دراسة استخدام المسابر المتمحورة لتحريض الأنماط الهامسة في الرنانات العازلة كهربائياً ضمن المجال 20-26 GHz للحزمة K

الدكتور المهندس ثائر داؤد

قسم هندسة الاتصالات – كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية – جامعة حلب – الجمهورية العربية السورية – البريد الالكتروني: daoudgh@gmail.com هاتف موبايل: 0988381262

الملخص

عرف استخدام الرنانات العازلة كهربائيا في أنظمة الترددات العالية تطوراً هائلاً منذ عدة سنوات، وخصوصاً ضمن مجال الأمواج الميكروية كموزعات الاستطاعةDistributors of puissance والمرشحات filters والهزازات Oscillators، والحساسات وغيرها، والتي يمكن أن نجدها في أنظمة الرادار والهاتف الخليوي ونظام تحديد المواقع العالمي GPs ....

لذلك، يكون مهماً استغلال خواص هذه الرنانات ضمن هذا المجال من الترددات. ولكن يصعب استخدام الرنانات المحرضة بأنماطها التقليدية بسبب أبعادها الصغيرة جداً. لذلك تم اقتراح استخدام الأنماط الهامسة Whispiring Gallery Modes (WGMs) للرنانات العازلة كهربائياً. لأنها تضمن زيادة في حجم الرنان من أجل نفس الترددات المليمترية السابقة.

لذلك يتركز البحث هنا على دراسة تفصيلية كهرطيسية رقمية دقيقة لأنظمة تحريض مختلفة للرنانات العازلة كهربائياً العاملة بهذه الأنماط.

تم انجاز هذا البحث بواسطة طريقة رقمية حسابية ارتكزت على مكتبة برامج MODULEF وهي طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد وباهتزازات حرة وقسرية. التي من خلالها سيتم التحديد الدقيق للبارامترات الكهرطيسية (مركبات وتوزع الحقول الكهرطيسية – الترددات الطنينية للأنماط – معاملات النقل S_{12}، معامل النوعية الخارجي Q_e،...) كتابع للخواص الهندسية وأنظمة التحريض للبنى المدروسة. من خلال ذلك يمكننا اختيار الأنسب لتصميم وتنفيذ الدارات العملية لاستخدامها في التطبيقات المناسبة.

الكلمات المفتاحية: رنان عازل كهربائياً، الأنماط الهامسة ، مكتبة برامج MODULEF ، معامل الإقتران

A study of the use of coaxial probes to excite whispering modes of dielectric resonators within the 20-26 GHz range of the K-band

Dr. Eng. Thaer Daoud, Department of Communications Engineering, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Aleppo- Syria , Tel: 0988381262 E-mail: daoudgh@gmail.com

Abstract

The use of dielectric resonators in high-frequency systems has seen tremendous development over the past few years, particularly in the field of microwaves, such as puissance distributors, filters, oscillators, sensors, etc., which can be found in radar systems, cell phones, and GPS applications,…. Therefore, it is important to exploit the properties of these resonators in this frequency range. However, conventional mode-excited resonators are difficult to use at these frequencies due to their extremely small dimensions. Therefore, the use of Whispering Gallery Modes (WGMs) for dielectric resonators has been proposed, as they ensure an increase in the resonator size for the same millimeter-wave frequencies. Therefore, the research here focuses on a detailed digital electromagnetic study of different induction regimes for dielectric resonators operating in these modes.

This study will be conducted using a numerical computational method based on the MODULEF software library, a three-dimensional finite element method with free and forced vibrations. This method will accurately determine the electromagnetic parameters (components and distribution of electromagnetic fields, resonant frequencies of modes, transmission coefficients S12, external quality coefficient Qe, etc.) as a function of the geometric properties and excitation systems of the studied structures. This will enable us to select the most appropriate ones for the design and implementation of practical circuits for use in appropriate applications.

Keywords: dielectric resonator, whispering modes, MODULEF software library, coupling coefficient.

I - مقدمة:

إن المرشحات والهزازات (المستخدمة كمبدلات أو كمنابع للترددات)، والتي توجد في قسمي الإرسال والاستقبال، هي من العناصر الأساسية لهذه الأجهزة، وخصوصاً ضمن مجال الترددات العالية جداً، وكذلك هي من العناصر الأساسية لتشكل العديد من الدارات الالكترونية وخصوصاً المستخدمة بحقل الاتصالات. حيث أن الخواص الكهربائية لهذه العناصر (تردد مركزي – حزمة تمرير – ...) والميكانيكية والحرارية تكون محددة تبعاً لتطبيقاتها، وكذلك أبعاد الأجهزة تأخذ حيزاً مهماً من الاهتمام التي يتوجب التقيد بها عند تصميم الدارات.

في السنوات الأخيرة، وبتطور التكنولوجيا والاتصالات، ومع تقدم آليات التنفيذ، فقد تم استخدام المواد العازلة كهربائياً والمستقرة حرارياً في تصنيع الرنانات العازلة كهربائياً لاستخدامها في تصميم وتنفيذ المرشحات والهزازات وغيرها بمميزات مشابهه للميزات التي تم الحصول عليها اعتماداً على الأجواف المعدنية و أدلة الموجة.

ولكن المشكلة في هذه الرنانات العازلة كهربائيا هو أن مختلف الأنماط يمكن أن تكون محرضة ويتم انتقاؤها أو اختيارها وذلك باختيار أحد أنظمة التحريض مثل: الخطوط الريبية –الكبسولات الكهربائية والمغناطيسية – أدلة الموجة المعدنية – المسابر المتمحورة –....

ضمن هذا النطاق هناك العديد من الأعمال البحثية سمحت بتحديد البارامترات الكهرطيسية وخصوصاً معامل الاقتران بين الرنان العازل كهربائياً و أنظمة التحريض. وقد تناولت الدراسات في هذا المجال مثل أعمال الباحث L.C, HUNTER الذي قام باستخدام التحريض بواسطة الشريطة الريبية ، حيث أنه في هذه الحالة كان هناك عدد كبير من الأنماط الهامسة بنوعيها، والمشكلة تمثلت في صعوبة فصل الأنماط[1]، أما الباحثين P.CROS و M.KOSHIBA و E.M.J, MARCATILLI الذين قاموا بتحريض الرنان العازل كهربائياً بواسطة أدلة الصورة العازلة، حيث أن هذه الطريقة كانت مناسبة من أجل الترددات العالية (أعلى من 30 GHz)، ولكن من أجل الترددات المنخفضة نسبياً فإن الضياعات الناتجة عن الاشعاع كانت مهمة، وفي هذه الحالة عندما دليل الموجة يعمل على النمط الأساسي فإنه يملك مركبتين أساسيتين E_y و H_z ، وبالتالي بهذه الشروط فإن الرنان العازل كهربائياً

و الذي يعمل بأنماط هامسة $WE_{n,0,0}$ يجب أن يكون محوره عمودياً على محور الانتشار للدليل، وبالمقابل من أجل الأنماط $WH_{n,0,0}$ فإن محور الرنان يجب أن موازياً لمحور انتشار الدليل [4-2]. أما X.H., JIAO فقد قام باستخدام طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد لدراسة تحريض الأنماط الهامسة بنوعيها. بهذه الدراسة كانت المسافة بين الرنان العازل كهربائياً والشريطة الريبية كبيرة نسبياً ، في هذه الحالة كانت الأنماط الأكثر تحريضاً هي الأنماط WH ولكن المشكلة هنا أن الأنماط WE لم يكن بالإمكان تحريضها[5] .

أما الباحث R.DISINER فقد قام باستخدام كبسولات كهربائية و كبسولات مغناطيسية لتحريض الرنان العازل كهربائياً، ولكن هذه الطريقة كانت محدودة الاستخدام بالترددات المنخفضة (أقل من 26 GHz)، وأعلى من هذا التردد فإنه سيكون لدينا ضياعات كبيرة، وبالإضافة لذلك بالترددات الأعلى من 40 GHz كان التنفيذ بدقة عالية صعبا للغاية [6]

لذلك في هذا البحث وبعد تقديم سريع لمبدأ حساب معامل الاقتران (دخل – خرج)، فإننا قمنا بتقديم تحليل لعدة نماذج لتحريض الأنماط الهامسة. حيث سنقوم بدراسة الاقتران بين الرنان العازل كهربائياً العامل على هذه الأنماط والمسابر المتمحورة. هذه العملية ستسمح لنا بالمعرفة الدقيقة لهذا النوع من التحريض الممكن استخدامه في تنفيذ الدارات ضمن نطاق حزمة الأمواج الميكروية.

