

Design and Analysis a MIMO Antenna Based on a Fractal Distribution of Graphene material for THz Applications

Rawan Mayya * 

Dr. Alsamowal Saleh **

Dr. Ghadir Madi ***

(Received 24 / 5 / 2025. Accepted 20 / 8 / 2025)

□ ABSTRACT □

Terahertz (THz) band is one of the least explored regions of the electromagnetic spectrum, and just a few materials respond to these frequencies. Thus, THz is considered a pivotal solution to support applications that require high data rates, such as the sixth-generation wireless communication systems. Graphene has been suggested as a promising candidate due to its unique characteristics and high electrical conductivity, unlike traditional metal antennas. THz band requires enhanced channel capacity and high data rates; therefore, multi-input multi-output systems (MIMO) are used in the THz band. This study presents the design and performance analysis of a MIMO antenna based on a fractal structure of graphene operating in THz band. This research studies the antenna's capability for dynamic frequency reconfiguration by controlling the chemical potential (Fermi level). Changing the resonance frequency by adjusting graphene's chemical potential confirms the antenna's tunability. Furthermore, employing fractal structures of graphene results in a multiband antenna whose frequencies can be tuned by varying the fractal parameters. Using CST Studio Simulator, we analyzed the effects of graphene and fractal geometry parameters on the antenna's performance.

Keywords: Graphene, Terahertz Band, MIMO, Sierpinski Carpet.

Copyright



:Latakia University journal(Formerly Tishreen)-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Master student, Department of communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University(Formerly Tishreen), Latakia, Syria. rawan.r.mayya@tishreen.edu.sy

** Professor, Department of Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria. dr.alsamowalsaleh@tishreen.edu.sy

*** Associate Professor, Department of communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University(Formerly Tishreen), Latakia, Syria ghadirmadi@yahoo.fr

تصميم وتحليل هوائي متعدد المداخل والمخارج MIMO باستخدام بنية تجزئية لمادة الغرافين لتطبيقات التيراهرتز THz

روان ميا * ID

د. السموءل صالح **

د. غدير ماضي ***

(تاريخ الإيداع 2025 / 5 / 24. قُبل للنشر في 2025 / 8 / 20)

□ ملخص □

تعتبر حزمة التيراهرتز أقل المناطق في الطيف الكهرومغناطيسي استكشافاً والمواد التي تستجيب لهذه الترددات قليلة، برزت الحاجة إلى النطاق التيراهرتز باعتباره حلاً محورياً لتلبية التطبيقات التي تطلب سرعة نقل عالية مثل الجيل السادس لأنظمة الاتصالات اللاسلكية.

يشكل الغرافين مادة جديدة اقترح استخدامه في مجال التيراهرتز وجذب اهتمام الباحثين بسبب خصائص الغرافين الفريدة وموصليته الكهربائية العالية في نطاق التيراهرتز بخلاف الهوائي المعدني التقليدي غير الملائم لنطاق التيراهرتز. أهم متطلبات نطاق التيراهرتز هي تحسين سعة القناة اللاسلكية وتأمين معدل نقل عالي للبيانات، لذلك يتم استخدام أنظمة الاتصالات متعددة المداخل والمخارج MIMO.

تم في هذا البحث تصميم وتحليل أداء هوائي MIMO يعتمد على بنية تجزئية لمادة الغرافين في نطاق التيراهرتز. يدرس البحث قدرة الهوائي على إعادة تشكيل التردد ديناميكياً عن طريق التحكم بأهم بارمتر للغرافين وهو الجهد الكيميائي (جهد فيرمي)، يؤكد تغير التردد مع تغيير الجهد الكيميائي للغرافين على قابلية توليف الهوائي، أثمر استخدام البنى التجزئية للغرافين عن هوائي متعدد الحزم الترددية يمكن التحكم بتردداته عن طريق تغيير بارمترات الجسم التجزئي. اعتمد البحث محاكي CST Studio والذي يستخدم طريقة العناصر المنتهية لتحليل معاملات الهوائي المقترح تبعاً لتغيير بارمترات الجسم التجزئي والغرافين.

الكلمات المفتاحية: نطاق التيراهرتز، الغرافين، أنظمة الهوائيات متعددة المداخل والمخارج، سجادة سبرينسكي.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة ماجستير - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) -

اللاذقية - سوريا rawan.r.mayya@tishreen.edu.sy

** أستاذ - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية -

سوريا dr.alsamowalsaleh@tishreen.edu.sy

*** أستاذ مساعد - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) -

اللاذقية - سوريا ghadirmadi@yahoo.fr

مقدمة:

لقد اكتسب الجيل الجديد لنظام الاتصالات اللاسلكي (sixth generation 6G) اهتماماً كبيراً في السنوات الأخيرة نتيجة الحاجة المتزايدة إلى معدلات بيانات أعلى واتصالات فائقة السرعة، ومن المتوقع أن تكون تقنية الاتصالات اللاسلكية 6G جاهزة للعمل بحلول عام 2030 وتحتل نطاقات التيراهرتز المكون الأساسي للبنية التحتية للاتصالات اللاسلكية، لذلك تواجه التقنيات في هذا الطيف تطوراً سريعاً وتتمتع بإمكانات عالية في تطبيقات الاتصالات اللاسلكية فائقة السرعة قصيرة المدى والاستشعار عن بعد والكشف البيولوجي ونقل البيانات بمعدلات عالية في تطبيقات انترنت الأشياء [1].

يشكل الهوائي عنصراً مهماً في كفاءة نظام الاتصالات اللاسلكية، فهو يحول التيار الكهربائي إلى موجات كهرومغناطيسية تُبث في الفضاء، أما في حالة الاستقبال، يستقبل الهوائي بعضاً من طاقة الموجات ويحولها إلى تيار كهربائي [2]، دفعت عيوب الهوائي المعدني في نطاق التيراهرتز الباحثين إلى استخدام مواد عضوية ثنائية الأبعاد مثل الغرافين في تصميم الهوائيات، يتمتع الغرافين بخصائص كهربائية وميكانيكية وحرارية مميزة، بالإضافة إلى ذلك يمكن تعديل موصلية الغرافين ديناميكياً عن طريق تطبيق جهد كهربائي خارجي، تقدم هذه الميزة هوائيات قابلة لإعادة التشكيل بحيث يمكن ضبط استجابة الهوائي وخصائصه عن طريق تغيير الكمون الكيميائي مما يجعله هوائي مرناً وقابل للتكيف مع متطلبات الاتصالات المختلفة في نطاق التيراهرتز [3].

وبما أن قناة الاتصال اللاسلكية تتأثر أيضاً بالخفوت لذلك يُعتبر استخدام هوائيات متعددة المداخل والمخارج (Multiple Input -Multiple Output MIMO) مناسبة لتقليل خفوت الإشارة في قناة الاتصال اللاسلكية لنطاق التيراهرتز وبالتالي زيادة سعة النظام [4].

أهمية البحث وأهدافه:

تواجه تقنيات الاتصالات الحديثة تحديات كبيرة في التوسع إلى نطاق التردد تيراهرتز، بسبب القيود التقنية المتعلقة بالمواد، فالهياكل المعدنية المستخدمة في الهوائيات التقليدية تصبح غير فعالة عند الترددات العالية بسبب انخفاض الموصلية الكهربائية وزيادة خسارة الإشعاع، لذلك هناك حاجة ملحة لاستكشاف مواد جديدة مثل الغرافين الذي يتميز بخصائص كهربائية قابلة للتعديل، مما يجعله خياراً مثالياً لتطوير هوائيات MIMO قابلة لإعادة التشكيل في نطاق التيراهرتز، إلى جانب الاستفادة من خصائص الهندسة التجزئية ودراسة ما ستقدمه في نطاق التيراهرتز. إن الهدف الرئيس من البحث هو تصميم وتحليل أداء هوائي MIMO باستخدام التوزيع التجزئي لمادة الغرافين يعمل في نطاق التيراهرتز، يدرس هذا البحث إعادة ضبط التردد وتحقيق التشغيل متعدد النطاقات من خلال استغلال خصائص الهندسة التجزئية للهوائي ومادة الغرافين مما يسمح بتحكم واسع في تردد الرنين.

طرائق البحث ومواده:

1 - الدراسات المرجعية:

على الرغم من وجود العديد من الدراسات التي تناولت تصميم هوائيات MIMO باستخدام مادة الغرافين أو الهندسة التجزئية، إلا أن معظمها يقتصر إما على دراسة خصائص الغرافين في نطاق التيراهرتز دون الاستفادة من ميزات

الهندسة التجزئية، أو يقتصر على استخدام الهندسة التجزئية في نطاقات أقل من التيراهرتز (GHZ) كما في تطبيقات الجيل الخامس. على سبيل المثال، تناولت الدراستان [5] و[6] تصميم هوائيات MIMO ثنائية المنفذ تعمل ضمن نطاق GHZ باستخدام رقع مشعة معدنية ذات أشكال تجزئية مثل بنية Sierpinski Koch أو غيرها، مما ساعد على تصغير أبعاد الهوائي وتحسين الأداء.

أما في نطاق التيراهرتز، فقد قدمت الدراسة [7] هوائي MIMO ثنائي المنفذ باستخدام الغرافين يعمل عند تردد 1.91 THz. كما ركزت الدراسة [8] على تصميم هوائي برقعة مشعة واحدة باستخدام الغرافين ضمن نطاق 1.8THz-2.5THz وقدمت الدراسة [9] دمج بنى أرضية من الميتاماتيريال مع الغرافين في تصميم هوائي MIMO ضمن نطاق 3.85THz ولكن من دون توظيف للهندسة التجزئية في نطاق التيراهرتز. وما زال هذا التوجه في مراحله الأولى، ويُعد مجالاً واعداً للبحث من أجل استكشاف الإمكانيات الكاملة لتكامل الغرافين مع الهندسة التجزئية في نطاق التيراهرتز.

2 - نطاق التيراهرتز:

على مدار العقد الماضي تم توقع نطاق التيراهرتز على أنه التكنولوجيا الرئيسة للجيل السادس من الاتصالات الخلوية، والتي تم تحديدها على أنها النطاق الطيفي الذي يمتد بين الترددات (0.1 THz – 10 THz)، يوفر مجال التيراهرتز نطاق ترددي عريض جداً يمكن أن يصل إلى مئات الجيجاهرتز من أجل تلبية الطلب المتزايد على معدلات النقل العالية والسريعة في الاتصالات [3].

