

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم الاتصالات
العام الدراسي 2021-2022

تصميم مصفوفة هوائيات خطية ذات ربح عالٍ تعمل في مجال الأمواج الميليمترية لدعم تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في نظم الاتصالات – اختصاص نظم الاتصالات الراديوية والنقالة

تقديم
م. حسام محمد خميس

إشراف
د. علي حسن

09/02/2023

SYRIAN ARAB REPUBLIC
HIGHER INSTITUTE FOR APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY
COMMUNICATION DEPARTMENT

Design linear High gain Antenna Matrix for 5G Applications work in mm

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
master of communication systems

by
Eng. Husam Muhammed Khamis

Supervisor
Dr. Ali Hassan

09/02/2023

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

Higher Institute for Applied Sciences and Technology

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا مؤسسة حكومية للتعليم العالي أحدثت بموجب المرسوم التشريعي رقم /24/ لعام 1983، وذلك بهدف إعداد كوادر علمية متميزة من مهندسين وباحثين للإسهام الفاعل في عملية التطوير العلمي والتنمية في الجمهورية العربية السورية. يمنح المعهد درجة الإجازة في اختصاصات الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وهندسة الطيران وعلوم وهندسة المواد.

يقبل المعهد العالي لدراسة هذه الاختصاصات شريحة منتقاة من المتفوقين في الشهادة الثانوية من الفرع العلمي. يتيح المعهد العالي أيضاً برامج ماجستير أكاديمي في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي نظم المعطيات الكبيرة ونظم المعلومات ودعم القرار وفي علوم وهندسة المواد وعلوم وهندسة البصريات. وأخيراً، يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في الاتصالات والمعلوماتية ونظم التحكم والفيزياء التطبيقية. تُحدث في المعهد العالي اختصاصات جديدة بحسب متطلبات سوق العمل وتوجهات البحث والتطوير المحلية والعالمية.

إلى جانب النشاط التعليمي، يمارس المعهد العالي عبر جهود أطره وفعالياته العلمية المختلفة نشاطاً حثيثاً في البحث والتطوير، إذ ينفذ مشاريع ودراسات واستشارات متنوعة لصالح الجهات العامة والخاصة في القطر، كما يتعاون مع جهات خارج القطر في بعض المشاريع البحثية والتطويرية. يسعى المعهد أيضاً، عبر دورات تدريبية نظرية وعملية متاحة للقطاعين العام والخاص وللأفراد، إلى إفادة أوسع فئة من المهتمين من إكسابهم أطره العلمية ومختبراته. واستكمالاً لدوره الرائد في مجال التعليم ونشر العلم، ينشر المعهد العالي كتباً علمية عالية المستوى، من نتائج أطره، منها ما هو تدريسي يوافق المناهج في المعهد العالي ويفيد شريحة واسعة من الطلاب الجامعيين عموماً، ومنها ما هو علمي ثقافي. يتيح المعهد العالي بعضاً من منشوراته على موقعه على الشبكة، كما يتيح إمكانية الاطلاع على وسائل الماجستير والدكتوراه المنفذة في المعهد العالي وعلى بعض منشورات طلابه وأطره من المقالات العلمية.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية، دمشق، ص.ب 31983

Higher Institute for Applied Sciences and Technology – HIAST

P. O. Box 31983, Damascus, Syrian Arab Republic

هاتف 00963115123819 - فاكس 00963115140761

بريد الكتروني contact@hiast.edu.sy

موقع الكتروني www.hiast.edu.sy

تصريح

أنا الموقع أدناه حسام محمد خميس

معدّ أطروحة الماجستير التي تحمل العنوان:

تصميم مصفوفة هوائيات خطية ذات ربح عالٍ تعمل في مجال الأمواج الميليمترية لدعم تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات

أصرح بأن:

- جميع الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة هي نتيجة جهودي الشخصية وبتوجيه من المشرف، وأن ما عدا ذلك من معلومات ونتائج قد نُسبت إلى مصادرها ومؤلفيها وأشير إلى ذلك في متن النص وفي قائمة المراجع.
- المعطيات والمعلومات المستخدمة في هذه الأطروحة جرى تحصيلها بطرائق سليمة ومشروعة ونُسبت إلى مصادرها في المواضع الملائمة.
- كل مكون من مكونات هذه الأطروحة (مقطع نصّي، صورة، مخطط، ...) مقتبس من عمل آخر جرى تمييزه بوضوح ونُسب إلى مصدره.
- الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة لم تُستخدم سابقاً وليست قيد الاستخدام للحصول على أي شهادة أكاديمية أخرى.

التوقيع



دمشق 8 / 2 / 2023

إهداء

إلى سكينة الروح وروح الحياة

عائتي

كلمة شكر.....

الشكر للدكتور علي حسن علي متابعته الدائمة وملاحظاته القيّمة وارشاداته الهامّة التي كانت اللبنة الأساسية لهذا العمل.

الشكر لكل من ساعد بأن يُبصر هذا العمل النور.

الخلاصة

يقدم هذا البحث تصميم وتحليل مصفوفة هوائيات مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس للاتصالات اعتماداً على تقنيات تخميد الحزم الجانبية. اعتمد في هذه الدراسة العمل في مجال الأمواج الميليمترية لما تتيحه من حيز ترددي على عكس المجالات الترددية الأخفض التي تعاني من اكتظاظ في التطبيقات العاملة عليها.

ولعل أبرز المشاكل التي تواجه أي نظام اتصالات هو التداخل لما له من أثر سلبي على أداء الخدمة التي يقدمها، لذلك تم التركيز بشكل أساسي في هذا العمل على تخميد الحزم الجانبية منعاً للتداخل بين الحزم الإشعاعية، فقد تم اختبار العديد من تقنيات تخميد الحزم الجانبية والمقارنة فيما بينهم من حيث الفعالية في الاستخدام في تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات والقدرة على تخميد الحزم الجانبية.

بدايةً اقترحنا تصميم مصفوفة هوائيات خطية، يتم تغذيتها وفق خوارزمية التخميد بنفس الوقت لجميع الحزم الجانبية (SSR) وذلك بهدف زيادة ربح الهوائيات المستخدمة من جهة وتخمين مطال الحزم الجانبية من جهة أخرى. تتكون المصفوفة الخطية المقترحة من 16 عنصر مصممة على قاعدة ذات نوع Rogers RO5880 بأبعاد $90 \times 25 \times 0.25 \text{ mm}^3$ عند تردد 27GHz، وقد أثبت التصميم المعتمد على الخوارزمية الأنف ذكرها فعالية عالية في تخميد الحزم الجانبية، فقد سجلت تخميداً بمقدار 12.5- ديسبل وبربح عالي 14.472 ديسبل. وبإعادة تصميم المصفوفة الخطية اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف وتحليل النتائج المستخلصة من محاكاة مصفوفة الهوائيات الخطية بناءً على الطريقتين، فقد أثبتت خوارزمية SSR تفوقها من حيث تخميد الحزم الجانبية إضافةً إلى أن متوسط قيمة الحزم الجانبية باستخدام الخوارزمية أخفض بكثير مقارنة بمستوى متوسط الحزم الجانبية عند استخدام خوارزمية دولف تشيبيشيف إضافةً إلى ميزات أخرى حصلنا عليها من التصميم المعتمد على خوارزمية SSR كالربح العالي وحزمة الأشعاع الرئيسية الضيقة، كما تم تحسين قيمة تخميد الحزم الجانبية للتصميم المعتمد على خوارزمية SSR وذلك من خلال استخدام الأسطح انتقائية التردد حيث تم الحصول على تخميد حزم جانبية بمقدار 14.5- ديسبل، علماً أن شكل الحزمة الرئيسية الناتجة شبيه بنصف الشطيرة. لذلك بهدف تحسين شكل الحزمة الرئيسية إلى قلمية قمنا بالجوء إلى تصميم مصفوفة هوائيات مستوية 8×8 اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف، أثبتت فعاليتها بتخميد الحزم الجانبية بمقدار يزيد عن 100dB وبربح أعلى إضافةً لحزمة أشعاع قلمية تتجه نحو المستخدم، ليكن بذلك التصميم الأفضل المقترح للاستخدام في تطبيقات الجيل الخامس.

Abstract

This research presents the design and analysis of an appropriate antenna array for fifth-generation communication applications based on sidelobe suppression techniques. This study focuses on the work in the millimeter wave domain due to its wide frequency range compared to lower frequency bands which suffer from congestion in operating applications.

One of the major problems facing any communication system is interference, which has a negative impact on service performance. Therefore, this work mainly focuses on sidelobe suppression to prevent interference between radiating beams. Many sidelobe suppression techniques have been tested and compared in terms of their effectiveness in fifth-generation communication applications and their ability to suppress sidelobes.

We initially proposed a linear array antenna design, fed according to the Sidelobes Simultaneous Reduction algorithm (SSR), in order to increase the gain of the used antennas and suppress the side lobes. The proposed linear array consists of 16 elements designed based on Rogers RO5880 with dimensions $90 \times 25 \times 0.25$ mm³ at 27GHz. The design based on the mentioned algorithm proved to be highly effective in suppressing side lobes, recording a suppression of -12.5 dB and a high gain of 14.472 dB.

By redesigning the linear array based on the dolph-chebyshevhh technique and analyzing the results obtained from simulating the linear antenna array based on both methods, it was proven that the SSR algorithm have a better performance in terms of sidelobe suppression, in addition to that, the average sidelobe using the algorithm decreased significantly compared to the average sidelobe level when using dolph-chebyshev technique. Other benefits obtained from designing based on SSR algorithm such as high gain and narrow main beam were also achieved.

As the side lobe suppression of the SSR-based design has been improved, by using frequency selective surfaces, a side lobe suppression of -14.5 dB was obtained, and the resulting main lobe shape was similar to a half-sine wave. In order to improve the main lobe shape to pencil-like, an 8x8 planar array based on Dolph-Chebyshev technique was adopted, which demonstrated its effectiveness with a side lobe suppression of more than 100dB and a higher gain pencil beam towards the user, making it the best proposed design for use in fifth generation applications.

المحتويات

12.....	الخلاصة
14.....	المحتويات
16.....	قائمة الأشكال
18.....	قائمة الجداول
19.....	قائمة الاختصارات
20.....	مقدمة عامة
24.....	الفصل الأول: مبادئ ومفاهيم أساسية
23.....	1.1- الهوائيات المصفوفية
24.....	2.1- تصنيف الهوائيات المصفوفية
29.....	3.1- دراسات مرجعية
31.....	الفصل الثاني: دراسة نظرية
31.....	1.2- تخميد الحزم الجانبية
38.....	2.2- طرق تغذية عناصر المصفوفة
38.....	3.2- مقسمات الاستطاعة T-junction
39.....	4.2- مصفوفات الهوائيات الخطية والمستوية
43.....	5.2- الأسطح انتقائية التردد
45.....	الفصل الثالث: أجيال أنظمة الاتصالات النقالة
45.....	1.3- مقدمة
45.....	2.3- لمحة عن الأجيال الحالية للشبكات الخلوية
46.....	3.3- الجيل الخامس للشبكات الخلوية
50.....	الفصل الرابع: تصميم وتحليل مصفوفة هوائيات اعتماداً على تقنيات تخميد الحزم الجانبية
50.....	1.4- مقدمة

- 2.4- تصميم ومحاكاة هوائى شرائحى وحيد.....50
- 3.4- تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على توزيع دولف-تشيبشيف...55
- 4.4- تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR.....57
- 2.4.4- مصفوفة هوائيات خطية مخمدة الحزم الجانبية باستخدام SSR محسنة الأداء.....65
- 5.4- محاكاة مصفوفة هوائيات مستوية مغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبشيف.....68

74..... خاتمة وأفاق مستقبلية

76..... المراجع

قائمة الأشكال

- الشكل 1: مصفوفة هوائيات مكونة من p عنصر تبعد عن بعضها البعض مسافة متساوية.....24
- الشكل 2: مصفوفة الهوائيات المقترحة في المرجع [7] مع مخطط الإشعاعي الناتج عنها.....26
- الشكل 3: المصفوفة الفرعية الفعالة المقترحة في المرجع [8] مع مخططها الإشعاعي وعملية قياسه.....26
- الشكل 4: مصفوفة الهوائيات المقترحة في المرجع [10] مع عرض ربحه ومخططه الإشعاعي.....27
- الشكل 5: تخميد الحزم الجانبية عند تغذية عناصر المصفوفة اعتماداً على خوارزمية SSR مقارنة بتغذية العناصر بشكل متساوي.....[3].29
- الشكل 6: المقارنة بين خوارزمية SSR ودولف تشيبيشيف [3].....35
- الشكل 7: تخميد الحزم الجانبية المحددة والتصفية المكانية لعدة سيناريوهات باستخدام 16 عنصر: a,c,e,g تمثل قيم الأوزان اللازمة للحصول على مخططات الأشعاع b,d,f,h على الترتيب [3].....36
- الشكل 8: (a) التغذية التسلسلية (b) التغذية التفرعية (c) التغذية التسلسلية-التفرعية [30].....37
- الشكل 9: شبكة T-junction بسيطة عديمة الضياع.....38
- الشكل 10: A مصفوفة هوائيات مكونة من ثمانية هوائيات ديبول تعمل في المجال UHF
- B مصفوفة هوائيات مستوية مكونة من 175 هوائي ديبول تعمل في المجال VHF.....40
- الشكل 11: مخطط يوضح توضع هوائيات المصفوفة الخطية.....41
- الشكل 12: مخطط يوضح تموضع هوائيات المصفوفة المستوية.....42
- الشكل 13: آلية عمل الأسطح FSS.....43
- الشكل 14: تطبيق تقنية تشكيل الفص الإشعاعي باستخدام مصفوفة هوائيات.....48
- الشكل 15: التصميم المكون من هوائي شرانحي ومخطط الربح له.....51
- الشكل 16: مصفوفة الهوائيات الخطية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف.....53
- الشكل 17: أظهار التصميم المعتمد على دولف تشيبيشيف عن قرب.....53
- الشكل 18: المخطط الإشعاعي الناتج عن محاكاة دولف تشيبيشيف مع الدارة المصممة.....54
- الشكل 19: مخطط S11 الناتج عن محاكاة دارة دولف تشيبيشيف.....54
- الشكل 20: المخطط الإشعاعي الناتج عن محاكاة دارة دولف تشيبيشيف.....55
- الشكل 21: مخطط الربح مقدراً بالديسبل بدلالة التردد للدارة المصممة.....56

- الشكل 22: سلوك تقارب الخوارزمية SSR مع عدد دورات التخفيف [3].....59
- الشكل 23: مصفوفة الهوائيات الخطية المغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR.....59
- الشكل 24: أظهار التصميم المعتمد على خوارزمية SSR عن قرب.....60
- الشكل 25: المخطط الإشعاعي الناتج عن محاكاة التصميم المعتمد على خوارزمية SSR.....60
- الشكل 26: المخطط الإشعاعي الناتج عن المحاكاة اعتماداً على خوارزمية SSR مع الدارة المصممة.....61
- الشكل 27: مخطط الربح بدلالة التردد بتطبيق خوارزمية SSR.....62
- الشكل 28: مخطط يظهر قيمة S11 بدلالة التردد.....63
- الشكل 29: مخطط إشعاعي متعدد الفصوص ناتج عن تخميد الحزم المحدد باستخدام SSR.....64
- الشكل 30: طريقة الترابط الكهربيسي Proximity feed.....65
- الشكل 31: التصميم المقترح لوحدة FSS.....66
- الشكل 32: التصميم المقترح لطبقتي FSS ومصفوفة الهوائيات الخطية.....66
- الشكل 33: مصفوفة FSS.....67
- الشكل 34: المخطط الإشعاعي للتصميم المحسن.....67
- الشكل 35: مخطط الربح للتصميم المحسن.....68
- الشكل 36: التصميم المقترح المكون من مصفوفة هوائيات مستوية 8x8.....69
- الشكل 37: مخطط الاتجاهية (الربح) بدلالة الزاوية لمصفوفة هوائيات مستوية مغذاة بشكل متساوي.....70
- الشكل 38: مخطط ثلاثي الأبعاد للمخطط الأشعاعي لمصفوفة الهوائيات المستوية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبشيف.....71
- الشكل 39: مخطط الربح بدلالة الزاوية لمصفوفة الهوائيات المستوية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبشيف.....72
- الشكل 40: مصفوفة هوائيات مستوية مخففة العناصر.....73
- الشكل 41: أداء المصفوفة المستوية مخففة العناصر (A) المصفوفة المستوية مخففة العناصر مغذاة من خلال دولف تشيبشيف ، B المصفوفة المستوية المغذاة من خلال نافذة هامينغ).....74

قائمة الجداول

- الجدول 1: مقارنة لبعض معاملات الأداء لمصفوفات الهوائيات العاملة في مجال الأمواج
الميليمترية. 20.....
- الجدول 2: المقارنة بين طرق تغذية عناصر مصفوفة الهوائيات [30]..... 37
- الجدول (3): أهم الحزم الترددية المستخدمة في الجيل الخامس [34]..... 49
- الجدول 4: قيم الأوزان المأخوذة من توزيع دولف تشيبيشيف..... 52
- الجدول 5: قيم الأوزان الناتجة عن تنفيذ خوارزمية SSR..... 57
- الجدول 6: الحزم الجانبية الناتجة عن التكرار الأول لخوارزمية SSR..... 58
- الجدول 7: قيم الأوزان لعناصر المصفوفة المستوية..... 71

قائمة الاختصارات

SSR. Simultaneous Sidelobes Reduction التخميد بنفس الوقت لجميع الحزم الجانبية

FSS. Frequency Selective Surfaces. الأسطح انتقائية التردد.

eMBB Enhanced Mobile Broadband النطاق النقل العريض المحسّن

Ultra Reliable Low Latency communications اتصالات عالية الوثوقية منخفضة زمن التلبث

URLLC

mMTC massive Machine Type Communications اتصالات الآلات الكثيفة

مقدمة عامة

تتطور المجتمعات البشرية بشكل متزامن مع مختلف التقانات والابتكارات التي تضفي المزيد والمزيد من السهولة في الحياة البشرية لما تعطي من خدمات ومميزات لم تكن حاضرة في الماضي القريب، ولكن في المقابل تمثل هذه الخدمات تحدياً بالنسبة للمبتكرين والمهندسين لتأمين متطلبات تشغيل هذه الخدمات وتذليل الصعوبات التي تواجهها خصوصاً في مجال الاتصالات اللاسلكية حيث تزداد الحاجة لمعدل نقل معطيات أعلى مع الحرص على تقليل الفقد وتفادي حصول تداخل إن كان هذا التداخل تداخلاً مع تقنيات أخرى أو تداخل إشعاعي ضمن التقنية ذاتها.

يؤثر الفقد والتداخل بشكل سلبي على أداء أنظمة الاتصالات، ولذلك تم الاعتماد في هذا البحث على العمل في مجال الأمواج الميليمترية لما تتبجه من حيز ترددي على عكس المجالات الترددية الأخفض والتي تعاني من اكتظاظ في التطبيقات العاملة عليها. كما أنه، يواجه العمل ضمن مجال الأمواج الميليمترية تحدياً كبيراً، فالأمواج الميليمترية تتميز بصغر طول موجتها مما يؤدي إلى زيادة الفقد خلال انتشارها مقارنة باستخدام مجالات ترددية أخرى [2].

يمكن مواجهة مشكلة الفقد الكبير خلال انتشار الأمواج الميليمترية بزيادة ربح الهوائيات المستخدمة. ولذلك، اقترحنا تصميماً لمصفوفة من الهوائيات الخطية، يتم تغذيتها وفق خوارزمية التخميد بنفس الوقت لمطال الحزم الجانبية. يسمح التصميم المقترح بزيادة الربح المحقق في الهوائيات وبالتالي التغلب على فقد الانتشار. كما تم التركيز بشكل أساسي في هذا البحث على تخميد الحزم الجانبية وذلك منعاً للتداخل بين الحزم الإشعاعية، فقد

تم الاعتماد على خوارزمية SSR التي تم ابتكارها أساساً من أجل تخميد الحزم الجانبية، مع العلم بإمكانية التعديل عليها من أجل القيام بتخميد حزم محددة وذلك بهدف القيام بما يسمى التصفية المكانية حيث تتميز الخوارزمية بالسرعة وسهولة التحكم بها وفعالية تخميد الحزم الجانبية و الحزم المحددة.

توجد العديد من الطرق لتخميد الحزم الجانبية من أبرزها طريقة دولف تشيبيشيف التي تعتبر من أكثر الطرق فعالية واستخداماً في تخميد الحزم الجانبية. لذلك، قمنا بإعادة تصميم المصفوفة السابقة اعتماداً على تقنية دولف تشيبيشيف إلا أن خوارزمية SSR أثبتت تفوقاً عليها. فقد حقق التصميم المعتمد على الخوارزمية الأنفة الذكر مستوى استطاعة الحزم الجانبية أقل ب 1 dB من طريقة دولف تشيبيشيف وذلك باستخدام العدد ذاته من العناصر في مصفوفة الهوائيات مع مستوى متوسط للحزم الجانبية أقل ب 7dB وهو ما يوافق ما ذكر في المقالة [3]. مما يؤكد فعالية خوارزمية SSR للقيام بتخميد الحزم الجانبية إضافة إلى الميزات الرائعة للتصميم المقترح كالربح العالي، العمل في مجال الأمواج الميليمترية، الحزم الجانبية المخمدة، حزمة الأشعاع الرئيسية الضيقة مما يجعل هذا التصميم مناسب لدعم تطبيقات الجيل الخامس، ولكنه غير مثالي نتيجة شكل حزمة الأشعاع الرئيسية الشبيهة بنصف الشطيرة نتيجة استخدام مصفوفة هوائيات خطية، فمن المهم في الجيل الخامس للاتصالات أن تكون حزمة الأشعاع قلمية تتجه نحو المستخدم. لذلك، لجأنا إلى تصميم مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 مكونة من 64 عنصر مغذاة اعتماداً على تقنية دولف تشيبيشيف،

حيث يتميز التصميم السابق بربح عالي 48dB تقريباً مع تخميد حزم جانبية يفوق 100dB- إضافة إلى حزمة الأشعاع الرئيسية الضيقة قلمية الشكل، مما يجعل التصميم السابق هو الأفضل للاستخدام في تطبيقات الجيل الخامس.

اعتمد في هذا العمل على برنامجي الماتلاب (MATLAB) و HFSS للقيام بعملية المحاكاة. استخدم برنامج HFSS في عملية محاكاة تصميم مصفوفة الهوائيات الخطية وشبكة التغذية الخاصة بها. وقد تم استخدام الماتلاب لتنفيذ خوارزمية SSR و دولف تشيبيشيف واستخراج عامل الأوزان لكل منهما، إضافة لمحاكاة مصفوفة الهوائيات المستوية المقترحة.

هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتصميم مصفوفة هوائيات مناسبة للعمل في تطبيقات الجيل الخامس تعمل عند تردد 27GHZ الواقع ضمن مجال الأمواج الميليمترية مع التركيز بشكل أساسي على تخميد الحزم الجانبية يجب أن يحقق التصميم المواصفات التالية:

- حزمة شعاعية رئيسية ضيقة
- حزم جانبية مخمّدة
- ربح عالي

لتحقيق هذا الهدف تم اقتراح عدة تصاميم: مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR، مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على تقنية دولف تشيبيشيف، مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 مغذاة اعتماداً على تقنية دولف تشيبيشيف، وقد تم اعتماد هذا التصميم نتيجة تحقيقه أهداف البحث بشكل ممتاز.

مساهمات البحث

نلخص مساهمات البحث كالتالي:

- مساهمات علمية:

- تصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف
- تصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR
- تصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR وتقنية FSS
- تصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 مغذاة اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف
- كتابة مقالة علمية بعنوان " تصميم مصفوفة هوائيات خطية مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس اعتماداً على خوارزمية SSR"، وقد تم تحكيمها وقبولها للنشر في مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية.

- مساهمات تقنية:

- تنجيز التصميم "مصفوفة هوائيات خطية اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف" باستخدام برنامج HFSS.
- تنجيز التصميم "مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR" باستخدام برنامج HFSS.
- تنجيز التصميم "مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 مغذاة اعتماداً على خوارزمية دولف تشيبيشيف" باستخدام برنامج MATLAB.

تنظيم الأطروحة

تم تنظيم الأطروحة كما يلي:

يقدم الفصل الأول مجموعة من المبادئ والمفاهيم الأساسية في مصفوفات الهوائيات وأنواعها وتطبيقاتها، ثم يستعرض مجموعة من الدراسات المرجعية التي تخص مشكلة البحث الرئيسية.