II – أهمية البحث و أهدافه

مما تقدم فإن الهدف والأهمية الأساسية لهذا البحث سيتركز على دراسة دقيقة و مفصلة للاقتران بين مسابر متمحورة ورنانات عازلة كهربائياً التي يمكن من خلالها أن تتحرض هذه الأنماط وذلك ضمن مجال الترددات الميكروية. حيث أنه من خلال هذه الدراسة سنقوم بتحديد البنية الأنسب والأكثر ملاءمةً لتحريض الأنماط الهامسة بهذا النوع من التحريض. هذه الدراسة يمكن أن تكون خطوة أساسية في تشكيل عناصر ودارات غير فعّالة كمرشحات تمرير حزمة والهزازات وغيرها، وذلك باستخدام مواد عازلة كهربائياً مناسبة ضمن هذا النطاق من الترددات، وذلك بهدف استخدامها في منظومات الاتصالات الحديثة.

III – مواد و طرائق البحث

لإنجاز هذه الدراسة فإنها ستكون ممنهجة وفق الخطوات التالية:

1- في الخطوة الأولى سنقوم بتقديم دراسة موجزة للرنانات العازلة كهربائياً والعاملة على الأنماط الهامسة Whispiring Gallery Modes (WGM)

2- في الخطوة الثانية سنقوم بتقديم شرح مبسط لطريقة العناصر المنتهية التي ستساعدنا في حساب البارامترات الكهرومغناطيسية للبنى المدروسة

3- الخطوة الثالثة ترتكز على الدراسة الكهرومغناطيسية الرقمية الدقيقة والمفصلة (بطريقة العناصر المنتهية) للاقتران للبنى المدروسة وذلك بهدف التحديد الدقيق للبارامترات الكهرومغناطيسية مثل معامل الاقتران دخل – خرج و معامل النوعية الخارجي – ...

4- و في الختام سنقوم بتحليل و مناقشة النتائج و طرح مقترحات للخطوات المستقبلية.

III – 1- دراسة موجزة للرنانات العازلة كهربائياً و العاملة على الأنماط الهامسة Whispiring Gallery Modes (WGM)

III - 1- 1- تمهيد مبسط

بالتعريف الجوف الكهرومغناطيسي هو عبارة عن حجم فارغ أو مليء بعازل كهربائي، وهو إما أن يكون محدود بجدران معدنية أو يكون محدود بجدران ذات طبيعة مغناطيسية وبالتالي السطح الفاصل عبارة عن عازل كهربائي، بالحالة الأولى نتكلم عن جوف معدني و بالحالة الثانية نتكلم عن رنّان عازل كهربائياً. وهذا الرنان العازل كهربائياً يجب أن يتميز بسماحية عالية وبضياعات صغيرة جداً أو بعامل نوعية عالي، وكذلك يجب أن يتميز باستقرار حراري حول تردد الطنين.

بشكل عام، الرنانات لها شكل اسطواني بمقطع دائري على شكل أقراص رنّانة مصمتة أو مفرغة. عادةً هذه الرنانات تستخدم لتشكيل المرشحات و موزعات الاستطاعة و الهزازات ذات استقرار ترددي عالي. إن استخدامها كمرشحات يكون لانتقاء حزمة من الترددات أو تردد معين، ويمكن أن تستخدم في مضاعفات طول الموجة في المحطات الراديو–تلفونية أو فصل مسارات الإرسال والاستقبال للهواتف النقالة و كذلك يمكن أن تساعد في تشكيل دارات القارنات الإتجاهية Directing Couplers -7] .9]

ولكن ضمن المجالات الترددية الميكروية، فإن الرنانات العازلة كهربائياً المحرّضة لتعمل بأنماطها الكلاسيكية يكون من الصعب استخدامها بسهولة بسبب أبعادها الصغيرة جداً. لذلك للحفاظ على مختلف خواص الرنانات ضمن هذه المجالات الترددية، فإنه كان من الضروري استخدام هندسيات جديدة تسمح بنشر أنماط جديدة بجوار الجدار الداخلي للرنان والتي تسمح بزيادة أبعاد الرنان من أجل نفس الترددات، وهذا ما يسمح بتشكيل الدارات السابقة بسهولة. مع الملاحظة أن المواد العازلة كهربائياً الممكن

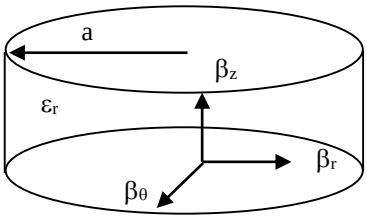
استخدامها لتصنيع هذه الرنانات تكون تبعاً للمجال الترددي المراد استخدامه وذلك بطريقة الجوف الأسطواني [12 -10][22].

III - 1- 2 - الرنانات العازلة كهربائياً بالأنماط الهامسةWGM

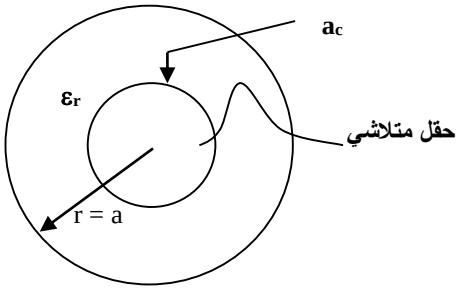
بالترددات العالية (حتى 100 GHz)، فإن الرنانات العازلة كهربائياً العاملة بالأنماط الكلاسيكية تكون أبعادها صغيرة جداً، فمثلاً من أجل سماحية ε_r =36 و بتردد قريب من التردد أعلاه فإن قطر الرنان العازل كهربائياً يكون مساوياً لارتفاعه وهو حوالي 500µm. وبالتالي في هذه الحالة فإن استخدام هذه العناصر بدقة كافية يكون صعباً جداً، ومن ناحية ثانية فإن توضّع الرنان بالقرب من خط تحريض يكون حسّاس للغاية (يلزمه دقة عالية). لذلك الأنماط الجديدة المسماة بالأنماط الطرفية أو الهامسة يمكن أن تسمح باستخدام الرنانات العازلة كهربائياً بهذه الترددات ولكن بأبعاد أكبر مما لو كانت تعمل بالأنماط التقليدية، فمثلاً من أجل المثال السابق فإن الرنان سيكون بقطر حوالي 2mm وارتفاع 0.5mm

III -1- 2 –1– توصيف عام للأنماط الهامسة

من وجهة النظر الكهرومغناطيسية، فإن واحدة من أهم الخواص الأساسية للأنماط الطرفية الهامسة هي توزع القدرة ضمن الرنان. لنفترض أنه لدينا رنان عازل كهربائي Dielectric Resonator DR بسماحية ε_r ونصف قطر r = a كما هو مبين بالشكل1. بالتعريف هذه الأنماط (الهامسةWM) هي أنماط طرفية تدور حول السطح المقعر الداخلي للرنان، وهذه الأنماط تنتقل في مقطع دائري والحقل الكهرومغناطيسي يتوضع في منطقة محدودة بالسطح داخلي للرنان r = a وسطح داخلي وهمي r = a_c خارج هذه المنطقة ($a < r < a_c$) الحقل الكهرطيسي يكون متلاشي كما هو مبين بالشكل2 [13-18]



