

تصميم مقسم وجامع استطاعة قطري متعدد المداخل أو المخارج بتقنية الحجرة الطنينية

طالبة الدراسات العليا: آية خطيب

المعهد العالي للعلوم التطبيقية و التكنولوجيا

اشراف الدكتور: علي حسن + د. علاء الدين سرحان

المخلص

تقدم هذه الورقة البحثية دراسة ومحاكاة لمجمع استطاعة قطري يعمل بتقنية الحجرة الطنينية، بثمانية منافذ دخل ومنفذ خرج وحيد، وذلك عند التردد 3.1 GHz وبالاعتماد على الكبل المحوري لتغذية المجمع. تم دراسة إدخال حواجز معدنية بين منافذ الدخل على السطح العلوي ثم السفلي للحجرة من ناحية طولها وعرضها وسماكتها، بهدف الوصول لأفضل أداء للمجمع. بينت نتائج المحاكاة للتصميم النهائي الوصول إلى نسب تقسيم استطاعة متساوية وتحقيق معامل انعكاس جيد عند مختلف المنافذ وكذلك عزل جيد جداً بين منافذ الدخل المتجاورة، وذلك مقارنة بالأبحاث المشابهة.

الكلمات المفتاحية: مجمع/ مقسم استطاعة قطري، حجرة طنينية، حواجز معدنية.

Design of a Multiway Radial Cavity Divider/Combiner with Coaxial Ports

Abstract

This paper presents a study and simulation of a radial cavity power combiner/divider, with 8-input ports and one output port, at center frequency of 3.1 GHz, and using coaxial cable to feed the combiner. The insertion of iris metal between input ports on the upper and lower surface of the cavity has been studied in terms of its length, width and thickness, in order to reach the best performance of the combiner/ divider. The simulation results for the final design show equal power division ratios, good reflection coefficient at different ports, as well as very good isolation between adjacent input ports, compared to similar research.

Keywords: Radial power combiner/ divider, resonant cavity, iris.

1- مقدمة

تعتبر الاستطاعة العالية مطلباً أساسياً في العديد من أنظمة الاتصالات الفضائية والرادارية، ولا تقتصر حاجتها على توليد استطاعة عالية بل تحتاج أيضاً لحجم صغير ووزن خفيف وأداء عالي.

أحد الحلول السائدة لتحقيق الاستطاعة المطلوبة هو مضخم صمام الموجة الراحلة $[TWTA]$ travelling wave tube amplifier، وذلك لكونه يقدم أداءً موثوقاً واستطاعة خرج عالية بحيث تصل إلى عدة ميغاواط. لكن يعاني هذا المضخم من عدة سلبيات تتمثل بحجمه الكبير، وسعره المرتفع، وحاجته لزمن إحماء، وإلى جهود مستمرة مرتفعة [1].

لذلك اتجه البحث لتطوير ودراسة أنواع أخرى من المضخمات، مثل المضخمات نصف الناقلية $[SSPA]$ solid state power amplifier، التي تتميز بصغر الحجم والوزن ووثوقية الأداء، إضافة إلى زمن إحمائها القصير، وفعاليتها العالية، وتقدم خطية أفضل، وجهد تغذية أقل. وذلك فضلاً عن رخص ثمنها وسهولة استبدالها في حالة الفشل. لكن تكمن العقبة الرئيسية في محدودية استطاعة خرجها، التي تختلف حسب تقنية التصنيع فمثلاً لا تتجاوز استطاعة الخرج في المضخمات Gallium Arsenide (GaAs) عشرات الواط، أما المضخمات Gallium Nitride (GaN) لا تتجاوز الاستطاعة المقدمة فيها مئات الواط [11].

حتى نستخدم النوع السابق من المضخمات لميزاتها المختلفة، كان لابد من التغلب على محدودية استطاعة خرجها من خلال تجميع إشارة الخرج لمجموعة منها بواسطة بنية

المجمعات التي تلعب دوراً هاماً في الدارات الميكروية ذات الاستطاعة العالية، وذلك لميزاتها المختلفة التي نذكر منها:

- (1)- الكلفة العامة للمجمعات أقل من كلفة مضخمات الاستطاعة العالية.
- (2)- ضجيج الصفحة للمجمع أقل بـ $1/N$ من ضجيج الصفحة في المضخم المفرد.
- (3)- يتميز المجمع بخاصية التراجع التدريجي، أي استمرار العمل حتى في حالة خروج أحد المضخمات عن الخدمة.
- (4)- تسهيل تنفيذ دارات التضخيم عريضة الحزمة التي تعد مرغوبة ببعض التطبيقات.

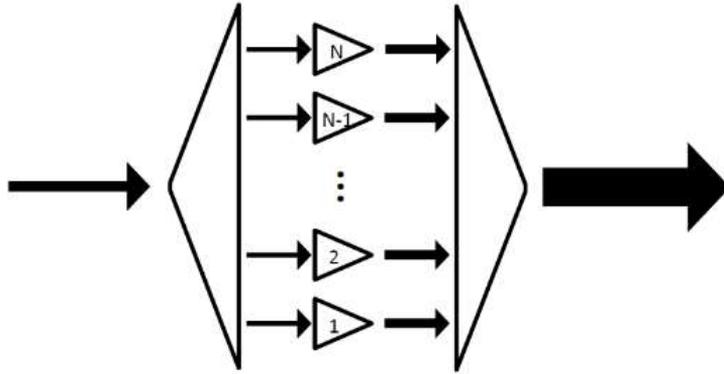
2- هدف البحث

يتحدد الهدف من هذا المشروع بدراسة بنية مجمعات الاستطاعة المكروية وطرق تنفيذها وخصائصها، ثم تبني الطريقة الأفضل للتجميع واختبارها في بيئة المحاكاة الإلكترونية وديناميكية وتنفيذها بشكل عملي.

نشأت فكرة المجمعات المكروية من الحاجة لزيادة الاستطاعة بأقل كلفة وأفضل أداء. فكلما زاد عدد المضخمات المجمع كلما زادت الاستطاعة الناتجة وقلّ ضجيج الصفحة الكلي، لكن بالمقابل سيزيد تعقيد البنية.

ينصح باستخدام مضخمات ذات الحجوم الصغيرة، وذلك للأسباب التالية: أنها تتمتع بفعالية استطاعة مضافة مقارنة بالأجهزة ذات الحجوم الكبيرة، وتصنيعها أسهل وكلفتها أقل، وسهولة تحقيق دارات عريضة المجال الترددي باستخدامها [12].

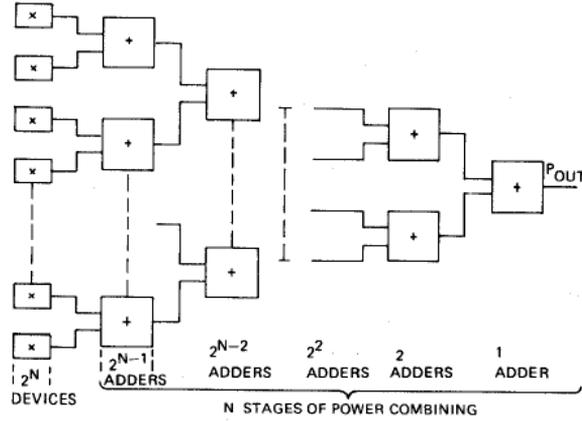
أما عن إجرائية عمل المجمعات/المقسمات، فيمكن شرحها بأن المقسم يقوم بتقسيم إشارة الدخل إلى N إشارة، كل منها سيتم تضخيمها باستخدام أحد المضخمات نصف الناقلية، ليتم تجميع N إشارة مضخمة باستخدام مجمع الاستطاعة، فنحصل على استطاعة خرج مرتفعة [4].