يختص الفصل الثاني بتقديم دراسة نظرية شاملة تتضمن المحاور التالية:

- تقنيات تخميد الحزم الجانبية
- طرق تغذية عناصر المصفوفة
- المصفوفات الخطية والمستوية
- مقسمات الاستطاعة
- الأسطح انتقائية التردد

يتضمن الفصل الثالث شرح مفصل عن أجيال أنظمة الاتصالات الخلوية مع التركيز على الجيل الخامس للشبكات الخلوية المستهدف العمل به.

في الفصل الرابع يتم تصميم وتنفيذ العديد من مصفوفات الهوائيات المغذاة اعتماداً على إحدى تقنيات تخميد الحزم الجانبية، إضافة إلى مناقشة نتائج المحاكاة، والقيام بالمقارنة بين هذه الطرق وانتقاء الأفضل.

أخيراً، نقدم خاتمة عامة للبحث، إضافة لبعض المقترحات والتوصيات التي تخدم الآفاق المستقبلية لهذا المجال البحثي.

الفصل الأول

مبادئ ومفاهيم أساسية

يتم تنظيم هذا الفصل كما يلي. نقدّم أولاً لمحة عامة عن مصفوفات الهوائيات، ومبدأ عملها وتطبيقاتها، والمقارنة بين معاملات الأداء لأبرز مصفوفات الهوائيات العاملة في مجال الأمواج المليمترية

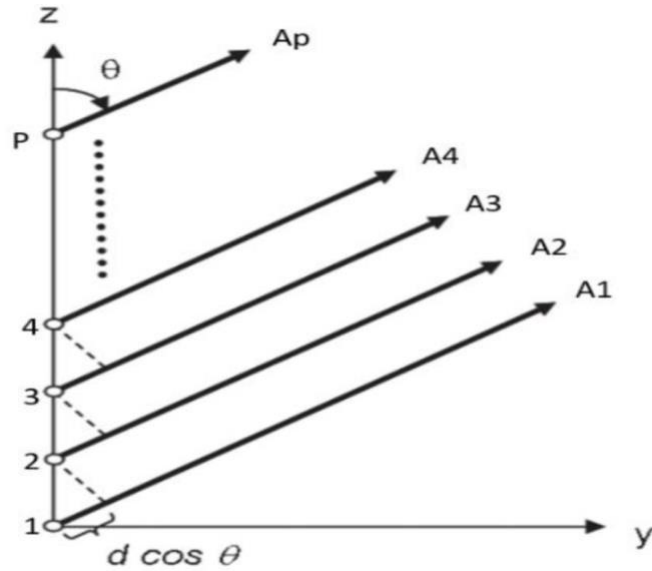
1.1- الهوائيات المصفوفية

1.1.1- مقدمة

إن التطور الحاصل في تقانة الهوائيات المصفوفية في يومنا هذا ناتج عن التطور الكبير الذي شهدته الهوائيات كافة عبر مئات السنين. تم تصميم أول هوائي مصفوفي عام 1901 من قبل جوجليمو ماركوني من أجل القيام بتجربة الاتصال عبر المحيط الأطلسي. عقب هذا الاختراع، وخلال العقود القليلة التالية بما في ذلك عصر الحرب العالمية الثانية تم تحسين الهوائيات المصفوفية من خلال العديد من المراجعات لرادارات الاتصالات، وعلم الفلك الراديوي، فقد تم ابتكار مصفوفة Yagi-Uda مع مخطط الأشعاع ذو النهاية النارية (end-fire radiation pattern) من خلال S.Uda, H.Yagi [4] يستخدم هذا الابتكار العديد من الموجات والعاكسات إلى جانب نقطة تغذية وحيدة. ومن الاكتشافات المميزة التي حدثت في تلك الفترة هي الهوائيات المزاحة طورياً.

تُعد الاكتشافات المذكورة ثورة حقيقية في عالم الهوائيات رغم الحجم الكبير لهذه الهوائيات ومحدودية مساحتها الراديوي في اتجاهي السمات والارتفاع. تم توظيف توجيه الحزمة (Beam steering) مع مصفوفة الهوائيات المزاحة طورياً في تلك الفترة باستخدام الطرق الميكانيكية فقط، مما جعل تكلفة استخدامها مرتفعة. لذلك تم استخدامها بدايةً في المجال العسكري فقط. [5] لتصبح تقنيات تشكيل الحزمة الإشعاعية فيما بعد مسيطرة بشكل كبير على مصفوفة الهوائيات المزاحة طورياً، فيما بعد استخدمت الأجهزة الإلكترونية مزيجات الطور وتقنيات المعالجة الرقمية التي أضفت المزيد من التطور على هذه الأجهزة، إلى أن بدأ عصر أنصاف النواقل التي أحدثت ثورة كبيرة في تصميم الهوائيات.

يتكون صيف الهوائي من العديد من العناصر المتطابقة والتي تبعد عن بعضها البعض مسافة معينة، يُمكن تغيير كسب الهوائي، نمط الأشعاع، زاوية التغطية وذلك بترتيب العناصر المصفوفية بطريقة معينة، تُمكن هذه الزيادة في الربح بتركيز الاستطاعة المشعة في الاتجاه المحدد، إضافة إلى التخفيف من عرض الحزمة الإشعاعية مقارنة باستخدام هوائي وحيد.



الشكل 1: مصفوفة هوائيات مكونة من p عنصر تبعد عن بعضها البعض مسافة متساوية

يبين الشكل 1 عناصر مصفوفة الهوائيات المنتشرة على امتداد المحور Z والتي تبعد عن بعضها البعض مسافة d ، يُمكن حساب الحقل الكهربائي المشع من خلال العلاقة الرياضية البسيطة (1) [6].

$$E = C \frac{e^{-jkr}}{A} \sum_{p=1}^P a_p f_p(\theta) e^{j(p-1)(kdcos\theta + \beta)} \dots\dots\dots (1)$$

حيث p تعبر عن رقم العنصر، a_p وزن العنصر p ، و β و θ تعبر عن زوايا الاحداثيات الكروية C ثابت، $f_p(\theta)$ الحقل الكهربائي للمشع p .
العلاقة الموجودة في الأعلى صحيحة للعناصر المشعة التي تبعد عن بعضها البعض مسافة متساوية، والمغذاة بذات الكمية من الاستطاعة.

2.1- تصنيف الهوائيات المصفوفية

تستخدم مصفوفات الهوائيات في العديد من تطبيقات الاتصالات لتحسين أداء النظام. ويظهر ذلك خصوصاً في الجيل القادم لأنظمة الاتصالات اللاسلكية، حيث يمتلك كل تطبيق متطلبات مختلفة. بشكل أساسي يتم تصنيف الهوائيات المصفوفية حسب نوع نمط الإشعاع والعناصر الإشعاعية المستخدمة فيه، أغلب الهوائيات المستخدمة في يومنا هذا تزود تغطية واسعة، جودة إشارة محسنة، فعالية عالية، حزمة ضيقة منعاً لحدوث التداخل.

1-2-1 الهوائيات المتعددة الحزم:

إن الجيل القادم للاتصالات يعتمد بشكل أساسي على الاتصالات اللاسلكية المتعددة المستخدمين لتحسين معدل النقل، الفعالية، الإنتاجية. تستخدم الهوائيات المتعددة الحزم لتغطية عدة مستخدمين بشكل متزامن بذات الوقت من خلال توليد عدة حزم مستقلة ذات ربح عالي، حيث تتميز هذه الهوائيات بتعقيد أكبر ولكن بحجم فيزيائي أصغر.

2-2-1 مصفوفة الهوائيات المخددة الحزم:

إن تخميد الحزم الجانبية هو أمر في غاية الأهمية لتحسين أداء الهوائي، وذلك لأنه يقلل من مستوى الإشارة المستقبلية عبر الفصوص الجانبية وبالتالي يحد من التداخل. يعتمد تخميد مستوى الحزم الجانبية على تغذية الهوائيات بمطالات تيارات غير متساوية، وذلك بسبب ارتفاع مستوى الفصوص الجانبية عند تغذية عناصر المصفوفة بشكل متساوي، إلا أن فعالية التغذية تختلف حسب تصميم الهوائي.

تتعدد طرق تخميد الحزم الجانبية ولعلّ من أبرزها: دولف تشيبيشيف، توزيع تايلور، نافذة هامينغ. كما تختلف هذه الطرق من حيث قيمة التخميد للحزم الجانبية، عرض الحزمة الرئيسية، الأداء في المصفوفات الكبيرة.

يتفوق تخميد الحزم الجانبية عبر خوارزمية SSR على أبرز الطرق الأخرى المستخدمة لهذا الأمر، حيث تعطي الخوارزمية نتائج أفضل عند المصفوفات الكبيرة جداً مقارنةً باستخدام توزيع تايلور كما تعطي ربحاً وتخميد للحزم الجانبية أكبر من الطرق الأخرى.

3-2-1 مصفوفة الهوائيات الفعالة

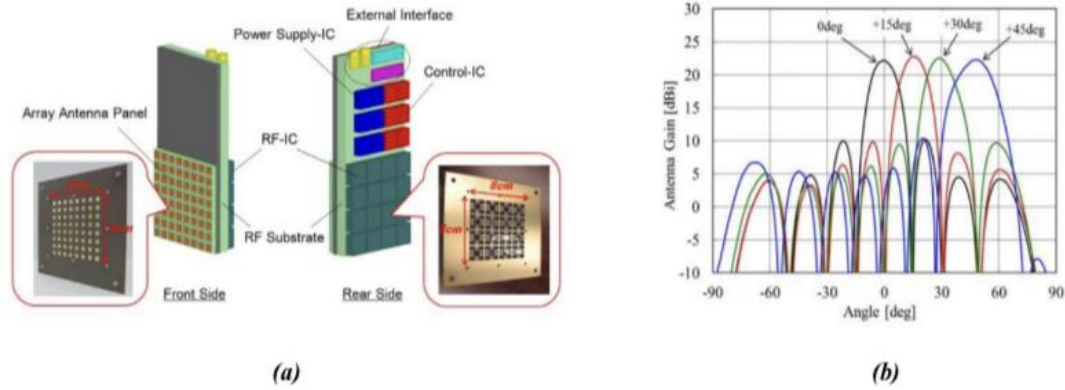
يُمكن التقليل من الضياعات الناتجة عن العمل في مجال الأمواج الميليمترية من خلال استخدام الهوائيات الموجهة بشكل كبير التي تدعم تقنيات تشكيل الفص الإشعاعي، وتعدد الحزم من خلال استخدامها العناصر الفعالة كالمكبرات التي تتيح تضيق عرض الحزمة الإشعاعية بشكل كبير إضافة إلى رفع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، كما تعمل هذه العناصر على تحسين عمليات التصميم حيث تمتاز هذه العناصر بصغر حجمها، والتسخين المحدود مقارنةً بالعناصر الأخرى، إضافة إلى تكاملها مع مختلف العناصر الفعالة الأخرى دون مشاكل.

تستخدم مصفوفة الهوائيات الفعالة بشكل واسع في المحطات القاعدية الخلوية نظراً لربحها العالي، وقدرة حزمها على المسح الزواري الواسع على المستويين العامودي والأفقي وذلك تبعاً لطريقة تغذيتها. تُقدم المصفوفة أداءً عالي جداً عند استخدامها في المصفوفات المزاحة طورياً أو في تطبيقات ال massive mimo .

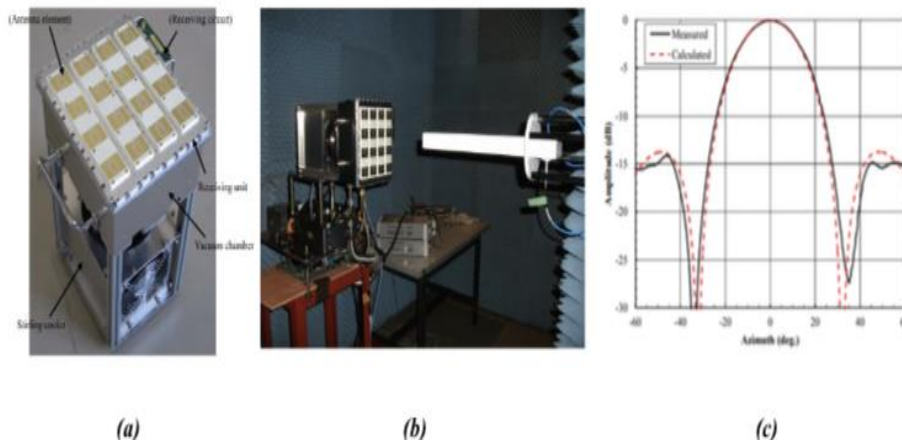
عرضت بعض الدراسات استخدام الهوائيات الفعالة الهجينة التي تستخدم الهوائيات المزاحة طورياً مع تقنيات ال massive mimo في اتصالات الجيل الخامس حيث تسهم هذه الهوائيات بتقليل تعقيد النظام،

واستهلاك الطاقة [7].

تساعد المبدلات التماثلية-الرقمية، الرقمية-التماثلية، التصميم المقترح في تقليل استهلاك الطاقة، كما تساعده مزيحات الطور في الحصول على زاوية مسح تصل إلى 45 درجة كما هو مبين بالشكل 2. يزداد أداء الهوائي بزيادة عدد العناصر. لذلك تستخدم الهوائيات الفعالة ذات العدد الكبير من العناصر في التطبيقات التي تحتاج إلى أداء عالي. صممت مجموعة توشيبا اليابانية مصفوفة فرعية فعالة شديدة الحساسية التي يُمكن أن تستخدم كمصفوفة هوائيات مزاحة طورياً فعالة قليلة الضجيج شديدة الحساسية للإشارة المستقبلية [8]. يتكون هذا التصميم من مرشح، محدد، مكبر منخفض الضجيج. صمم هذا العمل وفق الأبعاد التالية 200mmx240mmx100mm كما هو مبين في الشكل 3. هذه المصفوفة الفعالة تخمد الحزم الجانبية بمقدار -15dB مع تضيق عرض الحزمة الأساسية بشكل كبير.



الشكل 2: (a) مصفوفة الهوائيات المقترحة (b) أداء الإشعاع للمصفوفة [7]



الشكل 3: (a) المصفوفة الفرعية الفعالة (b) نتائج حسابات مخطط الإشعاع للهوائي ذو المصفوفة الفرعية (c) مخطط الإشعاع [8].

4-2-1 مصفوفات الهوائيات ذات الريح العالي

يعد الريح والاتجاهية العاليتين من أهم الميزات الأساسية التي يجب توفرها في التصاميم الحديثة لهوائيات الجيل الخامس التي تم تصميمها بشكل أساسي لدعم المستخدمين بمعدلات تراسل عالية، التي يتطلب تحقيقها العمل في مجال الأمواج الميليمترية.

تعاني الموجة الميليمترية خلال انتشارها من التشوه والتداخل بشكل أعلى من الأمواج ذات الترددات الأخفض. لذلك، من غير المناسب استخدام الهوائيات ذات الريح المنخفض أو المتوسط. اكتشف الباحثون العديد من التقنيات التي تعمل على رفع الريح كهوائيات العدسات العازلة، [9]، وهوائيات fabry-perot [11].

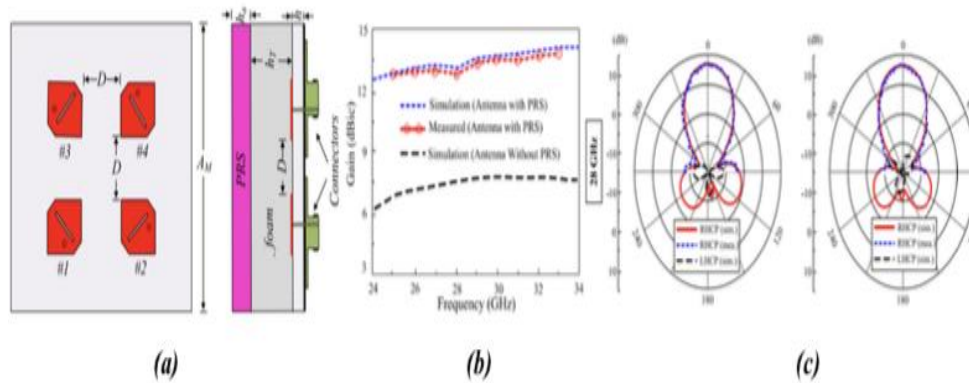
واستخدام القاعدة العاكسة جزئياً (PRS) التي تعتبر طريقة شائعة جداً لتحسين الريح. يُشار إلى هذه الهوائيات باسم fabry-perot التي تعتمد على الإشعاعات المتعددة المتداخلة المنبعثة من الهوائي

يتحقق الحد الأعظمي للإشعاع عريض الجانب عندما تكون الإشعاعات المنعكسة على توافق في الطور في كل من الأرض، والقاعدة العاكسة جزئياً.

يمكن تحسين أداء الهوائي بشكل كبير من خلال تنظيم العديد من البارامترات كالمسافة بين الهوائي والطبقة العاكسة جزئياً PRS، سمك القاعدة، نوع القاعدة PRS المستخدمة.

تم تصميم مصفوفة هوائيات MIMO مرتفعة الريح ذات الاستقطاب الدائري في [10]، حيث تم تحسين ربح الهوائي من 7dB إلى 14dB من خلال وضع القاعدة PRS بمقدار نصف طول الموجة عن أرض الهوائي كما هو مبين في الشكل 4.

يمتاز التصميم ببساطته، حيث يتكون من أربعة هوائيات شرائحية باستقطاب دائري، كما قدم خصائص متميزة كعرض المجال، وعزل جيد لجميع المداخل.



الشكل 4: (a) التصميم المقترح للهوائي (b) ربح الهوائي باستخدام PRS مقارنة بالريح دون استخدامها (c) المخطط الأشعاعي للتصميم المقترح. [10]

الجدول 1: مقارنة لبعض معاملات الأداء لمصفوفات الهوائيات العاملة في مجال الأمواج المليمترية.

المرجع	توصيف الهوائي	تصميم الهوائي	تردد العمل	الربح [dB]	مستوى الحزم الجانبية [dB]	عرض المجال
[12]	هوائي ذو فتحة مائلة بزاوية 45 درجة مع استخدام تقنية الركيزة المتكاملة مع الخط المحوري		35 GHz	17	-19.6	2.6%
[13]	صفيفة هوائي ثنائية الاستقطاب منخفضة التكلفة محفورة على ركيزة واحدة		35 GHz	25.4	-17.6	1.9%
[14]	مصفوفة هوائيات فتحة مكونة من 16 عنصر مدعومة بتجويف، يتم تنفيذها من خلال الغطاء المعدني للهاتف المحمول		28 GHz	15	-15	9%
[15]	مصفوفة هوائيات مستوية مكونة من 256 عنصر		24 GHz	27.2	-12	13%
[9]	عدسة عازلة كهربائية متعددة الطبقات منخفضة التكلفة لتحسين الربح وتخميند الحزم الجانبية		40 GHz	25.8	-25.7	14.6%
[16]	مصفوفة هوائيات مستوية عريضة المجال مع أشعاع متعدد الاتجاه عند المستوى الأفقي		26 GHz	11	-15	21.1%
[17]	مصفوفة هوائيات مخمدة الحزم الجانبية بالاعتماد على النمط TM50		22 GHz	19	-22	7.8%

3-1 دراسات مرجعية

نقدّم هنا مجموعة من الأبحاث والدراسات التي حاولت معالجة المشاكل التي تواجه التطبيقات العاملة في الجيل الخامس للاتصالات.

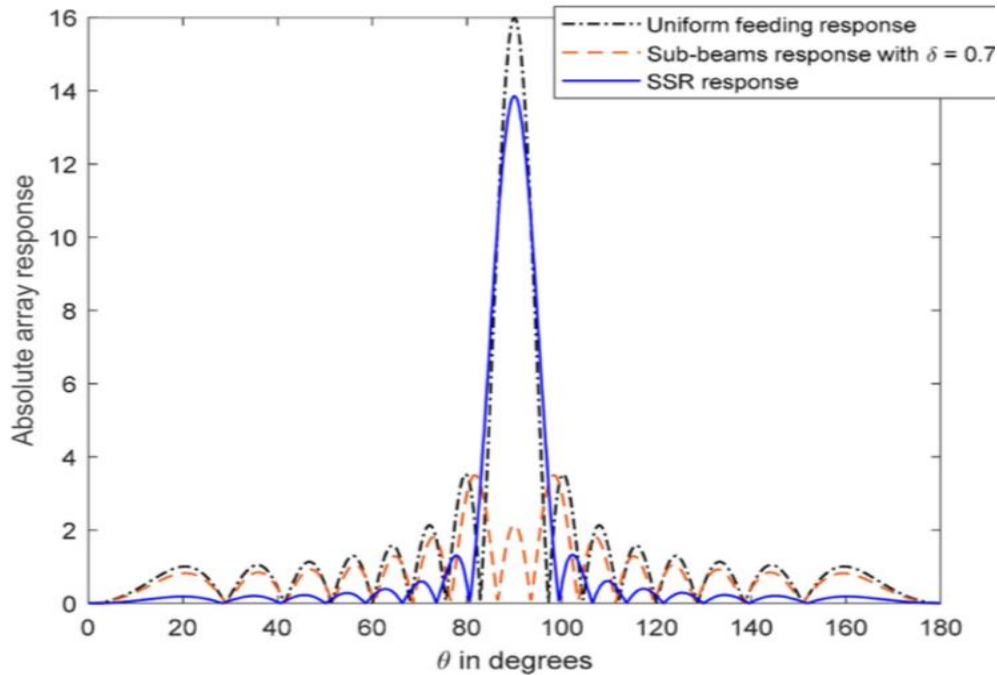
يعرض البحث [2]، حلاً لمشكلة الاكتظاظ في المجال الترددي من خلال الانتقال إلى مجال الأمواج الميليمترية حيث يعد حل واحد لسد النقص في النطاق الترددي لاتصالات البيانات عالية الجودة، وتم اعتماد هذا الحل في الأطروحة وذلك بالعمل في مجال الأمواج الميليمترية.

قام مؤتمر الاتصالات العالمي (WRC15) بتحديد عدة نطاقات ترددية لشبكات الجيل الخامس بما فيها نطاقات مخصصة في مجال الأمواج الميليمترية [19][20].

أما المرجع [21] فقد عرض مشكلة تواجه الأمواج الميليمترية وهي الفقد الذي تتعرض له نتيجة صغر طول موجتها.

لكن بالتصميم المقترح وبالمميزات التي يمتلكها كالربح العالي واستقرار مخطط الإشعاع تصبح قيمة هذا الفقد منخفضة ولا تؤثر على أداء الأتصال [21].

إضافةً للفقد يواجه العمل في مجال الأمواج الميليمترية قيم تداخل عالية تؤثر بشكل سلبي على أداء الاتصالات اللاسلكية. لذلك، يطرح المرجع [3] حلاً لهذه المشكلة من خلال تخميد الحزم الجانبية اعتماداً على خوارزمية SSR .



الشكل 5: تخميد الحزم الجانبية عند تغذية عناصر المصفوفة اعتماداً على خوارزمية SSR مقارنة بتغذية العناصر بشكل متساوي. [3].

عرض المرجع [22] إحدى التقنيات المعتمدة في مجال البحث وهي تقنية تشكيل الشعاع beamforming

حيث أنه في مصفوفة هوائيات ذات توجيهية عالية يمكن زيادة مدى التغطية والتغلب على الفقد الذي تواجهه الإشارات ذات التردد العالي كما نعلم أنه يمكن التحكم باتجاه حزمة الإشعاع ميكانيكيا وكهربائيا أيضا.

أما المرجع [23] فقد عرض مصفوفة هوائيات منعكسة قابلة لإعادة التشكيل من خلال تقنية السائل الكريستالي حيث يحقق ربح عالي بمقدار خمس وعشرون ديسبل تقريبا مع كلفة قليلة مقارنة مع تصميمات أخرى.

ولكن في المرجع [24] تم طرح طريقة أفضل وشائعة أكثر وذلك لتعويض خسائر الانتشار للموجات الميليمترية وذلك بتصميم هوائيات مصفوفة فعالة من خلال استخدام هيكل تغذية مناسب.

