

نمذجة وتحليل هوائي رقعة مدمج قابل لإعادة الضبط الترددي باستخدام مقاومات على شكل حرف H لتطبيقات الجيل الخامس

د. محمد نصر *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٣٠ . قُبل للنشر في ٢٠٢٦/٢/٣)

□ ملخص □

تم في هذا العمل تقديم نموذج وتحليل لهوائي رقعة شرائحي مشقوق قابل لإعادة الضبط الترددي يعمل ضمن نطاق الموجات المليمترية لتطبيقات الجيل الخامس. اعتمد الهوائي المقترح على عنصر إشعاع مستطيل مشقوق على شكل حرف H ومغذى باستخدام تقنية الموجة المشتركة المستوي مما أسهم في تحسين المطابقة وتقليل الفقد. تم استخدام ركيزة من نوع Rogers RT Duroid ٥٨٨٠ ذات ثابت عزل نسبي مقداره (٢,٢ = ϵ_r) وسماكة ١,٣ مم، مع أبعاد كلية للهوائي تبلغ ١,٣×٥×٥ مم³.

تم توصيل مقاومتين بين خط التغذية والرقعة المشعة لتحقيق خاصية إعادة الضبط الترددي، وتم تحليل ثلاث حالات تشغيل مختلفة عند قيم مقاومة قدرها ١٠٠ أوم، ٣٠٠ أوم، و ٦٠٠ أوم. أدت هذه القيم المختلفة إلى تغيير توزيع التيار على سطح الرقعة، وبالتالي تغيير التردد الرنيني للهوائي وأعطت ثلاث ترددات هي 55.1GHz، 48GHz، 60GHz.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج CST Microwave Studio أن الهوائي حقق أداءً جيداً من حيث معامل الانعكاس حيث حقق القيم -38dB، -28dB، -32dB، مع عرض النطاق الترددي بلغ 10GHz، 12GHz، 8GHz، بالإضافة إلى ربح مناسب عند جميع حالات إعادة الضبط 7.22dB، 7.15dB، 6.1dB عند المقاومات ١٠٠ أوم، ٣٠٠ أوم، و ٦٠٠ أوم على التوالي.

الكلمات المفتاحية: إعادة الضبط الترددي، هوائي رقعة شرائحي، اتصالات الجيل الخامس، عرض النطاق الترددي، معامل الانعكاس، ربح.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

Design and analysis of a compact, frequency-resettable patch antenna using H-shaped resistors for 5G applications

Dr. Mohammad Nassr *

(Received 30/12/2025 . Accepted 3/2/2026)

□ ABSTRACT □

This work presents the design and analysis of a frequency-resettable slotted patch antenna operating in the millimeter wave band for 5G applications. The proposed antenna is based on a rectangular, slotted H-shaped radiation element fed using Common Plane Wave (CPW/GCPW) technology, which improves alignment and reduces losses. The design was implemented on a Rogers RT Duroid 5880 substrate with a relative dielectric constant of $\epsilon_r = 2.2$ and a thickness of 1.3 mm, resulting in overall antenna dimensions of $5 \times 5 \times 1.3 \text{ mm}^3$.

To achieve frequency resetting, two resistors were connected between the feed line and the radiating patch. Three different operating conditions were analyzed at resistance values of 100 Ω , 300 Ω , and 600 Ω . These different values alter the current distribution across the patch surface, thus changing the antenna's resonant frequency to 48 GHz, 55.1 GHz, and 60 GHz.

Simulation results using CST Microwave Studio software showed that the antenna performs well in terms of reflection coefficient, achieving values of -38dB, -28dB, and -32dB, with bandwidths of 10GHz, 12GHz, and 8GHz, in addition to suitable gain at all reset conditions of 7.22dB, 7.15dB, and 6.1dB at resistors of 100 Ω , 300 Ω , and 600 Ω , respectively.

key words: frequency reconfigurable, microstrip patch antenna, 5G communications, bandwidth, S11, Gain.

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

١. المقدمة

شهدت أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة تطوراً ملحوظاً خلال السنوات الأخيرة، لا سيما مع ظهور تقنيات الجيل الخامس التي تتطلب سرعات نقل بيانات عالية، زمن تأخير منخفض، وكفاءة طيفية محسنة [1]. وقد أدى ذلك إلى زيادة الحاجة إلى هوائيات مدمجة قادرة على العمل عند ترددات متعددة مع الحفاظ على أداء إشعاعي جيد وحجم صغير، الأمر الذي يجعل الهوائيات التقليدية ذات النطاق الواحد غير كافية لتلبية هذه المتطلبات [2].

