

مقارنة بين هيكليات التوجيه المستخدمة في هوائيات الجيل الخامس من أجل المحطات الصغيرة والكبيرة

م. عدي قاسم *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/١/٢ . قبل للنشر في ٢٠٢٣/٣/٢)

□ ملخص □

ظهرت تقنيات مقترحة عديدة من هوائيات الجيل الخامس كان الهدف منها محاولة الحصول على نظام ذو ربح هوائي عالي جداً للاستفادة بأكبر قدر ممكن من طاقة الإشارة المرسله وتحقيق نسبة إشارة إلى ضجيج SNR مرتفعة، وقد شكلت تقنية الهوائيات الكثيفة الخيار الأفضل لما تعطيه من معدل ربح هوائي كبير و سهولة في توجيه الحزمة الشعاعية القلمية بالاتجاه المطلوب، وبرزت ثلاثة معماريات مختلفة في بناء الهوائي الكثيف هي الهيكلية التماثلية والهيكلية الرقمية والهيكلية الهجينة، وتعد الهيكلية الهجينة الخيار الأفضل لما تقدمه من موازنة بين دقة الهيكلية الهجينة وسهولة توجيه الإشارة في الهيكلية التماثلية، إلا أن الهيكلية الرقمية تعد مكلفة مادياً وهذا ما أدى إلى استبعادها رغم الربح العالي للهوائي الذي تقدمه، ربما يكون استبعاد هذه التقنية خياراً صائباً في الخلايا الصغيرة Micro Cells نظراً للتكلفة العالية، إلا أن الخلايا الأكبر تتطلب موثوقية ودقة و ربح هوائي كبير جداً يمكن لأجله التضحية بالتكلفة المرتفعة للحصول على النتائج المرجوة، ندرس في بحثنا هنا أداء كل من التقنية الهجينة والرقمية في الخلايا الصغيرة Micro Cells والخلايا الكبيرة Macro Cells مع مقارنة فيما بينهما من حيث الفعالية الطيفية ونسبة الإشارة إلى الضجيج ومن ثم تحديد التقنية الأفضل لاستخدامها مع كل نوع من أنواع الخلايا المذكورة، حيث تحقق الهيكلية الرقمية أداءً أفضل عند استخدامها مع الخلايا الأكبر.

الكلمات المفتاحية: الهيكلية الهجينة، الهيكلية الرقمية، الخلايا الصغيرة، ربح الهوائي، الحزمة الشعاعية القلمية، نسبة الإشارة إلى الضجيج، الفعالية الطيفية.

* ماجستير في هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس، سوريا

A comparison between Beamforming Architectures used in 5G Antennas in Micro & Macro Cells

Eng. Odai Kassem*

(Received 2/1/2023 . Accepted 2/3/2023)

□ ABSTRACT

Many antenna schemes have being emerged for the fifth generation systems, and the goal was to to obtain a system with a very high antenna gain to take advantage of the largest possible amount of the transmitted signal energy and achieve a high SNR signal-to-noise ratio, Massive MIMO antenna technology was the best option because of it gives big antenna gain and it can be easily directing the pencil beam to the desired direction, Three different architectures emerged in the construction of Massive MIMO antenna: the analog structure, the digital structure, and the hybrid architecture. The hybrid architecture is the best option because it offers a balance between the accuracy of the hybrid structure and the ease of signal beamforming in analog architecture. However, the digital architecture is financially expensive, and this is why it's not so desirable despite of the High antenna gain that it deserves, this technology may not be a right option in micro cells due to the high cost, but larger cells require reliability, accuracy and a very high antenna gain for which the high cost can be sacrificed to obtain the desired results, In our research, we study here the performance of both hybrid and digital technology in micro cells and large cells macro cells, with a comparison between them in terms of spectral efficiency and signal-to-noise ratio, and then we determine the best technology to use with each of the mentioned cell types, as the digital structure is achieved. It brings Better performance when used with Macro cells.

Key words: Hybrid architecture, digital architecture, Micro cells, antenna gain, pencil beam, SNR, Spectral Efficiency.

* Master of Communications Technology Engineering, Faculty of Information & Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

مقدمة:

