

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين الأداء للجيل الخامس للاتصالات الخلوية

محمد مأمون البارودي^{1*} عبد الكريم السالم² علي حسن³

^{1*} طالب دكتوراه، مهندس، في قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة البعث.
² أستاذ، دكتور، في قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة البعث.
³ دكتور، مدرس في قسم الاتصالات في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

الملخص:

تدعم السطوح العاكسة الذكية Intelligent reflecting surfaces، أو السطوح العاكسة القابلة لإعادة التشكيل reconfigurable reflecting surfaces عدداً واسعاً من تطبيقات الاتصالات الحديثة، مثل إنترنت الأشياء وتقنيات الجيل الخامس واتصالات البيئة الداخلية. تتكون هذه السطوح من مصفوفة من الخلايا الأساسية التي تضاف لها عناصر فعالة مسؤولة عن ضبط طورها بما يحقق زوايا انعكاس في اتجاهات مغايرة لاتجاه الانعكاس الطبيعي. يقدم البحث الحالي تصميم خلية أساسية تعمل عند التردد 30 GHz، وبأبعاد لا تتجاوز $7 \times 7 \text{ mm}^2$. تتموضع على ركيزة ارتفاعها 1.4 mm، وذات سماحية نسبية 4.25. توفر الخلية المصممة إمكانية إعادة التشكيل باستخدام ثنائيين متغيري السعة varactor أو ثنائيي PIN يمكنهما تحقيق طور انعكاس على مجال مقارب لـ 360° و 180° على التوالي ضمن زوايا ورود مختلفة ونمطي استقطاب للحقل الكهرومغناطيسي TE و TM. جرت محاكاة الخلية الأساسية باستخدام طريقة العناصر المنتهية FEM المتاحة في برمجية CST Studio Suite، دلت النتائج على إمكانية استخدام السطوح المقترحة في تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات الخلوية.

كلمات مفتاحية: سطوح عاكسة ذكية – سطوح عاكسة قابلة لإعادة التشكيل – الجيل الخامس – إنترنت الأشياء.

تاريخ الابداع: 2022/10/6

تاريخ القبول: 2023/1/23



حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

Intelligent Reflecting Surface Design with Reflection Phase Control to Improve 5G Performance

Mohammad Maamoun Albaroudi*¹ Abdulkarim Assalem² Ali Hassan³

*¹. Ph,Eng, Dr, of Department of Electronic and Communications Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical.

Dr. Ali Hassan.

². Dr, Department of Electronic and Communications Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Albaath University.

³.Dr ,Department of Communication at Higher Institute of Applied Sciences and Technology.

Abstract:

Intelligent reflecting surfaces, or reconfigurable reflecting surfaces, support many modern communications applications. Such as the Internet of things, 5G technologies, and indoor environment communications. These surfaces consist of a matrix of unit cells to which are added active elements responsible for adjusting their phase in order to achieve the angle of reflection in directions different from the direction of the specular reflection. The current research presents a unit cell design operating at 30 GHz, with dimensions not exceeding $7 * 7 \text{ mm}^2$. Located on a substrate with thickness of 1.4 mm, and a relative permittivity of 4.25. The designed cell offers the possibility of reconfiguration using two varactors or two PIN diodes that can achieve phase reflection on a range asymptotic to 360° and 180° respectively under different angles of incidence and polarization modes of the EM field TE and TM. The unit cell was simulated using the FEM method available in the commercially available CST Studio Suite software, the results indicated that the proposed surfaces could be used in 5G cellular applications.

Key Words: Intelligent Reflecting Surfaces – Reconfigurable Reflecting Surfaces - 5G - Internet of Things.

Received: 6/10/2022

Accepted: 23/1/2023

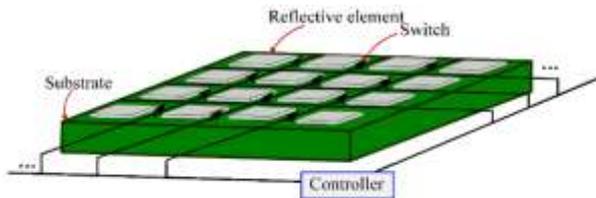


Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

المقدمة:

في السنوات الأخيرة، برزت السطوح العاكسة الذكية (IRS (Intelligent Reflecting Surfaces [4] أو السطوح الذكية القابلة لإعادة التشكيل (Reconfigurable Intelligent RIS Surfaces [5] أو السطوح العاكسة القابلة لإعادة التشكيل أو المصفوفات العاكسة الذكية (Smart Reflect SRA Array [6] كتقنية واعدة تهدف في مبدأها إلى تحقيق انعكاس شاذ (غير طبيعي) في اتجاهات مغايرة لاتجاه الانعكاس الطبيعي. يمكن لآلية التوليف هذه تحقيق مجموعة من الوظائف مثل توجيه الإشعاع باتجاه معين (وظيفة التوجيه)، وبالتالي إمكانية حجب الإشارة عن مستخدمين محددين (وظيفة الحجب). يتم حالياً البحث في السطوح العاكسة الذكية بهدف تطويرها لخدمة تقنيات الاتصالات النقالة. تتكون هذه السطوح من مصفوفة من الخلايا الأساسية unit cells المصنوعة من مواد ناقلة متموضعة على طبقة عازلة ذات سماحية نسبية ϵ_r وارتفاع مدروس h ، يحد الركيزة العازلة من الأسفل طبقة معدنية ذات ناقلية عالية بهدف منع تسرب الإشارة ودعم وظيفة الانعكاس [7]. يبين الشكل (1) بنية السطوح العاكسة الذكية.

تختلف السطوح العاكسة الذكية عن مصفوفة الهوائيات الكثيفة من حيث بنية المصفوفة. حيث تكون مصفوفة السطوح العاكسة الذكية خاملة ولا تستهلك طاقة تقريباً، في حين أنها فعالة في الهوائيات الكثيفة، وتستهلك طاقة مرتفعة. يوجد اختلاف في آلية العمل كذلك، إذ تعتمد السطوح العاكسة الذكية على مبدأ الانعكاس reflection، بينما تعتمد الهوائيات الكثيفة على مبدأ الإرسال transmit [9].



الشكل (1): البنية العامة للسطوح العاكسة الذكية [8].

يهدف الباحثون في نظم الاتصال اللاسلكية الحديثة، وبشكل خاص، نظم الاتصالات النقالة، إلى تطوير تقنيات تعظم من السعة capacity (المعدل الأعظمي لتدفق البتات)، بشكل لا يمكن تحقيقه عبر التعديل في طرفي الإرسال والاستقبال (إضافة هوائيات متعددة واستخدام تقنيات تعديل وترميز متقدمة) فقط. إذ يلزم كما تعد نظم الجيل الخامس 5G مثلاً، تعزيز قابلية التوجيه في وسط الاتصال. كما هو معروف، يمكن زيادة سعة قناة الاتصال عبر رفع رتبة التعديل modulation order أو زيادة كل من عرض المجال الترددي bandwidth أو نسبة متوسط استطاعة الإشارة إلى متوسط استطاعة الضجيج SNR وفق قانون شانون:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

حيث:

 C سعة القناة (bps). B عرض المجال الترددي (Hz). SNR نسبة متوسط استطاعة الإشارة إلى متوسط استطاعة الضجيج (بدون وحدة).

في بيئة اتصالات كثيفة، تبرز أهمية وظائف توجيه الحزمة الإشعاعية للهوائيات المستخدمة وحجب الإشارة عن بعض المستخدمين في رفع أداء النظام ككل. يمكن تحقيق هذه الوظائف عبر تقنيات مختلفة، مثل أنظمة الهوائيات المتعددة الكثيفة massive MIMO، أو المرحلات relays. تعاني هذه الأنظمة من استهلاك طاقة عالٍ، إضافة إلى تعقيد في التصميم والتنفيذ وضجيج حراري لا يمكن إهماله [1],[2],[3]. إضافة إلى ذلك، يصعب تحقيق ساعات كبيرة كالتي تعد بها اتصالات الجيل الخامس بالاعتماد على مكونات موجودة في طرفي المرسل والمستقبل فقط. أو أنها قد تكون مكلفة جداً أو غير ذات فاعلية كبيرة نظراً لتعقيدها وانخفاض فاعليتها الطاقية والطيفية.

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين

البارودي السالم حسن

والتي يمكن جمعها بشكل بناء في جهاز الاستقبال بهدف تعظيم إجمالي الاستطاعة المستقبلية [9]. يلخص الجدول (1) المقارنة السابقة بين السطوح العاكسة الذكية وبقية التقنيات من حيث نمط الازدواج وميزانية الاستطاعة والتداخل والكلفة العادية.

الجدول (1): مقارنة بين السطوح العاكسة الذكية IRS وبقية التقنيات [9]

التقنية	نمط الازدواج Duplex Mode	ميزانية الاستطاعة Power Budget	التداخل Interference	الكلفة العادية Hardware Cost
السطوح العاكسة الذكية IRS	كامل	خاملة منخفضة	منخفض جداً	منخفضة
المرحلات	كامل / نصفى	فعالة مرتفعة	مرتفع	مرتفعة
المبعثرات الخلفية	كامل	فعالة منخفضة	منخفض	منخفضة
اليونيات الثقيلة	كامل	فعالة مرتفعة جداً	مرتفع	مرتفعة

إذاً، فإنه على ضوء زيادة الطلب على الاتصالات اللاسلكية الكثيفة ذات السعة العالية، وميزانية الاستطاعة المنخفضة، تعتبر السطوح العاكسة الذكية حلاً واعداً يمكن من خلاله زيادة نسبة متوسط استطاعة الإشارة إلى متوسط استطاعة الضجيج SNR عبر التعديل في مستويات قناة الاتصال بما يحقق تحسين أداء نظم الاتصالات.

