

A New Metamaterial structure design using a fractal distribution of Split Ring Resonator (SRR)

Dr .Alsamawal Saleh*
Dr .Faek Arraj**
Samer Alsheikh Hasan***

(Received 12 / 7 / 2017. Accepted 7 / 11 / 2017)

□ ABSTRACT □

A growing interest in the research results concerning the interaction of electromagnetic waves with fabricated structures that give negative electric permittivity (ϵ) and magnetic permeability (μ) has been observed in the past few years. i.e. they acquire their electromagnetic properties through their structures not by their components expressing electromagnetic properties that do not occur in nature materials, these structures called negative permittivity and permeability materials or Meta-materials (MMs). Because of non-traditional properties of these materials, they can dramatically add a degree of freedom to the control of electromagnetic waves and have been used in many applications in the field of optical and microwaves.

this work explain the most important properties of Metamaterials. On the other hand, it uses fractal distribution in designing a new Metamaterial structure will be applying on whole substrate not only on unitcell and studying their effect on transmission and reflection parameters, and make sure the results by effective material properties extraction.

Key words: Meta-materials ,Cantorbar, unitcell, Split Ring Resonator(SRR)

* Assistant Professor ,Department of Communications Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University ,Lattakia, Syria

**Assistant Professor ,Department of Communications Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Aleppo University , Syria.

***Master Student ,Department of Communications Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University ,Lattakia ,Syria

تصميم بنية جديدة لمادة سالبة السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية Meta-Material باستخدام التوزع التجزيئي لرنانات الحلقة المشطورة

* د. السموعل صالح

** د. فائق عراج

*** سامر الشيخ حسن

(تاريخ الإيداع 2017 / 7 / 12. قُبل للنشر في 2017 / 11 / 7)

□ ملخص □

برز في السنوات الأخيرة اهتمام متزايد بنتائج الأبحاث المتعلقة بتفاعل الأمواج الكهرومغناطيسية مع تراكيب مصنعة تعطي سماحية كهربائية (ϵ) ونفاذية مغناطيسية (μ) سالبين، أي أنها تكتسب خصائصها الكهرومغناطيسية من خلال تركيبها وليس من خلال المواد المكونة لها مبدية خصائص كهرومغناطيسية لا تعطىها المواد الموجودة في الطبيعة وتدعى هذه التراكيب بالمواد سالبة السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية (MMs) Meta-Materials. وبسبب الخصائص غير التقليدية لهذه المواد، فقد قدمت درجة كبيرة من الحرية في التحكم بالأمواج الكهرومغناطيسية وتم استخدامها في العديد من التطبيقات في مجال الامواج المكروية والضوئية.

يلقي هذا العمل الضوء على مواد MMs ويشرح أهم خصائصها، ومن جهة أخرى يستخدم التوزع التجزيئي في تصميم بنية جديدة لمواد Metamaterial سوف يتم تطبيقه على الشريحة ككل وليس على الوحدة الأساس فقط ودراسة تأثير هذا التوزع على معاملات الارسال والانعكاس، و التأكد من النتائج باستخراج خصائص المادة الفعالة.

الكلمات المفتاحية: المواد سالبة السماحية الكهربائية والنفوذية المغناطيسية ، شريط كانتور ، الوحدة الأساس ،

رنانة الحلقة المشطورة

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

مقدمة:

يعتبر النقل، الانعكاس، الانكسار، الانحراف والتشتت من بين العديد من الآثار الناتجة عن التفاعل بين الأمواج الكهرومغناطيسية والجسم أو المادة، وهذا التفاعل الكهرومغناطيسي يتحدد ببعض خصائص الأمواج الكهرومغناطيسية وكذلك بمعاملات المادة الكهرومغناطيسية المسماة السماحية الكهربائية (ϵ) والنفاذية المغناطيسية (μ). تملك المواد العادية عادة قيم موجبة ل (ϵ و μ)، ومع ذلك فإن الاستجابة الكهرومغناطيسية للمواد الطبيعية يمكن أن تمتد قسرا إلى قيم لا تتوفر بسهولة وذلك من خلال تصميم مواد صناعية تعطي سماحية كهربائية ونفاذية مغناطيسية سالبان في ان واحد هذه المواد تسمى بالـ (MM) Metamaterial. يتكون هذا الاسم من شقين الأول Meta وهي كلمة لاتينية الأصل وتعني مابعد أو مافوق والشق الثاني هو كلمة Material وتعني مادة بالنتيجة يصبح معنى الكلمة هو ما فوق أو ما بعد المادة [1].

السبب وراء الاهتمام بـ (MM) Metamaterial هو في إمكانية تحديد البارامترات الكهرومغناطيسية لأن تمتلك القيمة المرغوبة ضمن الحدود النظرية بما في ذلك القيمة السالبة منها. تصنع عادة كصفوف دورية من العناصر المعدنية المضمنة في طبقات أساس عازلة، ويمكن أن تستخدم تشكيلة كبيرة من العناصر مثل الأسلاك، الرقع، الحلقات وغيرها وبأشكال مختلفة [2].

حاليا أصبحت وحدات الأساس والتراكيب في مواد MMs قابلة للضبط صناعيا في الشكل والحجم والمواقع وذلك من أجل تحقيق الوظيفة المطلوبة، وبالتالي تكمن أهمية هذه المواد في قدرتها على هندسة الخصائص الضوئية والكهرومغناطيسية للمواد حسب المطلوب وذلك لمجموعة واسعة من التطبيقات في مجال الاتصالات المبرورة والضوئية، وبالتالي يمكن تخفيض حجم ووزن المكونات والأجهزة وتحسين أدائها بشكل كبير.

أهمية البحث وأهدافه

تقدم الـ MMs مجموعة واسعة من ترددات العمل انطلاقا من الترددات الراديوية وصولا حتى الترددات الضوئية. وحاليا فإن العديد من الباحثين في جميع أنحاء العالم يدرسون أشكال مختلفة من الـ MM، وتم اقتراح العديد من الأفكار والمقترحات للتطبيقات المستقبلية لهذه المواد. ومن هذه الأفكار التي برزت في السنوات الأخيرة هو استخدام الهندسة التجزئية في تصميم هذه المواد. وقد تم نشر العديد من المقالات التي تستخدم أحد الأشكال التجزئية في تصميم بنية MM يتم تطبيقها على الوحدة الأساس unitcell فقط.