الشكل 1: رسم توضيحي لإجرائية عمل مجمعات/مقسمات الاستطاعة.

أما عن أنواع المجمعات/المقسمات، فتقسم مجمعات الاستطاعة المكروية من ناحية طريقة التجميع إلى نوعين: مجمعات ذات بنى تسلسلية (متعددة الخطوات)، ومجمعات ذات بنى تفرعية (بخطوة واحدة).

ومن أشهر مجمعات البنى التسلسلية أو متعددة الخطوات، مجمعات البنية الشجرية tree structure أو corporate structure، التي يشترط أن يكون عدد الأجهزة المجمعة من مضاعفات 2. وهي موضحة بالشكل 2:



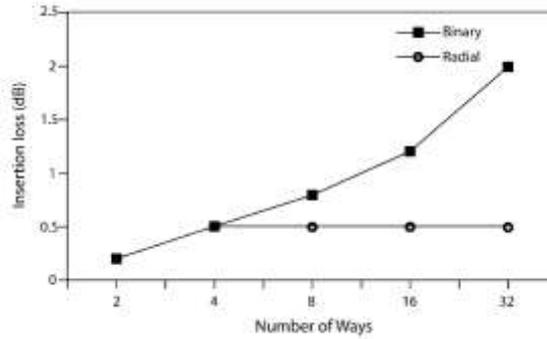
الشكل 2: مجمعات الاستطاعة ذات البنية الشجرية.

تكن مشكلة هذه المجمعات أن الجوامع تعاني من ضياعات، إضافةً لوجود عدد كبير من الوصلات ومقاطع خطوط النقل، التي تزيد من مستوى الضياعات وتؤدي إلى تدهور كبير في كفاءة التجميع الكلي، خاصة بالنسبة لعدد أكبر من المراحل [5].

ومن مجمعات البنى متعددة الخطوات أيضاً الجوامع المتسلسلة Chain combiner. تتميز هذه البنية بإمكانية إضافة مرحلة جديدة ببساطة، عن طريق توصيل المصدر الجديد.

نظرياً يمكن بناء مجمع من عدد كبير من العناصر، لكن الضياعات في الروابط الاتجاهية تقلل من كفاءة المجمع وعرض المجال الترددي، الذي يمكن تحقيقه باستخدام هذه الطريقة، إضافةً إلى أنه من الصعب بناء روابط اتجاهية ذات معاملات ربط عالية عند دمج عدد أكبر من الأجهزة [5].

النوع الثاني من المجمعات هي المجمعات ذات البنى التفرعية (بخطوة واحدة)، ويقصد بها توصيل منافذ الإدخال بالتوازي مع عقدة مجمعة، أي جمع استطاعة منافذ الدخل مباشرةً بخطوة واحدة دون الحاجة لمعالجتها عبر مراحل تجميع متعددة، وبالتالي ضياعات التوافق ستتناقص بشكل واضح مقارنة مع البنية التسلسلية وذلك بسبب قصر مسار التجميع [6]. كما يظهر في الشكل 3 (بحيث يقصد بالـ binary البنية التسلسلية، وبالـ radial البنية المتوازية).



الشكل 3: مقارنة البنية التسلسلية والبنية التفرعية للمجمعات من حيث ضياعات الإدخال. ومن إيجابيات هذه الطريقة أيضاً تدهور الأداء التدريجي graceful degradation في حال خروج أحد المنافذ عن الخدمة إضافة لإمكانية الاستبدال السريع، بمعنى استبدال الأجزاء المعطلة من النظام أثناء العمل.

علماً أنّ التصميم الحذر والدقيق لهذه البنى تمكنا من تحقيق عرض حزمة واسع والوصول إلى فعالية تجميع تصل حتى 90%. فضلاً عن أن فعالية التجميع لا تتعلق بعدد المضخمات على عكس الطريقة التسلسلية [6].

يمكن أن تكون هذه البنى قطرية أو غير قطرية، ولكن البنى القطرية هي السائدة بسبب استغلالها الذكي للمساحة مما يسمح باستخدام عدد أكبر من المنافذ للتجميع. وبما أننا نستخدم في هذا المشروع البنية القطرية، سنتحدث بتفصيل أكبر عن أنواعها المختلفة:

- **مجمعات قطرية تعتمد على الحجرة Radial Cavity–Based Combiner:** هذا النوع من المجمعات توجه الموجة الكهرطيسية ضمن الوسط بأقل ضياع. ونميز نمطين: مجمعات تعتمد على حجرة أسطوانية طنانة، ومجمعات تعتمد على أدلة موجة متكاملة على القاعدة [SIW] Substrate Integrated Waveguide. تتأثر فعالية مجمعات الحجرة الأسطوانية بالتسريب بين منافذ الدخل (العزل) الذي يحدث بسبب الأنماط الغير مرغوبة في الحجرة، ويمكن الحد منها من خلال الشقوق أو الحواجز، كما يمكن تحسين عرض الحزمة والتوافق بإضافة sub-cavity. يستخدم هذا النوع من المجمعات في حالة عرض حزمة محدود؛ حيث يتم تصميم الحجرة لتردد طنين معين [6].
- **مجمعات قطرية لا تعتمد على الحجرة Non–Cavity–Based Combiner:** تعتمد على تقنية microstrip أو Strip line، وذلك لكونها مناسبة للتوافق مع الدارات المتكاملة. ومن إيجابيات هذه التقنية هو إمكانية تحقيق العزل والموافقة باستخدام عناصر lumped مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تحتاج متطلبات عزل عالية. من أمثلة هذه المجمعات Wilkinson N–way combiner.
- **المجمعات القطرية المكانية:** تستخدم هذه المجمعات واجهات الهوائي للتجميع، وتتميز بكونها توفر نطاقاً ترددياً عريضاً، وغالباً ما تُستخدم للترددات العالية، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات داخل الاتصالات، حيث يكون النقل العالي للبيانات أمراً مهماً [4].

الاختيار بين هذه الأنواع المختلفة يعتمد على مجموعة من المتطلبات مثل: عرض الحزمة المطلوب، والفعالية، والحجم، والعزل، وأخطاء الصفحة والمطال والتدهور التدريجي.

3- مواد وطرق البحث

تم في المرجع [7] تصميم مجمع حجرة طنينية مع 4 منافذ و 8 منافذ، باستخدام نواقل محورية. تتحدث المقالة أنه يتطلب لتصميم مجمع مع فقد تمرير أقل ما يمكن:

1- حجرة ذات معامل جودة عالي.

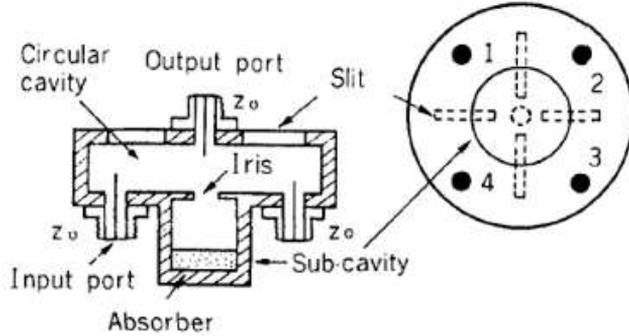
2- ضياعات دخل وخرج أقل ما يمكن.

تم دراسة العزل بين المنافذ من خلال مصفوفة الممانعة لتحديد شروط تقليل الترابط بين المنافذ، بحيث تعتمد على إيجاد القيم الذاتية والمتجهات الذاتية للمصفوفة. من قيم الأشعة الذاتية نحصل على أشكال التيارات في حالة 4 منافذ للمجمع، والأنماط المرافقة لكل حالة تيار مجمعة بالجدول التالي:

جدول (1): الأنماط المرافقة للتيارات.

