مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد 42 (العدد):2 الصفحات: 188-205

Damascus university journal of Engineering Sceinces
V 42 (No):2 PP: 188-205

تطوير هوائي ثنائي المجال باستخدام تقنية المرشحات المدمجة للتطبيقات الطبية

محمد حسام السقا[*1] عبد الرزاق البدوية[2] محمد زيواني[3]

[*1]. طالب دكتوراه، مهندس، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكيّة والكهربائيّة – جامعة دمشق – دمشق – سوريا.
husam.alsakka@damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ، دكتور، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكيّة والكهربائيّة – جامعة دمشق – دمشق – سوريا.
abdelrazak.badawieh@damascusuniversity.edu.sy

[3]. أستاذ مساعد، دكتور، قسم هندسة الاتصالات – المعهد العالي للعلوم التطبيقيّة والتكنولوجيا – دمشق – سوريا.
mzewani@yahoo.edu.sy

الملخص:

يُعد الهوائي أحد أهم عناصر الأنظمة فائقة عرض المجال Ultra Wide Band (UWB)، كونه يحدد بشكل كبير مواصفات النظام من حيث عرض المجال وإزالة التداخل مع الأنظمة ضيقة المجال التي تستخدم نفس المجال الترددي. تقدّم هذه الورقة البحثيّة دراسة تحليليّة وتصميميّة لهوائي UWB يمكن استخدامه في الأنظمة الطبيّة التي تعمل على مجالين ترددييّن منفصلين GHz [3.25-4.75] و GHz [6.6-10.25]. تم استخدام تقنية المرشّحات المدمجة لجعل الهوائي ثنائي المجال للحصول على مواصفات تردّديّة جيدة دون التأثير على المواصفات الإشعاعيّة للهوائي، وبالتالي نستطيع الحصول على مواصفات الترشيح والإشعاع ضمن نفس البنية. قمنا بالاعتماد على طريقة النمذجة والمحاكاة باستخدام بيئة المحاكاة CST Microwave Studio. وللتحقق من نتائج المحاكاة قمنا بتصنيع الهوائي المقترح باستخدام ركيزة من شركة Arlon بثابت عازليّة $\varepsilon_r = 3.25$ وعامل فقد $\tan\delta = 0.0032$ وسماكة $h = 0.8\,mm$. أظهرت النتائج العمليّة توافق مع نتائج المحاكاة، وحصلنا على مجالي عمل الأول GHz [3.1-4.76] والثاني GHz [6.64-10.21]. واستطعنا الحصول على مجال رفض عريض $2.26\,GHz$ يتمتع بقيمة VSWR عالية جدّاً تصل إلى 43 وبالتالي عزل كبير بين مجالي التمرير للهوائي بالإضافة إلى ربح يتراوح بين -3.4 $4.5\,dBi$ وفعاليّة إشعاع $\%[95-80]$. المواصفات التي حصلنا عليها مناسبة ومتطابقة مع متطلبات التطبيقات الطبيّة الموصّفة ضمن المعيار IEEE 802.15.6.

الكلمات المفتاحيّة: هوائي مرشّح، أنظمة فائقة عرض المجال، الطب عن بعد، ثنائي المجال، المرشّحات المدمجة.

تاريخ الإيداع: 2023/8/3

تاريخ القبول: 2023/9/18

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

Development of Dual-Band Antenna Using Embedded Filters Technique for Medical Applications

Mohammed Husam Alsakka*[1] Abdelrazak Badawieh[2] Mohammed Zewani[3]

*[1]. Postgraduate Student, Eng, Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria
husam.alsakka@damascusuniversity.edu.sy

[2]. Professor, Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.
abdelrazak.badawieh@damascusuniversity.edu.sy

[3]. Associate Professor, Dr, Department of Telecommunication Engineering, Higher Institute of Applied Sciences and Technologies (HIAST), Damascus, Syria.
mzewani@yahoo.edu.sy

Received: 3/8/2023

Accepted: 18/9/2023

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

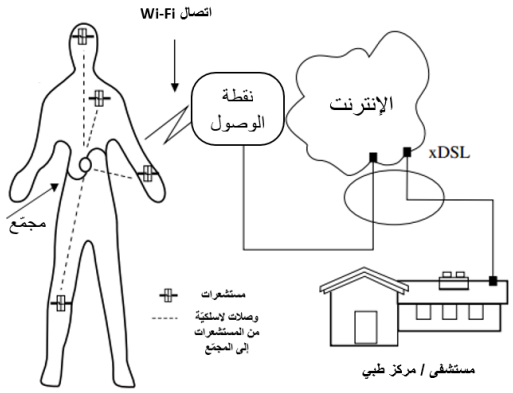
Abstract:

Antennas are considered as one of the most important elements of Ultra Wide-Band (UWB) systems. It greatly determines the system specifications in terms of bandwidth and interference removal with narrowband systems located in the same frequency range. This paper presents an analytical and design study of a UWB antenna that can be used for medical applications operating in two separate frequency ranges [3.25-4.75] GHz and [6.6-10.25] GHz. The embedded filters technology is used to make the antenna dual-band, and to obtain good frequency specifications without affecting the radiation of the antenna. Thus we can obtain the filtering and radiation specifications within the same structure. We relied on the modeling and simulation process on CST Microwave Studio. To verify the simulation results, we fabricated the proposed antenna using an Arlon substrate with dielectric constant $\varepsilon_r = 3.25$, loss factor $\tan\delta = 0.0032$, and thickness $h = 0.8\,mm$. The experimental results showed agreement with the simulation results, and we got two working bands, the first [3.1-4.76] GHz and the second [6.64-10.21] GHz. We were able to obtain a wide rejection range of 2.26 GHz with a very high Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) up to 43 and thus a large isolation between the upper and lower bands of the antenna. The gain of the antenna ranges between 3.4-4.5 dBi, and the radiation efficiency is in range [80-95]%. The specifications we have obtained are suitable and conform to the requirements of medical applications specified in the IEEE 802.15.6 standard.

Keywords: Filtering Antenna, Ultra wide-band Systems, Telemedicine, Dual-band, Embedded Filters

المقدمة:

يـؤمّن الطـب عـن بعـد (Telemedicine) خـدمات الرعايـة الصـحية بمسـاعدة تكنولوجيـا المعلومـات والاتصـالات. حيـث يمكن دمج تقنية شبكات منطقة الجسم اللاسلكيّة Wireless Body Area Network (WBAN) مع قطاع المعالجة عن بعد مثل إجراء الاستشارات الطبيّة مع الأطباء الأخصائيين عبر الإنترنت، وإرسال التقارير والصور الطبية، والتشخيص الطبي عن بُعد، إلخ (Arefin, et al., 2017). وبذلك تتيح شبكات WBAN عمليّة المراقبة عن بعد، لإجراء الفحص الطبي الدوري، أو تأمين العناية الفورية للمريض في حالات الطوارئ (Galvan-Tejada, et al., 2016). يوضّح الشكل (1) تمثيلاً مبسّطاً لشبكة WBAN مستخدمة للرعاية الصحية.



الشكل (1) مخطط شبكة WBAN.

