Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, July-December 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2026

RESEARCH ARTICLE **COMMUNICATIONS ENGINEERING**

Linear Detection in 28 GHz Massive MIMO Uplink Systems

Ahmed J. Saeid[1,*], Rasim A. Ali[1]

[1]Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 03 June 2026
Revised 21 July 2026
Accepted 01 August 2026
Online 05 August 2026

KEYWORDS
Massive MIMO;
MMSE;
Zero Forcing(zf);
Channel Estimation Error;
28 GHz mm Wave;
5G Networks.

ABSTRACT

Massive Multiple-Input Multiple-Output (Massive MIMO) systems represent a cornerstone for meeting the high-performance demands of 5G and beyond networks. This paper presents a comprehensive simulation framework that effectively couples electromagnetic physical characteristics with signal processing algorithms in the uplink transmission. A 16x16 planar antenna array comprising 256 elements was designed to operate at the 28 GHz millimeter-wave band, achieving a high array gain of 32.27 dB alongside precise beamforming capabilities. To evaluate system performance under realistic operating conditions, the spectral efficiency and Bit Error Rate (BER) of three prominent linear detectors—Maximum Ratio Combining (MRC), Zero Forcing (ZF), and Minimum Mean Square Error (MMSE)—were analyzed in the presence of noise and imperfect Channel State Information (CSI). MATLAB numerical simulations demonstrate that the MMSE detector provides the optimal trade-off between performance and computational complexity, achieving a BER of 10^ {-4} at an SNR of 15{dB}. Conversely, the ZF detector exhibited severe performance degradation due to noise enhancement under channel estimation error conditions (sigma_e^2 = 0.01). These findings offer practical insights for selecting scalable detector architectures in future wireless networks.

كشف الإشارات الخطية في الوصلة الصاعدة لأنظمة Massive MIMO بتردد 28 GHz

احمد سعيد[1،*]، راسم علي[1]

الكلمات المفتاحية
MIMO ضخمة
أجهزة الكشف الخطية
MMSE
التأثير الصفري (ZF)
خطأ في تقدير القناة
28 جيجا هرتز
شبكات الجيل الخامس

الملخص

تُعد أنظمة الهوائيات المتعددة الضخمة (Massive MIMO) ركيزة أساسية لتلبية المتطلبات المتزايدة لشبكات الاتصالات من الجيل الخامس وما بعدها حيث يقدم هذا البحث نموذج محاكاة شاملاً يربط بفعالية بين الخصائص الكهرومغناطيسية للمكونات الفيزيائية وخوارزميات معالجة الإشارة في الوصلة الصاعدة .(Uplink) تم تصميم مصفوفة هوائيات مستوية تتألف من 256عنصراً بترتيب 16x16تعمل عند التردد الملي متري 28GHzحيث حققت كسباً كهرومغناطيسي مرتفعاً قدره 32.27dB مع قدرة عالية على توجيه الحزم بدقة .ولتقييم الأداء في بيئة تشغيلية واقعية، تم تقييم الكفاءة الطيفية ومعدل خطأ البت (BER) لثلاثة من أبرز الكواشف الخطية كاشف الدمج الأقصى(MRC) ، وكاشف التصفير(ZF) ، وكاشف الحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ(MMSE) ، وذلك تحت تأثير الضوضاء وأخطاء تقدير معلومات حالة القناة، (Imperfect CSI) أظهرت النتائج العددية عبر محاكاة MATLAB تفوق كاشف MMSE في تحقيق الأداء الأفضل والتوازن الأمثل مع التعقيد الحسابي؛ حيث سجل انخفاضاً في معدل خطأ البت وصل إلى 10^{-4}عند نسبة إشارة إلى ضوضاء (SNR) قدرها 15 dB، مقارنة بكاشف ZF الذي شهد تدهوراً ملحوظاً جراء تضخيم الضوضاء عند تباين خطأ القناة$\sigma_e^2 = 0.01$ توفر هذه النتائج رؤى قيمة لتصميم معالجات الإشارة واختيار الحلول المثلى للشبكات اللاسلكية المستقبلية.

المقدمة

شهدت أنظمة الاتصالات اللاسلكية خلال الآونة الأخيرة قفزات نوعية وتطوراً مستسقياً وملحوظاً، مدفوعاً بالطلب العالمي المتنامي على تحقيق معدلات تدفق بيانات فائقة السرعة، وتعزيز كفاءة استغلال النطاق الطيفي، فضلاً عن خفض زمن التأخير إلى أدنى مستوياته، لا سيما مع التوجه الاستراتيجي المتزايد نحو صياغة معايير شبكات ما بعد الجيل الخامس وصولاً إلى آفاق الجيل السادس [1]. وفي خضم هذا التحول التكنولوجي العريض، برزت تقنية الهوائيات متعددة الإدخال والإخراج واسعة النطاق (Massive MIMO)كإحدى الركائز السيادية والحلول الجوهرية لتمكين هذه الأنظمة الحديثة [2]، والارتقاء بأدائها الرقمي والفراغي [3]. وتتمحور الفكرة التشغيلية لهذه التقنية حول دمج وتوظيف مصفوفات هوائيات ضخمة جداً في المحطات القاعدية، بما يتيح خدمة حشد موازٍ من المستخدمين في آن

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_22
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