يركز مجال البحث في الانتقال بين الأجيال الخليوية على تحسين مجموعة من البارامترات والتي تشكل معالم الجيل الخليوي الجديد الذي يتميز بها عن سابقتها من الأجيال الخليوية، ومن هذه البارامترات التأخير الزمني، استهلاك الطاقة، نسبة الإشارة إلى الضجيج، تعقيد البنية، التكلفة المادية، ورياح الهوائي، ومن المعروف أنه لا يمكن الحصول على تحسين في بارامتر من البارامترات السابقة دون التضحية بالتحسين الحاصل في أحد البارامترات الأخرى [1]، وتعد مسألة تصميم الهوائي العامل الأساسي الذي يحدد ملامح الجيل الخليوي الجديد وآلية عمله، وقد تم اعتماد الهوائي الكثيف كهوائي الجيل الخامس الخلوي نظراً لسهولة توجيه الإشارة المُرسلة عبره و ربحه المرتفع [2]، يتكون الهوائي الكثيف المصفوفي من مئات عناصر الهوائيات الموجودة ضمن مجال فيزيائي محدود مما يعقد من بنية الهوائي المصفوفي، ففي حال قمنا بتوصيل كل عنصر هوائي إلى سلسلة راديوية مخصصة فإننا نحصل على هيكلية رقمية digital Beamforming وتعطي أعلا ربح ممكن للهوائي، لكن هذه البنية تعد مكلفة للغاية إلى جانب صعوبة تطبيقها على ارض الواقع بسبب محدودية المجال الفيزيائي للهوائي الكثيف [2,3]، أما في حال قمنا بتوصيل مجموعة من السلاسل الراديوية بعدد أقل من عدد عناصر الهوائيات وفق مزيجات طورية محددة فإننا نحصل على البنية الهجينة التي تتميز بسهولة في تطبيق الهوائي المصفوفي وبتكلفة اقل، ولكن هذه المعمارية تعطي ربح هوائي أقل من ربح الهوائي الرقمي، لذلك كان لابد من الاستفادة من الهوائيين ضمن شبكة الجيل الخامس بما يحقق الموثوقية والربح العالي للهوائيات المستخدمة مع الحفاظ على بساطة بنية الهوائيات والتكلفة المنخفضة في نفس الوقت، لذلك ندرس مدى جدوى استخدام كل من الهوائيات المقترحة في كل من الخلايا الصغيرة والكبيرة بما يحقق الربح العالي والتكلفة المنخفضة [4]، تظهر الدراسة أنه يمكن التضحية بالتكلفة المرتفعة للهوائي الرقمي في الخلايا الكبيرة Macro Cells من أجل الحصول على ربح عالي بينما لا يمكن تحمل مثل هذه التكلفة في حال الخلايا الصغيرة.

هدف البحث:

يهدف هذه البحث إلى بناء نظام اتصالات جيل خامس خلوي يعتمد تصميم معماريتين من الهوائيات الكثيفة المصفوفية، الأولى تعتمد المعمارية الرقمية في توجيه الحزمة الشعاعية القلمية، والثانية تعتمد المعمارية الهجينة، ومن ثم نقوم بالمقارنة بين أداء كل من الهوائيين للحصول على الهوائي الأنسب لاستخدامه مع كل نوع من أنواع المحطات الخليوية الصغيرة أو الكبيرة.

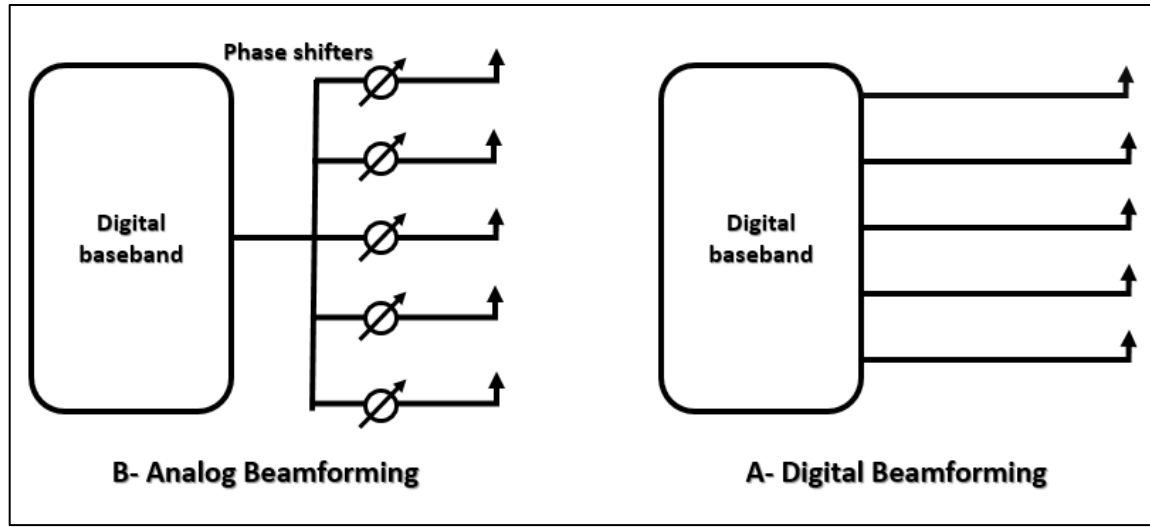
طرائق البحث ومواده:

أولاً-الدراسات المرجعية:

❖ بنية الهوائي الكثيف ذو التوجيه الرقمي Digital Beamforming:

يسمى الهوائي ذو التوجيه الرقمي بالهوائي كامل التوصيل fully connected switch لأن عدد السلاسل الراديوية يكون مساوياً لعدد عناصر الهوائيات في مصفوفة الهوائي وبالتالي يكون كامل التوجيه كلياً [5,6]، ويعتبر الهوائي الأعلى ربحاً على الإطلاق من بين الهوائيات المصفوفية و يحقق توجيهها كاملاً ومرناً للحزمة القلمية المُرسلة، ولكن من الصعب جداً تطبيق مثل هذا الهوائي على أرض الواقع لتكلفتها العالية نظراً لوجود عدد كبير من السلاسل الراديوية، ويصبح تصميمها بالغ التعقيد في حال كان الهوائي من النوع الكثيف Massive MIMO [7,8]، نظراً لمحدودية المجال الفيزيائي لأبعاد الهوائي لوجود

المئات من العناصر الهوائية التي تحتاج إلى العدد نفسه من السلاسل الراديوية، يسمح التشكيل الشعاعي الرقمي Digital Beamforming بالتحكم بمطال وطور الإشارة الصادرة عن كل مصفوفة جزئية [8].

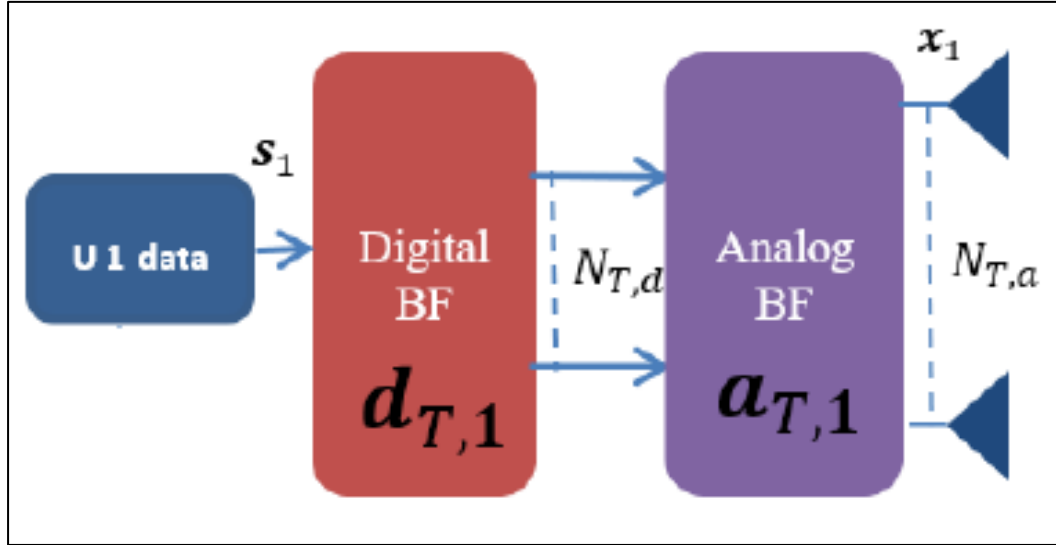


الشكل (١) طوبولوجيا التوجيه الرقمي والتماثلي.

❖ بنية الهوائي الكثيف ذو التوجيه الهجين Hybrid Beamforming:

إن التشكيل الشعاعي الهجين هو تقنية يتم من خلالها تجزئة عملية التشكيل الشعاعي بين المجالين الرقمي والتشابهي، ويقوم مصممو النظام عادة بتطبيق التشكيل الشعاعي الهجين للموازنة بين المرونة والتكلفة [9]، يتم تطوير تقنية التشكيل الشعاعي الهجين عادة بدمج مجموعة من عناصر مصفوفة الهوائيات في مصفوفات جزئية subarray، ويخصص لكل مصفوفة جزئية وحدة إرسال واستقبال مستقلة، وبهذا نحقق عدد هذه الوحدات في النظام بشكل ملحوظ، ويتم اختيار عدد العناصر وتوزع هذه العناصر ضمن المصفوفات الجزئية بشكل يضمن تحقيق النظام للمجال الذي يشمل زوايا التوجيه Steering Angels كلها [10].

لنأخذ سلسلة الإرسال كأول مثال لنا، حيث يتصل كل عنصر هوائي ضمن المصفوفة الجزئية بمزيج طور موجود ضمن القسم التماثلي من السلسلة الراديوية، فيما يتكون القسم الرقمي من عوامل وزن عقدية يتم تطبيقها على الإشارات التي تغذي المصفوفة الجزئية كلها، ويبين الشكل (٢) الهيكلية الهجينة.