تُعد الهوائيات القابلة لإعادة الضبط (Reconfigurable Antennas) من الحلول الفعالة لمواجهة هذه التحديات، حيث تتيح إمكانية تغيير الخصائص التشغيلية للهوائي مثل التردد الرنيني، نمط الإشعاع، أو الاستقطاب دون الحاجة إلى تغيير البنية الفيزيائية بالكامل [3]. ويتم تحقيق إعادة الضبط باستخدام عناصر تحكم مختلفة مثل الثنائيات، المفاتيح الإلكترونية، المواد القابلة للضبط، أو تحميل المقاومات داخل البنية الإشعاعية للهوائي [4].

من جهة أخرى، تحظى هوائيات الرقعة الشرائحية باهتمام واسع في تطبيقات الجيل الخامس نظراً لبساطة تصنيعها، وانخفاض كلفتها، وسهولة دمجها مع الدارات المتكاملة، وصغر حجمها [5]. كما أن استخدام الشقوق داخل الرقعة المشعة يساهم في تحسين الخصائص الإشعاعية وتوفير مرونة أكبر في التحكم بالتردد الرنيني [6].

تم في هذا البحث اقتراح تصميم لهوائي رقعة مشقوق قابل لإعادة الضبط الترددي يعتمد على شكل هندسي على هيئة حرف H، ويتم تغذيته باستخدام تقنية الموجة المشتركة المستوي (CPW). تم تحقيق إعادة الضبط الترددي من خلال تحميل مقاومتين بين خط التغذية والرقعة المشعة بقيم مختلفة، مما يسمح بالحصول على عدة حالات تشغيل ترددية مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس والأنظمة اللاسلكية الحديثة.

نظراً لأهمية الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، فقد درس العديد من الباحثين هذا الموضوع باستخدام طرق مختلفة، ففي دراسة B. Alekhya, et al [7] قارن الباحثون تصميمات مختلفة للهوائيات القابلة لإعادة التشكيل للجيل الخامس، حيث تعمل هذه الهوائيات عند تردد يبلغ 60 GHz، وقد تم استخدام أحجام مختلفة للمستويات الأرضية والعناصر الإشعاعية لتصميمات الهوائيات المقترحة، كما تم استخدام الركيزة Rogers-RT5880 بسماكات مختلفة. أما في عمل A. Ghaffar, et al [8] فقد وصف الباحثون هوائياً موجهاً مستويًا على شكل حرف T قابل لإعادة التشكيل لشبكات الجيل الخامس، يتنوع فيه تردد الرنين للحصول على عرض النطاق الترددي لخسارة العودة 10 dB في نطاق التردد من 23 GHz إلى 29 GHz من خلال دمج مقاومتين متغيرتين. وفي دراسة R. Garg [9] اقترحت الدراسة تصميمًا مضغوطاً لمصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد، حيث يتم وضع ثمانية هوائيات ذات فتحات مدمجة على الجزء العلوي من لوحة الدارات المطبوعة للهاتف المحمول (PCB) لتشكيل مصفوفة قابلة للتوجيه باستخدام الحزمة، ويمكن إعادة تكوين استجابة التردد لمصفوفة الهوائيات للعمل إما عند 28 GHz أو 38 GHz، ويمكن تحقيق وظيفة إعادة التشكيل للتصميم المقترح من خلال تنفيذ وتحيز زوج من الثنائيات عبر كل عنصر من عناصر المصفوفة ذي الفتحة على شكل حرف T، وتم استخدام Rogers RT5880 كركيزة (طبقة الأساس) للهوائي المصفوفي.

٢. هدف البحث:

هدف هذا البحث إلى تصميم وتحليل هوائي رقعة مدمج على شكل حرف H قابل لإعادة الضبط الترددي باستخدام مقاومات مختلفة ويمكن استخدامه في تطبيقات الجيل الخامس من الاتصالات.

٣. طرائق البحث ومواده:

بدأ هذا البحث بتصميم هوائي على شكل حرف H قابل لإعادة تشكيل التردد ويحقق خصائص الجيل الخامس من الاتصالات، تمت عملية المحاكاة باستخدام برنامج (CST Microwave Studio (CST MWS وهو برنامج متخصص بتصميم وتحليل الأنظمة والمكونات الكهرومغناطيسية عالية التردد بشكل ثلاثي الأبعاد، حيث يسمح بالتحليل السريع والدقيق للأجهزة عالية التردد مثل المرشحات والهوائيات والهياكل أحادية ومتعددة الطبقات، وهو برنامج سهل الاستخدام ويوفر للمستخدم نظرة ثاقبة لسلوك تصاميم المكونات الكهرومغناطيسية عالية التردد.