يختلف التشتت وانعكاس الإشارات في نطاق التيراهرتز عن تلك الموجودة في النطاقات الأخرى، بحيث تعتبر أسطح الأجسام في البيئات الداخلية في نطاق التيراهرتز خشنة بدلاً من أن تكون أسطح ملساء، وذلك بحسب الطول الموجي للموجة الساقطة وزاوية سقوطها واستقطاب الموجة الساقطة والخصائص الكهربائية للسطح وكثافة السطح، إضافة لذلك عندما يتم إرسال موجات التيراهرتز في بيئات داخلية فإن الأجسام الموجودة في هذه البيئات تتحرك ببطء نسبياً مقارنة بسرعة انتشار الموجات، وبالتالي فإن تأثير هذه الأجسام على انتشار الموجات يكون بطيء جداً ويمكن اعتبارها أجسام ثابتة بين هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال، وتعتبر هذه ميزة إيجابية في نظام التيراهرتز حيث أنها تساعد على تحسين جودة الاتصال وزيادة مدى الإشارة دون تأثير كبير لحركة الأجسام الموجودة في البيئات الداخلية [2].

3 - الغرافين:

تشكل الاتصالات التي تدعم الغرافين نموذج جديد تم اقتراحه وجذب اهتمام الباحثين بسبب خصائص الغرافين الفريدة الميكانيكية والحرارية والكهربائية والإلكترونية [10].

الغرافين هو عبارة عن بلور كربوني ثنائي الأبعاد يتمتع بخصائص فيزيائية وكيميائية مميزة مثل:

- ✓ موصلية كهربائية جيدة مما يجعله مناسب جداً لنشر الإشارات الكهربائية عالية التردد.
- ✓ الغرافين أرق مادة معروفة على الإطلاق وأمتن المواد المعروفة.
- ✓ يتمتع الغرافين بمرونة عالية ومقاومة عالية ويعتبر من أفضل موصلات الحرارة.
- ✓ من أقوى المواد المانعة للنفاذ فهو أقوى من الفولاذ بحوالي 200 مرة، كثيف للغاية، لا يسمح تكوينه السداسي بمرور أصغر ذرة معروفة كيميائياً وهي ذرة الهيليوم .

✓ يتفاعل بشكل جيد مع الأنسجة الحية دون أي تأثير سلبي على الجسم مما يجعله مادة آمنة للاستخدام في الأجهزة الطبية والصحية ويمكن استخدامه في الأجهزة اللاسلكية المستخدمة في المجال الطبي دون أي تأثير سلبي على الجسم [11].

إضافة لجميع الميزات السابقة يدعم الغرافين انتشار موجات بولاريتون (Surface Plasmon Polariton SPP) في درجة حرارة الغرفة، الموجات البلازمية هي موجات كهرومغناطيسية محصورة، تظهر في ترددات التيراهرتز عند السطح الفاصل بين المعدن والعازل نتيجة تذبذبات الشحنات الكهربائية، بسبب هذه الخصائص يستخدم الغرافين لتصميم هوائيات نانوية بلازمية يمكنها العمل بكفاءة في نطاق التيراهرتز.

تنتشر موجات SSP بسرعة أقل بكثير من الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ الحر، نتيجة لذلك فإن الطول الموجي

$$\lambda_{spp} \text{ أصغر بكثير من الطول الموجي في الفضاء الحر } \lambda$$

$$\gamma = \lambda / \lambda_{spp} \quad (1)$$

يعرف γ (confinement factor) بعامل الحبس ويمثل نسبة الطول الموجي في الفضاء الحر إلى الطول الموجي للموجة السطحية λ_{spp} ، ويعبر عن مستوى تركيز الموجة الكهرومغناطيسية قرب سطح المادة، عندما يكون معامل الحبس مرتفعاً، تكون الموجة الكهرومغناطيسية محصورة بشكل أكبر على سطح المادة، مما يسمح بتصغير أبعاد الهوائي وتحقيق تكامل أفضل مع الأنظمة النانوية [12].

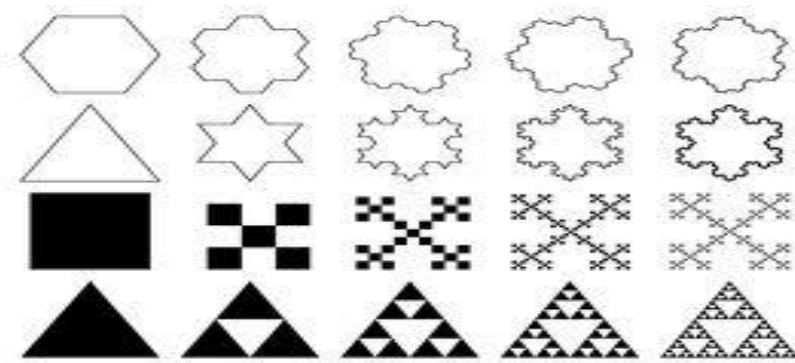
العلاقة التي تعبر عن طول الهوائي البلازمي تعطى كالآتي [10]:

$$l_p \approx \frac{\lambda_{spp}}{2} = \frac{\lambda}{2\gamma} \quad (2)$$

وبالتالي أبعاد الهوائيات البلازمية أصغر أبعاد من الهوائيات المعدنية، مما يسمح بتصميم هوائيات أصغر وأكثر كثافة، فالهوائيات النانوية البلازمية القائمة على الغرافين ليست سوى بطول بضعة ميكرومتر وعرضها مئات النانومترات فقط أي أصغر تقريباً بمقدار ضعفين من الهوائيات المعدنية في التيراهرتز [10].

4 - الهندسة التجزئية (الفراكتالية):

يعود مصطلح fractal إلى الكلمة اللاتينية (fractus) التي تعني الأجزاء الهندسية غير المنتظمة (fragment irregular)، ويسمى بالهندسة التجزئية (fractal geometry)، وهو يختلف عن الهندسة الإقليدية التي تتعامل مع خطوط ودوائر وأشكال هندسية منتظمة تتضمن ثلاثة أبعاد [13].



الشكل (1) أشكال هندسية مختلفة للفركتالات

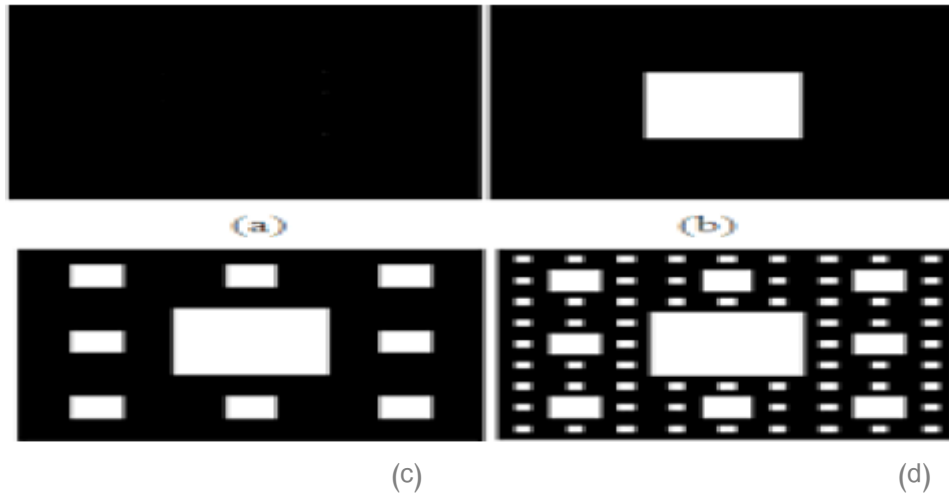
الجسم التجزئي: هو جسم غير منتظم يملك خصائص مميزة مثل خاصية التشابه الذاتي أو التكرار للشكل العام، أي أن القطعة الصغيرة منه هي شكل مصغر جداً عن الشكل الإجمالي للجسم.

البنية التجزئية: هي أشكال هندسية تنتج من تقسيم الشكل الأساسي إلى أجزاء صغيرة، وكل جزء هو صورة مصغرة من الشكل الأساسي كما يظهر الشكل (1). أي أن البنية التجزئية هي كائن ذو بعد كسري يتم إنتاجه بشكل متكرر.

الهوائيات التجزئية: هي هوائيات تستخدم بنية تجزئية أو جسم تجزئي للتصميم وذلك من أجل زيادة الطول الفعال للهوائي، وجود أكثر من جزء مشع في البنية يوفر عرض حزمة كبير أو هوائي متعدد الحزم [14].

سجادة سيربينسكي (Sierpinski Carpet):

هندسة كسورية منتظمة على شكل مستطيل أو مربع، الشكل الأصلي بدون أي تكرار هو رقعة بسيطة مربعة $S=0$ ، يمكن تطبيق أبعاد مختلفة ومستقلة عن أبعاد الشكل الأصلي عند إنشاء تصميم سجادة سيربينسكي حيث أن التصميم يعتمد بشكل أساسي على النسب والتكرار، يتم اختيار أبعاد المستطيل الكبير الذي في المنتصف وتوزيع باقي التكرارات بناءً على أبعاده، بعد تحديد موقع كل مستطيل في كل تكرار يتم إزالته من الشكل، تتكرر هذه العملية N عدد من المرات يعرف بالتكرارات، يوضح الشكل (2) بنية سجادة سيربينسكي:

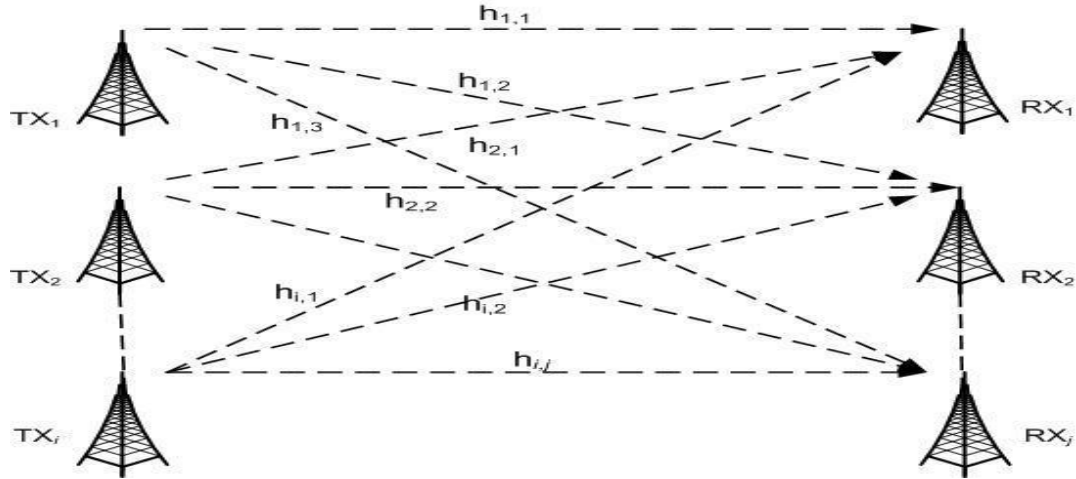


الشكل (2) بنية سجادة سيربينسكي (a) الشكل الأساسي بدون أي تكرار $S=0$ (b) $S=1$ التكرار الأول ويسمى المولد (c) $S=2$ التكرار الثاني (d) $S=3$ التكرار الثالث [14]