علما أن التغذية الفعالة تعطي العديد من الإيجابيات كعرض المجال الواسع، والعزل المرتفع، ومن أهم طرق التغذية الفعالة هي: القاعدة المتكاملة مع دليل الموجة Substrate integreted waveguide (SIW)

حيث يتم استخدام هذه التقنية في العديد من أنظمة الهوائيات بهدف الحصول على مخطط الإشعاع المطلوب [24]

كما هناك بعض الأبحاث التي عرضت طرق لزيادة الربح في أنظمة MIMO حيث بحث المرجع [25] في موضوع تكامل مصفوفات الفتحة ذو الربح العالي مع MIMO

وكما ذكرنا سابقا زيادة كثافة طرفيات الأتصال له العديد من السلبيات على عدة نواحي كحجم الخلية والاستطاعة المتوسطة والتميز بين معلومات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة بالإضافة إلى عرض المجال وحتى مخطط الأشعاع لذلك اقترح المرجع [26] استخدام مصفوفة هوائيات مع فتحة كهربائية كبيرة ذات عرض المجال الواسع والحزمة الإشعاعية الضيقة والتي تعتبر مناسبة جدا لشبكات الاتصالات المستقبلية بما فيها شبكات الجيل الخامس.

أما المرجع [27] فقد بحث بموضوع استخدام مصفوفة هوائيات متعددة الحزم MBA بدلاً عن استخدام مصفوفة هوائيات تشكيل الشعاع

حيث تمتاز مصفوفة الهوائيات متعددة الحزم بإمكانية توليد حزم مستقلة ذات توجيهية عالية وذلك يخدم في تغطية مدى محدد مسبقا.

ومن الممكن استخدام مصفوفات الهوائيات متعددة الحزم مع هوائيات MIMO لتسمح بربح عالي وتنوع مسارات متعددة غير مرتبطة وتنوع معلومات القناة.

ويمكن استخدامها أيضا مع الهوائيات المزاحة طوريا، ولكن تعتبر الهوائيات متعددة الحزم مكلفة للغاية لذلك تستخدم غالبا في الرادار والاتصالات الفضائية [28].

الفصل الثاني

دراسة نظرية

نقدّم في هذا الفصل شرح مفصل عن أفضل الطرق لتخميد الحزم الجانبية لمعالجة مشكلة التداخل، ثم نقدّم دراسة نظرية لأفضل طرق تغذية المصفوفات وتقسيم الاستطاعة إضافةً لمقارنة سريعة بين المصفوفات الخطية والمستوية

1.2- تخميد الحزم الجانبية

1.1.2- مقدمة

يسعى مصممو أنظمة الجيل الخامس للاتصالات إلى منع التداخل لما له من تأثير سيء للغاية على أداء هذه الأنظمة.

يمكن الحد من التداخل ذو التأثير السيء من خلال تخميد الحزم الجانبية دون التأثير على حزمة الأشعاع الرئيسية قدر الأمكان، كما يفيد هذا التخميد من تركيز الاستطاعة نحو الأشعاع المفيد دون أي هدر للاستطاعة في الفصوص الجانبية.

أي يتم اللجوء إلى تخميد الحزم الجانبية من أجل الحصول على فعالية استطاعة، فعالية طيفية إضافة إلى الحد من التداخل.

توجد العديد من الطرق لتخميد الحزم الجانبية ولعلّ أبرز هذه الطرق هي طريقة دولف-تشيبشيف، خوارزمية SSR، الخوارزمية الجينية، توزيع تايلور، نافذة هامينغ.

2.1.2- طريقة دولف-تشيبشيف لتخميد الحزم الجانبية

تقلل خوارزمية تحليلات تشيبشيف من الإشعاعات الجانبية غير المرغوبة، حيث يمكن من خلال هذه الطريقة الحصول على مستوى التخميد المطلوب لمطال الحزم الجانبية، كما تزود توزيع تيارات تشيبشيف علاقة منظمة بين عرض الحزمة الإشعاعية ومستوى الحزم الجانبية.

تم دراسة مصفوفة تشيبشيف لأول مرة عام 1946 من قبل C.L. Dolph [28].

أشار في هذه الدراسة على أن تغذية جميع عناصر المصفوفة بذات المطال والطور ينتج ربح مرتفع إلا أنه يؤدي إلى عرض حزمة غير مثالية مع مستوى مرتفع للحزم الجانبية، بينما بتغذية عناصر مصفوفة الهوائيات بمطالات تيارات مختلفة وبطور متماثل يؤدي إلى خفض مستوى مطال الحزم الجانبية، إضافة

إلى جعل عرض حزمة الأشعاع الرئيسية مثالية.

تمتاز طريقة دولف- تشيبيشيف بسهولة الحصول على قيم توزيعات التيار من خلال معرفة المستوى المطلوب لمطال الحزم الجانبية فقط. يمكن حساب معاملات تشيبيشيف من خلال العلاقات التالية:

$$T_n(z) = \text{Cos}(n \text{ arc cos } z) \dots\dots\dots(1)$$

باعتبار $u = \text{arc cos } z$ ، n تعبر عن رقم العنصر، $-\infty \geq z \geq \infty$. حيث z هو متغير يتم إيجاده عن طريق حل معاملات دولف تشيبيشيف أما المعامل z_0 يتم تحديده من العلاقة $T_{N-1}(z_0) = R_0$ (voltage ratio). يتم حساب توزيع التيار لثمانية عناصر من المصفوفة من خلال العلاقة التالية:

$$F_8(u) = I_1 \text{cos}u + I_2 \text{cos}3u + I_3 \text{cos}5u + I_4 \text{cos}7u \dots\dots\dots(2)$$

يتم حساب كثيرات الحدود من خلال العلاقات التالية:

$$I_4 = z_0^7 \dots\dots\dots(3)$$

$$I_3 = 7I_4 - 7z_0^5 \dots\dots\dots(4)$$

$$I_2 = 5I_3 - 14I_4 + 14z_0^3 \dots\dots\dots(5)$$

$$I_1 = 3I_2 - 5I_3 + 7I_4 - 7z_0 \dots\dots\dots(6)$$

لذلك يمكن حساب التيارات I بسهولة بمعرفة z_0 فقط. تم دراسة توزيع تشيبيشيف من قبل العديد من الباحثين، حيث قاموا بإدخال تحسينات مع استخدام تقنيات جديدة. كما تم نشره في المرجع [29] عام 1994 من قبل A.Safaai حيث قام بإدخال تحسينات جديدة في تصميم مصفوفة تشيبيشيف. تم التعبير عن معامل المصفوفة بدلالة الدالة المثلثية Cosine عوضاً عن كثيرات حدود تشيبيشيف.

3.1.2- تخميد الحزم الجانبية من خلال خوارزمية SSR

نُشرت هذه الخوارزمية في أواخر العام 2021، وحقت نجاحاً كبيراً في عملية تخميد الحزم الجانبية. كما سُميت بخوارزمية التخفيف المتزامن لمطال الحزم الجانبية (Sidelobes Simultaneous Reduction). أثبتت الخوارزمية جدارتها على العديد من الطرق شائعة الاستخدام لهذه المهمة. يكمن المبدأ الأساسي لهذه الخوارزمية في استكشاف أماكن تواجد الحزم الجانبية وتشكيل مخطط إشعاعي مطابق لهذه الحزم ومن ثم طرحها من المخطط الإشعاعي الأصلي لينتج مخطط إشعاعي مع تخميد الحزم الجانبية ويتم إعادة تنفيذ الخوارزمية عدداً من المرات لاستكشاف أماكن تواجد أي حزم جانبية وضمان تخميد جميع هذه الحزم إلى المستوى المطلوب.

1.3.1.2- مراحل تنفيذ الخوارزمية SSR: [3]

1- تغذية القيم الضرورية لعدد من المحددات: طول الموجة $\lambda=11\text{mm}$ ، البعد بين العناصر $d=5\text{mm}$ ، عامل التقارب $\delta = 0.8$ convergence factor. عدد الدورات التكرارية للخوارزمية $C=7$ ، عدد

العناصر $N=16$ ، اتجاه الحزمة الأساسية $\theta_0 = 90 \text{ deg}$.

2- إيجاد عامل الوزن البدائي حيث: $W_N(\theta_0) = V_N(\theta_0)$

3- علماً أن:

$$V_N(\theta) = \left[1 e^{j\left(\frac{2\pi D_1 \cos(\theta)}{\lambda}\right)} e^{j\left(\frac{2\pi D_2 \cos(\theta)}{\lambda}\right)} \dots e^{j\left(2\pi \frac{D_{N-1} \cos(\theta)}{\lambda}\right)} \right]^T$$

4- إيجاد استجابة المصفوفة $AR(\theta)$ من العلاقة التالية:

$$AR(\theta) = W_N^H(\theta_0) V_N(\theta)$$

يستمر تنفيذ باقي خطوات الخوارزمية طالما عدد الدورات المحققة أصغر من C .

5- إيجاد اتجاهات الإشعاع الأعظمية واستجابة المصفوفة عند زوايا الإشعاع الأعظمية من خلال العلاقات التالية:

$$\frac{\partial AR(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_p} = 0, \text{ with } \frac{\partial^2 AR(\theta)}{\partial \theta^2} < 0 \text{ at } \theta = \theta_{p+}$$

يتم تحديد زوايا الإشعاع الأعظمية P الأقل من مسنوى إشعاع الحزمة الأساسية، أي عدد الحزم الجانبية.

$$AR(\theta_p) = W_N^H(\theta_0)V_N(\theta_p)$$

6- إيجاد عامل الأوزان للحزم الجانبية المحددة من خلال العلاقة التالية:

$$w_{N,P} = \sum_{p=1}^P \delta \frac{AR^H(\theta_p)v_N(\theta_p)}{|AR(\theta)|_{\max}}$$

7- تشكيل استجابة مصفوفة مشابهة تماماً للحزم الجانبية الموجودة في استجابة المصفوفة الأساسية من خلال العلاقة التالية:

$$ARSL(\theta) = w_{N,P}^H v_N(\theta)$$

8- الحصول على استجابة مصفوفة الهوائيات الأساسية مع تخميد الحزم الجانبية من خلال العلاقة:

$$Arc(\theta) = AR(\theta) - ARSL(\theta)$$

9- الحصول على عامل الأوزان الذي يُنتج تخميد الحزم الجانبية المطلوب

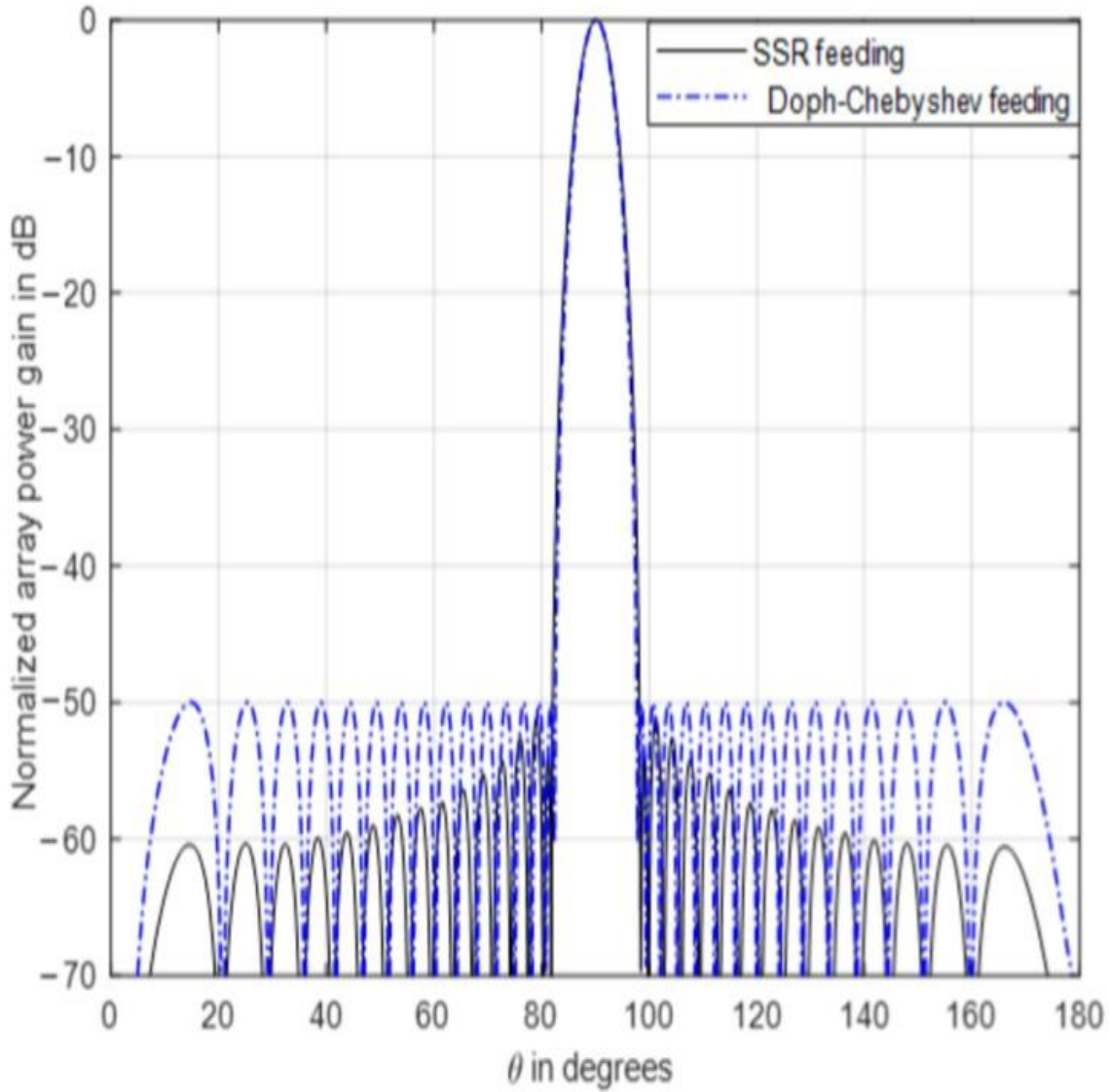
$$w_{N,c} = w_N(\theta_0) - w_{N,P}$$

نهاية الخوارزمية

2.3.1.2- أداء خوارزمية SSR

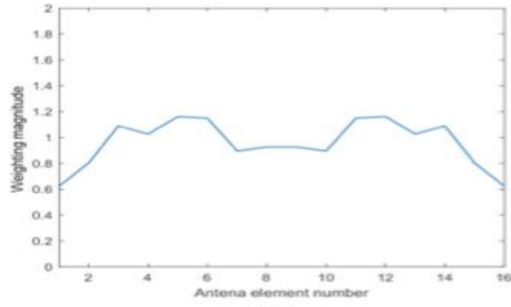
تمتلك الخوارزمية العديد من الميزات، حيث تمتاز بفعالية عالية في تخميد الحزم الجانبية مقارنة بالطرق الأخرى كدولف تشيبيشيف كما هو مبين في الشكل 6، كما تتفوق الخوارزمية على توزيع تايلور ذي الأداء السيء في المصفوفات الكبيرة، إضافة إلى امتلاك خوارزمية SSR القدرة على تخميد الحزم المحددة كما هو

مبين في الشكل 7، حيث يمكن تخميد حزم جانبية محددة الواقعة بمجال أشعاعي محدد فقط دون التأثير على حزمة الأشعاع الرئيسية، وذلك بالتعديل على الخوارزمية بدءاً من الخطوة الخامسة وذلك بتحديد الزوايا المراد تخميدها فقط.

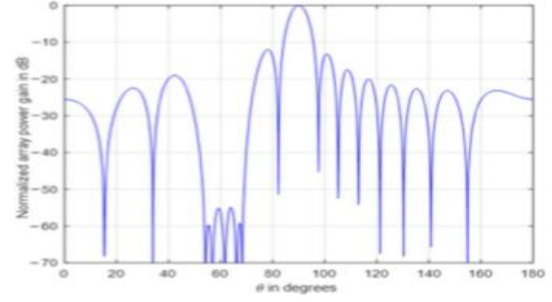


الشكل 6: المقارنة بين خوارزمية SSR ودولف تشيبشيف [3].

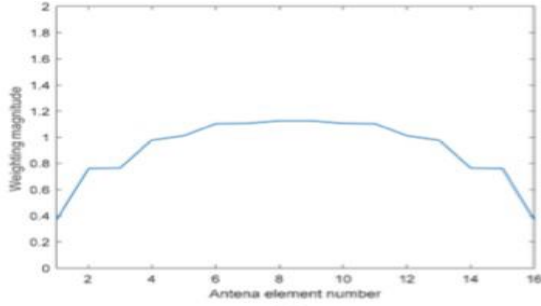
يبين الشكل 6 فعالية خوارزمية SSR في تخميد الحزم الجانبية مقارنة بخوارزمية دولف تشيبشيف حيث تتميز الخوارزمية بمتوسط حزم جانبية أقل ب 7dB من دولف تشيبشيف التي تعتبر من أفضل طرق تخميد الحزم الجانبية.



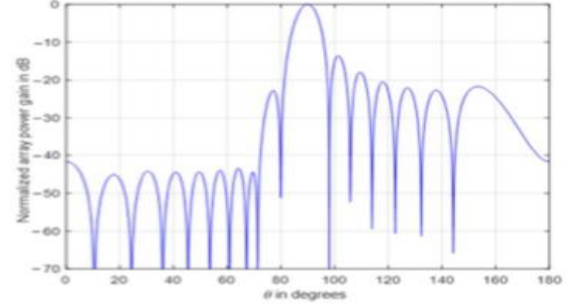
(a)



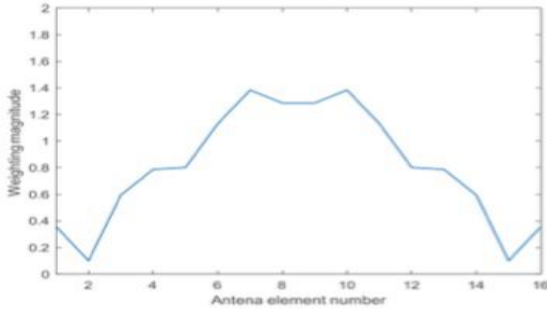
(b)



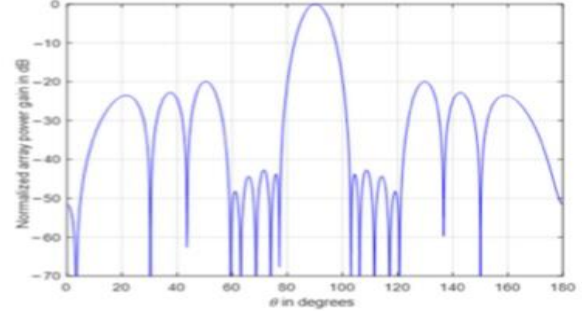
(c)



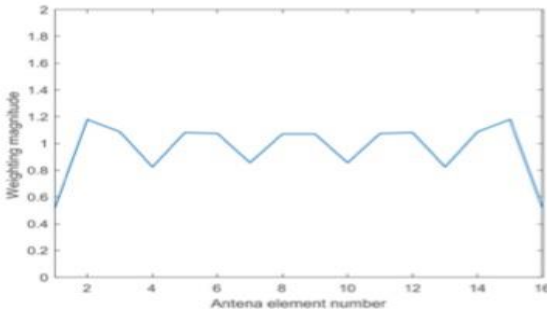
(d)



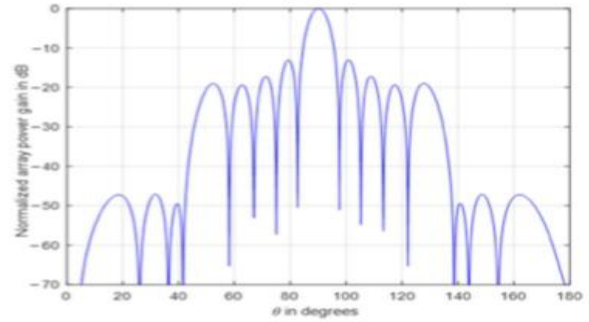
(e)



(f)



(g)



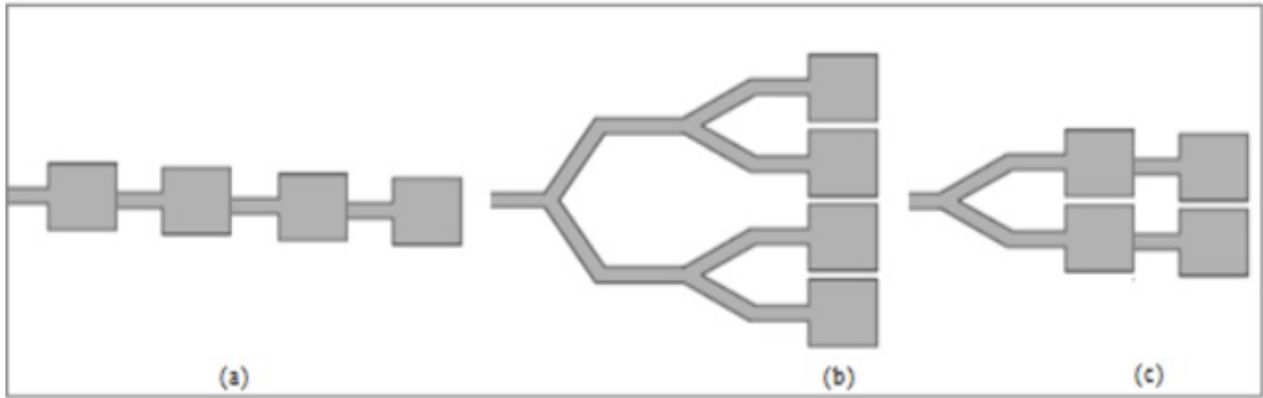
(h)

الشكل 7: تخميد الحزم الجانبية المحددة والتصفية المكانية لعدة سيناريوهات باستخدام 16 عنصر: a,c,e,g تمثل قيم الأوزان اللازمة للحصول على مخططات الأشعاع b,d,f,h على الترتيب [3].

2.2- طرق تغذية عناصر المصفوفة

توجد ثلاث طرق لتغذية عناصر المصفوفة: التغذية التسلسلية، التغذية التفرعية، التغذية التسلسلية-التفرعية.

حيث ينتج عن تغذية عناصر المصفوفة اعتماداً على التغذية التفرعية Corporate feed بربح واتجاهية أعلى مقارنة ببقية الطرق، كما ينتج عن تنفيذ هذه الطريقة عرض حزمة أضيق مقارنة بباقي الطرق كما هو مبين في الجدول 2. لذلك تم اعتماد التغذية التفرعية لتغذية عناصر المصفوفة الخطية المستخدمة في التصميم المقترح الذي يستخدم مقسمات استطاعة T-junction من أجل تقسيم الاستطاعة بشكل غير متساوي.



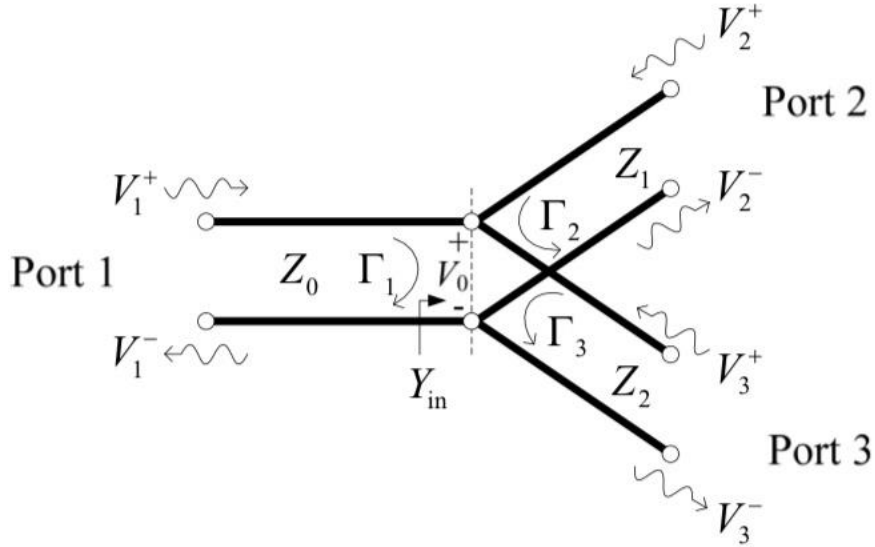
الشكل 8: (a) التغذية التسلسلية (b) التغذية التفرعية (c) التغذية التسلسلية-التفرعية [30]

معاملات الهوائي	التغذية التسلسلية	التغذية التفرعية	التغذية التسلسلية-التفرعية
الربح	10.48dB	12.85dB	11.27dB
الاتجاهية	10.86dB	13.18dB	11.6dB
عرض الحزمة	52°	22°	40°

الجدول 2: المقارنة بين طرق تغذية عناصر مصفوفة الهوائيات [30]

3.2- مقسمات الاستطاعة T-junction [36]

هي شبكة مؤلفة من ثلاثة مداخل، وهي عبارة عن مدخل ومخرجين كما هو مبين في الشكل 9 ، حيث يتم تقسيم الاستطاعة الداخلة عبر المدخل 1 إلى المخرجين 2,3، تعمل هذه المقسمات بشكل فعال على تقسيم الاستطاعة بشكل غير متساوٍ، كما يمكن تقسيم الاستطاعة بشكل متساوي.