٣-١ هوائيات الجيل الخامس (5G Antennas):

أدت المتطلبات المتزايدة لأنظمة الاتصالات من الجيل الخامس إلى تطوير أنواع متقدمة من الهوائيات القادرة على العمل ضمن نطاقات ترددية عالية، وخصوصًا نطاق الموجات المليمترية. تتميز أنظمة الجيل الخامس بالحاجة إلى معدلات نقل بيانات مرتفعة، زمن تأخير منخفض، وكفاءة طيفية عالية، مما يفرض قيودًا صارمة على تصميم الهوائيات المستخدمة في هذه الأنظمة.

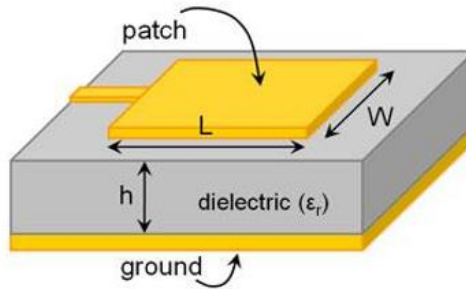
تعمل هوائيات الجيل الخامس عادةً عند ترددات أعلى من الأجيال السابقة، مثل النطاقات دون 6 جيجاهرتز ونطاقات الموجات المليمترية، الأمر الذي يتطلب تصاميم مدمجة ذات كفاءة إشعاعية جيدة وقدرة على التكيف مع تغير ظروف التشغيل [10].

تلعب الهوائيات القابلة لإعادة الضبط دورًا مهمًا في أنظمة الجيل الخامس، حيث تسمح بتغيير التردد الرنيني أو نمط الإشعاع أو الاستقطاب بما يتناسب مع متطلبات النظام، مما يقلل الحاجة إلى استخدام عدة هوائيات منفصلة. كما أن استخدام هوائيات صغيرة الحجم وقابلة للدمج مع الدوائر الإلكترونية يُعد عاملًا أساسيًا في تطبيقات الهواتف الذكية، إنترنت الأشياء، والأنظمة اللاسلكية المدمجة [11].

٣-٢ الهوائيات الشرائحية (Patch Antennas Microstrip):

تُعد هوائيات الرقعة الشرائحية من أكثر أنواع الهوائيات استخدامًا في أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة، نظرًا لبساطتها وتركيبها وسهولة تصنيعها وانخفاض تكلفتها. يتكون هذا النوع من الهوائيات عادةً من رقعة معدنية مشعة موضوعة على ركيزة عازلة، مع وجود مستوى أرضي في الجهة المقابلة [11].

يوضح الشكل (١) بنية هوائي الرقعة الشرائحي حيث تتميز هذه الهوائيات بصغر الحجم وخفة الوزن وإمكانية دمجها بسهولة مع الدارات المتكاملة، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس والأنظمة المحمولة [12].



الشكل (١): بنية هوائي الرقعة الشرائحي [12]

يمكن تحسين أداء الهوائيات الشرائحية والتحكم بخصائصها الإشعاعية من خلال تعديل شكل الرقعة أو إضافة شقوق داخلها، حيث تساهم هذه التعديلات في زيادة طول المسار الكهربائي وتوفير مرونة أكبر في التحكم بالتردد الرنيني. كما أن استخدام تقنيات تغذية مختلفة مثل خط الميكروستريب أو CPW يساعد في تحسين المطابقة وتقليل الفقد [12].

تم في هذا البحث اعتماد هوائي رقعة مشقوق على شكل حرف H والذي يساهم في تحسين خصائص إعادة الضبط الترددي مع الحفاظ على أبعاد صغيرة وبنية بسيطة.

٣-٣ بارامترات قياس أداء الهوائي (Antenna Performance Parameters):

يتم عادةً تقييم أداء الهوائيات اعتماداً على مجموعة من المعاملات الأساسية التي تعكس كفاءتها وقدرتها على الإشعاع والعمل بكفاءة ضمن النطاق الترددي المطلوب. ومن أهم هذه المعاملات [13]:

(١) بارامتر الانعكاس S11: هو البارامتر الأكثر شيوعاً فيما يتعلق بالهوائيات، حيث يمثل مقدار الطاقة المنعكسة من الهوائي لذا فهو يسمى بمعامل الانعكاس وعندما $S_{11} = 0$ dB فهذا يعني بأن كل الطاقة تنعكس عن الهوائي ولا يشع الهوائي أبداً، ويُرمز له بالرمز Γ .

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

حيث Z_{in} هي ممانعة دخل الهوائي، و Z_0 هي الممانعة المميزة لخط النقل.