واحد وضمن نفس المورد الزمني والترددي المشترك، وهو ما يسهم طردياً في تحسين كفاءة الإشعاع وتقليل الطاقة المفقودة. [4]، وتعظيم الكفاءة الطيفية المحققة.[5] ، وعلى صعيد التشغيل العملي، ترتبط الكفاءة الاسترجاعية والتشغيلية لهذه الأنظمة في خط الوصلة الصاعدة(Uplink) ارتباطاً وثيقاً وجوهرياً بمدى دقة وجودة معلومات حالة القناة (CSI) المتوفرة عند الاستقبال. غير أن الأداء الواقعي الفعلي يصطدم بجملة من العوائق التقنية والتحديات القاسية في البيئات العملية؛ إذ غالباً ما تفتقر تقديرات القناة إلى المثالية نتيجة التأثر المباشر بمستويات الضوضاء الحرارية المحيطة [6]، وتفاقم ظاهرة تلوث الإشارات المرجعية Pilot) (Contaminationالناجمة عن إعادة استخدام المتتاليات [7]، بالإضافة إلى تصاعد حدة التداخل البيني المشترك بين المستخدمين، وتضافر هذه العوامل مجتمعة لتخلق بيئة تشغيلية مشوبة بعدم اليقين، مما يلقي بظلاله سلبياً على جودة استرجاع البيانات المحمولة،.[8] ، وهنا يأتي الدور الحيوي والمحوري لكواشف الاستقبال الخطية المتمثلة في خوارزميات الدمج بنسبة الحد الأقصى [9] ، وإلغاء التداخل بالفرض الصفري [10] ، والحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ(MMSE) ، حيث تمثل هذه الكواشف الأداة الارتكازية لمعادلة الكفة وتحقيق التوازن الأمثل بين جودة الأداء الفني من جهة والتعقيد الحسابي للمعالجة الرقمية من جهة أخرى. ومن هذا المنطلق، تتبلور الغاية الأساسية لهذا البحث في تقييم الأداء وتحليل السلوك الرقمي لأنظمة Massive MIMO في الوصلة الصاعدة بالاعتماد على مصفوفة هوائيات مستوية متطورة ومكثفة تتألف من 256 عنصراً مشعاً تم ترتيبها بهندسة مربعة(16x16) ، ومصممة للعمل خصيصاً ضمن نطاق ترددات الموجات الملي مترية [11] ، والتي تعد الثورة القادمة في عالم الاتصالات اللاسلكية العريضة [12]. وتأسيساً على ذلك، في هذا العمل تم رصد وقياس التأثيرات الهيكلية الناتجة عن ظاهرة عدم اليقين وأخطاء تقدير القناة على محوري الأداء الأساسيين: معدل خطأ البت (BER) من جهة [13]، والإنتاجية الطيفية الإجمالية الممكن تحقيقها من جهة أخرى [14]، صولاً إلى طرح وتطوير حلول هندسية عملية تضمن استقرار المنظومة، وتعزز من موثوقيتها واستدامتها في ظل أقسى ظروف التشغيل غير المثالية.[15-24] .

تهدف الورقة الى تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات 16x16تعمل عند تردد 28 GHz مخصصة لشبكات 5 Gباستخدام برنامج.CST Studio Suite كذلك يتم تقييم أداء الكواشف الخطية (ZF, MMSE, MRC) في الوصلة الصاعدة لأنظمة Massive MIMO تحت تأثير أخطاء تقدير القناةCSI) (Imperfections.، ومن ثم مقارنة كمية نسبة خطأ البت (BER) والتعقيد الحسابي بين الكواشف المختلفة في بيئة القناة غير المثالية باستخدام MATLAB.

افتراضات القناة

نفترض وجود قناة رالي (Rayleigh Fading Channel) مع وجود خطأ في تقدير القناة يتم نمذجته كـ:

$$\widehat{H} = H + E \quad (1)$$

حيث {H}هي مصفوفة القناة الحقيقية، و {E}تمثل مصفوفة أخطاء التقدير المستقلة والموزعة طبيعياً بنواة صفرية وتباين .sigma_e^2، الجدول (1) يوضح بعض عناصر القناة الاساسية في منظومة المحاكاة

الجدول 1: عناصر القناة الاساسية في منظومة المحاكاة

(Parameter) بارامتر المحاكاة	(Setting) القيمة / الإعداد
تردد التشغيل(Center Frequency)	28 GHz
عدد هوائيات المحطة(Base Station Antennas)	$N_R = 16 \times 16 = 256$
عدد المستخدمين(Users)	$K = 200$
نموذج التعديل(Modulation scheme)	16-QAM / QPSK
نموذج القناة(Channel Model)	Uncorrelated Flat Rayleigh Fading
تباين خطأ القناة(\sigma_e^2)	0.00 (مثالي) إلى 0.05 (غير مثالي)

نمذجة النظام ومحاكاة القناة

تم استيراد البيانات الفيزيائية المستخرجة من مصفوفة الهوائيات(16X16) المصممة في برنامج CSTإلى بيئة .MATLAB، حيث تم تمثيل نظام الاتصال في الوصلة الصاعدة بمعادلة.

$$y = \sqrt{\rho} HX + n \quad (2)$$

حيث أن:

$y = \in C^{M\times 1}$هو المتجه الذي يمثل الإشارة المستقبلة عند المحطة القاعدة حيث M = 256

ρ تمثل قدرة الإرسال للمستخدمين.

$H \in C^{K\times M}$ هي مصفوفة القناة بين المستخدمين والمحطة القاعدة.

X هو متجه الإشارات المرسلة من قِبل المستخدمين.

n يمثل ضوضاء غاوس البيضاء المضافة.(AWGN)

بهدف تعزيز دقة التقييم، تم إدخال نموذج عدم مثالية معلومات حالة القناة(Imperfect CSI) ، حيث يتم التعبير عن القناة الفعلية(H) بدلالة القناة المقدرة$(\widehat{H})$ وخطأ التقدير (E) وفقاً

$$H + \sqrt{1 - \Gamma^2}\widehat{H} + \Gamma E \quad (3)$$

حيث أن:

$\widehat{H}$هي القناة المقدرة المتاحة عند المحطة القاعدة.

E تمثل مصفوفة خطأ التقدير التي تتبع توزيع غاوس المعياري.

Γ هو معامل يمثل درجة عدم اليقين في القناة حيث $\Gamma = 0$ تعني قناة مثالية، وكلما زادت القيمة زاد الخطأ في التقدير.

الكواشف الخطية وتحليل الأداء

لتحليل كفاءة استرجاع الإشارات المرسلة في الوصلة الصاعدة، يتم تطبيق ثلاثة كواشف خطية تعتمد على إيجاد مصفوفة الكشف(W) بحيث يتم تقدير الإشارة المرسلة $\hat{X} = W^H y$ وقد تم نمذجة الكواشف وفقاً الى التالي :

كاشف الدمج الأقصى (MRC) يعمل على تعظيم قوة الإشارة المطلوبة عبر مواءمة الإشارة المستقبلة مع خصائص القناة، وتُعطى مصفوفة الكشف الخاصة به بالمعادلة

$$w_{MRC} = \widehat{H} \quad (4)$$

كاشف إلغاء التداخل الصفري (ZF) يهدف إلى القضاء التام على التداخل بين المستخدمين عبر عكس تأثير مصفوفة القناة، ويُصاغ رياضياً في المعادلة التالية

$$W_{ZF} = \widehat{H}\left(\widehat{H}^H \widehat{H}\right)^{-1} \quad (5)$$

كاشف الحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ (MMSE) يسعى لتحقيق التوازن الأمثل بين قمع التداخل والحد من تضخيم الضوضاء، ويُعبر عنه بالمعادلة التالية

$$W_{MSSE} = \hat{H}\left(\hat{H}^H\hat{H} + \sigma^2 I_K\right)^{-1} \quad (6)$$

حيث تمثل σ^2 قدرة الضوضاء و I_K مصفوفة الوحدة .