4 - نظام الهوائيات متعددة المداخل والمخارج MIMO:

تعتبر خسارة المسار Pass Loss بالإضافة إلى فقدان الامتصاص الجزئي من المشاكل الرئيسة في نطاق التيراهرتز بسبب التخميد الجوي العالي، للتعويض عن تأثير هذه الخسارة في ترددات التيراهرتز مع دعم معدلات بيانات عالية تم اقتراح استخدام هوائيات متعددة المداخل والمخارج MIMO (Multiple Input - Multiple Output) للتغلب على هذه المشكلة، تؤمن هوائيات MIMO ربح عالي عند زاوية الإشعاع مع أقل خسارة وعرض نطاق واسع وأقصى قدر من الموثوقية في الاتصالات، وهذا ما يجعل هوائيات MIMO مناسبة للاستخدام في تطبيقات التيراهرتز

نظام MIMO هو نظام يتضمن عدة هوائيات في كل من طرفي الإرسال والاستقبال معاً حيث توضع عدة هوائيات مفصولة مكانياً عن بعضها البعض كما هو موضح في الشكل (3)، يعتبر الحل المحوري لتعزيز سعة القناة مقارنة بالأنظمة اللاسلكية التقليدية [15].



الشكل (3) نموذج نظام MIMO [16]

تعتبر القناة اللاسلكية بين كل زوج هوائيات (مرسل - مستقبل) قناة (Single Input Single Output) ، والتي تعتبر كل منها قناة لاسلكية متعددة المسارات Wireless Multipath Channel [15].

النتائج والمناقشة:

قمنا في هذا البحث بتصميم هوائي متعدد المداخل والمخارج (MIMO) ثنائي المنفذ مصنوع من مادة الغرافين، حيث تم اعتماد بنية التغذية الحثية غير المباشرة. في هذا النوع من التغذية، يتم فصل خط التغذية عن الرقعة المشعة بواسطة طبقة عازلة (الركيزة الثانية)، يتم تحفيز الرقعة المشعة من خلال اقتران حثي ناتج عن الحقل الكهرومغناطيسي لخط التغذية، دون وجود تماس كهربائي مباشر. تتيح بنية التغذية الحثية غير المباشرة تحسين التوافق بين خط التغذية والرقعة المشعة، وتقليل الإشعاع غير المرغوب فيه، بالإضافة إلى توسيع النطاق الترددي، لا سيما في التطبيقات عالية التردد [17]، ولهذا تم اعتماد التغذية الحثية في التصميم الحالي.

يتوضع الغرافين كرقعة مشعة على طبقتي أساس من مادة ثنائي أكسيد السيليكون ويتحدد ارتفاعهما بالشرط [7]:

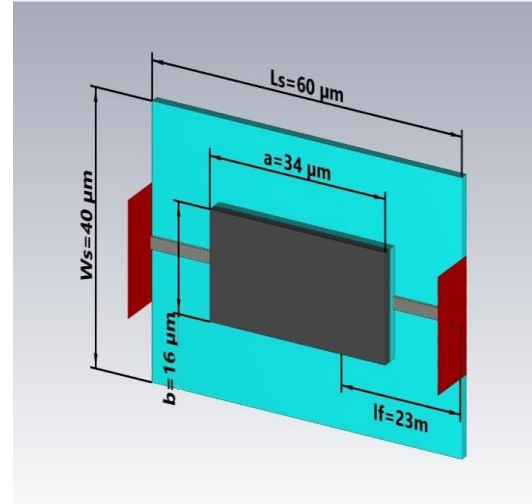
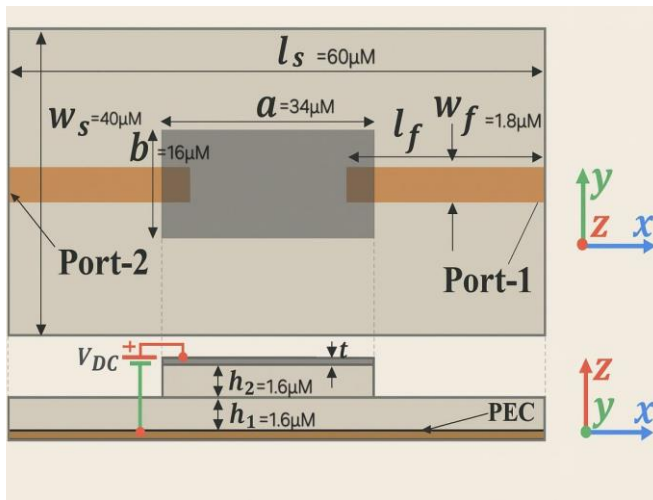
$$0.003\lambda_0 < h < 0.05 \lambda_0 \quad (3)$$

يظهر الشكل (4) هوائي MIMO المصمم ثنائي المنفذ المصنوع من مادة الغرافين وفقاً للأبعاد الفيزيائية المثلى للهوائي المقترح المبينة في الجدول (1):

الجدول (1) الأبعاد الفيزيائية للهوائي المصمم

المقياس	البعد الفيزيائي
60	طول المستوي الأرضي والركيزة الأولى l_s
40	عرض المستوي الأرضي والركيزة الأولى w_s
1.6	ارتفاع الركيزة الأولى والركيزة الثانية h_1 h_2
23	طول خطي التغذية l_f
1.8	عرض خطي التغذية w_f
34	طول رقعة الغرافين المشعة a
16	عرض رقعة الغرافين المشعة b

:



(a) مقطع جانبي للهوائي المقترح (b) التمثيل الهندسي للهوائي المقترح مع الأبعاد الفيزيائية
الشكل (4) بنية الهوائي في المرحلة $S = 0$ من البنية التجزئية المقترحة

يتكون التصميم المقترح من ركيزتين من ثنائي أكسيد السيليكون بثابت عازلية كهربائي يبلغ 3.8 و يبلغ ارتفاع الركيزة الأولى h_1 ، وارتفاع الركيزة الثانية h_2 ، أسفل الركيزة الأولى يوضع مستوي أرضي مثالي، بينما يوجد في الجزء العلوي من الركيزة الأولى خطي التغذية، ويتم فصل خطوط التغذية عن رقعة الغرافين المشعة للهوائي باستخدام الركيزة الثانية، تم حساب أبعاد خطوط التغذية لتتحقق تطابق مقاومة تبلغ 50Ω ، كما تم اختيار نسبة الطول إلى العرض (a/b) لرقعة الغرافين وفق للخصائص الكهربائية والفيزيائية للتحليل الوارد في المرجع [18]، وتم اختيار أبعاد الرقعة المشعة وخطوط التغذية بما يحقق تطابقاً جيداً عند تردد الرنين 6THz، بالاعتماد بشكل رئيسي على نتائج المحاكاة باستخدام برنامج CST Studio ، الذي يستخدم طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) في حل معادلات ماكسويل [19] لتحليل معاملات الهوائي المقترح بناءً على تغيير بارامترات الجسم التجزئي والغرافين. كما تم الاستناد إلى المعادلات التحليلية العامة لتحديد أبعاد الهوائي [17]، يعطى عرض الرقعة المشعة W بالعلاقة التالية :

$$W = \frac{1}{2f_0\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (4)$$

ϵ_0 : السماحية النسبية للفراغ.

μ_0 : النفاذية المغناطيسية للفراغ

C : سرعة الضوء في الفراغ.

1 - دراسة تأثير تغيير بارامترات الغرافين على سلوك الهوائي التجزئي المقترح

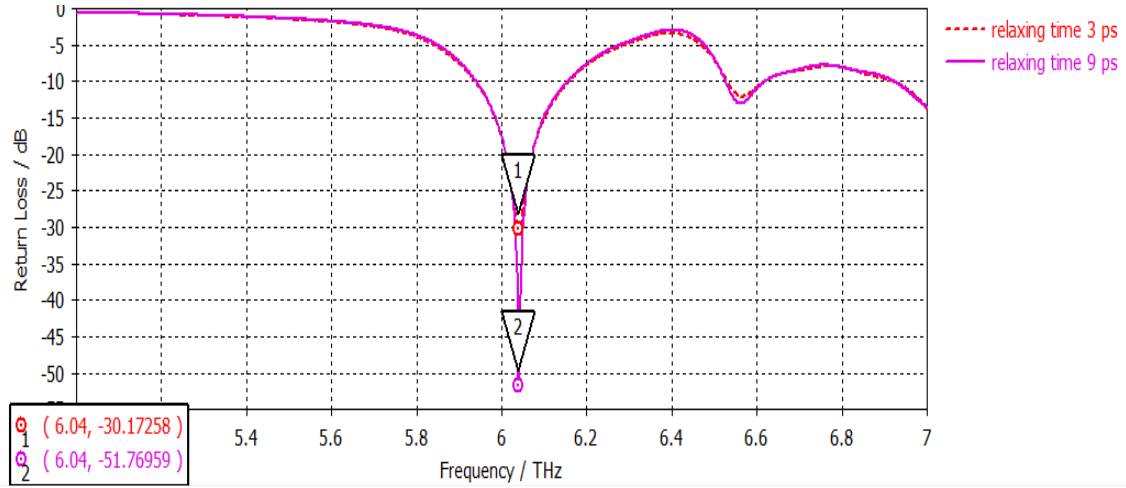
1-1 دراسة تأثير زمن الاسترخاء على سلوك الهوائي عند قيمتين مختلفتين لزمن الاسترخاء T

زمن الاسترخاء (Relaxation Time): هو أحد أهم البارامترات في تصميم هوائيات الغرافين، حيث يساهم في تحسين استجابتها ويجعلها فعالة للتطبيقات عالية التردد، وهو مصطلح يشير إلى الفترة الزمنية التي تستغرقها الإلكترونات لتعود إلى حالتها الطبيعية أو الأصلية بعد تعرضها لتأثير خارجي، في مجال الهوائيات المصنوعة من

الغرافين وتطبيقات التيراهيرتز، يلعب زمن الاسترخاء دوراً أساسياً في تحديد خواص التوصيل والترددات التي يمكن للهوائي العمل عليها [20].

تم تغيير زمن الاسترخاء عند الأبعاد الفيزيائية المبينة في الجدول (1) ودراسة تأثير هذا التغيير على خسارة العودة return loss عند الشروط الحدية والقيم نفسها.