بالتالي الهدف من هذا البحث هو تصميم بنية MM جديدة بحيث تتوضع الوحدة الأساس على شكل توزع تجزئي (شريط كانتور) على كامل الشريحة المصممة ودراسة تأثير ذلك على معامل الانعكاس للشريحة المقترحة وذلك باستخدام برنامج المحاكاة (High Frequency Structural Simulator) HFSS والتأكد من النتائج التي نحصل عليها من خلال استخراج معاملات المادة الفعالة باستخدام برنامج الماتلاب.

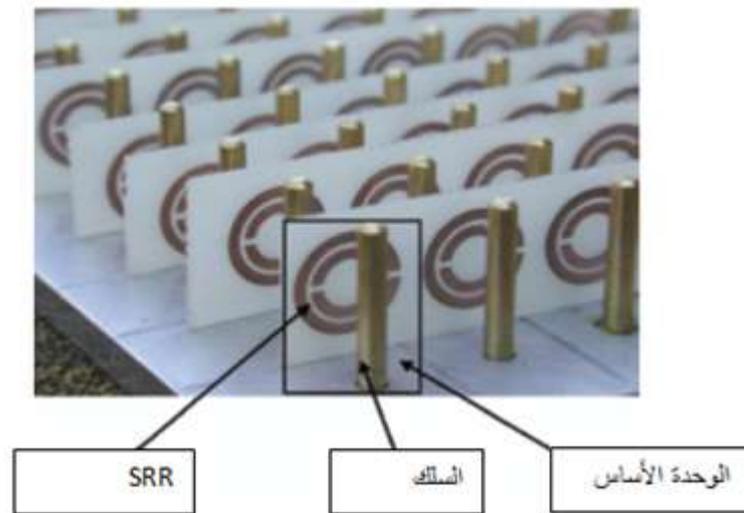
طرائق البحث ومواده:

1 المبادئ الأساسية للـ Metamaterial

تعتبر الـ MMS تراكيب كهرومغناطيسية صناعية متجانسة مع خصائص غير عادية ليست متاحة بسهولة في الطبيعة. تتميز هذه التراكيب بحجم الوحدة الأساس، والذي هو أصغر بكثير من طول الموجة المنتشرة λ_m . اذا تمت مراعاة هذا الشرط فإن الموجة الكهرومغناطيسية المنتشرة لا تميز تفاصيل التركيب عند حزمة ما وتستجيب للمعاملات الأساسية الفعالة (السماحية الكهربائية الفعالة ϵ_{eff} والنفاذية المغناطيسية الفعالة μ_{eff}) اللتان تعتمدان على طبيعة الوحدة الأساس وترتبطان بدليل الانكسار بالعلاقة [2]:

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_{eff} \mu_{eff}} \quad (1-3)$$

تمت الدراسة النظرية لمواد الـ MMS منذ العام 1968 من قبل العالم الروسي Veselago، الذي قام بدراسة رياضية لانتشار الأمواج الكهرومغناطيسية في الوسط مع قيم أنية سالبة لثابت العازلية ϵ والنفاذية μ ، ولكن لم تكن هناك تأكيدات تجريبية. في العام 1996 بين العالم pendry أن صف دوري من الأسلاك النحاسية مع أنصاف أقطار ومباعدات محددة سوف ينتج استجابة كهرومغناطيسية ذات سماحية ϵ سالبة. وبعد ثلاث سنوات وجد أن صف دوري من رنانات الحلقة المشطورة (Split Ring Resonator) SRR سيكون له مجال ترددي تكون فيه النفاذية μ سالبة. وفي العام 2001 بين العالم Smith أنه إذا تم دمج هاتين المادتين الصناعيتين المقترحتين من قبل Pendry بطريقة ما فإن المركب سيكون مادة بسماحية ونفاذية سالبان معاً، لذلك بدؤوا ببناء مثل هذه المواد الصناعية المركبة ولاحظوا خصائصها المادية. وكانت الـ Metamaterial الأولى التي تم تصنيعها على شكل صف ثنائي البعد من وحدات أساس (unit cell) مكررة من الأسلاك النحاسية و SRR، كما هو موضح في الشكل (1)، حيث صف SRR يسهم في النفاذية السالبة وصف الأسلاك النحاسية يسهم في السماحية السالبة [2] [3].

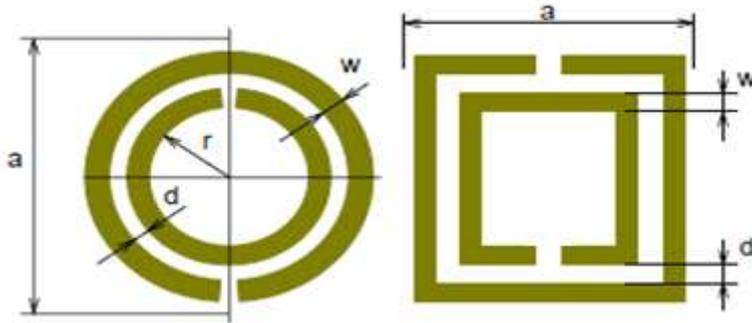


الشكل (1) الـ Metamaterial الأولى المقدمه من قبل Smith

كما ذكرنا سابقا فقد بين العالم Pendry أن تركيب رنانة حلقة مشطورة SRR بأبعاد أصغر بكثير من طول الموجة (بما يسمح باعتبارها كوسط فعال) يمكن أن تستجيب للإشعاع المكروي باستقطاب ما و يمكن أن تنتج μ سالبة في مجال ترددي معين كما لو أنها تملك نفاذية مغناطيسية فعالة تعطى بالعلاقة [4]:

$$\mu_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + j \frac{2a\sigma}{\omega r \mu_0} - \frac{3ac_0^2}{\pi \ln(2w/d)r^3}} \quad (2-3)$$

حيث c_0 : سرعة الضوء في الخلاء ، σ : هي مقاومة الحلقات ، μ_0 : النفاذية في الفراغ.
 a ، r ، w و d : الأبعاد الفيزيائية للوحدة الأساس كما في الشكل (2).
 و SRR النموذجية التي أوجدها Pendry مؤلفة من حلقتين متحدتي المركز، كل منها يقطعها انشطار صغير،
 ومن ثم ظهرت عدة أشكال منها المربعة، ورغم ذلك فإن تقريبات الحلقة الدائرية نفسها يمكن استخدامها للمربعة.
 والشكل (2) يوضح SRR النموذجية الدائرية والمربعة منها.