يتم تقييم أداء هذه الكواشف إحصائياً من خلال المعايير التالية:

نسبة الإشارة إلى التداخل والضوضاء (SINR)، حيث تُعد هذه النسبة المعيار الأساسي لقياس جودة الإشارة لكل مستخدم (K)بعد عملية الكشف، وتُعطى بالمعادلة التالية

$$\mathrm{SINR_K} = \frac{\rho\left|W_k^h h_k\right|^2}{\rho\sum_{h=k}^{k}\left|W_k^H h_i^{\,2}\right| |+\sigma^2||W_K|\text{^}2} \quad (7)$$

حيث أن:

W_Kهو متجه الكشف الخاص بالمستخدم (K)المستخرج من مصفوفة الكشف W

h_K هو متجه القناة الفعلي للمستخدم K

المقام :يمثل مجموع قدرة التداخل من المستخدمين الآخرين بالإضافة إلى قدرة الضوضاء المرفوعة بواسطة الكاشف.

يتم حساب معدل خطأ البت (Bit Error Rate) لتقييم موثوقية النظام، وهو يمثل نسبة البت المستلمة بشكل خاطئ إلى إجمالي البت المرسلة. في محاكاة MATLAB، يتم تقديره إحصائياً عبر مقارنة الإشارة المكتشفة$(\hat{X})$ بالإشارة الأصلية(X) [5]

$$Ber = \frac{Number\ Of\ Error\ Bits}{Total\ Number\ Of\ Error\ Bits} \quad (8)$$

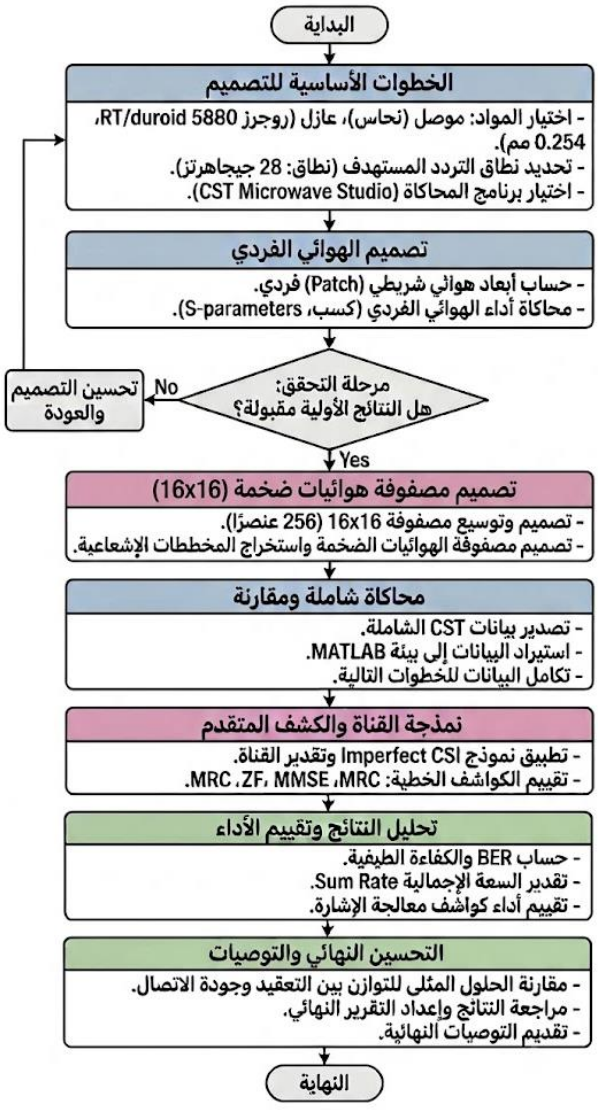
ويرتبط هذا المعدل مباشرة بقيمة الـ SINRونوع التضمين المستخدم مثل QAM، كما تمثل السعة الإجمالية التي يمكن للنظام تحقيقها، وتُقاس بوحدة (بت/ثانية/هيرتز)، [3]

$$C_{SUM} = \sum_{K=1}^{K} \log_2(1 + SINR_K) \quad (9)$$

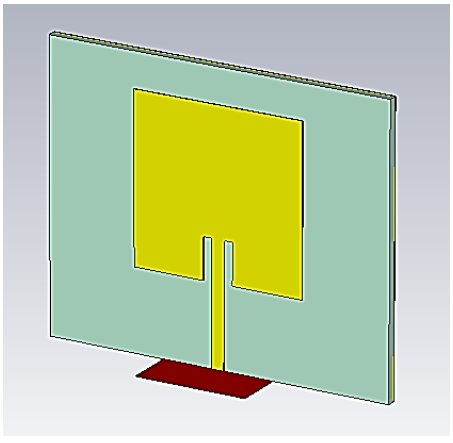
حيث تعكس قدرة المصفوفة الضخمة 16X16على خدمة K من المستخدمين في نفس المورد الترددي.