الدراسات السابقة:

قام Fara وآخرون في [10] بمحاكاة وتنفيذ نموذج أولي لسطوح ذكية قابلة لإعادة التشكيل باستخدام الثنائي متغير السعة varactor، ودراسة استجابة الخلية الأساسية باستخدام برمجية المحاكاة الإلكترونية ديناميكية بهدف تحقيق انعكاس الإشارة الواردة في اتجاهات مختلفة. يعمل الثنائي متغير السعة على جهد عكسي يتراوح بين $V [1-5]$ مقدماً سعوية $pF [1-0.2]$. تمت برهنة قدرة هذه السطوح على رفع أداء نظم الاتصالات النقالة. قدّم Ojaroudi وآخرون في [11] تصميم سطوح قابلة لإعادة التشكيل عبر ثنائيات PIN مكونة من مصفوفة من 10×10 عنصر من الخلايا الأساسية ذات شكل حرف U. يمكن استخدام هذه السطوح في وظائف مثل توجيه الحزمة الإشعاعية على المركبات. تعمل السطوح المقترحة حول التردد 5.3 GHz. تم تنفيذ نتائج المحاكاة من أجل التحقق من صحة السطوح

تلتعب مرحلات التضخيم والتوجيه amplify and forward المعروفة اختصاراً بـ AF relay دوراً في عملية الاتصال بين المصدر والهدف عن طريق تضخيم الإشارات وإعادة توليدها، بينما تعكس السطوح العاكسة الذكية IRS الإشارات الواردة كمصفوفة خاملة (تقريباً) بدون استخدام جهاز إرسال، وبالتالي تُلغى الحاجة إلى استهلاك طاقة الإرسال. يمكن للسطوح العاكسة الذكية أن تعمل في نمط الازدواج الكامل full duplex، بينما يعمل مرحل AF في وضع ازدواج نصفى half duplex، لأنه يعاني من تداخل شديد في نمط الازدواج الكامل، مما يجعله يتطلب تقنيات فعالة لإلغاء التداخل، الأمر الذي يجعل السطوح العاكسة الذكية IRS أكثر فاعلية في استخدام الطيف [9].

على غرار مرحلات AF، تقوم مرحلات فك الترميز والتوجيه decode and forward المعروفة اختصاراً بـ DF relay بفك ترميز وإعادة توليد الإشارة المرسل من المصدر وإرسالها إلى الهدف. نظراً لوجود عملية فك الترميز، فإن هذه المرحلات تتسم بدرجة أكبر من التعقيد وتستهلك طاقة معالجة إشارة مرتفعة. في المقابل، كما ذكر سابقاً، لا تقوم السطوح العاكسة الذكية IRS بأي فك ترميز ولا تقوم إلا بوظيفة الانعكاس الخامل. وبالتالي، فهي ذات تكلفة أقل وتستهلك طاقة ضئيلة [9].

تعكس البعثرة الخلفية backscatter وسم معرّف الترددات الراديوية (Radio-frequency identification) RFID إلى جهاز الاستقبال من الإشارة التي يرسلها القارئ. في المقابل، تعمل IRS على تحسين أداء وصلة الاتصال الحالي بدلاً من تقديم المعلومات الخاصة بها عن طريق انعكاس بسيط للإشارة. على هذا النحو، فإن المسار من القارئ إلى المستقبل في اتصالات التبعثر الخلفي يواجه تداخلاً غير مرغوب فيه، ويحتاج هذا التداخل إلى تخفيف عند جهاز الاستقبال، ولكن، باستخدام السطوح العاكسة الذكية IRS، تحمل إشارات المسار المباشر وإشارات المسار الانعكاسي نفس المعلومات المفيدة،

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين

البارودي السالم حسن

المقترحة في سيناريو المركبات. تم إيجاد معدل البيانات اللحظي كتابع لعرض الحزمة beamwidth وسرعة المركبة والمسافة. كما هو متوقَّع، كلما انخفض عرض الحزمة، زاد معدل البيانات. بالإضافة إلى ذلك، كلما انخفضت سرعة المركبة أو المسافة، زاد معدل البيانات. جرت مقارنة سعة النظام المقترح كتابع للمسافة في ظل وجود هذه السطوح وعدمه، وتم البرهان على أن وجود السطوح القابلة لإعادة التشكيل سيؤدي إلى زيادة السعة بشكل كبير، خاصة مع زيادة المسافة بين محطة الإرسال ومحطة الاستقبال.

قدّم Chen وآخرون في [12] نموذجاً لمُزيح طور يعتمد على الزاوية، ويتكون من خلية أساسية قابلة لتغيير الاستجابة الطورية باستخدام ثنائي متغير السعة بهدف تحسين الاتصالات اللاسلكية حول 5.5 GHz. تمت دراسة تأثير تغيير كل من زاوية ورود الموجة وقيمة السعوية على معامل انعكاس السطوح القابلة لإعادة التشكيل. يُقترح استخدام هذه السطوح في تقنيات الازدواج بتقسيم التردد FDD.

اقترح Ojaroudi و Loscri في [13] بنية سطوح عاكسة ذكية قابلة لإعادة التشكيل تعتمد على الجرافين بهدف رفع أداء تطبيقات اتصالات التيراهيرتز. يتكوّن الهيكل المقترح من عدّة طبقات مع رقعة مشعّة من الجرافين. يتم تغيير جهد الانحياز لضبط الجهد الكيميائي، ما يوفّر قيم طور مختلفة. تعمل السطوح المقترحة عند التردد 4.35 THz. من خلال إنشاء هياكل مصفوفة كاملة باستخدام 16 * 16 من الخلايا الأساسية المقترحة، فإنه يتم التلاعب بالنمط الإشعاعي وتوجيه الحزمة في اتجاهات اختيارية مختلفة.

اقترح Arghni وآخرون في [14] مصفوفة عاكسة قابلة لإعادة التشكيل عبر التحكم في خصائص الثنائي متغير السعة varactor على كل خلية أساسية. تمت دراسة التحسين الذي يضيفه وجود هذه السطوح عبر إعادة تكوين نفسها من أجل عكس الموجات الكهرطيسية الواردة نحو الاتجاه المقصود الذي قد يعاني فيه جهاز الاستقبال من تغطية ضعيفة.

قدّم Pala و Matos في [15] نظام سطح عاكس ذكي قابل لإعادة التشكيل يعتمد على خاصية الانتقال من المعدن إلى العازل التي تقدمها طبقة VO₂، يتم وضع هذه الطبقة على مصفوفة عالية الكثافة من العناصر التي يمكن تشغيلها إلكترونياً. باستخدام طريقة التحكم هذه، يمكن تغيير شكل الانعكاس بشكل مرّن وبسرعة عالية. تم تحقيق مجال طوري يبلغ حوالي 300° عند التردد 32 GHz من أجل تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات النقالة. يمكن أن يعمل الجهاز المقترح كمنصّة جديدة لمصفوفات التردد المرتفع القابلة لإعادة التشكيل، والعديد من التطبيقات ذات المجال الترددي الواسع.

مشكلة البحث:

يتبع طور الانعكاس كلاً من طول وحجم العنصر بشكل أساسي، ويعلم أن تحقيق توزّع طور تدريجي معيّن على مصفوفة من الخلايا الأساسية، يؤدي إلى تركيز الإشعاع في أي اتجاه اختياري تقريباً. يبيّن الشكل (2) الانعكاس بالاتجاه الشاذ (غير الطبيعي) عبر تغيير أطوار العناصر بشكل تدريجي، ويبين يساره الانعكاس بالاتجاه الطبيعي، وهذه هي المشكلة التي يُعنى بها البحث. إن القصد من إعادة التشكيل هنا هو تغيير الطول الكهربائي للخلية الأساسية اعتماداً على إشارات كهربائية تتحكّم في خصائص عنصر/عناصر فعّالة متموضعة في مواضع مدروسة ضمن الخلية، والذي يماثل بكلمات أخرى التعديل في قيم الحثية inductance والسعوية capacitance المكافئتين للخلية الأساسية اعتماداً على عناصر متحكّم بخواصها كهربائياً بهدف تحقيق إزاحة في تردد الرنين f_r ، والذي يقابله تحقيق إزاحة في طور الانعكاس الخاص بالعنصر وفق العلاقتين:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \quad (3)$$

حيث:

البارودي السالم حسن

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين

معامل الانعكاس عندها، عبر تغيير جهد الانحياز العكسي للثنائي متغير السعة كما في الشكل (3)، أو تغيير حالة مبدلات PIN. يمكن نمذجة معامل الانعكاس عند الحمل (الخلية الأساسية) بالعلاقة:

$$\Gamma_i = \beta_i \cdot e^{j\phi_i} \quad (4)$$

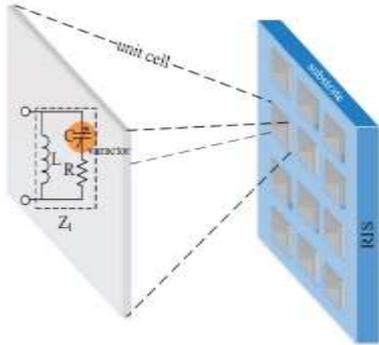
حيث:

Γ_i معامل الانعكاس للخلية i .