شكل1: رنان RD بسماحية ε_r ونصف قطر a



شكل2: توزع الحقل الكهرطيسي للأنماط الهامسة في رنان DR

وبالتالي في المستوي الراديالي للرنان، فإن الحقول الكهرومغناطيسية لهذه الأنماط تتواجد بشكل مركّز كما هو مبين بالشكل أعلاه بالقرب من السطح المقعر الداخلي للرنان. أما في المستوي المحوري للرنان فإن الحقول الكهرومغناطيسية تنتقل بثابت انتشار ضعيف، و بالتالي يمكن إهماله أمام ثابت الانتشار الزاوي Azimutal ، وبالتالي الترددات الطنينية ستكون متعلقة بشكل مباشر بنصف قطر الرنان r = a . و من الشكل أعلاه يمكن أن نكتب[22-17]:

$$k^2 = \beta_\theta^2 + \beta_r^2 + \beta_z^2 \qquad (1)$$

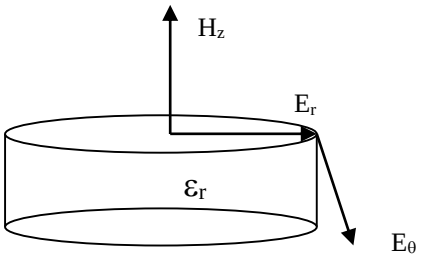
علماً أن:

$$k^2 = \varepsilon_r \frac{\omega^2}{c^2} \qquad (2)$$

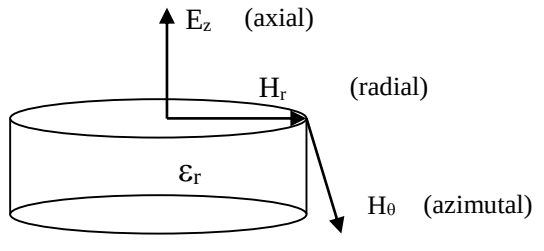
حيث: K هو عامل الموجة ضمن الرنان

$\beta_\theta, \beta_r, \beta_z$ هي عبارة عن ثوابت الانتشار على التوالي: المحوري Axial ، الراديالي Radial، الزاوي Azimutal، C هي سرعة الضوء في الخلاء

في هذه الرنانات يمكن أن نميّز نوعين من الأنماط WE و WH مزودة بثلاثة معاملات: n العدد الزاوي، m العدد الراديالي، l العدد المحوري، وبالتالي يمكن أن نكتب $WE_{n,m,l}$ و $WH_{n,m,l}$. ففي حالة WE فإن الحقل الكهربائي يكون بشكل أساسي بمركبات معترضة والحقل المغناطيسي يكون بشكل أساسي طولاني (E_θ, E_r, H_z) كما هو موضح بالشكل3 أما في حالة WH فإن الحقل المغناطيسي يكون بشكل أساسي معترض والحقل الكهربائي طولاني أي (H_θ, H_r, E_z) كما هو موضح بالشكل4



الشكل3: الحقل الكهرطيسي للأنماط WE

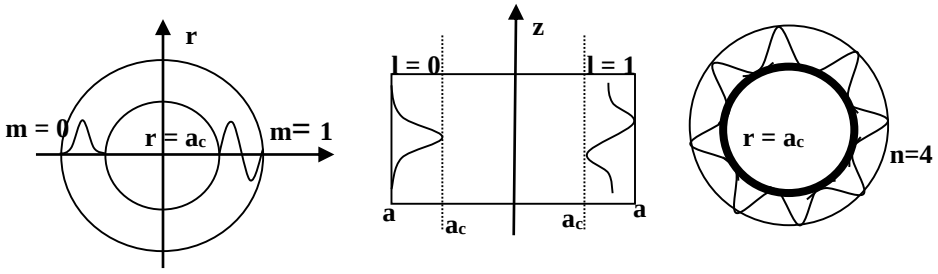


الشكل4: الحقل الكهرطيسي للأنماط WH

حيث n: هو عبارة عن عدد التغيرات الزاوية للحقل، (التغيرات تبعاً لـ θ) وكذلك يمثل مرتبة تابع بيسيل، و يجدر الذكر أنه كلما زادت قيمته فإن القدرة ستتركز قرب السطح المقعر الداخلي للرنان.

m : هو عبارة عن عدد التغيرات الراديالية للحقل أو عدد الأصفار تبعاً لقطر الرنان

l:هو عبارة عن عدد التغيرات وفق المحور Z أو عدد الأصفار بالاتجاه المحوري. الشكل5 يوضح ذلك[23-27] [17-18]



الشكل5: التغيرات االزاوية، الراديالية، المحورية للحقل الكهرطيسي

III - 2 – الطريقة الرقمية المستخدمة بالدراسة

III - 2 –1– شرح مبسط [28-32] [17-18] [15]

لإنجاز الدراسة الرقمية للبنى المدروسة (وبالتحديد دراسة الاقتران ومعامل النوعية الخارجي)، فإنه سيتم استخدام برنامج من مكتبة برنامج الحساب Moduef و بالتحديد بيئة العناصر المنتهية (طريقة العناصر المنتهية)، وذلك بعد ملاءمة هذه الطريقة على البنية المدروسة . هذه الطريقة يمكن تطبيقها على بنيات ذات أبعاد وأشكال لا على التعيين، تكون مكونة من حجوم محددة إما بجدران كهربائية (CCE) أو مغناطيسية (CCM) التي عليها يتم تطبيق الشروط الحدية المناسبة.

إن استخدام هذه الطريقة يبدأ بإدخال البنية هندسياً (أبعاد البنية) وتشكيل ما يعرف بالشبكة العنكبوتية للبنية وذلك بتقسيم البنية على شكل مثلثات في حالة الدراسة ببعدين 2D ، وعلى شكل مجسمات في حالة الدراسة بثلاثة أبعاد 3D، مع الملاحظة أنه في المنطقة المتوقع انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية يجب أن نزيد عدد نقاط التقطيع (في حالتنا منطقة الرنان ونظام التحريض)، لأن ذلك يضمن الحصول على نتائج أكثر دقة ولكن بالمقابل فإن الزمن اللازم للحساب سيكون كبيراً نسبياً. بعد ذلك يتم كتابة شيفرتين (كودين) خاصتين بهذه البنية:

- الأولى هي عبارة عن برنامج تهيئة للحساب ويتضمن إدخال الثوابت الفيزيائية للبنية المدروسة التي تم إدخالها هندسياً تحت اسم معين (.سماحيات الأوساط، الشروط الحدية للبنية (جدران معدنية CCE أو عازلة كهربائياً CCM)، نوع الاهتزاز (حر أم قسري)).

- الثانية هي عبارة عن برنامج الحساب الذي من خلاله يمكن تحديد مختلف الأمواج المنتشرة في هذه البنية حتى التي تسمى بالأمواج الطفيلية غير المفيدة وكافة المعاملات الكهرومغناطيسية (معاملات S ومعاملات النوعية Q ...) وذلك تبعاً للبارامترات لفيزيائية والهندسية للبنية المدروسة.

إن جوهر المسألة يكون بحساب:- الأمواج الكهرومغناطيسية بكل ما يتعلق بها (مركبات الحقول الكهرومغناطيسية – ثابت الانتشار الطولاني- السماحية الفعالة- التردد الطنيني-...)- معاملات S – معاملات النوعية Q ...، وذلك للبنية التي يمكن أن تحتوي على العديد من الأوساط بسماحيات مختلفة وبنفوذية مغناطيسية متماثلة. وتكون البنية محددة بسطوح فصل إما CCE أو CCM ، والتي عليها ستتوزع الشحن والتيارات السطحية. ومن ناحية ثانية، فإننا نتوضع دائماً بحالة أن مركبات الحقول الكهرومغناطيسية هي دورية بالنسبة للزمن $\exp(-j\,\omega\,t)$ ، بالإضافة أن الأوساط هي متجانسة ومتماثلة ، ضمن هذه الشروط فإن معادلات ماكسويل يمكن أن تكتب بالصيغة النهائية التالية-17] [15][6]: 18]

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\overrightarrow{\mathrm{rot}}\vec{H}\right)\left(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\overrightarrow{\varphi_m}\right)dV - k_0^2\iiint_V \mu_r\vec{H}\cdot\overrightarrow{\varphi_m}\,dV = -j\omega\varepsilon_0\sum_{i=1}^{n}\iint_{S_{pi}}\overrightarrow{j_{mpi}}\cdot\overrightarrow{\varphi_m}\,dS_{pi} \qquad (3)$$

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\mu_r}\overrightarrow{\mathrm{rot}}\vec{E}\right)\left(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\overrightarrow{\varphi_e}\right)dV - k_0^2\iiint_V \varepsilon_r\vec{E}\cdot\overrightarrow{\varphi_e}\,dV = -j\omega\mu_0\sum_{i=1}^{n}\iint_{S_{pi}}\overrightarrow{j_{epi}}\cdot\overrightarrow{\varphi_e}\,dS_{pi} \qquad (4)$$

حيث: n: عدد المنافذ للبنية $i=1\rightarrow n$: رقم المنفذ p_i: مستوي المنفذ S_{pi}: سطح المستوي p_i V : حجم البنية φ_e وφ_m : تمثل على التوالي تابع الفحص القياسي بحائط مغناطيسي وكهربائي.

j_{epi} ، j_{mpi} : هي على التوالي التيارات السطحية المغناطيسية و الكهربائية للمستوي Pi

وهنا لدينا صيغتان ممكنتان للاستخدام: إما الصيغة E التي من خلالها يتم حساب الحقل الكهربائي $\vec{E}$ ، أو الصيغة H: التي من خلالها يتم حساب الحقل المغناطيسي $\vec{H}$ ، و من خلال أحدهما يمكن حساب الآخر بواسطة معادلات ماكسويل، وهذا ما يوفر زمن الحساب.