التيار	النمط المرافق للتيار
i_0	TM_{0Q0}
i_1	استقطاب دائري عكس عقارب الساعة TM_{1Q0}
i_2	TM_{2Q0}
i_3	استقطاب دائري مع عقارب الساعة TM_{1Q0}

Q في الجدول السابق معامل صحيح ويدل على النمط غير المرغوب المرافق للتغذية. الأنماط غير المرغوبة لا تتجه نحو المركز مما يؤدي إلى انعكاس الإشارة على منافذ الدخل، سيتم استخدام شقوق وأشباه حجرة من أجل امتصاص هذه الأنماط غير المرغوبة.



الشكل 4: تموضع الشقوق وشبه الحجرة ضمن الحجرة الأسطوانية للمجمع.

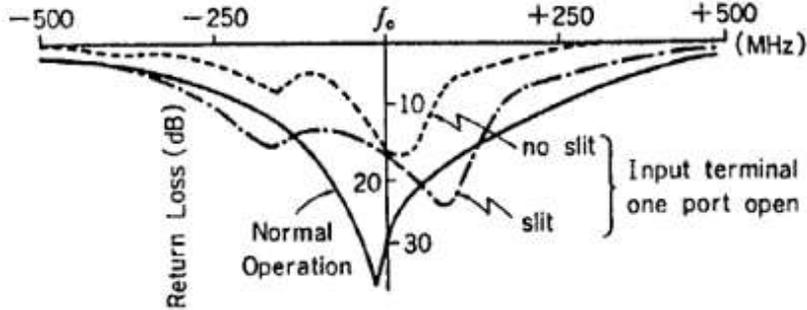
ترتبط الطنانة الفرعية sub-cavity مع النمط الدوراني TM_{1Q0} بحيث تتكون من مرشد موجة يمرر النمط TE_{11} فقط، ويوجد في نهاية أحد جانبي مرشد الموجة ماص مايكروني. أما الشقوق طولها $\lambda/2$ وتقطع تيار النمط TM_{2Q0} المتدفق على السطح السفلي للحجرة، مما يؤدي لإشعاع الطاقة خارجاً.

من أجل مجمع مع 8 منافذ، تكون الإجرائية مشابهة لمجمع بـ 4 منافذ، فالأنماط غير المرغوبة ذات استقطاب دائري مع عقارب الساعة، وعكس عقارب الساعة وهي الأنماط

$$TM_{4Q0}, TM_{3Q0}, TM_{2Q0}, TM_{1Q0}$$

النتائج التجريبية لشبه الحجرة والشقوق:

تحديد نتائج وضع الشقوق وشبه الحجرة من خلال قياس العزل بين منافذ الدخل، بحيث تم تغذية منفذ واحد وقياس مستوى الاستطاعة لكل المنافذ، سنلاحظ تراكب النمط المرغوب مع الأنماط الأخرى بشكل لا يمكن فصله. كان فقد الإشارة العائدة حوالي 8 dB ما عدا نقطة الطنين، كما تجدر الملاحظة لعدم وجود اختلافات واضحة في النتائج عند استخدام شقوق بعرض 1 mm و $1-5 \text{ mm}$. كما تم دراسة تأثير خروج أحد المنافذ عن الخدمة، بحيث تم وضعها دارة مفتوحة، إضافة لتأثير وجود شقوق وعدم وجودها.



الشكل 5: فقد الإشارة العائدة لمجمع بثمانية منافذ بحالة خروج أحدها عن الخدمة.

أما فقد الإدخال فتبلغ قيمته عند التردد 12 GHz حوالي 0.25 dB لمجمع بأربعة منافذ، و 0.45 dB لمجمع بثمانية منافذ، بحيث تراجع فقد الإدخال باستخدام الشقوق وشبه الحجرة حوالي 0.05 dB بالنسبة لبنيتي المجمع. في المرجع [8] تم استخدام دليل الموجة بدلاً من الناقل المحوري لإشارة الخرج فقط، وهذا يزيد تعقيد البنية لكن يحسن من نسبة الأمواج المستقرة وفقد الإعادة. التحدي الأساسي في العمل هو تحقيق فقد إدخال أقل ما يمكن، علماً أن فقد الإعادة وتوافق الدخل والخرج وضياعات الناقل كلها تؤثر على فقد الإدخال.

ومع أننا نستخدم دليل موجي لإشارة الخرج، لكن معاملات التبعثر S للمنافذ الستة عشر قريبة من بعضها، كم أن نسبة الأمواج المستقرة يتم تحسينها من خلال تقنيات التصنيع. تقوم النواقل المحورية بدور مرشح لأنماط الانتشار، بحيث ترشح الأنماط العالية التي يتم انتشارها عند استخدام الدليل الموجي، بحيث يصل رفض النمط لحوالي 37 dB، ويمكن اعتبار أن النمط العرضاني TEM سيتواجد فقط. مما يؤدي إلى توزع متجانس لكل منافذ النواقل المحورية، أي أن بارامترات المنافذ قريبة من بعضها.

ثم تعرض المقالة نتائج التصميم الناتجة عن المحاكاة والتنفيذ العملي. في البداية يتم عرض فقد الإعادة وكيفية تغييره مع تغير طول الناقل المحوري، بحيث تصل قيمة فقد الإعادة إلى 22 dB على المجال 4.4-5 GHz مع عرض حزمة 22%. أما بالنسبة لفقد الإدخال فقيمه المثالية هي 12.04 dB - وهي مساوية لقيمة 1/16، لكن نتائج المحاكاة تعطي قيم أقل بـ 0.06 dB للقيمة المثالية.

يتحدث المرجع [6] في بدايته عن المقارنة بين المجمع القطري والمجمعات الشجرية والثنائية، ويبرهن حسب المراجع على أفضلية المجمع القطري من حيث الكفاءة والضياعات وقدرة التجميع. يتكون المجمع القطري من ثلاث أقسام: المغذي، ومسار التقسيم، والمقسم.

المغذي هو ناقل محوري موصول مع خط دائري لا نهائي. أما مسار التقسيم أو الخط الدائري فهو عبارة عن خط نقل قليل الضياع مع نقطة تغذية في منتصفه، حيث تتوزع الطاقة بشكل منتظم للخارج بالنسبة لنمط الانتشار مع مركبة الحقل الكهربائي المحوري. علماً أن ضياع هذا الخط أقل من خط نقل شرائحي microstrip (يمثل ضياعه 1/3 من ضياع خط النقل الشرائحي ذي الممانعة المميزة 50Ω).

يجب تغذية الخط الدائري بشكل متناظر لمنع انتشار الأنماط المرتفعة (بحيث الاستقرار الميكانيكي، التغذية المتناظرة، واختيار المأخذ الخارجي للناقل المحوري للمغذي، هي

المفاتيح لتحقيق تغذية متوازنة ومنتظمة)، فانتشار أنماط عليا سوف تزيد من الضياع، وعدم توازن المطال والصفحة بين المنافذ الطرفية (النمط المسيطر ينتشر بشكل قطري، أما الأنماط العليا تنتشر بشكل محيطي)، بحيث النمط المسيطر يعطي توازن بالصفحة لكل المنافذ بينما الأنماط العليا تغير قطبيتها بشكل دوري بالاتجاه المحيطي وذلك كل $\frac{\pi}{n}$ حيث n رقم النمط أي تسبب عدم توازن بالصفحة متغير.

