSTRACT □

Fifth-generation (5G) communication systems are considered a revolution in the wireless communication market, as smart devices require a wide frequency range. This rapid revolution has driven researchers to develop communication technologies in both software and hardware domains. Antenna design is also a crucial field that requires continuous development to serve 5G communication systems.

The main objective of this work is to design an antenna that operates at two frequencies, namely 28 GHz and 38 GHz, while achieving all the important characteristics of 5G communication systems, including dual polarization and wide frequency coverage. The proposed antenna in this study is designed to operate at high frequencies (millimeter-wave wavelengths) and has achieved dual polarization.

To improve the directivity and the gain to more than 12 dB, as well as expand the frequency range to over 1 GHz, an antenna array composed of four elements was designed. This antenna can be used in the design of transmission stations and smart device panels that serve 5G communication systems. The beam steering capability of the antenna was achieved by adding a signal phase shifter to the quad design, allowing the main radiation beam to be tilted in different directions for both frequencies.

Key Words: microstrip patch antenna, antenna array, bandwidth, return loss, gain, phase shifter.

* Engineer with a master's degree holder in telecommunications engineering_ Faculty of Information and Communication Technology _ University of Tartous _ Tartous _ Syria.

١. المقدمة:

تم تطوير التكنولوجيا اللاسلكية من خلال الجيل الخامس (5G) لتوفير معدلات بيانات عالية وأداء محسّن في قطاع الاتصالات اللاسلكية. يشغل الهوائي الشرائحي المطبوع دورًا حيويًا في هذا القطاع المزدهر، ولا يمكننا اليوم أن نفكر في أي تطور في تقنية الاتصال اللاسلكي دون النظر إلى التغييرات المتعلقة بتقنية الهوائي الشرائحي. لإنشاء اتصال بين الأجهزة اللاسلكية في نطاقات تردد أعلى مثل نطاق الموجات المليمترية، نحتاج إلى هوائي صغير الحجم ورخيص التكلفة وسهل التصنيع. تتمتع الهوائيات الشرائحية المطبوعة بالسمات السابقة، وبالتالي يُفضل استخدامها في هذا السياق. تعتبر الهوائيات الشرائحية المطبوعة خيارًا ممتازًا لتلبية متطلبات تقنية الجيل الخامس وتطبيقات الاتصالات اللاسلكية الأخرى. [1] بشكل عام، يمكننا القول بأن الهوائي الشرائحي المطبوع يلعب دورًا حيويًا في تطور تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية، ويعد خيارًا مثاليًا لتحقيق اتصالات فعالة وموثوقة على نطاقات تردد أعلى مثل نطاق الموجات المليمترية.

تتألف مصفوفة الهوائيات من عدة هوائيات موضوعة بشكل منتظم على سطح محدد. وتستخدم هذه الهوائيات لإرسال واستقبال الإشارات اللاسلكية. ولكي نقوم بتوجيه الحزمة الرئيسية من الهوائي أو تغيير اتجاهها وفقاً للتطبيق المرغوب فيه نقوم باستخدام محولات (مزيجات) الطور phase shifter.

وهناك العديد من الأبحاث التي تناولت أهمية محولات الطور وعملها واستخدامها في تصميم الهوائيات حيث تم في البحث [4] عرض مصفوفة هوائيات منخفضة التكلفة 1×4 تتضمن مبدلات طور دليل موجي متكامل (SIW) قابلة للضبط بشكل مستمر. من خلال التكامل السلس بين عناصر الهوائي، ومحولات الطور، وشبكة تغذية SIW، يتم تجميع المصفوفة المرحلية المقترحة في هيكل متجانس متعدد الطبقات. توضح النتائج المقاسة أنه تم الحصول على نطاق مسح مستمر للحزمة من -45 درجة إلى 45 درجة يغطي نطاق التشغيل بالكامل البالغ $0.09-0.98$ جيجا هرتز. وفي الوقت نفسه، يتم تحقيق مكاسب تصل إلى 11 ديسيبل. كما تم في البحث [5] اقتراح شبكة تغذية جديدة لمحولات الطور القابلة للضبط باستخدام مصفوفة بتلر 4×4 . لضبط اختلاف الطور التدريجي عند منافذ الإخراج لشبكة المصفوفة، تم دمج محولات الطور الأربعة داخل مصفوفة بتلر. تتحكم الفولتية الرقمية ثنائية القناة في محولات الطور الأربعة في وقت واحد لضبط فرق الطور في نطاق 90 درجة لكل إثارة إدخال لمصفوفة بتلر، ولإثبات مفهوم التصميم، تم تصميم نموذج أولي لمصفوفة بتلر المقترحة بتردد 0.8 جيجا هرتز، وتتفق النتائج التجريبية بشكل جيد مع نتائج المحاكاة. من خلال التكامل مع أربعة عناصر هوائي رقعة، يتم توجيه شعاع الإشعاع المقاس من -51 إلى 52 عن طريق ضبط جهدي التحكم. وتم في البحث [6] عرض هوائي الطور السلبي منخفض التكلفة باستخدام محول طور الدليل الموجي المتكامل (SIW) القابل للضبط المستمر. تعتمد آلية تحويل الطور على إزعاج المجال الكهربائي لخط الدليل الموجي المتكامل (SSIW) للركيزة المشقوقة عن طريق وضع ثوابت عازلة كهربائية عالية فوق فتحة SIW. تم تطوير نهج يعتمد على نموذج دائرة خط نقل بسيط (TL) يمكنه دعم أوضاع مختلفة كطريقة سريعة لتحسين التصميم. تم التحقق منه من خلال محاكاة الموجة الكاملة. يُظهر النموذج الأولي نطاق مسح شعاعي مستمر من -20 درجة إلى $+20$ درجة يغطي نطاق التشغيل بالكامل من 29 إلى 31 جيجا هرتز. ويقدم البحث [7] نظام هوائي صفيح طوري (PAA) منخفض التكلفة ومدمج وموجه الحزمة يعتمد على نهج جديد لدمج مبدلات مرحلية منخفضة التكلفة وعالية الأداء مع لوحات التحكم الخاصة بها داخل هيكل الهوائي. ونتيجة لذلك، تم تقليص النظام إلى هيكل واحد لمجموعة الهوائيات ومحولات الطور المتكاملة، بدلاً من نظام PAA المتطور الذي يحتوي على لوحتين منفصلتين