في البنية التي تم تشكيل شبكتها العنكبوتية فإنه يتم تطبيق العلاقة 3 أو العلاقة 4 (إما الصيغة E أو الصيغة H) على كل عنصر من عناصر الشبكة مع ضمان شروط الاستمرارية بين كل عنصرين متجاورين، علماً أنه لدينا نمطان من الحلول:

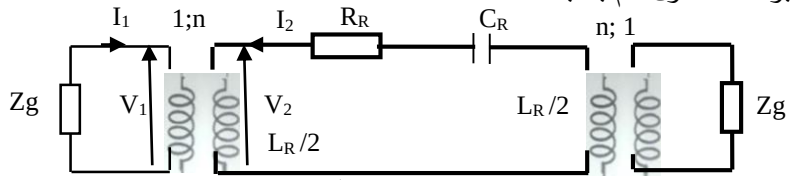
- الحل بالاهتزازات الحرّة الذي يسمح بالبحث عن الأنماط المنتشرة– ثابت الانتشار– السماحية الفعّالة– التردد الطنيني للنمط المنتشر–.... هنا الحد الثاني من العلاقتين 3 و 4 يكون مساوياً للصفر.
- الحل بالاهتزازات القسرية الذي يتم فيه فرض التردد ومن ثم يتم البحث عن كافة المعاملات (معاملات النقل والانعكاس،...) للبنية المدروسة.

III - 3– دراسة الاقتران و معامل النوعية

III - 3–1 – مبدأ الحساب

III - 3–1 –1– الاقتران دخل – خرج

إن الاقتران بين نظام تحريض (دليل موجة – شريط ريبي – مسبار –...) ورنان عازل كهربائياً يمكن تمثيله بالشكل6، حيث أن الرنان يمثل بدارة طنينية تسلسلية وبالتالي فإن الاقتران بين منبع بممانعة Zg والرنان يمثل بواسطة محول تام بنسبة n



الشكل6: الدارة المكافئة لرنان عازل كهربائياً و نظام تحريضه

حيث: C_R, R_R, L_R العناصر الممثلة للرنان العازل كهربائياً

علاقات الجهود و التيارات بالأطراف هي[15]: $I_1/I_2 = -n$ $V_1/V_2 = 1/n$

III - 3–1 –1– حساب معاملات النوعية[39-33] [22] [18]

1 – حساب معامل النوعية بالفراغ Q_o

معامل النوعية بالفراغ لا يأخذ بعين الاعتبار إلا مميزات الرنان وهو مستقل عن نظام التحريض المستخدم، ويحدد بالعلاقة:

$$\mathbf{Q_o} = \boldsymbol{\omega_o} \frac{\text{القدرة الكلية المخزنة بالحلقة}}{\text{الاستطاعة المبددة بالحلقة}} = \boldsymbol{\omega_o} \frac{\overline{W}}{\overline{P}} \qquad (5)$$

حيث أنه بالطنين يكون لدينا: $L_R C_R \boldsymbol{\omega_o} = 1$

القدرة الكلية المخزنة بالدارة الطنينية= $W_{total} = 2\,\overline{W_e} = 2\,\overline{W_m} = \overline{W_e} + \overline{W_m}$: $\frac{1}{2} L_R I^2$

أما الاستطاعة المبددة بالدارة الطنينية: $\overline{P} = \frac{1}{2} R_R I^2$

و بالنهاية فإن معامل النوعية بالفراغ يعطى بالعلاقة: $Q_o = \omega_o \frac{\overline{W}}{\overline{P}} = \omega_o \frac{L_R}{R_R}$

2 – حساب معامل النوعية الخارجي Q_e

هذا المعامل لا يأخذ بعين الاعتبار ضياعات الدارة الطنينية ولكن يأخذ فقط بعين الاعتبار ضياعات نظام التحريض:

$$Q_e = \omega_o \frac{L_R}{n^2 Z_g} \quad (6)$$

حيث $n^2 Z_g$ تطابق ممانعة المنبع المنقولة إلى الملف الثانوي للمحول

من هذه العلاقات لمعاملات النوعية بالفراغ والخارجي يمكن أن نحدد الاقتران $\propto$ بين الرنان و نظام التحريض:

$$\propto = \frac{Q_o}{Q_e} = \frac{n^2 Z_g}{R_R} \quad (7)$$

3 – حساب معامل النوعية للحمولة Q_L

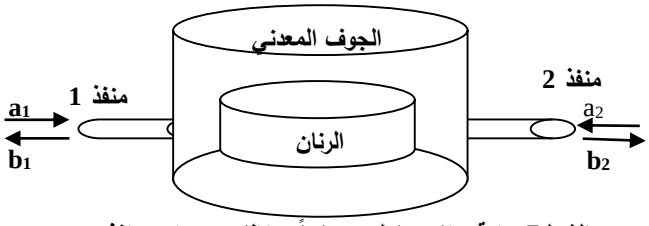
هذا المعامل يأخذ بعين الاعتبار بآن واحد ضياعات الدارة الطنينية الممثلة بالمقاومة R_R للرنان والضياعات الناتجة عن الممانعة المنقولة للمحولة الثانوية $n^2 Z_g$:

$$Q_L = \boldsymbol{\omega_o} \frac{L_R}{R_R + n^2 Z_g} \quad (8)$$

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_o} \quad (9)$$

III - 3-1 – 1 – 2 – حساب الاقتران دخل – خرج بطريقة العناصر المنتهية

سنعتبر الآن أنه لدينا بنية برنان عازل كهربائياً محاط بجوف معدني وبمنفذين كما هو موضح بالشكل 7



الشكل7: بنية برنان عازل كهربائياً و نظام تحريض بمنفذين

مهما يكن نظام التحريض المستخدم فإن رباعي الأقطاب يمكن أن يميز بمصفوفة التوزع، وبالتالي فإنه بواسطة طريقة العناصر المنتهية بالاهتزازات القسرية ستسمح لنا بتحديد Sij من أجل مختلف الترددات. بشكل عام، فإنه من خلال منحني استجابة النقل Sij فإنه يمكن تحديد Q_L بالعلاقة:

$$Q_L = \frac{f_o}{f_2 - f_1} \qquad (10)$$

حيث: f_o : تردد الطنين، f_1 و f_2 : الترددات التي يكون فيها بارامتر النقل $|S_{ij}| = -3$ dB

من ناحية ثانية فإن البنية التي تحتوي على منفذين سيكون لدينا:

Q_{e1}: يميز الاقتران منفذ أول مع الرنان و Q_{e2}: يميز الاقتران منفذ ثاني مع الرنان

في حال أن الاقتران بين نظام التحريض والرنان المتماثل فإننا نحصل على: $Q_{e1} = Q_{e2} = Q_e$ ، وعندما لا نأخذ بالحسبان ضياعات البنية (الضياعات المعدنية – ضياعات العازل الكهربائي) فإن معامل النوعية بالفراغ يتجه للانهاية.