المسار المشترك (القسم الأوسط) هو عبارة عن قرص دائري محمل عند حافته بحلقة مقاومة لتوفير التخميد لأنماط الانتشار ذات المراتب العليا المحيطية، مع الحفاظ على عزل مناسب بين المنافذ.

يتفرع القرص إلى نواقل شرائحية تُكون المقسم، والتي تستخدم لتغذية المضخمات وهي تسبب ضياع، ويجب أن تكون أطوالها قصيرة قدر الإمكان لزيادة كفاءة المجمع.

يقدم المرجع [9] تصميماً عبارة عن مجمع استطاعة قطري بمنافذ أدلة موجية وتم اختياره بفضل صفاته المميزة (التي تتمثل بالضياعات المنخفضة، والقدرة على التعامل مع الاستطاعات العالية وعرض المجال الترددي الواسع). وسيتم استخدام خط نقل مخروطي موصول مع مأخذ [SMA] SubMiniature version A بممانعة 50Ω (لموافقة الدليل الموجي مع المأخذ SMA)، وتم فصل المنافذ الطرفية عن بعضها من خلال صفائح معدنية شاقوليه بهدف تحسين العزل.

تم وصل الناقل الداخلي للمأخذ SMA مع السطح العلوي لخط النقل المخروطي بهدف تقليل ضياع الإدخال.

تتعلق الممانعة المميزة لخط النقل المخروطي بزاوية التصميم فقط، مما يجعل خط النقل هذا عريض الحزمة الترددية.

إن النمط المسيطر ضمن الدليل الموجي هو TEM؛ حيث الحقل E موجود باتجاه Z والحقل H متموضع على دوائر متحدة المركز؛ بحيث الحقول تشبه بتموضعها حالة دليل

الموجة المستطيل. ثم نتحدث المقالة عن قياس الممانعة المميزة للناقل القطري وخوارزمية إيجادها.

4- النتائج ومناقشتها

سنعمل في البداية على فهم مكونات المجمع وخصائص كل مكون والطريقة التي يجب أن يصمم بها، لنصبح بعدها قادرين على البدء بالتصميم.

• الحجرة الطنينية:

لفهم مبدأ عمل الحجرة الطنينية علينا أولاً توضيح مفهوم الطنين، الذي يعني وجود موجة واردة قطعت مسافة معينة ثم اصطدمت وانعكست، فتتلاقى الموجة الواردة مع المنعكسة وتجتمعان بشكل بناء. علماً أنّ الطنانة المثالية عديمة الضياع هي التي لا تمتلك أي فتحة للتغذية أو لإشارة الخرج. بهذه الحالة ستهتز الموجات ضمن الحجرة للأبد (بشرط أن يكون المعدن مثالي). إضافة منفذ دخل أو الخرج يكافئ إضافة عناصر ممانعة مما يسبب ضياعات وإزاحة في تردد الطنين، كما أن معدن الحجرة ليس مثالياً. في حال كان وسط سير الموجة الراحلة هو دليل موجي ستقطع الموجة مسافة $n\frac{\lambda}{2}$ (شرط انتشار الموجة ضمن موجة الموجة تشكل الأمواج المستقرة) [10].

إن الحجرة الأسطوانية هي عبارة عن دليل موجة أسطواني تم قصر نهايته بصفائح معدنية، مما يكسبه تناظر دائري والذي يؤدي بدوره لبعدين محتملين للطنين، الأول ارتفاع الأسطوانة d (اتجاه الانتشار)، والثاني الاتجاه العامودي عليه.

من أجل دراسة الحقول الكهرومغناطيسية، نأخذ الشروط الحدية عند جانبي الحجرة $(z = 0, d)$ وهذا يوافق انعدام تابع بيسل أو مشتقه. في حالة الحقل الكهربائي TE_{nm} سنرمز لجذور بيسل ρ'_{nm} وبشكل مشابه بالنسبة للحقل المغناطيسي TM_{nm} سنرمز

لتوابع ببسل ρ_{nm} . فنحصل على العلاقة التالية المعبرة عن الحقل الكهربائي كما وردت في المرجع [4]:

$$\vec{E}_t(\rho, \phi, z) = \underbrace{\vec{e}(\rho, \phi)}_A \underbrace{(A^+ e^{-i\beta_{nm}z} + A^- e^{i\beta_{nm}z})}_B \quad (1)$$

يعبر التابعين A و B عن تغيرات الموجة العرضانية للموجة الواردة والمنعكسة ضمن دليل الموجة، بعد تطبيق الشروط الحدية نحصل على أن مطال الموجة الواردة والمنعكسة يجب أن يكونان متعاكسان $A^+ = -A^-$ ، وهذا يعطي علاقة لتحديد ارتفاع الأسطوانة من الشكل: $\beta_{nm}d = l\pi$ حيث l أي عدد صحيح، و β_{nm} هو معامل الانتشار ضمن الحجرة الذي يعطى بالعلاقات التالية بالنسبة للحقل الكهربائي والمغناطيسي، كما وردت في المرجع [4]:

$$\text{TE :} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 + \left(\frac{\rho_{nm}'}{a}\right)^2} \quad (2)$$

$$\text{TM :} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 + \left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2} \quad (3)$$

حيث $k = w\sqrt{\mu\epsilon}$ معامل الانتشار في الخلاء، بإعادة ترتيب العلاقة السابقة نحصل على ترددات القطع:

$$\text{TE :} \quad f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\rho_{nm}'}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (5)$$

$$\text{TM :} \quad f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (6)$$

تم استخدام دليل جديد وهو l الذي يعبر عن وجود أمواج مستقرة في جهة الانتشار.

يمكن دراسة ممانعة الحجرة الأسطوانية بالاعتماد على نموذج دائرة الطنين التفرعية فبتطبيق نظرية الدارات عليها، نحصل على ممانعة الحجرة التي تعطى بالشكل التالي، كما وردت في المرجع [4]:

$$Y(w) = \frac{1}{R} + \frac{1}{jwL} + jwC; \quad Z = Y^{-1} \quad (7)$$

ويمكن التعبير عن معامل الجودة للحجرة بدلالة عناصر الدارة: $Q = w_0RC$

حيث $w_0^2 = \frac{1}{LC}$ تردد الطنين. مما سبق يمكن التعبير عن ممانعة الحجرة الطنينية بالعلاقة التالية:

$$Z = -\frac{\frac{jw}{C}}{w^2 - w_0^2(1 + \frac{j}{Q})} \quad (8)$$

السؤال الآن، كيف يمكن تغذية الحجرة الطنينية؟

يجب مراعاة عدد من الاعتبارات عند تغذية الحجرة وهي: الترابط بين الطنانة والتغذية، وتردد إشارة الدخل وتموضعها، ودعم حقل إشارة التغذية لحقل نمط الطنين وهذا يعني أن يكون حقل التغذية أعظمي وبهذا يغذي مجال الرنين.

يحتوي نظام الطنين عادةً على عدد من المنافذ للتغذية التي تؤثر على أداء الحجرة الطنيني، واختيار طريقة التغذية يعتمد على مجموعة من الخواص مثل: المجال الترددي،

ومستويات الطاقة، والضياعات، كما يجب الأخذ بالحسبان التجهيزات الميكروية التي ستتصل بها الرنانة.

تم اختيار نمط الانتشار ضمن الحجرة TM_{0m0} ، حيث $m \geq 2$ لأن $m = 1$ يكون $E_z = 0$ إضافةً إلى أن تحقيقها يتطلب تجهيزات بحجم أصغر، أو زيادة قطر الدائرة التي توجد عليها الأجهزة. تؤثر m بالحالة العامة على عدد الأجهزة المستخدمة للتجميع، وبالتالي على عرض حزمة المجمع، وعلى الأنماط المنتشرة ضمن الحجرة، فقد تسبب ظهور أنماط غير مرغوبة مما يؤثر على فعالية الأداء، لذلك يترافق تصنيع الحجرة دوماً بأساليب لحذف هذه الأنماط مثل الشقوق أو الحواجز.