β_i مطال الانعكاس للخلية i .

ϕ_i طور الانعكاس للخلية i .

تكون قيم مطال معامل الانعكاس β_i في المجال [0,1] كقيم خطية، وفي المجال $[-\infty, 0]$ بالديسبل، ويكون طور معامل الانعكاس ضمن المجال شبه المستمر $[0^\circ - 360^\circ]$ بشكل نموذجي في حالة استخدام ثنائي متغير السعة varactor، وقيمتين تقريبتين هما $(0^\circ, 180^\circ)$ بشكل نموذجي في حالة استخدام ثنائي PIN. في تصميم السطوح العاكسة الذكية، يجب تحقيق مجال طوري واسع، مع مطال انعكاس عالٍ قدر المستطاع، بهدف تحقيق مجال مسح إشعاعي واسع، مع SNR عالية، على الترتيب.



الشكل (3): نموذج نظري للسطوح العاكسة الذكية [7].

عملياً، يحصل الانعكاس عندما لا يحصل توافق بين ممانعة الفضاء الحر، البالغة 377Ω تقريباً، وممانعة الخلية الأساسية Z_i . تعطى ممانعة الخلية الأساسية وفقاً للعلاقة التالية [18]:

$$Z_i = \frac{Z_0 S_{21}}{2(1 - S_{21})} \quad (5)$$

حيث:

Z_i ممانعة الخلية الأساسية.

f_r تردد الرنين لدارة تتصل عناصرها على التسلسل أو على التفرع.

L الحثية المكافئة.

C السعوية المكافئة.

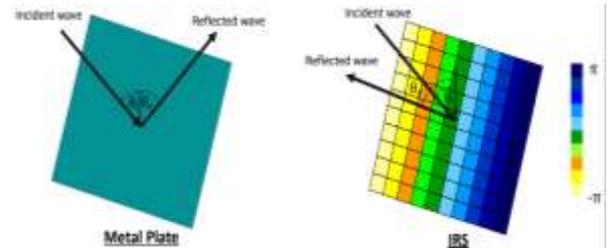
θ زاوية الطور لدارة رنين تسلسلية.

X_L المعاوقة الحثية.

X_C المعاوقة السعوية.

R المقاومة الأومية.

تكون العلاقة (3) مشابهة في حالة الرنين التفرعي، ولكن مع استبدال المعاوقة بالمطوعة، والمقاومة بالناقالية.

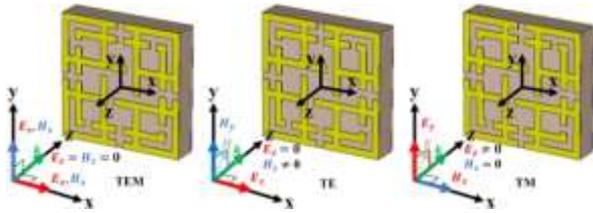


الشكل (2): تحقيق زاوية الانعكاس الاختيارية عبر توزيع الطور التدريجي.

تم سابقاً إدخال تقنيات إعادة تشكيل الهوائيات مثل دمج العناصر الإلكترونية أو البصرية أو الميكانيكية أو الركييزة متغيرة الخواص مثل الكريستال السائل إلى مجموعة من تطبيقات الاتصالات اللاسلكية والفضائية بهدف تعديل تردد العمل أو استقطاب أو النموذج الإشعاعي للعنصر المشع [16]. في وقتنا الحاضر، تنجه الأبحاث إلى إدخال هذه التقنيات (وخاصة الإلكترونية منها) إلى تقنيات إعادة تشكيل المواد الفائقة metamaterial والسطوح انتقائية التردد frequency selective surfaces، بهدف تحقيق استجابة قابلة للتغيير [17]. مؤخراً، يحاول الباحثون المعنيون بتطوير تقنيات اتصالات نوعية إدخال مفهوم إعادة التشكيل إلى السطوح العاكسة ليُعرف اسمها بالسطوح العاكسة الذكية IRS، أو السطوح العاكسة القابلة لإعادة التشكيل. يمكن تبسيط مفهوم توليف الطور باعتماد طريقة العناصر المجمععة (المركزة) lumped elements المكافئة للدارة. عملياً، يتم تغيير ممانعة الحمل، وهي ممانعة الخلية في هذه الحالة، بهدف ضبط قيمة

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين البارودي السالم حسن

كما ذكر، يهدف هذا التصميم إلى تحقيق تعديل في طور ومطال الانعكاس من أجل نمطي استقطاب للحقل الكهرومغناطيسي هما نمط الحقل الكهربائي المستعرض (transverse electric) والذوي يكافئ في CST، موجة مستقطبة خطياً في اتجاه المحور y، ونمط الحقل المغناطيسي المستعرض (transverse magnetic) والذي يكافئ في CST، موجة مستقطبة خطياً في اتجاه المحور x، تتم دراسة نمطي الاستقطاب السابقين فقط كونهما يحاكيان نمط استقطاب اختياري للموجة الواردة. يبين الشكل (4) توضيحاً لمفهوم أنماط استقطاب الحقل الكهرومغناطيسي. كما يبين الشكل (4)، تكون مركبتا الحقلين الكهربائي والمغناطيسي عموديتان على اتجاه الانتشار في النمط TEM، بينما في النمط TE، تكون مركبة الحقل الكهربائي عمودية على اتجاه الانتشار، في حين توجد مركبة حقل مغناطيسي موازية لاتجاه الانتشار، لذلك تسمى الموجة في هذا النمط بالموجة H، وفي حالة النمط TM، تكون مركبة الحقل المغناطيسي عمودية على اتجاه الانتشار، في حين توجد مركبة حقل كهربائي موازية لاتجاه الانتشار، لذلك تسمى الموجة في هذا النمط بالموجة E.



الشكل (4): أنماط استقطاب الحقل الكهرومغناطيسي [19].

لهذا السبب، إضافة إلى مجموعة من الأسباب، مثل سهولة النمذجة وبساطة التصنيع، فإنه تم اعتماد شكل ثنائي القطب المتقاطع المعدل modified cross dipole. استُخدمت ركيزة عازلة من نوع FR-4. يبين الجدول (2) مواصفات الركيزة العازلة.

الجدول (2): مواصفات الركيزة العازلة.

نوع المادة	FR - 4 (Lossy)
------------	----------------

Z_0 ممانعة الفضاء الحر. S_{21} معامل التمرير.

يمكن كتابة مطال معامل الانعكاس عند الخلية الأساسية كتابع لممانعة الفضاء الحر وممانعة الخلية الأساسية كما يلي:

$$\beta_i = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (6)$$

يرتبط معامل نسبة أمواج الجهد المستقرة VSWR بمطال معامل الانعكاس وفق العلاقة:

$$VSWR = \frac{1 + \beta_i}{1 - \beta_i} \quad (7)$$

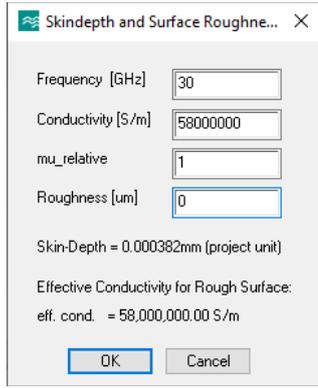
بالتعويض في (6):

$$VSWR = \frac{1 + ((Z_i - Z_0)/(Z_i + Z_0))}{1 - ((Z_i - Z_0)/(Z_i + Z_0))} \quad (8)$$

إذاً، من أجل تحقيق انعكاس أعظمي (مطال انعكاس قريب من 1 أو 0 dB، ونسبة أمواج جهد مستقرة قريبة من ∞) يجب تعظيم الفرق بين ممانعة الفضاء الحر Z_0 وممانعة الخلية الأساسية Z_i ، ومن أجل ضبط طور الانعكاس (تحقيق مجال طوري واسع) يجب تغيير تردد الرنين للخلية الأساسية.

بناءً على ما ذكر، يهتم البحث الحالي بدراسة آلية تغيير طور الانعكاس للخلية الأساسية لضمان الحصول على أكبر مجال مسح إشعاعي ممكن. إن تغيير طور الانعكاس سيؤدي إلى تباين في مطال الانعكاس. إذاً يجب الحفاظ على قيم مطال انعكاس جيدة، وهو ما سيناشره البحث. تم التطرق إلى هذه الآليات في أبحاث سابقة، ولكن الجديد الذي يقدمه البحث هو تحقيق طور ومطال انعكاس متماثلين تقريباً من أجل أنماط استقطاب مختلفة للحقل الكهرومغناطيسي، إضافة إلى دراسة نوعين من آليات تغيير طور الانعكاس ضمن تصميم واحد للخلية الأساسية، مع مناقشة تأثير تغير زاوية الورود على معامل الانعكاس. يبدأ البحث بالمقدمة والدراسات المرجعية، ويعرض القسم الثالث منه مشكلة البحث، ويتم التطرق إلى طرائق البحث والمحاكاة وإجرائية التصميم ومناقشة النتائج في القسمين الرابع والخامس على الترتيب. يُختم البحث بالخلاصة.