(٢) نسبة جهود الأمواج المستقرة VSWR: هو مقياس لعدم تطابق الممانعة بين الهوائي ونظام التغذية، أي أنه كلما كانت قيمة VSWR أكبر كان عدم التطابق أعلى، ويُعرف على أنه النسبة بين الحد الأعلى للجهود V_{max} إلى الحد الأدنى له V_{min} . ومن أجل تحقيق مطابقة مقبولة وجيدة للهوائي يجب أن تكون قيمة VSWR أقل من ٢ وقيمة S11 أقل من -10 dB. ويُعبر عنه بالعلاقة:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2)$$

كما يمكن ربط VSWR بمعامل الانعكاس S11 عن طريق العلاقة:

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (3)$$

(٣) عرض النطاق الترددي (Bandwidth): هو مدى الترددات التي يمكن فيها للهوائي أن يشع أو يستقبل

الطاقة، ويكون فيها قيمة VSWR أقل من ٢ ويُعطى بالعلاقة:

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (4)$$

Q: عامل الجودة للهوائي.

أما بالنسبة للهوائيات ضيقة الحزمة فيتم التعبير عن عرض النطاق لها كنسبة مئوية من فرق التردد (التردد الأعلى f_H مطروحاً منه التردد الأدنى f_L) على التردد المركزي (f_r) لعرض النطاق وهذا ما يسمى بعرض النطاق الكسري للهوائي (FBW) ويُعطى بالعلاقة:

$$FBW = \frac{f_H - f_L}{f_r} = \frac{1}{Q} \quad (5)$$

ونلاحظ من العلاقتين السابقتين أن عامل الجودة للهوائي يتناسب عكسياً مع عرض النطاق الترددي. ٤) ربح (كسب) الهوائي (Antenna Gain): هو مقياس لمدى كفاءة الهوائي ولتجهيته، أي نسبة الأشعة الكهرومغناطيسية التي تنطلق في اتجاه معين بالنسبة للمجموع الكلي للأشعة المرسله. ويُعطى الربح (G) بالعلاقة:

$$G = 4\pi \left(\frac{\text{Radiation Intensity}}{\text{Antenna Input Power}} \right) \quad (6)$$

٥) مخطط الإشعاع Radiation Pattern: هو تمثيل رسومي لخصائص إشعاع الهوائي كتابع للإحداثيات الفراغية، يتم تحديده عادة في منطقة المجال (الحقل) البعيد للهوائي (منطقة بعيدة بدرجة كافية عن الهوائي حيث يكون توزيع المجال الزاوي مستقلاً بشكل أساسي عن المسافة)، ويُعد مخطط الإشعاع الأكثر فائدة وهو التوزيع المكاني ثلاثي الأبعاد للطاقة المشعة.

بالنسبة للهوائي المستقطب خطياً، غالباً ما يُوصف أداؤه من حيث مخططات المستوي E والمستوي H:

• يُعرف المستوي E بأنه المستوي الذي يحتوي على متجه الحقل الكهربائي واتجاه الإشعاع الأقصى.

• يُعرف المستوي H بأنه المستوي الذي يحتوي على متجه الحقل المغناطيسي واتجاه الإشعاع الأقصى.

٣-٤ نمذجة هوائي الرقعة الشرائحي:

يحتاج تصميم هوائي الرقعة الشرائحي إلى اختيار مادة طبقة الأساس بسماكة h ، وثابت عازلية كهربائية ϵ_r ، إضافة إلى تحديد تردد الرنين المركزي f_r بوحدة Hz ثم تحديد أبعاد الهوائي أي عرض الهوائي W ، وطول الهوائي L ، كل ما سبق تم حسابه باستخدام المعادلات وفق الخطوات الآتية:

الخطوة 1: من أجل هوائي شرائحي فعال، نحسب العرض من المعادلة [14]:

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (7)$$

الخطوة 2: تحديد ثابت العازلية الكهربائية الفعال ϵ_{eff} من المعادلة [14]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (8)$$

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 التزايدى (أو بما يسمى الطول الكهربائي) من المعادلة:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (9)$$

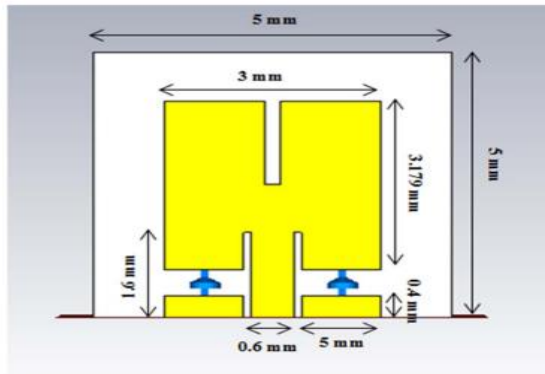
الخطوة 4: تحديد الطول الحقيقي L ، بالمعادلة:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (10)$$

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

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (11)$$

يوضح الشكل (٢) البنية الهندسية للهوائي المقترح القابل لإعادة الضبط الترددي. تم تصميم الهوائي بأبعاد كلية مقدارها ١,٣×٥×٥ مم³، مما يجعله مناسباً للتطبيقات المدمجة ذات القيود الحجمية الصارمة. تم تنفيذ التصميم على ركيزة من نوع Rogers RT Duroid ٥٨٨٠ ذات ثابت عزل نسبي $\epsilon_r = 2.2$ ومعامل فقدان منخفض، وبسماكة ١,٣ مم، وذلك لتحسين الكفاءة الإشعاعية وتقليل الفقد عند الترددات العالية.