تتكون هذه الشبكة من مستشعرات طبّية تقوم بأخذ القياسات الفيزيولوجية من جسم المريض وفق برنامج زمني محدّد. حيث تتوضع هذه المستشعرات على أنحاء مختلفة من الجسم. على سبيل المثال، توضع على الصدر لتخطيط القلب، وعلى الذراع لقياس مستويات الجلوكوز، وعلى الرسغ لقياس ضغط الدم، وعلى الكاحلين والركبتين والذراعين لمراقبة الحركة. يقوم مجمّع مركزي بتجميع البيانات المحصّلة من المستشعرات وإرسالها إلى نقطة وصول (Access point) والتي بدورها تقوم بنقل البيانات عبر شبكة الإنترنت إلى وجهتها النهائية (Galvan-Tejada, et al., 2016). يعد تطوير أجهزة استشعار جديدة وقنوات اتصال وشبكات لاسلكية ومكونات متكاملة ذكية وآمنة للأنظمة الإلكترونية فيزيائياً مجالاً ذا أهمية كبيرة. وفقاً للمفوضية الأوروبية (Vera, et al., 2019). حيث لا تزال شبكات WBAN تقنية جديدة نسبياً فيها العديد من المشاكل والقيود التي يجب حلها من أجل الوصول إلى المعايير المطلوبة للاستخدام الأمثل. تواجه شبكات WBAN تحدّياً كبيراً يتمثل في انتشار الإشارة والتداخل والتفاعل بين الإنسان والحاسوب (Vera, et al., 2019). ونظراً لأن بعض مجالات عمل شبكات WBAN تتوافق مع مواصفات أنظمة UWB فقد تم اعتبارها كمرشح جذاب لشبكات WBAN (Saha, et al., 2019). من خواص الهوائي عريض المجال:

1) ربح مرتفع
2) حجم صغير
3) استهلاك طاقة أقل مقارنة بالمجالات الترددية الميكروية الأخرى.

ومن بين جميع الهوائيات المختلفة الممكنة القابلة للتصنيع نجد أنّ تصميم هوائي UWB باستخدام البنى الشرائحيّة الميكرويّة هو المفضّل لعدّة أسباب، أهمّها:

1) مستوى استطاعة التشغيل منخفض
2) المناعة الجيدة ضد الضجيج
3) حجم صغير
4) إمكانيّة نقل بيانات بمعدلات مرتفعة جداً.

وبالتالي فهو مناسب للتطبيقات الطبيّة (Othman, et al., 2019).

1- الهدف:

يهدف البحث إلى مايلي:

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

1) تصميم هوائي فائق عرض المجال يعمل على المجال GHz [3.25-10.25]. ويتوافق مع المجال الترددي ضمن معيار شبكات WBAN (IEEE 802.15.6) ذو المجالات الترّدديّة:

(أ) GHz [3.25-4.75].

(ب) GHz [6.6-10.25].

2) دراسة ومقارنة الطرق المختلفة لتوليد مجال رفض ترددي.

3) اقتراح بنية هوائي UWB ثنائي المجال باستخدام البنى الشرائحيّة الميكرويّة يحقق المواصفات المطلوبة.

4) مقارنة الهوائي المقترح مع الأبحاث المختلفة.

2- الهوائيّات فائقة عرض المجال:

خصّصت لجنة الاتصالات الاتحادية Federal Communications Commission (FCC) في عام 2002 المجال الترّددي من GHz 3.1 وحتى GHz 10.6 لأنظمة UWB (Saha, et al., 2019) ، ومنذ ذلك الحين، أصبحت هذه تكنولوجيا UWB مجالاً للدراسة والبحث (Galvan-Tejada, et al., 2016). يجب أن يتمتع هوائي نظام UWB بمجموعة من المواصفات كالحجم المضغوط للغاية، سهولة المكاملة، المتانة الميكانيكيّة، وإمكانية العمل في ظروف بيئة قاسية، وذلك بغض النظر عن تطبيقات UWB المستخدمة (Saha, et al., 2019). تختلف عمليّة تصميم هوائي UWB عن الهوائي ضيق المجال. حيث تتركز عملية تصميم الهوائيّات ضيقة المجال حول ثنائي القطب (Dipole) متناهي الصغر والذي طوله أصغر بكثير من طول الموجة (Galvan-Tejada, et al., 2016). ولكن هذا غير ممكن في هوائيّات UWB لوجود أكثر من تردد رنين ضمن المجال الترددي العريض. وبشكل عام فإنّ الهوائي عنصر رنان تتغيّر ممانعته تبعاً للتردد. ويدعى مجال الترددات التي يكون فيها الهوائي موافق بعرض مجال الممانعة (Impedance Bandwidth) (Galvan-Tejada, et al., 2016). تُعد الهوائيّات المطبوعة من أكثر البنى استخداماً في أنظمة UWB كونها غير معقدة، وسهلة التصنيع، ولها عرض مجال كبير، ونمط إشعاع جيد (Galvan-Tejada, et al., 2016). من الممكن أن تأخذ رقعة إشعاع الهوائي أشكالاً مختلفة، فمن الممكن أن تكون دائريّة (هوائي أحادي القطب Monopole) كما في (Alizadeh, et al., 2021; Yadav, et al., 2017; Wang, et al., 2020; Bala, et al., 2022; Miraç Dilruba Geyikoglu, 2023)، أو رقعة مستطيلة (Modak, et al., 2020; Salamin, et al., 2019; Abbas, et al., 2021)، أو رقعة بيضويّة الشكل (Luo, et al., 2022)، أو رقعة مضلّعة (Lin, et al., 2023; Sanyal, et al., 2019)، وغيرها من الأشكال المختلفة (Ali, et al., 2023; Jameel, et al., 2023; Karad & Hendre, 2023; Din, et al., 2022).

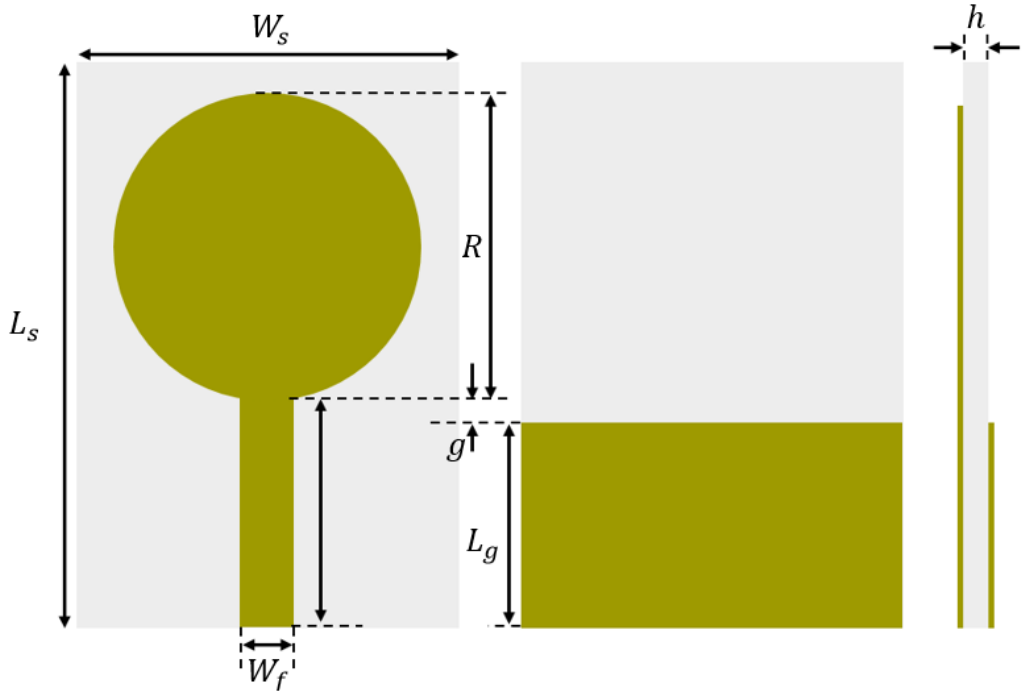
3-1- إزالة التداخل مع الأنظمة ضيقة المجال:

تتواجد ضمن مجال أنظمة UWB الترددّية مجموعة من الخدمات ضيقة المجال كنظام WIMAX (3.3–3.6 GHz) وأنظمة الاتصالات الساتليّة على الوصلة الهابطة 4 GHz وعلى الوصلة الصاعدة 8 GHz ونظام WLAN (5.15–5.35 GHz, 5.725–5.825 GHz)، مجال ITU 8.025-8.4) (GHz)، وغيرها. ومن أجل إزالة التداخل مع هذه الأنظمة تتبع تصاميم هوائيّات UWB طرق مختلفة لحذف المجال الترددي كإجراء تعديلات على شكل المُشع، أو طبقة الأرضي، أو خط التغذية، أو عن طريق تقنيات الترشيح المدمجة (Saha, et al., 2019). قام Alizadeh في (Alizadeh, et al., 2021) بتصميم هوائي UWB موجّه لتطبيقات التصوير الطبّي والاتصالات عالية السرعة. يحتوي التصميم على بنى فجوات المجال الكهرطيسيّة Electromagnetic Bandgap (EBG) لإزالة التداخل مع أنظمة WIMAX وWLAN. كما قام Modak في (Modak, et al., 2020) باستخدام بنى EBG لإنشاء خمس مجالات رفض لأنظمة الاتصالات النقالة 2.6 GHz، إشارات الاتصالات الساتليّة، WLAN، وتطبيقات الاتصالات الساتليّة Indian National Satellite (INSAT)

عند التردد 6.5 GHz. كما قام بعض الباحثين باستخدام بنى خطوط النقل المشوّهة Defectet Microsrtip Structure (DMS) مثل إنشاء تشوهات/فتحات بشكل حرف U لإحداث الرنين توليد مجالات الرفض (Yadav, et al., 2017; Lin, et al., 2023; Luo, et al., 2020). كما استخدم عدد آخر من الباحثين طرق مختلفة لتوليد مجالات الرفض عن طريق بنى الأرضي المشوّهة Defected Ground Structures (DGS) كما في (Bala, et al., 2022; Miraç Dilruba Geyikoglu, 2023; Sanyal, et al., 2019; Wang, et al., 2020). جرى في التصميم (Wang, et al., 2020) استخدام بنى رنانات حلقيّة Split Ring Resonators (SRR) لتحقيق بعض مجالات الرفض أيضاً. وتعد بنى SRR أحد أشهر البنى المستخدمة في تحقيق مجالات رفض ضمن هوائيّات UWB (Salamin, et al., 2019; Abbas, et al., 2021; Luo, et al., 2020; Chao, et al., 2022). كما جذبت طريقة دمج تصميم المرشّحات المِكرويّة مع تصميم الهوائي باهتمام العديد من الباحثين من أجل تطبيقات مختلفة مثل الراديو الإدراكي، تطبيقات WLAN، وغيرها (Juma'a, et al., 2022). حيث تتميّز هذه البنية بإمكانيّة الحصول على الإشعاع والترشيح في تصميم واحد، ممّا يقود لتصغير حجم ووزن النهاية الراديويّة الأماميّة، والتخلص من الضياعات المتعلّقة بالوصل بين الهوائي والمرشّح (Gangwar, et al., 2021). يحسّن المزيج بين الهوائي والمرشّح الأداء ويقلّل الحجم ولكن بالمقابل فإنّ عدم التوافق بين المرشّح والهوائي يقود لزيادة في الضياع (Mao, et al., 2021).

3- تصميم هوائي UWB:

سنعتمد في التصميم على بنية الهوائي وحيد القطب الدائري. يبيّن الشكل (2) الهوائي والذي يتكون من مشع دائري وخط تغذية 50 Ω مع طبقة أرضي جزئيّة. في حين يبيّن الجدول (1) أبعاد الهوائي. يبيّن الشكل (3) عرض مجال الهوائي والذي يمتد من 3.25 GHz وحتى 10.2 GHz. كما نجد أن قيمة نسبة أمواج الجهد المستقرة أقل من 2 (يكافئ فقد انعكاس أصغر من 10 dB) على كامل مجال التمرير. تتعلق الاستجابة الترددية للهوائي على المسافة التي تحتلها طبقة الأرضي. بإجراء المحاكاة على برنامج CST وبتغيير مسافة الأرضي تحت الهوائي، نلاحظ في الشكل (5) أنّه من أجل طبقة أرضي كاملة $L_g = 32.5\ mm$ فإنّ استجابة الهوائي تكون ضيقة وممركزة عند التردد $10.9\ GHz$.

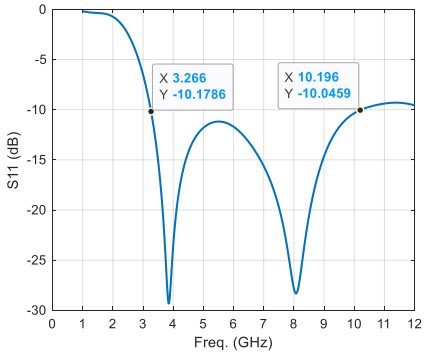


الشكل (2) بنية الهوائي، (أ) الوجه العلوي، (ب) الوجه السفلي، (ج) الوجه الجانبي.

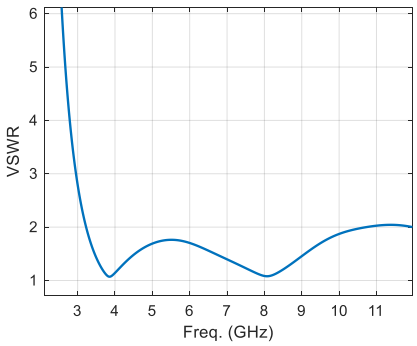
في حين تكون الاستجابة جيدة عندما تكون طبقة الأرضي جزئيّة وأقل من طول خط نقل تغذية الهوائي حيث نجد أنّه من أجل طبقة أرضي جزئيّة أصغر فإنّ عرض مجال استجابة الهوائي يصبح أضيق.

الجدول (1) أبعاد الهوائي

البعد	القيمة (mm)
W_s	23
L_s	32
L_g	11.5
R	17.7
W_f	1.89
h	0.8
g	0.5



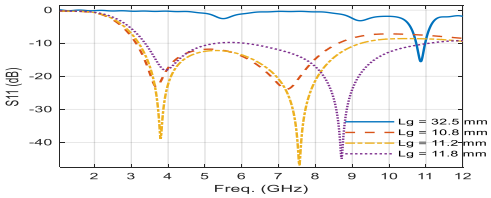
الشكل (3) فقد انعكاس الهوائي.



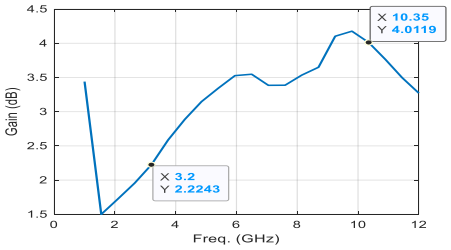
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

الشكل (4) نسبة أمواج الجهد المستقرة.

تظهر المحاكاة أنّ ربح الهوائي Gain يتغيّر بين 2.2 dBi و 4 dBi كما في الشكل (6).

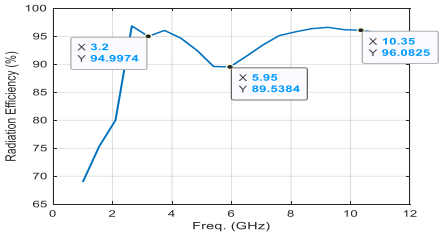


الشكل (5) أثر تغيير حجم طبقة الأرضي على الاستجابة الترددية للهوائي.



الشكل (6) ربح الهوائي.