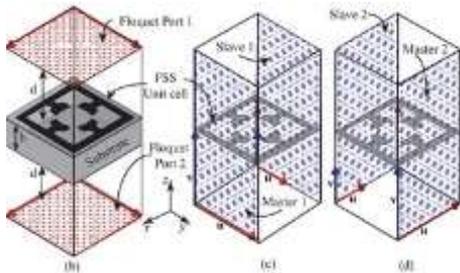
طرائق البحث والمحاكاة:



الشكل (5): توظيف CST في إيجاد العمق القشري.

يتم إدخال تردد العمل وناقلية المعدن ونفاذيته النسبية ودرجة خشونته (تؤثر على الناقلية الفعالة)، ويكون الخرج هو العمق القشري (عملياً، يُهمل توزع التيار من أجل مسافة أكبر من نحو ثلاثة أضعاف العمق القشري). إن القيمة المحددة 0.035 mm كارتفاع للناقل كافية وفق ما توضحه النتائج.

نظراً للطبيعة الدورية لهياكل المواد الفائقة، فإنه يمكن تطبيق تقريبات المصفوفة اللانهائية. توظف طريقة الخلية الأساسية unit cell method الحل الدوري لهذا النموذج. تشير الخلية الأساسية إلى دور واحد من السطوح. باستخدام نموذج الخلية الأساسية، يمكن تحديد أداء هيكل المواد الفائقة تحت شروط المصفوفة اللانهائية بمساعدة برنامج محاكاة كهرومغناطيسي. من الممكن في تحليل الخلية الأساسية إنشاء فرق طور بين الحدود الدورية، والذي يتوافق مع حالة الورد المائل. يجب أن يختلف أداء هياكل السطوح العاكسة الذكية تحت زوايا ورود متفاوتة. وبالتالي، فإن اختبار هذه الميزة مع تحليل الاستجابة تجاه أنماط الاستقطاب المختلفة أمر مطلوب.



الشكل (6): الشروط الحدية الدورية ومنافذ Floquet [20].

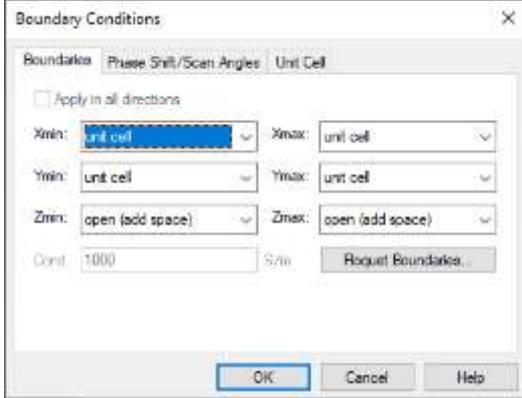
1.4 mm	الارتفاع
4.25	المساحة النسبية
0.025	ظل الفقد

لا يُفضّل العمل بركائز ذات سماحية نسبية مرتفعة، كون ذلك يؤدي إلى تصغير أبعاد الخلية المصممة، ومنه تخفيض فعالية الإشعاع لكل خلية، يجب في هذه الحالة زيادة عناصر المصفوفة الموسعة بهدف رفع فعالية السطح العاكس ككل. يبيّن الجدول (3) مواصفات المادة الناقلة. توفر برمجية CST Studio Suite إمكانية استخدام مواد ناقلة من نوع موصل تام مثالي (Perfect Electric Conductor (PEC)، الذي يوفر نسبياً، سرعة محاكاة أكبر، ويحقق ناقلية لانهائية، ومقاومة صفرية، وهو غير موجود عملياً، لذلك تم اختيار المادة الموصلة لتكون من النحاس الملدّن annealed copper بناقلية تبلغ $5.8 \times 10^7 S/m$.

الجدول (3): مواصفات المادة الناقلة.

نوع المادة	Copper (Annealed)
الناقلية الكهربائية	$5.8 \times 10^7 S/m$
السماكة	0.035 mm

يتم اختيار سماكة منخفضة للناقل، حوالي 0.035 mm عادةً، وذلك بهدف مراعاة عدة اعتبارات، من أهمها، فقد الناقل المتمثل بمفهوم الأثر القشري skin effect، والذي يُحسب أثره بواسطة العمق القشري skin depth، وهي المسافة التي ينخفض فيها مطال الحقل الكهربائي بمقدار e ، وذلك من حافة الناقل باتجاه المركز، يمكن حساب العمق القشري لأي ناقل بواسطة أداة macros المتوفرة من برمجية CST Studio Suite وفق الشكل (5).

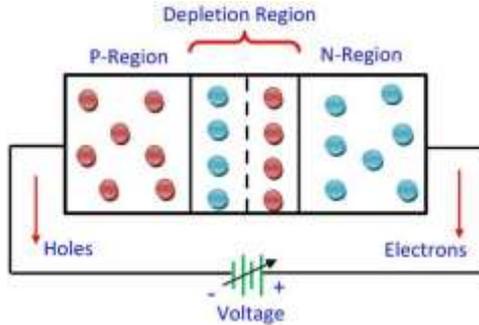


الشكل (7): الشروط الحدية المستخدمة في برمجة CST.

التصميم ومناقشة النتائج:

أ. توليف معامل الانعكاس باستخدام الثنائي متغير السعة
varactor:

يعتبر الثنائي متغير السعة، المعروف بـ varactor أو varicap، ثنائياً معتمداً على الجهد، أي أن خرج الثنائي يعتمد على جهد الدخل، يتم استخدام هذا الثنائي حيث يُطلب سعة متغيرة، ويتم التحكم في هذه السعة بواسطة الجهد. يتكون الثنائي متغير السعة من مواد شبه موصلة من النوع p و n. في المادة من النوع n، تمثل الإلكترونات أغلبية حوامل الشحنة، وفي المادة من النوع p، تمثل الثقوب أغلبية الحوامل. عندما يتم ربط مادة شبه موصلة من النوع p مع أخرى من النوع n، يتم إنشاء منطقة النضوب depletion layer عند تقاطع pn. تتشكل الأيونات الموجبة والسالبة منطقة النضوب، وتحظر هذه المنطقة التيار من الدخول إلى منطقة pn، وفق الشكل (8).



الشكل (8): منطقة النضوب في وصلة pn محيطة عكسياً.

تبدأ تحليلات الخلية في البرمجيات المعتمدة على طريقة العناصر المنتهية Finite Elements Method (FEM) ببناء دور واحد من نموذج الخلية الأساسية، ثم بناء صندوق هوائي vacuum box يغطي حواف الخلية الأساسية، ومن ثم توضع الشروط الحدية. يوضح يمين الشكل (6) تعيين الشروط الدورية والتي تدعى بالسيّد master والعبد slave في العديد من البرمجيات. تضمن هذه الحدود بناء مصفوفة لانهائية إما ببعدين أو ثلاثة أبعاد.

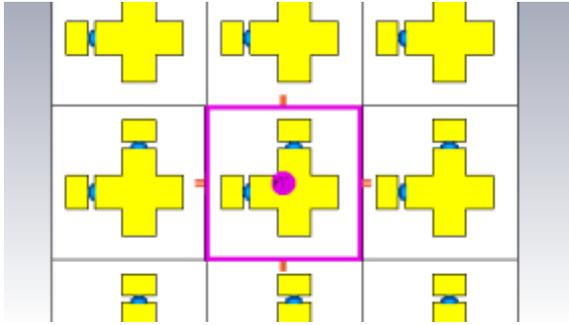
يمكن مراقبة أداء هياكل السطوح تجاه زوايا ورود مختلفة عبر تعيين فرق الطور بين زوجي slave - master. تُنفذ تغذية نموذج الخلية الأساسية بواسطة منافذ Floquet كما هو موضح في يسار الشكل (5). بخلاف الجدران الجانبية الدورية لنموذج الخلية الأساسية، فإنه يلزم وجود شرط حد مفتوح واحد على الأقل لدراسة محددات مصفوفة التبعثر scattering matrix.

تحتوي هياكل الخلايا الأساسية في المواد الفائقة metamaterial عادةً على منفذي Floquet نظراً لأن كلاً من خصائص التمرير والانعكاس هي معايير أداء. في حالة استخدام الخلايا الأساسية كسطوح عاكسة، تتم دراسة معامل الانعكاس فقط، كون معامل التمرير سيكون منخفضاً جداً (نتيجة تأثير المستوى الأرضي). يوضح الشكل (7) الشروط الحدية المستخدمة.

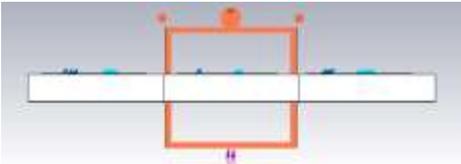
تم ضبط الشروط الحدية على المحور Z على الخيار (حدود مفتوحة مع مسافة إضافية)، وذلك من أجل حسابات منطقة الحقل البعيد far field region. يستخدم حل المجال الترددي طريقة العناصر المنتهية finite elements method (FEM) لحل معادلات ماكسويل.

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين

البارودي السالم حسن
الشكل (7). يبيّن الشكلان (11) و(12) منظوراً رأسياً وجانبياً
للمصفوفة الموسعة، يُوضّح فيه الصندوق الهوائي في برمجية
CST Studio Suite.