الشكل (٢): تصميم الهوائي المقترح

يتكون العنصر الإشعاعي الرئيسي من رقعة مستطيلة الشكل بأبعاد 3×3.179 مم²، تحتوي على شق مركزي مصمم على شكل حرف H. يساهم هذا الشق في زيادة طول المسار الكهربائي للتيار السطحي، مما يسمح بالتحكم في التردد الرنيني وتحسين المطابقة دون زيادة الحجم الفيزيائي للهوائي. تم تغذية الهوائي باستخدام تقنية (CPW) Coplanar Waveguide، حيث يبلغ طول خط التغذية 1.6 مم وعرضه 0.6 مم، وتم اختيار هذه التقنية لما توفره من سهولة في الدمج مع الدارات المتكاملة وتحسين أداء المطابقة مقارنة بتقنيات التغذية التقليدية.

لتحقيق خاصية إعادة الضبط الترددي، تم توصيل مقاومتين بين خط التغذية والرقعة المشعة، حيث تعمل هذه المقاومات على تغيير توزيع التيار الكهربائي داخل البنية الإشعاعية. تم تحليل ثلاث حالات تشغيل مختلفة باستخدام قيم مقاومة مقدارها ١٠٠ أوم، ٣٠٠ أوم، و ٦٠٠ أوم، حيث تؤدي كل قيمة إلى تغيير التردد الرنيني للهوائي.

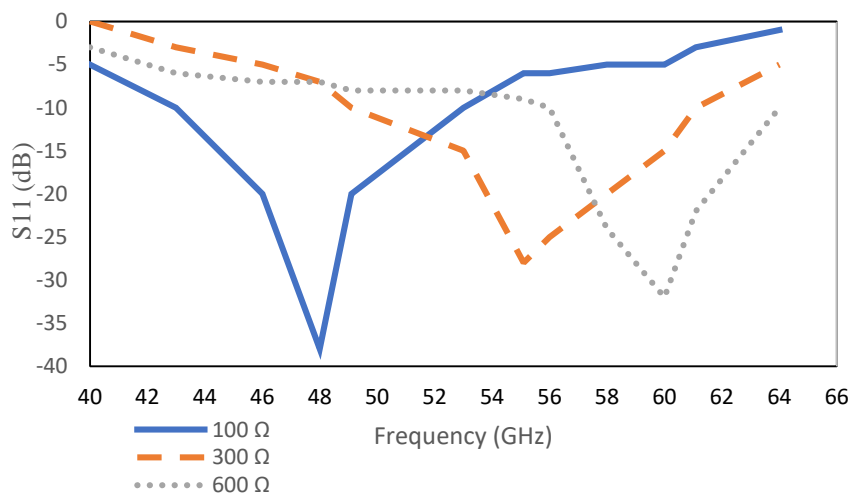
يسمح هذا الأسلوب في إعادة الضبط بالحصول على مرونة ترددية عالية مع الحفاظ على بنية بسيطة وسهلة التصنيع، مما يجعل التصميم المقترح مناسباً لتطبيقات الجيل الخامس والأنظمة اللاسلكية متعددة النطاقات.

٤. النتائج والمناقشة:

تم تحليل أداء الهوائي المقترح القابل لإعادة الضبط الترددي باستخدام برنامج CST Microwave Studio، حيث تم تقييم الخصائص الإشعاعية الأساسية مثل معامل الانعكاس (S_{11})، نسبة الموجة الراجعة (VSWR)، الريح، ونمط الإشعاع لكل حالة من حالات تحميل المقاومات. يوضح هذا القسم تأثير تغيير قيم المقاومات على سلوك الهوائي والتردد الرنيني.

٤-١ معامل الانعكاس (S_{11} - Return Loss)

يُعد معامل الانعكاس أحد أهم المعايير التي تُستخدم لتقييم جودة المطابقة بين الهوائي وخط التغذية. يوضح الشكل (٣) استجابة معامل الانعكاس للهوائي عند حالات إعادة الضبط المختلفة.