الشكل (2): SRR النموذجية الدائرية والمربعة

إذا يكون هناك مجال ترددي ضيق تكون فيه النفاذية سالبة بين تردد البلازما وتردد الرنين المغناطيسي الذي يعطى بالعلاقة :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3ac_0^2}{\pi \ln(2w/d)r^3}} \quad (3-3)$$

ومن جهة أخرى إن الاستجابة الكهرومغناطيسية للمعادن تقع في الجزء المرئي وبالقرب من الأشعة فوق البنفسجية للطيف بتابع عازلية من الشكل (حسب قانون لورنز - درود) [4][5] :

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{w_p^2}{w(w - j\gamma_c)} \quad (4-3)$$

وقد بين Pendry أنه من أجل مادة صناعية مؤلفة من اسلاك رقيقة جدا تم تجميعها في شبكة دورية فإن الكتلة الفعالة للالكترونات المقتصرة على الأسلاك يمكن تعزيزها بعدة مراتب من المغناطيسية لتقليل تردد البلازما من المجال المرئي والأشعة فوق المكونية الى مجال الأمواج المكونية.

حيث تردد البلازما w_p يعتمد على كثافة وشحنة الالكترون ويعطى بالعلاقة :

$$w_p^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (5-3)$$

ويعطى معامل التخميد γ_c بالعلاقة :

$$\gamma_c = \frac{\epsilon_0 a^2 w_p^2}{\pi r^2 k} \quad (6-3)$$

حيث : n_e : كثافة الإلكترونات ، e : شحنة الإلكترون ، m_e : كتلة الإلكترون ، ϵ_0 : ثابت العازلية في الفراغ ، c_0 : سرعة الضوء في الخلاء ، a : الفاصل بين الأسلاك ، r : نصف قطر السلك ، k : العدد الموجي .

كما يتبين من المعادلة (3-5) و المعادلة (3-6) فإن السماحية الكهربائية الفعالة ϵ_{eff} تعتمد على البارامترات الهندسية للنظام (ثابت الشبكة a و نصف قطر السلك r).

النتائج التي بينها Pendry فيما يتعلق بـ μ_{eff} السالبة من شبكة من SRRs و ϵ_{eff} السالبة من شبكة من الأسلاك تم جمعها معا من قبل Smith، وللمرة الأولى تم اقتراح بنية صناعية تتميز بخصائص وسط سالب السماحية والنفاذية الميمنة في الشكل (1).

2 خصائص الـ Metamaterial

انطلاقاً من كون السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية سالبان في مواد الـ Metamaterial لذلك تسمى بالمواد التي تخضع لقاعدة اليد اليسرى LHM (Left Handed Material) وذلك لأن أشعة الحقل الكهربائي والمغناطيسي والطور تشكل ثلاثية يد يسرى على عكس المواد الطبيعية التي فيه الثلاثية السابقة تشكل ثلاثية يد يمنى وتسمى بالمواد التي تخضع لقاعدة اليد اليمنى RHM (Right Handed Material) [6][8] .

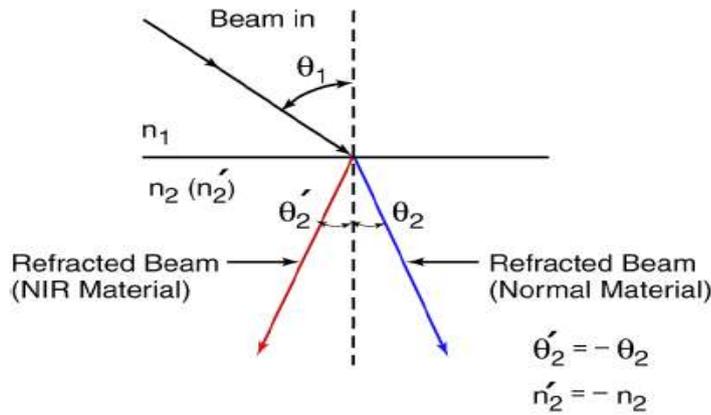
وبالتالي هذا يشير الى أن شعاع الطور K وسرعة المجموعة أو شعاع التأشير S هي في اتجاه معاكس من أجل مواد MM، وبالتالي الأمواج تنتشر بالاتجاه العكسي لذا تسمى أوساط الموجة الراجعة أو العكسية BWM (Back Ward Media) وتسمى أيضا بالمواد ثنائية السلبية (DNG) (Double Negative Materials) .

وكما ذكرنا سابقاً تتحدد استجابة المادة للأمواج الكهرومغناطيسية بمعاملين أساسيين هما السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية، وباعتبارهما في مواد الـ MM سالبان بالنتيجة فهي تملك دليل انكسار سالب لذا تسمى NIR (Negative Index Refraction) وقد أدى هذا الى العديد من الظواهر الكهرومغناطيسية والضوئية المترافقة مع دليل الانكسار السالب.

المثال الأبسط على الفرق بين المواد التقليدية و LHM هو في تأثير هذه المواد على ظاهرة الانكسار. ففي المواد التقليدية (RHM) تنكسر الموجة الكهرومغناطيسية بالاتجاه الطبيعي عندما تنتقل الموجة من الفراغ الى وسط ذو دليل انكسار موجب. بينما في LHM تنكسر الموجة الى الجهة الأخرى بعيداً عن الوضع الطبيعي كما هو موضح في الشكل (3). وكما هو معلوم زاوية الانكسار يتم تحديدها من خلال قانون Snell كما يلي :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (7-3)$$

حيث : θ_1 و θ_2 زاويتي الورود والانكسار للموجة على التوالي. من أجل مواد LHM فإن قانون Snell لا يزال صحيح، طالما أن $n_2' < 0$ و $\theta_2' < 0$ فان الناتج $n_2' \sin \theta_2'$ موجب، لكن اتجاه الحزمة المنكسرة يكون الى اليسار باعتبار $\theta_2' < 0$ كما هو مبين في الشكل (3):



الشكل (3): ظاهرة الانكسار في مواد (NIR Material) LHM و (Normal Material) RHM من الخصائص الغريبة الأخرى لمواد MM هي تأثير دوبلر العكسي (Doppler) و تأثير كرينكوف (Cherenkov) العكسي أيضا.

3- تطبيقات الـ Metamaterial

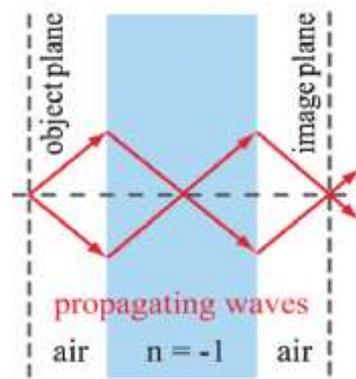
أظهرت الخصائص الكهرومغناطيسية غير التقليدية لمواد الـ MMS اعتماد العديد من الأجهزة والنظم والتطبيقات على مثل هذه المواد، وذلك انطلاقاً من امتداد تردد العمل لهذه المواد من مجال الأمواج المكروية وصولاً حتى الترددات المرئية وازدياد المعرفة بالسلوك الكهرومغناطيسي لمثل هذه المواد. وسنستعرض في هذه الفقرة أهم هذه التطبيقات [6][7]:

3-3-1 في مجال الهوائيات :

هوائيات الـ MMS هي صنف من الهوائيات التي تستخدم هذه المواد لتعزيز أو زيادة أداء النظام. حيث تستخدم لتقليل الضياعات وبالتالي زيادة ربح الهوائي. ويمكن استخدامها في هوائيات الرقعة فتسهم في زيادة الفعالية إضافة إلى زيادة مجال مسح الاشعاع من خلال استخدام الأمواج الأمامية والخلفية.