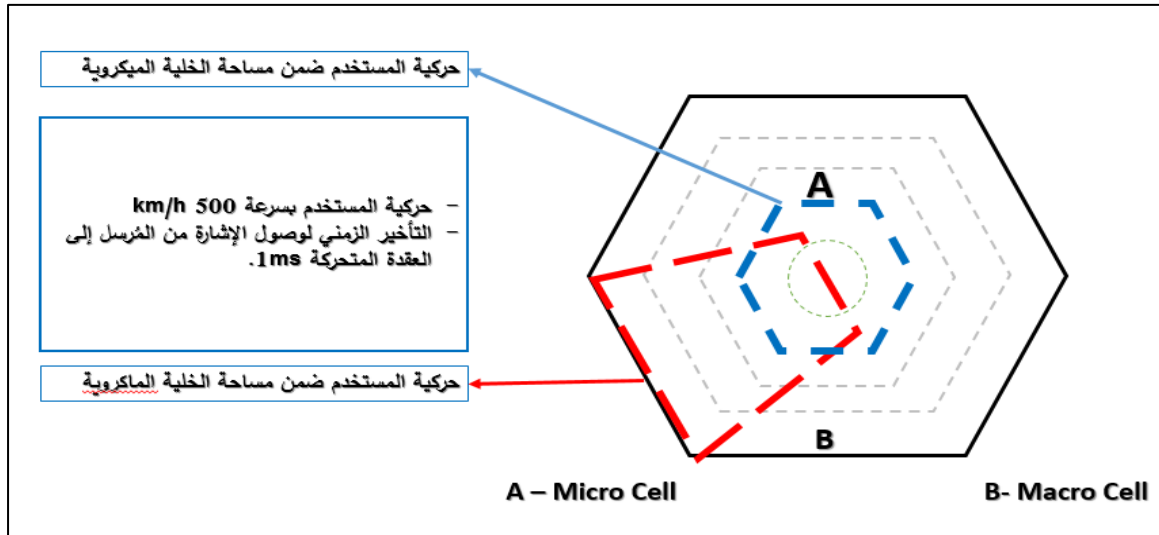


الشكل (٢) بنية الهيكلية الهجينة لهوائي كثيف

تتميز المعمارية الهجينة بأنها أقل تكلفة من المعمارية الرقمية (معمارية التوصيل الكلي) [11,12]، إلا أنها أقل دقة من البنية الرقمية وذلك لكون البنية الرقمية تحتوي على سلسلة راديوية لكل عنصر من عناصر الهوائي الكثيف [12].

ثانياً- هيكلية النظام المقترح:

نقوم في هذا النظام ببناء أربعة سيناريوهات، تعتمد على مقارنة أداء كل من الهوائي الرقمي والهجين عند العمل مع خلية كبيرة Macro Cell والعمل مع خلية ميكروية Micro Cell،



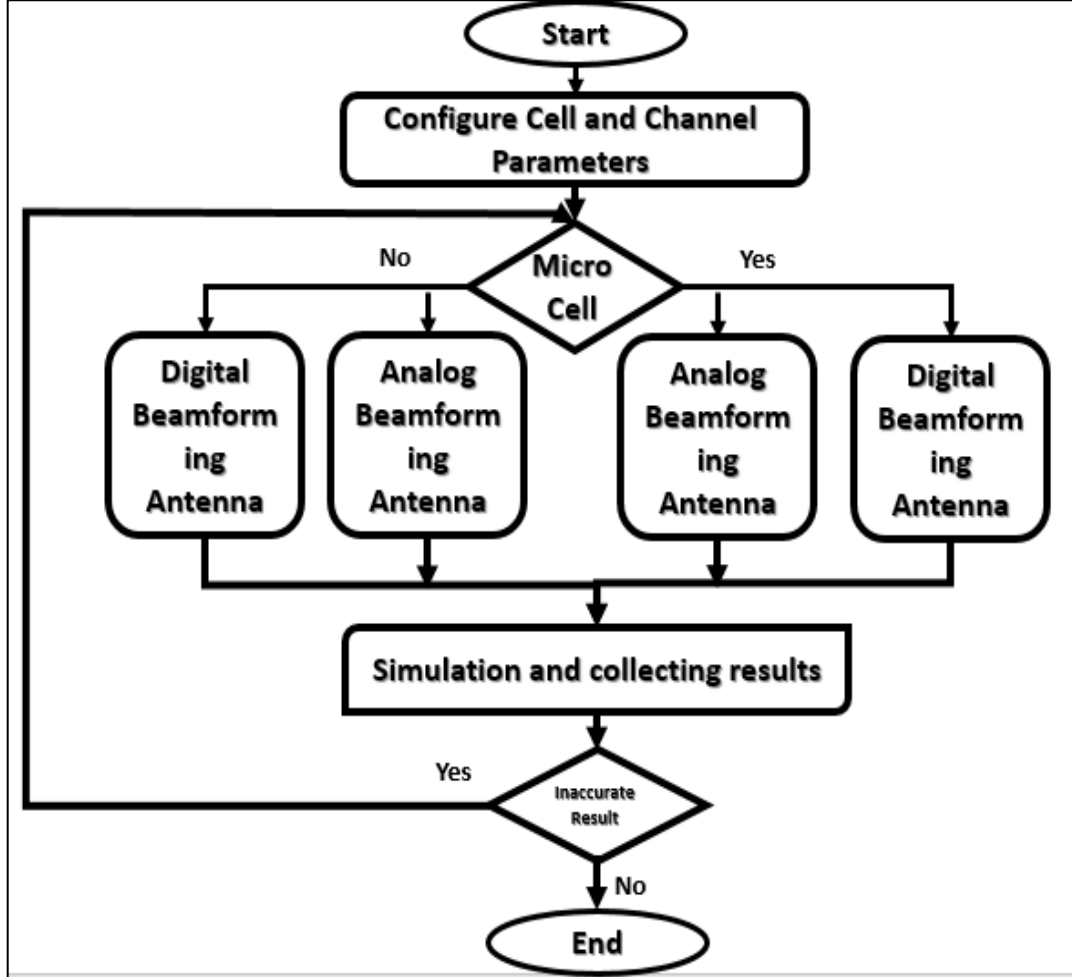
الشكل (٣) سيناريو النموذج المقترح لخليتين ماكروية وميكروية.