الشكل (٣): معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي لكل حالات المقاومة

الحالة الأولى ($R = 100 \Omega$):

عند تحميل مقاومتين بقيمة 100 أوم، يظهر الهوائي ترددًا رنينيًا منخفضًا نسبيًا وهو 48 GHz، حيث يحقق معامل انعكاس -38 dB، مما يدل على مطابقة جيدة وقدرة عالية على إشعاع القدرة المدخلة. ويُعزى هذا السلوك إلى زيادة التيار المار في المسار الإشعاعي نتيجة القيمة المنخفضة للمقاومة.

الحالة الثانية ($R = 300 \Omega$):

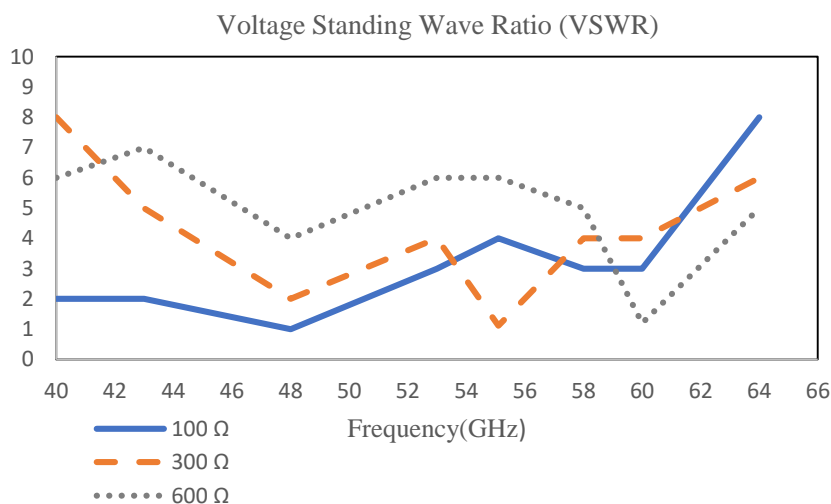
عند زيادة قيمة المقاومة لـ 300 أوم، ينتقل التردد الرنيني إلى قيمة أعلى مقارنة بالحالة الأولى وهو 55.1 GHz، مع الحفاظ على معامل انعكاس أقل من -10 dB وهو -28 dB. يشير هذا الانتقال إلى تأثير تحميل المقاومة على الطول الكهربائي الفعال للرقعة المشعة.

الحالة الثالثة ($R = 600 \Omega$):

في هذه الحالة، أدى استخدام مقاومات بقيمة 600 أوم إلى زيادة إضافية في التردد الرنيني حيث وصل التردد إلى 60 GHz، واستمر الهوائي في تحقيق مطابقة مقبولة ضمن نطاق التشغيل. إلا أن قيمة معامل الانعكاس تكون أقل تحسناً -32 dB مقارنة بالحالة الأولى نتيجة تقليل التيار السطحي داخل البنية الإشعاعية. تؤكد هذه النتائج أن الهوائي يتمتع بمرونة ترددية واضحة من خلال تغيير قيم المقاومات فقط دون الحاجة إلى تعديل البنية الفيزيائية.

٢-٤ نسبة الموجة الراجعة (VSWR)

تمثل VSWR مقياساً آخر لجودة المطابقة بين الهوائي وخط التغذية. يوضح الشكل (٤) قيم VSWR لجميع حالات إعادة الضبط.