متصلتين بواسطة كابلات RF متحدة المحور. ويقدم البحث [8] ثلاثة أساليب جديدة لتصميم هوائيات المصفوفة الطورية من أجل تقليل تعقيدها. يعتمد النهج الأول على تقنية الرنين الممتد، والتي، على عكس تصميمات المصفوفة الطورية التقليدية، تحقق مهام تقسيم الطاقة وتحويل الطور داخل دائرة واحدة. يعتمد النهج الثاني المقدم على طريقة التغذية ثنائية الاتجاه. تم تصميم مصفوفة طورية جديدة بناءً على هذا النهج الذي يتطلب إزاحة طور أقل من مبدلات الطور التقليدية. أخيراً، يسمح النهج الثالث الموصوف في البحث بالتحكم في تقدم الطور عبر عناصر الهوائي باستخدام مبدل طور واحد. لذلك، يتم تقليل عدد مبدلات الطور المطلوبة في المصفوفة الطورية بشكل كبير مقارنة بتصميمات المصفوفة الطورية التقليدية التي تتطلب مبدل طور منفصل لكل عنصر هوائي. ومن أجل تقليل فقدان المسح وكذلك الحصول على مكاسب مسح أعلى لمصفوفة مرحلية، يُقترح في [9] تصميم مصفوفة، يختلف عدد مبدلات الطور النشطة المستخدمة في هذا الهيكل عن الأعمال السابقة، وهو مطابق لنظيره بدون مصفوفات فرعية، مما يجعله أكثر فعالية من حيث التكلفة. ولتحقيق هذه الخاصية القيمة، يُقترح مُشكل شعاع قابل لإعادة التشكيل لتمكين نمط الإشعاع الخاص بمصفوفة فرعية من أن يكون قابلاً للتحويل إلى أوضاع مختلفة لمناطق المسح المختلفة. وتبحث المقالة [10] في كيفية جعل توجيه حزمة الهوائي ذكياً من خلال زيادة سعة القناة ونطاقها وتقليل التداخل لتعزيز كسب هوائي صفيح التصحيح المستطيل لتطبيق 5G. تعتبر هوائيات توجيه الشعاع الحل الأمثل لمجموعة متنوعة من تطبيقات النظام؛ يتم تحقيق ذلك في الغالب باستخدام المصفوفات الطورية، حيث يتم استخدام مبدلات الطور للتحكم في الشعاع الرئيسي. في هذا البحث، تم أخذ مبدلات الطور ذات الصمام الثنائي في الاعتبار. توفر الحالات "ON" و"OFF" تحولاً في الطور بسبب مسارات التيار المختلفة. يمكن تبديل اتجاه الشعاع الرئيسي بين زوايا ٢٥ درجة مع عرض شعاع ٣ ديسيبل يبلغ ٢٣ درجة.

٢. هدف البحث:

هدف هذا البحث إلى تصميم مصفوفة هوائيات ثنائية التردد لأنظمة اتصالات الجيل الخامس مع استخدام محولات الطور في التصميم لبيان أهميتها ودورها في توجيه الحزمة الرئيسية للهوائي نحو الاتجاه الذي يناسب التطبيق المطلوب.

٣. مواد البحث وطرقه:

تتألف منهجية البحث من المراحل الآتية:

١. تصميم هوائي الرقعة الشرائحي المستطيل ((Microstrip Patch Antenna (MPA)) بناءً على المعادلات الأساسية لتصميم الهوائيات
٢. إنشاء فتحة (slot) في الهوائي المصمم ليصبح الهوائي بشكل حرف H بهدف جعل الهوائي يعمل على ترددين.
٣. تصميم مصفوفة هوائيات خطية لزيادة الكسب والاتجاهية بناءً على تصميم العنصر المنفرد.
٤. استخدام محولات الطور في تصميم مصفوفة الهوائيات بهدف إمكانية التحكم في توجيه حزمة الإشعاع الرئيسية.
٥. مرحلة استخلاص النتائج والتوصيات.

١-٣- مزيجات الطور phase shifters:

محول (مزيج) الطور (phase shifter): هو وحدة في شبكة الموجات اللاسلكية، توفر تغييراً قابلاً للتحكم في طور إشارة التردد اللاسلكي، كما يُستخدم في مصفوفات الهوائيات. وتطبيقاته تشمل التحكم في الطور النسبي لكل عنصر في هوائيات المصفوفة في أنظمة الرادار أو روابط الاتصال القابلة للتوجيه. ونبين فيما يلي أنواع مختلفة من مزيجات الطور الشائعة [2]. وفي العمل الحالي تم إضافة خط انتقال بسيط إلى مصفوفة الهوائيات للحصول على تغيير محدد في الطور لتحقيق قدرة توجيه الحزمة الثابتة.

• مزيج الطور بواسطة الديود PIN (PIN diode phase shifter):

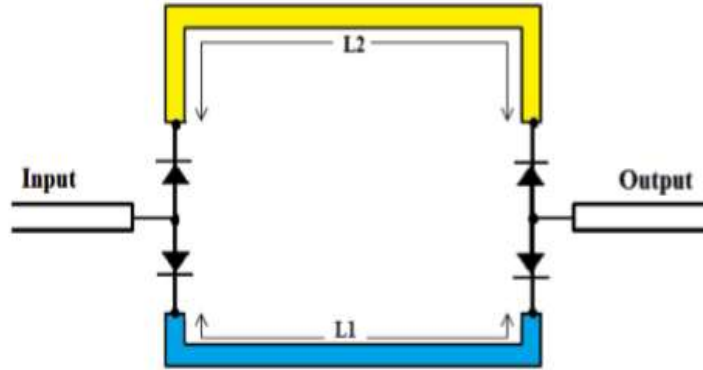
تتمتع مزيجات الطور بالديود PIN بميزات عديدة كالسرعة العالية والحجم الصغير، وهناك عموماً ثلاثة أنواع أساسية من مزيجات الطور بالديود PIN وهي:

• مزيج الطور بواسطة الخط المبدل Switched line phase shifter:

يستخدم هذا النوع مفتاحين لتوجيه الإشارة بين خطي النقل اللذين يختلفان في طولهما، كما هو موضح في الشكل (1) التغيير التفاضلي في الطور بين المسارين هو:

$$\Delta\phi = \beta (L2 - L1) \quad (1)$$

حيث β هو ثابت الانتشار للخط، وهذا المزيج الطوري يعني وجود تأخير زمني حقيقي بين منفذي الإدخال والإخراج، كما يمكن استخدامه لكل من وظائف الاستقبال والإرسال. ويتم تصميم مزيج الطور بخط المبدل ليكون متوافقاً مع مزيج طوري ثنائي الحالة بقيم ($\Delta\phi = 180, 90, 45, \dots$ degree)



الشكل (1): مزيج الطور بواسطة الخط المبدل

• مزيج الطور بواسطة خط التحميل The loaded line phase shifter:

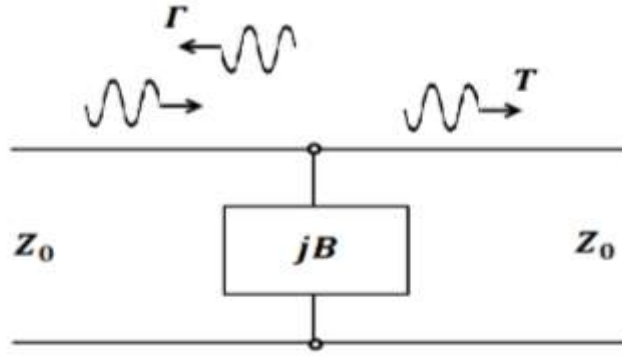
هذا النوع مفيد للحصول على تغييرات صغيرة في الطور (عادة ٤٥ درجة أو أقل). الشكل (2) يوضح المبدأ الأساسي لهذا النوع، حيث يمكن كتابة معامل الانعكاس ومعامل الانتقال على النحو التالي:

$$\Gamma = -\frac{jb}{2+jb} \quad (2)$$

$$T = 1 + \Gamma \quad (3)$$

حيث $b = BZ_0$ هو الشحنة المعيارية الموحدة والتغير التفاضلي في الطور هو:

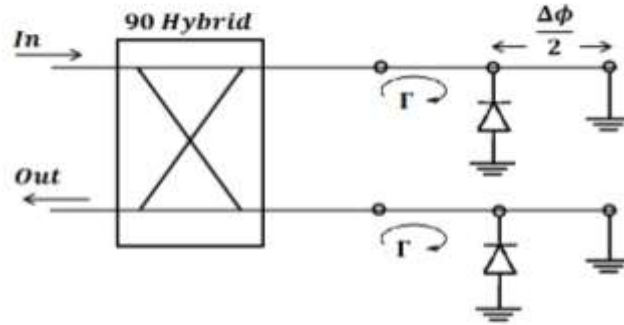
$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{b}{2}$$



الشكل (٢): مزيج الطور بواسطة خط التحميل-الدائرة الأساسية

• مزيج الطور الانعكاسي The reflection phase shifter:

هذا النوع من مزيجات الطور يستخدم مفتاح SPST (ذو قطب واحد وحالة واحدة) للتحكم في طول المسار لإشارة مرتدة، ولتوفير دارة ثنائية المنفذ يتم استخدام مجمع متعدد القطب عادة كما هو موضح في الشكل (3).

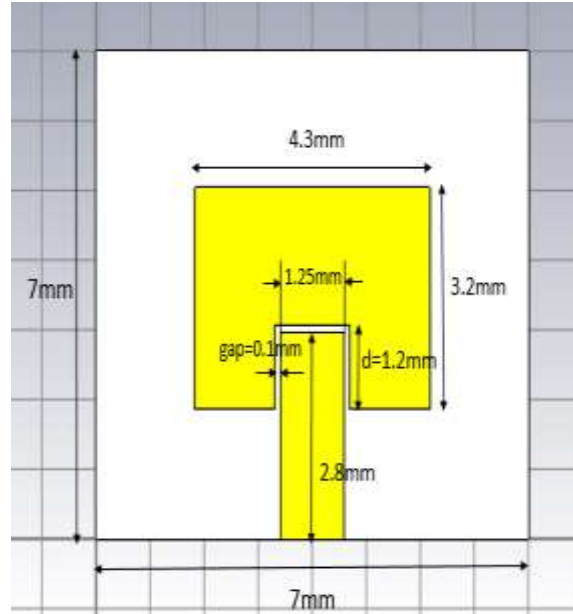


الشكل (٣): مزيج الطور الانعكاسي بواسطة الهجين التربيعي

في عملية التشغيل، يتم تقسيم إشارة الإدخال بالتساوي بين المنافذ الاثنتين للمجمع متعدد القطب. يتم تشغيل الديودات في نفس الحالة، لذا ستجمع الموجات المرتدة من المنتهيات الاثنتين عند منفذ الإخراج المشار إليه. يتم تشغيل الديودات أو إيقاف تشغيلها لتغيير طول المسار الكلي وتوفير التغير في الطور عند المخرج [3].

3-2- تصميم هوائي الرقعة الشرائحي للنظام المقترح:

تم تصميم عنصر هوائي مشع بسيط على شكل مستطيل من النحاس على طبقة الركيزة. تبلغ أبعاد الرقعة المستطيلة $W_p = 4.3\text{mm}$ و $L_p = 3.2\text{mm}$ ، كما هو موضح في الشكل (٤). تم استخدام ركيزة من نوع Rogers RT Duroid 5880 نظرًا لكفاءتها في نطاق الموجات المليمترية، كما تتميز بثابت عزل منخفض ($\epsilon_r = 2.2$) وخسارة منخفضة ($\tan \delta = 0.0009$)، حيث تمثل الخسارة ضياعات المادة العازلة في الركيزة. بالنسبة لارتفاع الركيزة $H_s = 0.254\text{mm}$. تم استخدام تقنية التغذية المقترنة بالفجوة.



الشكل (٤) هوائي الرقعة مع التغذية بالفجوة المقترنة

لتصميم الهوائي الشرائحي، يجب اختيار مادة للطبقة الأساسية بسمك h وثابت عزل كهربائي ϵ_r . يجب أيضاً تحديد تردد الرنين المركزي f_r بوحدة هرتز، وأبعاد الهوائي بما في ذلك عرض الهوائي w وطول الهوائي L . يمكن حساب هذه القيم باستخدام المعادلات والخطوات التالية [7]:

الخطوة 1: من أجل هوائي شرائحي فعال، نحسب العرض w من المعادلة:

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

الخطوة 2: تحديد ثابت العازلية الكهربائية الفعال ϵ_{eff} من المعادلة:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{W}}} \quad (5)$$

حيث: ϵ_{eff} هي ثابت العازلية الكهربائية الفعال، ϵ_r هي ثابت العازلية لطبقة الأساس، h هي ارتفاع طبقة الأساس العازلة، w هي عرض الرقعة.