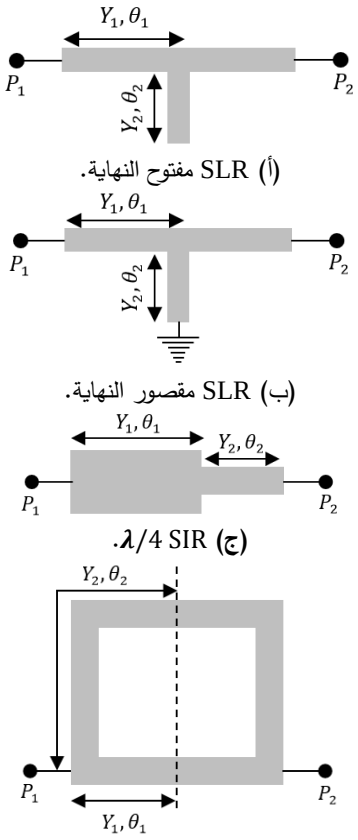
أمّا بالنسبة لفعاليّة الإشعاع Radiation Efficiency فهي موضّحة في الشكل (7) والذي يبيّن أنّ قيمة فعاليّة الإشعاع تتراوح بين 89.5 % و 96 % على كامل المجال الترددي للهوائي.



الشكل (7) فعاليّة الإشعاع للهوائي.

4- تصميم المرشّح:

تعتبر الرنانات متعددة الأنماط Multi-Mode Resonators (MMR) أحد أهم البنى المستخدمة في تصميم المرشّحات متعددة المجالات (Bi, et al., 2021). يمكن تحقيق المرشّحات متعددة المجالات باستخدام بنى مختلفة مثل رنانات الممانعة الخطويّة Stepped Impedance Resonators (SIRs) (Basit, et al., 2023; Yoon & Kim, 2021)، رنانات مزوّدة بفرعة Stub Loaded Resonators (SLRs) (Kastro & Wiselin, 2019; Luo, et al., 2023)، والرنانات الحلقيّة Ring Resonators (Sun, et al., 2021; Shome & Khan, 2019). تتمتّع رنانات الممانعة الخطويّة SIR ببنية بسيطة وصغيرة الحجم إلّا أنّها تعاني الصعوبة في تعديل بنيتها للحصول على أنماط رنين إضافيّة، على عكس رنانات SLR والتي يمكن إضافة أنماط رنين إلى بنيتها بسهولة (Bi, et al., 2021). أمّا بالنسبة للرنانات الحلقيّة فهي تمتاز عن النوعين السابقين بأنه يمكن التحكم بكل نمط (تردد) رنين على حدة ولكن على حساب ازدياد حجمها (Bi, et al., 2021). يمكن عملياً المزج بين بنى MMR المختلفة من أجل الحصول على أداء مرشّحات أمثلي (Kastro & Wiselin, 2019). يبيّن الشكل (8) بنى رنانات SLR و SIR والرنانات الحلقيّة ثنائيّة النمط.



(أ) SLR مفتوح النهاية.

(ب) SLR مقصور النهاية.

(ج) $\lambda/4$ SIR.

(د) رنانة حلقيّة.

الشكل (8) بنى رنانات ثنائيّة النمط.

مـن أجـل تصـميم مرشّـح UWB ثنـائي المجـال سـنقوم بالاعتمـاد علـى رنانـات SIR وSLR لكونهـا ذات حجـم صغير وبنية بسيطة. يبيّن الشكل (9) بنية المرشّح المقترح والذي يتكون من رنانة ممانعة خطويّة بطول يساوي إلى نصف طول الموجة مزوّدة في منتصفها بفرعة مقصورة النهايـة ومترابطـة علـى طرفيهـا برنـانتي SLR مفتـوحتي النهاية. قمنا بإضافة ملف دائري مطبوع يقوم بعمليّة حذف المجال الترددي غير المرغوب به.

5-1- التحليل الرياضي:

بحكم البنية المتناظرة لمكوّنات المرشّح فإنّه يمكن استخدام تحليل النمط الفردي والزوجي لإيجاد ترددات رنين الدارة. تعطى ترددات رنين SLR مفتوحة النهاية (Bi, et al., 2021) على النحو التالي:

$$f_{odd} = \frac{(2n+1)c}{4L_1\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (1)$$

$$f_{even} = \frac{nc}{2(L_1+L_2)\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (2)$$

حيث c سرعة الضوء، L_i الطول الفيزيائي الموافق للطول الكهربائي θ_i، n عدد صحيح. أمّا من أجل رنانة الممانعة الخطويّة فيبيّن الشكل (10) الدارة المكافئة من أجل نمطي العمل الفردي والزوجي. تعطى علاقات سماحيّة الدخل للنمطين الزوجي والفردي على النحو التالي (Verma, 2021):

$$Y_{in,1} = jY_1 \frac{2Y_1 \tan\theta_1 \tan\theta_3 - Y_3}{2Y_1 \tan\theta_3 + Y_3 \tan\theta_1} \quad (3)$$

$$Y_{in,even} = Y_2 \frac{Y_{in,1} + jY_2 \tan\theta_2}{Y_2 + jY_{in,1} \tan\theta_2} \quad (4)$$

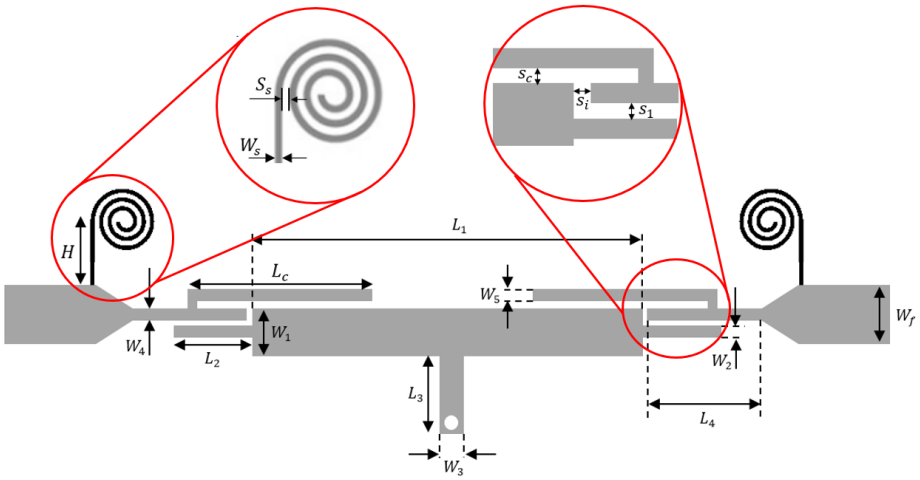
$$Y_{in,odd} = -jY_2 \frac{K - \tan\theta_1 \tan\theta_2}{\tan\theta_1 + K \tan\theta_2} \quad (5)$$

حيث $\theta_1 = \beta(L_1/2)$، $\theta_2 = \beta L_2$، $\theta_3 = \beta L_3$، $K = \frac{Y_1}{Y_2}$. تحدد ترددات الرنين من العلاقة $Y_{in} = 0$ وبالتالي من أجل العلاقة (5) يتم تحديد تردد رنين النمط الفردي كالتالي:

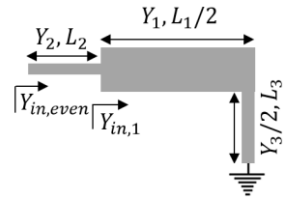
(6)

$$Y_{in,odd} = 0 \Rightarrow K = \tan\theta_1 \tan\theta_2$$

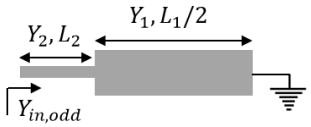
إنّ الطبيعة التكراريّة للتابع $\tan\theta$ تعطي توافقيّات ترديديّة f_{sp}، والتي تزداد المسافة بينها وفق النسبة K (Verma, 2021).