3-3-2 العدسات الفائقة (المثالية) :

العدسات المثالية هي واحدة من أهم التطبيقات للمواد سالبة دليل الانكسار. وهي العدسات التي تستخدم مواد الـ Metamaterial للتغلب على حد الانحراف. مصطلح العدسات المثالية تم اطلاقه من قبل العالم Pendry نظراً لقدرة مثل هذه العدسات على إعادة بناء صورة مثالية عن طريق استعادة المكونات الضائعة للأمواج الكهرومغناطيسية. فقد بين Pendry أن المواد سالبة دليل الانكسار تسمح للعدسات المسطحة بتغطية الأنماط المتلاشية في الصورة مما يعطي دقة أفضل للصورة. والشكل (4) يوضح مثل هذه العدسات.



الشكل (4): تركيز كامل الاشعاع الضوئي في العدسات المصنوعة من لوح LHM

3-3-3 أجهزة الاخفاء (التعمية) clocking devices :

تعتبر الـ MM هي الأساس في بناء أجهزة إخفاء عملية. الاخفاء يمكن أن يتحقق عن طريق إلغاء الحقل الكهربائي والمغناطيسي المولدة بواسطة العنصر أو من خلال توجيه الموجة الكهرومغناطيسية حول العنصر. إضافة الى استخدام الـ Metamaterial في تصميم مرشحات فعالة وكمعوذات طورية وفي مجال الحساسات وكثير من التطبيقات الأخرى.

4-3 الهندسة التجزئية

برزت الهندسة التجزئية كأحد أبرز فروع الرياضيات التطبيقية الحديثة نتيجة لقصور الهندسة الإقليدية عن توصيف الكثير من الظواهر الطبيعية والعلمية فهي تستخدم لوصف أشكال في الطبيعة لا يمكن وصفها باستخدام الهندسة الإقليدية، و يعود أصل الكلمة لعام 1975 حيث صاغها العالم ماندلبورت من اللغة اللاتينية (fractus) والتي تعني كسر أو جزء. ويعرف الجسم التجزئي بأنه جسم غير منتظم، أو هو شكل هندسي غير نظامي غير قابل للوصف أو القياس باستخدام الهندسة الإقليدية، ويتصف بأنه يمتلك خاصية التشابه الذاتي الداخلي ويتولد بالتجزئي، أي بتجزئة الشكل الأساسي إلى أصغر فأصغر وبشكل مشابه للجسم الأساسي ومن أهم الأمثلة عن التراكيب التجزئية (منحنى فان كوخ-سجادة سربينسكي- شريط كانتور) [9].

1-4-3 معاملات الجسم التجزئي

يوصف الجسم التجزئي عن طريق مجموعة من المعاملات [10] :

1_ البعد التجزئي (fractal dimension D): هو معامل أساسي للجسم التجزئي ونعبر عنه بالقانون:

$$D = \ln(N)/\ln(1/\rho) \quad (8-3)$$

حيث أن N يمثل عدد القطع الموجودة في الجسم التجزئي و ρ يمثل درجة التقسيم لهذا الجسم.

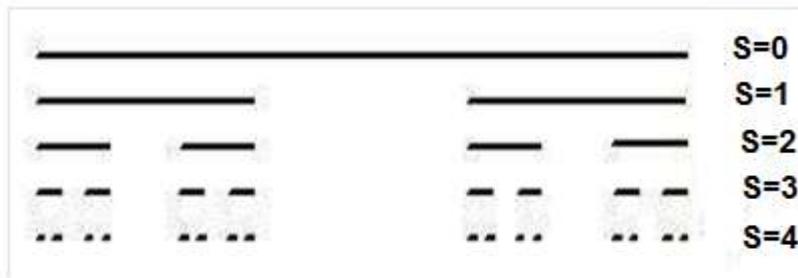
2_ مرحلة أو درجة التجزئي (Stag of growth S): تتم العملية التكرارية المستخدمة في الحصول على

الجسم التجزئي على عدة مراحل، كل مرحلة تدعى درجة تجزئي. تبدأ هذه العملية بالمرحلة S=0 والتي تعبر عن الجسم الأساسي ثم S=1 التي تعبر عن مولد الجسم التجزئي، وتستمر العملية إلى اللانهاية حتى تصغر قطع المادة وتتعدم ضمن الجسم.

3_ معامل تغير أبعاد الفجوات أو الفراغات (Lacunarity): يعبر عن توزع الفراغات أو الفجوات في الجسم التجزيئي، وهذا المعامل يعبر عن كثافة توزع المادة في الجسم التجزيئي الذي يكون بأشكال مختلفة ولها نفس البعد التجزيئي D ونفس درجة التجزيء ولكنها تختلف عن بعضها البعض بتوزع المادة ضمن الشكل التجزيئي للجسم.

3-4-2 شريط كانتور cantor bar

سوف نستخدم في هذا البحث شريط كانتور (cantor bar) والذي يمكن وصفه بأنه قطعة مستقيمة طولها (L) ذات دليل انكسار (n) متوضعة في الفراغ الحر ذو قرينة الانكسار (n_0) . يتم تقسيم القطعة إلى (X) قطع متساوية بمعامل تقسيم $(\rho = 1/X)$ ثم ننزع (Y) قطعة من الشكل بحيث $(Y < X)$ لنحصل على قطع عددها $(X-Y)$ تشبه الجسم الأصلي، ولكن أقل طول بمقدار نسبة معامل التقسيم (ρ) . هذه المرحلة ندعوها درجة التجزيء الأولى (S_1) ، وتسمى بالجسم المولد للتركيب. في مرحلة التجزيء الثانية نقوم بنفس العملية السابقة فنحصل على (X^2) قطعة مشابهة للجسم الأصلي، ولكن مصغرة بمقدار (ρ^2) . وهكذا بالنسبة إلى المرحلة الثالثة للتجزيء نحصل على (X^3) قطع مصغرة بمقدار (ρ^3) ، وتستمر هذه العملية حتى نصل إلى درجة تجزيء عالية جداً عندها تنتهي المادة، أو تصبح قليلة جداً ونحصل عندها على ما يسمى الغبار الكانتوري. والشكل (5) يوضح هذا التوزع [11].