نقوم في البداية بنمذجة عمل الخلية الميكروية بتطبيق هوائي مصمم وفق الهيكلية الهجينة مع الأخذ بعين الاعتبار موقع العقدة الهدف عند أبعاد مختلفة من الهوائي وفق وحدة قياس بالمتر ، ثم نعيد تطبيق الهوائي نفسه لكن عند العمل وفق خلية ماكروية وأيضاً عند مسافات مختلفة من مركز الخلية (الهوائي) مع الأخذ بعين الاعتبار إجراء المحاكاة ضمن نفس القطاع من الخلية الميكروية بما يحقق ثبات الضجيج والتخامد والانعكاس ضمن القناة المتشكلة،

وفي السيناريوهين الأخيرين نعيد نفس الاختبارات بالنسبة لهوائي يعمل وفق المعمارية الرقمية (معمارية التوصيل الكلي).

ثالثاً- خوارزمية العمل المقترحة:

يبين الشكل (٥) المخطط التدفقي لخوارزمية العمل المقترحة المعدلة.

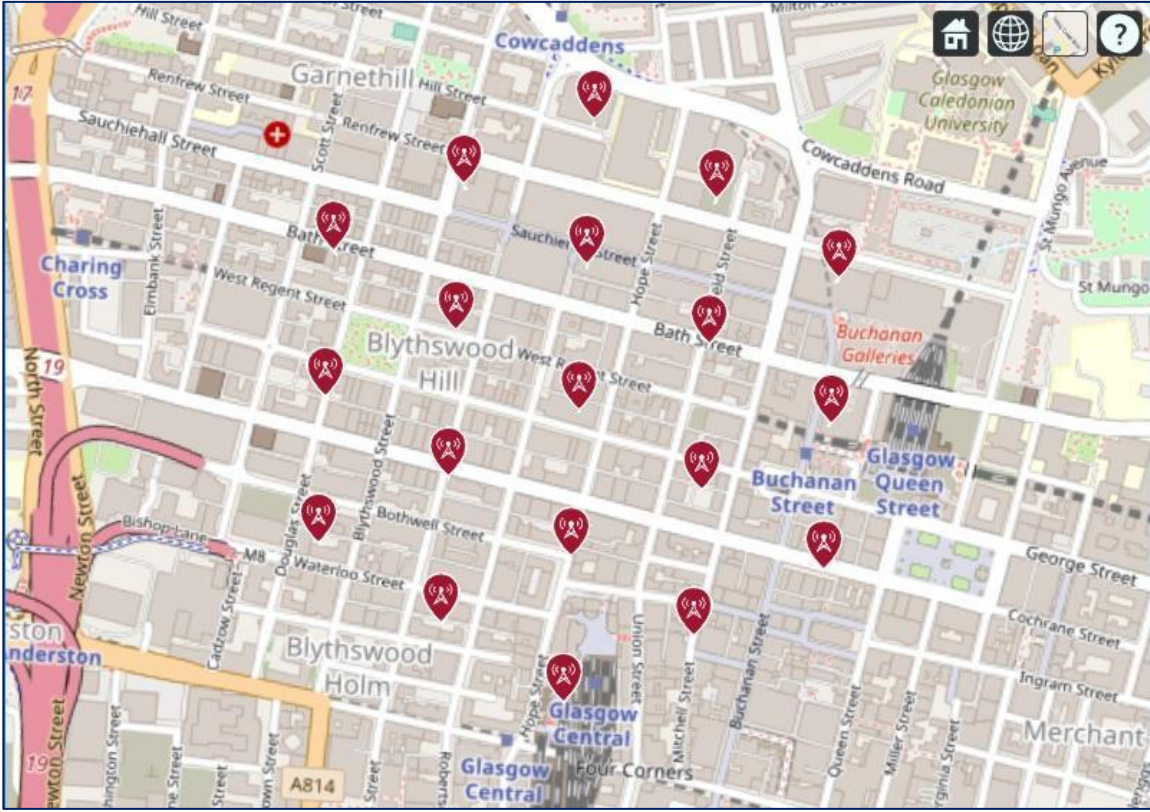


الشكل (٤) المخطط التدفقي لخوارزمية العمل المقترحة المعدلة.

نقوم بتطبيق كل سيناريو على حدى ثم إجراء المحاكاة وجمع النتائج، مع مراعاة حركية العقد وتثبيت خواص الخلية المستخدمة وفق كل سيناريو وبالتالي نحصل على أفضل مقارنة ممكنة.