الشكل (9) بنية مرشّح MMR المقترح.



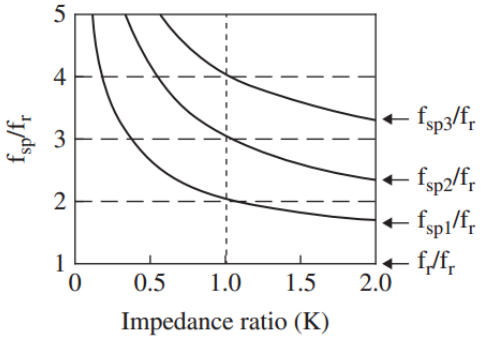
(أ)



(ب)

الشكل (10) بنية مرشّح MMR المقترح، (أ) النمط الزوجي، (ب) النمط الفردي.

ويبيّن الشكل (11) نسبة ترددات التوافقيات إلى التردد الأساسي المحدّد بالعلاقة (6).



الشكل (11) توافقيات رنانة SIR نصف طول الموجة (Verma, 2021).

من أجل أن تكون التوافقيات قريبة من بعضها وضمن مجال التمرير نقوم باختيار قيمة K كبيرة. كما نقوم باختيار $\theta_1 = 3\theta_2$ من أجل الاستفادة من العلاقة الرياضيّة التي تربط $\tan(3x)$ بـ $\tan x$ كالتالي:

(7)

$$\tan(3x) = \frac{3\tan x - \tan^3 x}{1 - 3\tan x}$$

بأخذ $\theta_2 = 25^o$ يكون $\theta_1 = 75^o$ وتكون قيمة $K = 1.6$. ومنه نحصل على تردد الرنين الرئيسي $f_0 = 3.5\ GHz$، والتوافقيّات عند الترددات $f_{sp1} = 6.3\ GHz$، $f_{sp2} = 8.7\ GHz$، $f_{sp3} = 12.25\ GHz$. يساهم f_0 في تشكيل مجال التمرير الأول GHz [3.25-4.75] للمرشّح في حين تساهم كل من f_{sp1} و f_{sp2} في تشكيل المجال الثاني GHz [6.6-10.25].

أما بالنسبة لنمط العمل الزوجي، يمكن استنتاج شرط الرنين بجعل العلاقة (4) مساوية للصفر لينتج التالي:

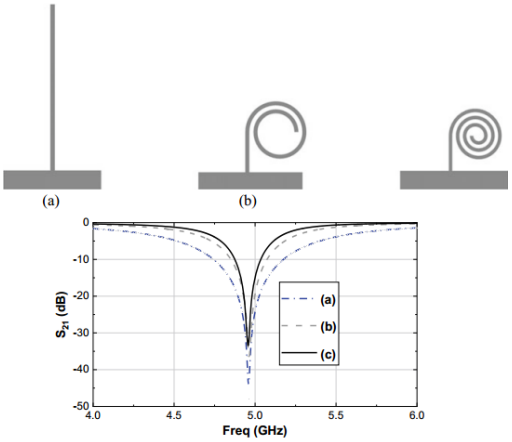
$$\tan\theta_3 = \frac{Y_1Y_3 - Y_2Y_3\tan\theta_1\tan\theta_2}{2Y_1^2\tan\theta_1 + 2Y_1Y_2\tan\theta_2}$$

$$\tan\theta_3 = \frac{Y_1Y_3 - Y_2Y_3\tan\theta_1\tan\theta_2}{2Y_1^2\tan\theta_1 + 2Y_1Y_2\tan\theta_2}$$

(8)

حيث $K_1 = \frac{Y_3}{Y_1}$، يحدد النمط الزوجي ترددي رنين إضافيّين من أجل $\theta_2 = \theta_3$ عند $f_1 = 4.3$ GHz و $f_2 = 7.48$ GHz.

أمّا بالنسبة للملف الدائري المطبوع فهو عبارة عن فرعة مفتوحة النهاية (open stub) يعطي صفر تمرير عند التردد المطلوب. يمكن أن تكون الفرعة مستقيمة أو على شكل ملف دائري. يبيّن الشكل (12) الاختلاف في الاستجابة بين إضافة فرعة مفتوحة النهاية وبين ملف دائري بدورة ونصف وبثلاث دورات (Bi, et al., 2021).



الشكل (12) استجابة فرعة مفتوحة (Bi, et al., 2021).

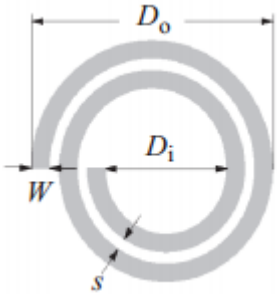
نلاحظ من الشكل أنّ عرض مجال الرفض يزداد بزيادة عدد اللفات وذلك كون الناقليّة تصبح أقل بزيادة عدد اللفات (مع الحفاظ على عرض وطول الفرعة) وبالتالي نلاحظ في الشكل (12) زيادة في الانتقائيّة من أجل عدد اللفات الأكبر. ويبيّن الشكل (14) الملف الدائري المطبوع والذي تعطى معادلات الناقلية له كما يلي (Verma, 2021):

$$L(nH) = 0.03937 \frac{a_{\mu m}^2 n^2}{8a + 11c} . K_g \quad (9)$$

حيث

$$a = \frac{(D_0 + D_i)}{4}$$
$$c = \frac{(D_0 - D_i)}{2} \quad (10)$$
$$K_g = 0.57 - 0.145 ln \frac{W}{h}$$

حيث h سماكة الركيزة، W عرض الركيزة، وذلك من أجل $W/h > 0.05$، D_i و D_0 القطر الداخلي والخارجي للملف المطبوع على الترتيب.



الشكل (13) الملف الدائري المطبوع (Bi, et al., 2021).

يتم برمجيّاً تصميم الملف الدائري المطبوع باستخدام بيئة المحاكاة CST عن طريق خاصيّة توليد منحني تحليلي Analytical curve بحيث يتم إدخال معادلات المنحني على المحاور الأفقية والشاقوليّة وفق مايلي:

(11)

$$x(t) = at\,cos(t)$$
$$y(t) = at\,sin(t)$$

حيث يتم تحديد قيم a و t ضمن CST للحصول على عدد اللفات المطلوب.

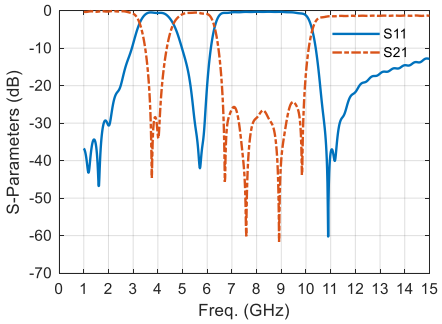
من أجل الوصول إلى الاستجابة الموضّحة في الشكل (14) نقوم بمعايرة أبعاد المرشّح. يبيّن الجدول (2) الأبعاد الفيزيائيّة الناتجة.

5- مكاملة الهوائي مع المرشّح:

من أجل الحصول على هوائي ذو استجابة عريضة المجال ذات مجال حذف نقوم بمكاملة مرشّح MMR مع بنية هوائي UWB، ويبيّن الشكل (15) البنية النهائيّة لتصميم الهوائي المرشّح.