تم اختيار النمط TM_{020} للانتشار ضمن الحجرة، وتم استخدام تردد القطع لتحديد نصف قطر الحجرة، بحيث يجب ألا تتجاوز ارتفاع الحجرة $\frac{\lambda}{2}$ (علماً أنّ تردد القطع لن يتأثر بارتفاع الحجرة طالما $l = 0$). بالتعويض بالعلاقة (6) نحصل على العلاقة التالية:

$$a = \frac{c \rho_{nm}}{2\pi f_r \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (9)$$

• المنفذ الرئيسي والمنافذ الجانبية

إنّ المجمع القطري لديه عدد من المنافذ الجانبية التي تمثل إشارة الدخل، ومنفذ مركزي تتجمع فيه إشارة الخرج. هذه المنافذ هي المسؤولة عن حمل الترددات المطلوبة وتحقيق التوافق بين المجمع والدارات المجاورة بأقل ضياع ممكن.

تم اختيار الناقل المحوري لحمل الإشارات في المنافذ الجانبية والإشارة المركزية، بحيث طوله $l_{wg} < 3\lambda$ وذلك لتجنب الانعكاسات والأنماط الغير مرغوبة. يقع المنفذ المركزي في المركز حيث الرنين أعظمي لكل إشارات الدخل. وتتوزع المنافذ الجانبية

بشكل منتظم حول الحجرة، وذلك لتوليد نمط متناظر دائري TM_{0m0} ، وعدد هذه المنافذ تعتمد على حاجة التضخيم، وهو معامل تصميم هام بحيث يؤثر على معامل الجودة للطنانة والذي بدوره يؤثر على عرض الحزمة. لا يمكن تجميع أي عدد من المنافذ فيزيائياً في الحجرة القطرية وذلك بسبب محدودية المساحة.

• معاملات يجب مراعاتها عند التصميم:

أولاً: موافقة الممانعات يمكن النظر للممانعة المكافئة للمنافذ الجانبية على أنها مجموع ممانعات موصولة على التفرع، حسب المرجع [4]:

$$\frac{1}{Z_{peripheral}} = \frac{1}{Z_{wg}} + \frac{1}{Z_{wg}} + \dots = \frac{N}{Z_{wg}} \quad (10)$$

$$\Rightarrow Z_{peripheral} = \frac{Z_{wg}}{N}$$

بحيث أي تعديل على الممانعة مثل إضافة ممانعة تفرعيه ستؤثر حكماً على تردد الطنين للحجرة، وهذا ليس بالضرورة أن يسبب مشكلة لأن الحجرة ستتوافق معه.

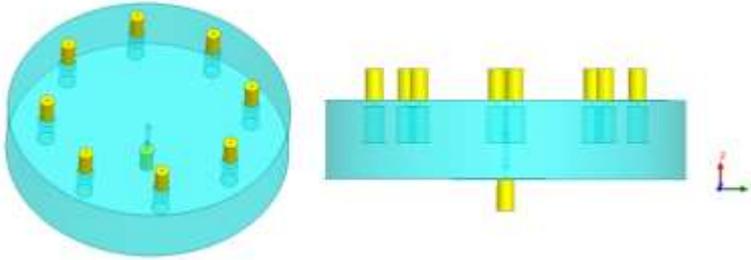
ثانياً: عرض الحزمة تحدثنا سابقاً أن عرض الحزمة ضيق للحجرة الأسطوانية الطنانة، لكن يمكن زيادته من خلال زيادة عدد المنافذ مما يقلل معامل الجودة. يمكن تقدير قيمة رياضية تقريبية لعرض الحزمة باستخدام الدارة المكافئة ودراسة التوافق بين الطنانة والمنافذ المجاورة، بحيث يحسب BW من خلال معامل الجودة المحمل (Q_L) loaded Q-factor الذي يتعلق بمعامل الربط ومعامل الجودة غير المحمل (Q_0) . ومعامل الجودة الخارجي Q_{ext} الذي يعبر عن الترابط بين المهتز والتغذية، فحتى يتساوا معامل الجودة المحمل والغير محمل يجب أن يكون الترابط أكبر ما يمكن [4].

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (11)$$

ثالثاً: العزل أو التسريب بين المنافذ نقصد بالتسريب مقدار الاستطاعة الضائعة من استطاعة الدخل عبر المنافذ، ويحدث نتيجة ظنين أنماط غير مرغوبة. للتخلص من التسريب بين المنافذ أو لتخفيف أثره يجب أولاً تحديد الأنماط غير المرغوبة ثم حذفها. لكن يجب أن نتذكر أنه لا يمكن تحقيق عزل وترابط وموافقة ممانعات مثالية بآن معاً.

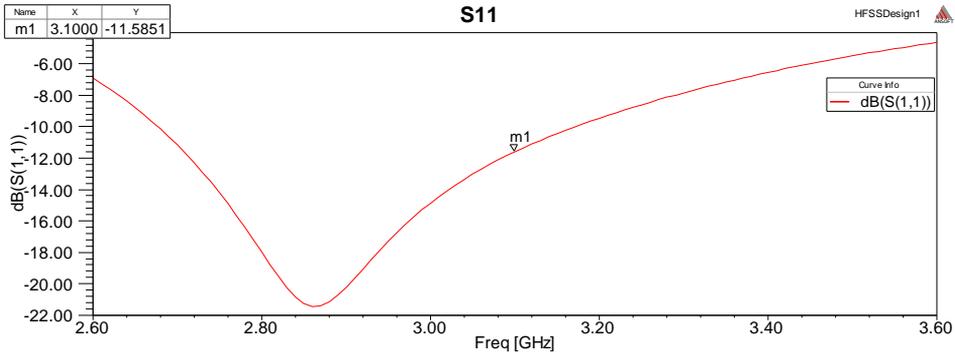
• التصميم الأول:

بالاعتماد على بيئة المحاكاة الإلكتروديناميكية المتمثلة ببرنامج High Frequency Structure Simulation [HFSS]، تم تصميم الحجرة الأسطوانية الطنينية بنصف قطر $a = 85 \text{ mm}$ ، نحسبه بالتعويض في العلاقة (9)، وارتفاع لا يتجاوز نصف طول الموجة أي $d < 40.8 \text{ mm}$ ، حتى لا نحصل على أمواج مستقرة في جهة الانتشار. ومنافذ الدخل والخرج كما ذكرنا سابقاً كوابل محورية مع وجود أسطوانات داخلية نحاسية ملتصقة مع الناقل الداخلي للكبل المحوري بهدف تعديل ممانعة المنافذ الطرفية للوصول إلى توافق ممانعات [4]. يجب أن تتموضع المنافذ الطرفية بحيث تكون متباعدة عن بعضها البعض بشكل متساوي لتحقيق التناظر الدائري، وطالما عددها ثمانية هذا يعني تموضع كل منها على زاوية قدرها 45° مبتعدة عن المركز ببعد قدره $\rho = 62.04 \text{ mm}$ حيث الحقل الكهربائي أعظم ما يمكن [11]. فحصلنا على الشكل التالي:



الشكل 6: بنية مجمع الاستطاعة القطري.