الخطوة 3: تحديد الطول التزايد (أو بما يسمى الطول الكهربائي) من المعادلة:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (6)$$

الخطوة 4: تحديد الطول الحقيقي L بالمعادلة:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (7)$$

حيث ΔL هو الطول التزايد (أو يسمى الطول الكهربائي)

L_{eff} هو الطول الفعال للهوائي ويمثل ارتفاع مركز الهوائي فوق المستوي الأرضي ويُعطى بالعلاقة:

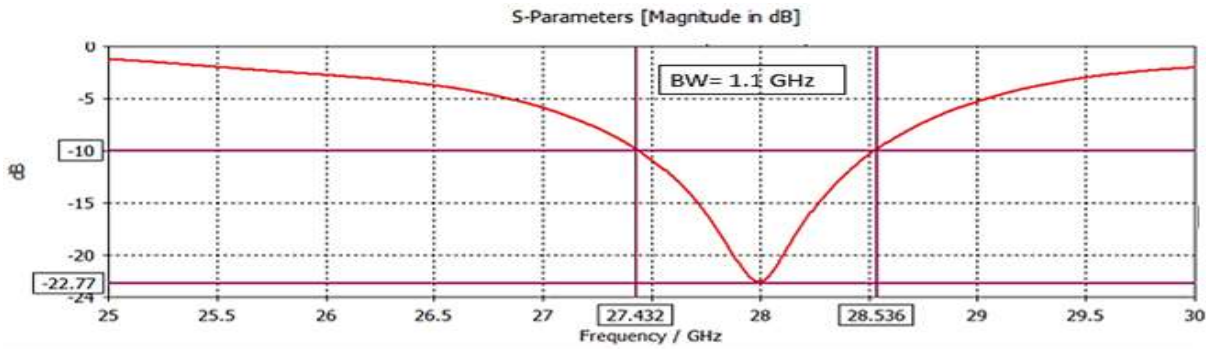
$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

بإجراء محاكاة لهذا الهوائي تمكنا من تحديد بارامترات الأداء والتي من أهمها خسارة العودة وتسمى أيضاً معامل الانعكاس (reflection coefficient) وهي نسبة القدرة الواردة إلى القدرة المنعكسة لهوائي وتقدر بالديسبل (dB)، ويمثل S11 خسارة عودة الهوائي. ولكي يعمل الهوائي بطريقة فعالة يجب أن يكون $S_{11} < -10$ dB).

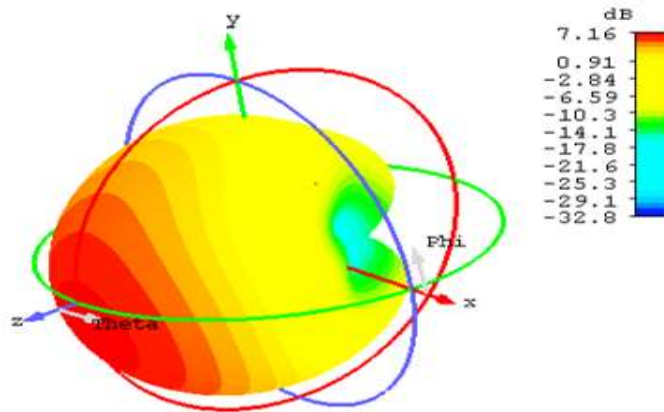
يبين الشكل (5) بأن إشعاع الهوائي يكون الأفضل عن 28 GHz حيث تكون قيمة $S_{11} = -22.77$ dB، كما يمكن أيضاً حساب عرض النطاق الترددي من الشكل التالي حيث يُعرف بأنه نطاق التردد عندما $S_{11} < -10$ dB وبالتالي فإن عرض النطاق الترددي سيكون تقريباً مساوياً إلى 1.1 GHz حيث أن حدود نطاق التردد هي $f_L = 27.432$ GHz (الحد الأدنى)، و $f_H = 28.536$ GHz (الحد الأعلى)، ومن خلال إجراء عملية طرح الحد الأعلى من الحد الأدنى نحصل على عرض النطاق الترددي أي $f_L = f_H - 27.432 = 28.536 - 27.432 \cong 1.1$ GHz [8].

$$\sqrt{27.432 * 28.536} \cong 28 \text{ GHz} \text{ حيث أن } f_o = \sqrt{f_L * f_H} = 28 \text{ GHz}$$

ويمثل الشكل (6) مخطط الريح لهوائي التغذية بالفجوة المقترنة بالشكل ثلاثي الأبعاد، حيث يبين الشكل بأن قيمة الريح التي تم تحقيقها هي 7.16 dB وهي قيمة جيدة لهوائي شرائحي مطبوع مصمم لاتصالات 5G.



الشكل (٥) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي لهوائي الرقعة المفرد



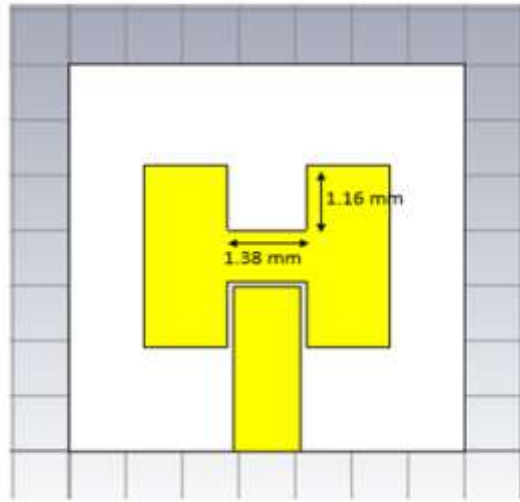
الشكل (٦): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D للهوائي المفرد

٣-٣- تصميم هوائي الرقعة الشرائحي المفرد بعد إحداث فتحة مستطيلة الشكل فيه:

يوضح الشكل (7) هوائي الرقعة الشرائحي المصمم باستخدام تقنية التغذية المقترنة بالفجوة بعد إحداث فتحة مستطيلة الشكل فيه. فأصبح الهوائي على شكل حرف H، وذلك لتحقيق تشغيل مزدوج النطاق لهوائي