الشكل 9: شبكة T-junction بسيطة عديمة الضياع

يملك مقسم الاستطاعة قيدين أساسيين يجب مراعاتهما:

- 1- يجب أن يكون خط التغذية متوافق.
- 2- يتم تقسيم استطاعة الدخل Pin بين المداخل 2,3 على حسب القيمة المرغوبة.

تُرمز نسبة التقسيم ك: X:Y حيث :

- نسبة $100\% \frac{X}{X+Y}$ من استطاعة الدخل تصل إلى أحد المخارج، و
- نسبة $100\% \frac{Y}{X+Y}$ من استطاعة الدخل تصل إلى المخرج الآخر.

على سبيل المثال،

- 1:1 تعني 50% من استطاعة الدخل تصل إلى كل مخرج.
- 2:1 تعني 67% من استطاعة الدخل تصل إلى إحدى المخارج كما تصل بقية الأستطاعة للمخرج الآخر.

بالعودة إلى الدارة المبينة في الشكل 9، يتطلب مراعاة الشرط الأول تحقيق المعادلة التالية:

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_0}$$

وبافتراض أن الشبكة عديمة الضياع:

$$P_{in} = P_1 + P_2$$

يمكن حساب ممانعات المخرجين من خلال العلاقات التالية:

$$Z_1 = \frac{Z_0}{P_1/P_{in}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_0}{P_2/P_{in}}$$

تحدد العلاقات السابقة ممانعات خطوط نقل شبكة التغذية المصممة بناءً على مقسمات الاستطاعة -T-junction.

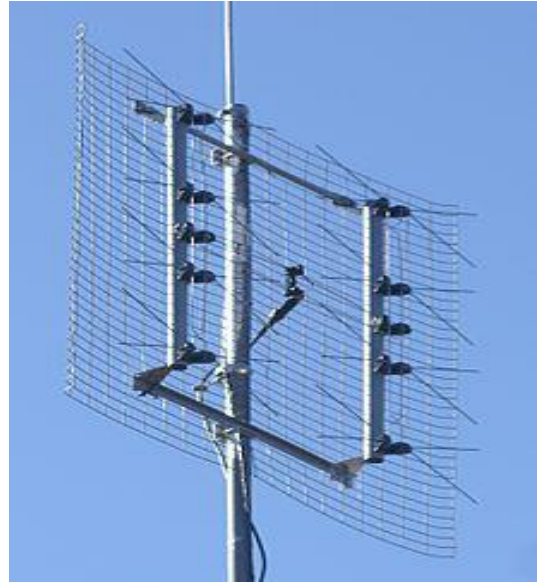
4.2- مصفوفات الهوائيات الخطية والمستوية

تتكون مصفوفة الهوائيات بشكل عام من مجموعة من الهوائيات المرتبطة مع بعضها وتعمل كهوائي واحد لإرسال واستقبال الموجات الراديوية. يتم اعتبار كل هوائي في المصفوفة كعنصر في هذه المصفوفة، ويرتبط مع جهاز الاستقبال أو الإرسال بواسطة خط تغذية بزاوية طور محددة. تحقق مصفوفة الهوائيات أمواج راديوية ذات ربح عالي، وحزمة أشعاع ضيقة. يتم اللجوء إلى عدد أكبر من الهوائيات من أجل الحصول على قيمة ربح أعلى وحزمة أشعاعية رئيسية أضيق، حيث تزداد قيمة الربح بازدياد عدد الهوائيات المكونة للمصفوفة. تتألف بعض المصفوفات من آلاف الهوائيات خصوصاً في التطبيقات العسكرية، حيث تحقق مصفوفة الهوائيات العديد من الميزات كالربح العالي، تنوع المسارات، كما يمكن استخدامها من أجل منع التداخل من اتجاه محدد.

يتكون المخطط الأشعاعي للهوائي من حزمة أشعاعية قوية تتجه نحو اتجاه واحد تسمى الحزمة الرئيسية، كما يتكون من حزم أشعاعية أضعف تسمى الحزم الأشعاعية الجانبية. يتم اللجوء إلى زيادة عرض الهوائيات، إضافةً إلى زيادة عدد الهوائيات المكونة للمصفوفة لكي نحصل على كسب عالي، حزمة أشعاعية ضيقة، حزم جانبية أقل مما يؤدي إلى تخفيف التداخل ذو الأثر السيء على الاتصالات عامة واتصالات الجيل الخامس خاصة. يكمن المبدأ الأساسي لمصفوفة الهوائيات في التداخل البناء، والتداخل الهدام. حيث تتداخل الأمواج الراديوية المنبعثة من هوائيات المصفوفة تداخلاً بناءً ينتج عنه حزمة اشعاعية رئيسية قوية ضيقة، بينما تتداخل هذه الأمواج تداخلاً هداماً لتؤدي إلى تخميد الحزم الجانبية.



B



A

الشكل 10: A مصفوفة هوائيات مكونة من ثمانية هوائيات ديبول تعمل في المجال UHF
B مصفوفة هوائيات مستوية مكونة من 175 هوائي ديبول تعمل في المجال VHF

1.4.2- مصفوفة الهوائيات الخطية

تتكون المصفوفة الخطية من مجموعة من الهوائيات التي تصطف إلى جانب بعضها البعض على امتداد محور واحد فقط، تساهم هذه المصفوفة في رفع قيمة الربح إضافة إلى تضيق عرض الحزمة الرئيسية

حيث تزداد قيمة الربح بازدياد عدد العناصر المكونة لهذه المصفوفة، ينتج عن المصفوفة الخطية مخطط أشعاعي مكون من حزمة أشعاعية ذات استطاعة مرتفعة شبيهة بشكل الشطيرة، إضافة إلى العديد من الحزم الجانبية ذات الاستطاعة المنخفضة مقارنةً بالحزمة الرئيسية.

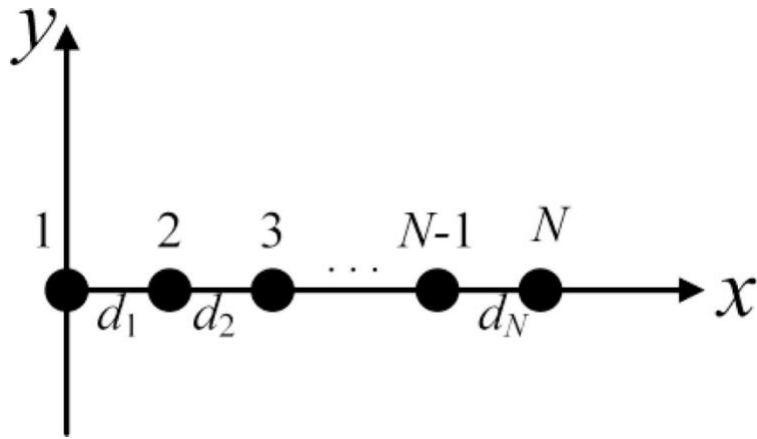
يعبر عن عامل المصفوفة الخطية بالمعادلة التالية:

$$AF = \left[1 e^{j\left(\frac{2\pi D_1 \cos(\theta)}{\lambda}\right)} e^{j\left(\frac{2\pi D_2 \cos(\theta)}{\lambda}\right)} \dots e^{j\left(2\pi \frac{D_{N-1} \cos(\theta)}{\lambda}\right)} \right]$$

حيث: N عدد العناصر

λ طول الموجة

D المسافة بين العناصر



الشكل 11: مخطط يوضح توضع هوائيات المصفوفة الخطية

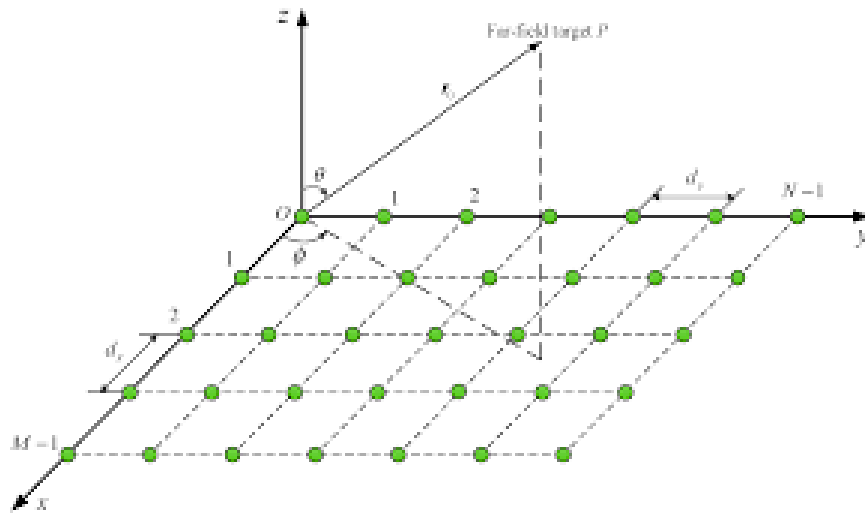
2.4.2- مصفوفة الهوائيات المستوية

تتكون مصفوفة الهوائيات المستوية من مجموعة من الهوائيات التي تصطف على امتداد محورين أفقي وعمودي، لينتج عن هذه المصفوفة حزمة أشعاعية ضيقة قلمية الشكل، حيث تتفوق عن المصفوفة الخطية من حيث قيم الربح وعرض الحزمة الرئيسية.

تعطي المصفوفة المستوية مستوى حزم جانبية أخفض مقارنةً بالمصفوفة الخطية عند تطبيق ذات تقنية تخميد الحزم الجانبية. لذلك، تعتبر مصفوفة الهوائيات المستوية هي الأكثر مثالية للاستخدام في تطبيقات الجيل الخامس.

يتم الحصول على عامل المصفوفة من خلال المعادلة التالية:

$$AF = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{mn} \cos\left[\frac{2m-1}{2} kd_y \sin\theta \cos\phi_n\right] \cos\left[\frac{2n-1}{2} kd_x \sin\theta \sin\phi_n\right]$$



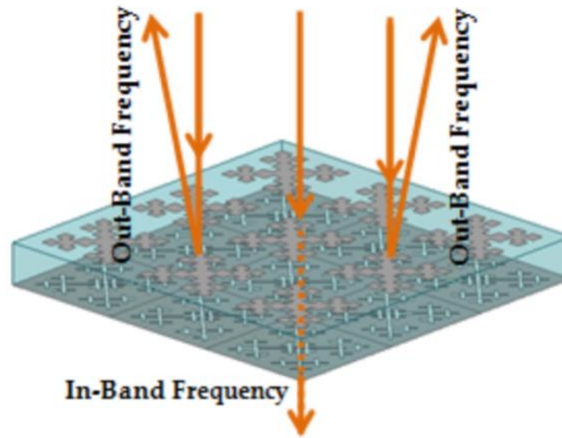
الشكل 12: مخطط يوضع تموضع هوائيات المصفوفة المستوية

5.2- الأسطح انتقائية التردد Frequency selective surfaces

يعد الترشيح المكاني في نطاقات التردد الميكروية والبصرية أكثر العمليات المرغوبة في جميع أنظمة معالجة الإشارات، كما يُطلق عليها تسمية المرشحات المكانية على نطاق واسع حيث تُستخدم الأسطح انتقائية التردد لتعديل الموجة EM القادمة إليها وتوفير خصائص نفاذية / انعكاسية. يتم تصميم الأسطح انتقائية التردد عادةً بواسطة عناصر مصفوفية معدنية دورية متوضعة على ركيزة عازلة كهربائياً.

تمتلك الأسطح انتقائية التردد خواص ترشيحية حيث يمكن تصنيفها إلى أربعة أنواع: مرشح التمرير المنخفض، مرشح التمرير المرتفع، مرشح تمرير حزمة، مرشح منع حزمة. تسمح مرشحات FSS ذات التمرير المنخفض بعبور مجال الترددات المنخفض ضمن التشكيلة بينما تمنع مجال الترددات المرتفع. أما مرشحات FSS ذات التمرير المرتفع تعمل بشكل معاكس لمرشح التمرير المنخفض، وكذلك مرشحات FSS ذات تمرير الحزمة تقوم بالسماح لحزمة معينة من الترددات بالمرور ضمن تشكيلاتها بينما تمنع الحزم الترددية الأخرى حيث تعمل بشكل معاكس لمرشحات FSS ذات منع الحزمة.

تُصمم تشكيلة الأسطح انتقائية التردد بهدف الحصول على التردد الطنيني المطلوب وذلك من خلال إضافة مصفوفة دورية من الشرائح المعدنية أو الفتحات المحفورة في القاعدة العازلة. يُعد الاختيار المناسب لعناصر مصفوفة FSS والشكل والأبعاد والمادة المصنوعة منها الركيزة الجزء الأهم في عملية التصميم. تم شرح النظرية التشغيلية للهياكل القائمة على الأسطح انتقائية التردد من خلال Munk بالتفصيل في [35].



الشكل 13: آلية عمل الأسطح FSS.

الشكل 13 يعرض آلية عمل FSS التي يُحصل عليها من خلال شبكة ذاتية الطنين. عندما ترد أمواج EM على هيكلية FSS تقوم بتحرير تيارات كهربائية في العناصر المصفوفية، حيث

يقوم مستوى طاقة الترابط بتحديد مطال التيارات المنتجة، كما تعمل التيارات المتولدة كمنابع EM وتقوم بتوليد حقول مبعثرة إضافية. حيث تشكل حقول EM الواردة مع هذه الحقول المبعثرة المجال الناتج في محيط FSS، وبالتالي يمكن الحصول على التيارات المطلوبة وخصائص الحقل من خلال تصميم عناصر المصفوفة بشكل صحيح وإنشاء استجابة المرشح. سنستخدم الأسطح انتقائية التردد لتخميد الحزم الجانبية وذلك باستخدامها كأسطح عاكسة عند تردد العمل.

6.2- الهوائي الشرائحي Patch antenna

الهوائي هو أداة تقوم بتحويل التيار الكهربائي إلى موجة كهرومغناطيسية تنبث في الهواء، وذلك في حالة الإرسال أو كأداة تحول الموجة الكهرومغناطيسية إلى تيار كهربائي في حالة الاستقبال، فبواسطته تتم عملية التواصل اللاسلكي، ومن أكثر أنواع الهوائيات شيوعاً في محطات الإرسال اللاسلكية هو الهوائي الشرائحي حيث تم تطوير هذا النوع من الهوائيات في خمسينيات القرن الماضي ولم تتم الاستفادة منه عملياً إلا بعد مرور عشرين سنة من تطويره وذلك لصعوبة التحكم في التردد الذي يعمل عليه، إضافةً إلى غياب التطبيقات الملائمة لاستخدامه ثانياً.

يتكون الهوائي الشرائحي كما هو مبين في الشكل A-15 من مادة عازلة تكون بمثابة القاعدة تُوضع على سطح موصل من أحد جانبيها، ويعلو المادة العازلة في الجانب الآخر سطح نحاسي موصل رفيع مسؤول عن عملية البث يسمى الشريحة ويتصل بشكل مباشر مع خط التغذية الكهربائي. يمتاز هذا النوع من الهوائيات ب:

- رخيص الثمن
 - مستقر ميكانيكياً
 - ذو حجم صغير ووزن خفيف
 - يُمكن التحكم بشكل الشعاع الراديوي الذي يبثه وذلك اعتماداً على شكل الشريحة
- لهذه الأسباب يُستخدم الهوائي الشرائحي في العديد من المجالات حيث يستخدم في الهواتف والأقمار الصناعية والطائرات والمركبات الفضائية والصواريخ.
- تعتمد أبعاد الهوائي الشرائحي على العديد من المحددات حيث يجب أن يكون طول الشريحة مساوي لثلث أو نصف طول الموجة كما يعتمد على ثابت العزل الكهربائي للمادة العازلة حيث تزداد كفاءة الهوائي بانخفاض قيمة ثابت العزل الكهربائي، أما عرض الشريحة فيحدد قيمة مقاومة الإدخال للهوائي، وسمك القاعدة معيار مهم لكفاءة الهوائي وتحديد عرض نطاق الترددات المستخدمة للبث.
- من سلبيات هذا الهوائي:

- يزداد حجم الهوائي بانخفاض تردد العمل
 - عرض المجال للهوائي ضيق
- يُمكن مواجهة عرض المجال الضيق من خلال عمل شقوق وفتحات في الشريحة وتقليل قيمة ثابت العزل للقاعدة وزيادة عرض الشريحة.

أجيال أنظمة الاتصالات الخلوية

نقدّم في هذا الفصل شرح مفصل عن أجيال أنظمة الاتصالات الخلوية مع التركيز على الجيل الخامس للشبكات الخلوية المستهدف العمل به

1.3-مقدمة

انتشرت تطبيقات الاتصالات اللاسلكية بشكل كبير في مختلف المجالات التجارية، الزراعية، الصحية إضافة إلى التطبيقات الحديثة كإنترنت الأشياء، المدن الحديثة، الواقع الافتراضي. يتضمن هذا الفصل لمحة عن الأجيال المختلفة لنظم الاتصالات الخلوية الحالية وصولاً إلى نظم الجيل الخامس بما يقدمه من خدمات ومعدلات نقل عالية.

2.3- لمحة عن الأجيال الحالية للشبكات الخلوية

تختلف شبكات الأجهزة النقالة عن بعضها البعض بالكثير من التقنيات المستخدمة فيها، حيث تتطور التقنيات المستخدمة في هذه الشبكات مع تطور الأجيال لتضفي المزيد من التطور في الأداء والوثوقية والكفاءة.

1.2.3- الجيل الأول من الاتصالات الخلوية 1G

يعتمد الجيل الأول على استخدام أمواج راديوية تماثلية بتقنية النفاذ المتعدد بتقسيم التردد FDMA ، حيث يتميز هذا الجيل بالبساطة مقارنةً مع الأجيال اللاحقة بالإضافة إلى انعدام الوثوقية والأمان.[31]

2.2.3- الجيل الثاني من الاتصالات الخلوية 2G

في هذا الجيل تم الانتقال إلى التعديل الرقمي لزيادة السعة وتحسين مستوى الأمان عن الجيل السابق. كما تم استخدام تقنية النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن TDMA ، كما تم استخدام تقنيتي تبديل الرزم وتبديل الدارات حيث وصلت سرعة نقل المعطيات الى 384kbps في الجيل 2.75G [32].

3.2.3- الجيل الثالث من الاتصالات الخلوية 3G

يدعم الجيل الثالث من الاتصالات الخلوية معدلات نقل أعلى بالإضافة إلى دعم الخدمات الصوتية .
استُخدم في هذا الجيل تقنية النفاذ المتعدد بتقسيم الرماز CDMA مما أدى إلى تحسن في مستوى نقل
المعطيات لأكثر من 14Mbps.[32]

4.2.3- الجيل الرابع من الاتصالات الخلوية 4G

يعتمد الجيل الرابع للاتصالات على تقنية النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد OFDMA، حيث وصلت
سرعة نقل المعطيات إلى أكثر من 1Gbps، إضافة إلى الوثوقية العالية التي يمتاز بها هذا الجيل. [32]

3.3- الجيل الخامس للشبكات الخلوية 5G

اعتمد الاتحاد الأوروبي خطة العمل الخاصة به لتطبيق التقنية الجديدة عام 2016 بهدف إطلاق خدمات
الجيل الخامس في جميع الدول الأعضاء بحلول نهاية عام 2020 وتحتوي هذه التقنية على المزايا
التالية:[31][32]

- تحقيق سعة أعلى وتغطية أكبر مع تعقيد أقل
- امتلاك بنية مرنة وقابلة للتوسعة من أجل التكيف مع زيادة الطلب من قبل المستخدمين
- دعم تقنيات الهوائيات الذكية وتشكيل الحزمة بشكل أكبر
- دعم انترنت الأشياء
- تحقيق معدل بيانات حتى 10Gbps
- تقديم حزم مختلفة قد تصل تردداتها حتى 100GHZ
- تحسين فاعلية الطاقة لتواكب زيادة الطلب على البيانات وتنوع الخدمات

1.3.3- استخدام الجيل الخامس

حدد الاتحاد الدولي للاتصالات ITU بموجب شروط الاتصالات النقالة الدولية IMT-2020 ثلاث
سيناريوهات يمكن استخدام الجيل الخامس فيها:

• النطاق العريض النقال المحسن eMBB

يمتاز هذا السيناريو عن بقية السيناريوهات المقترحة بتقديم اتصالات فائقة السرعة بالإضافة إلى
جودة خدمة موحدة في جميع أماكن الخلية حتى على حوافها.
يعتبر هذا السيناريو مناسباً جداً للتطبيقات التي تتطلب معدل نقل عالٍ كتطبيقات الواقع الافتراضي،
وتطبيقات واتصالات الفيديو عالية الدقة.

• اتصالات الآلات الكثيفة mMTC

يهدف هذا السيناريو إلى دعم عدد كبير من الأجهزة المتصلة بمتطلبات جودة متباينة بهدف تأمين الاتصال لجميع الأجهزة المتصلة. يتناسب هذا السيناريو مع جميع التطبيقات التي تتطلب دعم عدد كبير من الأجهزة كإنترنت الأشياء، المدينة الذكية، تطبيقات المراقبة.

• اتصالات عالية الوثوقية منخفضة زمن التلبث URLLC

يتطلب هذا السيناريو زمن تأخير منخفض واستجابة سريعة جداً، وبالتالي فهو مناسب لجميع تطبيقات الزمن الحقيقي الحساسة لزمن التأخير كتطبيقات القيادة عن بعد.

2.3.3- التقنيات المستخدمة في الجيل الخامس للاتصالات

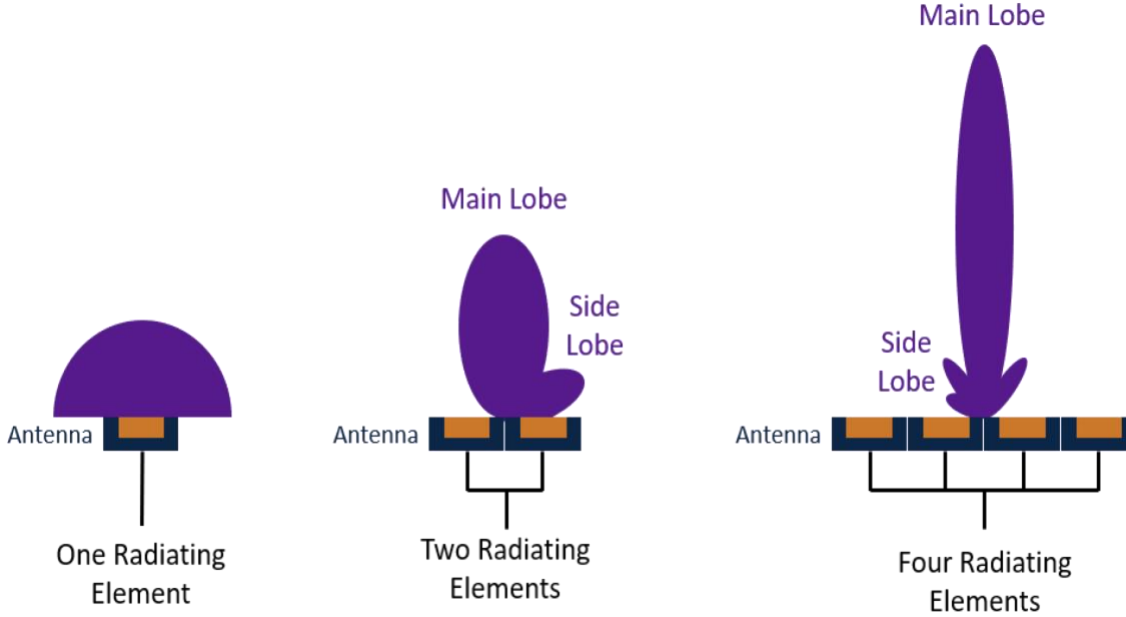
استخدم في الجيل الخامس العديد من التقنيات المتقدمة التي أدت إلى تحسن كبير في أداء أنظمة الجيل الخامس.

• الاتصالات المتعددة الدخل المتعددة الخرج الكثيفة massive MIMO

تدعم الاتصالات المتعددة الدخل المتعددة الخرج ارسال واستقبال الإشارات من وإلى عدد كبير من المستخدمين في ذات الوقت مما سيؤدي إلى تحسن في الفعالية الطيفية. تتيح تقنية MIMO المميزات التالية: زيادة معدلات البيانات وذلك باستخدام التضميم الزمني والمكاني. تحسين استطاعة الإشارة المستقبلية وذلك من خلال ضم الإشارات المستقبلية من خلال عدة هوائيات بدلاً عن هوائي وحيد.