المواد وطرق العمل

ينبثق الإطار الهيكلي لهذا العمل من منهجية علمية قوامها التمازج بين المحاكاة الكهرومغناطيسية والبناء الرياضي الخوارزمي، بهدف تحليل الأداء الديناميكي لشبكات الـ Massive MIMO في اتجاه الوصلة الصاعدة. ولضمان دقة المخرجات، تم تقسيم الخطوات التنفيذية للنظام إلى عدة مراحل متسلسلة ومترابطة كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل 1: المخطط الانسيابي لمنهجية العمل

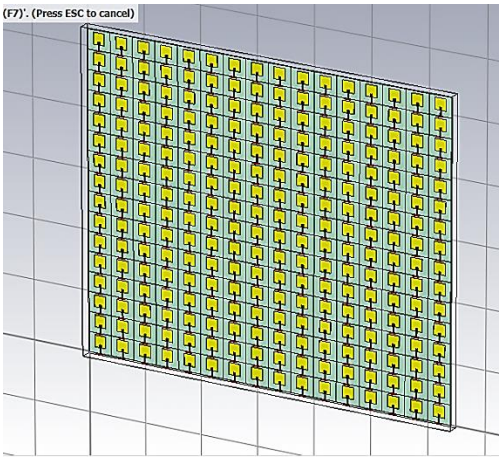


الشكل 2: الهوائي المفرد

تصميم الهوائي المنفرد والمصفوفة

الشكل (2) يوضح الهوائي المفرد وكيف انطلقت الخطوات التنفيذية للبحث من خلال صياغة التصميم الكهرومغناطيسي لهوائي (Microstrip Patch Antenna)، مع اعتماد النحاس كمادة موصلة أساسية في تشكيل بنية الرقعة والأرضية لضمان أدنى مستويات الفقد التوصيلي .بينما استُخدمت مادة (Rogers RT5880) كطبقة عازلة (Substrate) نظراً لخصائصها المتميزة في الترددات العالية وفقدانها المنخفض للطاقة إثر استكمال تصميم الهوائي الأحادي وضبط معاملاته الفيزيائية ليتوافق مع نطاق التردد 28 جيجا هرتز

الشكل (3) يوضح مصفوفة الهوائيات 256 عنصر وتم توسيع التصميم وتكبيره لبناء مصفوفة هوائيات ضخمة مكونة من 256 عنصراً (16X16) لمحاكاة بيئة الـ Massive MIMO باستخدام برنامج .CST Studio Suiteتم استخراج النتائج الجوهرية للمصفوفة، بما في ذلك معاملات التشتت-S (parameters)والمخططات الإشعاعية.



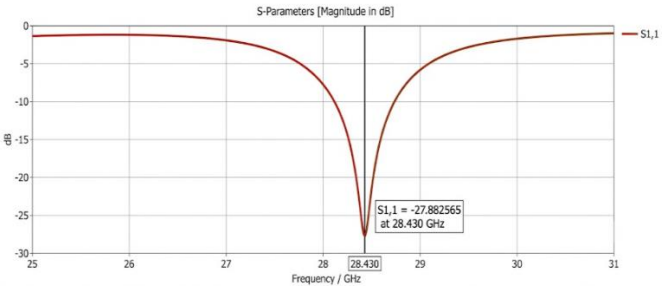
الشكل 3: مصفوفة الهوائيات 256 عنصر

النتائج والمناقشة

تأسيساً على خطوات التحقق المنهجي، خضع الهوائي الرقعة المفرد لعملية تقييم شاملة لخصائصه الإشعاعية عند التردد المستهدف 28GHz، حيث تم تحليل المؤشرات الكهرومغناطيسية للتأكد من تلبية المعايير التصميمية المطلوبة، قبل مرحلة محاكاة المصفوفة الضخمة ودراسة سلوكها

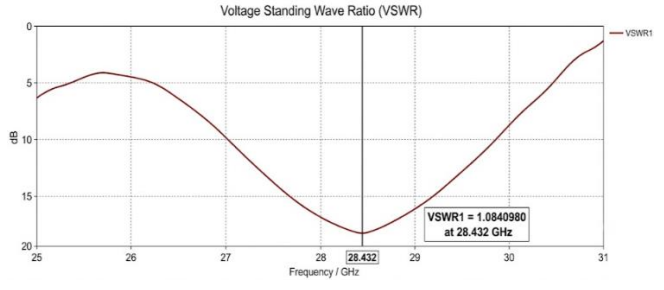
تحليل الهوائي المفرد(Single Antenna Analysis)

يوضح الشكل (4) معامل الانعكاس(S_{11}) للهوائي المصمم، ونلاحظ أن الهوائي يحقق رنيناً دقيقاً عند التردد المستهدف (28.432) جيجا هرتز بقيمة تصل الى 27.88dB، مما يشير إلى وجود مواءمة جيدة جدا للممانعة وتقليل الطاقة المنعكسة إلى المصدر.



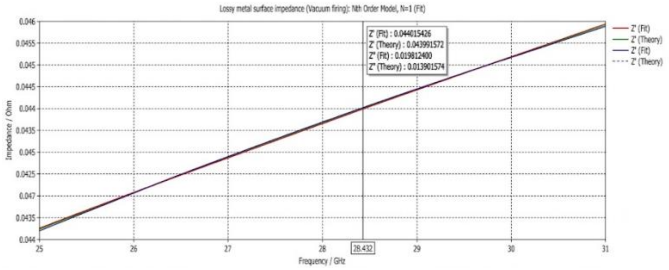
الشكل 4 معامل الانعكاسS11

ويدعم هذه النتيجة ما يظهره الشكل (5) لنسبة موجة الجهد الواقفة $VSWR$، حيث بلغت القيمة حوالي 1.084 عند تردد الرنين، وهي قيمة مثالية تقترب من الواحد الصحيح، مما يؤكد كفاءة نقل الطاقة من خط التغذية إلى رقعة الهوائي.



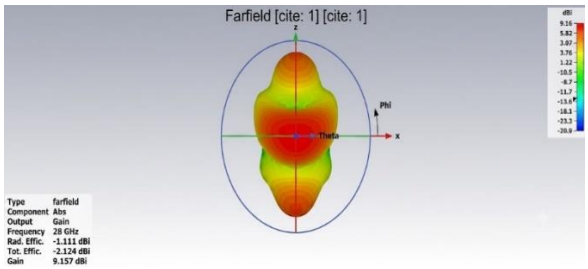
الشكل 5: نسبة موجة الجهد الواقفةVSWR

علاوة على ذلك، تم تحليل الممانعة السطحية للهوائي كما هو موضح في الشكل (6)، حيث تم ضبط خصائص النحاس والركيزة (Rogers RT5880) لتحقيق أفضل استجابة ممكنة في نطاق الموجات الملي مترية. يظهر التحليل استقراراً في ممانعة الموجة مما يقلل من الفاقد الحراري والسطحي.