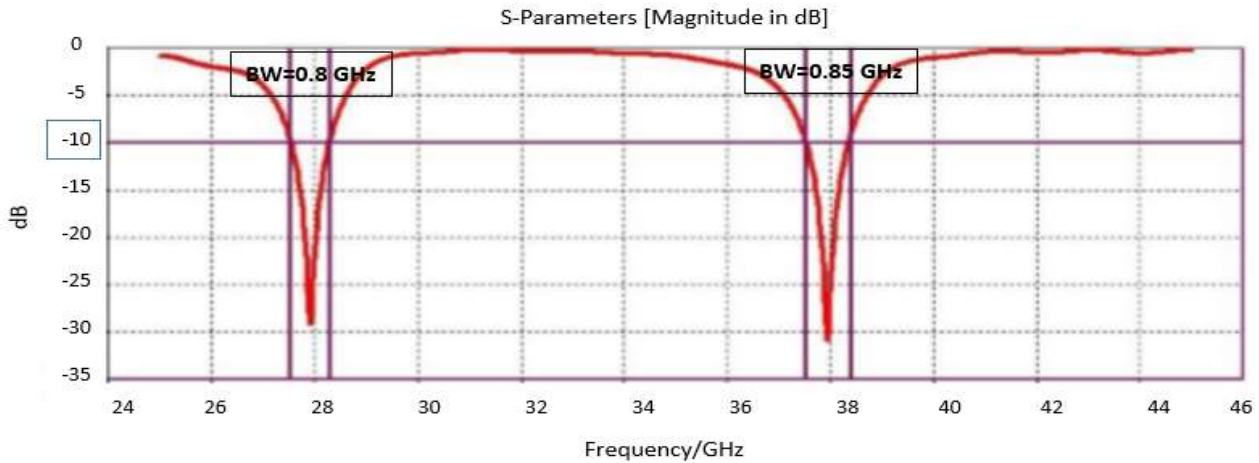
الرقعة الشرائحي، وتساوي أبعاد هذه الفتحة (1.16mm x 1.38mm) وقد تم اختيار هذه الأبعاد بناءً على دراسة تجريبية للحصول على أفضل النتائج وفق ما يوضح الجدول التالي:
الجدول (١): دراسة تجريبية للحصول على أفضل الأبعاد للفتحة

L	W	28 GHz			38 GHz		
		BW(GHz)	S11(dB)	Gain(dB)	BW(GHz)	S11(dB)	Gain(dB)
0.9	1.1	0.7	-34	6	0.81	-30	6.5
1	1.2	0.75	-24	7.9	0.79	-29	7
1.16	1.38	0.8	-30	8.23	0.85	-31	7.58



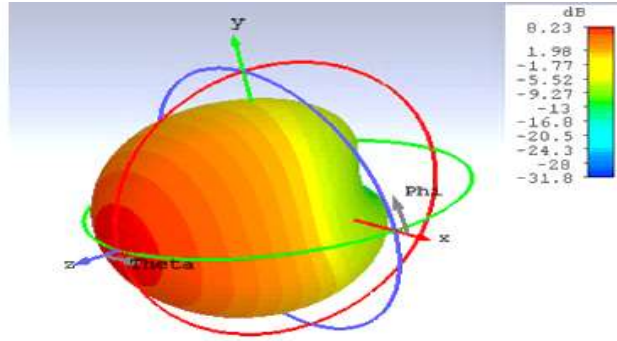
الشكل (7): هوائي الرقعة الشرائحي مع الفتحة

وقد كانت نتائج المحاكاة جيدة لهذا العنصر المفرد على شكل حرف H عند كل من ترددات الرنين حيث يساوي $S_{11} = -30$ dB عند 28GHz و -31 dB عند 38GHz مع عرض نطاق حوالي 0.8GHz على كلا الترددات حيث أن الحد الأعلى للمجال الأول يساوي 28.2GHz والحد الأدنى له يساوي 27.4GHz وبإجراء عملية الطرح - $f_H - f_L = 28.2 - 27.4 \cong 0.8$ GHz أما بالنسبة لحدود المجال الثاني فإن الحد الأعلى له يساوي 38.35GHz والحد الأدنى له يساوي 37.5GHz وأيضاً بإجراء عملية الطرح $f_H - f_L = 38.35 - 37.5 \cong 0.85$ GHz يوضح الشكل (٨)

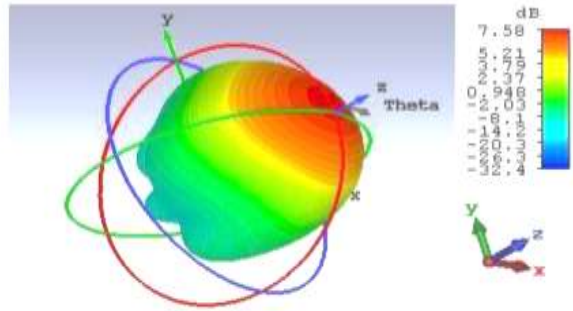


الشكل (٨) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي لهوائي الرقعة المفرد بعد إحداث الفتحة

الأنماط ثلاثية الأبعاد للهوائي المزدوج النطاق على شكل حرف H عند الترددات 28 GHz و 38 GHz موضحة في الشكلين (9) و (10) على التوالي. الحد الأقصى للكسب المحقق هو 8.23 dB عند 28 GHz و 7.58 dB عند 38 GHz.



الشكل (٩): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد للهوائي عند 28 GHz

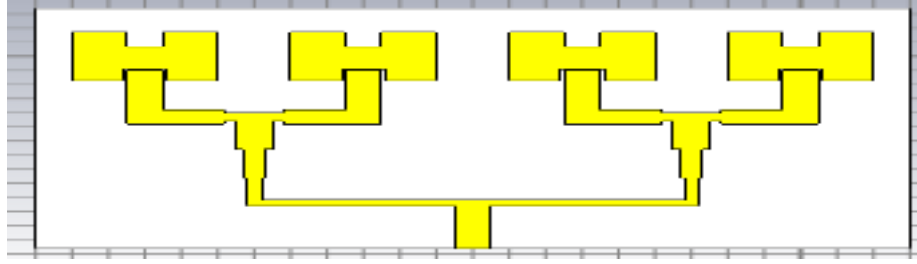


الشكل (١٠): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد للهوائي عند 38 GHz

٣-٤- تصميم مصفوفة هوائيات رقعية شرائحية:

تم استخدام تقنية التغذية المتوازية (المشتركة) لتصميم الشبكة التي تربط الهوائيات بمنفذ الإدخال، حيث تم تغذية جميع العناصر بالتوازي من مصدر واحد، وتتكون هذه الشبكة بشكل أساسي من شبكة متفرعة من مقسمات القدرة ثنائية الاتجاه كما يبين الشكل (11)، والمزايا الرئيسية للتغذية المتوازية هي أنه يتم تقسيم القدرة بالتساوي عند كل تقاطع (junction)، ويكون موضع الحزمة مستقلاً عن التردد بشرط أن تكون المسافات من منفذ الإدخال إلى كل عنصر مشع متطابقة، وأخيراً فإنها تعد تغذية ذات نطاق عريض. عادةً ما تكون جميع العناصر المشعة متطابقة تماماً مع خطوط التغذية بطريقة مناسبة مثل محول ربع طول الموجة، ومن أجل الحصول على شبكة تغذية مشتركة متناظرة، فإن عدد العناصر المشعة يجب أن يكون $2n$ حيث n عدد صحيح [13]. مصفوفة التغذية المتوازية هي سهلة نسبياً والتي يمكن من خلالها تحديد كل من المطال والطور لكل عنصر بشكل مستقل.