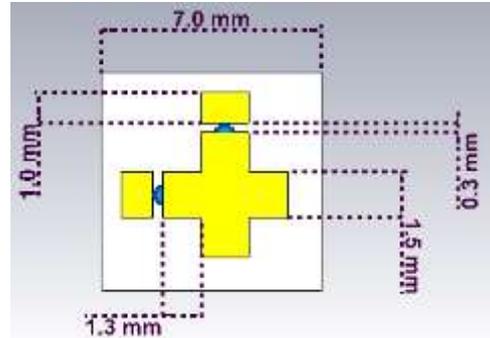
الشكل (11): منظور رأسي للصندوق الهوائي في برمجية CST (اللون الأرجواني).



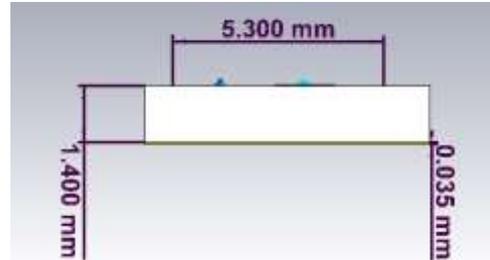
الشكل (12): منظور جانبي للصندوق الهوائي في برمجية CST (اللون البرتقالي).

يبيّن الشكل (13) المخطط التدفقي للإجرائية المستخدمة في
تصميم الخلية الأساسية.

يعمل الثنائي متغير السعة فقط في حالة التحيز العكسي reverse bias. بسبب التحيز العكسي، لا يتدفق التيار. إذا تم توصيل الثنائي في انحياز أمامي، يبدأ التيار بالتدفق عبر الثنائي وتنخفض منطقة نضوبه. لا تسمح منطقة النضوب للأيونات بالانتقال من مكان إلى آخر. وعلى هذا الأساس، يمكن استخدام الثنائي متغير السعة كمكثف قابل للتوليف وفقاً للجهود العكسي المقدم. تتوفر حالياً ثنائيات متغيرة السعة بأبعاد فائقة الصغر (طول وسطي 0.3 mm)، وسعويات فائقة الصغر ودقة التوليف (من رتبة فيمتو فاراد)، الأمر الذي يعزز من إمكانية دعم تقنيات واتصالات الأمواج المليمترية ونظم الجيل الخامس ضمن الحزمة مرتفعة التردد. يبيّن الشكلان (9) و (10) منظوران رأسي وجانبي على الترتيب لتصميم الخلية الأساسية لمصفوفة السطوح العاكسة المقترحة وأبعادها، مبيّناً موضع الثنائيين متغيري السعة (باللون الأزرق). نهتم في عملية المحاكاة بإيجاد طويلة وطور معامل الانعكاس، أي S_{11} فقط.



الشكل (9): منظور رأسي للخلية الأساسية في CST.



الشكل (10): منظور جانبي للخلية الأساسية للسطوح العاكسة في برمجية CST. كما ذكر، يغطّي الصندوق الفراغي حواف الخلية الأساسية، وذلك بهدف تطبيق الشروط الحدية المطلوبة الموضّحة في

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين

البارودي السالم حسن

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-0.5} \quad (9)$$

يتم تضمين ثابت السماحية الفعال ϵ_{eff} في حسابات طول الموجة وتردد العمل، لمكافئة أثر وسط الانتشار غير المتجانس (الهواء/الركيزة)، ويقع ضمن المجال $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$. بعد التعويض تكون قيمته تقريباً 3.09، علماً أن السماحية النسبية للركيزة المستخدمة كما ذكر هي 4.25. بهذا الحال، وبدون إضافة أي شق لتمثيل الثنائي متغير السعة، يكون نصف طول موجة تردد الرنين، من أجل ترددات أقل من 25 GHz، لا يقل عن حوالي 3.41 mm، (مع تضمين أثر ϵ_{eff})، وفق العلاقة:

$$L = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (10)$$

حيث:

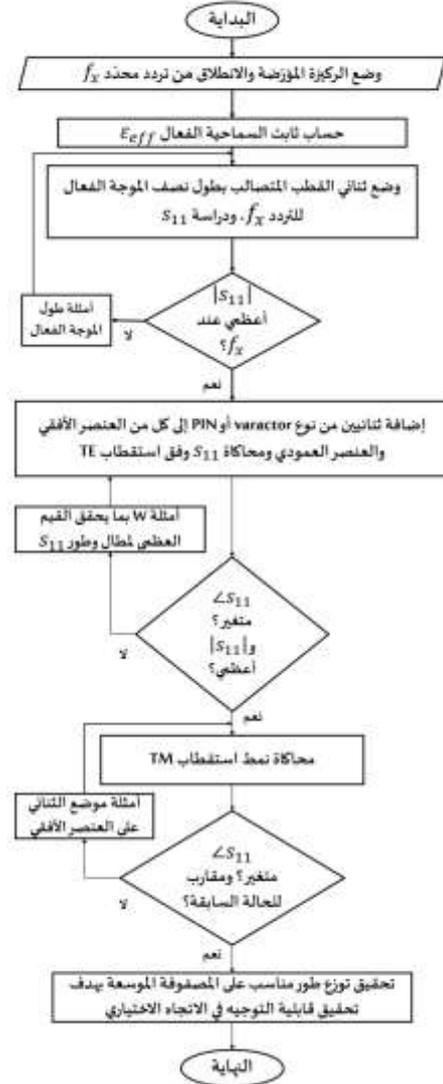
L طول العنصر الأفقي والعمودي.

λ_g طول الموجة المقادة.

λ_0 طول موجة الفضاء الحر.

ϵ_{eff} ثابت السماحية الفعال.

هذه الحسابات، تكون دقيقة تقريباً، بدون إضافة تأثير كل من تراكب الخلايا المجاورة، والشق المضاف بهدف نمذجة الثنائي متغير السعة. يؤثر هذا الشق بسعوية تضاف على التسلسل مع السعوية بين الخلايا الأساسية المتجاورة، ما يؤدي إلى زيادة تردد الرنين وفق العلاقة (2). نحتاج في هذه المرحلة للقيام بعمليات الأمثلة optimizer ومسح المتوسطات par. sweep، المتوقرتان في بيئة محاكاة CST. يبين الشكل (14)، آلية إضافة هدف أو مجموعة من الأهداف ضمن أداة الأمثلة من أجل تحقيق المواصفات المطلوبة بعد تضمين أثر الشق السعوي وتراكب الخلايا المتجاورة.



الشكل (13): المخطط التدفقي لتصميم الخلية الأساسية.

حيث:

تردد قريب من تردد العمل (يكون تردد العمل عند النقطة الترددية التي تحقق أعظم مجال طوري ممكن).

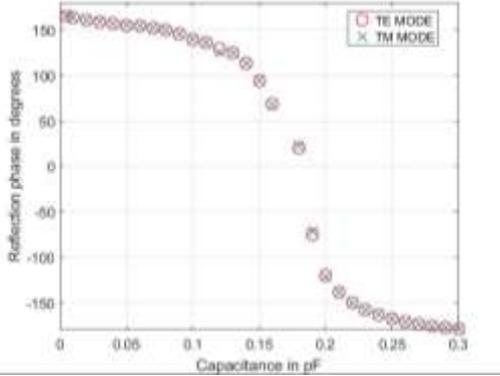
f_x

W عرض العنصرين الأفقي والعمودي.

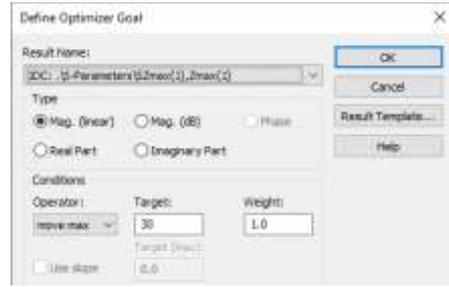
h ارتفاع الركيزة.

ϵ_r ثابت السماحية النسبية.

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين
البارودي السالم حسن
متغير السعة. يظهر توافق شبه تام لتغيرات الطور والمطال مع
تغير نمط الاستقطاب.

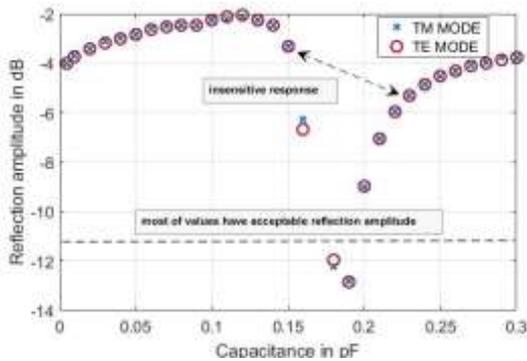


الشكل (14): استخدام أداة الأمثلة في تحقيق المواصفات المطلوبة للخلية الأساسية.

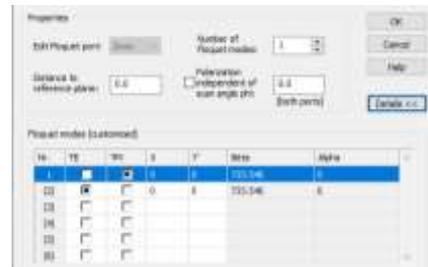


الشكل (15): استخدام أداة الأمثلة في تحقيق المواصفات المطلوبة للخلية الأساسية.

يتم ضبط إعدادات نمط توزع الحقل الكهرطيسي، من خلال نافذة Floquet boundaries، الموضحة في الشكل (15).