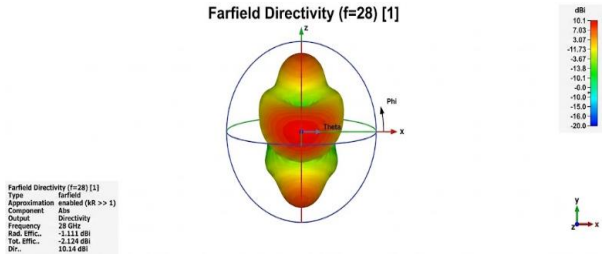


الشكل 6: الممانعة السطحية للهوائي

أما فيما يخص الخصائص الإشعاعية، فيوضح الشكل (7) والشكل (8) نمط الإشعاع ثلاثي الأبعاد (3D Radiation Pattern) للهوائي المفرد. حيث يوضح أن الهوائي يتمتع بكسب جيد جدا يصل الى 9.157dB وكسب الى9.157dB مناسب بالنسبة لحجمه، حيث يتركز الإشعاع في الفص الرئيسي بشكل يخدم متطلبات التغطية في أنظمةMassive MIMO

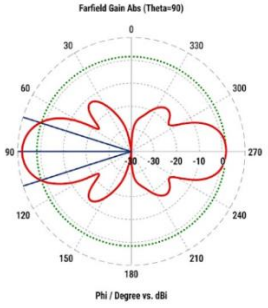


الشكل 7: الخصائص الإشعاعية للكسب

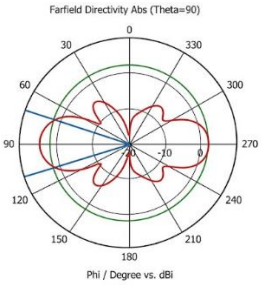


الشكل 8: الخصائص الإشعاعية للاتجاهية

كما يوضح الشكل (9) والشكل (10) مخطط الكسب والاتجاهية في المستويات القطبية، مما يؤكد أن توزيع المجال الكهربائي يتوافق مع التوقعات النظرية لتصاميم رقعة microstrip.



الشكل 9: مخطط الكسب في المستويات القطبية



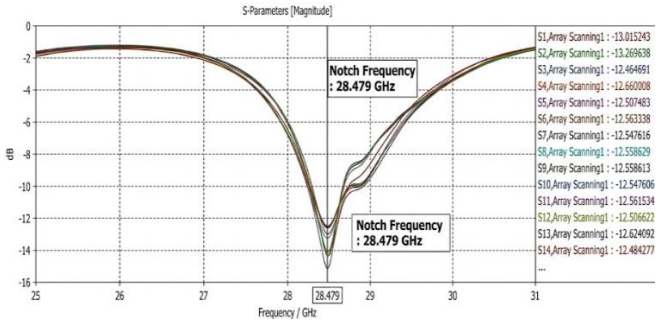
الشكل 10: مخطط الاتجاهية في المستويات القطبية

ان هذه النتائج للهوائي المفرد تعد أساساً متيناً لبناء مصفوفة الـ 256 عنصراً، حيث تضمن كفاءة كل عنصر مستقل قبل دراسة تأثيرات الاقتران المتبادل (Mutual Coupling) وتوجيه الحزم (Beamforming) في المصفوفة الضخمة.

التقييم الشامل لمصفوفة الهوائيات الضخمة

بعد التحقق من كفاءة الهوائي المفرد، تم تصميم مصفوفة هوائيات مستوية (Planar Array)تتكون من 256عنصراً بتنسيق 16X16 يهدف هذا التصميم إلى محاكاة بيئة العمل الفعلية لأنظمة الجيل الخامس التي تعتمد على تقنية الـ Massive MIMO لتعزيز الكسب وتوجيه الطاقة بدقة نحو المستخدمين.

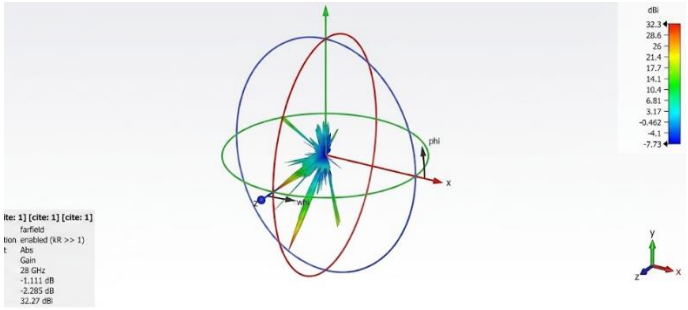
يوضح الشكل (11) مصفوفة معاملات التشتت (S-Parameters) للمصفوفة عند ترددGHz 28.، حيث يوضح استقراراً في قيم الانعكاس لجميع العناصر، مع الحفاظ على مستوى عزل مناسب بين الهوائيات المتجاورة لتقليل تأثير الاقتران المتبادل(Mutual Coupling) ، وهو أمر بالغ الأهمية لضمان دقة عمل الكواشف الخطية لاحقاً في بيئة.MATLAB



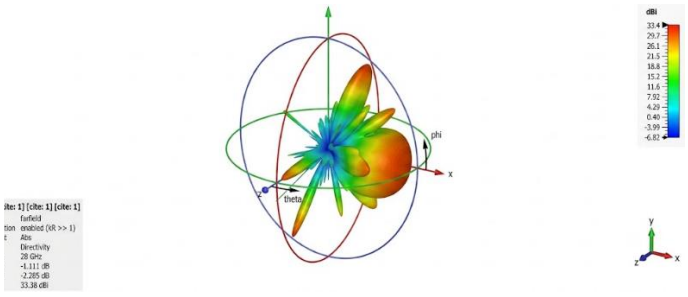
الشكل 11: مصفوفة معاملات التشتت(S-Parameters)

أما فيما يخص الخصائص الإشعاعية للمصفوفة، فيوضح الشكل (12) نمط الإشعاع ثلاثي الأبعاد والنتائج المتعلقة بالكسب .(Gain) يبين زيادة جوهرية في قيمة الكسب الكلي لتصل الىdB 32.27 للنظام مقارنة بالهوائي المفرد، حيث ساهم تجميع 256 عنصراً في تضييق عرض الفص الرئيسي (Main Lobe)وزيادة الاتجاهية بشكل كبير. بينما يبين الشكل (13) مخططات الاتجاهية في مستويات القطع، حيث تظهر القدرة العالية للمصفوفة على تركيز الطاقة الإشعاعية، مما يقلل من التداخل البيني ويحسن من نسبة الإشارة إلى التداخل والضوضاء.(SINR).