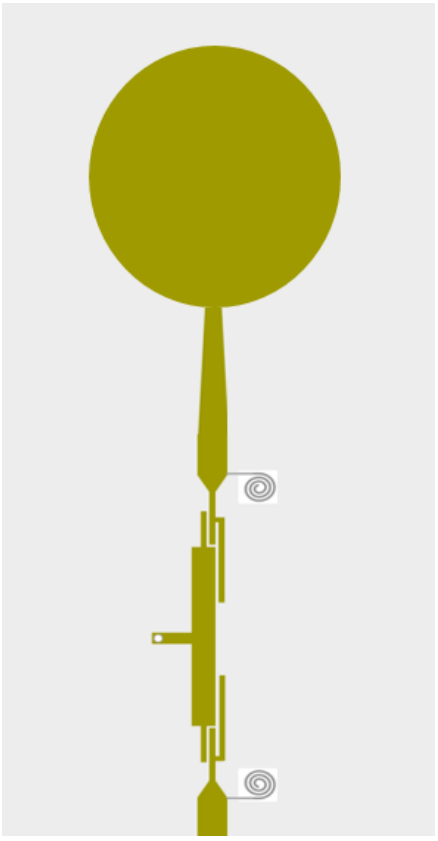
الجدول (2) أبعاد المرشّح

البعد	القيمة (mm)
W_1	0.80
W_2	0.16
W_3	0.50
W_4	0.16
W_5	0.16
L_1	11.00
L_2	1.70
L_3	1.20
L_4	2.60
L_c	3.40
H	4.00
W_s	0.20
S_s	0.20
S_c	0.05
S_i	0.05
S_1	0.05

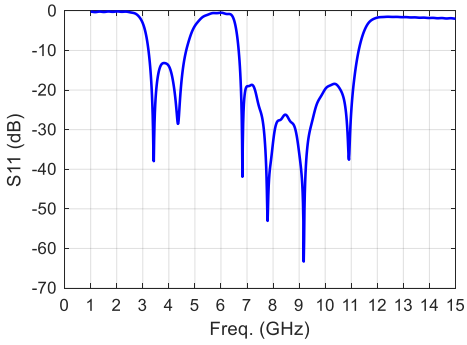


الشكل (14) استجابة المرشّح.

بإجراء المحاكاة على البنية الجديدة والمؤلفة من الهوائي والمرشّح نجد كما يوضّح الشكل (16) فقد الانعكاس للهوائي حيث نلاحظ عرض المجال الممتد من 3.2 GHz وحتى 11.3 GHz مع مجال رفض 4.75 GHz إلى 6.6 GHz. وبرسم نسبة أمواج الجهد المستقرة VSWR كما في الشكل (17) نلاحظ أن النسبة تصل في مجال الرفض إلى 38 عند التردد 6 GHz ضمن مجال الرفض وأقل من 2 ضمن كامل مجال التمرير.

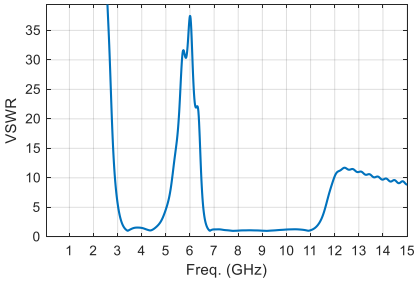


الشكل (15) بنية الهوائي المرشّح.

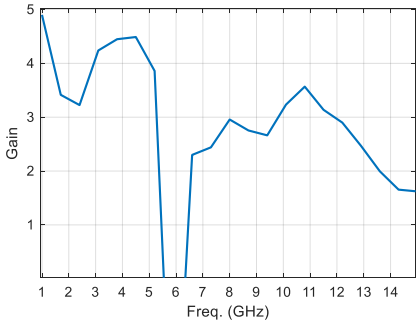


الشكل (16) فقد الانعكاس للهوائي المرشّح.

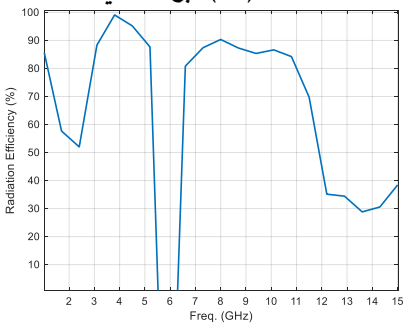
يحقق الهوائي ربح 4.5 dBi و [2-3.5] dBi على مجال التمرير الأول GHz [3.25-4.75] ومجال التمرير الثاني GHz [6.6-10.25] على الترتيب كما يبيّن الشكل (18). بالإضافة إلى فعالية إشعاع [90%-98%] في مجال التمرير الأول GHz [3.25-4.75] و [82%-90%] في مجال التمرير الثاني GHz [6.6-10.25] (الشكل 19).



الشكل (17) نسبة أمواج الجهد المستقرة للهوائي مع المرشح.



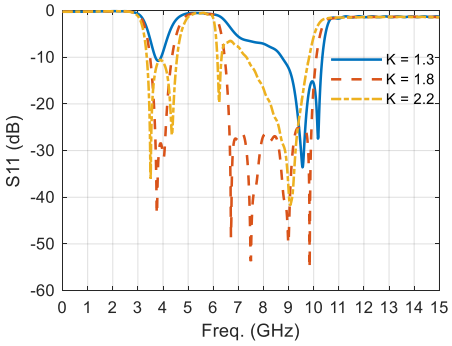
الشكل (18) ربح الهوائي.



الشكل (19) فعاليّة الإشعاع للهوائي.

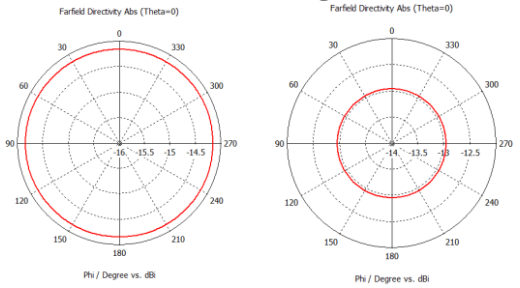
6-1- علاقة عرض مجال الهوائي بنسبة الممانعة K للمرشّح:

يتأثر عرض مجال الهوائي بشكل كبير بتغيّر قيمة نسبة الممانعة للمرشّح K. فبزيادة النسبة K ينقص عرض مجال رنانة الممانعة الخطويّة في المرشّح ممّا يؤدي إلى انخفاض عرض المجال للهوائي في حين انخفاض هذه النسبة يؤدي إلى إزاحة ترددات الرنين نحو الأعلى مع زيادة التباعد بينها، ويبيّن الشكل (20) أثر تغيّر النسبة K على أداء الهوائي.



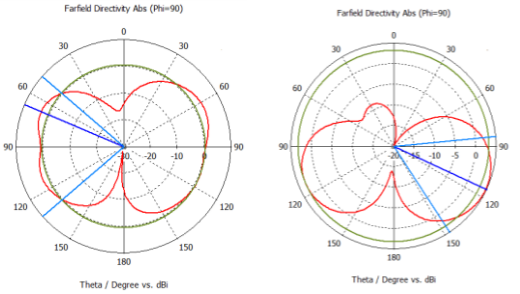
الشكل (20) أثر تغيير نسبة الممانعة للمرشّح K على فقد الانعكاس للهوائي.

تبيّن الأشكال (20) و (21) المخطط الإشعاعي للهوائي في مستوي الحقل المغناطيسي ومستوي الحقل الكهربائي عند مركزي مجالي التمرير 4 GHz و 8 GHz على الترتيب.



عند التردد 4 GHz. عند التردد 8 GHz.

الشكل (20) المخطط الإشعاعي للهوائي في مستوي الحقل المغناطيسي.

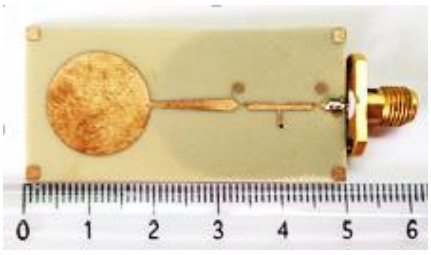


عند التردد 4 GHz. عند التردد 8 GHz.