وبالتالي لتحديد معامل النوعية الخارجي Q_e يكفي تحديد Q_L للنظام وذلك تبعاً للعلاقة:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_{e1}} + \frac{1}{Q_{e2}} = \frac{2}{Q_e} \qquad (11)$$

هذه الدراسة الدقيقة للاقتران دخل – خرج ستكون منفذة بواسطة طريقة العناصر المنتهية باهتزازات قسرية. و هذا ما سيسمح لنا بالحصول غلى الاستجابة كتابع للتردد لأي بنية وذلك بعد الأخذ بعين الاعتبار:

- تأثير التحريض على تردد الطنين للرنان العازل كهربائياً
- تأثير الناقليات المعدنية لنظام التحريض على أشكال الحقول
- عدم الانتظامية أو الدقة للاقترانات بين أنظمة التحريض والرنان العازل كهربائياً

وفقاً لذلك سنقوم الآن بتحديد الاقتران دخل – خرج لبنية برنان باستخدام أنظمة تحريض مختلفة.

III - 3 – 2 – حساب معامل الاقتران دخل – خرج لبنى برنان عازل كهربائياً يعمل على أنماط هامسة

الدراسة التي سننفذها هنا ستسمح لنا بتحديد مميزات مختلف طرق التحريض للرنان العازل كهربائياً.

من أجل هذه الدراسة سنختار الرنان بالمواصفات التالية:

- $\varepsilon_r = 9.6$ يتم تقديرها بطريقة الجوف الاسطواني[22]
- $2a = 14$ mm $h = 2$ mm

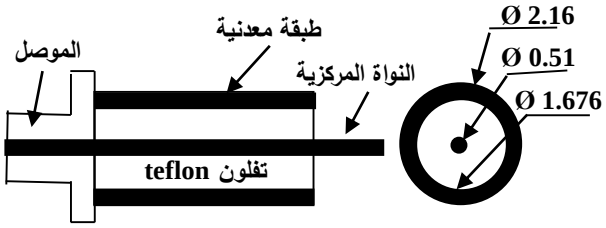
- نختار حزمة الترددات 20 – 26 GHz، لأنه أعلى من ذلك سيكون لدينا ضياعات هامة وسيكون هناك صعوبة كبيرة في التنفيذ.

ضمن حزمة الترددات 20 – 26 GHz فإنه من أجل كل نوع من أنواع التحريض سنقوم بحساب البارامترات أو معاملات S للبنية، وهنا سيتم التركيز على معامل الانتقال Sij لأنه سيحدد لنا مدى

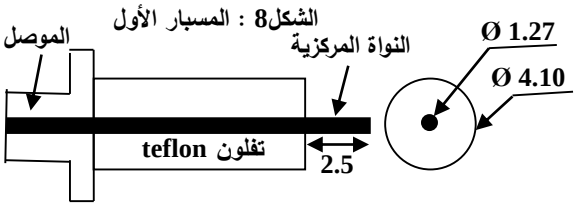
الاقتران مع نظام التحريض المعتبر، وبحالتنا وبسبب تناظر البنية بالنسبة لمحوري التناظر فإن Sij = Sji . وختاماً، ومن أجل كل نمط من الأنماط الهامسة في الرنان سنحدد تردد الطنين ومن ثم سنحسب معامل النوعية الخارجي.

III - 3-2-1- التحريض عن طريق الأسطح الجانبية للجوف بواسطة مسابر متمحورة

من أجل انجاز هذه الدراسة نعتبر أن الاقتران بين نظام التحريض والرنان العازل كهربائياً سيكون بواسطة نوعين من المسابر المتمحورة كما هو مبين بالشكل 8 وبالشكل 9

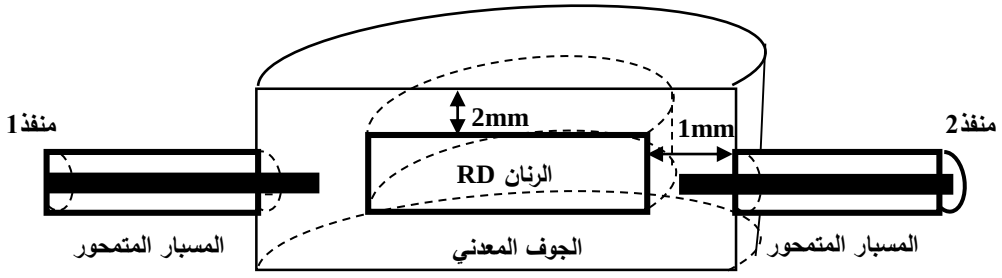


الشكل8 : المسبار الأول



الشكل9 : المسبار الثاني

كما نلاحظ أنه في المسبار الأول يوجد غلاف معدني أما المسبار الثاني فلا يحتوي على غلاف حول مادة التفلون. ومن ناحية ثانية، بشكل عام فإن التحريض بواسطة المسابر بكل أنواعها يتم تحقيقه على الأوجه الجانبية الخارجي للجوف كما هو موضح بالشكل 10.



الشكل10: الشكل العام لتحريض الرنان RD بمسابر متمحورة على الجدران الجانبية للجوف المعدني

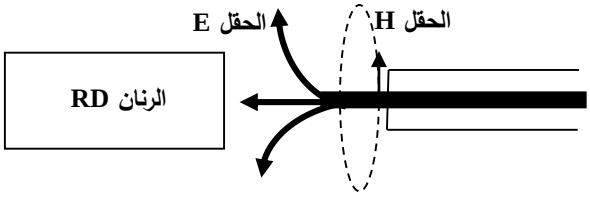
3 -

III – 3– 2 –1 – 1– التحريض باستخدام النوع الأول من المسابر

هنا البنية مكونة من جوف معدني ضمنه الرنان، في هذه البنية الأسطح العلوية والسفلية للجوف المعدني تبعد عن الرنان نفس ارتفاعه (2mm) بينما الجدران الجانبية للجوف تبعد 1mm عن الرنان. النواة المركزية للمسبار تدخل ضمن الجوف المعدني بعمق $l_s = 0.75mm$ أي أن بعد النواة عن الرنان سيكون 0.25mm .

مع الملاحظة أن هذه التقريبات بالأبعاد تمت بعد عدة محاولات من أجل الحصول على اقتران مهم بواسطة المسبار، ولكن كان هناك حذر من حصول تشويش على الأنماط المحرضة.

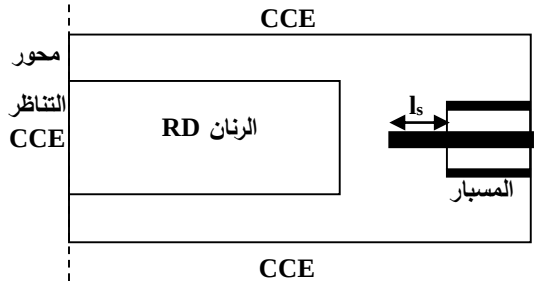
إن شكل الحقل الكهربائي E في المسبار الذي منه قد نتمكن من تحريض الأنماط WE_{n00} و WH_{n00} يمتلك عناصر محورية و معترضة كما هو مبين بالشكل 11



الشكل 11 : شكل الحقل الكهرومغناطيسي للمسبار

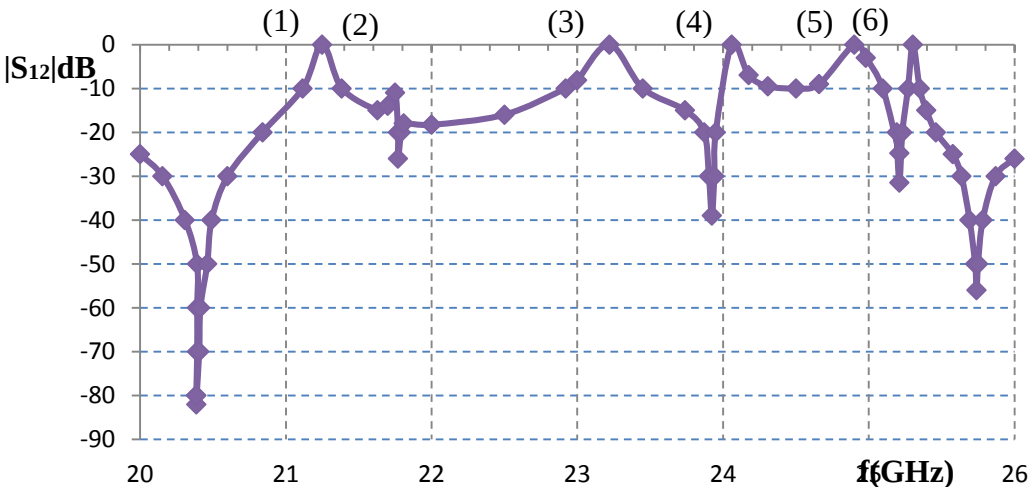
في دراستنا هنا سنستخدم الرنان RD مثقوب بمركزه، و ذلك لأن الأنماط الهامسة ستكون قدرتها محصورة بالقرب من الجدران الداخلية للرنان. لذلك إن وجود الثقب في مركز الرنان لا يشوش غلى الأنماط الهامسة.