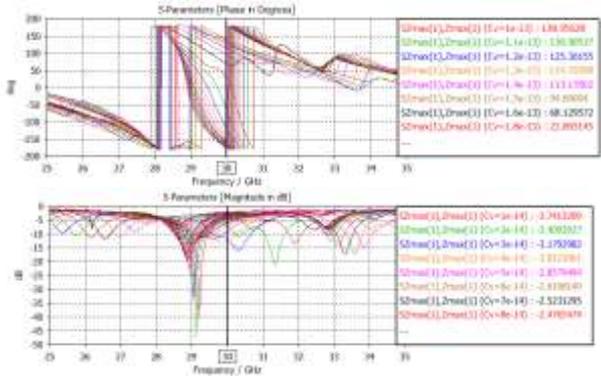
الشكل (16): مطال الانعكاس عند التردد 30 GHz.



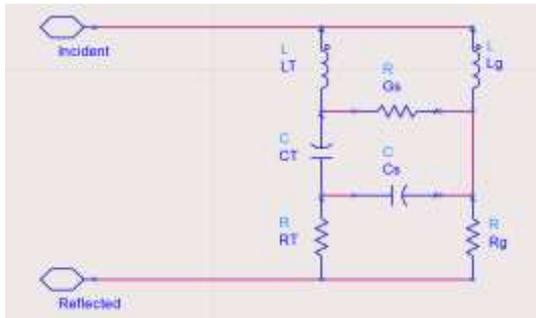
الشكل (17): ضبط نمط استقطاب الحقل الكهرطيسي في CST.

يبين الشكل (16) نتائج محاكاة مجموعة كبيرة من منحنيات معامل الانعكاس من أجل قيم مختلفة للسعة المضافة من قبل الثنائي متغير السعة كتابع للتردد.

إن معامل الانعكاس بشكل عام تابع لكل من تردد العمل ω_c ونمط الاستقطاب TE/TM وزاوية ورود θ والسعة C_p المضافة عبر الثنائيين متغيري السعة المتموضعين على العنصر الأفقي والعنصر العمودي للخلية. وفقاً للنتائج الموضحة في الشكلين (17) و (18) فإنه يمكن تحديد نمط الاستقطاب. يمكن مكافئة الخلية الأساسية للسطوح العاكسة المقترحة وفق الشكل (19).

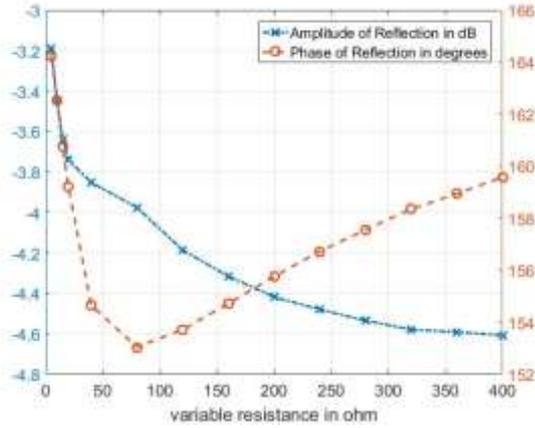


الشكل (18): نتائج محاكاة مجموعة كبيرة (لم يتم تضمين جميع النتائج هنا) من منحنيات طور الانعكاس (في الأعلى) ومطال الانعكاس (في الأسفل) من أجل قيم مختلفة للسعة المضافة من قبل الثنائي متغير السعة (بالفاراد) كتابع للتردد.



الشكل (19): الدارة المكافئة للخلية الأساسية.

يبين الشكلان (17) و (18) طور ومطال الانعكاس على التوالي عند التردد 30 GHz من أجل استقطاب أفقي واستقطاب عمودي للحقل الكهرطيسي كتابع لسعة الثنائي



الشكل (20): تأثير المقاومة المتغيرة على مطال وطور الانعكاس للخلية الأساسية.

يلاحظ أن طور الانعكاس لا يتأثر تقريباً، ويتغير ضمن مجال صغير، على عكس مطال الانعكاس الحساس بشكل واضح لقيمة المقاومة.

نظرياً، يمكن تغيير طور الانعكاس (إزاحة تردد الرنين) عبر توليف الحثية الكلية، وهو أمر صعب نسبياً ويزيد من معامل الجودة للدارة (يقلل ذلك من عرض المجال الترددي) وفق

العلاقة:

$$Q = \frac{2\pi fl}{R} \quad (13)$$

حيث:

Q معامل الجودة للملف (بدون واحدة).

f تردد العمل (Hz).

L حثية الملف الفعالة (H).

R مقاومة الملف (ohm).

بالنظر إلى المعادلة (13)، يتبين أنه مع زيادة تردد العمل، أو حثية الملف، فإن معامل الجودة يزداد وبالتالي ينخفض عرض المجال الترددي. يمكن ضبط طور الانعكاس عبر توليف السعوية الكلية التي تتضمن السعوية المتغيرة C_v . إن السعوية المكافئة تتناسب عكساً مع معامل الجودة، وفق العلاقة:

$$Q = \frac{1}{2\pi fCR} \quad (14)$$

حيث:

R_g الضياعات الحرارية نتيجة تأثير المستوى الأرضي.

L_g حثية المستوى الأرضي.

G_s ضياعات الركيزة العازلة.

C_s السعوية الناتجة ما بين المستوى الأرضي وعنصري

ثنائي القطب المتصالب.

R_T المقاومة الكلية للعناصر الناقلة في الخلية الأساسية مع

مقاومة الثنائي السعوي.

L_T الحثية الكلية المكافئة للمواد الناقلة في الخلية

الأساسية.

C_T السعوية الداخلية C_{in} للخلية مع السعوية المضافة من

قبل الثنائي السعوي C_v .

بإهمال ضياعات الركيزة G_s والسعوية الناتجة ما بين المستوى

الأرضي وعنصري ثنائي القطب المتصالب C_s ، يمكن كتابة

ممانعة الخلية الأساسية وفق العلاقة:

$$Z_i = \frac{(R_g + j\omega_c L_g)(R_T + j\omega_c L_T + \frac{1}{j\omega_c C_T})}{(R_g + j\omega_c L_g + R_T + j\omega_c L_T + \frac{1}{j\omega_c C_T})} \quad (11)$$

بتثبيت جميع المحددات باستثناء السعوية المقدمة من الثنائي

السعوي، نحصل على:

$$Z_i = kC_v \quad (12)$$

حيث:

C_v السعوية المقدمة من الثنائي السعوي.

k ثابت يتضمن المتوسطات الثابتة.

تم في التصميم مراعاة أن تقل المسافة بين الخلايا عن نصف

طول موجة العمل الفعالة بهدف الحد من الفصوص الإشعاعية

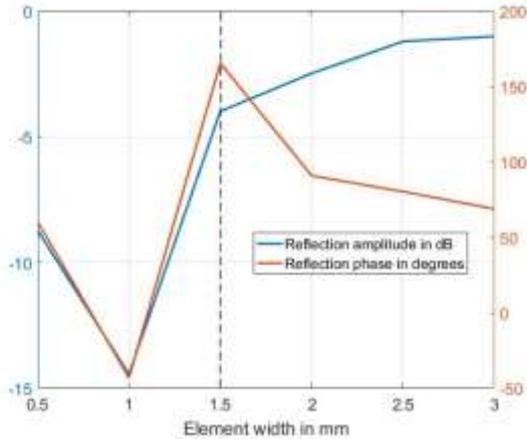
في الاتجاهات غير المرغوبة [21]. تؤثر ناقلية المواد

المستخدمة في تعديل مطال معامل الانعكاس بدون أي تأثير

على الطور تقريباً. يبين الشكل (20) تأثير إضافة مقاومة

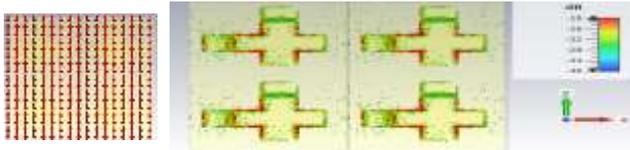
تسلسلية متغيرة في نفس موضع الثنائيين متغيري السعة على

مطال وطور الانعكاس.



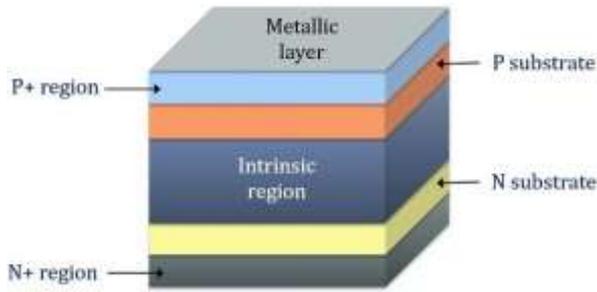
الشكل (21): مطال وطور الانعكاس كتابع لعرض العناصر.

يبين الشكل (22) توزع الحقل الكهربائي في النمطين TE و TM، والتيار السطحي في كل منهما.



الشكل (22): توزيع نمط الحقل الكهربائي والتيار السطحي

في عمليات التبديل switching. يوضح الشكل (23) بنية ثنائي PIN.



الشكل (23): بنية ثنائي PIN.