رابعاً- نموذج المحاكاة:

قمنا بإجراء هذه المحاكاة على برنامج Matlab Simulink 2019a لبناء بيئة مخصصة لاختبار محطات الماكرو والميكرو الخليوية، حسب المعيار المعرف في التقرير [1,13] ITU-R M.[IMT- [2020.EVAL] الذي يستخدم لاختبار تقنيات الجيل الخامس الخليوية بهدف نمذجة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR بالإضافة إلى بقية بارامترات الطاقة للمقارنة بين أداء كل نوع من المحطات الخليوية المذكورة، نعتمد وجود كثافة مستخدمين عالية في البيئة المدروسة كما هو مبين في الشكل (٤).



الشكل (٥) النظام المقترح لاختبار المحطات الخلوية.

يمكن تمثيل القناة المكافئة لكل طرفية مستخدم k User terminal (UT) k ، h_k تعبر عن القسم الرقمي من بنية الهوائي المصفوفي [14]، ويعبر عنها بالعلاقة:

$$h_k = h_k F_{RF} \quad (1)$$

حيث F_{RF} تمثل المصفوفة في القسم التماثلي المعبرة عن عناصر الهوائيات وتُحسب بالشكل الآتي :

$$F_{RF} = [F_{RF}, 1 \dots \dots \dots, F_{RF}, k] \quad (2)$$

عند ذلك يمكن كتابة المعادلة المعبرة عن القناة الافتراضية H الممثلة لعدد k من المستخدمين UTs بالشكل الآتي:

$$\hat{H} = [\hat{h}_1^T, \dots \dots \dots, \hat{h}_k^T] \quad (3)$$

والآن نكتب المعادلة النهائية المعبرة عن موجّه رقمي W

$$W = \hat{H}^H (\hat{H} \hat{H}^H)^{-1} \quad (4)$$

ووفق تسلسل الخطوات السابقة نحصل على معادلة الموجه الهجين F^{HBF} Hybrid Beam [14,15]

:Former

$$F^{HBF} = F_{RF} W \quad (5)$$

ونستخدم نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل SINR كمعيار لقياس الكفاءة الطيفية والتي تحسب في النمطين

الهجين والرقمي بنفس العلاقة التي تعطى بالشكل الآتي:

$$\text{SINR}_k = \frac{\beta}{(HH^H)^{-1}_{k,k}} \quad (6)$$

لنحسب الآن استهلاك الطاقة لكل من النمطين الهجين والرقمي حيث يساعدنا ذلك في فهم أفضل للجدوى الاقتصادية عند المقارنة بينهما مع الأخذ بعين الاعتبار أن الشبكة الخليوية تحتاج وحدات ميكروية أكثر وخاصة في المناطق المزدحمة فيما يقتصر عمل الوحدات الماكروية كمحطات مظلة Umbrella Cells لربط المحطات الميكروية ببعضها البعض ضمن منطقة محددة أو في المناطق النائية ذات الكثافة السكانية المنخفضة [16]، نعرّف أولاً استهلاك الطاقة P_{RF} لكل سلسلة راديوية RF Chain وفق العلاقة:

$$P_{RF} = 2P_{LP} + 2P_M + P_H \quad (7)$$

حيث:

P_{LP}

-

هي الطاقة المستهلكة في مرشح التمرير المنخفض.

P_M

-

الطاقة المستهلكة في المازج.

P_H

-

هي الطاقة المبددة في قناة الاتصال وفق الزاوية ٩٠ (أي المنتشرة بشكل عمودي على اتجاه الانتشار).

وعند استخدام هوائي مصفوفي مصمم وفق الهيكلية الرقمية (التوصيل الكلي) فإن الطاقة المستهلكة

الكلية P_D تعطى بالعلاقة [17]:

$$P_D = P_{LO} + P_{PA} + N_{BS} (2P_{DAC} + P_{RF}) \quad (8)$$

حيث:

P_{LO}

-

هي الطاقة المستهلكة في الهزاز المحلي Local oscillator.

P_{PA}

-

هي الطاقة المستهلكة في مضخم الطاقة وتعطى بالعلاقة $P_{PA} = \frac{P_t}{\eta}$ حيث P_t هي طاقة الإرسال و η هي فعالية مضخم الطاقة، وتتناسب الفعالية عكساً مع التردد المستخدم في الإشارة المرسل.

N_{BS}

-

عدد عناصر الهوائيات في مصفوفة الإرسال.

P_{DAC}

-

هي الطاقة المستهلكة في المحول الرقمي التشابهي DAC.