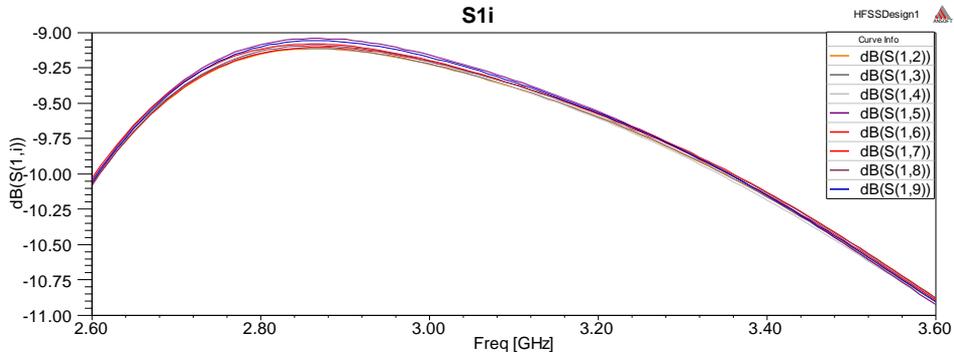
فتكون نتائج محاكاة هذه البنية، ضمن المجال الترددي $[2.6-3.6]$ GHz، الذي يضم تردد العمل في مركزه (3.1 GHz). بحيث يمثل الشكل التالي معامل الانعكاس على المنفذ المركزي والذي يعبر عن مقدار الاستطاعة المنعكسة الضائعة على هذا المنفذ:



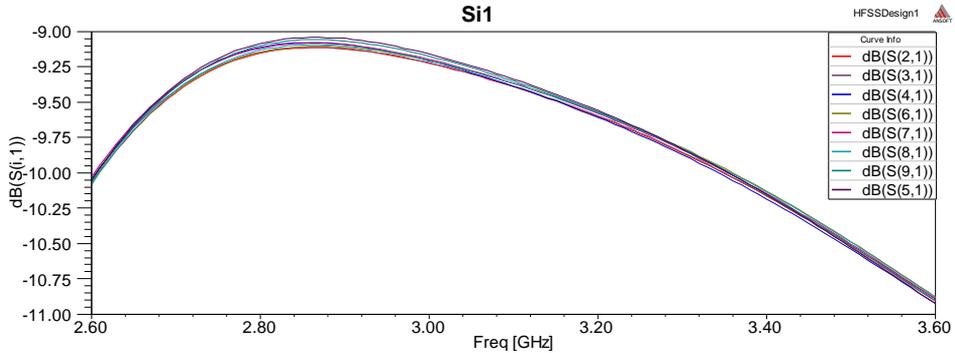
الشكل 7: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

نلاحظ من الشكل السابق أن الدارة موفقة، فيمكن اعتبار قيمة معامل الانعكاس مقبولة طالما أقل من 10 dB ، والقيمة لدينا هنا عند التردد المركزي (3.1 GHz) -11.5851 dB .

ولمعرفة توزيع الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الطرفية وبالعكس، قمنا برسم معاملات العبور S_{1i} ، أي مقدار الاستطاعة الموزعة من المنفذ الأول إلى المنافذ الطرفية وبالعكس، والتي يجب أن تكون متساوية ومتطابقة وقيمتها عند التردد المركزي قريبة من القيمة المتوقعة أي قريبة من -9.03089 dB ، لأنه في حال غدينا بمقدار 1 W ستكون الاستطاعة الموزعة على 8 منافذ أي: $10 \log\left(\frac{1}{8}\right) = -9.03089 \text{ dB}$.



الشكل 8: مقدار الاستطاعة من المنافذ الجانبية إلى المنفذ المركزي.



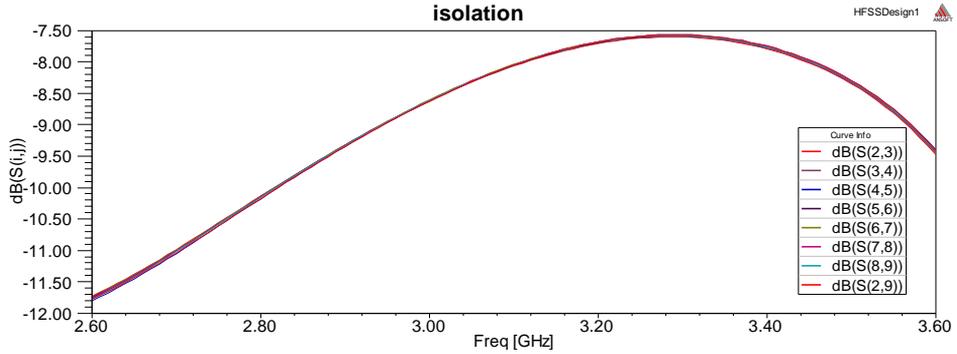
الشكل 9: مقدار الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الجانبية.

بالفعل يوضح الشكلين السابقين تطابق قيم معامل العبور S_{1i} ، S_{i1} ، أي أن الدارة عكوسه أي يمكن استخدامها كمجمع أو كمقسم. ولتوضيح قيم هذه المعاملات عند التردد المركزي نظمنا الجدول التالي:

جدول (2): قيم الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الطرفية وبالعكس عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة	المعامل	القيمة
S_{12}	-9.3914 dB	S_{21}	-9.3914 dB
S_{13}	-9.3871 dB	S_{31}	-9.3871 dB
S_{14}	-9.3870 dB	S_{41}	-9.3870 dB
S_{15}	-9.3370 dB	S_{51}	-9.3370 dB
S_{16}	-9.3666 dB	S_{61}	-9.3666 dB
S_{17}	-9.3669 dB	S_{71}	-9.3669 dB
S_{18}	-9.3693 dB	S_{81}	-9.3693 dB
S_{19}	-9.3502 dB	S_{91}	-9.3502 dB

رسمنا العزل بين المنافذ الجانبية، وهو يعتبر معامل هام في التصميم وفي تحديد فعالية التجميع. ويتمثل بقيم المعاملات S_{ij} :



الشكل 1: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

وما يهمنا قيم هذه المعاملات عند تردد العمل (المركزي)، وهي موضحة بالجدول 3.

جدول (3): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

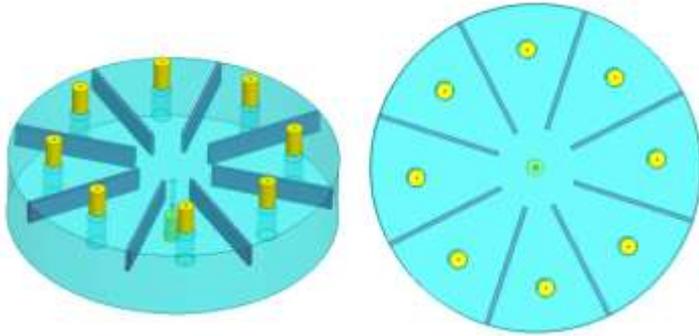
المعامل	القيمة
S_{23}	-8.0661 dB
S_{34}	-8.0585 dB
S_{45}	-8.0485 dB
S_{56}	-8.0512 dB
S_{67}	-8.0404 dB
S_{78}	-8.0449 dB
S_{89}	-8.0486 dB
S_{92}	-8.0516 dB

نلاحظ أن قيم معاملات العزل تحتاج للتحسين حتى نقل من الاستطاعة الضائعة،

لذلك قمنا بإجراء بعض التعديلات على البنية السابقة وهذا ما سنوضحه في الفقرة التالية.