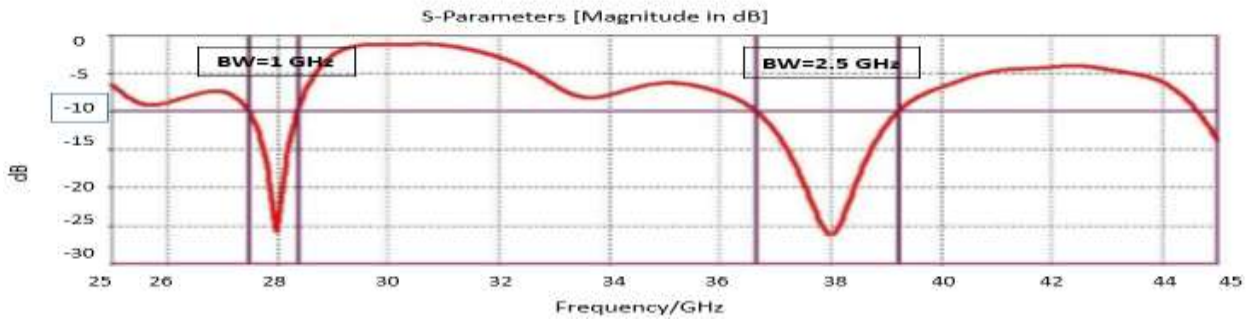
أما بالنسبة لترتيب العناصر فقد تم ترتيبها بشكل خطي وهو ترتيب يسمح بوضع عناصر الهوائيات المختلفة في سطر واحد من طرف إلى آخر، وهذا يعني أن العناصر المختلفة تكون مرتبة خلف بعضها في سطر واحد كما يبين الشكل (11)، ويمكن أن يكون هذا الترتيب إما رأسياً أو أفقياً، هنا أيضاً يتم توفير الإثارة بتيارات لها نفس المطال والطور لجميع العناصر، يوفر هذا الترتيب قيمة جيدة للكسب (الربح).



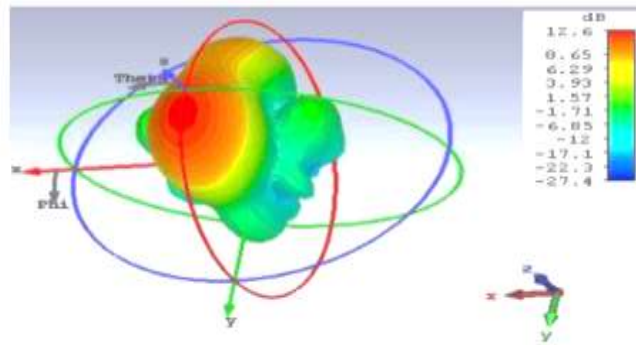
الشكل (١١): مصفوفة هوائيات خطية 1x4

وقد تم استخدام تكوين المصفوفة لتعزيز كسب الهوائي واتجاهيته لأنه بالنسبة لأنظمة اتصالات 5G يجب أن يكون كسب الهوائي أكثر من 12dB. وهذا ما تم تحقيقه من خلال إجراء محاكاة لتصميم مصفوفة الهوائي المكونة من أربعة عناصر حيث كان الكسب أكثر من 12dB عند ترددي الرنين.

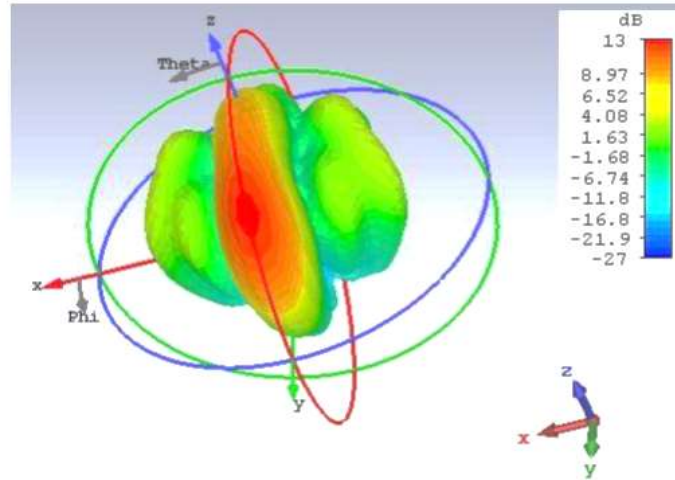
بعد تحسين أبعاد شبكة التغذية، تظهر نتيجة محاكاة S11 تطابقاً جيداً عند ترددي الرنين وهو -25dB عند 28GHz و -27 dB عند 38GHz (الشكل 12). كما أن أنماط الإشعاع المحاكاة ثلاثية الأبعاد عند الترددات 28GHz و 38GHz تظهر كسباً محققاً جيداً قدره 12.6dB و 13dB على التوالي وهي قيم جيدة تحقق متطلبات الجيل الخامس 5G من الاتصالات كما هو موضح في الشكل (13) والشكل (14).



الشكل (١٢) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي لمصفوفة الهوائيات



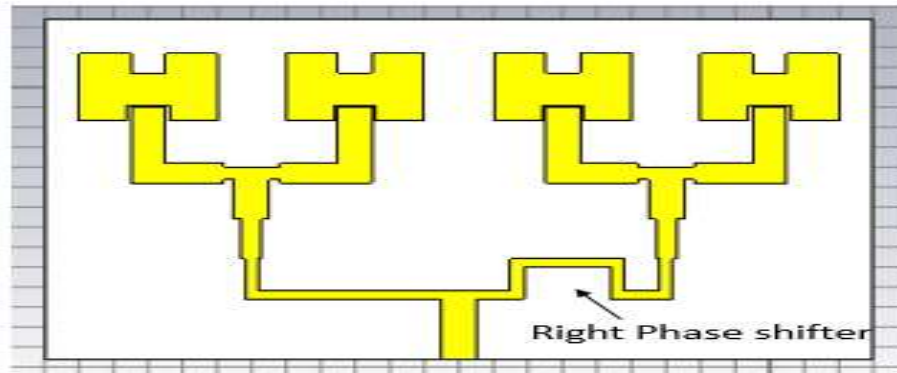
الشكل (١٣): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 28 GHz



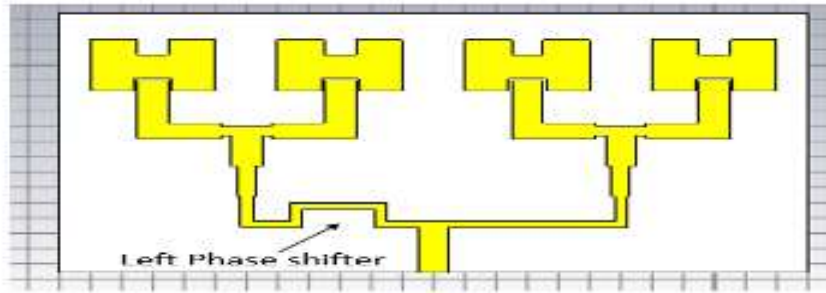
الشكل (١٤): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 38 GHz