• تشكيل الشعاع

تعتمد تقنية تشكيل الشعاع على توجيه المخطط الإشعاعي لمصفوفة الهوائيات نحو الطرفية المستهدفة. يؤدي دمج هذه التقنية مع الأمواج الميليمترية إلى زيادة استطاعة الإشارة المستقبلية، وتقليل التداخل بين المستخدمين، كما يؤدي دمج هذه التقنية مع تقنية mMIMO إلى كفاءة طيفية عالية. حيث يبين الشكل 14 كيفية تطبيق تقنية تشكيل الشعاع باستخدام مصفوفة هوائيات حيث يزداد الربح وتضيق حزمة الأشعاع الرئيسية بازدياد عدد العناصر.



الشكل 14: تطبيق تقنية تشكيل الفص الإشعاعي باستخدام مصفوفة هوائيات

• النفاذ المتعدد غير المتعامد

تستخدم تقنية النفاذ المتعدد غير المتعامد من أجل استخدام الطيف الترددي بشكل أمثل، وذلك عبر تشترك الموارد الراديوية، كما تتفوق هذه التقنية على تقنية النفاذ المتعدد في استثمار الموارد غير المتعامدة إلا أنها تعاني من التداخل نتيجة غياب التعامد. يمكن التغلب على التداخل الناتج عن عدم التعامد من خلال استخدام مستقبلات متقدمة ذات تعقيد عال.

تعتبر هذه التقنية هي الأفضل من حيث تلبية المتطلبات المتزايدة في الأجيال المتلاحقة نتيجة استخدامها للموارد غير المتعامدة، وبالتالي عدم الوقوع في محدودية الموارد المتعامدة.

• العمل في مجال الأمواج المليمترية

يتميز مجال الأمواج المليمترية بالإناحية الطيفية العالية مقارنة بالمجالات الترددية الأخفض التي تعاني من اكتظاظ نتيجة استغلال تطبيقات الاتصالات اللاسلكية الحالية الطيف الترددي لهذه التطبيقات بشكل شبه كامل. [33]

يحسن العمل في مجال الأمواج المليمترية من أداء نظم الاتصالات اللاسلكية وذلك من خلال زيادة معدلات الإرسال نتيجة النطاقات الطيفية العريضة للأمواج المليمترية، إضافةً إلى تصغير حجم

العتاد المستخدم نتيجة صغر طول الموجة الميليمترية. تعاني الموجة الميليمترية من قيم عالية من الفقد والتداخل مقارنةً بالموجات الأخرى ذات التردد الأخفض. لذلك يتم استخدام هذه الأمواج في تغطية مسافات قصيرة. مع العلم أن مجال الأمواج الميليمترية يمتد من 24GHZ إلى 300GHZ، لكن الجيل الخامس للاتصالات يُتوقع أن يستخدم المجال 24GHZ إلى 100GHZ من مجال الأمواج الميليمترية، وذلك للصعوبات العملية التي تواجه العمل عند ترددات أكبر.

3.3.3- ترددات حزم الجيل الخامس

يسرد الجدول (3) أهم الحزم الترددية المستخدمة في الجيل الخامس [34]

ترددات الوصلة الهابطة [MHZ]	ترددات الوصلة الصاعدة [MHZ]	نمط الازدواج	الحزمة
2110-2170	1920-1980	FDD	N1
1930-1990	1850-1910	FDD	N2
1805-1880	1710-1785	FDD	N3
869-894	824-849	FDD	N5
2620-2690	2500-2570	FDD	N7
925-960	880-915	FDD	N8
729-746	699-716	FDD	N12
791-821	832-862	FDD	N20
1930-1995	1850-1915	FDD	N25
758-803	703-748	FDD	N28
2570-2620	2570-2620	TDD	N38
1880-1920	1880-1920	TDD	N40
2496-2690	2496-2690	TDD	N41
1432-1517	1432-1517	TDD	N50
1427-1432	1427-1432	TDD	N51
2110-2200	1710-1780	FDD	N66
26500-29500	26500-29500	TDD	N257
24250-27500	24250-27500	TDD	N258
37000-40000	37000-40000	TDD	N260
27500-28350	27500-28350	TDD	N261

الجدول (3): أهم الحزم الترددية المستخدمة في الجيل الخامس [34].

الفصل الرابع

تصميم وتحليل مصفوفة هوائيات مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس

نقدّم في هذا الفصل تصميم للعديد من مصفوفات الهوائيات المغذاة اعتماداً على أفضل طرق تخميد الحزم الجانبية، والقيام بالمقارنة بينها، وانتقاء التصميم الأفضل من حيث تخميد الحزم الحانبية وفعاليتها في دعم تطبيقات الجيل الخامس

1.4- مقدمة

قدّمنا في الفصل الأول شرح مفصل عن مصفوفات الهوائيات وأنواعها مع المقارنة بين أبرز الأبحاث والتطبيقات التي اعتمدت على مصفوفات الهوائيات بشكل أساسي.

قدّمنا في الفصل الثاني دراسة نظرية لأهم طرق تخميد الحزم الجانبية كطريقة دولف-تشيبشيف وخوازمية SSR ، كما قمنا بالمقارنة بين أبرز طرق التغذية التي بينت تفوق طريقة التغذية التفرعية من حيث الربح و عرض حزمة الأشعاع الرئيسية، كما تناولنا طريقة تقسيم الاستطاعة اعتماداً على مقسمات T-junction ، بالإضافة إلى المقارنة بين مصفوفة الهوائيات الخطية ومصفوفة الهوائيات المستوية.

قدّمنا في الفصل الثالث دراسة لمختلف أجيال الاتصالات اللاسلكية مع التركيز على الجيل الخامس للاتصالات المستهدف دعمه من خلال التصميمات المقترحة خلال هذا العمل.

بناءً على ذلك أصبح بإمكاننا تصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات مغذاة اعتماداً على أفضل تقنيات تخميد الحزم الجانبية لدعم تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات اللاسلكية.

حيث قمنا في هذا الفصل بتصميم ومحاكاة العديد من التصاميم المناسبة لدعم تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات كما قمنا بالمقارنة فيما بينها حيث تم في البداية استعراض أداء هوائي شرائحي وحيد لنقوم فيما بعد بتصميم مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على دولف تشيبشيف الذي يعتبر أحد أفضل طرق تخميد الحزم الجانبية، ومن ثم قمنا في هذا الفصل بتصميم وتنفيذ مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على قيم الأوزان الناتجة عن تنفيذ خوازمية SSR كما تم تحسين أداء التصميم السابق من خلال استخدام الأسطح انتقائية التردد التي أثبتت جدارتها في تخميد الحزم الجانبية، لنقوم في النهاية بالعمل على المصفوفة المستوية وتغذيتها اعتماداً على توزيع دولف تشيبشيف ومحاكاة التصميم عبر بيئة الماتلاب بالإضافة إلى عرض مقارنة بين طرق تخميد الحزم الجانبية المختلفة.

2.4- تصميم ومحاكاة هوائي شرائحي وحيد

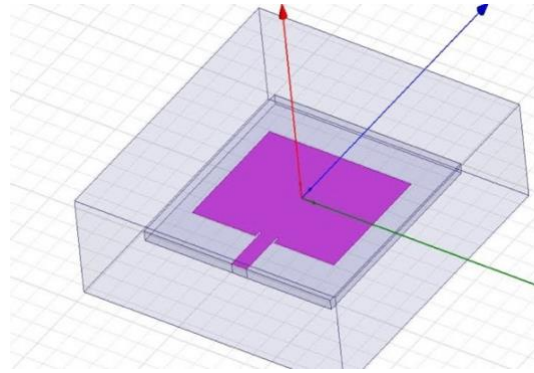
يبين الشكل 15 (a) التصميم المكون من هوائي شرائحي وحيد كما يبين الشكل 15 (b) الربح الناتج عن الهوائي الشرائحي البالغ 7dB.

يعمل الهوائي عند تردد 27GHz كما تم تصميمه وفق الأبعاد التالية: 3.5x3.5 mm على قاعدة نوع Rogers5880 ذات سماكة 0.25 mm. حيث تم اعتماد هذه الأبعاد من خلال العلاقات التالية:

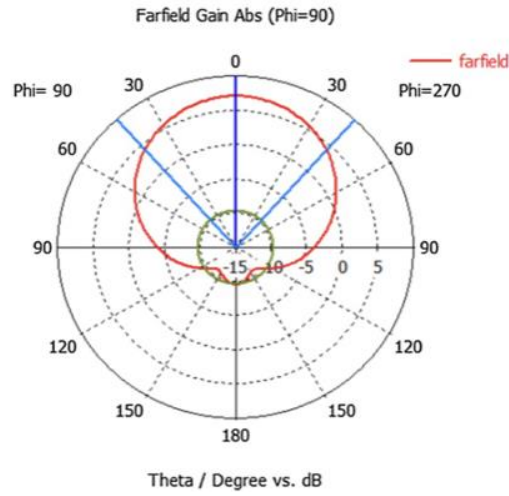
$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right)$$

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}}$$

حيث W عرض الهوائي، L طول الهوائي، h سماكة الركيزة، f التردد



A



B

الشكل 15: A التصميم المكون من هوائي شرائحي، و B مخطط الريح له

3.4- تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على توزيع دولف-تشيبشيف

يتكون هذا التصميم من مصفوفة هوائيات خطية تعمل على تردد 27 GHz ، والتي تتألف من 16 عنصر من الهوائيات الشرائحية التي تبعد عن بعضها البعض بمقدار 5 mm والمصممة على شكل مربعات بأبعاد 3.5x3.5 mm، والتي تم تصميمها على قاعدة ذات نوع Rogers 5880 بثخانة 0.25 mm، بطول 25 mm وبعرض 90 mm، كما تتميز هذه القاعدة بعامل سماحية ذو القيمة 2.2، وبعامل فقد يبلغ 0.009 ، كما تم تغذية مصفوفة الهوائيات الخطية اعتماداً على قيم الأوزان المأخوذة من طريقة دولف تشيبشيف، حيث بُنيت شبكة التغذية اعتماداً على مقسمات الاستطاعة T-junction من أجل تقسيم الاستطاعة بين عناصر المصفوفة بشكل غير متساوي.

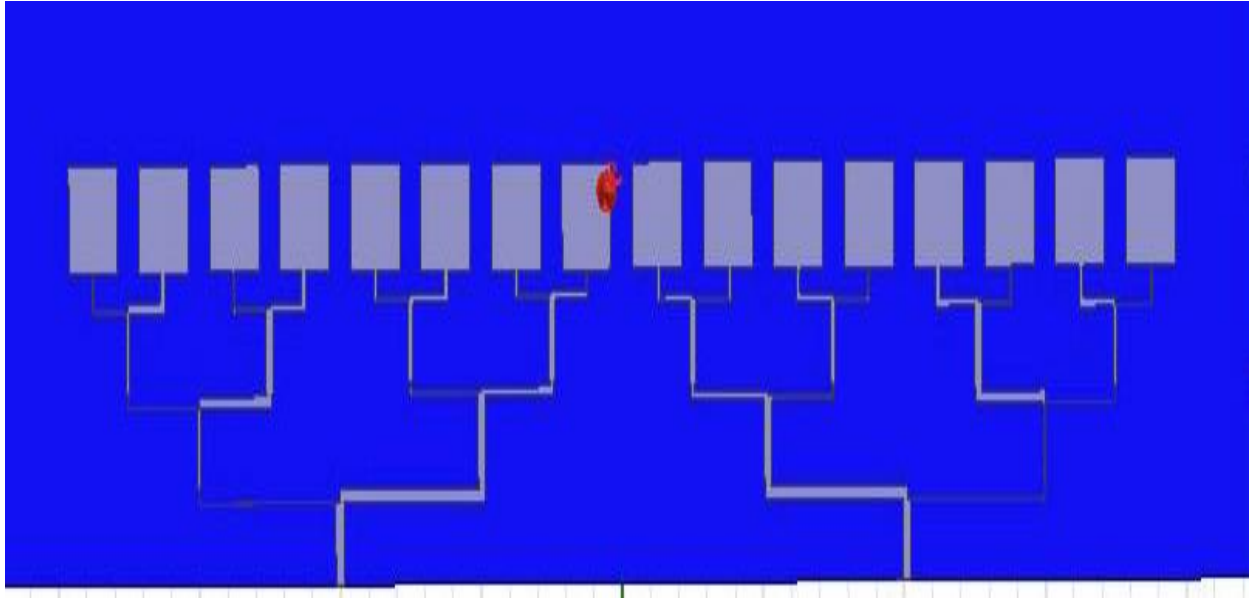
من أجل محاكاة التصميم، تم الاعتماد على برنامج HFSS نظراً لكفاءته في عملية محاكاة الهوائيات إضافة لسهولة التعامل به. صممت شبكة التغذية وفق قيم الأوزان المأخوذة من توزيع دولف تشيبشيف وفق القيم المبينة في الجدول 4

الجدول 4: قيم الأوزان المأخوذة من توزيع دولف تشيبشيف

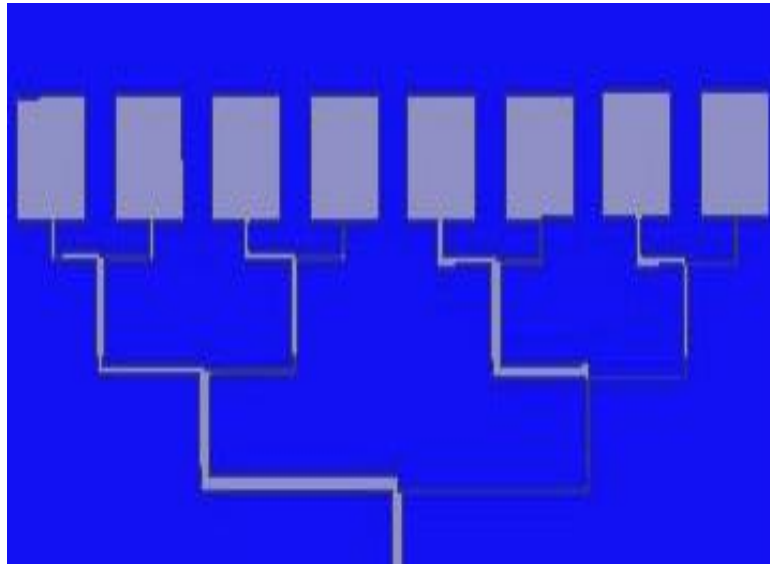
رقم العنصر	1	2	3	4	5	6	7	8
عامل الأوزان	0.1138	0.1964	0.3319	0.4926	0.6613	0.8163	0.9353	1
رقم العنصر	9	10	11	12	13	14	15	16
عامل الأوزان	1	0.9353	0.8163	0.6613	0.4926	0.3319	0.1964	0.1138

1.3.4- مناقشة نتائج المحاكاة

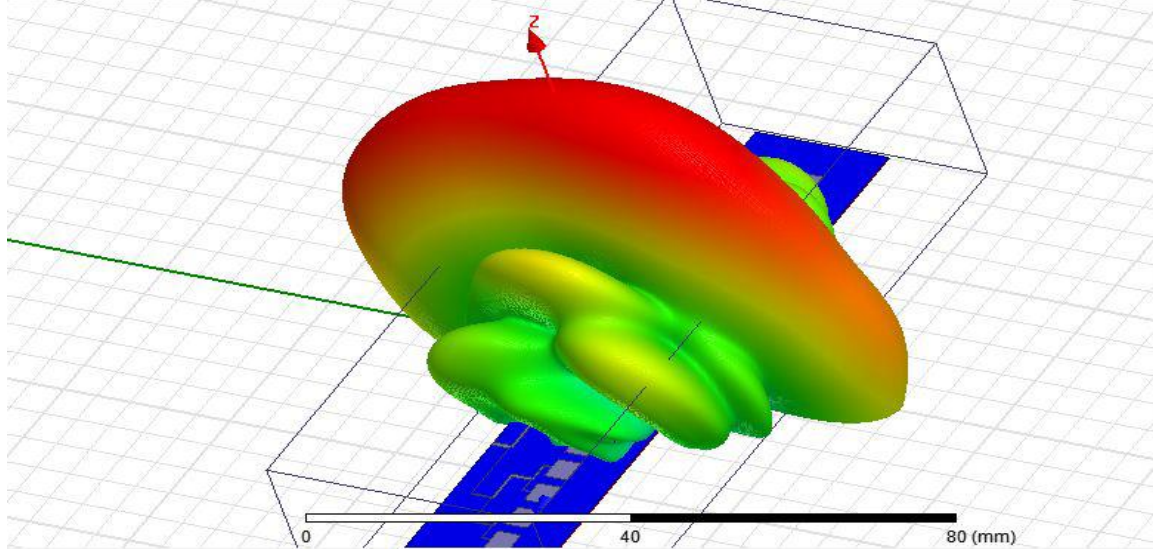
يبين الشكل 16 التصميم المنفذ المكون من 16 عنصر، والذي يبين تطابق أبعاد الهوائيات المستخدمة، واختلاف أقطار خطوط نقل شبكة التغذية نتيجة لاختلاف قيم ممانعاتها وذلك بهدف تقسيم الاستطاعة بين عناصر المصفوفة بشكل غير متساوي وذلك بالاعتماد على توزيع دولف-تشيبشيف، كما تظهر في شبكة التغذية خطوط نقل بطول يبلغ ربع طول الموجة للقيام بعملية توفيق الممانعات



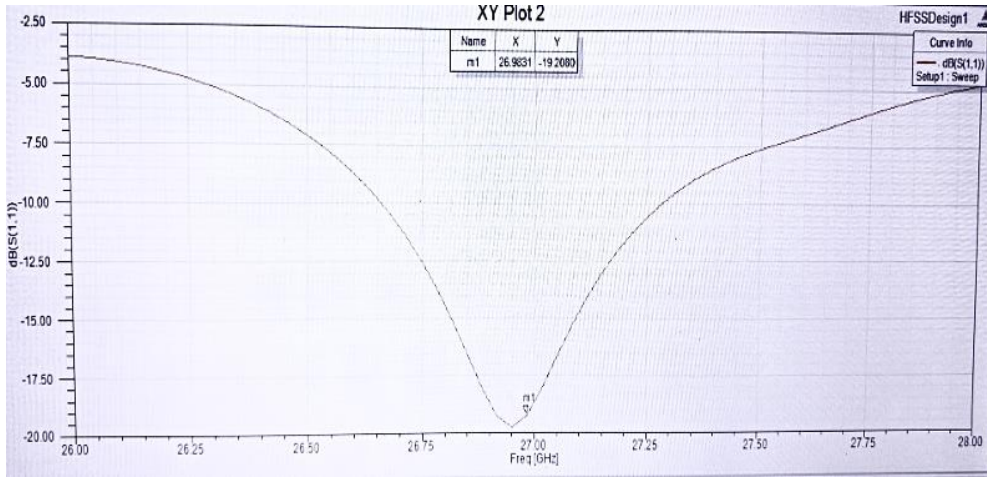
الشكل 16: مصفوفة الهوائيات الخطية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف-تشيبشيف



الشكل 17: أظهار التصميم المعتمد على دولف تشيبشيف عن قرب

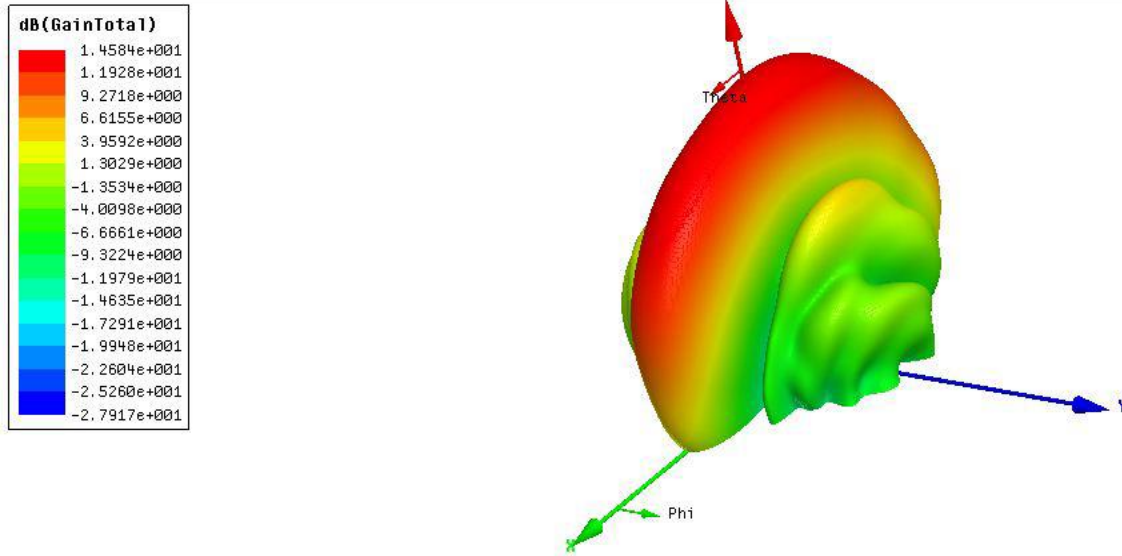


الشكل 18: المخطط الإشعاعي الناتج عن محاكاة دولف تشيبيشيف مع الدارة المصممة

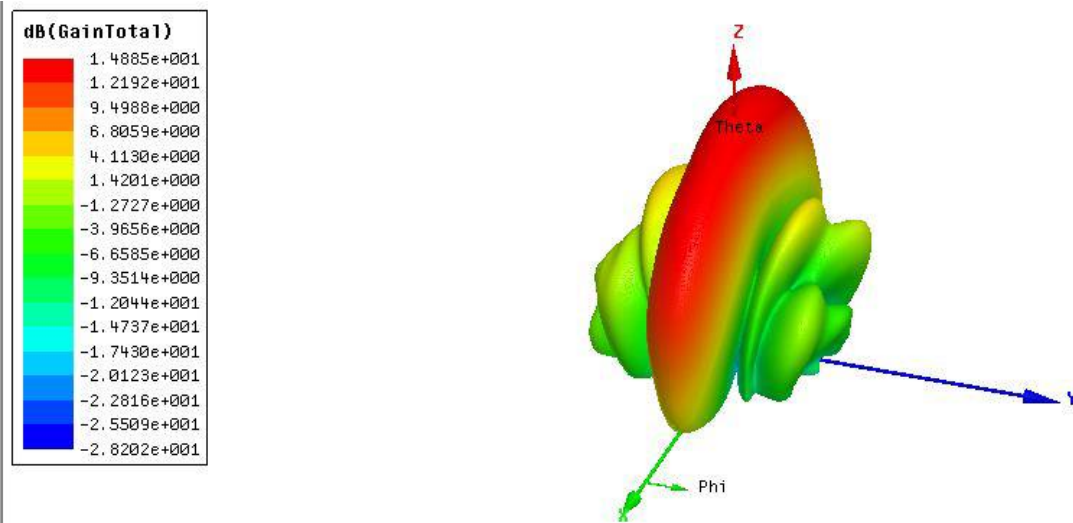


الشكل 19: مخطط S11 الناتج عن محاكاة دارة دولف تشيبيشيف

يبين الشكل 19 نجاح عملية توفيق الممانعات نتيجة اعتماد طريقة توفيق الممانعات باستخدام محول ربع طول لموجة.