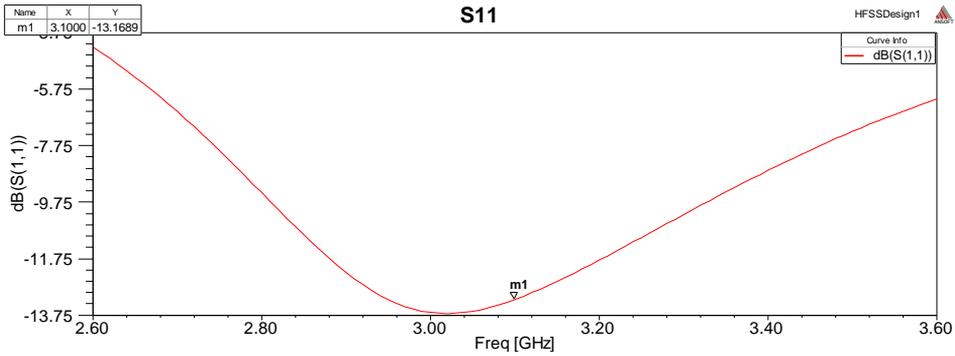
• التصميم الثاني:

أضفنا حواجز معدنية بين المنافذ الطرفية وأجرينا توليف على متحولاتها الثلاثة الطول والعرض والسماكة، للوصول إلى النتيجة الأفضل. فكان شكل البنية النهائي:



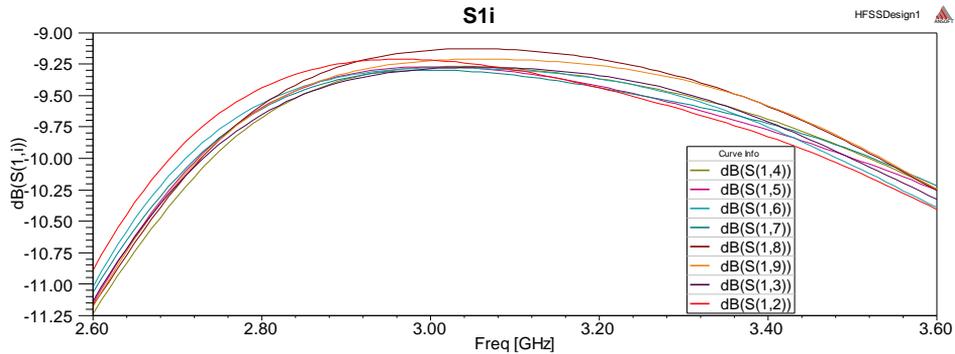
الشكل 2: بنية المجمع بعد إدخال الحواجز المعدنية بين منافذه الجانبية.

ثم عرضنا نتائج المحاكاة، فلاحظنا تحسن بقيمة معامل الانعكاس على المنفذ المركزي، بحيث وصلت قيمته عند التردد المركزي إلى -13.1689 dB .



الشكل 3: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

أما معاملات العبور أو تقسيم الاستطاعة فكانت قيمها أقرب للقيمة المتوقعة في معظمها عند التردد المركزي، ويمكن توضيح ذلك بالشكل 16:



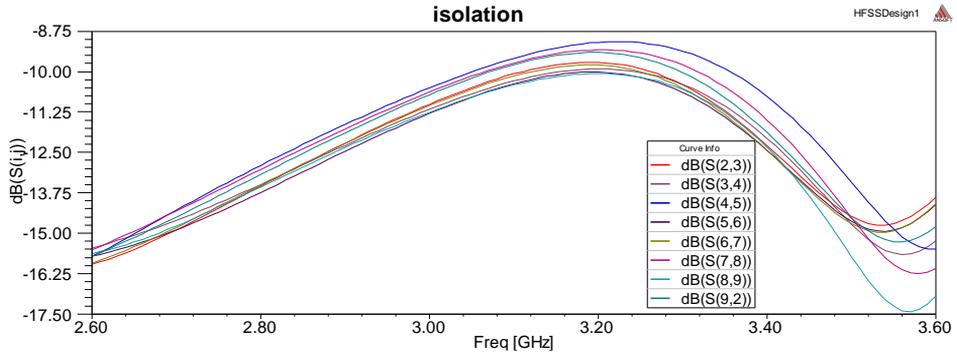
الشكل 4: مقدار الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي.

ولتوضيح النتيجة أكثر جمعنا القيم ضمن جدول:

جدول (4): قيم الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{12}	-9.2969 dB
S_{13}	-9.282 dB
S_{14}	-9.2878 dB
S_{15}	-9.3148 dB
S_{16}	-9.2986 dB
S_{17}	-9.3391 dB
S_{18}	-9.1373 dB
S_{19}	-9.2151 dB

كما أن معامل العزل بين المنافذ الطرفية تحسن بمقدار 2 dB تقريباً، بحيث كانت قيمته عند التردد المركزي -10 dB تقريباً عند معظم القيم.



الشكل 5: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

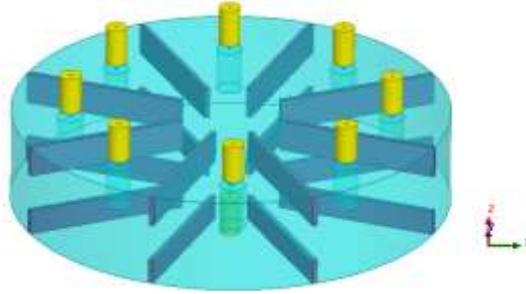
جدول (5): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{23}	-10.0715 dB
S_{34}	-10.2936 dB
S_{45}	-9.5873 dB
S_{56}	-10.3762 dB
S_{67}	-10.1335 dB
S_{78}	-9.7368 dB
S_{89}	-10.4157 dB
S_{92}	-9.7823 dB

إذاً إضافة الحواجز المعدنية انعكس إيجابياً على نتائج التصميم، لكن هل يمكن تحسين النتائج أكثر في حال أضفنا حواجز على السطحين العلوي والسفلي؟ هذا ما سنجاوب عليه في الفقرة التالية.

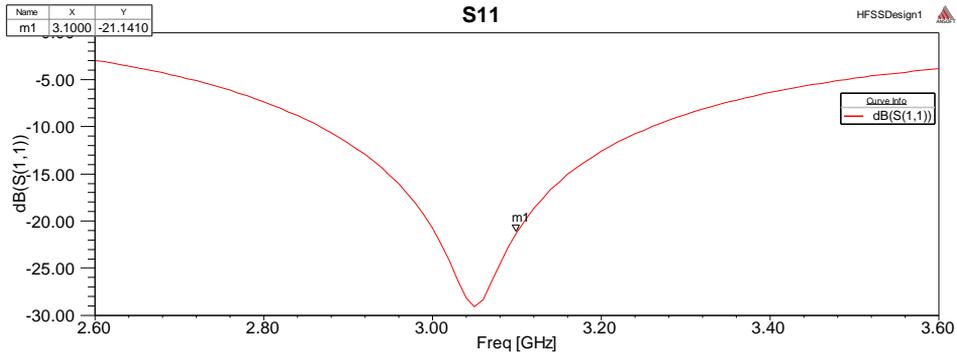
• التصميم الثالث:

لاحظنا إمكانية تحسين قيم العزل أكثر، من خلال إضافة حواجز معدنية على السطحين العلوي والسفلي بشكل متناظر، بمعنى إضافة الحاجز المعدني على السطح السفلي بنفس إحداثيات موقعه على السطح العلوي لكن باختلاف الارتفاع فقط. هذا موضح بالشكل التالي:



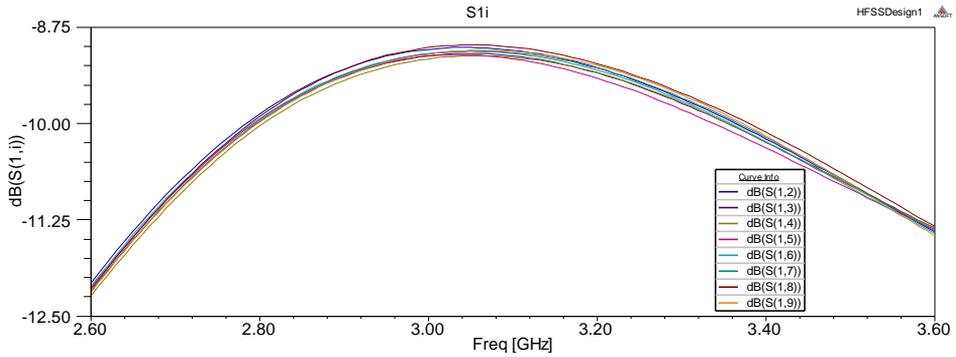
الشكل 6: بنية المجمع بعد إدخال الحواجز المعدنية على السطح العلوي والسفلي للحجرة.