أما الطاقة المستهلكة في حالة استخدام هوائي مصفوفي مصمم وفق الهيكلية الهجينة فتعطى

بالعلاقة [18]:

$$P_{HBF} = P_{LO} + P_{PA} + N_{RF}(2P_{DAC} + P_{RF}) + N_{BS}N_{RF}P_{PS} \quad (9)$$

حيث:

P_{PS}

-

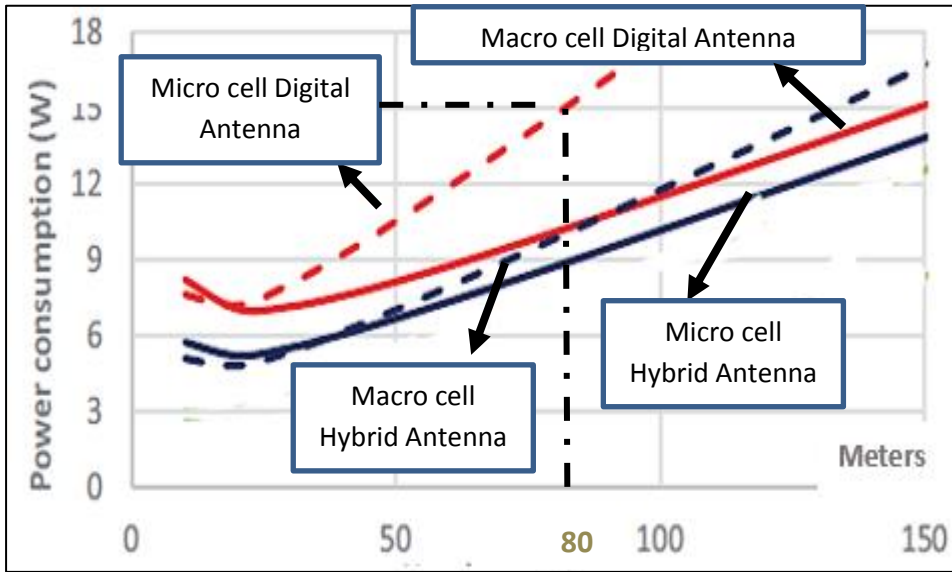
الطاقة المستهلكة في المزيج الطوري Phase Shifter وتتأثر بدقة البت للمزيج الواحد.

النتائج والمناقشة:

لقد أجرينا المحاكاة وفق نظام تم تنفيذه في بيئة عمل ضمن برنامج MATLAB 2019a لدراسة أداء عمل نمطين من الهوائيات المصفوفية وفق الخلايا الماكروية والميكروية من أجل الحصول على أفضل نمط يمكن استخدامه مع كل نوع من أنواع الخلايا المذكورة، ولاحظنا من خلال بحثنا وبعد عملية جمع النتائج الخلايا الميكروية تعطي نتائج مثالية عند استخدام هوائي مصفوفي رقمي، وكذلك الأمر بالنسبة للمصفوفة الماكروية، أما بالنسبة للهوائي الهجين فإن استخدامه مع المحطات الميكروية يعطي نتائج مقارنة للنتائج التي حصلنا عليها وفق الهوائي الرقمي، وكذلك الأمر بالنسبة للمحطات الماكروية ولكن أداءه يضعف عند المسافات الأبعد ضمن الخلية الماكروية كما هو مبين في الجدول (١).

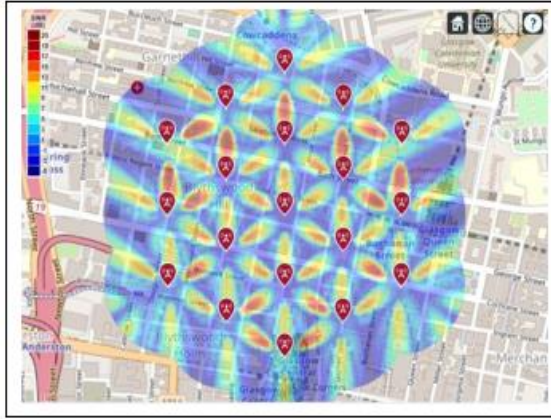
الجدول (١) نتائج المحاكاة لاختبار أداء الهوائيين المقترحين وفق نمط الخلية الماكروية والميكروية عند مسافة ٨٠ متراً من مركز المحطة الخلوية بالنسبة لاستهلاك الطاقة.

	Macro Cell with Digital Antenna	Macro Cell with Hybrid Antenna	Micro Cell with Digital Antenna	Micro Cell with Hybrid Antenna
SINR(dB)	١٥	٥	١٧	١٥
Power Consumption (W)	9.5	9.5	15	9



الشكل (٦) استهلاك الطاقة في كل محطة عند مسافات مختلفة داخل الخلية.