علاوة على ذلك، تم استخلاص قيم الكفاءة الإشعاعية والكفاءة الكلية للمصفوفة، إذ أبانت المخرجات عن استقرار ملحوظ وأداء عالٍ عند التردد المليمتر المُحدَّد، بمجرد التحقق من النتائج الفيزيائية لمصفوفة الهوائيات

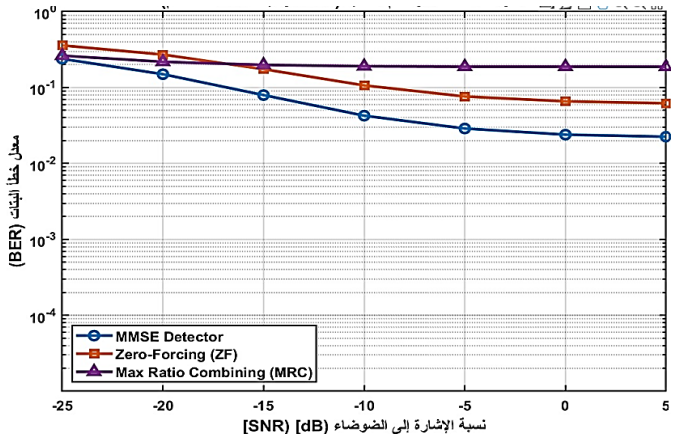


الشكل 12: نمط الإشعاع ثلاثي الأبعاد للكسب



الشكل 13: مخططات الاتجاهية في مستويات القطع

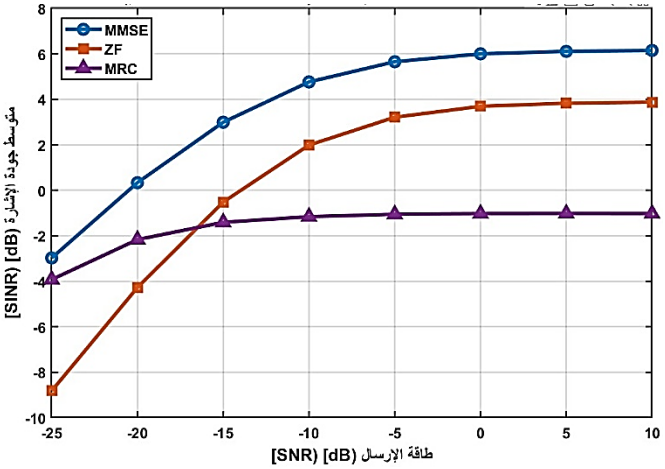
الضخمة ذات الـ 256 عنصراً واعتمادها بواسطة برنامجCST ، تم نقل مصفوفة القناة والبيانات الكهرومغناطيسية المستخلصة من معاملات التشتت إلى بيئة MATLAB تُمثّل هذه البيانات المدخلات الأساسية والواقعية لنمذجة النظام، حيث جرى تقييم أداء الكواشف الخطية في ظل ظروف عدم مثالية معلومات حالة القناة وقد استندت عملية التقييم والمقارنة بين هذه الكواشف إلى معايير أداء دقيقة شملت حساب معدل خطأ البت ونسبة الإشارة إلى التداخل والضوضاء بالإضافة إلى الكفاءة الطيفية الكلية وذلك لتحديد الكاشف الأكثر كفاءة وموثوقية في بيئات الاتصال المستقبلية، ويبين الشكل (14) مقارنة بين أداء الكواشف الخطية الثلاثة MMSE, ZF, MRCمن حيث معدل خطأ البت مقابل نسبة الإشارة إلى الضوضاء بنطاق يتراوح من 25-إلى 5ديسيبل، وذلك في سيناريو تشغيل يتسم بالازدحام الشديد (200 مستخدم مع مصفوفة بـ 256 هوائياً).



الشكل 14: BER vs SNR 256

يوضح الشكل (15) نتائج تحليل أداء الكواشف الخطية في أنظمة الهوائيات المتعددة الضخمة (Massive MIMO) المكونة من 256 عنصراً تفوقاً

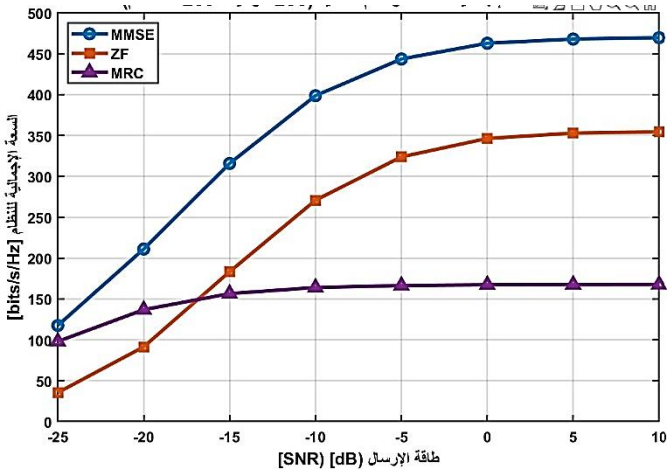
صريحاً لكاشفMMSE ، حيث نجح في تحقيق أعلى مستويات جودة الإشارة (SINR)متجاوزاً عتبة 6dB بفضل قدرته الفائقة على الموازنة الرياضية بين قمع التداخل والحد من تضخيم الضوضاء في بيئة تشغيل مزدحمة بـ 200 مستخدم. وفي المقابل، حل كاشف ZF في المرتبة الثانية بأداء استقر 4 dB رغم الضعف الشديد الذي أظهره في مناطق الطاقة المنخفضة نتيجة تأثره بظاهرة تضخم الضوضاء، بينما سجل كاشف MRC أدنى مستويات الأداء بوقوعه في حالة التشبع عند1- dB نظراً لعجزه البنيوي عن معالجة التداخل البيني الكثيف. وتؤكد هذه النتائج مجتمعة أن الاعتماد على مصفوفات الهوائيات الضخمة يتطلب حتماً توظيف كواشف متطورة مثل MMSE لضمان استقرار النظام وموثوقيته في ظل ظروف القناة الواقعية وغير المثالية.