إن قطر الثقب سيكون 2 mm ، وهذا ما يسمح بتثبيت الرنان بواسطة قضيب معدني عند التنفيذ العملي. هذا الثقب سيكون منمذج بواسطة ثقب ممعدن عند الدراسة بواسطة العناصر الدقيقة كما هو مبين بالشكل 12. إن وجود الثقب لن يغير الترددات الطنينية للأنماط الهامسة.



الشكل 12 : البنية المدروسة بطريقة العناصر الدقيقة

وبسبب التناظر بالنسبة للبنية، فإنه سنكتفي بتنفيذ الدراسة على ربع البنية بواسطة العناصر الدقيقة ثلاثية الأبعاد و ذلك لتخفيض زمن الحساب. وبعد إدخال إحداثيات البنية و تشكيل الشبكة العنكبوتية الملائمة وكتابة الكودات اللازمة فإنه تم الحصول على تغيرات |S12| كتابع للتردد كما هو موضح بالشكل 13.



الشكل13: استجابة النقل | S12| لمختلف الأنماط كتابع للتردد

ومن أجل معرفة تأثير نوع التحريض على تردد طنين الأنماط، فإنه تم حساب معامل النوعية الخارجي Q_e، وكذلك فقد قمنا بعملية مقارنة بين الترددات الطنينية لمختلف الأنماط وذلك من أجل حالتي الاهتزازات (الحرة و القسرية). كل ذلك موضح بالجدول1.

الجدول 1: الترددات الطنينية ومعامل النوعية الخارجي لمختلف الأنماط

no	النمط	اهتزازات حرة f(GHz)	اهتزازات قسرية f(GHz)	Qe
(1)	W E_{400}	20.81	21.22	470
(2)	نمط طفيلي	/	21.72	/
(3)	WE_{310}	22.99	23. 26	212
(4)	WE_{500}	23.38	24.04	800
(5)	نمط طفيلي	/	24.94	344
(6)	WE_{220}	25.15	25.28	2300

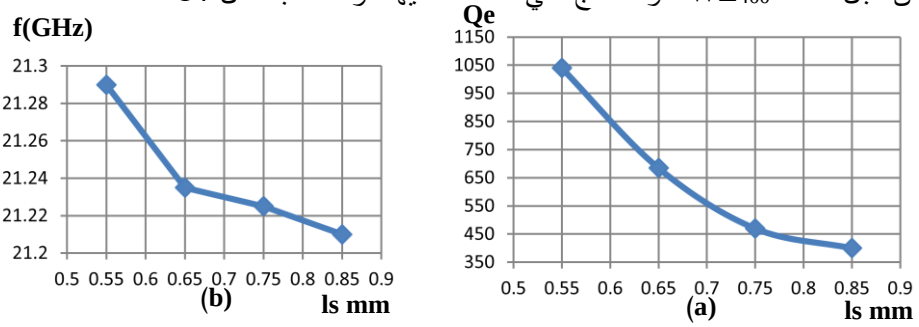
من هذه النتائج يمكن أن نلاحظ أنه فقط الأنماط WE هي المحرضة، التي منها الحقل الكهربائي المشع بواسطة المسبار يكون بشكل أساسي معترض، أما قسمه المحوري فيكون ضعيف لتحريض الأنماط WH. ومن ناحية ثانية فقد لاحظنا أنه بالنسبة للأنماط WE فإن العنصر المعترض الكهربائي يكون أعظمياً في المستوي الذي يقع في منتصف ارتفاع الرنان، لذلك فإن أقوى تحريض سيكون في هذا المستوي.

وقد لاحظنا أنه من أجل هذه الحالة المدروسة، فإن أفضل اقتران حصلنا عليه كان للنمط WE_{400} والنمط WE_{310} . ومن ناحية ثانية، ومن أجل قيمة للرقم الزاوي n عالية فإن القدرة ستكون أكثر فأكثر محصورة على الطرف الداخلي للرنان، وبالتالي سيكون أصعب فأصعب تحريض الأنماط، وهذا ما يفسر الاقتران الضعيف للنمط WE_{500} ، وبالمقابل من أجل للرقم الزاي n ثابت ورقم راديالي m مختلف عن الصفر فإن القدرة سيشع جزء منها خارج الرنان، هذا ما يفسر أن الأنماط WE_{n10} ستكون محرضة بشكل أفضل من الأنماط WE_{n00} .

من الجدول أعلاه نلاحظ وجود ترددات طنينية (طفيلية) نتوقع أنها عائدة من جهة للقضيب المعدني الذي يسمح بتثبيت الرنان RD ومن جهة ثانية للصندوق المعدني الذي يحتوي على الرنان RD .

شيء أساسي ومهم أنه عند التنفيذ العملي والدقيق لهذه البنية فإنه يمكن أن نصادف مشكلة أساسية وهي عملية تعيير بعد مسبار التحريض عن الرنان RD الذي يمكن أن يشوش على الأنماط، وبالتالي فإن موقع المسبار المتمحور سيؤثر بشكل مباشر على معامل النوعية الخارجي، حيث لاحظنا أنه عند التغيير البسيط جداً لموقع المسبار سيتغير معامل النوعية الخارجي بشكل سريع.

لذلك قمنا بتنفيذ حساب للترددات الطنينية ولمعامل النوعية الخارجي من أجل عدة أطوال للمسبار l_s وذلك من أجل النمط WE_{400} . و النتائج التي حصلنا عليها موضحة بالشكل 14



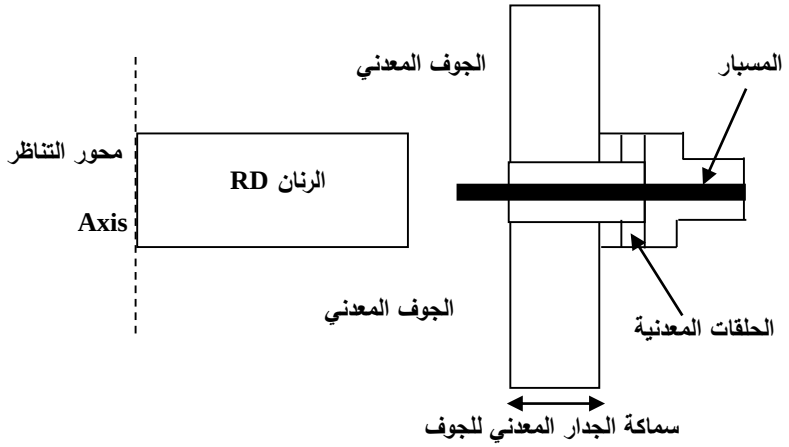
الشكل 14 : تغيرات:-a معامل النوعية الخارجي -b الترددات الطنينية كتابع لطول المسبار ls

من هذه النتائج نلاحظ أنه عندما نزيد العمق l_s للمسبار فإنه يزداد التشويش على النمط WE_{400}، وبالتالي معامل النوعية ينخفض و كذلك التردد الطنيني.

مما سبق، فإننا ننصح عند استخدام هذا النوع من التحريض فإنه من المفضل اختيار مسابر متمحورة أكثر كبراً (ضخمة قليلاً) و مثبتة على الصندوق المعدني، وبالتالي الموقع المراد بين المسبار والرنان RD سيكون أسهل الحصول عليه، وخصوصاً عند تكرار العملية.