أما الأشكال المعبرة عن نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل فتبدو النتائج بعد إجراء عملية المحاكاة كما هو موضح في الأشكال الآتية.



b- محطة ميكروية بهوائي هجين



a- محطة ماكرو بهوائي هجين

من الشكلين السابقين نلاحظ أن الهوائي الهجين يتمتع بنسبة إشارة إلى ضجيج أفضل عند المسافات القصيرة (المحطات الميكروية) بينما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل أقل بشكل ملحوظ عند المسافات الأكبر (المحطات الماكروية) ويظهر ذلك من حيث المخطط الإشعاعي لكل هوائي من هوائيات المحطات المستخدمة في كل نمط ونلاحظ أن الوريقة الشعاعية لكل هوائي تكون أكثر وضوحاً في المحطات الميكروية لتركيز معظم الطاقة في الاتجاه المطلوب وتكون نسبة.



d- محطة ميكروية بهوائي رقمي



c- محطة ماكرو بهوائي رقمي

نلاحظ في الشكلين (c,d) أن الهوائي الرقمي يملك نسبة إشارة إلى ضجيج وتداخل أفضل من الهوائي الهجين وهو ما يعطي أفضلية للهوائي الرقمي لاستخدامه على أرض الواقع لكن الاستهلاك العالي للطاقة في الهوائي الرقمي يجعل من غير العملي لاستخدامه في المحطات الميكروية لذلك نخلص إلى نتيجة أن الهوائي الرقمي يمكن استخدامه في محطات المظلة الماكروية أما الهوائي الهجين فيمكن استخدامه في المحطات الميكروية.

الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية:

قمنا بتطبيق هيكليتين من هيكليات أنظمة الهوائيات الكثيفة المصفوفية التي تعمل بالأمواج الملي مترية في بيئة واحدة ضمن برنامج Matlab وباستخدام نوعين من المحطات الخليوية هما المحطة الميكروية والماكروية وقمنا بدراسة نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل SINR وكمية استهلاك الطاقة في كل من النوعين المذكورين، وحصلنا على نتائج تشير إلى أن الهوائي الرقمي يملك نسبة إشارة إلى ضجيج أفضل في النوعين من الخلايا لكنه أعلى استهلاكاً للطاقة بشكل أكبر من الهوائي الهجين، وبما أن المحطات الميكروية هي أكبر عدداً في طبولوجيا الشبكات الخليوية فيما تقتصر المحطات الماكروية على محطات المظلة للربط بين المحطات الميكروية والتحكم وتنظيم عمليات التسليم Hand over للمستخدمين العابرين بين الخلايا، لذلك يُفضل استخدام الهوائي الهجين في المحطات الميكروية والهوائي الرقمي في المحطات الماكروية، استهدفت الدراسة بارامترين أساسيين للمقارنة هما استهلاك الطاقة و نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل فيما يمكن لدراسات قادمة التركيز على بارامترات أخرى كمشغولية الشبكة وعدد المستخدمين والظروف الجوية للوسط اللاسلكي المحيط بالمحطات المستخدمة كما يمكن للباحثين دراسة مدى تأثير المباني الشاهقة والحواجز الطبيعية والتداخل متعدد المسارات على نتائج الدراسة.

المراجع:

- [1] Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL], "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020", 2017. <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>
- [2] ITU-R, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015. [Online]. Available: <https://www.itu.int>
- [3] K. N. Hsu et al., "Low-complexity hybrid beam-tracking algorithms and architectures for mmWave MIMO systems," 2016 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, 2016, pp. 1902-1905.
- [4] T. S. Rappaport et al., "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks with a focus on propagation models," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 65, 2017.
- [5] R. J. Mailloux, Phased array antenna handbook, 2nd ed., Artech House, p. 19, 2005.
- [6] B. Sadhu et al., "7.2 A 28GHz 32-element phased-array transceiver IC with concurrent dual polarized beams and 1.4 degree beam-steering resolution for 5G communication," 2017 IEEE Int. Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, CA, 2017, pp. 128-129.
- [7] X. Guan, H. Hashemi, and A. Hajimiri, "A fully integrated 24-GHz eight-element phased-array receiver in silicon," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no. 12, Dec. 2004.
- [8] A. Natarajan, A. Komijani, and A. Hajimiri, "A fully integrated 24-GHz phased-array transmitter in CMOS," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 40, no. 12, Dec. 2005.
- [9] F. Sahrabi, and 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, April 2016.
- [10] W. B. Abbas, F. Gomez-Cuba and M. Zorzi, "Millimeter Wave Receiver Efficiency: A Comprehensive Comparison of Beamforming Schemes With Low Resolution ADCs," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 12, pp. 8131-8146, Dec. 2017.
- [11] G. Auer et al., "How much energy is needed to run a wireless network?," IEEE Wireless Communications, Oct. 2011.
- [12] S. Shakib et al., "A Highly Efficient and Linear Power Amplifier for 28-GHz 5G Phased Array Radios in 28-nm CMOS," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 51, no. 12, pp. 3020-3036, Dec. 2016.
- [13] T. Hanna et al., "A wideband highly efficient class-J integrated power amplifier for 5G applications," 15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Strasbourg, 2017, pp. 325-328.
- [14] V. Puyal et al., "A broad-band 55-nm BiCMOS T/R switch for mmW 5G small cell access point," 14th IEEE Int. New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Vancouver, BC, 2016, pp. 1-4.
- [15] T. Cameron, "RF technology for the 5G millimeter wave radio," Analog Devices, 2016 [Online]. Available: analog.com