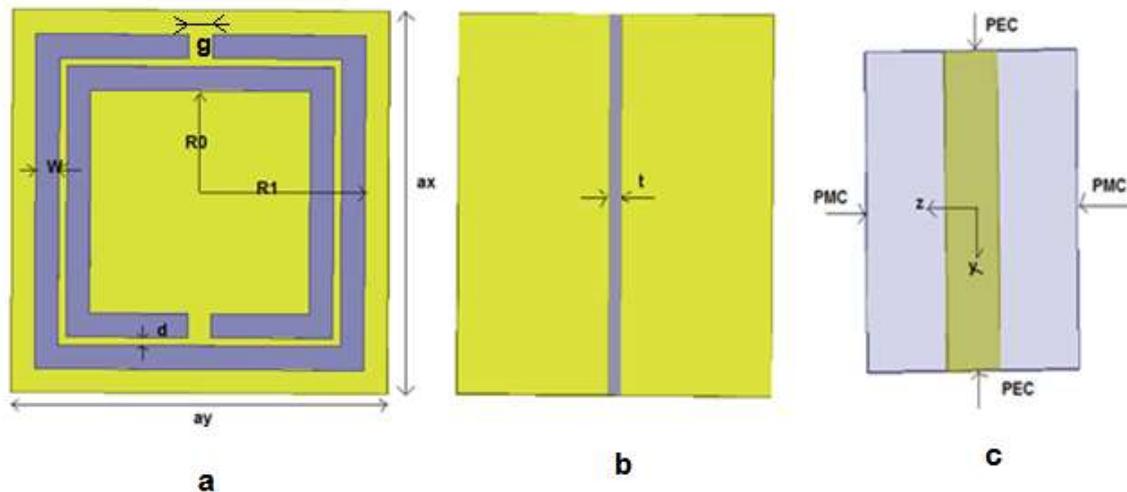
الشكل (5) : شريط كانتور (cantor bar)

النتائج والمناقشة

بداية سوف نقوم بدراسة معاملات الارسال والانعكاس من أجل الوحدة الأساس unitcell الافتراضية التي تم استخدامها في هذا البحث، وتحليل النتائج باستخدام برنامج المحاكاة HFSS والتأكد من النتائج من خلال استخراج بارامترات المادة الفعالة باستخدام الـ MATLAB. ثم سنقوم بوضع نموذج للبنية التصميمية المقترحة باستخدام التوزع التجزيئي المختار (شريط كانتور) ودراسة نتائج معامل الانعكاس لهذه البنية المقترحة وأيضاً التأكد من النتائج باستخدام بارامترات المادة الفعالة.

1 دراسة الوحدة الأساس لبنية الـ Metamaterial

كما ذكرنا سابقاً فإن الوحدة الأساس لبنية MM هي عبارة عن تركيب مشترك لرنانات الحلقة المشطورة والأسلاك المعدنية. شكل وأبعاد الوحدة الأساس المستخدمة في دراستنا مبينة في الشكل (6):



الشكل (6) : الوجه الأمامي (a) والخلفي (b) والشروط الحدية (c) للوحدة الأساس

نستخدم في هذا البحث رنانة حلقة مشطورة SRR مربعة و أسلاك معدنية بالأبعاد التالية :

– نصف قطر الحلقة الداخلية ($R0=0.7\text{mm}$) – نصف قطر الحلقة الخارجية ($R1=1.05\text{mm}$) –

عرض كل حلقة ($w=0.15\text{mm}$) – الفاصل بين الحلقتين ($d=0.05\text{mm}$) –

عرض الانقسام ($g=0.1\text{mm}$) – سماكة الشريط المعدني ($t=0.075\text{mm}$) –

سماكة الطبقة العازلة (0.5mm) لمادة ذات ثابت عازلية (2.33).

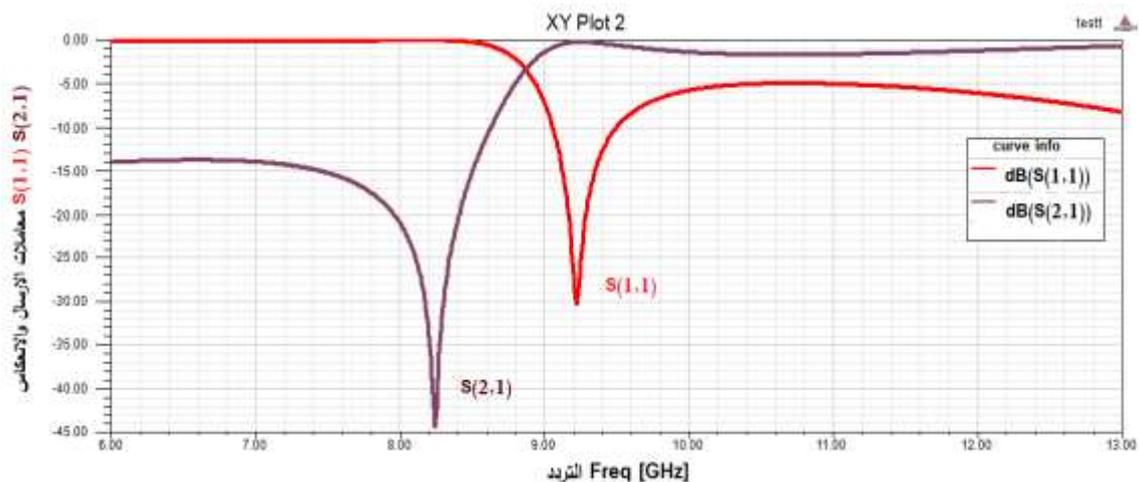
$ax=ay=2.4\text{mm}$ – $az=2\text{mm}$

استخدمنا في دراستنا برنامج المحاكاة HFSS إضافة إلى استخدام شروط حدية للسطوح كموصلات كهربائية

مثالية (PEC) وموصلات مغناطيسية مثالية كما هو مبين في الشكل (6) وذلك من أجل إثارة الرنانة بالموجة المستوية

المنتشرة باتجاه المحور Y باستقطاب بالاتجاه X و بالتالي الحصول على سلوك LHM المطلوب.

وحصلنا على النتيجة التالية بالنسبة لمعاملات الإرسال $S(2,1)$ والانعكاس $S(1,1)$.