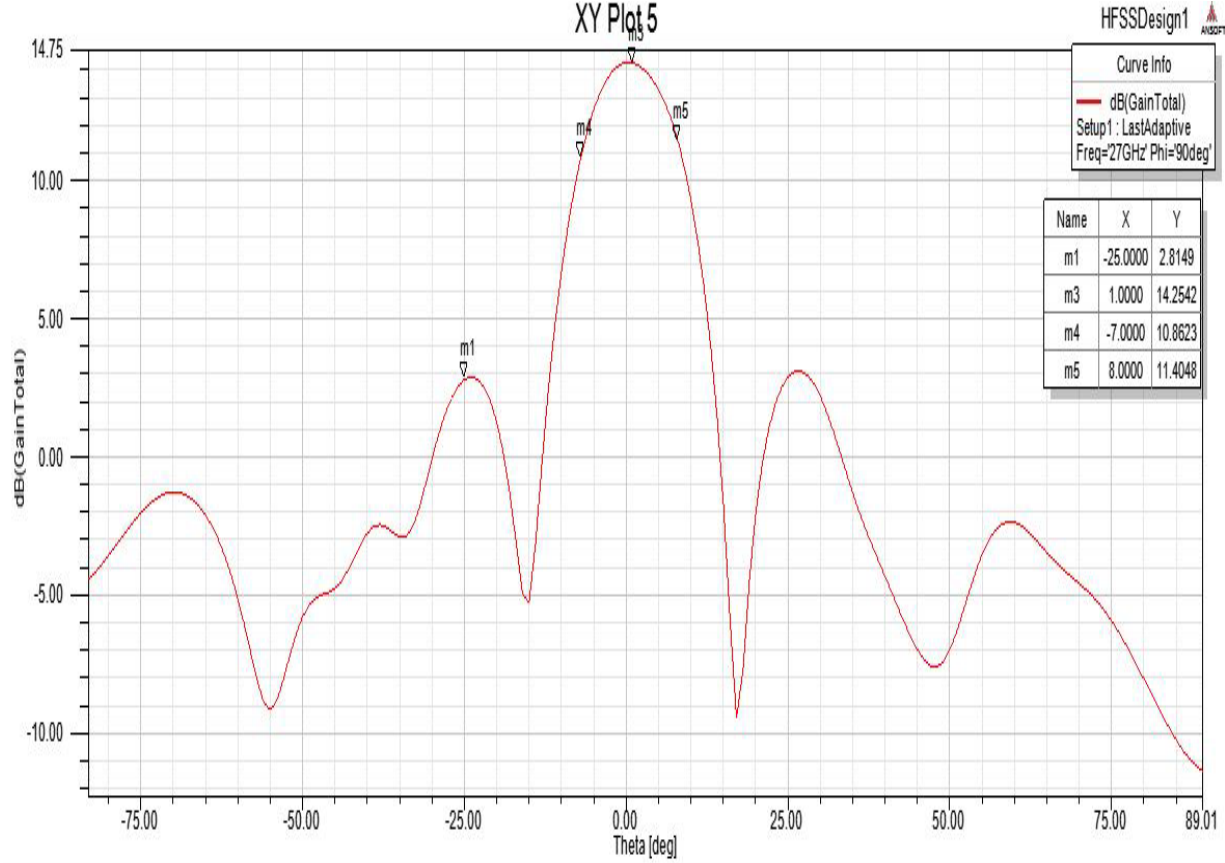
A



B

الشكل 20: المخطط الإشعاعي الناتج عن محاكاة دائرة دولف تشيبيشيف

يبين الشكل 20 المخطط الإشعاعي الناتج عن عملية المحاكاة لمصفوفة الهوائيات الخطية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف، حيث نلاحظ وجود حزمة أشعاعية رئيسية قوية شبيهة بنصف الشطيرة بالإضافة إلى العديد من الحزم الجانبية المخمدة بشكل كافٍ للحد من التداخل.



الشكل 21: مخطط الربح مقدراً بالديسبل بدلالة التردد للدارة المصممة

يبين الشكل 21 مقدار الربح الذي يحققه التصميم المقترح حيث حقق التصميم ربحاً بمقدار 14.2542dB بينما بلغ عرض الحزمة الإشعاعية الرئيسية (-3dB) 15 درجة، كما بين الشكل تخميدياً جيداً للحزم الجانبية، والذي يساوي -11.4393dB.

بناءً على النتائج السابقة نجد أن التصميم مناسب لتطبيقات الجيل الخامس حيث حقق ربحاً عالياً بالإضافة إلى تخميد جيد للحزم الجانبية وعرض حزمة ضيق.

يعمل هذا التصميم عند التردد 27GHz الذي يقع ضمن مجال الأمواج المليمترية الذي يمتاز بإتاحة عالية مقارنةً بالمجالات الترددية الأخفض التي تعاني من اكتظاظ التطبيقات اللاسلكية العاملة عند هذه المجالات.

4.4- تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR

صممت شبكة التغذية اعتماداً على قيم الأوزان الناتجة عن تنفيذ خوارزمية SSR كما تم استخدام مصفوفة الهوائيات الخطية ذاتها المستخدمة بالتصميم المعتمد على توزيع دولف تشيبيشيف بالإضافة إلى استخدام القاعدة ذاتها، وذلك بهدف المقارنة بين أداء خوارزمية SSR، توزيع دولف تشيبيشيف، حيث يتكون هذا التصميم من مصفوفة هوائيات خطية تعمل على تردد 27 GHz ، والتي تتألف من 16 عنصر من الهوائيات الشرائحية التي تبعد عن بعضها البعض بمقدار 5 mm والمصممة على شكل مربعات بأبعاد 3.5x3.5 mm، والتي تم تصميمها على قاعدة ذات نوع Rogers 5880 بثخانة 0.25 mm، بطول 25 mm وبعرض 90 mm، كما تتميز هذه القاعدة بعامل سماحية ذو القيمة 2.2، وبعامل فقد يبلغ 0.009 ، كما تم تغذية مصفوفة الهوائيات الخطية اعتماداً على قيم الأوزان المأخوذة من خوارزمية SSR، حيث بُنيت شبكة التغذية اعتماداً على مقسمات الاستطاعة T-junction من أجل تقسيم الاستطاعة بين عناصر المصفوفة بشكل غير متساوي، كما تم تحديد معاملات الخوارزمية كالتالي:

عدد الدورات سبعة دورات، كما تم تحديد عامل التقارب بالقيمة 0.8 حيث تم اختيارها كونها قيمة التقارب الأفضل لتخميد الحزم الجانبية كما هو موضح في الشكل 22.

استخدم برنامج الماتلاب من أجل تنفيذ خوارزمية SSR حيث يتم تصميم شبكة التغذية اعتماداً على قيم الأوزان الناتجة عن تنفيذ هذه الخوارزمية المبينة في الجدول 5.

كما تم الاعتماد على برنامج HFSS من أجل محاكاة التصميم المقترح نظراً لكفاءته في عملية محاكاة الهوائيات إضافة لسهولة التعامل به.

الجدول 5: قيم الأوزان الناتجة عن تنفيذ خوارزمية SSR

رقم العنصر	1	2	3	4	5	6	7	8
عامل الأوزان	0.2433	0.3755	0.47	1	0.622	0.4819	0.7627	0.7298
رقم العنصر	9	10	11	12	13	14	15	16
عامل الأوزان	0.7298	0.7627	0.4819	0.622	1	0.47	0.3755	0.2433

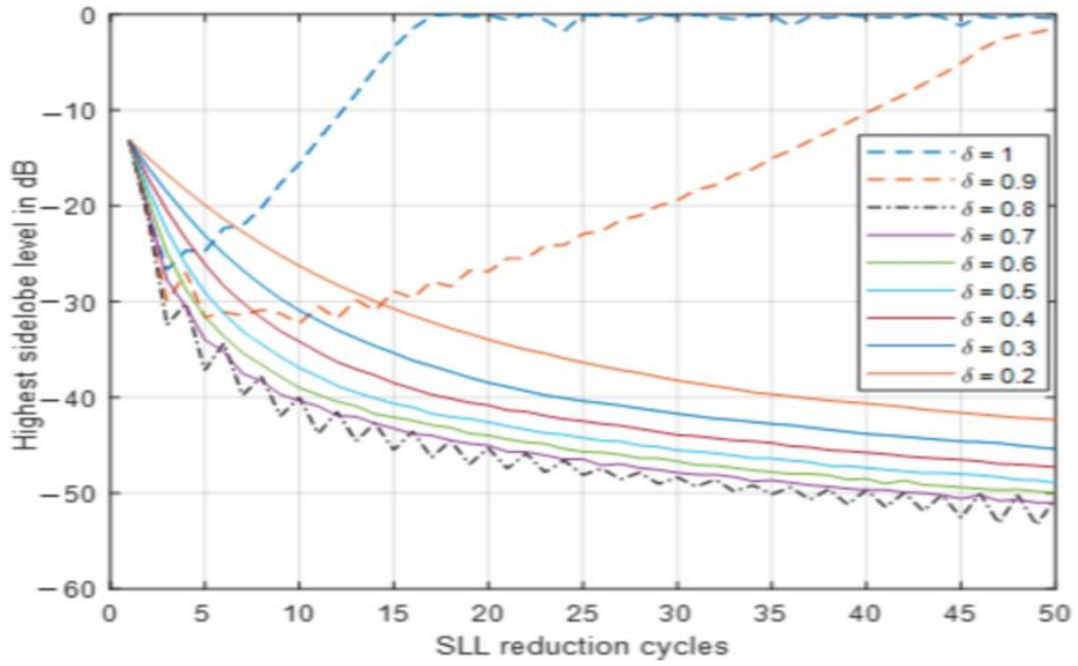
كما تم تحديد زوايا الحزم الجانبية عقب التكرار الأول للخوارزمية عند القيم الموضحة في الجدول 6

الجدول 6: الحزم الجانبية الناتجة عن التكرار الأول لخوارزمية SSR

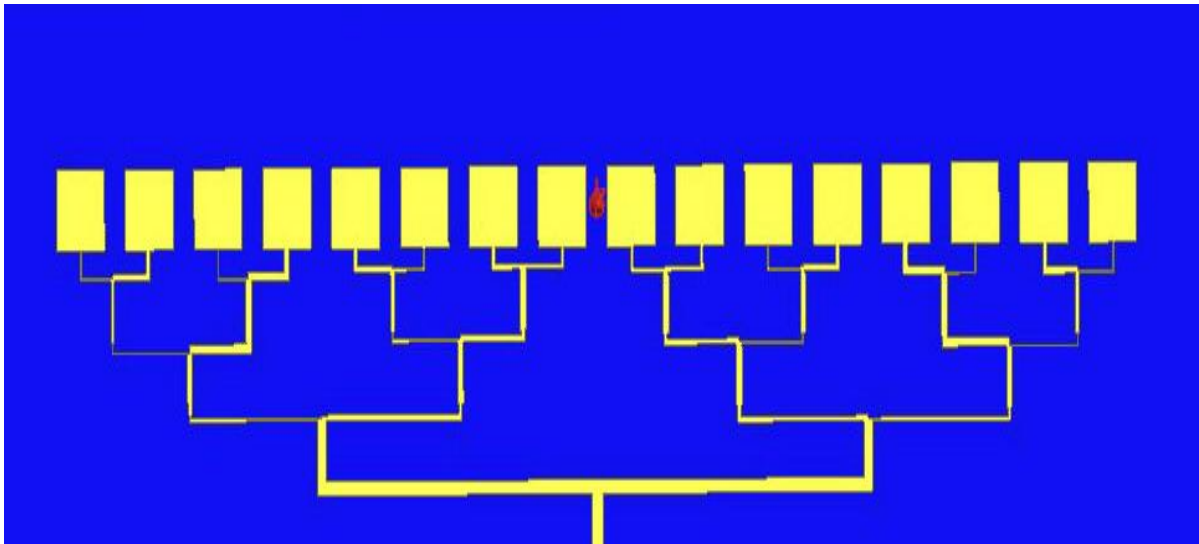
7	6	5	4	3	2	1	رقم الحزمة الجانبية
78.4	68.1	65.3	62.3	51.3	38.9	24.4	اتجاه الحزمة الجانبية (Deg)
14	13	12	11	10	9	8	رقم الحزمة الجانبية
163.7	146.2	134.7	125.1	116.5	108.5	100.7	اتجاه الحزمة الجانبية (Deg)

1.4.4 - مناقشة نتائج المحاكاة

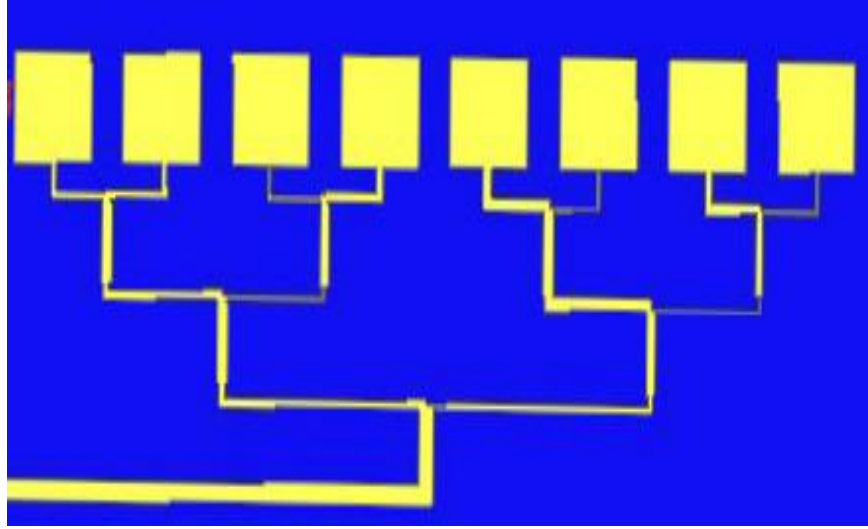
يبين الشكل 23 التصميم المنفذ المكون من 16 عنصر، والذي يبين تطابق أبعاد الهوائيات المستخدمة، واختلاف أقطار خطوط نقل شبكة التغذية نتيجة لاختلاف قيم ممانعاتها وذلك بهدف تقسيم الاستطاعة بين عناصر المصفوفة بشكل غير متساوٍ وذلك بالاعتماد على خوارزمية SSR، كما تظهر في شبكة التغذية خطوط نقل بطول يبلغ ربع طول الموجة للقيام بعملية توفيق الممانعات.



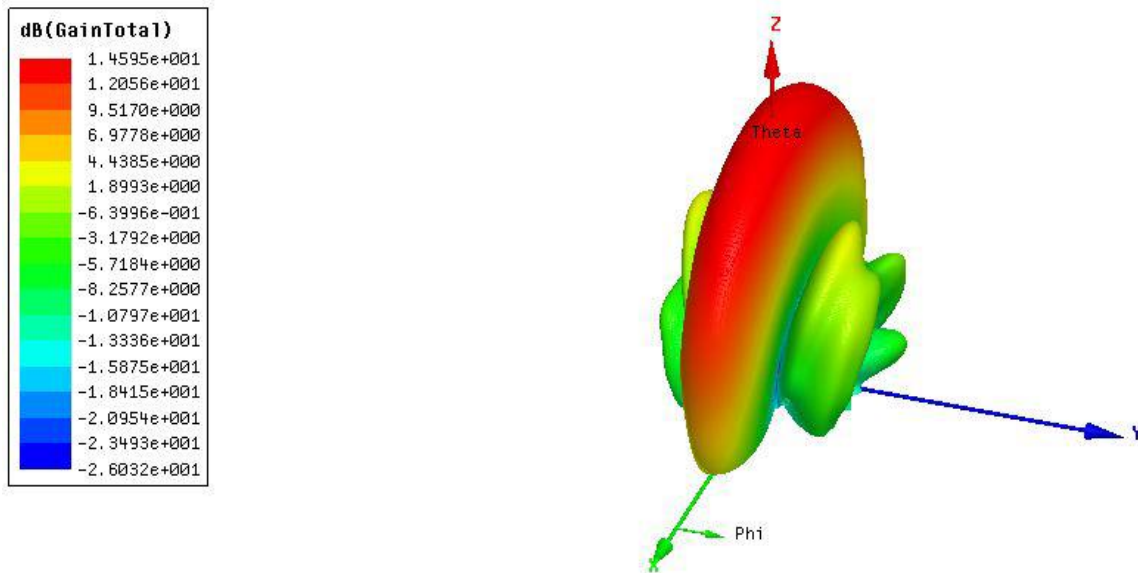
الشكل 22: سلوك تقارب الخوارزمية SSR مع عدد دورات التخفيف [3]



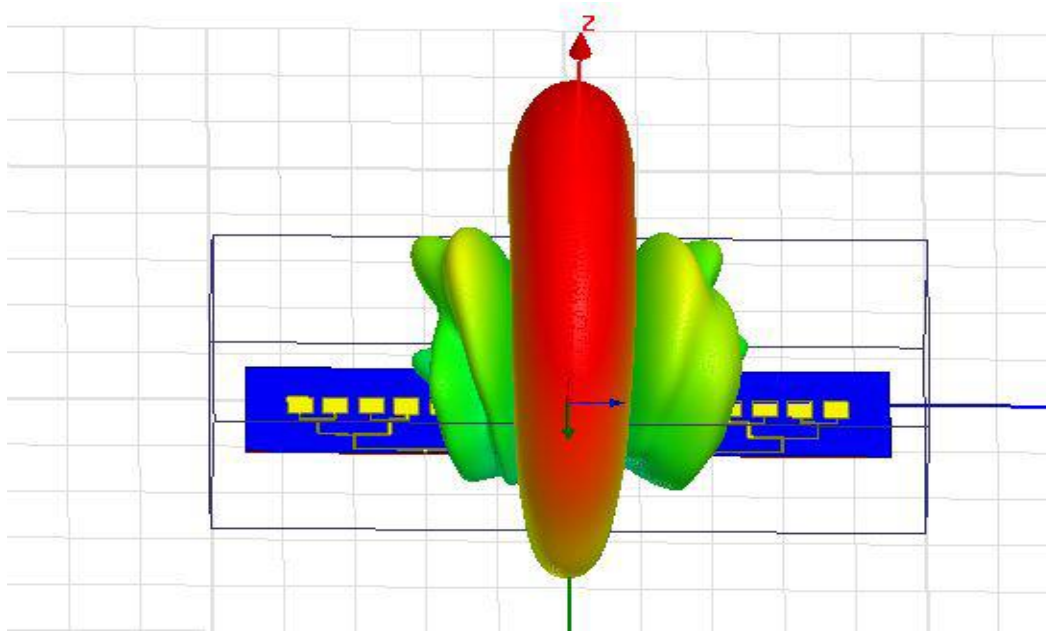
الشكل 23: مصفوفة الهوائيات الخطية المغذاة اعتماداً على خوارزمية SSR



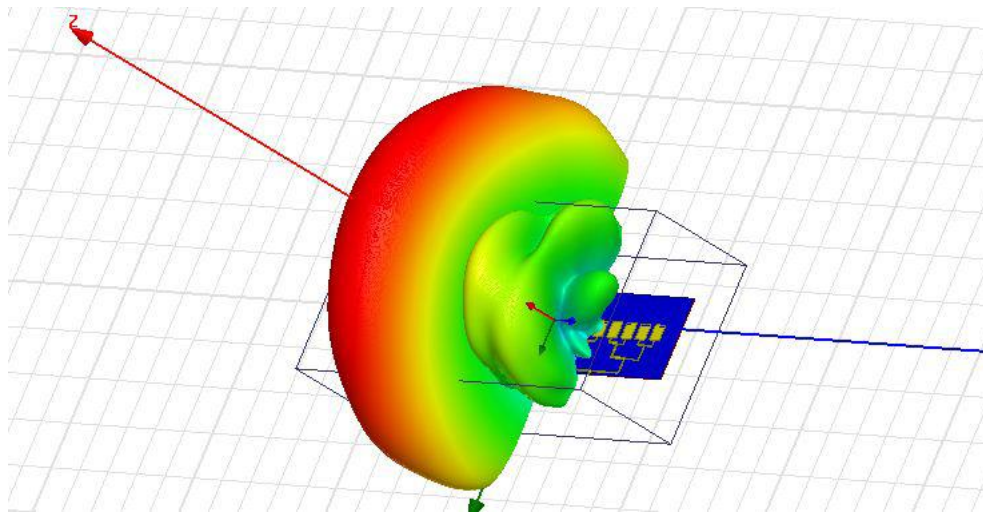
الشكل 24: أظهار التصميم المعتمد على خوارزمية SSR عن قرب



الشكل 25: المخطط الأشعاعي الناتج عن محاكاة التصميم المعتمد على خوارزمية SSR



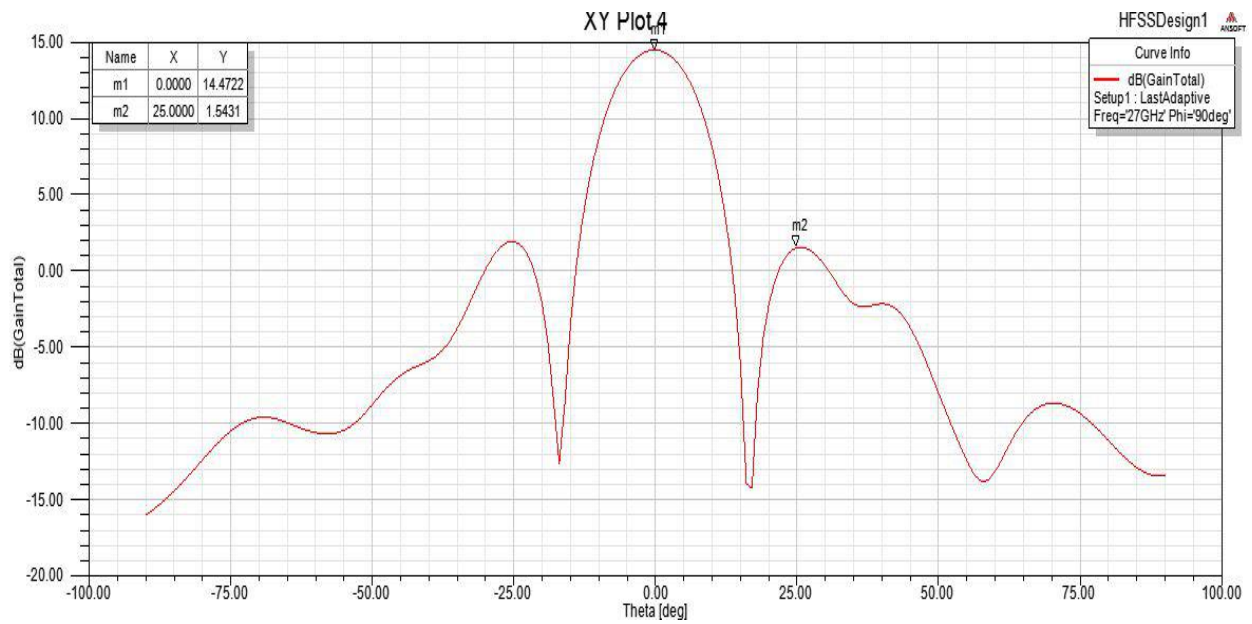
A



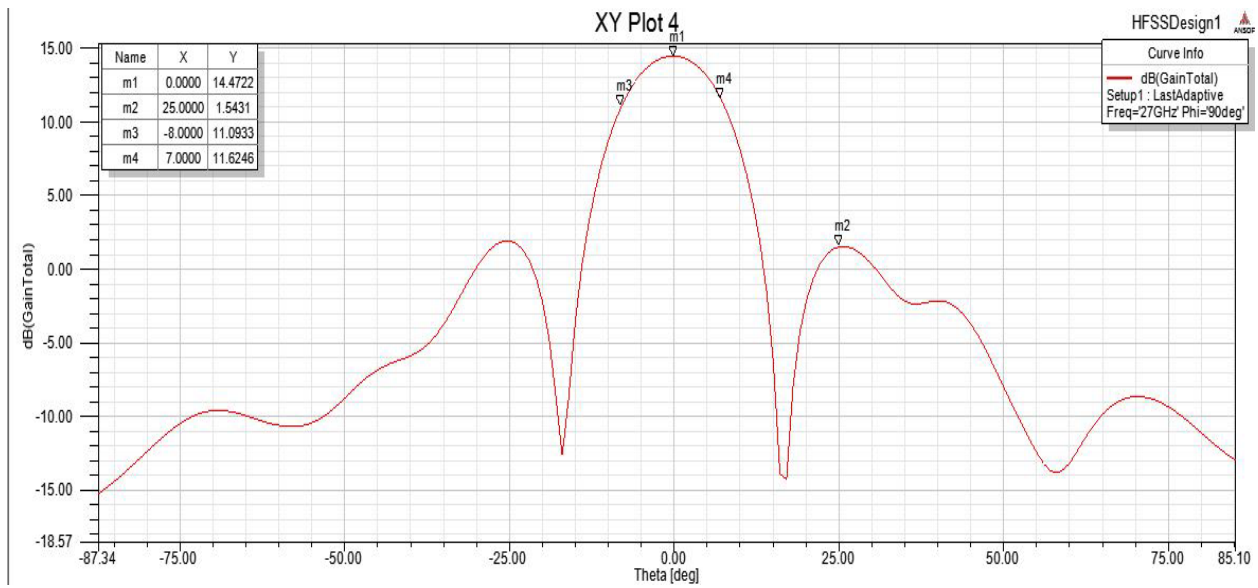
B

الشكل 26: المخطط الأشعاعي الناتج عن المحاكاة اعتماداً على خوارزمية SSR مع الدارة المصممة

A مسقط أمامي، B مسقط جانبي



A



B

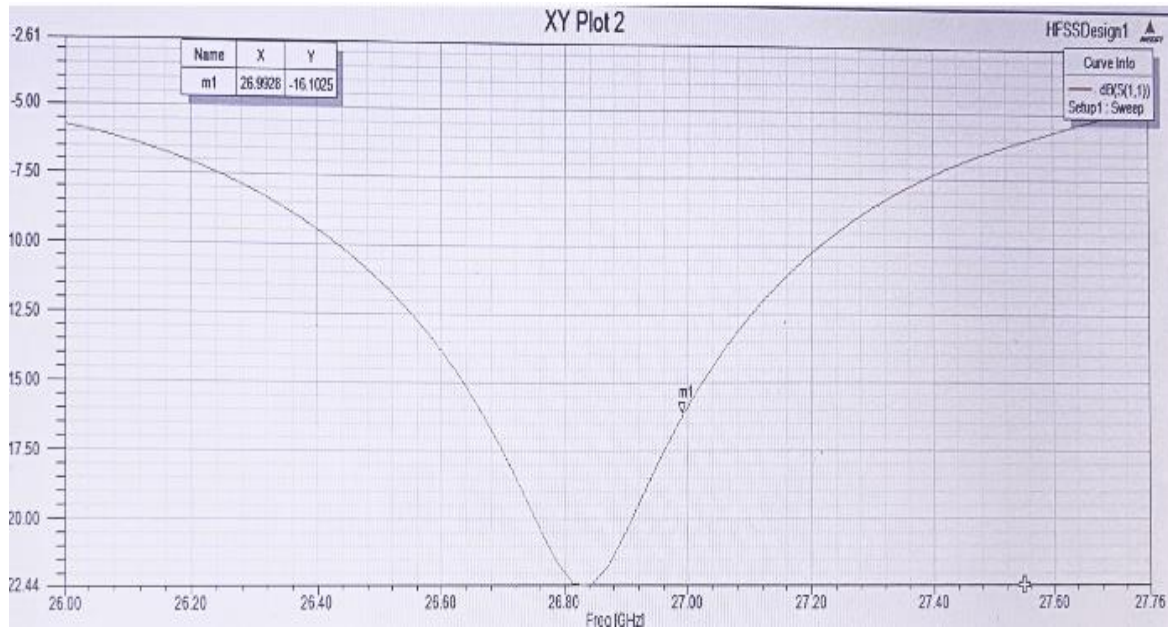
الشكل 27: مخطط الريح بدلالة التردد بتطبيق خوارزمية SSR

يبين الشكل 25 المخطط الأشعاعي الناتج عن محاكاة التصميم السابق حيث تظهر الحزمة الرئيسية بوضوح بشكل شبيه بالشطيرة إضافة للعديد من الحزم الجانبية المخمدة.