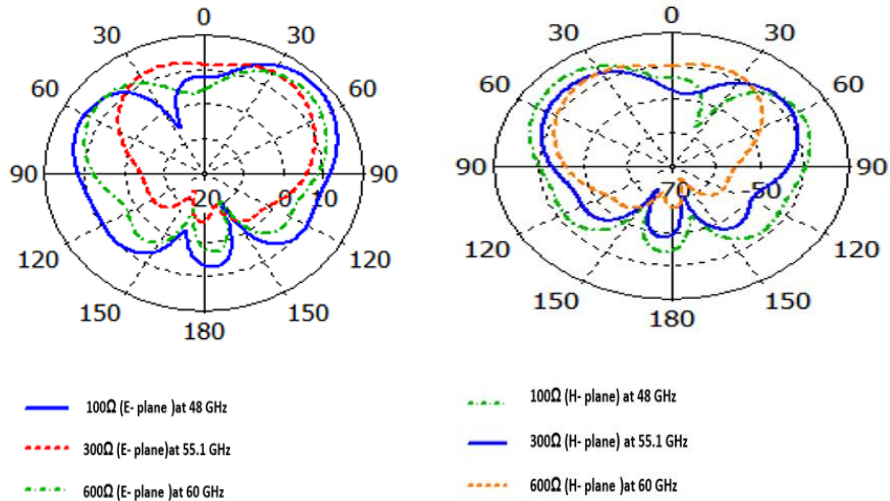


الشكل (٤): VSWR لكل حالات المقاومة

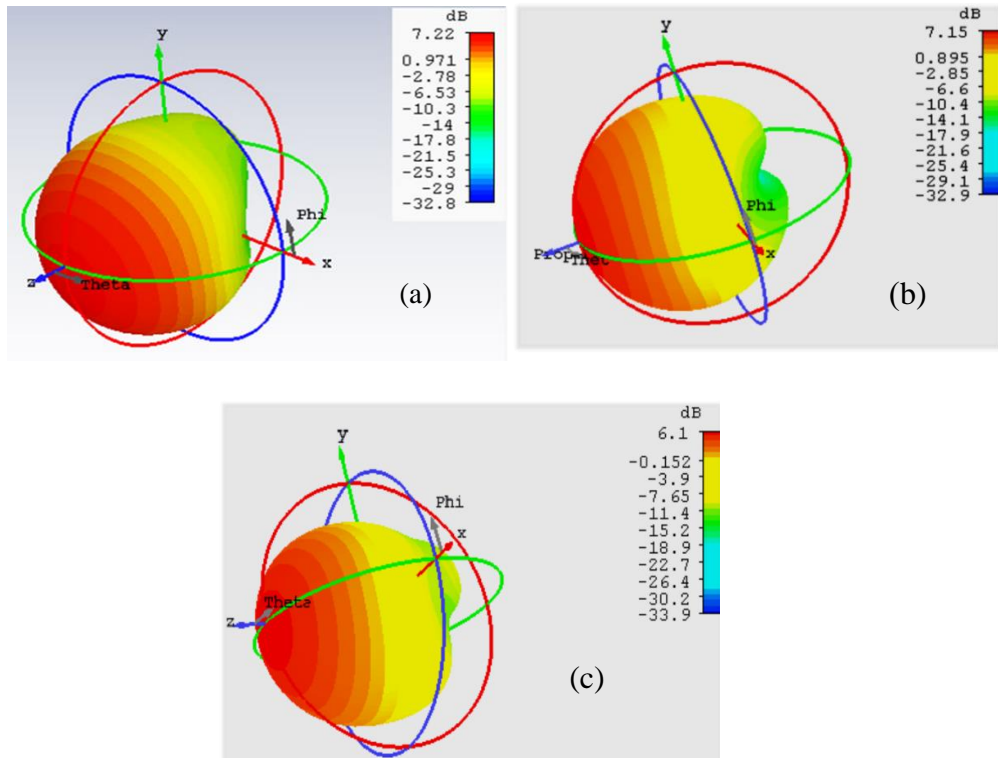
عند $R = 100 \Omega$ ، تسجل VSWR قيمة الواحد الصحيح، مما يدل على مطابقة شبه مثالية.
 عند $R = 300 \Omega$ ، تبقى قيمة VSWR ضمن المجال المقبول (أقل من ٢)، مع زيادة طفيفة ناتجة عن تغيير خصائص المعاوقة وهي 1.12.
 عند $R = 600 \Omega$ ، ترتفع قيمة VSWR نسبيًا لكنها تبقى ضمن الحدود المسموح بها للتطبيقات العملية وهي 1.2.
 تشير هذه النتائج إلى أن الهوائي يحافظ على أداء مستقر من حيث المطابقة عبر مختلف حالات إعادة الضبط.

٣-٤ الربح ونمط الإشعاع:

تم تحليل الربح ونمط الإشعاع للهوائي عند الترددات الرنينية لكل حالة مقاومة، حيث يوضح الشكل (٥) مخطط الإشعاع ثنائي الأبعاد 2D في المستويين E و H لكل حالات المقاومة، أما الشكل (٦) يعرض مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D.



الشكل (٥): مخطط الإشعاع ثنائي الأبعاد 2D في المستويين E و H لكل حالات المقاومة



الشكل (٦): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D لكل حالات المقاومة: (a) عند 100Ω، (b) عند 300Ω، (c) عند 600Ω

نلاحظ من الشكل (٦) أنه في حالة 100 أوم، يحقق الهوائي أعلى قيمة كسب نتيجة التوزيع المنتظم للتيار على الرقعة المشعة وهي 7.22 dB. أما عند مقاومة 300 أوم، ينخفض الكسب بشكل طفيف مع الحفاظ على نمط إشعاع مستقر ومتماثل نسبياً وهي 7.15 dB.