الشكل 15: SINR vs SNR 256

تُظهر نتائج المحاكاة الموضحة في الشكل (16) المرفق تفوقاً استثنائياً لكاشف MMSEفي تحقيق أعلى مستويات السعة الإجمالية للنظام(Sum Rate) ، حيث نجح في الوصول إلى سعة تقارب 470بت/ثانية/هيرتز عند قيم طاقة الإرسال العالية. ويعزى هذا الأداء المتفوق إلى قدرة الكاشف العالية على إدارة التداخل الكثيف بين الـ 200 مستخدم بكفاءة، مما سمح للنظام باستغلال كامل عرض النطاق الترددي المتاح. وفي المقابل، حل كاشف ZF في المرتبة الثانية بسعة إجمالية بلغت حوالي 350بت/ثانية/هيرتز، حيث أظهر نمواً مضطرداً مع زيادة طاقة الإرسال رغم تأثره الملحوظ بظاهرة تضخيم الضوضاء في النطاقات المنخفضة. بينما سجل كاشف MRC أدنى مستويات الكفاءة الطيفية، حيث وقع في حالة التشبع (Saturation) عند سعة محدودة لا تتجاوز 170بت/ثانية/هيرتز، نظراً لعجزه عن فك الارتباط بين إشارات المستخدمين المتداخلة. وتؤكد هذه النتائج أن اختيار كاشف MMSEيعد ضرورة حتمية لأنظمة Massive MIMO بمصفوفة 16 x16 لتحقيق أقصى استفادة من الكفاءة الطيفية المتاحة في ظل ظروف القناة غير المثالية.

تتوافق نتائجنا العددية بشكل وثيق مع النتائج النظرية والمخبرية التي توصل إليها Björnsonوآخرون [1] حيث أظهر كاشف MMSEصلابة ومناعة أعلى ضد ظروف الضوضاء المتداخلة وأخطاء القناة، وذلك بفضل قدرته على موازنة كبت التداخل مع مستوى الضوضاء المتبقية. في المقابل، يعاني كاشف ZF من تدهور حاد وسريع في الأداء نتيجة ظاهرة تضخيم الضوضاء التي تتفاقم عند ارتفاع درجة عدم اليقين في نموذج القناة $\sigma_e^2 > 0$



الشكل 16: SumRate_256

تُعد هذه النتائج ذات أهمية مباشرة في تصميم محطات البث الذكية لشبكات الجيل الخامس (5G NR) والأنظمة المستقبلية G6، وتحديداً في المناطق الحضرية عالية الكثافة (Dense Urban Scenarios) والاتصالات المتنقلة عالية السرعة، حيث يتعذر الحصول على حالة قناة مثالية(Perfect CSI)بسبب التغير السريع لبيئة الانتشار.

قدّمت هذه الدراسة تحليلاً منهجياً لأداء الكواشف الخطية في الوصلة الصاعدة لأنظمة Massive MIMO بمصفوفة 16x16عند تردد 28 جيجا هرتز .وقد أظهرت النتائج أن كاشف MMSE يقدم أفضل توازن بين الأداء والتعقيد الحسابي في الظروف المدروسة، متفوقاً على كاشف ZF الذي يتأثر شديداً بأخطاء تقدير القناة.

الاستنتاجات والتوصيات

أظهرت نتائج هذا العمل، القائم على نمذجة رياضية ومحاكاة متقدمة تجمع بين التصميم الكهرومغناطيسي في برنامج CST والمعالجة الخوارزمية في بيئة MATLAB، أن اعتماد مصفوفة هوائيات مستوية ضخمة تتألف من 256 عنصراً مشعاً يحقق قفزة نوعية وتحسناً جوهرياً في أداء روابط الاتصال اللاسلكية عند تردد الموجات الملي مترية المستهدف 28 جيجا هرتز مقارنة بالأنظمة التقليدية ذات الهوائيات المحدودة. وقد أثبت التصميم الفيزيائي للهوائي الرقعة المفرد المصنع من ركيزة Rogers RT5880 كفاءة عالية ومواءمة ممانعة سطحية مثالية تضمن تدفق القدرة القصوى بأقل خسائر انعكاس ممكنة، حيث حقق معامل انعكاس حاداً عند 27.882dB-ونسبة موجة واقفة قياسية بلغت 1.084مما مهد الانتقال بفعالية إلى طور المصفوفة الضخمة التي أسهم هندستها المربعة المكثفة في تضييق عرض الفص الرئيسي وتركيز الطاقة الإشعاعية ليرتفع الكسب الصافي الإجمالي إلى ذروة قياسية بلغت 32.27dB ، وعلى صعيد معالجة الإشارات الرقمية في ظل بيئة مزدحمة تشهد تشغيلاً متزامناً لـ 200 مستخدم، كشف التقييم الشامل عن تباين واضح في استجابة خوارزميات الكشف الخطية تحت ظروف عدم مثالية معلومات حالة القناة .(Imperfect CSI) حيث أثبت كاشف الحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ (MMSE) تفوقه الصريح والمطلق

عبر قدرته الفائقة على كبت التداخل البيني وعزل الضوضاء محققاً أعلى كفاءة طيفية إجمالية بلغت حوالي 470bits/s/Hz مع تأمين أدنى معدلات لخطأ البت .(BER) وفي المقابل، حل كاشف التصفير (ZF) في المرتبة الثانية بكفاءة طيفية بلغت 350/bits/s/Hz لكنه عانى من تدهور حاد في مناطق الطاقة المنخفضة نتيجة تأثره البالغ بظاهرة تضخيم الضوضاء الحسابية عند حساب معكوس مصفوفة القناة، بينما سجل كاشف الدمج الأقصى (MRC)أدنى مستويات الأداء الرقمي على الإطلاق بعد أن اصطدم بسقف أداء منخفض وحالة تشبع أفقي تام بسعة لم تتجاوز 170\ bits/s/Hz نتيجة عجزه البنيوي عن إدارة التداخل الكثيف الناجم عن تراكب إشارات المستخدمين. وعليه يمكن القول

أن إدخال نموذج خطأ التقدير وعدم اليقين في القناة يفرض قيوداً صارمة على جودة الاتصال اللاسلكي، مما يؤكد الفعالية العالية للنظام المقترح القائم على التكامل المنهجي بين التصميم الفيزيائي والمعالجة الخوارزمية كحل متقدم وموثوق لتأمين واستقرار الروابط اللاسلكية في شبكات الجيل الخامس وما يليه.