كما يبين الشكل 27 قيمة الربح الناتج عن محاكاة التصميم المعتمد على خوارزمية SSR الذي بلغت قيمته 14.4722dB مع مستوى حزم جانبية تقارب -12.53dB ، بينما بلغ عرض حزمة الأشعاع الرئيسية (-3dB) 15 درجة.

كما يبين الشكل 28 قيمة S11 بدلالة التردد، حيث بلغت قيمة العامل S11 عند التردد 27GHZ -16dB مما يدل على نجاح عملية توفيق الممانعات نتيجة استخدام خطوط نقل بطول يساوي ربع طول الموجة.

بينما بلغت قيمة عرض المجال الترددي الذي تكون فيه قيمة العامل S11 أقل من -10dB 800MHZ



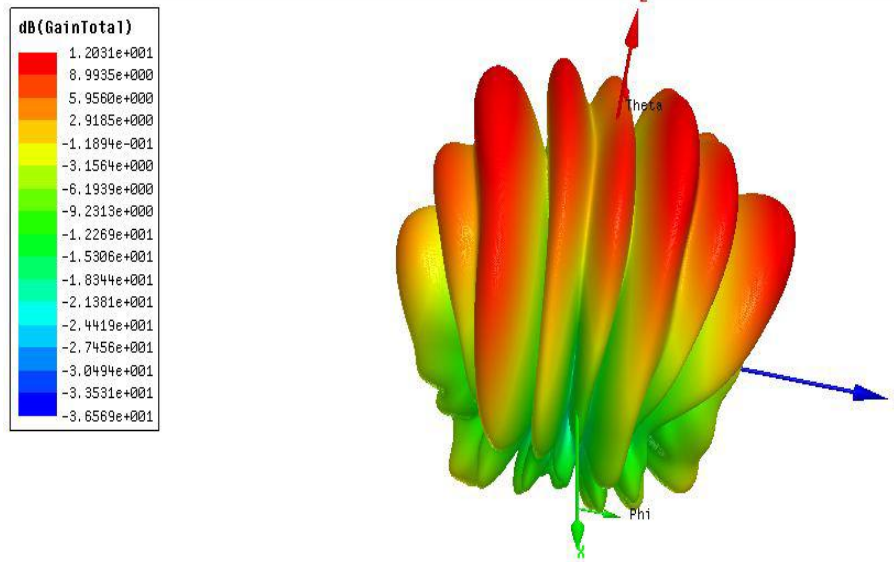
الشكل 28: مخطط يظهر قيمة S11 بدلالة التردد.

تبين النتائج السابقة تفوقاً للتصميم السابق المعتمد على خوارزمية SSR على التصميم المعتمد على توزيع دولف تشيبيشيف حيث نتج عن تنفيذ الخوارزمية تحسناً في الربح بمقدار 0.218dB كما حُمدت الحزم الجانبية بواسطة الخوارزمية بشكل أكبر من دولف تشيبيشيف ب 1.1dB، كما يلاحظ أن متوسط الحزم الجانبية أقل بكثير مقارنة عن الحزم الجانبية الناتجة عن تطبيق دولف تشيبيشيف.

يتناسب التصميم السابق مع تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات اللاسلكية كونه يحقق شروطه كافة كالربح العالي، تخميد الحزم الجانبية الجيد، عرض الحزمة الإشعاعية الضيق، العمل في مجال الأمواج الميليمترية.

فقد حقق ربحاً أعلى بـ 7.4dB مقارنةً باستخدام هوائي شرائحي وحيد. كما تتميز خوارزمية SSR بالقيام بما تسمى التصفية المكانية حيث تمكن هذه الميزة من حجب الخدمة عن أماكن معينة دون التأثير على مناطق أخرى، حيث يبين الشكل 29 تخميداً لحزم معينة وذلك عند الزوايا المحددة في الجدول 6 مما ينتج مخطط إشعاعي متعدد الفصوص. ولكن الملاحظ من المخططات الإشعاعية للتصميمين السابقين أن الحزمة الأشعاعية الرئيسية تأخذ شكل شبيه بنصف الشطيرة.

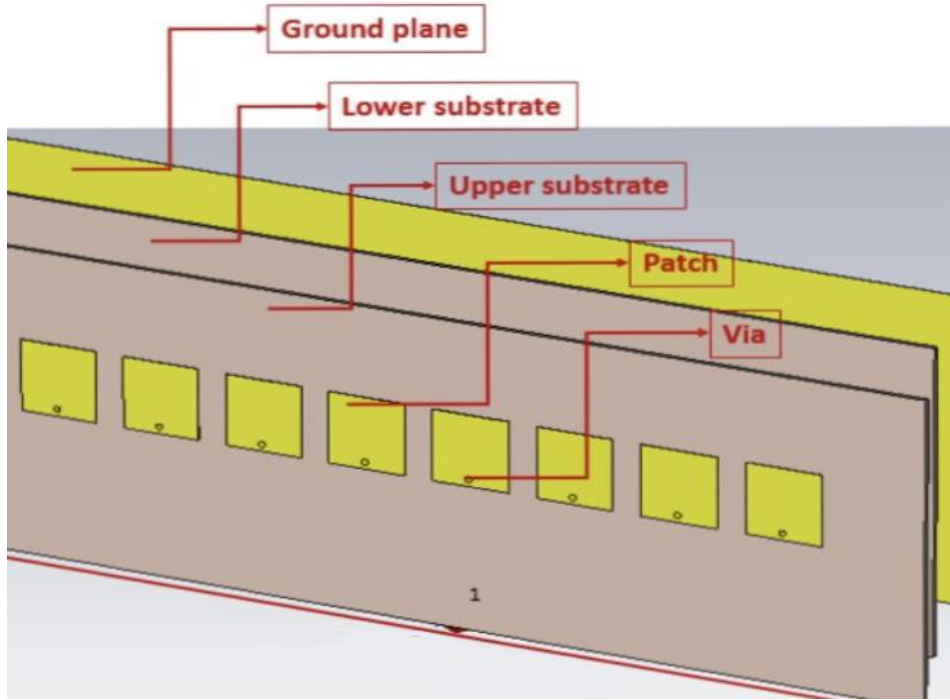
نعلم أنه في الجيل الخامس للاتصالات يتم توجيه حزمة الأشعاع الرئيسية الضيقة نحو المستخدم مباشرةً، لذلك يفضل جعل حزمة الأشعاع الرئيسية قلمية الشكل تنتج نحو المستخدم، وذلك بهدف جعل أداء مصفوفة الهوائيات مثالية تماماً لتطبيقات الجيل الخامس للاتصالات، لذلك سنلجأ لتصميم مصفوفة هوائيات مستوية عوضاً عن مصفوفة الهوائيات الخطية.



الشكل 29: مخطط أشعاعي متعدد الفصوص ناتج عن تخميد الحزم المحدد باستخدام SSR

2.4.4- مصفوفة هوائيات خطية مخمدة الحزم الجانبية باستخدام SSR محسنة الأداء

تم تحسين الأداء للتصميم السابق من خلال استخدام طريقة الترابط الكهرطيسي proximity feed لزيادة الربح كما هو مبين في الشكل 30، إضافة إلى استخدام الأسطح انتقائية التردد FSS لتخميد الحزم الجانبية. حيث يتم استخدام الأسطح انتقائية التردد عادةً لزيادة الربح ولكن هنا سنقوم باستخدامها لتخميد الحزم الجانبية من خلال استخدامها كعاكس عند تردد العمل 27 GHz ، ووضعها على جانبي المصفوفة الخطية.

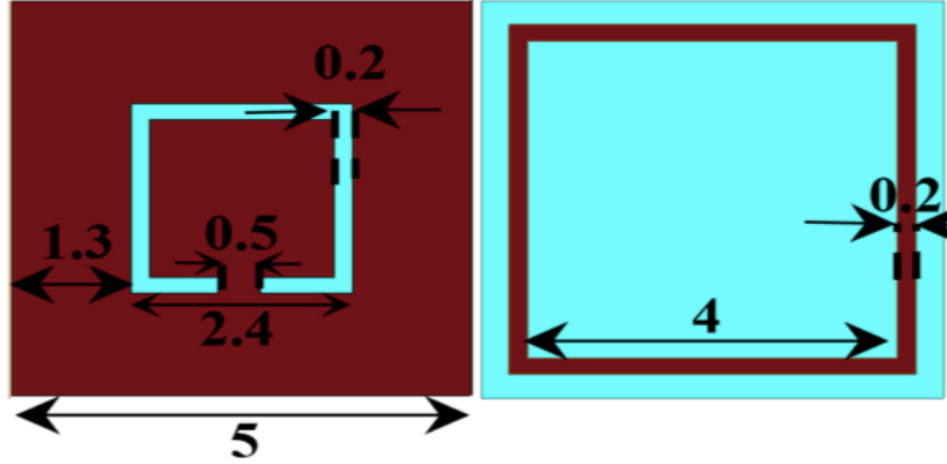


الشكل 30: طريقة الترابط الكهرطيسي Proximity feed

كما ذكرنا سابقاً سنقوم باستخدام الأسطح انتقائية التردد كعاكس وذلك بهدف عكس الإشعاعات الجانبية وتوجيه الإشعاع باتجاه الحزمة الرئيسية علماً أن الأسطح FSS يمكن أن تعمل كمادة نافذة، عاكسة، وذلك تبعاً للتردد العاملة عليه وشكل تصميمها.

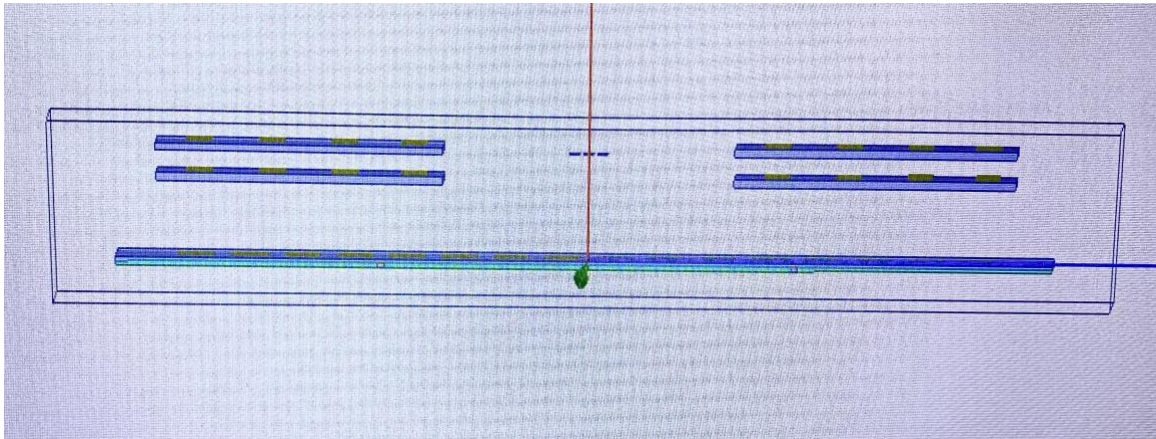
سنلجأ في هذا التصميم إلى استخدام طبقتين FSS، كما هو مبين في الشكل 32، حيث تتكون كل طبقة من مصفوفة من وحدات 3x4 FSS متوضعة على ركيزة ذات نوع Rogers 4003C ذات عامل عازلية 3.38 ، و عامل فقد يساوي 0.0027 ، وبارتفاع 0.508mm.

ترتفع طبقتي ال FSS عن مصفوفة الهوائيات الخطية الشرائحية بمقدار 4.821mm، بينما تبعد الطبقتين عن بعضهما البعض بمقدار 0.89mm. بينما يتم تصميم كل وحدة FSS على شكل شريحة مربعة على شكل حرف C متوضعة في الأعلى، بينما يُوضع شريط مربع في الأسفل كما هو مبين في الشكل 30.

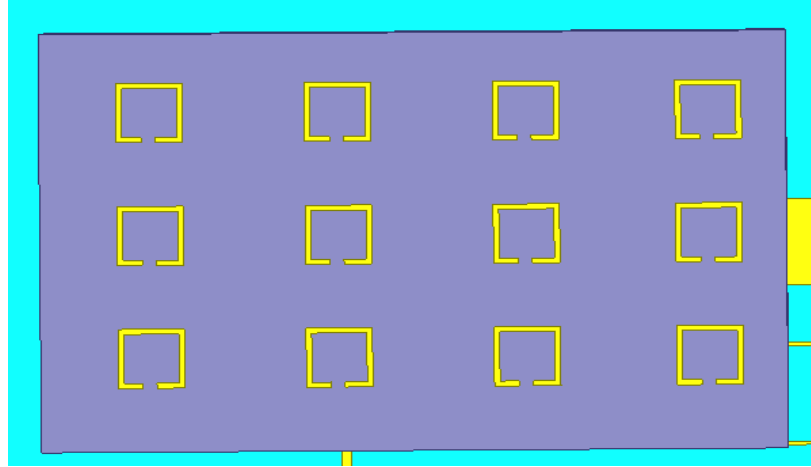


الشكل 31: التصميم المقترح لوحدة FSS

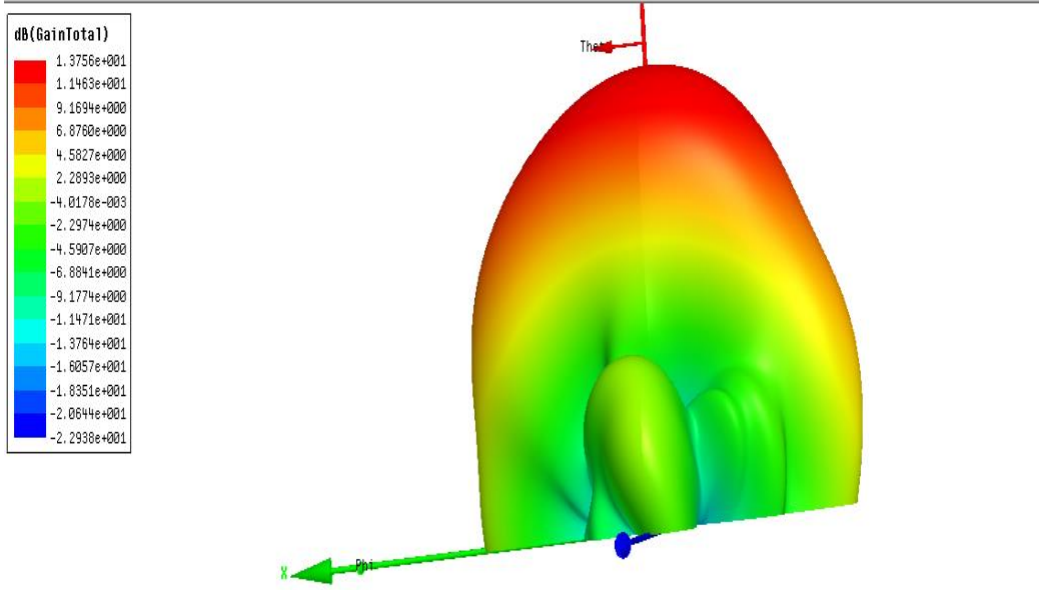
تسمى الشرائط الرفيعة الموصلة بقاطعات الاستقطاب كونها تلغي مكون الاستقطاب العمودي للحقل الكهربائي الساقط.



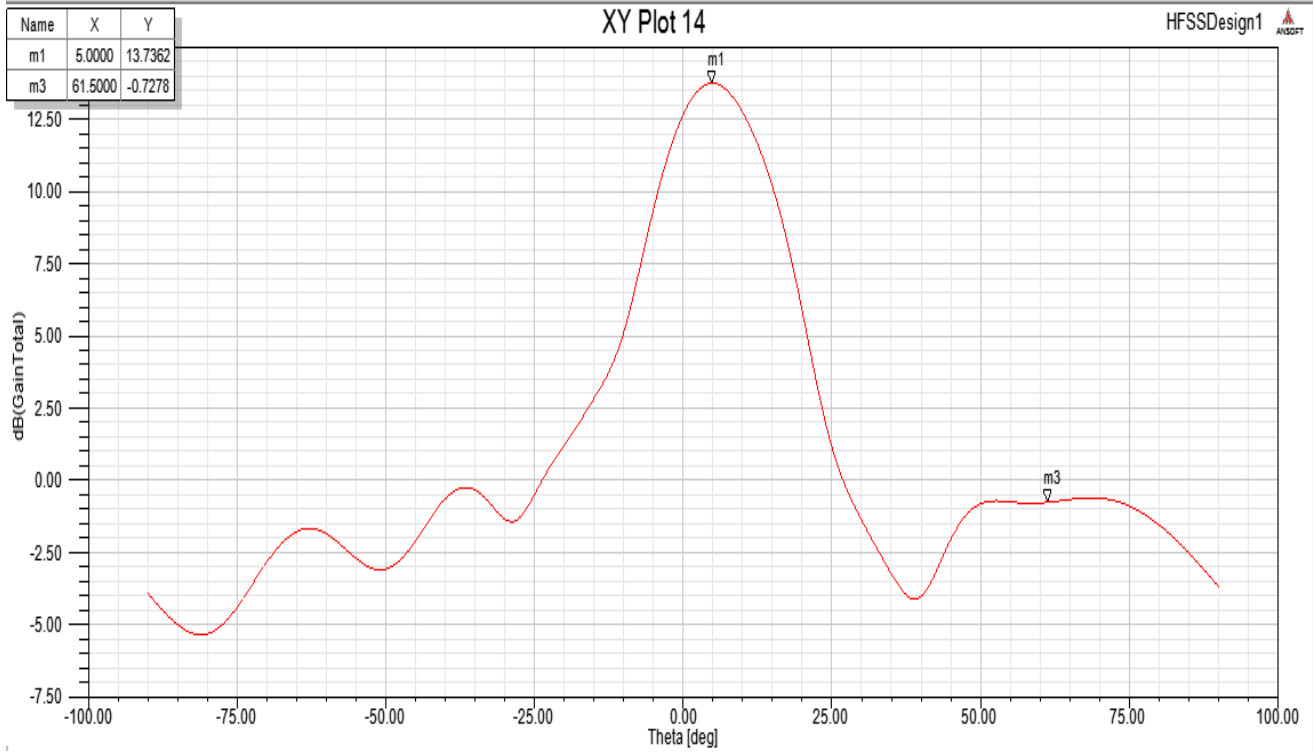
الشكل 32: التصميم المقترح لطبقتي FSS ومصفوفة الهوائيات الخطية



الشكل 33: مصفوفة FSS



الشكل 34: المخطط الإشعاعي للتصميم المحسن



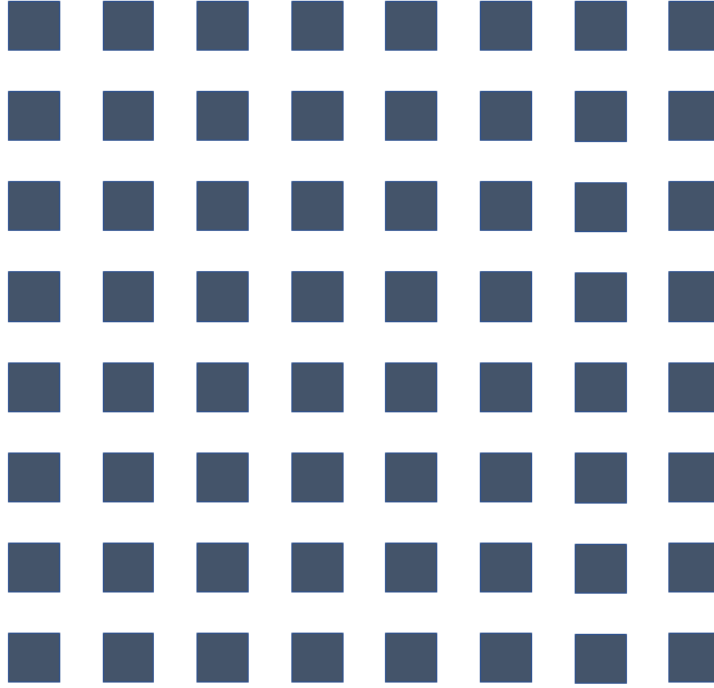
الشكل 35: مخطط الربح للتصميم المحسن

نلاحظ من الأشكال السابقة الحصول على تخميد حزم جانبية مساري ل -14.5dB بتحسين يقارب 2.2dB عن التصميم السابق باستخدام خوارزمية SSR فقط مما يبرز فعالية استخدام مصفوفات FSS كما حصلنا على عرض مجال ترددي 240MHz كما نلاحظ وجود وحدات FSS نافذة في وسط التصميم، لنبين آلية عمل FSS وأهميتها الكبيرة في تخميد الحزم الجانبية.

5.4 - محاكاة مصفوفة هوائيات مستوية مغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف

يهدف استخدام مصفوفة الهوائيات المستوية إلى الحصول على حزمة اشعاعية ضيقة قلمية الشكل تتجه نحو المستخدم لكي تكون مثالية للاستخدام في الجيل الخامس للاتصالات اللاسلكية، مع الحرص على أن تكون الحزم الجانبية مخمدة بشكل كافٍ، وذلك منعاً للتداخل الغير مرغوب.

يتكون التصميم المقترح من مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 تتألف من 64 عنصر مغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف، كما هو مبين في الشكل 36. علماً أننا لم نستطع تطبيق خوارزمية SSR وتقنية FSS على المصفوفة المستوية نظراً للإمكانات الحاسوبية المحدودة.