عندما يكون ثنائي PIN في حالة تحيز أمامي forward bias، يتم حقن الشحنات بانتظام في المنطقة الجوهرية بين منطقتي p و n. يسقط هذا الحقن المقاومة الأمامية للثنائي، وبالتالي يمكنه العمل كمقاومة متغيرة. عند تطبيق التحيز العكسي، يزداد عرض منطقة النضوب، وتزداد سماكة المنطقة الجوهرية حتى

حيث:

Q معامل الجودة للمكثف (بدون واحدة).

f تردد العمل (Hz).

C حثية المكثف الفعالة (F).

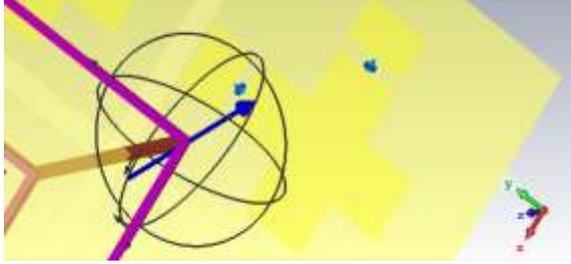
R مقاومة المكثف (ohm).

يجب انتقاء قيمة أمثلية للسعوية الداخلية C_{in} (تحدّد بشكل أساسي عبر تعديل عرض العناصر W أو المسافات بين الخلايا الأساسية) بهدف تحقيق أقصى مجال توليف للطور مع أعظم طور انعكاس من أجل قيم مختلفة لسعوية الثنائي متغير السعة C_p . يبين الشكل (21) تغيّرات معامل الانعكاس كتابع لعرض العناصر من أجل القيمة الصغرى لـ C_p . يتم تثبيت قيمة السعوية المتغيرة C_p واختيار أفضل نقطة عمل من أجل الطور ومطال معامل الانعكاس المطلوبين وهي عند 1.5 mm كما يبين الشكل (21).

الشكل (22): توزيع نمط الحقل الكهربائي والتيار السطحي عند التردد 30 GHz من أجل سعوية ثنائي متغير السعة تبلغ 0.3 pF. أعلى اليسار: توزيع الحقل الكهربائي في حالة النمط TE، أعلى اليمين: توزيع التيار السطحي في حالة النمط TE، أسفل اليسار: توزيع الحقل الكهربائي في حالة النمط TM، أسفل اليمين: توزيع التيار السطحي في حالة النمط TM. يقصد بالنمط TE، كما ذكر، أن الحقل الكهربائي مستقطب باتجاه المحور Y، ويدل اللون القاتم على كثافة توزيع التيار، وهو ما يوضحه الشكل (22).

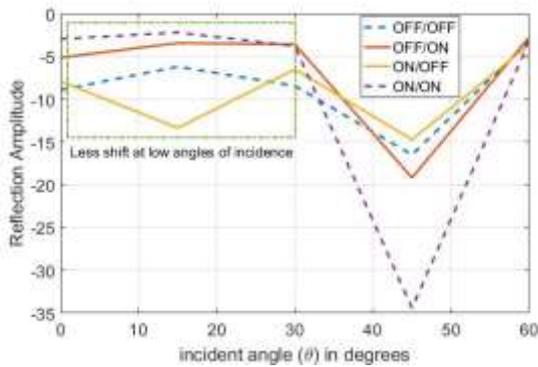
ب. توليف معامل الانعكاس باستخدام ثنائي PIN:

في ثنائي PIN، تتوفر مادة شبه موصلة نقية بين طبقتي p و n، تسمى بالطبقة الجوهرية intrinsic، وتعمل كعازل، لذلك لا يوجد تدفق للتيار من خلالها. لذا، فإن بنية PIN مفيدة جداً



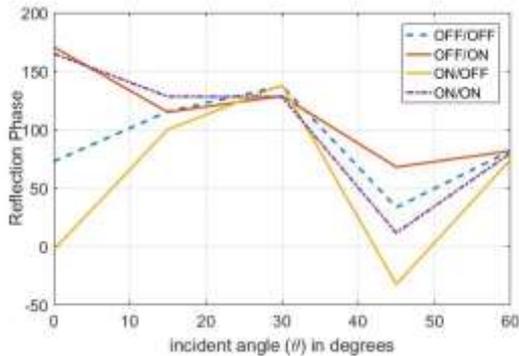
الشكل (25): تمثيل زاوية ورود θ في CST.

يبين الشكلان (26) و (27) تأثير زوايا ورود مختلفة على طور ومطال الانعكاس على الترتيب من أجل أربع حالات.



الشكل (26): تأثير زاوية ورود θ على مطال الانعكاس.

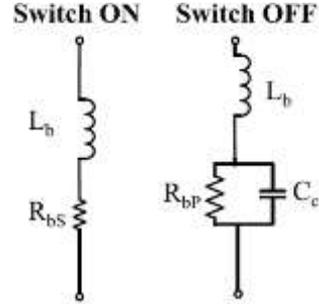
يلاحظ من النتائج في الشكل (26)، أن تغير مطال الانعكاس يكون أقل من أجل زوايا ورود المنخفضة، ويزداد مع زيادة زاوية ورود.



الشكل (27): تأثير زاوية ورود θ على طور الانعكاس.

يظهر في الشكل (27) بشكل واضح أن طور الانعكاس تابع لزاوية ورود. يبين الجدول (5) مقارنة نتائج الدراسات الحديثة السابقة حول السطوح العاكسة الذكية مع نتائج الدراسة الحالية، من حيث سنة البحث وملخص الدراسة وآلية التبديل وتطبيق الاتصالات المحتمل، والجديد الذي أضافته هذه

تبتعد عنها حوامل الشحنات بالكامل، ويعمل الثنائي في هذه الحالة كمكثف. إذاً، تكافئ الحالة الأولى حالة وصل ON، وتكافئ الحالة الثانية حالة قطع OFF. يبين الشكل (24) الدارة المكافئة لثنائي PIN.



الشكل (24): الدارة المكافئة لثنائي PIN.

تم في البحث، استبدال الثنائيين متغيري السعة في الخلية الأساسية بثنائي PIN، وتمت مكافئة الثنائي في حالة التحيز العكسي (حالة القطع) بمقاومة 2.1Ω ومكثف ذو سعة pF 0.17 متصلان على التفرع، وبمقاومة تسلسلية $3 K\Omega$ في حالة التحيز الأمامي (حالة الوصل). أظهرت النتائج المبينة في الجدول (4) توافقاً شبيه تام لتغيرات الطور التي لا تتجاوز حوالي 180° وفق الحالات الأربع للثنائيين مقابل تغير نمط الاستقطاب.

الجدول (4): تغيرات معامل الانعكاس وفقاً لحالات العمل.

(المطال بالدسيبل، والطور بالدرجات)

TE		TM		حالة الثنائيين
Amp.	Phase	Amp.	phase	
-3.02	166.2	-3.02	166.3	ON/ON
-5.89	-5.1	-7.9	-1.7	ON/OFF
-5.7	172.5	-5.13	170.8	OFF/ON
-8.07	77.5	-8.67	73	OFF/OFF

يظهر التوافق الكبير في النتائج بين نمطي الحقل الكهرطيسي TE و TM، الأمر الذي يؤكد إمكانية استخدام التصميم من أجل نمط استقطاب اختياري في حالة استخدام ثنائيات PIN. جرى في النتائج السابقة مناقشة تغير نمط الاستقطاب، أيضاً، فإن مطال وطور الانعكاس يتغيران تبعاً لزاوية ورود θ ، ونقصد بها الزاوية بين المحور Z، واتجاه انتشار الموجة المستوية في الوسط الآخر كما يبين الشكل (25).

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين البارودي السالم حسن
الدراسة. ويبين الجدول (6) مقارنة ما بين نتائج الدراسات سنة البحث وآلية التبديل وقيم ومجالات معامل الانعكاس
المتشابهة السابقة التي اهتمت بتعديل مطال وطور معامل (مطالاً وطوراً).
الانعكاس بشكل أساسي مع نتائج الدراسة الحالية من حيث

الجدول (5): مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع الدراسات حول السطوح العاكسة الذكية.

الدراسة	ملخص	آلية التبديل	التطبيق	دراسة أكثر من تقنية تبديل أو أكثر من نمط استقطاب
[10] 2022	اقتراح نموذج أولي يوفر إمكانية تغيير الطور للموجات الكهرومغناطيسية المنعكسة بطريقة مستمرة.	ثنائي متغير الجهد Varactor	تحسين اتصالات التبعثر المحيطي (AmBC).	-
[11] 2020	تصميم خلية أساسية unit cell مع تغيير طور عند 0° و 180° .	ثنائي PIN	تحسين السعة في اتصالات المركبات المتحركة.	-
[12] 2020	دراسة تغير الطور كتابع لزاوية ورود الموجة الكهرومغناطيسية على السطح العاكس.	ثنائي متغير الجهد Varactor	الحد من عكسية القناة في الاتصالات القائمة على نموذج الازدواج بتقسيم الزمن TDD.	-
[13] 2021	اقتراح نموذج خلية أساسية تعتمد على الجرافين بهدف تغيير طور الانعكاس للموجة الواردة.	الجهد الكيميائي Chemical Potential	تحسين أداء اتصالات التيراهيرتز.	-
[14] 2022	تصميم مصفوفة خلايا أساسية بهدف تغيير طور الانعكاس للموجات الكهرومغناطيسية الواردة.	ثنائي متغير الجهد Varactor	تحسين الاتصالات من أجل الأجهزة ضعيفة التغطية.	-
[15] 2022	تصميم سطح عاكس ذكي استناداً إلى خاصية الانتقال من المعدن إلى العازل لطبقة VO_2 .	طبقة VO_2	تحسين أداء المصفوفات العاكسة القابلة لإعادة التشكيل وفق مجال ترددي واسع.	-
البحث الحالي 2022	تصميم سطح عاكس ذكي غير حساس لنمط الاستقطاب بهدف تغيير طور الانعكاس على مجال واسع.	ثنائي متغير الجهد Varactor ثنائي PIN	تحسين اتصالات حزمة الأمواج الملمبترية لتطبيقات الجيل الخامس.	مقارنة اختلاف الأداء في حالة استخدام ثنائي متغير السعة Varactor وثنائي PIN، وتحليل نمطي استقطاب للحقل الكهرومغناطيسي TE, TM.