يلاحظ في حالة ٦٠٠ أوم انخفاض إضافي في الكسب نتيجة تقليل القدرة المشعة وهي 6.1 dB، إلا أن نمط الإشعاع يبقى مناسباً لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية. كما يُظهر الهوائي نمط إشعاع شبه اتجاهي، وهو مناسب لتطبيقات الجيل الخامس التي تتطلب تغطية فعالة واستقرارًا في الأداء.

يتضح من خلال النتائج السابقة أن تحميل المقاومات داخل بنية الهوائي على شكل حرف H يوفر وسيلة فعالة وبسيطة لتحقيق إعادة الضبط الترددي. يتيح هذا الأسلوب الانتقال بين عدة ترددات تشغيل مع الحفاظ على أداء إشعاعي جيد ومطابقة مقبولة، دون الحاجة إلى استخدام عناصر تحكم معقدة أو دارات إضافية.

٥. الاستنتاجات والتوصيات

- تم تصميم وتحليل هوائي رقعة شرائحي مشقوق على شكل حرف H وقابل لإعادة الضبط الترددي لتطبيقات الجيل الخامس ضمن نطاق الموجات المليمترية.
- أظهر الهوائي المقترح قدرة فعالة على تغيير التردد الرنيني من خلال تحميل مقاومتين بقيم مختلفة دون الحاجة إلى تعديل البنية الفيزيائية للهوائي.
- بينت نتائج المحاكاة أن الهوائي يحقق مطابقة جيدة عند جميع حالات إعادة الضبط، مع قيم مناسبة لمعامل الانعكاس ونسبة الموجة الراجعة (VSWR).
- حافظ الهوائي على أداء إشعاعي مستقر وريح مقبول عند مختلف قيم المقاومات المستخدمة.
- أثبت أسلوب إعادة الضبط المعتمد على المقاومات فعاليته كحل بسيط وعملي لتحقيق المرونة الترددية مع الحفاظ على صغر الحجم وسهولة التصنيع.
- إمكانية دراسة تأثير تعديل أبعاد الشق على شكل حرف H أو إضافة شقوق إضافية لتحسين عرض الحزمة وزيادة عدد الترددات القابلة لإعادة الضبط.
- يمكن توسيع الدراسة مستقبلاً من خلال دمج الهوائي ضمن مصفوفات هوائيات أو أنظمة MIMO لتطبيقات الجيل الخامس المتقدمة.

.٦ المراجع

- [1] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213–6230, Dec. 2024.
- [2] K. Shereen, M. I. Khattak, and M. Witjaksono, "A brief review of frequency, radiation pattern, polarization, and compound reconfigurable antennas for 5G applications," *Journal of Computational Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 1065–1076, 2022.
- [3] M. K. Shereen, M. I. Khattak, and M. H. Hasan, "A frequency and radiation pattern reconfigurable antenna for 5G applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 1–9, 2024.
- [4] S. Bharadwaj, D. Sipal, and S. K. Koul, "A compact frequency reconfigurable antenna for multiband wireless applications," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 86, pp. 1–8, 2023.
- [5] W. A. Awan, A. Ghaffar, N. Hussain, and X. J. Li, "Compact frequency reconfigurable antenna for 5G communications," in *Proc. IEEE International Conference on Telecommunications and Networks*, Nov. 2022, pp. 1–4.
- [6] S. Jilani and K. P. Esselle, "Millimeter-wave frequency reconfigurable antenna for 5G networks," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 132–135, 2024.
- [7] B. Alekhya, N. Murugan, and N. Kartheek, "Millimeter-wave reconfigurable antenna for 5G wireless communications," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 101, pp. 45–52, 2022.
- [8] A. Ghaffar, W. A. Awan, and N. Hussain, "A compact multiband frequency reconfigurable antenna for portable wireless devices," in *Proc. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Dec. 2023, pp. 122–125.
- [9] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2001.
- [١٠] نصر، م؛ حسن، ل، "دراسة تأثير تقنيات التغذية على الهوائي الشرائحي المطبوع في مجال الاتصالات الخلوية للجيل الخامس 5G"، مجلة جامعة طرطوس، ٢٠٢١.
- [١١] نصر، م؛ حسن، ل، "تصميم مصفوفة هوائيات تعمل عند ثلاث ترددات لأنظمة اتصالات الجيل الخامس 5G"، مجلة جامعة طرطوس، ٢٠٢٢.
- [12] L.Hasan, M.Nasser, M.Anbar, M.Kolistratov and E. Vostorgina, "High Gain, Wide Band 1*8 Microstrip Patch Antenna Array at 28GHz for 5G Communication," in *IEEE*. 2022.
- [13] L.Hasan, M.Nasser, M.Anbar, M.Kolistratov and E. Vostorgina, "Inverted U-shaped Frequency Reconfigurable Microstrip patch antenna for 5G communication systems" in *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY*.2023.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.