III – 3– 2 –1 – 2– التحريض باستخدام النوع الثاني من المسابر

من أجل ضمان التعدين للمسبار، فإنه يجب أن تكون متعلقة بالجوف المعدني، ولذلك من أجل تعيير المسافة بين الرنان RD والمسبار، لذلك، لضبط المسافة بين المسبار و RD، نقوم بإدخال حلقات معدنية بين المسبار والجوف كما هو مبين بالشكل 14



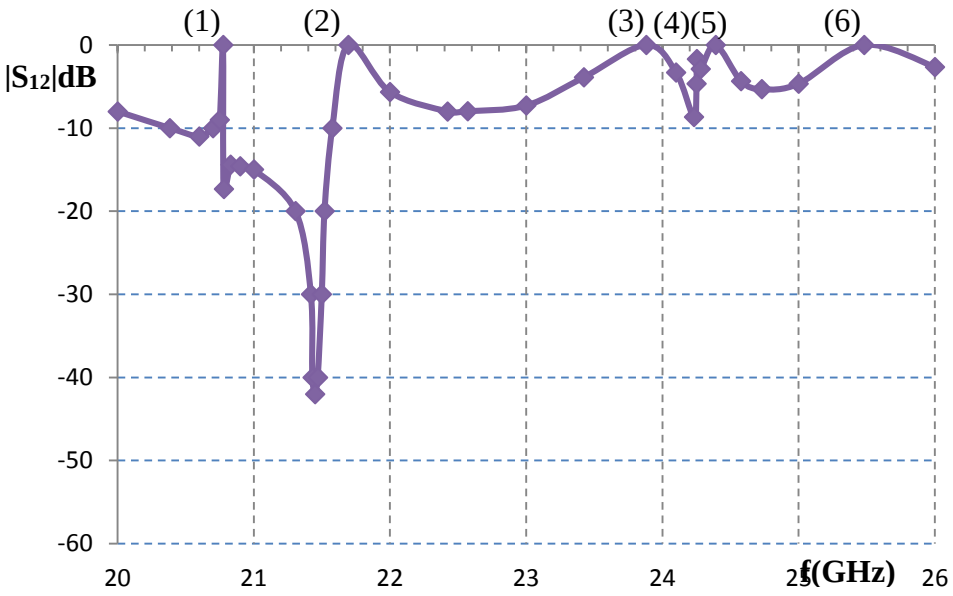
الشكل15: بنية التحريض بواسطة النوع الثاني من المسبار المتمحورة

بهذا النظام فإن المسبار يكون دائماً مثبت بالجوف، وهذه البنية المراد دراستها لها المواصفات التالية:

- السطوح المعدنية العلوية والسفلية للجوف المعدني تبعد عن الرنان RD 2mm
- الجدران الجانبية تكون بعيدة نسبياً من الرنان RD وهي 4mm
- المسبار يدخل داخل الجوف بعمق 2.5mm
- المسافة بين المسبار و الرنان RD هي 1.5mm

إن انجاز الدراسة الكهرومغناطيسية لهذا النظام من التحريض وبواسطة طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد فإنه سيكون كالسابق على ربع البنية و ذلك بسبب التناظرات الهندسية للبنية، و هذا ما يخفض

كثيراً من زمن الحساب. ولذلك وبعد أن قمنا بأنشاء الشبكة العنكبوتية المناسبة والملائمة فقد قمنا بكتابة الكودات اللازمة لهذه البنية. وبالتالي من هذه الدراسة تمكنا من تحديد تغيرات البارامتر |S12| كتابع للتردد كما هو موضح بالشكل 15



الشكل16: استجابة النقل |S12| لمختلف الأنماط كتابع للتردد

وكما سبق، فمن أجل معرفة تأثير التحريض على تردد طنين الأنماط، فإنه تم حساب الترددات الطنينية و معامل النوعية الخارجي Q_e، وكذلك فقد قمنا بعملية مقارنة بين الترددات الطنينية لمختلف الأنماط وذلك من أجل حالتي الاهتزازات (الحرة و القسرية). كل ذلك موضح بالجدول2.

الجدول 2: الترددات الطنينية ومعامل النوعية الخارجي لمختلف الأنماط

no	النمط	اهتزازات حرة f(GHz)	اهتزازات قسرية f(GHz)	Qe
(1)	نمط طفيلي	/	20.72	>20000
(2)	W E_{400}	21.30	21.70	245
(3)	WE_{310}	23.45	23. 82	80
(4)	نمط طفيلي	/	24.26	/
(5)	WE_{500}	23.64	24.34	/
(6)	نمط طفيلي	/	25.50	52

من هذه النتائج يمكننا أن نلاحظ أيضاً أنه لم نتمكن من تحريض الا الأنماط WE بشكل جيد، وأن المستوي المتوسط لمعامل النقل أعلى من 10dB- . ومن ناحية ثانية، في هذه البنية فإنه كانت لدينا صعوبة في عملية فصل الأنماط المحرضة رغم أن معامل النوعية الخارجي منخفض.

لمحاولة حل هذه المشكلة ومشكلة تحريض الأنماط WH ، فإنه نقترح مستقبلاً إجراء دراسة على بنية التي منها يكون التحريض منخفض قليلاً، مثلاً بأن نقوم بإبعاد المسبار عن الرنان RD . بحيث نجد طريقة لا ندخل المسبار ضمن الجوف من أجل التشويش بأقل ما يمكن للأنماط الهامسة.

هذه البنية الجديدة من المتوقع أن تسمح لنا باستخدام جوف بنصف قطر أصغر من الأجواف السابقة، وهذا ما قد يؤثر إيجاباً على الترددات الطنينية وعلى إمكانية تحريض الأنماط WH .

ومن أجل ضمان اقتران مرغوب فإنه يمكن أن نقترح كالسابق استخدام حلقات معدنية للتحكم الدقيق ببعد المسبار عن الرنان RD .

IV – مناقشة النتائج و التوصيات

من خلال هذا البحث تمكنا من:

1 – القيام بتحليل كهرومغناطيسي مفصل لنوعين من أنظمة التحريض بواسطة المسابر المتمحورة وذلك بهدف إمكانية تحريض الأنماط الهامسة الممكن انتشارها ضمن الرنانات العازلة كهربائيا وذلك بالاعتماد على إحدى برامج مكتبة Modulef و هي طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد 3D بالاهتزازات القسرية و الحرة. وذلك بعد أن قمنا بتقديم سريع لمبدأ حساب كلاً من معامل الاقتران دخل – خرج ومعامل النوعية الخارجي.

2 – وبالتالي تمكنا من التحديد الدقيق للبارامترات الكهرومغناطيسية (مركبات وتوزع الحقول الكهرومغناطيسية التي من خلالها حددنا هوية النمط – الترددات الطنينية للأنماط – معامل الاقتران (النقل) – معامل النوعية الخارجي) لبنى مختلفة برنان عازل كهربائياً موجود ضمن جوف معدني، محرض بواسطة مسابر متمحورة لنشر الأنماط الهامسة في هذا الرنان العازل كهربائياً.

3– هذه الدراسة سمحت لنا بالتقييم الدقيق لبعض أنظمة التحريض بواسطة المسابر المتمحورة ، والتي من خلالها حددنا أهم ميزاتها والعوائق التي يمكن أن نصادفها عند التنفيذ العملي للدارات التي

تعتمد على انتشار هذه الأنماط ضمن الرنانات العازلة كهربائياً RD ، فمثلاً كما نعرف فإنه من أجل تنفيذ مرشح بهذه الرنانات وبهذه الأنماط فإنه يجب أن نختار بنى تسمح بالحصول على معامل نوعية خارجي Q_e منخفض، بينما من أجل تنفيذ الهزازات فإنه يتوجب علينا استخدام البنى التي منها معامل النوعية الخارجي Q_e عالي نسبياً. من ناحية ثانية، هذه الدراسة ستحدد لنا أي البنى بنظام تحريضها سيكون لدينا عزل كبير أو صغير بين الأنماط الرنانة، وبأيها سيكون لدينا عدد كبير أو صغير من الأنماط الطفيلية والتي لاحظنا وجودها في البنى المدروسة والتي كان من الصعب تحديد هويتها.

4-ختاماً هذه الدراسة وضعت بين أيدينا بنى رنانة بأنظمة تحريض مختلفة التي ستسمح لنا باختيار البنية المناسبة للتطبيق المناسب في تصميم الدارات المتكاملة غير الفعالة الميكروية مثل: موزعات الاستطاعة Distributors of puissance ، المرشحات Filters – القارنات الاتجاهية Directing Couplers، الهزازات Oscillators، .... الممكن استخدامها في مجال الاتصالات الحديثة.