الشكل (7) معاملات الإرسال $S(2,1)$ والانعكاس $S(1,1)$ للوحدة الأساس

نلاحظ وجود ذروة نقل عند تردد الرنين $f = 9.2\text{GHz}$ تقريبا والتي تقابل منطقة سماحية ϵ ونفاذية μ سالبة. وللتأكد من النتائج قمنا بتطوير برنامج باستخدام الماتلاب للحصول على بارامترات المادة الفعالة انطلاقا من معاملات الارسال والانعكاس وذلك اعتمادا على العلاقات التالية [12]:

$$\epsilon = n/z \quad \text{السماحية} \quad (1-4)$$

$$\mu = n^*z \quad \text{النفاذية} \quad (2-4)$$

حيث: n هو دليل الانكسار ويعطى بالعلاقة:

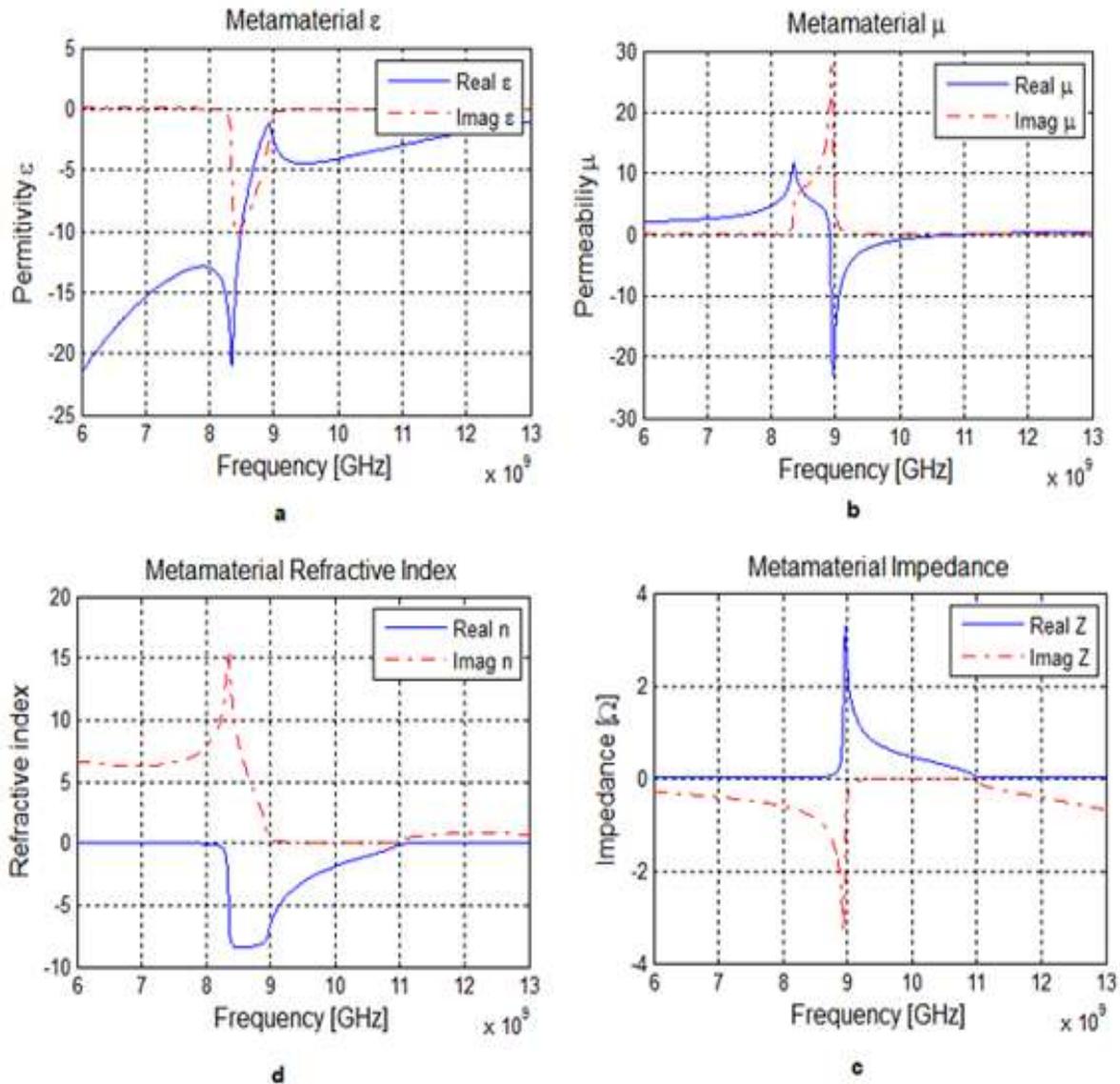
$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (3-4)$$

حيث: K هو العدد الموجي - d : سماكة الشريحة

Z : الممانعة وتعطى بالعلاقة:

$$Z = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (4-4)$$

وحصلنا على النتائج التالية للسماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية والممانعة ودليل الانكسار



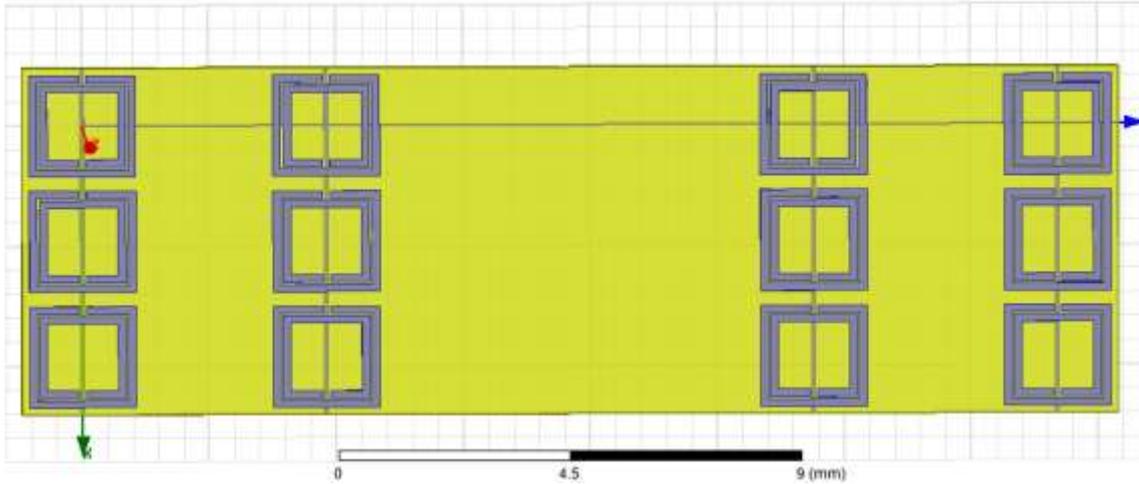
الشكل (8) معاملات السماحية (a) والنفاذية (b) والممانعة (c) ودليل الانكسار (d) المستخرجة من معاملات الارسال والانعكاس

نلاحظ من الشكل (8) أنه في المجال الترددي بين تردد الرنين المغناطيسي (تقريباً 9.2 GHz) وتردد القطع (تقريباً 11 GHz) يكون القسم الحقيقي للسماحية والنفاذية سالبان أي دليل انكسار سالب وهذا يتطابق مع حزمة نقل LHM للأموح المعينة في مخطط الارسال والانعكاس قيمته الاعظمية تكون عند تردد الرنين. ونلاحظ أيضاً أن القسم التخيلي في حده الأدنى بجوار تردد الرنين أي الضياعات أقل ما يمكن.