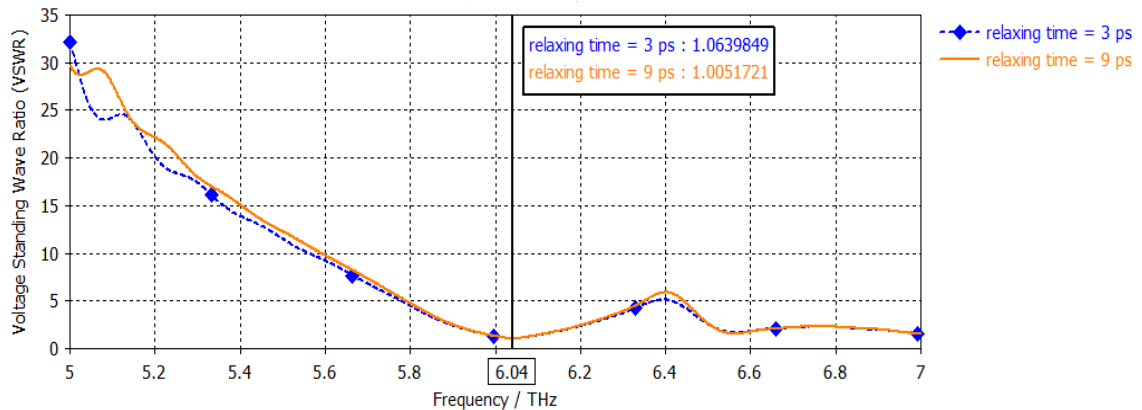
يبين الشكل (5) قيمة خسارة العودة عند تردد عمل الهوائي المقترح عند زماني استرخاء $\tau=9\text{ps}$ $\tau=3\text{ps}$



الشكل (5) خسارة العودة عند قيمتي زمن الاسترخاء $\tau=3\text{ps}$ $\tau=9\text{ps}$

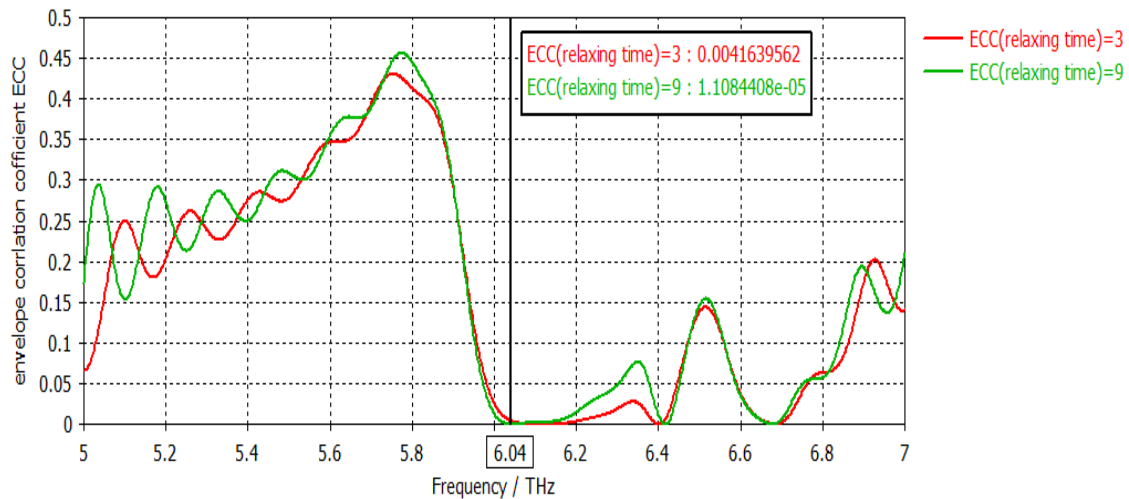
من الشكل (5) نلاحظ زيادة خسارة العودة (return loss) من -30.17dB عندما $\tau=3\text{ps}$ إلى -51.76dB عندما $\tau=9\text{ps}$ ، هذا يشير إلى زيادة كفاءة أداء الهوائي في نقل الطاقة وانخفاض الطاقة المنعكسة.

تعتبر نسبة الأمواج المستقرة للجهد (VSWR) مقياساً لمدى كفاءة نقل الطاقة من المنبع عبر خط النقل إلى الهوائي، يظهر من الشكل (6) تناقص قيمة VSWR من 1.06 عند زمن استرخاء $\tau=3\text{ps}$ إلى 1.005 عند زمن استرخاء $\tau=9\text{ps}$ مما يدل على زيادة التطابق بين ممانعة المنبع والهوائي و تناقص الطاقة المنعكسة عن الهوائي.



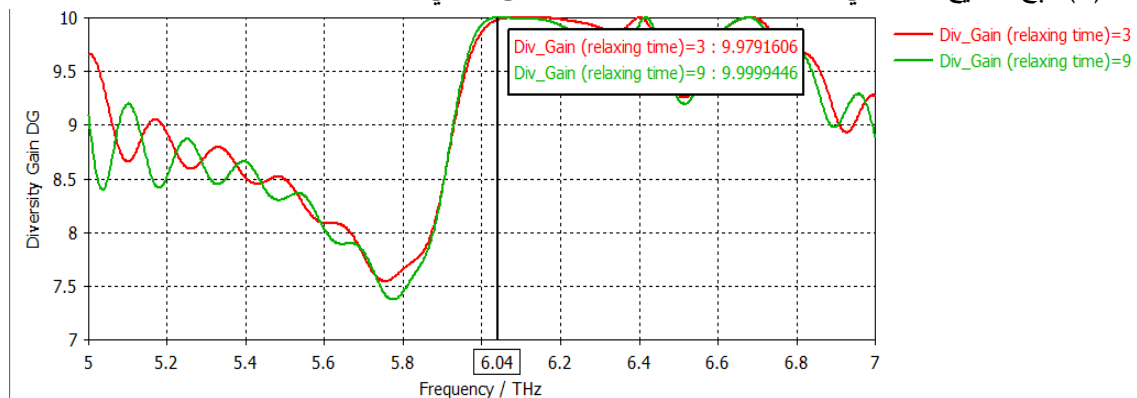
الشكل (6) VSWR عند زماني استرخاء 3ps , 9ps

يعتبر معامل ارتباط الغلاف Envelope Correlation Coefficient ECC أحد أهم معايير أداء نظام MIMO المعتبرة أثناء التصميم، لأنه مرتبط بالكفاءة الطيفية، يُظهر معامل ارتباط الغلاف تأثير اختلاف مسارات انتشار الإشارات التي تصل إلى عناصر الهوائي، ويوجد عدة طرق لحساب هذا البارامتر وتتراوح قيمته التقريبية ضمن المجال [0-1]، وكلما اقتربت هذه القيمة من الصفر كلما كان أداء الهوائي أفضل [15]، يوضح الشكل (7) معامل ارتباط الغلاف عند زمني استرخاء 3ps ، 9ps على التوالي ونلاحظ انخفاض قيمة معامل ارتباط الغلاف من 0.004 عند زمن استرخاء $\tau=3ps$ إلى 0.00001 عند زمن استرخاء $\tau=9ps$ وهذا أمر بالغ الأهمية في نظام MIMO:



الشكل (7) معامل ارتباط الغلاف عند زمني استرخاء $\tau=3ps$, $\tau=9ps$

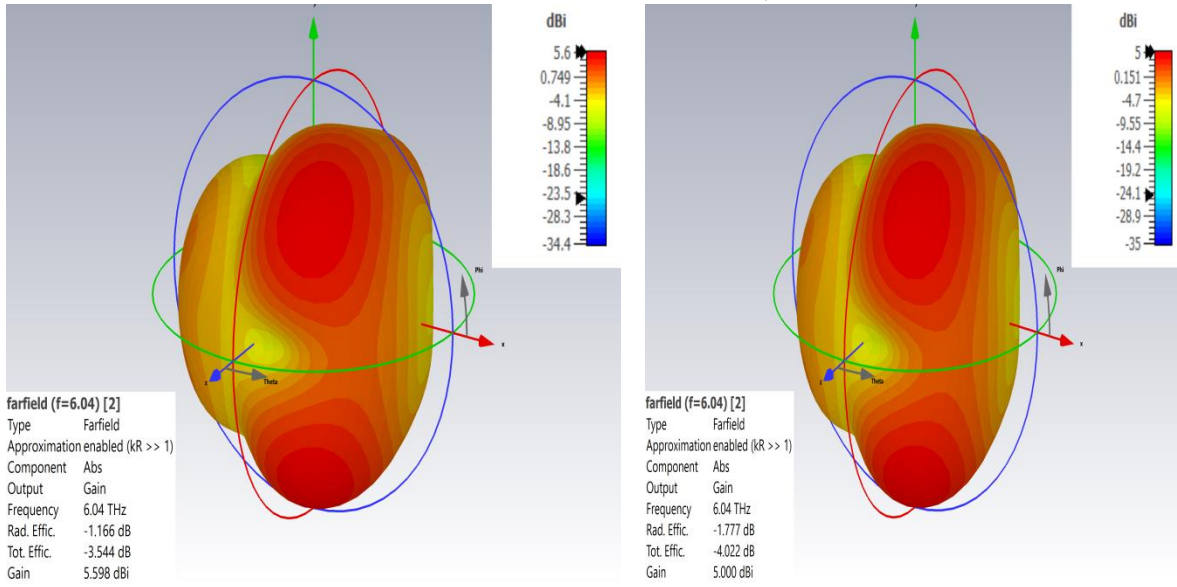
يعرف ربح التنويع Diversity Gain بأنه مقدار التخفيض بمعدل خطأ البت كتابع لنسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج، إذ إن كل نسخة من الإشارة المرسلّة تسلك مسار خفوت مستقل، مما يضعف احتمال وقوعها بنقاط خفوت عميق معاً، ويعتمد المستقبل على تقنيات دمج خاصة للحصول على إشارة في ظروف خفوت أفضل، يوضح الشكل (8) ربح التنويع عند زمني استرخاء $\tau=3ps$, $\tau=9ps$ على التوالي :



الشكل (8) ربح التنويع عند زمني استرخاء $\tau=3ps$, $\tau=9ps$

نلاحظ من النتيجة السابقة اقتراب قيمة ربح التنوع جداً من القيمة المثالية (10dB) عند زمن استرخاء $\tau=9\text{ps}$ حيث ارتفعت من 9.97 عند زمن استرخاء $\tau=3\text{ps}$ إلى 9.9999 عند زمن استرخاء $\tau=9\text{ps}$ ، مما يشير إلى كفاءة عالية في التخفيف من التداخلات متعددة المسارات وتحسين أداء النظام في بيئات الاتصالات اللاسلكية من النتائج السابقة نلاحظ أن زمن الاسترخاء يؤثر بشكل مباشر على قدرة الغرافين على توصيل التيار، فكلما كان زمن الاسترخاء أطول، كانت الإلكترونات في الغرافين قادرة على الاحتفاظ بطاقتها لفترة أطول أي استجابة أطول للإلكترونات، مما يزيد من توصيل الغرافين ويقلل من فقدان الطاقة خلال الرنين. لذلك، يكون الغرافين عالي الجودة هو الذي يتمتع بزمن استرخاء أطول بالنتيجة توصيلية أفضل مقارنة بالغرافين منخفض الجودة.