تصميم مصفوفة الهوائيات الخطية باستخدام مزيج الطور: -٥-٣

يعد اتجاه مخطط إشعاع الهوائي مهماً جداً في عملية التصميم، حيث تتطلب أنظمة الجيل الخامس هوائيات ذات قدرة على توجيه الحزمة، والاتجاهية العالية تعني حزم إشعاعية أضيق لذا يجب أن نكون قادرين على التحكم في اتجاه الحزمة الرئيسية، ويمكن تحقيق ميزة توجيه الشعاع للهوائيات لأنظمة 5G من خلال العديد من الطرق التي تعتمد على تغيير الطور أو مطال إشارة الدخل للهوائي، وسيؤدي هذا إلى تغيير اتجاه الحزمة الرئيسية إلى الاتجاه المطلوب وفقاً لفرق الطور بين الإشارات المغذية للهوائيات. يعرض الشكلان (15) و (16) بنية مصفوفة الهوائيات المكونة من أربعة عناصر مزاحة الطور حيث تمت إضافة محول الطور phase shifter مرة على الجانب اليمين ومرة أخرى على الجانب الأيسر، ويمكن لهذين التصميمين تحقيق قدرة توجيه الحزمة الثابتة حيث يمكن توجيه الحزمة الرئيسية مرة إلى الاتجاه θ بينما يقوم الهيكل الآخر بتوجيه الحزمة إلى الاتجاه $-\theta$.



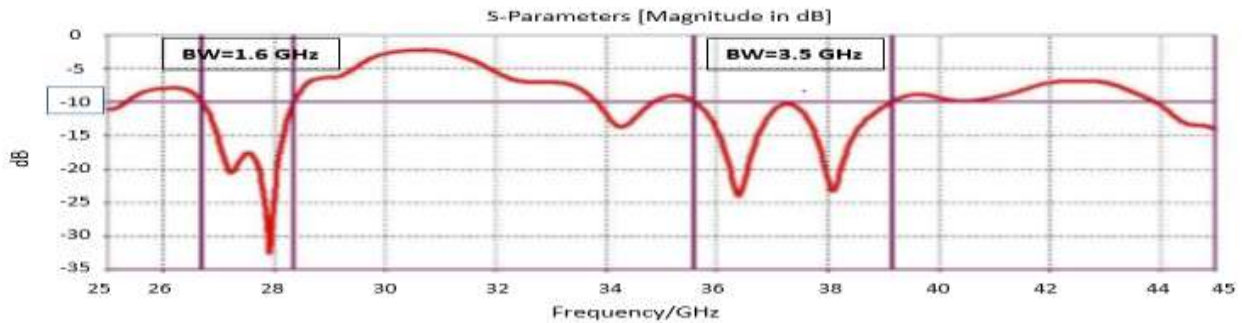
الشكل (١٥) مصفوفة هوائيات خطية 1x4 مع محول طور يميني



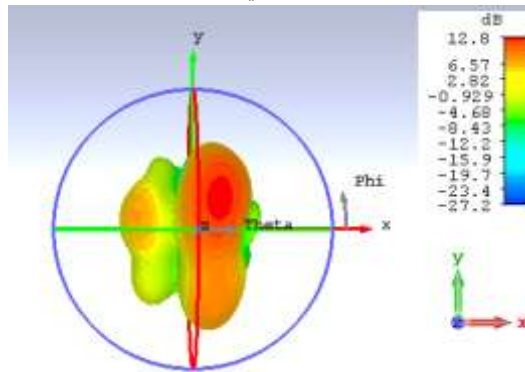
الشكل (١٦) مصفوفة هوائيات خطية 1x4 مع محول طور يساري

بعد إضافة محول (مزيج) الطور إلى تصميم العناصر الأربعة، تظهر نتيجة محاكاة S11 تطابقًا جيدًا عند ترددي الرنين وهو -28 dB عند ٢٨GHz و -23 dB عند 38GHz الشكل (١٧). أيضًا، يُظهر مخطط الإشعاع المحاكى ثلاثي الأبعاد عند ٢٨GHz ربحًا محققًا جيدًا قدره ١٢.٨ ديسيبل حيث يتم توجيه الحزمة إلى $\theta = +10$ درجة في الهيكل مع ناقل الطور الأيمن وإلى $\theta = -10$ درجة في الهيكل مع ناقل الطور الأيسر كما هو موضح في الشكلين (18) و (19).

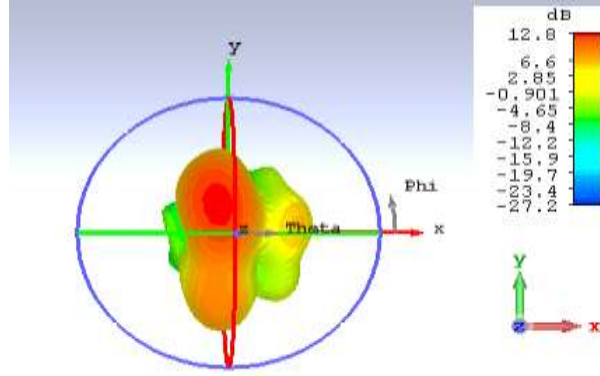
وبالمثل، محاكاة ثلاثية الأبعاد، يُظهر مخطط الإشعاع عند ٣٨GHz كسبًا محققًا جيدًا يساوي 9.03 ديسيبل حيث يتم توجيه الحزمة إلى $\theta = +10$ درجة في الهيكل مع ناقل الطور الأيمن وإلى $\theta = -10$ درجة في الهيكل مع ناقل الطور الأيسر كما هو موضح في الأشكال (20) و (21).