الجدول (6): مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع الدراسات التي تهتم بتعديل طور ومطال الانعكاس بشكل أساسي.

تصميم سطح عاكس ذكي مع التحكم بطور الانعكاس من أجل تحسين البارودي السالم حسن

أقصى انحراف في مطال الانعكاس بين TE/TM		أقصى انحراف في طور الانعكاس بين TE/TM		أدنى مطال انعكاس		أعظم مطال انعكاس		مجال طور الانعكاس		السنة	الدراسة
Varactor	PIN	Varactor	PIN	Varactor	PIN	Varactor	PIN	Varactor	PIN		
0.369	2	4.075°	3.88°	-12.8	-7.9	-2.1	-3	344°	177°	2022	الحالية
-	-	-	-	-20.5	-	-0.439	-	238°	-	2022	[10]
-	-	-	-	-	-2.5	-	-2	-	180°	2020	[11]

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

الخلاصة والأعمال المستقبلية:

يمكن. قدم البحث مقارنة بين تقنيات الاتصالات المعتمدة (هوائيات كثيفة، مرحلات، الخ) مع تقنية

السطوح العاكسة الذكية من حيث استهلاك الطاقة ومبدأ العمل ومستويات التداخل. تم تبيان التفوق الواضح للسطوح العاكسة

الذكية في معياري الفعالية الطاقية والكلفة العتادية بشكل واضح مع بقية التقنيات. قام البحث بالتحقيق في الخصائص التي يمكن أن تقدمها الخلايا الأساسية المشكّلة للمصفوفة الموسعة لهذه السطوح، وفق تحليل مفصل لكيفية تحقيق

تسعى نظم الاتصالات العصرية في إيجاد تقنيات جديدة لزيادة المعدل الأعظمي لتدفق البتات (السعة) التي تقدمها وصلات الاتصالات، بهدف دعم سرعات عالية من جهة، وتخدم عدد أكبر من المشتركين من جهة أخرى. مؤخراً، ظهرت السطوح العاكسة الذكية، أو ما يعرف بالسطوح العاكسة القابلة لإعادة التشكيل، كتقنية واعدة، تهدف في مبدأها إلى تخفيف استهلاك الطاقة الذي تعاني منه نظم الهوائيات الكثيفة القائمة في أجيال الاتصالات الحديثة، وتحقيق مسح إشعاعي في اتجاهات اختيارية، مع أقل تعقيد

وظيفة الانعكاس عبر عنصر الخلية الأساسية، وذلك من وجهة نظرية خطوط النقل، مع تبيان تحليلي لخصائص معامل الانعكاس ونسبة أمواج الجهد المستقرة المطلوبين نظرياً. تم كذلك، تقديم مخطط تدفقي وفق خوارزمية واضحة لتصميم نموذج الخلية الأساسية المقترح، مع توضيح خطوات النمذجة والأمثلة باستخدام برمجة CST، بهدف الحصول على المجال الطوري والمطال المطلوبين. تم اختبار إعادة تشكيل معامل انعكاس الخلية الأساسية في حالتها استخدام الثنائي متغير السعة varactor وثنائي pin، تم تحقيق مجال طوري واسع في كلتا الحالتين. أظهرت النتائج في حالة استخدام ثنائي varactor تحقيق مجال طوري يبلغ حوالي 344° ، مع مطال انعكاس مقبول، وفي حالة ثنائي PIN، تم تحقيق 4 قيم مختلفة لطور الانعكاس. من أجل محاكاة بيئة انتشار عملية، ذات استقطاب حقل كهربي اختياري، فإنه تمت دراسة استجابة الخلية الأساسية تجاه نمطي استقطاب TE و TM. أظهرت النتائج توافقاً تاماً تقريباً بين الحالتين، ولأن الموجة الكهربية، قد ترد بزوايا مائلة، إذاً، يجب محاكاة الخلية الأساسية تحت ظروف الورد المائل. تم البرهان على أن مطال الانعكاس لا يتغير بشكل كبير من أجل زوايا الورد المنخفضة، وأن طور الانعكاس تابع بشكل أساسي لزوايا الورد.

يمكن في الدراسات اللاحقة، محاكاة تأثير الركيزة وطرائق إعادة التشكيل الأخرى على مستويات معامل الانعكاس، أيضاً يجب التحقيق في تبعية طور معامل الانعكاس على زاوية الورد بهدف تحقيق وظائف اتصالات مختلفة.

References:

- [1] Di Renzo, M., Ntontin, K., Song, J., Danufane, F. H., Qian, X., Lazarakis, F., ... & Shamai, S. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 798-807.
- [2] Chen, Z., Ma, X., Han, C., & Wen, Q. (2021). Towards intelligent reflecting surface empowered 6G terahertz communications: A survey. *China Communications*, 18(5), 93-119.
- [3] Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M. S., Yuen, C., De Rosny, J., & Tretyakov, S. (2020). Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead. *IEEE journal on selected areas in communications*, 38(11), 2450-2525.
- [4] Cui, M., Zhang, G., & Zhang, R. (2019). Secure wireless communication via intelligent reflecting surface. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(5), 1410-1414.
- [5] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. S., & Zhang, R. (2019). Wireless communications through reconfigurable

- [14] Araghi, A., Khalily, M., Safaei, M., Bagheri, A., Singh, V., Wang, F., & Tafazolli, R. (2022). Reconfigurable intelligent surface (ris) in the sub-6 ghz band: Design, implementation, and real-world demonstration. *IEEE Access*, 10, 2646-2655.
- [15] Matos, R., & Pala, N. (2022). VO2-based ultra-reconfigurable intelligent reflective surface for 5G applications. *Scientific Reports*, 12(1), 1-9.
- [16] Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., M. Abdulkhaleq, A., & A. Abd-Alhameed, R. (2020). Reconfigurable antennas: Switching techniques— A survey. *Electronics*, 9(2), 336.
- [17] Wang, F., Li, K., Ren, Y., & Zhang, Y. (2019). A novel reconfigurable FSS applied to the antenna radar cross section reduction. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(7), e21729.
- [18] de Oliveira, M. R., de Melo, M. T., Llamas-Garro, I., & G. Neto, A. (2018). Reconfigurable cross dipole: hash frequency selective surface. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(2), 224-229.
- [19] Hakim, M. L., Alam, T., Soliman, M. S., Sahar, N. M., Baharuddin, M. H., Almalki, S. H., & Islam, M. T. (2022). Polarization insensitive symmetrical structured double negative (DNG) metamaterial absorber for Ku-band sensing applications. *Scientific reports*, 12(1), 1-18.
- [20] Farooq, U., Iftikhar, A., Shafique, M. F., Khan, M. S., Fida, A., Mughal, M. J., & Anagnostou, D. E. (2021). C-band and X-band switchable frequency-selective surface. *Electronics*, 10(4), 476.
- [21] Anwar, R. S., Mao, L., & Ning, H. (2018). Frequency selective surfaces: a review. *Applied Sciences*, 8(9), 1689.
- [6] Tan, X., Sun, Z., Jornet, J. M., & Pados, D. (2016, May). Increasing indoor spectrum sharing capacity using smart reflect-array. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Liu, Y., Liu, X., Mu, X., Hou, T., Xu, J., Di Renzo, M., & Al-Dhahir, N. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE communications surveys & tutorials*, 23(3), 1546-1577.
- [8] Pérez-Adán, D., Fresnedo, Ó., González-Coma, J. P., & Castedo, L. (2021). Intelligent Reflective Surfaces for Wireless Networks: An Overview of Applications, Approached Issues, and Open Problems. *Electronics*, 10(19), 2345.
- [9] Long, W., Chen, R., Moretti, M., Zhang, W., & Li, J. (2021). A promising technology for 6G wireless networks: Intelligent reflecting surface. *Journal of Communications and Information Networks*, 6(1), 1-16.
- [10] Fara, R., Ratajczak, P., Phan-Huy, D. T., Ourir, A., Di Renzo, M., & De Rosny, J. (2022). A prototype of reconfigurable intelligent surface with continuous control of the reflection phase. *IEEE Wireless Communications*, 29(1), 70-77.
- [11] Ojaroudi, M., Vegni, A., & Loscri, V. (2020). Design and analysis of a reconfigurable intelligent meta-surface for vehicular networks. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*.
- [12] Chen, W., Bai, L., Tang, W., Jin, S., Jiang, W. X., & Cui, T. J. (2020). Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold?. *IEEE Communications Letters*, 24(9), 2060-2064.
- [13] Ojaroudi, M., & Loscri, V. (2021, March). Graphene-based reconfigurable intelligent meta-surface structure for THz communications. In *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.