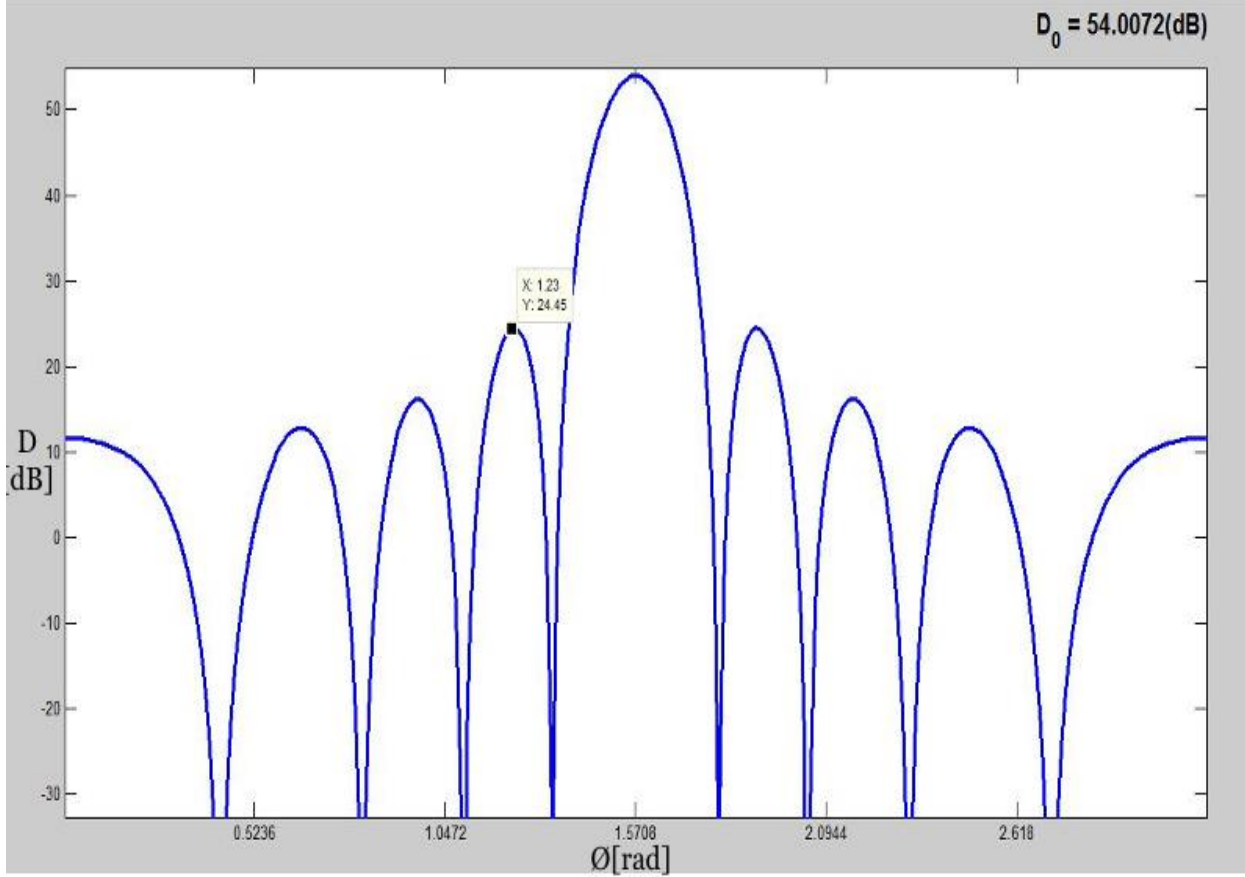
الشكل 36: التصميم المقترح المكون من مصفوفة هوائيات مستوية 8x8

1.5.4- نتائج المحاكاة

غُذيت جميع عناصر المصفوفة بدايةً بذات القيم، حيث يبين الشكل 37 مخطط الربح مقدراً بالديسبل بدلالة الزاوية مقدرة بالراديان، ينتج هذا المخطط عن تغذية عناصر المصفوفة المستوية بشكل متساوي.

تبلغ قيمة الربح عند استخدام التغذية المتساوية لجميع عناصر المصفوفة 54.0072dB، بينما يبلغ تخميد الحزم الجانبية القيمة -29.56dB.

حيث تمت محاكاة التصميم السابق باستخدام برنامج الماتلاب. يتميز التصميم بالقيمة العالية للربح والحزمة الضيقة نتيجة استخدام مصفوفة الهوائيات المستوية.



الشكل 37: مخطط الاتجاهية (الربح) بدلالة الزاوية لمصفوفة هوائيات مستوية مغذاة بشكل متساوي

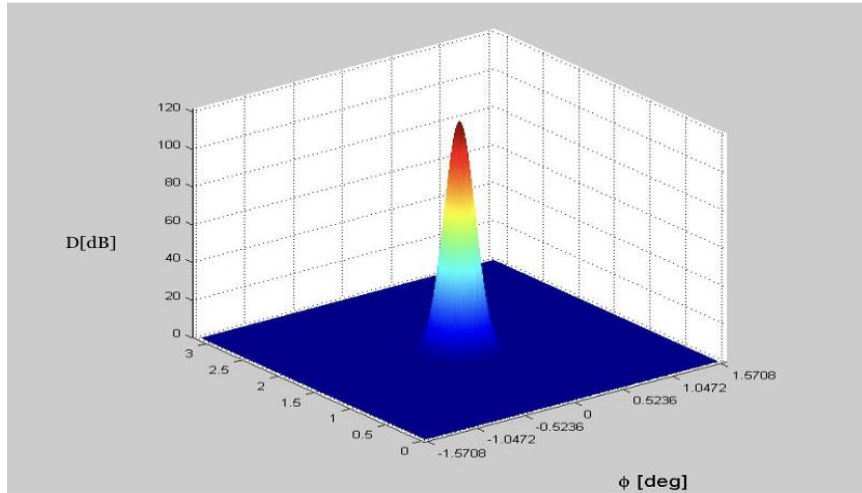
تمت تغذية عناصر المصفوفة المستوية باستخدام توزيع دولف تشيبيشيف، وذلك وفق القيم المحددة في الجدول 7 من أجل تخميد الحزم الجانبية والحصول على مخطط أشعاعي مثالي لتطبيقات الجيل الخامس للاتصالات.

اعتمد برنامج الماتلاب من أجل محاكاة التصميم المؤلف من مصفوفة هوائيات مستوية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف.

الجدول 7: قيم الأوزان لعناصر المصفوفة المستوية

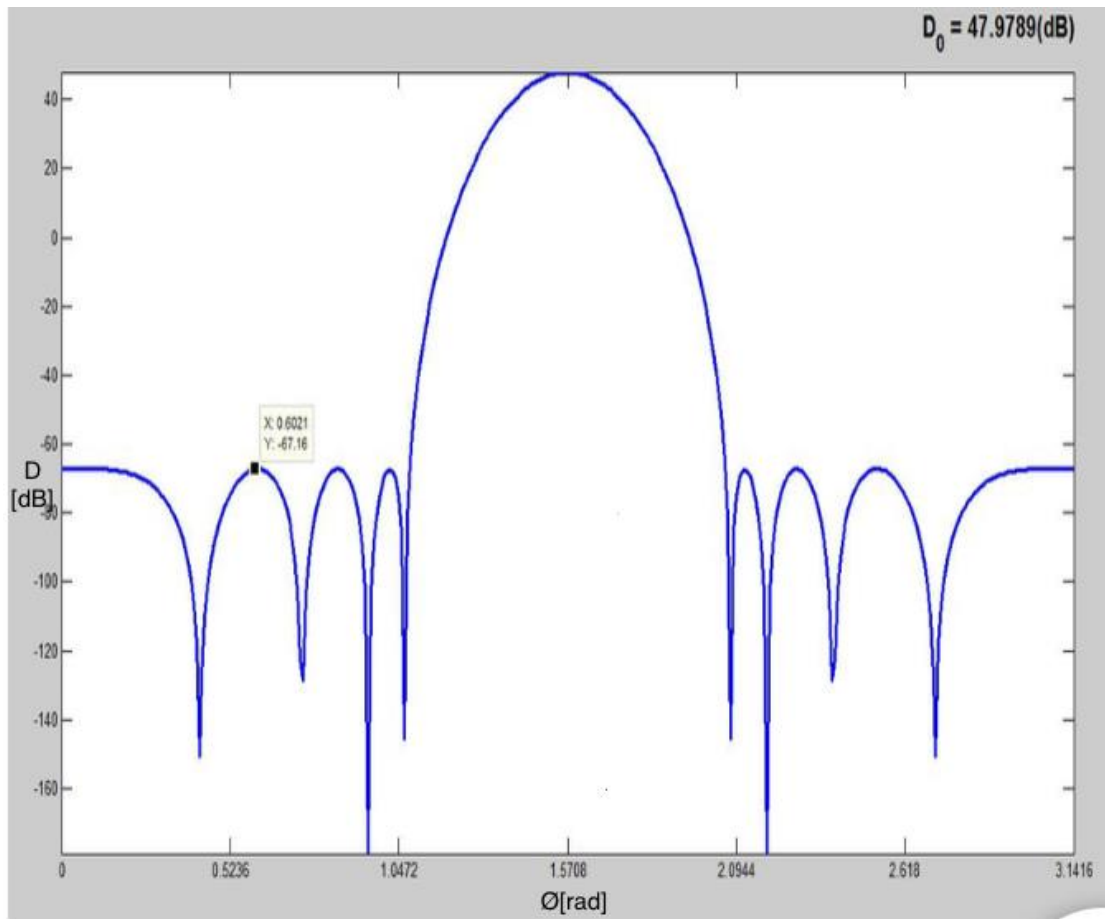
رقم العنصر	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00895	0.033	0.0679	0.0946	0.0946	0.0679	0.033	0.00895
2	0.033	0.122	0.2509	0.3494	0.3494	0.2509	0.122	0.033
3	0.0679	0.2509	0.5158	0.7182	0.7182	0.5158	0.2509	0.0679
4	0.0946	0.3494	0.7182	1	1	0.7182	0.3494	0.0946
5	0.0946	0.3494	0.7182	1	1	0.7182	0.3494	0.0946
6	0.0679	0.2509	0.5158	0.7182	0.7182	0.5158	0.2509	0.0679
7	0.033	0.122	0.2509	0.3494	0.3494	0.2509	0.122	0.033
8	0.00895	0.033	0.0679	0.0946	0.0946	0.0679	0.033	0.00895

يبين الشكل 38 المخطط الأشعاعي الناتج عن محاكاة التصميم المعتمد، حيث تظهر الحزمة الرئيسية بشكل واضح التي تتميز بشكل قلمي و عرض ضيق، كما نلاحظ عدم ظهور الحزم الجانبية في هذا المخطط نتيجة القيم المتناهية الصغر لهذه الحزم وفعالية التخميد وفق توزيع توزيع دولف تشيبيشيف.



الشكل 38: مخطط ثلاثي الأبعاد للمخطط الأشعاعي لمصفوفة الهوائيات المستوية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف.

كما يبين الشكل 39 قيمة الربح للتصميم المعتمد 48dB تقريباً بالإضافة إلى تخميد حزم جانبية عالي جداً يتجاوز -115dB.



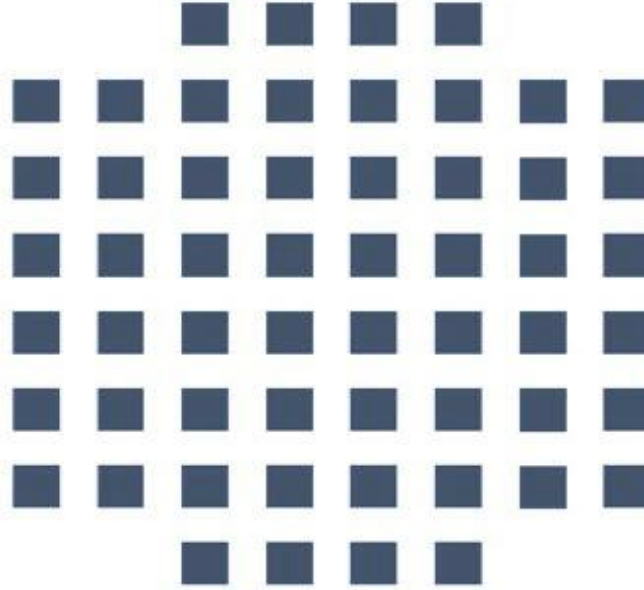
الشكل 39: مخطط الربح بدلالة الزاوية لمصفوفة الهوائيات المستوية المغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشيبيشيف.

تبين النتائج السابقة مثالية التصميم لتطبيقات الجيل الخامس، حيث حقق هذا التصميم الميزات التالية:

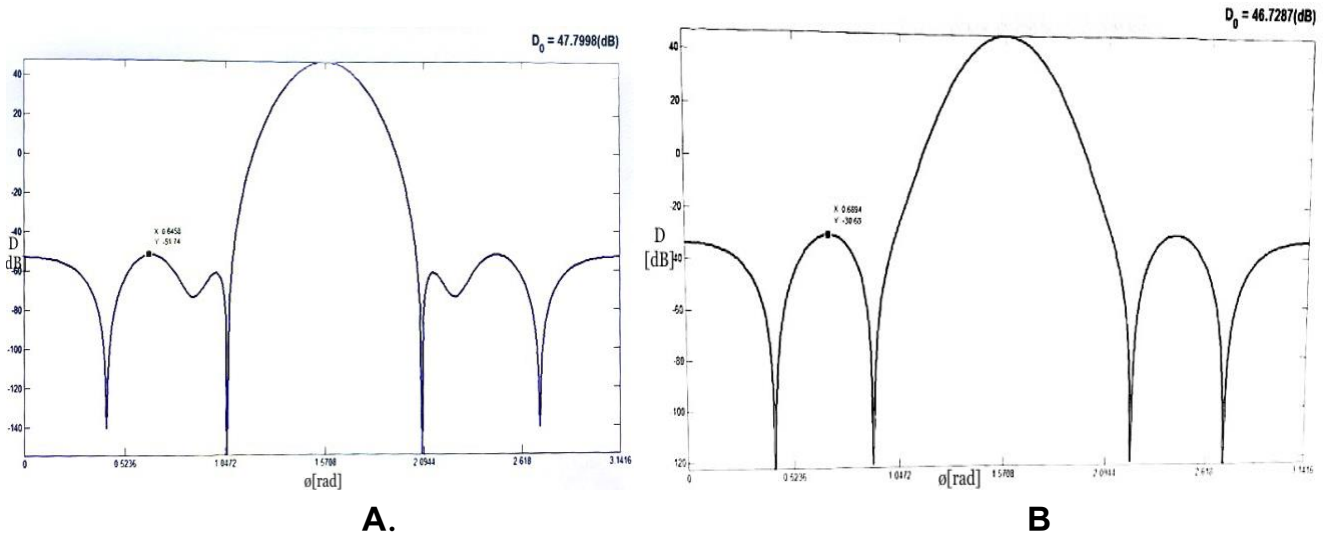
- ربح عالي جداً يصل إلى 48dB
- تخميد حزم جانبية يتجاوز -115dB
- حزمة اشعاعية رئيسية قلمية الشكل تتجه نحو المستخدم.
- فعالية استطاعة عالية
- العمل في مجال الأمواج الميليمترية
- معدل تراسل مرتفع

2.4.5- مصفوفة هوائيات مستوية مخففة العناصر

يتألف التصميم من مصفوفة هوائيات مستوية مكونة من 56 عنصر تتم تغذيتها اعتماداً على خوارزمية دolf تشيبيشيف، حيث تمت محاكاة التصميم باستخدام بيئة المحاكاة الماتلاب، حيث تمت إزالة العناصر المغذاة باستطاعة منخفضة دون التأثير على الأداء بشكل ملموس.



الشكل 40: مصفوفة هوائيات مستوية مخففة العناصر



الشكل 41: أداء المصفوفة المستوية مخففة العناصر (A المصفوفة المستوية مخففة العناصر مغذاة من خلال دولف تشيبيشيف ، B المصفوفة المستوية المغذاة من خلال نافذة هامينغ).

يبين الشكل 41 تفوق المصفوفة المستوية مخففة العناصر على المصفوفة المستوية المغذاة اعتماداً على نافذة هامينغ من حيث الاتجاهية وتخمين الحزم الجانبية.

5- الخاتمة

قدّمنا في هذا العمل عدة تصاميم مغذاة اعتماداً على أفضل طرق تخمين الحزم الجانبية، قمنا في البداية بتصميم مصفوفة هوائيات خطية مغذاة اعتماداً على توزيع تشيبيشيف، حيث أظهرت نتائج محاكاة هذا التصميم الأداء الجيد له في تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات حيث يمتاز بربح مرتفع 14.2542dB مقارنةً بالربح الذي يحققه الهوائي الشرائحي الوحيد 7dB كما يمتاز بتخمين مستوى حزم جانبية يصل إلى

-11.4393dB ، فيما قمنا بتصميم وتنفيذ تصميم آخر يعتمد على طريقة أفضل لتخمين الحزم الجانبية حيث اعتمد في تغذية عناصر المصفوفة الخطية على قيم الأوزان المأخوذة من خوارزمية SSR التي تمتاز بتخمين حزم جانبية عالٍ إضافة إلى إمكانية تخمين حزم جانبية محددة فقط من خلالها، وهذا ما أكدته نتائج محاكاة التصميم حيث حقق ربحاً بمقدار 14.4722dB إضافة إلى تخمين حزم جانبية بمقدار -12.53dB حيث حقق هذا التصميم ربحاً أعلى من دولف تشيبيشيف بـ 0.218dB وأعلى مقارنةً بالهوائي الشرائحي الوحيد بـ 7.218dB ، كما تفوقت بتخمين الحزم الجانبية عن توزيع دولف

تشبيشيف ب 1.1dB كما تميزت الخوارزمية بتخميد متوسط الحزم الجانبية بشكل أكبر بكثير من متوسط الحزم الجانبية الناتجة عن دولف تشبيشيف، كما تم تحسين أداء التصميم السابق من خلال استخدام أسطح FSS العاكسة حيث تم الحصول من خلالها إلى حزم جانبية مخمّدة بمقدار -14.5dB. يتم في الجيل الخامس للاتصالات توجيه حزمة اشعاعية رئيسية ضيقة تتجه نحو المستخدم. لذلك، قمنا بتصميم مصفوفة هوائيات مستوية 8x8 مكونة من 64 عنصر مغذاة اعتماداً على توزيع دولف تشبيشيف حيث قمنا باعتماد هذا التصميم كأفضل تصميم مناسب للعمل في تطبيقات الجيل الخامس للاتصالات نظراً للميزات التالية التي يمتلكها هذا التصميم:

كالريخ العالي المقدر ب 48dB، وتخميد حزم جانبية الذي يتجاوز -115dB، إضافة إلى الشكل القلبي للحزمة الرئيسية الأشعاعية التي تتجه نحو المستخدم، والتردد المرتفع الذي تعمل عنده، والذي يقع ضمن مجال الأمواج الميليمترية حيث يعتبر هذا التصميم فعال للغاية من حيث الاستطاعة إضافة إلى تحقيقه كافة المتطلبات لتطبيقات الجيل الخامس وبشكل ممتاز للغاية.

6- الآفاق المستقبلية

يمكن تحسين التصميم المعتمد في هذا العمل، وذلك باستخدام تقنيتي الأسطح انتقائية التردد وخوارزمية SSR في المصفوفة المستوية.

المراجع

- [1] Albagory, Y.; Alraddady, F. An Efficient Approach for Sidelobe Level Reduction Based on Recursive Sequential Damping. *Symmetry* 2021, 13, 480.
- [2] T. S. Rappaport, et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, 2013, pp. 335-349.
- [3] Albagory, Y. An Efficient Fast and Convergence-Controlled Algorithm for Sidelobes Simultaneous Reduction (SSR) and Spatial Filtering. *Electronics* 2021, 10, 1071.
- [4] H. Yagi, S. Uda, "Projector of the Sharpest Beam of Electric Waves," *Proc. Imp. Acad. (Tokyo)* Vol 2, p 49 (1926).
- [5] M. I. Skolnik, "Survey of Phased Array Accomplishments and Requirements for Navy Ships," in *Phased Array Antennas*. Edited by A. A. Oliner and G. H. Knittel, Artech House, Inc., pp. 15-20
- [6] C. Balanis, *Antenna Theory and Design*, Third Edition, New York, Wiley, 2005.
- [7] S. Yamaguchi, H. Nakamizo, S. Shinjo, K. Tsutsumi, T. Fukasawa and H. Miyashita, "Development of active phased array antenna for high SHF wideband massive MIMO in 5G," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017.
- [8] T. Kumamoto, H. Kayano, N. Shiokawa, K. Nakayama, T. Kawaguchi and M. Shinonaga, "High-sensitivity receiving sub-array module with HTS filters for an active phased array antenna," 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, 2013.
- [9] Saghlatoon, Hossein & Honari, Mohammad Mahdi & Aslanzadeh, Samira & Mirzavand, Rashid. "Electrically-Small Luneburg Lens for Antenna Gain Enhancement Using New 3D Printing Filling Technique" *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2020.
- [10] Hussain, Niamat & Jeong, Minjoo & Park, Jiwoong & Kim, Nam. (2019). A Broadband Circularly Polarized Fabry-Perot Resonant Antenna Using A Single-Layered PRS for 5G MIMO Applications. *IEEE Access*. 7. 42897-42907. 10.1109/ACCESS.2019.

- [11] A. Goudarzi, M. Movahhedi, M. M. Honari, H. Saghlatoon, R. Mirzavand and P. Mousavi, "Communication Wideband High-Gain Circularly-Polarized Resonant Cavity Antenna with a Thin Complementary Partially Reflective Surface," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020.
- [12] B. Liu et al., "A Linearly Polarized Slot Array Antenna With Substrate Integrated Coaxial Line Technique," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 2, pp. 339-342, Feb. 2018.
- [13] X. Jiang, Z. Zhang, Z. Tian, Y. Li and Z. Feng, "A Low-Cost Dual-Polarized Array Antenna Etched on a Single Substrate," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 265-268, 2013.
- [14] B. Yu, K. Yang, C. Sim and G. Yang, "A Novel 28 GHz Beam Steering Array for 5G Mobile Device With Metallic Casing Application," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 1, pp. 462-466, Jan. 2018.
- [15] Q. Wang, W. M. Zou, M. P. Jin, X. L. Zhang and L. Chen, "A Low-Cost Thin Active Phased Array for 5G Applications," 2019 12th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), London, United Kingdom, 2019.
- [16] C. Mao, M. Khalily, P. Xiao, T. W. C. Brown and S. Gao, "Planar Sub-Millimeter-Wave Array Antenna With Enhanced Gain and Reduced Sidelobes for 5G Broadcast Applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 1, pp. 160-168, Jan. 2019.
- [17] Zhang, Yunyang et al. "Low grating Lobe Array Antenna With Electrically Large Property Based on TM₅₀ mode ." IEEE Access 7, 2019.
- [18]. Final Acts WRC-15 in World Radiocommunication Conference, document 190-15, Geneva, Switzerland, Apr. 2016.
- [19]. M. M. Honari, R. Mirzavand, J. Melzer and P. Mousavi, "A New Aperture Antenna Using Substrate Integrated Waveguide Corrugated Structures for 5G Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 254-257, 2017.

[20]. Peize, Zhang. (2019). Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems, 2019

[21]. F. Sohrabi, W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, 2016.

[22]. S. Bildik, S. Dieter, C. Fritzsich, W. Menzel and R. Jakoby, "Reconfigurable Folded Reflectarray Antenna Based Upon Liquid Crystal Technology," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2015.

[23]. S. E. Hosseini, N. Komjani, H. Oraizi, and M. T. Noghani, "Optimum design of SIW longitudinal slot array antennas with specified radiation patterns," *ACESJ.*, vol. 27, no. 4, pp. 320–325, Apr. 2012.

[24]. M. Ikram, N. Nguyen-Trong and A. M. Abbosh, "Realization of a Tapered Slot Array as Both Decoupling and Radiating Structure for 4G/5G Wireless Devices," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 159112-159118, 2019.

[25]. F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, February 2014.

[26]. F. Demmerle and W. Wiesbeck, "A biconical multibeam antenna for space-division multiple access," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 6, pp. 782-787, June 1998.

- [27]. J. Brady, N. Behdad, and A. M. Sayeed, "Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: System architecture, modeling, analysis, and measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3814–3827, Jul. 2013
- [28]. C.L. Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and side-lobe level," *IRE*, Vol. 34, 1946.
- [29] A. Safaai-Jazi, "A new method for the analysis and design of Chebyshev arrays," *Proceedings of 26th Southeastern Symposium on System Theory*, Athens, OH, USA, 1994.
- [30] Abdennaceur Baghdad, Abdelmajid Badri, Aicha Sahel, Hayat Errifi "Design and Simulation of Microstrip Patch Array Antenna with High Directivity for 10 GHz Applications" *Mohammedia*, Morocco, NOV, 2014.
- [31] M. Sousa, P. Vieira, M. P. Queluz and A. Rodrigues, "A Survey on the 5th Generation of Mobile Communications", *ISEL Academic Journal of Electronics Telecommunications and Computers*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [32] L. García, J. Jiménez, M. taha, J. Lloret, "Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network", *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 2, no. 8, pp. .2013 ,47-53
- [33] P. Paudel, "Wireless Technologies for IoT in Smart Cities", *Network Protocols and Algorithms* , 2018, Vol. 10, No. 1
- [34] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/frequency-bands-channels-fr1-fr2.php>
- [35] Munk, B.A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*; Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA, 2000; Volume 29
- [36] <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100113>