يحدث الانعكاس الاقل تقريباً عند التردد 9.2 GHz (تردد الرنين) حيث $\mu' = -4.2$ و $\epsilon' = -4.2$ و μ'' و ϵ'' هي القسم الحقيقي لكل من السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية على الترتيب (وبالتالي تكون ممانعة بنية LHM مطابقة لممانعة الخلاء).

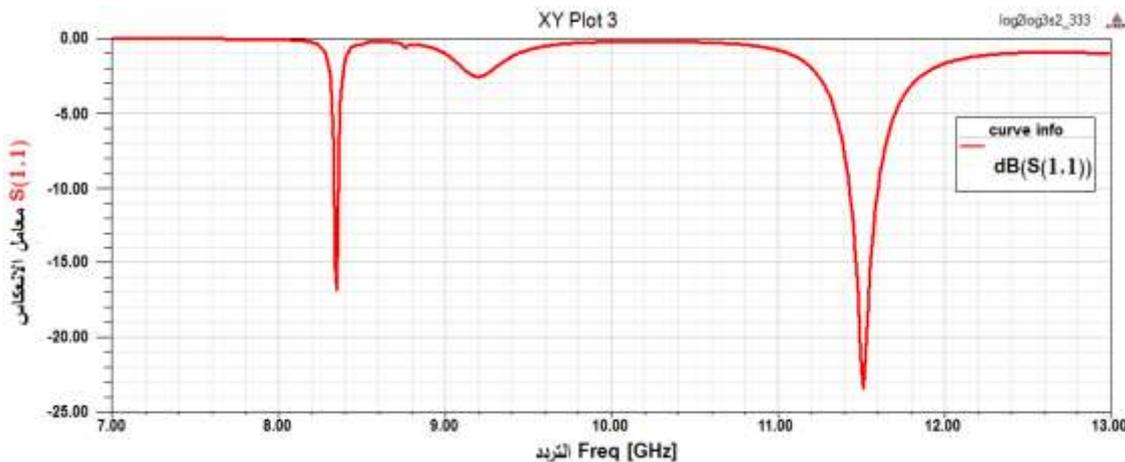
2-4 البنية التصميمية المقترحة

نقوم في هذه المرحلة بتصميم بنية Metamaterial باستخدام الوحدة الأساس نفسها المستخدمة في الدراسة الأولى مع نفس الأبعاد ونقوم بتوزيعها بشكل تجزيئي على شريحة عازلة بطول (21.6 mm) وعرض (7.2mm) و نفس سماكة الطبقة العازلة وثابت العازلية للدراسة الأولى. التوزيع التجزيئي المستخدم هو نموذج كانتور. تم اختيار الشكل المقترح المبين في الشكل (9) بعد عدة نماذج وذلك عند درجة التجزيء $S=2$ ومن أجل البعد التجزيئي $D = \ln(2)/\ln(3)$ حيث حصلنا على أكثر من رنين قوي للبنية عند هذه القيم.



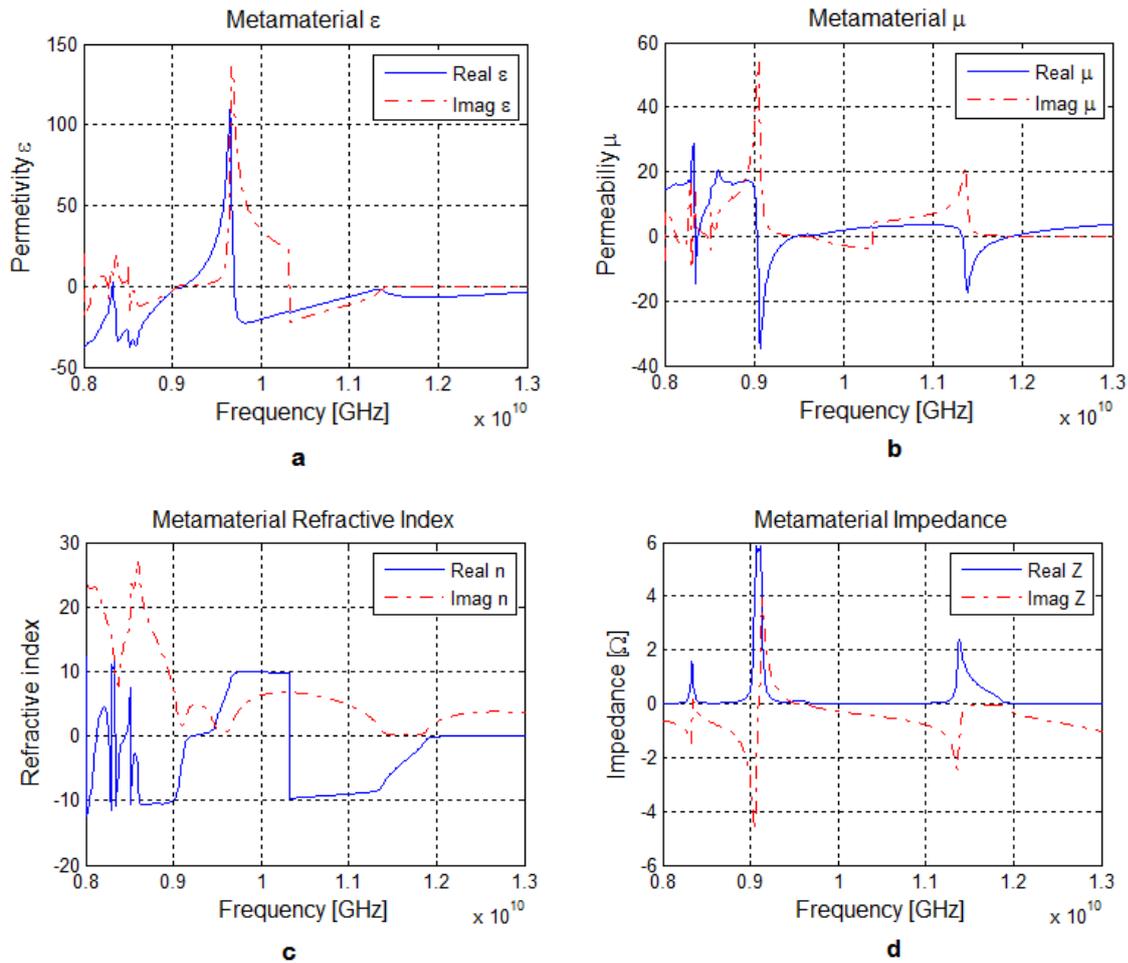
الشكل (9) النموذج المقترح لبنية LHM باستخدام التوزيع التجزيئي كانتور