بلغت قيمة الربح للهوائي المقترح 5 dB عند زمن استرخاء 3ps، بينما بلغت قيمة الربح للهوائي المقترح 5.586dB عند زمن استرخاء 9ps كما هو موضح في الشكل (9).



(a-9) المخطط الإشعاعي 3D عند $\tau=3\text{ps}$

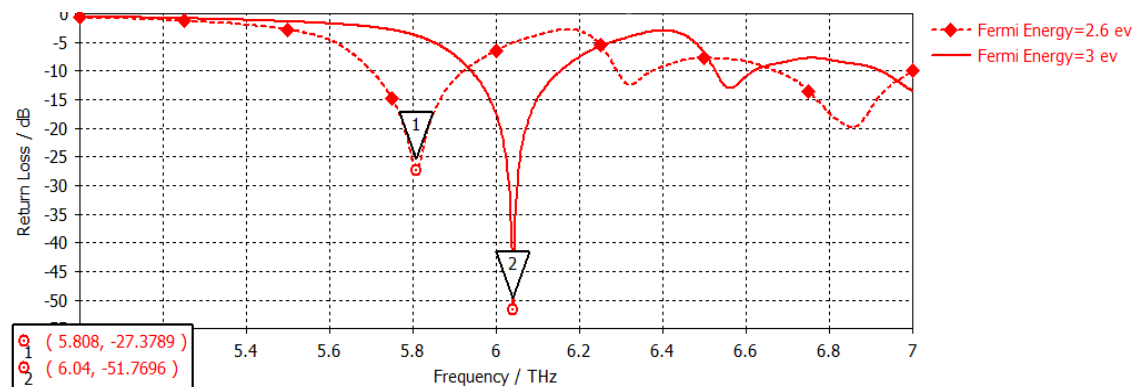
(b-9) المخطط الإشعاعي 3D عند $\tau=9\text{ps}$

الشكل (9) المخطط الإشعاعي 3D وقيمة الربح عند زمني استرخاء $\tau=3\text{ps}$ و $\tau=9\text{ps}$

2-1 دراسة تأثير الكمون الكيميائي (طاقة فيرمي) على سلوك الهوائي عند قيمتين مختلفتين للكمون الكيميائي μ_c
تعتبر طاقة فيرمي في الغرافين (Fermi Energy) خاصية محورية تحدد كيفية تفاعل الإلكترونات وتوزيعها في المادة، وهي المستوى الطاقوي الأعلى الذي تصل إليه الإلكترونات المتوضعة ضمن حزمة المنع للمادة عند درجة حرارة الصفر المطلق. تُعتبر طاقة فيرمي مفهوماً مهماً لأنها تحدد سلوك الإلكترونات وتفاعلها مع المجال الكهرومغناطيسي. يُمكن تعديل طاقة فيرمي في الغرافين من خلال تطبيق جهد كهربائي أو كيميائي (مثل إضافة ذرات أو جزيئات على السطح). هذه العملية تُعرف باسم "الإشابة" أو "التطعيم" (Doping).

يمكن لتغيير طاقة فيرمي في الهوائي المقترح ضمن مجال التيراهرتز أن يؤثر على ترددات عمل الهوائي المقترح، فعند زيادة أو خفض طاقة فيرمي، يتم ضبط تردد رنين الهوائي، مما يتيح للهوائي أن يكون مرناً في الاستجابة لترددات مختلفة [21].

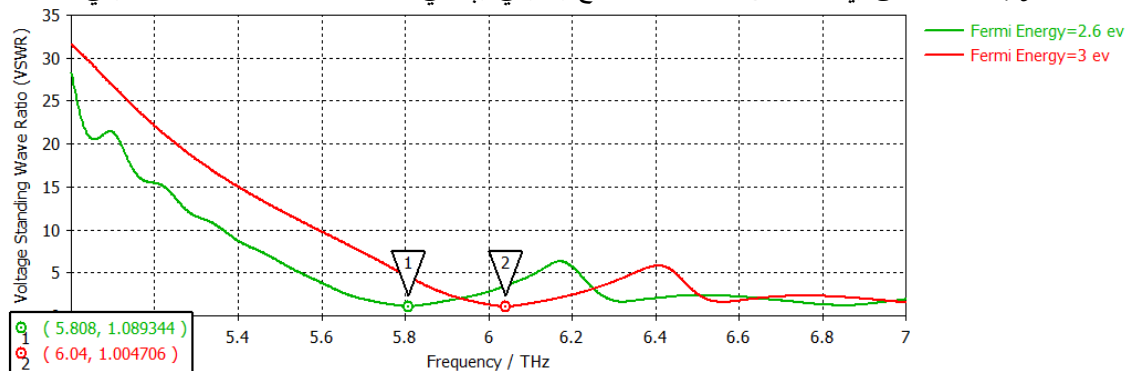
تم تغيير الكمون الكيميائي عند الأبعاد الفيزيائية المبينة في الجدول (1) ودراسة تأثير هذا التغيير على خسارة العودة عند الشروط الحدية والقيم نفسها.



الشكل (10) خسارة العودة عند $\mu_c = 2.6 \text{ eV}$ و $\mu_c = 3 \text{ eV}$

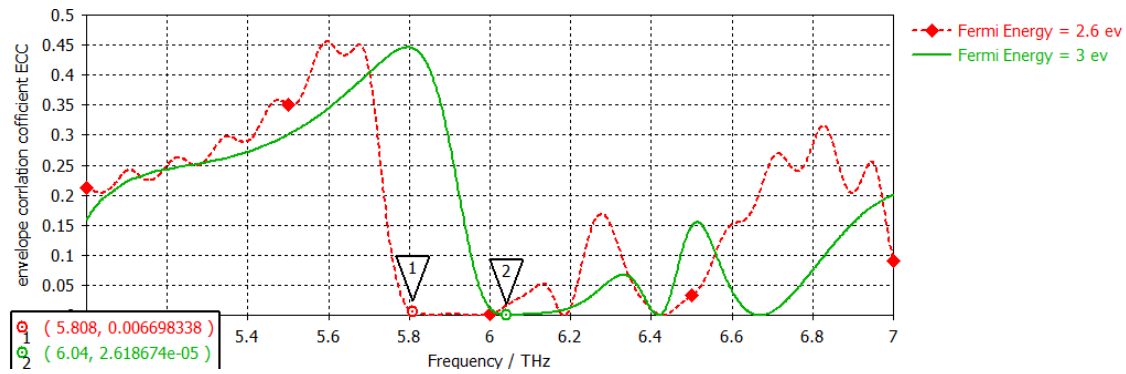
نلاحظ من الشكل (10) أن تردد الرنين ينزاح نحو تردد أدنى من التردد المطلوب 6.04 THz ضمن المجال الترددي وذلك عند كمون كيميائي $\mu_c = 2.6 \text{ eV}$ ، وتغيير هذه القيم عند تغيير قيمة الكمون الكيميائي حيث بازدياد الكمون الكيميائي تزداد قيمة خسارة العودة من قيمه -27.37dB عند التردد 5.808 THz إلى قيمه -51.76dB مع انزياح نحو الترددات الأعلى

يظهر من الشكل (11) تناقص قيمة VSWR من 1.09 إلى 1.004 عند تغيير الكمون الكيميائي $\mu_c = 2.6 \text{ eV}$ إلى 3.004 عند $\mu_c = 3 \text{ eV}$ مما يدل على زيادة التطابق بين ممانعة المنبع والهوائي وبالتالي تناقص الطاقة المنعكسة عن الهوائي.



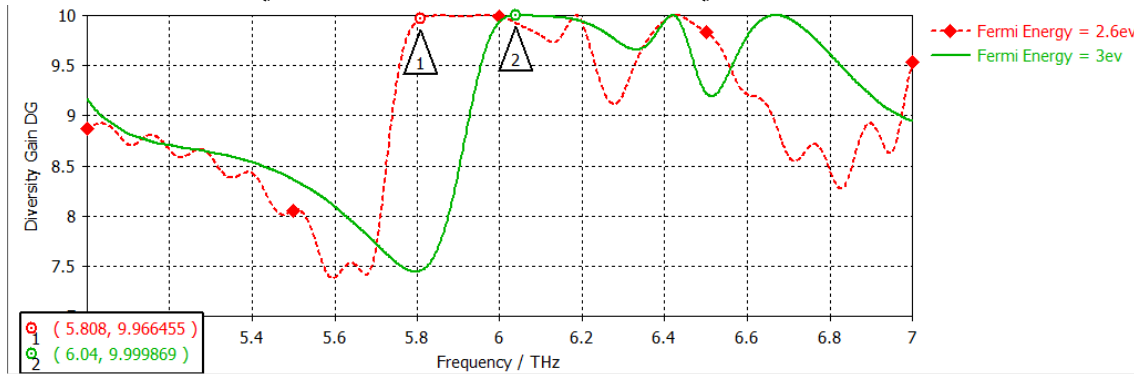
الشكل (11) VSWR عند كمون كيميائي 3 eV و 2.6 eV

يوضح الشكل (12) انخفاض قيمة معامل ارتباط الغلاف من 0.006 إلى 2.6 eV عند كمون كيميائي 0.00002 إلى 3 eV عند كمون كيميائي أي اقتراب ECC من قيمته المثلى 0 عند زيادة الكمون الكيميائي:



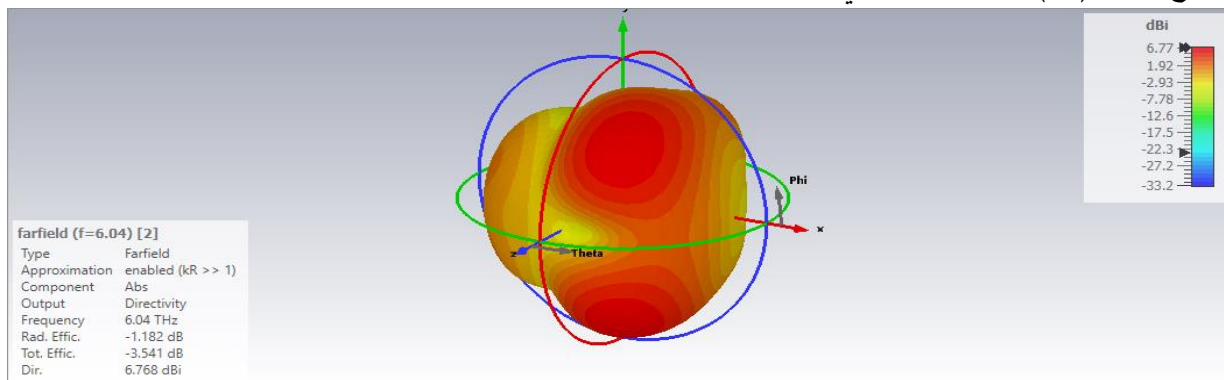
الشكل (12) ECC عند كمون كيميائي 2.6 eV و 3 eV

يوضح الشكل (13) اقتراب قيمة ربح التنوع من قيمته المثالية (10dB) بازدياد قيمة الكمون الكيميائي حيث ازدادت قيمة ربح التنوع من 9.96 عند كمون كيميائي 2.6 eV إلى 9.9998 عند كمون كيميائي 3 eV :

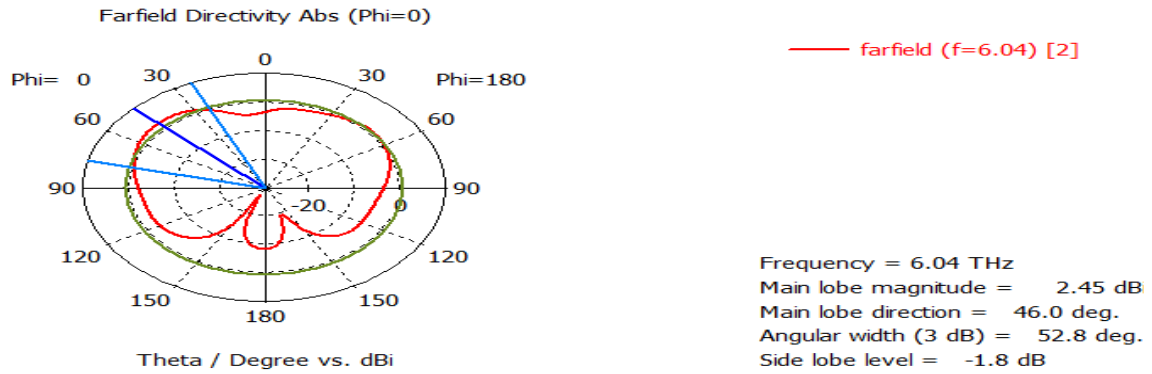


الشكل (13) DG عند كمون كيميائي 2.6 eV و 3 eV

يوضح الشكل (14) المخطط الإشعاعي عند التردد 6.04 GHz:



الشكل (14-a) القيمة العظمى للاتجاهية والمخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد



الشكل (14-b) المخطط الإشعاعي ثنائي الأبعاد عند المرحلة التجزئية S=0

يبلغ عرض حزمة ترددية عند التردد 6.04 التيراهرتز

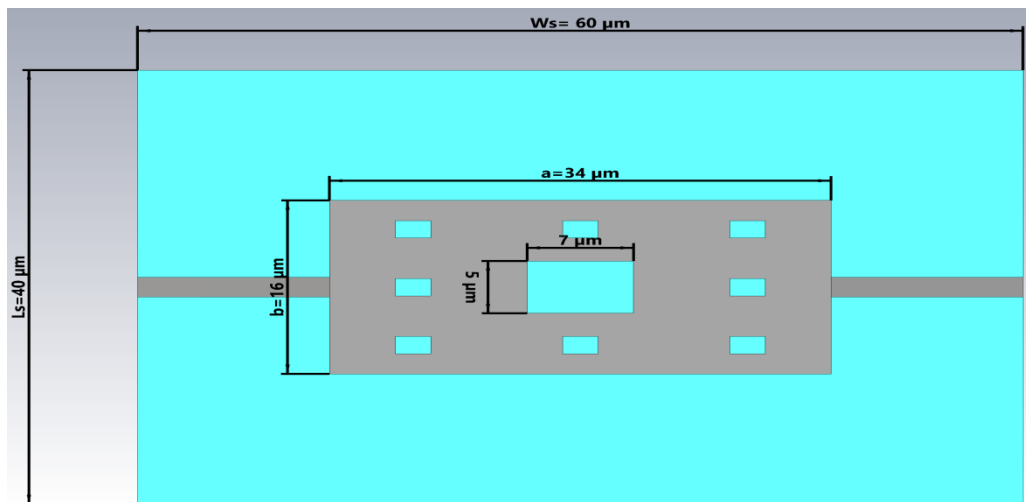
$$BW = f_H - f_l = 6.15419662 - 5.9397292 = 0.2145237THz = 214.524GHz$$

معامل الجودة :

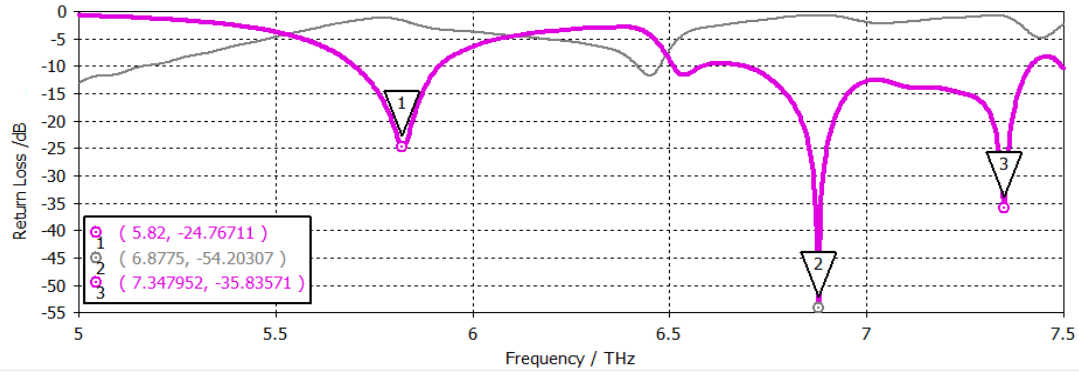
$$Q = \frac{\sqrt{f_H * f_l}}{\Delta F} = \frac{f_0}{BW} = 28.186$$

2 - دراسة سلوك الهوائي التجزئي في المرحلة S=2

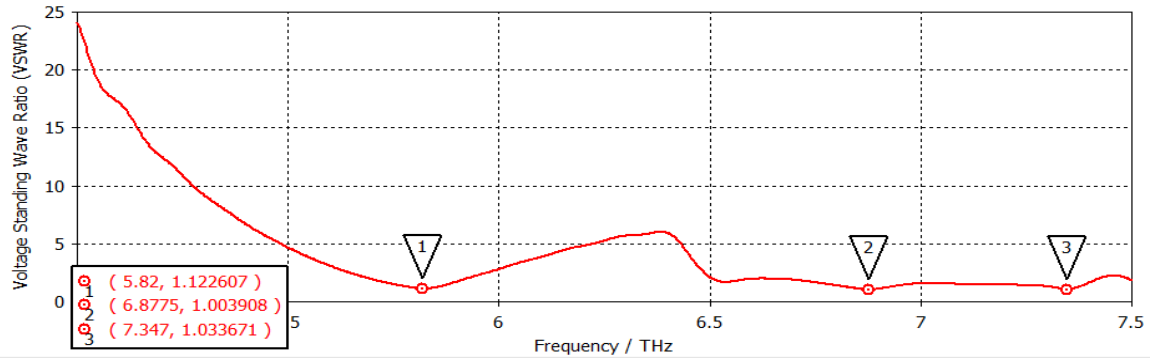
في المرحلة التجزئية S=2 تم تطبيق التكرار الثاني من سجادة سيربينسكي مع المحافظة على كافة البارامترات الأخرى دون تغيير، وتحت شروط المحاكاة نفسها فأصبح لدينا تسع فتحات طنينية ضمن الرقعة المشعة كما في الشكل(15):



الشكل (15) الهوائي التجزئي في المرحلة التجزئية s=2



الشكل (16) : خسارة العودة للهوائي عند المرحلة S=2



الشكل (17) : VSWR عند المرحلة S=2

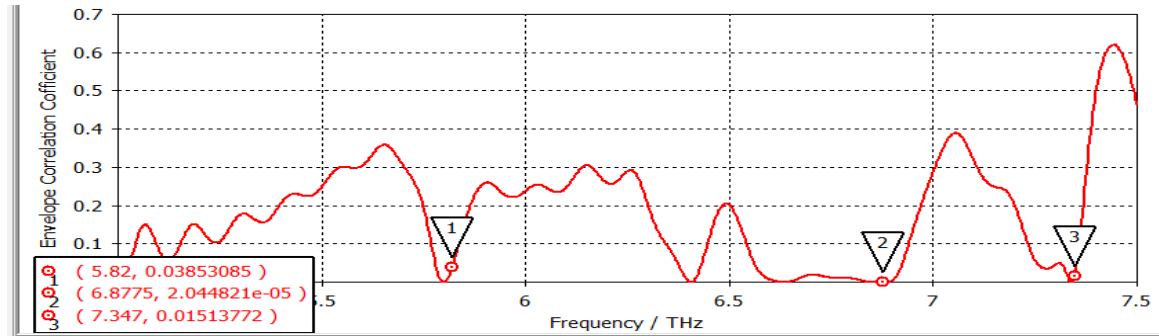
يظهر الشكل السابق تغيير ملحوظ في تردد الرنين وزيادة عدد ترددات الرنين وتغير في قيمة VSWR حيث بلغت عند الترددات الرنينية:

الجدول (2) قيم خسارة العودة و VSWR عند المرحلة S=2

F [THz]	5.82 THz	6.87 THz	7.34 THz
$S_{11}[dB]$	-24.7 dB	-54.2 dB	-35.8 dB
VSWR	1.12	1.003	1.03