وبما يخص الأعمال المستقبلية لهذا البحث فإنه كما ذكرنا أعلاه من أجل سهولة فصل الأنماط المحرضة و إمكانية تحريض الأنماط WH فإننا نقترح إجراء دراسة على بنية التي منها يكون التحريض منخفض قليلاً، وذلك بأن نقوم بإبعاد المسبار عن الرنان RD . بحيث نجد طريقة لا ندخل المسبار ضمن الجوف من أجل التشويش بأقل ما يمكن على الأنماط الهامسة.

هذه البنية الجديدة من المتوقع أن تسمح لنا باستخدام جوف بنصف قطر أصغر من الأجواف السابقة، وهذا ما قد يؤثر إيجاباً على الترددات الطنينية وعلى امكانية تحريض الأنماط WH .

ومن ثانية، ومن أجل ضمان اقتران مرغوب فإنه يمكن أن نقترح كالسابق استخدام حلقات معدنية للتحكم الدقيق ببعد المسبار عن الرنان RD .

المراجع العلمية

[1]- Hunter L.C," Computation Of Coupling Between WGM Dielectric Resonators And a Microstrip Transmission Line", IEE Proc, Mirow.Antennas. Propag.vol.142.nº3,1995.
[2]- Marcatilli E.J.," Dielectric Rectangular Waveguides And Dielectrical Coupler For Integrated Optics", MELECON, Bari, 2000, Italie,.
[3]- Cros P.,"These nº44-2021, Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes ", 2021-France.
[4]- KOSHIBA M.,"Vectorial Wave Analysis Of Dielectric Waveguides For Optical Integrated Circuits Using Equivalent Network Approach", JNOG 2022, France.
[5]- Jiao X.H.," Filtres Miillimetriques a Resonteurs Dielectriques", These nº05-2020, Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes ", 2020-France.
[6]- Disiner R.,"These nº65-2022 Limoges", France.
[7]-Combes P.F. "Microondes : Lignes, Guides et Cavites". Dunod,ISBN 210002840 5 , 1996 Paris
[8]-Ferrari Ph. "Electroniques des Radiofrequences et des Hyperfrequences", Academic Year 2019-2020 ,2020- Joseph Fourier University-France
[9]- Combes P.F. , "Circuits Passifs, Propgtion, Antennes". Dunod,ISBN 1998-Paris.
[10]- Badev A., Nov.,"Matériaux diélectriques à faibles Pertes utilisés comme résonateurs et filtres dans les circuits micro-ondes", Thèse de doctorat université Toulouse, 2008 (France).
[11]-Binsangou,V., "These nº6-99 Limoges", 1999- France.
[12]- Zuhair A. Tayyeb, "Use of Cr-39 Polymer for Radiation Dosimetry – JKAU": Eng. Sci., Vol. 22 No.1, pp: 79-96 (2011 A.D. / 1432A.H.) 2011, Doi: 10.4197 / Eng. 22-1.5. 00split?, Queens College-CUNY, NEMSS- Middletown.
[13]- Dssertations/ 2022Theses on the topic"Mode de galerie" 2022.
[14]- Michael L. Gorodetsky, Aleksey E. Fomin, 2005- "Geometrical theory of whispering modes", Arxiv: physcs/0509226v1 Sep. 2005.
[15]- Faham M., "Analyse regoureuse par la method des elements finis des structures resonnants passive micro-ondes" Application au filter millimetrique a resonateur dielectrique", Universite de Tlemencen, 2015.

[16]- Lemiev-Leduc C., "Microcavite a modes de galerie en polymere pour la detection de gaz, Polytechnique de Monterial", 2019, Universite de Monterial.
[17]- Daoud T. "Analytic And Numeric Study for Dielectric Resonators for design and execute microwaves integrated circuits for use them in communication devices", 2019, Journal Of Hama University, Nº 83.
[18]- Daoud T. " A detailed study of the coupling between Dielectric Resonators and various excitation systems for the design and execute of microwaves integrated circuits for use in communications devices ", 2019, Journal Of Hama University, Nº 130.
[19]- Kersuzan C. Celai S., Willy Daney de Marcillac Pons T.,Agnes Maitr, " Photolithographed Whispering gallery mode microdisk cavites coupled to semiconductor quantum dote", 2024,Sorbonne Universite- France.
[20]- Salzenstien P., Diallo S., Henriet R., Balakirva I., Saleh K., "Resonateurs optiques a mode de galerie appliques aux oscillateurs et aux peignes de frequencies", 2014, Journee du club UMR Foton Lannion.
[21]- Wei Hong, Xiaohan Sun, "Micro-disks embedded microring for optical filter", Jiangsu Provincial Center for Optical Sensors and Optical Communications Network Technology, Lab of Photonics and Optical Communications, Southeast University, #2 SiPaiLou, Nanjing 210096, China
Article history: Received 4 July 2010 Accepted 15 December 2010 Available onlinexxx.
[22]- Nigon F. "These nº21-1997 Limoges", 1997-France.
[23]- Michael L. Gorodetsky, Aleksey E. Fomin, "Geometrical theory of whispering gallery modes", arxiv:Physics/0509226v1/ Physics Optics2005.
[24]- Sacha Bergeron, "Microcavités diélectriques circulaires et applications", Mémoire du Maitrise ES Sciences Appliquées, Ecole polytechnique de Montréal, 2010Univ. de Montréal.
[25]-Lemieux-Leduc,C.,"Microcavites a modes de galerie en polymere pour la detection de gaz", These polytechnique, 2019, Montreal.
[26]-Kersuzan C., Celaj S., Willy Daney de Marcillac, Pons T., Ages Maitre, " Photo lithographed Whispering Gallery Mode Microdisk Cavities Coupled to Semiconductor Quantum Dots", 2024, ACS Photonics, 11(4), 1715-1723.
[27]-D.R. Kasanov and A.M. Monakhov,"Open Whispering Gallery Modes Resonators", Loffe Institute,Politeknicheskaya,2024, 26,St.Peterspurg, 194021, Russia
[28]-SCHILDERS,W.H.A,TER MATEN, E.J.W., "Special Volume: Numerical Methods in Electromagnetics" , 2005-London, UK.
[29]-MATTHEW, N.O., "Numerical Techniques In Electromagnetics". ISBN, Second Edition-New York, 750p., 2000 .
[30]-MATTHEW, N.O., "Elements Of Electromagnetic", ISBN, Third Edition-New York, 765p., 2001.

[31]-A.Bendali," Methode Des Elements Finis", Insa-Toulouse,2013.
[32]-F. Bourada," Methode Des Elements Finis", Institut des science et de la Technologie, Tissemsilt-Algeria, 2020
[33]-Ramier A., "Integration de guides d'onde et micro-resonateurs a modes de galerie par assemblage a puce retournee", Polytechnique de Monterial, 2014,Universite de Monterial.
[34]- Jean-Michel Le Floch, "Modélisation de nouveaux résonateurs diélectriques à forts coefficients de qualité pour des applications de métrologie", These nº4-2007 Limoges, 2007,France
[35]- Samiha Mekerta, "Modélisation électromagnétique de structures microondes planaires à résonateurs diélectriques, application au filtrage microonde", « Nature & Technologie ». n° 05/Juin 2011. Pages 17 à 25.
[36]- A. Mazzei et al, "Controlled Coupling of Counter propagating Whispering-Gallery Modes by a Single Rayleigh Scatterer: A Classical Problem in a Quantum Optical Light", Phys. Rev. Lett., vol. 99, art. no. 173603, 2007. [37]- Wojciech ´Smigaj, "Conception et modélisation numérique de composants optiques en nanophotonique intégrée", Thèse nº1-2011 Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III), France.
[38]-S. Savard," Fabrication et Etude de Composants Microondes Planaires Supaconducteurs", Universite de Sherbrooke- Canada, 2004.
[39]-Le Floch J.M., "Modelisation de nouveaux resonateurs dielectriques a forts Coefficients de qualite pour des applications de metrologie", Universite de Limoges, 2007, France.