ومن أجل نفس الشروط الحدية للدراسة الأولى واتجاه الانتشار باتجاه المحور y تم التوصل إلى النتيجة التالية بالنسبة لمعامل الانعكاس:



الشكل (10) معامل الانعكاس $S(1,1)$ لبنية LHM المقترحة

نلاحظ من الشكل (10) وجود ذروتين واضحتين للنقل (عند التردد 8.4GHz و 11.5GHz) وذروة نقل صغيرة (عند التردد 9.2GHz). بالتالي عند التوزيع التجزيئي للوحدة الأساس نحصل على عدة حزم تمرير بشدات مختلفة أي يوجد أكثر من رنين للشريحة ككل والتي تمثل مناطق LHM. وللتأكد من هذه النتائج تم استخراج بارامترات المادة الفعالة بالطريقة نفسها التي تم استخدامها في المرحلة الأولى وحصلنا على النتائج التالية المبينة في الشكل (11).



الشكل (11) معاملات المادة الفعالة لنموذج بنية LHN المقترح (a: السماحية، b: النفاذية، c: دليل الانكسار، d: الممانعة)

نلاحظ من الشكل (11) أنه عند حزم النقل (عند الترددات 8.4GHz و 9.2GHz و 11.5GHz) يكون كل من السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية سالبان معا وبالتالي مناطق LHM، وهذا تأكيد للنتائج التي حصلنا عليها من مخطط الانعكاس للبنية المقترحة. نلاحظ من مخطط دليل الانكسار (الشكل 11-c) أنه عند التوزيع التجزيئي حصلنا على قيم لدليل الانكسار أكثر سلبية تصل حتى (-9) تقريبا وعند ترددات مختلفة على طول التردد العامل، وبالتالي زيادة عرض الحزمة التي تعرض دليل انكسار سالب والتي هي من أهم معوقات مواد MMS.

الاستنتاجات والتوصيات

أظهر البحث تعريف بالمواد سالبة السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية والخصائص الكهرومغناطيسية الفريدة التي تقدمها مثل هذه المواد، وأهمية الهندسة التجزيئية في تصميم مواد الـ Metamaterial ودرجات الحرية الكبيرة التي تقدمها عند التصميم من أجل التغلب على عوائق مثل هذه المواد من حيث زيادة عرض الحزمة الذي تعمل عنده هذه المواد وتقليل الضياعات، وذلك لملاءمة استخدامها في مختلف أجهزة الاتصالات المكروية والضوئية والاستفادة من خصائصها.

يمكن توسيع البحث ودراسة تأثير المعاملات التجزئية على السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية وبالتالي معاملات الارسال والانعكاس للبنية التصميمية المقترحة، واقتراح أشكال جديدة لرنانات الحلقة المشطورة بما يعطي خيارات جديدة للتصميم للوصول الى القيم الأمثل لدليل الانكسار السالب أو الخصائص الكهرومغناطيسية الملائمة لتطبيق معين.

المراجع:

[1] PALANDOKEN, M and KAHRAMANMARAS, A. " *Microwave Metamaterials for Compact Filters and Antennas* ", Technischen Universität Berlin , Berlin 2012, pp.1-129.

[2] WEILAND,T, JAKOBY,R and SCHUHMANN, R. "*Simulation of Electromagnetic Fields in Double Negative Metamaterials*", Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2009, pp.1-131.

[3] GIL,M and AZNAR,F. "*Electrically small resonators for metamaterial and microwave circuit design*" Universitat Autònoma de Barcelona (GEMMA/CIMITEC Group) April, 2010, pp.404-428.

[4] JAKSIC,Z, DALARSSON,N and MAKSIMOVIC, M. "*Electromagnetic Structures Containing Negative Refractive Index Metamaterials*", IEEE, Serbia and Montenegro, 2005, pp.145-155.

[5] CHISTODOULOU,C.G, GILMORE,M.A, and ELKADY,I.F. "*ANALYSIS, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A RECONFIGURABLE FRACTAL VOLUMETRIC LEFT-HANDED METAMATERIAL*", The University of New Mexico, December, 2008, pp.1-88.

[6] GANGWAR,K, PARAS and GANGWAR, R.P.S. "*Metamaterials: Characteristics, Process and Applications*", Advance in Electronic and Electric Engineering © Research India Publications, ISSN 2231-1297, Volume 4, Number 1 (2014), pp.97-106.

[7] SINGH,G, RAJNI and MARWAHA,A. "*A Review of Metamaterials and its Applications*", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 19 Number 6 – Jan 2015, pp.305-310.

[8] FRAKLIN, J, BIDDLE, J and BALKO, B. "*Double Negative Materials (DNM), Phenomena and Application*", Institute for Defence Analyses, Alexandria, Virginia 22311-1882, July 2009, pp.1-82.

[9] FALCONER, K. "*Fractal Geometry Mathematical Foundations And Applications*" John Wiley & Sons, 2004, pp.1-155.

[10] TIWARIA. "*Fractal application in electrical and electronics engineering*". International Journal of engineering science & advanced technology U.S.A . Vol.2, Num.3,2012, pp.406-411.

[11] د.م السمومل صالح، " خصائص الانعكاس الناتجة عن التوزيع التجزئي وحيد البعد للمواد سالبة العازلية

الكهربائية والنفاذية المغناطيسية وتطبيقها في تصميم مرشح تمرير مكروي ضيق الحزمة " تم قبوله للنشر في مجلة بحوث جامعة تشرين لعام 2013 ، ص 109_123.

[12] KADAM,N.T, JANWALKER,K.S and ODHEKAR,A.A "*Parameter Extraction for Negative Index Metamaterials*", International Conference on Computer Technology (ICCT 2015), pp.1-4.