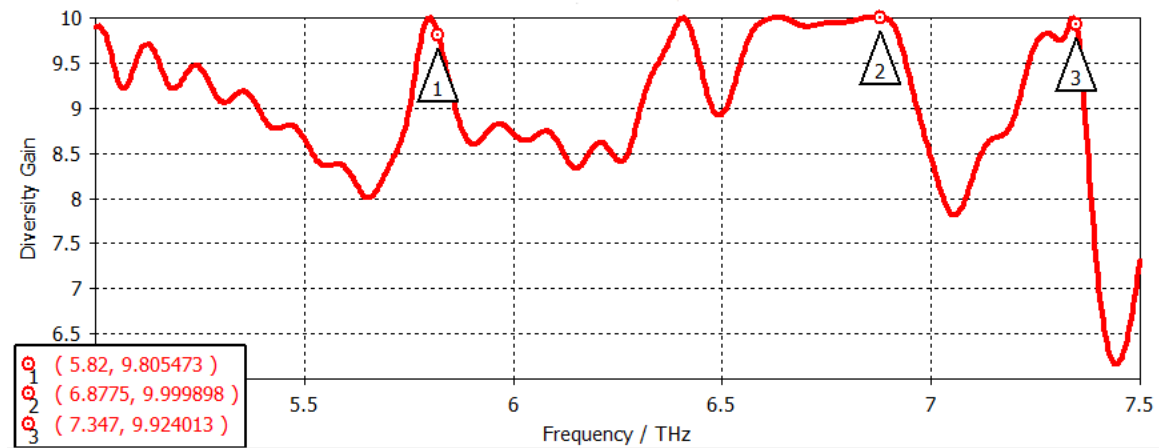
يتضح من النتائج السابقة أن تطبيق الهندسة التجزئية باستخدام سجادة سيرينسكي في تصميم الهوائي عند المرحلة S=2 أدى إلى تحقيق أداء محسن متعدد الترددات حيث انتقل الهوائي من العمل عند تردد رنيني واحد 6.04THz إلى العمل عند ثلاثة ترددات رنينية (5.82THz-6.87THz-7.34THz) مما يعكس فعالية التصميم في توسيع النطاق الترددي وتحقيق استجابة متعددة الترددات وتحسن في المخطط الإشعاعي .

يظهر الشكل التالي (18) قيم معامل ارتباط الغلاف ECC عند الترددات الرنينية وجميع القيم الناتجة تقع ضمن المجال المقبول [0-1]:



الشكل (18) معامل ارتباط الغلاف ECC في المرحلة التجزئية S=2

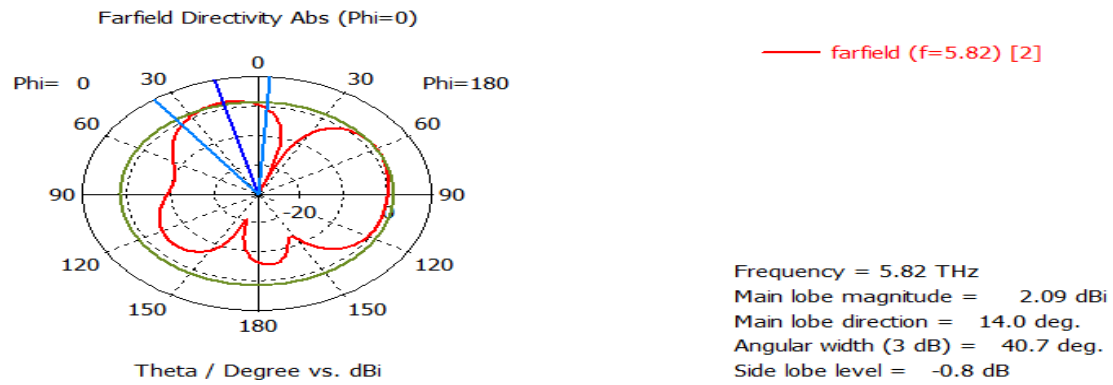
يوضح الشكل (19) قيم ربح التنوع عند الترددات الرنينية الجديدة:



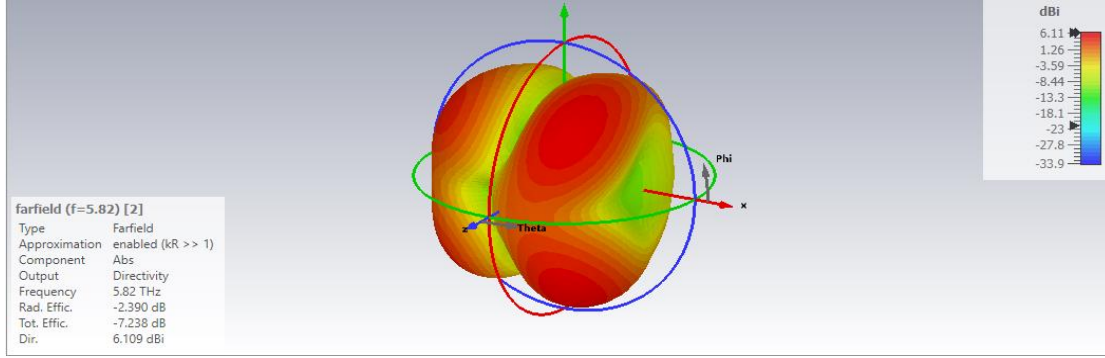
الشكل (19) ربح التنوع من أجل المرحلة التجزئية S=2

استناداً إلى النتائج السابقة أظهرت القيم ربح التنوع المقاسة عند الترددات الثلاثة نتائج مرتفعة جداً حيث تراوحت بين (9.999-9.941) وتقترب جداً من القيمة المثالية (10dB)، مما يشير إلى كفاءة عالية في التخفيف من التداخلات متعددة المسارات وتحسين أداء النظام في بيئات الاتصالات اللاسلكية، كما أن معامل ارتباط الغلاف ECC عند الترددات الثلاثة جميعها كان ذو قيم منخفضة جداً وتنخفض قيمها عند تطبيق سجاد سيرينسكي وهي أقل بكثير من الحد الموصى به (<0.5) وهذا أمر بالغ الأهمية في نظام MIMO

يوضح الشكل (20) المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد وثنائي الأبعاد في المستوي $\Pi=0$ عند التردد الرنيني 5.82 THz



الشكل (20-a) المخطط الإشعاعي ثنائي الأبعاد عند التردد 5.82THz في المرحلة التجزئية S=2



الشكل (b-20) المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد عند التردد 5.82 التيراهرتز في المرحلة التجزئية S=2

يبلغ عرض حزمة ترددية عند التردد 5.82THz

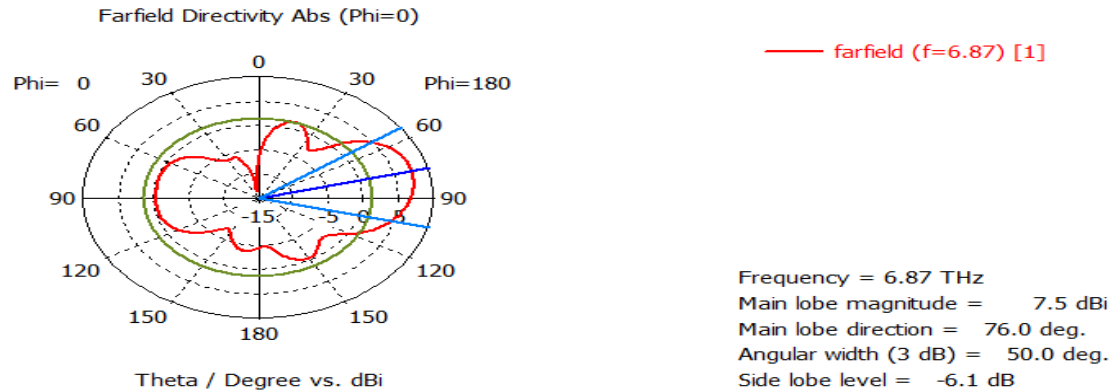
$$BW = f_H - f_l = 6.15419662 - 5.9397292 = 0.21470101 \text{ THz} = 214.7 \text{ GHz}$$

تكون قيمة معامل الجودة عند هذا التردد:

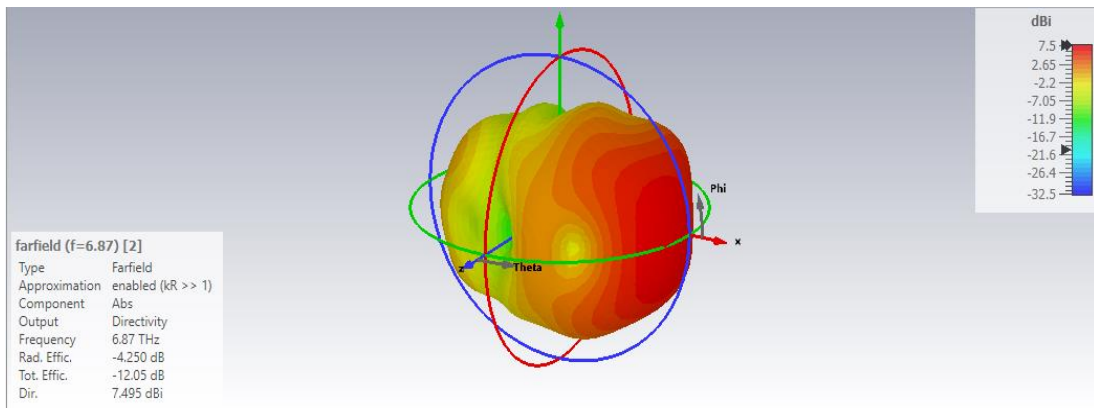
$$Q = \frac{\sqrt{f_H * f_l}}{\Delta F} = \frac{f_0}{BW} = 27.0464$$

يوضح الشكل (21) القيمة العظمى الاتجاهية والمخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد وثنائي الأبعاد في المستوي $\Phi=0$

عند التردد الرنيني 6.87THz



الشكل (a-21) المخطط الإشعاعي ثنائي الأبعاد عند التردد 6.87THz في المرحلة التجزئية S=2



الشكل (b-21) المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد عند التردد 6.87THz في المرحلة التجزئية S=2

يبلغ عرض حزمة ترددية عند التردد 6.87THz

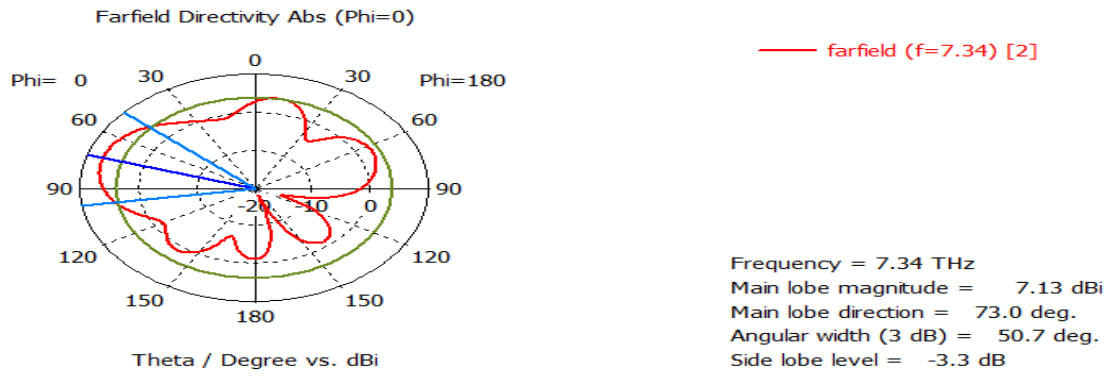
$$BW = f_H - f_l = 6.9529958 - 6.7949321 = 0.1580637THz = 43.485GHz$$