الشكل (21) المخطط الإشعاعي للهوائي في مستوي الحقل الكهربائي.

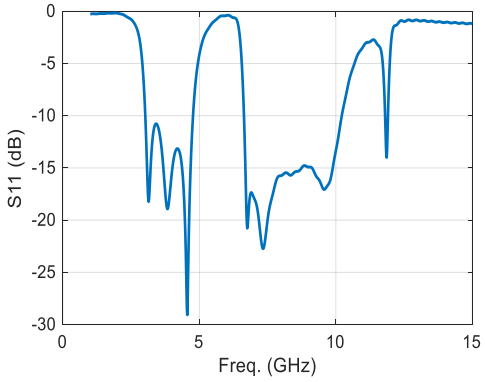
6- التنفيذ العملي ومناقشة النتائج:

نقوم بتصنيع الهوائي المرشّح باستخدام ركيزة من شركة Arlon بثابت عازليّة $\varepsilon_r = 3.25$ وسماكة $h = 0.8\,mm$ وعامل فقد $\tan\delta = 0.0032$. يبيّن الشكل (22) صورة الهوائي المرشّح المنفّذ، في حين يبيّن الشكل (23) فقد الانعكاس.

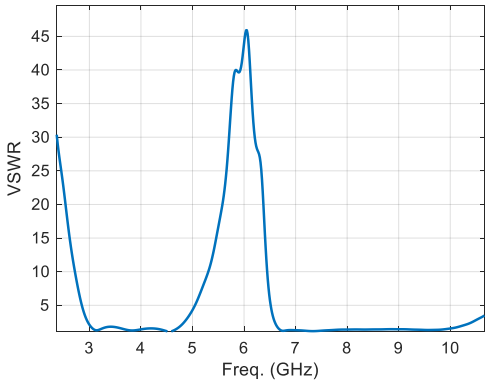


الشكل (22) الهوائي المرشّح.

يظهر الشكل (23) أنّ الهوائي يعمل ضمن مجالين الأول [3.1-4.76] GHz والثاني [6.64-10.21] GHz. حيث نلاحظ عمليّاً انخفاض تردد القطع العلوي للمجال الثاني للهوائي من 11.3 GHz إلى 10.21 GHz، مع انخفاض طفيف على فقد انعكاس الهوائي. يحقق الهوائي فقد انعكاس أقل من 10 dB ضمن المجال الأول [3.25-4.75] GHz وفقد انعكاس أقل من 15 dB ضمن المجال الثاني [6.6-10.25] GHz. ويبيّن الشكل (24) VSWR والذي يتوافق مع نتائج المحاكاة. وبالتالي فإنّ الهوائي مناسب ويصلح للاستخدام العملي.



الشكل (23) فقد انعكاس الهوائي المرشّح.



الشكل (24) VSWR الهوائي المرشّح.

يبيّن الجدول (3) مقارنة الهوائي المرشّح الذي قمنا بتصميمه مع تصاميم أخرى لتحقيق هوائيّات UWB.

الجدول (3) مقارنة النتائج

المرجع	مجال العمل GHz	مجالات الرفض		الربح dBi	فعاليّة الإشعاع (%)	التقنية المستخدمة
		المجال GHz	VSWR			
(Alizadeh, et al., 2021)	$[2.63 - 13]$	$[3.11 - 4.01]$ $[5.15 - 5.98]$	---	$[2.3 - 3.6]$	---	EBG
(Bala, et al., 2022)	$[1.94 - 15.4]$	$[3.16 - 4.09]$ $[6.00 - 6.40]$ $[8.20 - 9.20]$ $[10.0 - 11.6]$ $[12.38 - 12.89]$	---	$[3 - 6]$	---	DMS
(Miraç Dilruba Geyikoglu, 2023)	$[2.05 - 14]$	$[2.40 - 3.70]$ $[5.15 - 5.72]$	---	$[4.28 - 5.4]$	$[73 - 94]$	DGS
(Modak, et al., 2020)	$[2.9 - 10.5]$	$[2.4 - 2.9]$ $[3.6 - 4.3]$ $[5.3 - 5.7]$ $[6.4 - 6.7]$ $[7.8 - 8.6]$	---	3.1	---	EBG, DMS
(Abbas, et al., 2021)	$[3.1 - 11.8]$	$[3.40 - 3.90]$ $[5.15 - 5.82]$ $[7.25 - 7.75]$	---	3.86	---	EBG, SRR
(Lin, et al., 2023)	$[2.7 - 11.06]$	$[3.22 - 3.83]$ $[4.49 - 5.05]$ $[7.18 - 7.84]$	4.0 5.0 4.5	4.5	$[75 - 79]$	DMS
(Chao, et al., 2022)	$[1.3 - 11.6]$	$[2.47 - 4.19]$ $[4.32 - 5.96]$	6.0 8.0	3.5	$[60 - 82]$	SRR
التصميم المقترح	$[3.1 - 10.21]$	$[4.76 - 6.40]$	43	$[3.5 - 4.5]$	$[80 - 95]$	مرشّحات مدمجة

نلاحظ من نتائج معظم الأبحاث والمبيّنة في الجدول (3) أنّها ذات عرض مجال فائق مع مجالات رفض ضيقة (أقل من 1 GHz) كما أنها لاتحتوي على دراسة نسبة أمواج الجهد المستقرة. في الدراسة (Lin, et al., 2023) ثلاثة مجالات رفض ضيقة مع قيم VSWR لاتتجاوز 5. في حين تحتوي الدراسة (Chao, et al., 2022) على مجالي رفض عرضهما $1.52\ GHz$ و $1.64\ GHz$ مع قيم VSWR على المجال الأول 6 والمجال الثاني 8. أمّا الهوائي المقترح والمنفّذ من قبلنا فإنّ مجال الرفض عريض $2.26\ GHz$ ويتمتع بقيمة VSWR عالية جدّاً تصل إلى 43 وبالتالي هناك عزل كبير بين مجالي الهوائي الترددّين للهوائي والذي يتمتع بقيم ربح وفعاليّة جيّدة بالمقارنة مع الدراسات الأخرى.

7- الخاتمة والأعمال المستقبليّة:

قمنا في هذه الورقة البحثيّة باستخدام المرشّحات المدمجة من أجل تصميم هوائي UWB ثنائي المجال. تتوافق مواصفات الهوائي الذي قمنا بتصميمه وتنفيذه مع متطلبات التطبيقات الطبيّة الموصّفة ضمن المعيار IEEE 802.15.6. حيث حصلنا على مجالين ترددّيين منفصلين GHz [3.1-4.76] و GHz [6.64-10.21]. يفصل بينهما مجال رفض عريض يصل إلى $2.26\ GHz$. وتعتبر هذه القيمة كبيرة بالمقارنة مع معظم الأبحاث المماثلة والتي لم يصل فيها

عرض مجال الرفض لأكثر من $1.6\ GHz$. كما بلغت قيمة VSWR ضمن مجال الرفض 43. وبالتالي هناك عزل ممتاز بين مجالي تمرير الهوائي. أمّا من حيث مواصفات الإشعاع فقد حصلنا على ربح هوائي وفعاليّة إشعاع جيدة جدّاً بالمقارنة مع تصاميم هوائيّات UWB الحديثة. يمكن في الدراسات التالية العمل على زيادة ربح الهوائي عن طريق استخدام خلايا EBG أو بنى DGS. كما يمكن دراسة إمكانيّة العمل على ثني تصميم المرشّح من أجل الحصول على حجم أصغر للهوائي.