التوصيات

تعزيز خوارزميات المعالجة الرقمية بالكواشف الذكية: على الرغم من الفعالية العالية لكاشف MMSE، يُوصى بتجربة واختبار كواشف استقبال متقدمة تعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي وشبكات التعلم العميق (Deep Learning)، أو تقنيات الكشف شبه الخطية مثل (Message Passing)، وذلك لرفع دقة استرجاع البيانات وتقليل التعقيد الحسابي عند معالجة المصفوفات الكبيرة جداً.

توسيع نطاق دراسة الاقتران المتبادل (Mutual Coupling): يُفضّل إجراء فحص استقصائي أعمق لتأثيرات الاقتران الكهرومغناطيسي المتبادل بين العناصر الـ 256 نظراً لتراصها الكثيف، واستكشاف آليات متطورة للحد من هذا التأثير عبر دمج هياكل المواد التحولية (Metamaterials) أو خطوط القطع المبتكرة في بنية الركيزة العازلة دون التأثير على الكسب الكلي.

تطبيق استراتيجيات الترميز الهجين (Hybrid Precoding): بالنظر إلى الكسب العالي المحقق للمصفوفة 32.27 dB يوصى بدمج معالجة الإشارات في الشقين التناظري والرقمي معاً، وذلك لتقليص عدد وحدات التحويل والترددات اللاسلكية (RF chains) المطلوبة، الأمر الذي ينعكس مباشرة على خفض التكلفة المادية الكلية واستهلاك الطاقة في المحطات القاعدية.

محاكاة النظام تحت سيناريوهات انتشار واقعية وديناميكية: من المهم تطوير نموذج المحاكاة في MATLAB ليشمل نماذج قنوات لاسلكية قياسية ثلاثية الأبعاد (مثل 3GPP SCM أو NYUSIM) وبيئات تتسم بحجب الرؤية البصرية (NLOS) وتعدد مسارات الانتشار الكثيف، للتحقق من صمود واستقرار المنظومة في ظل ظروف التشغيل الواقعية والمزدحمة.

Author Contributions: "**Ali**: Conceptualization; **Saeid** and **Ali**: methodology. writing—original draft preparation, review and editing, data collection, results' analysis and discussion. All the authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "The data is available at request"

References

[1] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti. "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency." *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 11, no. 3-4, pp. 154-655, 2017. https://doi.org/10.1561/2000000093

[2] T. Marzetta. "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas." IEEE *Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp.: 3590-3600, 2010 https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092

[3] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson. "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays." *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, 2013. https://doi.org/10.1109/MSP.2011.2178495

[4] C. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed., John Wiley & Sons, Arizona, 2016. https://www.wiley.com/en-us/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061

[5] H. Ngo, E. Larsson, and T. Marzetta. "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems." *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, 2013. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.020413.110828

[6] T. Rappaport, et al. "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813

[7] S. Hoydis, and M. Debbah. "Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 160-171, 2013. https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130205

[8] H. Yang, and T. Marzetta. "Performance of conjugate beamforming and zero-forcing transmitter in large-scale antenna systems." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 172-179, 2013. https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130206

[9] J. Zhang, E. Björnson, M. Michailidis, L. Sanguinetti, and M. Debbah. "Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 9, pp. 2137-2162, 2020. https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000818

[10] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta. "Massive MIMO for next generation wireless systems." *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, 2014. https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761

[11] L. Lu, G. Li, A. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang. "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges." *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, 2014. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2316530

[12] A. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari, and F. Capolino. "Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution?." *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 56-62, 2014. https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453

[13] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. Heath. "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems." *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 831-846, 2014. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2334278

[14] T. Bai, and R. Heath. "Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks." *IEEE Transactions on*

Wireless Communications, vol. 14, no. 2, pp. 1100-1114, 2015. https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2364267

[15] P. Nadar, et al. "Design and analysis of microstrip patch antenna array and electronic beam steering linear phased antenna array with high directivity for space applications." *ACS Omega*, vol. 8, no. 45, pp. 43197-43217, 2023. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06691

[16] I. Adam, and R. Ali. "Design and analysis of Massive MIMO patch antenna (8x8) in E band application." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 33-42, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_33

[17] Z. Abdhafith, R. Ali, and N. Abohmooed. "Impact of substrate thickness on the rectangular patch antenna for 5G communication system by CST Studio." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 79-83, 2025. https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/60/37

[18] S. Omar, and N. Abuhamoud. "Design and optimization of low power microstrip patch antennas for enhanced short-range wireless communications." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 182-191, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_24

[19] R. Swaminathan, D. Gopal, and N. Vanitha. "Performance analysis of microstrip patch antenna at 28 GHz over Rogers RT/Duroid 5880 and Neltec NY9220 substrates with different thicknesses." *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 7, no. 3, pp. 221-226, 2019. https://www.rjwave.org/ijedr/papers/IJEDR1903060.pdf

[20] O. Haraz, M. Ashraf, and S. Alshebili. "8×8 patch antenna array with polarization and space diversity for future 5G cellular applications." In *Proc. Int. Conf. IT Convergence and Security (ICITCS)*, pp. 1-4, 2015. https://doi.org/10.1109/ICITCS.2015.7292911

[21] A. Othman, W. Hassan, F. Ahmed, and R. Ali. "Impact of Dielectric Substrate Material on the Performance of Microstrip Patch Antennas (MPAs), V-Band." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 131-140, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_14

[22] J. Fal, N. AbuHamoud, and A. Abdulgader. "Study and Design Multiband MPA Antenna for Smart Phones." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 294-299, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_31

[23] R. Amer, N. Alkilani, L. Mustafa, F. Enwayes, and T. Alhadad. "Modeling and Simulation to Evaluate the Specific Absorption and Thermal Effect of Antennas Coated with Various Biomaterials." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 397-403, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_43.

[24] R. Ali, and M. Mega. "Designing A Protective Case to Reduce Electromagnetic Radiation Emitted from Mobile Phones Using CST Software." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 326-333, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_36