تكون قيمة معامل الجودة عند هذا التردد:

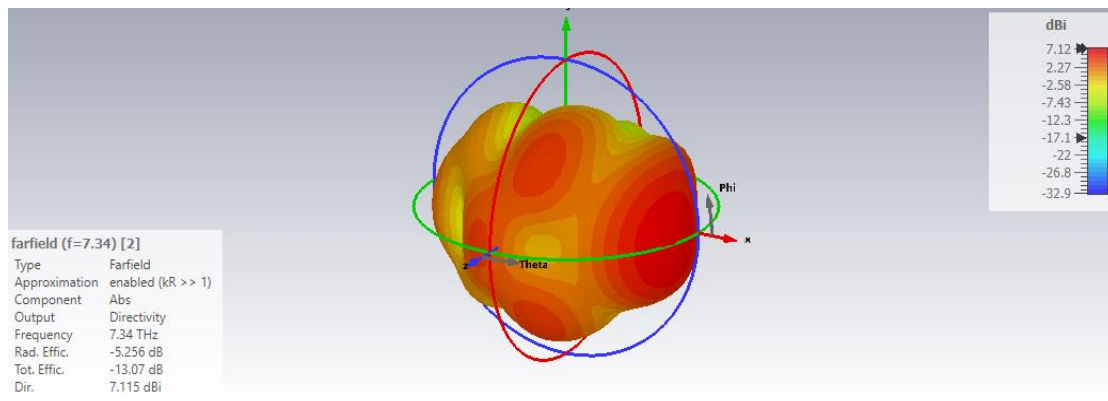
$$Q = \frac{\sqrt{f_H * f_l}}{\Delta F} = \frac{f_0}{BW} = 43.485$$

يوضح الشكل (22) القيمة العظمى والاتجاهية والمخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد وثنائي الأبعاد في المستوي $\Pi=0$

عند التردد الرنيني 7.34THz



الشكل (22-أ) المخطط الإشعاعي ثنائي الأبعاد عند التردد 7.34THz في المرحلة التجزئية S=2



الشكل (22-ب) المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد عند التردد 7.34THz في المرحلة التجزئية S=2

تمثل قيمة شدة الورقة الرئيسية (Main Lobe Magnitude) أقصى شدة للإشعاع في الاتجاه المحوري للهوائي، وهي مؤشر مباشر على قدرة الهوائي على تركيز الإشارة في اتجاه معين. تُقاس هذه القيمة بوحدة الديسيبل (dBi)، وبزيادة قيمة الورقة الرئيسية، تتحسن قدرة الهوائي على الإرسال أو الاستقبال بكفاءة في الاتجاه المطلوب، في هذا العمل عند المقارنة بين نتائج المخططات الإشعاعية في الأشكال (14-20-21-22) يتضح أن تطبيق الهندسة التجزئية ساهم في تحسين خصائص الورقة الرئيسية بشكل واضح، حيث ارتفعت شدة الورقة الرئيسية من 4.5dBi في المرحلة S=0 إلى 7.5dBi في المرحلة S=2 عند التردد الثاني 6.87THz وارتفعت إلى 7.13dBi عند التردد الثالث 7.34THz، ويعكس هذا التحسن قدرة التصميم المقترح على توجيه الإشعاع بكفاءة عالية ضمن أنظمة التيراهرتز متعددة المنافذ.

يمثل مستوى الوريقات الجانبية (Side Lobe Level SLL) أحد المؤشرات الأساسية في تقييم الأداء الإشعاعي للهوائي، حيث يُعبّر عن مقدار الإشعاع المنبعث في الاتجاهات الجانبية مقارنة بالوريقة الرئيسية. ويُقاس هذا المؤشر بوحدة الديسيبل (dB)، ويُفضل أن تكون قيمته سالبة وكبيرة نسبياً، بما يدل على انخفاض الإشعاع في تلك الاتجاهات غير المرغوبة. يُعتبر خفض قيمة SLL هدفاً مهماً لتقليل التداخل والتشويش وتحسين تركيز الإشارة نحو الهدف. في هذا العمل، ساهمت بنية الهندسة التجزئية في خفض قيمة SLL من -0.8dB في المرحلة $S=0$ إلى -6.1dB عند المرحلة $S=2$ عند التردد 6.87THz، وبالتالي تقليل التداخل الناتج عن الإشعاع في الاتجاهات غير المرغوبة، وهذا ما يعكس فعالية التصميم المقترح في تحسين الأداء الإشعاعي ضمن نطاق التيراهرتز باستخدام الهندسة التجزئية.

الاستنتاجات والتوصيات:

يتضح من النتائج السابقة تغير تردد الرنين مع تغيير الجهد الكيميائي للغرافين، حيث أظهرت النتائج أن زيادة زمن الاسترخاء من $\tau=3\text{ps}$ إلى $\tau=9\text{ps}$ عند تردد 6.04THz حسّنت خسارة العودة بنسبة 71.56%، مما يشير إلى تحسّن ملحوظ في خصائص الإرسال وتقليل الإشارة المنعكسة عند هذا التردد وأدى رفع طاقة فيرمي من 2.6eV إلى 3eV إلى انتقال التردد الرنيني من 5.81THz إلى 6.04THz، مع تحسّن في خسارة العودة بنسبة 89.09%، ويؤكد ذلك على قدرة الهوائي على قابلية التوليف بدقة من خلال تعديل مستوى طاقة فيرمي، قدرة الهوائي على إعادة التكوين ديناميكياً عن طريق ضبط الجهود الكيميائية لرقعة الغرافين توفر مزايا كبيرة لتطوير هوائيات عالية الكفاءة متكيفة مع أنظمة الاتصالات المتقدمة والتطبيقات الطبية والعسكرية في نطاق التيراهرتز بالإضافة إلى ذلك قدمت الهندسة التجزئية عدة مجالات ترددية جديدة وتحسين قيم خسارة العودة وتعزيز الاتجاهية وتقليل مستوى الوريقات الجانبية. أثبتت النتائج أن تطبيق الهندسة التجزئية أيضاً يساعد على تحسين الخصائص الترددية والإشعاعية بشكل ملحوظ مما يجعل هذا النوع من التصميم مناسباً لتطبيقات التيراهرتز التي تتطلب العمل في أكثر من نطاق ترددي دون الحاجة إلى تعقيد إضافي في البنية الفيزيائية للهوائي.

References:

- [1] M. Ikram, A. Zahid, A. Ghaffar, and I. Khan, "A road towards 6G communication—a review of 5G antennas, arrays, and wearable devices," *Electronics*, vol. 11, no. 1, p. 169, 2022.
- [2] S. R. Saunders and A. A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2024.
- [3] M. E. Benlakehal, M. Bouchoucha, and R. Merad, "Design and analysis of MIMO system for terahertz communication using terahertz patch antenna array based on photonic crystals with graphene," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 11, art. 693, 2022.
- [4] A. Faisal, R. Abbas, and S. Mumtaz, "Ultramassive MIMO systems at terahertz bands: prospects and challenges," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 33–42, 2020.
- [5] R. Sampath and K. T. Selvan, "Compact hybrid Sierpinski Koch fractal UWB MIMO antenna with pattern diversity," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, art. e22017, 2020.
- [6] A. Mohanty and S. Sahu, "High isolation two-port compact MIMO fractal antenna with WiMAX and X band suppression characteristics," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, art. e22021, 2019.

- [7] M. F. Ali, R. K. Singh, and R. Bhattacharya, "Re-configurable graphene-based two-port dual-band and MIMO antenna for THz applications," *Proc. 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*, Bhopal, India, pp. 1–6, 2020.
- [8] S. S. Keerthana, R. Kumar, and M. S. Rao, "Double port MIMO antenna for THz applications using graphene patch," *International Journal*, vol. 11, no. 5, 2023.
- [9] B. Ahammed, T. Karim, and M. A. Alim, "Investigation of graphene functionalized multi-band MIMO antenna with enhanced isolation with high gain for THz applications," *Discover Electronics*, vol. 2, no. 1, art. 11, 2025.
- [10] C. Han, J. M. Jornet, and I. Akyildiz, "Ultra massive MIMO channel modeling for graphene-enabled terahertz band communications," *Proc. 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, pp. 1–5, 2018.
- [11] L. Zakrajsek, P. Jankovic, and M. Vidmar, "Design of graphene-based plasmonic nano antenna arrays in the presence of mutual coupling," *Proc. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Paris, France, pp. 1–5, 2017.
- [12] M. Samad, K. Alam, and M. Hossain, "Excitation of surface plasmon polaritons (SPPs) at uniaxial chiral graphene planar structure," *Plasmonics*, vol. 19, art. 93, 2024.
- [13] J. Anguera, C. Puente, and J. Soler, "Fractal antennas: an historical perspective," *Fractal and Fractional*, vol. 4, no. 1, p. 3, 2020.
- [14] G. Khanna and N. Sharma, "Fractal antenna geometries: a review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 153, no. 7, pp. 29–32, 2016.
- [15] K. Sakaguchi, Y. E. Hai, and K. Araki, "MIMO channel capacity in an indoor line of sight (LOS) environment," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 88, no. 7, pp. 3010–3019, 2005.
- [16] A. Afriyie, *Multiple Input Multiple Output (MIMO) Operation Principles*. Accra, Ghana: Kwame Nkrumah University Press, 2013.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [18] G. J. Nissiyah and M. G. Madhan, "Graphene-based microstrip antenna for triple and quad band operation at terahertz frequencies," *Optik*, vol. 231, art. 166360, 2021.
- [19] H. Davoudabadifarahani and B. Ghalamkari, "High efficiency miniaturized microstrip patch antenna for wideband terahertz communications applications," *Optik*, vol. 194, art. 163118, 2019.
- [20] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, "Graphene-based plasmonic nano antenna for terahertz band communication in nanonetworks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 685–694, 2013.
- [21] S. Dash and A. Patnaik, "Behavior of graphene-based planar antenna at microwave and terahertz frequency," *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, vol. 40, art. 100800, 2020.