فحصلنا على قيم أفضل للعزل والانعكاس والنقل، وسنعرض هذه القيم تباعاً. لنبدأ أولاً بمعامل الانعكاس على المنفذ المركزي من خلال الشكل التالي نجد أنه تحسن بشكل كبير بحيث وصلت قيمته عند التردد المركزي إلى -21.141 dB .



الشكل 7: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

وتقسيم الاستطاعة كان متساوي بشكل كبير بين المنافذ، وهذا ما تعرضه معاملات النقل من المنافذ الجانبية إلى المنفذ المركزي:



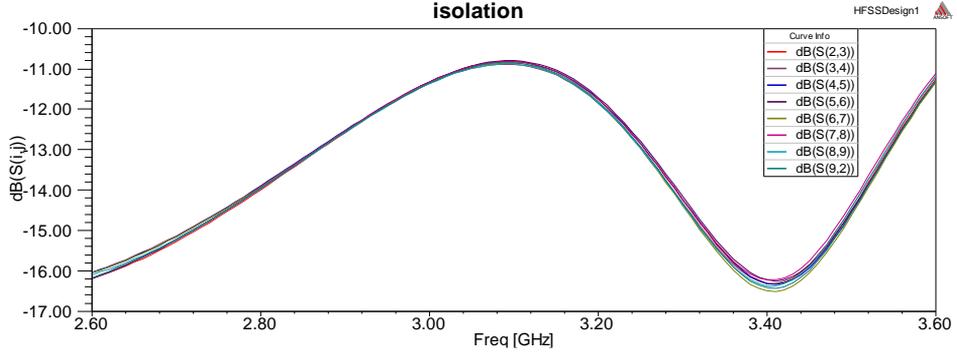
الشكل 17: مقدار الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي.

ويوضح الجدول 6 قيم تقسيم الاستطاعة عند التردد المركزي:

جدول (6): قيم الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{12}	-9.0518 dB
S_{13}	-9.1244 dB
S_{14}	-9.1419 dB
S_{15}	-9.1612 dB
S_{16}	-9.0946 dB
S_{17}	-9.0788 dB
S_{18}	-9.0102 dB
S_{19}	-9.0671 dB

أما قيم العزل بين المنافذ الجانبية فكانت جيدة جداً، وهي موضحة بالشكل 21 والجدول 7:



الشكل 18: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

جدول (7): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{23}	-10.8254 dB
S_{34}	-10.8902 dB
S_{45}	-10.8205 dB
S_{56}	-10.7984 dB
S_{67}	-10.8607 dB
S_{78}	-10.8188 dB
S_{89}	-10.8820 dB
S_{92}	-10.8495 dB

5- الاستنتاجات

قدمت هذه المقالة دراسة وتحليل وتصميم لمجمع/ مقسم استطاعة قطري يعمل بتقنية الحجرة الطنينية عند التردد المركزي 3.1 GHz. ويمكن تلخيص نتائج البحث بالنقاط التالية:

1- تم في البداية اعتماد التصميم الأولي للحجرة مع المنافذ والأسطوانات المعدنية الداخلية، وحصلنا على نتائج مقبولة للانعكاس على المنفذ المركزي بحيث كان أقل من 10 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 8 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة يمكن اعتبارها قريبة من القيمة المتوقعة.

2- ثم قمنا بإضافة حواجز معدنية بين المنافذ الطرفية لتحسين العزل بين هذه المنافذ على السطح العلوي، فلاحظنا تحسن بجميع معاملات التصميم (العزل والانعكاس ونقل الاستطاعة). بحيث معامل الانعكاس على المنفذ المركزي أقل من 11.7 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 10 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة يمكن أقرب للقيمة المتوقعة.

3- هذا ما دفعنا لتطوير هذا التصميم من خلال إضافة حواجز معدنية على السطحين العلوي والسفلي وبشكل متناظر. فكان معامل الانعكاس على المنفذ المركزي أقل من 15 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 10.8 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة أقرب للقيمة المتوقعة.

6- التوصيات والأفاق المستقبلية

يمكن التطوير على العمل من خلال استخدام تجويف مستطيل عوضاً عن الأسطوانية ومناقشة النمط TE_{010} ، فهي مرغوبة في التطبيقات الرادارية. كما يمكن البحث عن طرق مختلفة لإثارة الحجرة الطنينية باستخدام مجسات أكثر تعقيداً وذلك لتأمين مجال ترددي أوسع. ويمكن دراسة إمكانية تعديل عدد المنافذ وتأثيرها على الأداء.

References المراجع 6-

[1]	J. Brown, 15 April 2015 "What's The Difference Between TWTAs and SSPAs"
[2]	José R. Montejo-Garai, Jorge A. Ruiz-Cruz and Jesús M. Rebollar, 2019 "Design of Radial Power Combiners Based on TE ₀₁ Circular Waveguide Mode".
[3]	Hao Shao, Kaijun Song, Liyuan Xue, Letian Guo, Song Guo, Yedi Zhou, Yong Fan, 2018 "Compact Four-Way Radial-Cavity-Based Power Divider/Combiner with High Power and High Isolation".
[4]	I. KLAPPEVIK, 2017 "Analysis, Construction And Evaluation Of a Radial Power Divider/ Combiner".
[5]	K. J. Russell, 5 May 1979 "Microwave Power Combining Techniques".
[6]	A. E. a. S.-W. Lee, 1 Jan 2006 "A Simplified Design Approach For Radial Power Combiner".
[7]	H. M. & H. Mizuna, 9 September 1986 "Design of Microwave Power Combiner With Circular TM _{0m0} Mode Cavity".
[8]	F. Kh.Gharehkand, 2014 "Design of a 16 Way Radial Microwave Power Divider/Combiner With Rectangular Waveguide Output and Coaxial Input".
[9]	A. A. Sarhan, 2014 "Broadband Radial Waveguide Power Combiner with Improved Isolation among Adjacent Output Ports".
[10]	D. M.Pozar, 2005 <u>Microwave Engineering</u> . 3rd edition. New York: Wiley. 752P.
[11]	L. Frenzel, 19 Oct 2012 "What's The Difference Between GaAs And GaN RF Power Amplifier".
[12]	R. A. York, 8 Aug 2001 "Some Considerations For Optimal Efficiency And Low Noise In Large Power Combiners".
[13]	H. Matsumura and H. Mizuno, 1987 "Design of Microwave Power Combiner with Circular TM _{0m0} Mode Cavity," <u>Electronics and Communications in Japan</u> , Part 2, vol. 70, no. 9.

- | | |
|------|---|
| [14] | SONG, Kaijun; FAN, Yong; ZHOU, Xiaobing, 2009 Broadband radial waveguide power amplifier using a spatial power combining technique. IET microwaves, antennas & propagation. |
|------|---|