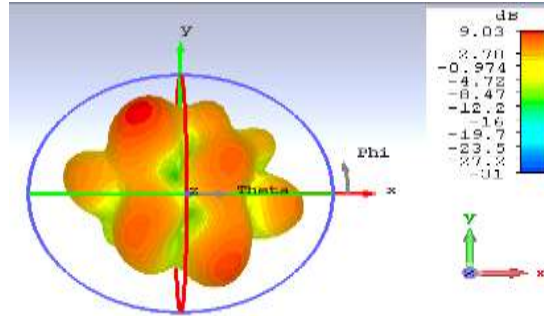
الشكل (١٧) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي لمصفوفة الهوائيات بعد إضافة محولات الطور



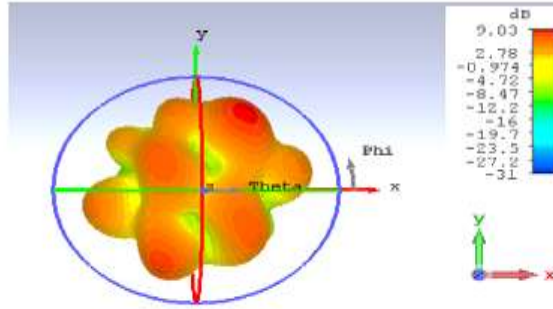
الشكل (١٨): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 28 GHz (محول الطور اليميني)



الشكل (١٩): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 28 GHz (محول الطور اليساري)



الشكل (٢٠): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 38 GHz (محول الطور اليميني)



الشكل (٢١): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد لمصفوفة الهوائيات عند 38 GHz (محول الطور اليساري)

٤. الاستنتاجات والتوصيات:

- تُعد هوائيات الرقعة الشرائحية من أكثر أنواع الهوائيات شيوعاً نظراً لمزاياها الواضحة من الوزن الخفيف والتكلفة المنخفضة والتكوين المستوي وسهولة التصنيع، وهي مناسبة للمصفوفات.
- Duroid هي عبارة عن ألياف زجاجية مقواة ب PTFE (poly tetra fluoro ethylene). وتتميز الركيزة RT Duroid 5880 بفقدان ظل منخفض وثابت عزل منخفض، وتوفر مقاومة كيميائية ممتازة، وتُعد الأفضل بالنسبة للموجات المليمترية (mm wave)، وهي مناسبة كثيراً للترددات العالية جداً (UHF) نظراً لعزلها الكهربائي المنخفض.
- يعد اختيار تقنية التغذية للهوائي الشرائحي المطبوع قراراً مهماً لأنه يؤثر على عرض النطاق الترددي والبارامترات الأخرى، حيث تم اختبار ثلاثة أنماط من تقنيات التغذية على هوائي الشرائحي المطبوع ولاحظنا بأن كل تقنية تعطي نطاقاً ترددياً مختلفاً وكسباً مختلفاً وكفاءة مختلفة

- وما إلى ذلك. تُعد الهوائيات المقترنة بالفجوة هي الأفضل وذلك لأنها حققت متطلبات الجيل الخامس من الاتصالات حيث كان عرض النطاق الترددي لها أكبر من 1GHZ وقيمة الكسب (الربح) أكبر من 6dB كما أن قيمة الكفاءة الإشعاعية لها كانت هي الأفضل.
- التغذية المشتركة (المتوازية) للهوائيات المصفوفية تمكننا من تحقيق المزيد من التحكم في السعة والطور بسبب القدرة على تغيير أطوال خطوط التغذية بشكل منفصل، وهذا يعني أن مصفوفات التغذية المشتركة يمكن أن تتمتع بقدرة أكبر على توجيه أنماط إشعاع الهوائي.
 - يساهم تكوين مصفوفة الهوائيات في زيادة الكسب والاتجاهية مما يعزز متطلبات الجيل الخامس من الاتصالات.
 - يساعد استخدام محولات الطور في تصميم مصفوفات الهوائيات في تحقيق ميزة توجيه الشعاع.
 - يمكن دراسة أداء الهوائي من أجل تقنيات تغذية أخرى ومقارنة أدائها.
 - يمكن دراسة أداء الهوائي من أجل أنماط أخرى من مزيحات الطور ومقارنة أدائها.
 - تصميم هوائي الرقعة الشرائحي من أجل أشكال مختلفة للرقعة ومقارنة أدائها وتأثيرها على البارامترات المختلفة للهوائي.

٥. المراجع

- [١] ف.غصنة، ل.علي، ل.إسماعيل، ٢٠١٩ التكامل بين شبكات الجيل الخامس وشبكات IOT (إنترنت الأشياء) إمكانية التحقيق وجودة الأداء"، مجلة جامعة طرطوس.
- [٢] م. نصر، ل. حسن، ٢٠٢١. "دراسة تأثير تقنيات التغذية على الهوائي الشرائحي المطبوع في مجال الاتصالات الخلوية للجيل الخامس ٥"، مجلة جامعة طرطوس.
- [٣] م. نصر، ل. حسن ٢٠٢٢. "تصميم مصفوفة هوائيات تعمل عند ثلاثة ترددات لأنظمة اتصالات الجيل الخامس ٥"، مجلة جامعة طرطوس.
- [4] J.Yuan, L.Ge, J. Wang, Q. Chen, W. Wu, L.Yujian 2019. "Reconfigurable Phased-Array Antenna Using Continuously Tunable Substrate Integrated Waveguide Phase Shifter". IEEE.
- [5] H. Ren , L. Peizhao , G.Yixin , B. Arigong, 23 July 2020 . "Phase Shifter-Relaxed and Control-Relaxed Continuous Steering Multiple Beamforming 4×4 Butler Matrix Phased Array" UNIVERSITY OF BIRMINGHAM. IEEE.
- [6] Z. R. Omam, W. M. Abdel-Wahab, A. Raeesi, A. Palizban, 03 May 2020. "Ka-Band Passive Phased-Array Antenna with Substrate Integrated Waveguide Tunable Phase Shifter" University of Canberra. IEEE.
- [7] K.M. Younus, A.A. Jasim, R.W. Clarke, 2021. "A beam Steering System Design based on Phased Array Antennas", INCET.
- [8] D. Ehyaie, 2018 "Novel Approaches to the Design of Phased Array Antennas", IEEE.
- [9] H. chu, C.shao, X. Zhu, 2022, "Design of a phased array antenna with scan loss reduction and gain enhancement by using reconfigurable subarrays", IET Microwaves, Antennas And Propagation, V.19, P.789-797.
- [10] S. Mingle, I. Hassoun, W. Kamali, 2019, "Beam-steering in metamaterials enhancing gain of patch array antenna using phase shifters for 5g applications", IEEE, p.1-4.

- [11] Constantine A. Balanis, 2007 “*ANTENNA THEORY - Analysis and Design*”, *Second Edition: Reprint*, John Wiley Publications
- [12] Fadel A. M. Alaswad , Mohamed A. S. Alshushan , 2022. “*Bandwidth Enhancement of rectangular microstrip patch antenna using T slot inside U-slot shape*”, ISTJ.
- [13] T. Varum, A. Ramos, J. N. Matos, *Planar microstrip series-fed array for 5G applications with beamforming capabilities*, 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G), 2018, P.1-3