8- المصطلحات العلميّة:

المصطلح العربي	المصطلح الإنكليزي
فائق عرض المجال	Ultra Wide Band (UWB)
الطب عن بعد	Telemedicine
شبكات منطقة الجسم اللاسلكيّة	Wireless Body Area Network (WBAN)
نقطة وصول	Access point
لجنة الاتصالات الاتحادية	Federal Communications Commission (FCC)
ثنائي القطب	Dipole
عرض مجال الممانعة	Impedance Bandwidth
أحادي القطب	Monopole
فجوات المجال الكهرطيسيّة	Electromagnetic Bandgap (EBG)
بنى خطوط النقل المشوّهة	Defectet Microsrtip Structure (DMS)
بنى الأرضي المشوّهة	Defected Ground Structures (DGS)
رنانات حلقيّة	Ring Resonators
فعاليّة الإشعاع	Radiation Efficiency
الرنانات متعددة الأنماط	Multi-Mode Resonators (MMR)
رنانات الممانعة الخطويّة	Stepped Impedance Resonators (SIRs)
الرنانات المزوّدة بفرعة	Stub Loaded Resonators (SLRs)
نسبة أمواج الجهد المستقرة	Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

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

References:

1. Abbas, A. et al., 2021. Triple Rectangular Notch UWB Antenna Using EBG and SRR. IEEE Access, Volume 9, pp. 2508-2515.
2. Ali, E. M. et al., 2023. A Shorted Stub Loaded UWB Flexible Antenna for Small IoT Devices. sensors.
3. Alizadeh, F. et al., 2021. UWB dual-notched planar antenna by utilizing compact open meander slitted EBG structure. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).
4. Arefin, M. T., Ali, M. H. & Haque, A. K. M. F., 2017. Wireless Body Area Network: An Overview and Various Applications. Journal of Computer and Communications, Volume 5, pp. 53-64.
5. Bala, S., Reddy, P. S., Sarkar, S. & Sarkar, P. P., 2022. Small Size Wideband Monopole Antenna with Five Notch Bands for Different Wireless Applications. Radioengineering, 31(1), pp. 23-31.
6. Basit, A. et al., 2023. Design, Modeling, and Implementation of Dual Notched UWB Bandpass Filter Employing Rectangular Stubs and Embedded L-Shaped Structure. Fractal and Fractional.
7. Bi, X., Ma, Q., Cao, Z. & Xu, Q., 2021. Design and Analysis of Multi-Band Filtering Circuits. s.l.:Springer.
8. Bi, X. et al., 2019. A compact sept-band bandpass filter utilising a single multi-mode resonator. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 13(12), pp. 2013-2019.
9. Chao, Z. et al., 2022. A miniaturized microstrip antenna with tunable double band-notched characteristics for UWB applications. Scientifc Reports.
10. Crnojevic´-Bengin, V., 2015. Advances in Multi-Band Microstrip Filters. s.l.:Cambridge University.
11. Din, I. U. et al., 2022. Improvement in the Gain of UWB Antenna for GPR Applications by Using Frequency-Selective Surface. International Journal of Antennas and Propagation.
12. Galvan-Tejada, G. M., Peyrot-Solis, M. A. & Jardón-Aguilar, H., 2016. Ultra Wideband Antennas: Design, Methodologies, And Performance. s.l.:Taylor & Francis Group.
13. Gangwar, A. K., Alam, M. S., Rajpoot, V. & Ojha, A. K., 2021. Filtering antennas: A technical review. RF and Microwave Computer-Aided Engineering.
14. Jameel, M. S., Mezaal, Y. S. & Atilla, D. C., 2023. Miniaturized Coplanar Waveguide-Fed UWB Antenna for Wireless Applications. Symmetry.
15. Juma'a, F. K. et al., 2022. Design and Implementation of a Miniaturized Filtering Antenna for 5G Mid-Band Applications. Electronics.

16. Karad, K. V. & Hendre, V. S., 2023. A flower bud-shaped fexible UWB antenna for healthcare applications. EURASIP Journal on Wireless.

17. Kastro, G. & Wiselin, M., 2019. Design and Analysis of Stub Loaded Resonator. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 8(1S4), pp. 272-283.

18. Kumar, V. & Gupta, B., 2016. On-body measurements of SS-UWB patch antenna for WBAN. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).

19. Liang, J., Chiau, C. C., Chen, X. & Parini, C. G., 2005. Study of a Printed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Systems. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Volume 53, pp. 3500-3504.

20. Lin, H., Lu, Z., Wang, Z. & Mu, W., 2023. A Compact UWB Monopole Antenna with Triple Band Notches. Micromachines.

21. Li, P., Liang, J. & Chen, X., 2006. Study of Printed Elliptical/Circular Slot Antennas for Ultrawideband Applications. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Volume 54, pp. 1670-1675.

22. Luo, J., Shi, K. & Gao, S., 2022. Miniaturized Multiband Bandpass Filters Based on a Single Multimode Resonator Loading Branches. Discrete Dynamics in Nature and Society.

23. Luo, J., Shi, K. & Gao, S., 2023. Compact multiband bandpass filters based on parallel coupled split structure multimode resonators. Electronics Letter, 59(1).

24. Luo, S. et al., 2020. A monopole UWB antenna with sextuple band-notched based on SRRs and U-shaped parasitic strips. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).

25. Mao, C. X. et al., 2021. Filtering Antennas: Design Methods and Recent Developments. IEEE Microwave Magazine, 22(11), pp. 52 - 63.

26. Miraç Dilruba Geyikoglu, 2023. A novel UWB fexible antenna with dual notch bands for wearable biomedical devices. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Volume 114, pp. 439-450.

27. Modak, S., Khan, T. & Laskar, R. H., 2020. Penta-Notched UWB Monopole Antenna using EBG Structures and Fork-Shaped Slots. Radio Sci, Volume 55, pp. 1-11.

28. Othman, A. et al., 2019. Design of compact ultra wideband antenna for microwave medical imaging application. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Volume 15, pp. 1197-1202.

29. Saha, C., Siddiqui, J. Y. & Antar, Y. M., 2019. Multifunctional Ultrawideband Antennas Trends, Techniques and Applications. s.l.:CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.

30. Salamin, M. A., Ali, W. A., Das, S. & Zugari, A., 2019. Design and investigation of a multi-functional antenna with variable wideband/notched UWB behavior for WLAN/X-band/UWB and Ku-band applications. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).

31. Sanyal, R., Sarkar, P. P. & Sarkar, S., 2019. Octagonal nut shaped monopole UWB antenna with sextuple band notched characteristics. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).

32. Shome, P. P. & Khan, T. a., 2019. A Compact Design of Circular Ring-Shaped MMR Based Bandpass Filter for UWB Applications. s.l., s.n.

33. Sun, M. et al., 2021. A high selectivity dual-band bandpass filter using quadruple-mode multi-stub loaded ring resonator (SLRR). International Journal of RF and Microwave computer-aided engineering.

34. Vera, D., Costa, N., Roda-Sanchez, L. & Olivares, T., 2019. Body Area Networks in Healthcare: A Brief State of the Art. MDPI, Applied sciences.

35. Verma, A. K., 2021. Introduction to Modern Planar Transmission Lines Physical, Analytical, and Circuit Models Approach. s.l.:John Wiley & Sons, Inc.

36. Wang, S., Li, K., Kong, F. & Du, L., 2020. A miniaturized triple-band planar antenna combing single-cell metamaterial structure and defected ground plane for WLAN/WiMAX applications. Journal Of Electromagneticwaves And Applications.

37. Yadav, D. et al., 2017. A Compact Dual Band-Notched UWB Circular Monopole Antenna with Parasitic Resonators. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).

38. Yoon, K. & Kim, K., 2021. Design of Dual Ultra–Wideband Band–Pass Filter Using Stepped Impedance Resonator Short Stubs and T–Shaped Band-Stop Filter. Electronics.