

دراسة وتحليل فعالية نظام الاتصال الضخم متعدد المداخل والمخارج الخالي من الخلايا (CF-MM)

- م. علي جحي: طالب دكتوراه - هندسة اتصالات - جامعة البعث - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات.
- د.م شحادة الموسى: أستاذ - جامعة البعث - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات.
- د.م مازن يوسف: مدرس - جامعة البعث - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات.

الملخص:

يعرف نظام Massive MIMO الخالي من الخلايا (Cell Free Massive MIMO) بأنه نظام جديد يجمع بشكلٍ أساسي بين أفضل مزايا الشبكات الخليوية فائقة الكثافة (UDN) مع نظام Massive MIMO الخليوي للتغلب على نقاط الضعف الخاصة بها. تتمثل إحدى طرق تصور الأمر في وجود شبكة تحتوي على مصفوفة Massive MIMO واحدة، يتم إعادة ترتيب هذه المصفوفة، ونشر الهوائيات الفردية في مواقع مختلفة ضمن المنطقة المراد تأمين التغطية لها، مع الاحتفاظ بنفس خوارزميات الإرسال / الاستقبال. وعند تقديم الخدمة لتجهيزات المستخدم، ترسل الهوائيات الموزعة كل إشارة بيانات باستطاعة وزاوية طور مختلفة بحيث تصل إلى جهاز المستخدم المرغوب بشكلٍ متزامن وبالتالي تقوي بعضها البعض. وبالمثل، تتم معالجة الإشارات المستقبلية عند مختلف الهوائيات الموزعة بشكلٍ مشترك لاستخراج البيانات من كل تجهيزات المستخدم. كان الدافع الأساسي وراء نظام Massive MIMO الخالي من الخلايا تصميم بنية تحتية جديدة للشبكة قادرة على توفير معدلات نقل بيانات موحدة في منطقة التغطية، أي

التركيز على تحسين معدلات نقل البيانات التي يتمتع بها المستخدم، بدلاً من معدلات نقل البيانات المتوسطة أو معدلات الذروة، والتي هي بالفعل مرتفعة جداً في الشبكات الحالية.

قمنا في هذا البحث بالمقارنة بين أداء الشبكات الخالية من الخلايا والشبكات الخليوية التقليدية من خلال المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB (R2018a). وتم تحليل ومقارنة معدلات نقل البيانات لكل مستخدم (Data Rate) ضمن سيناريوهات مختلفة لنشر نقاط الوصول الخاصة بنظام Massive MIMO الخالي من الخلايا، ثم قارنا بعد ذلك بين قيم نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) على الوصلة الصاعدة (من UE إلى BS) التي تحققها الأنظمة الرئيسية المعتمدة في الجيل الخامس (5G) والمتمثلة بأنظمة Massive MIMO والخلايا الصغيرة (Small Cells) وقيم SNR لنظام Cell Free Massive MIMO المقترح. ثم قمنا بعد ذلك دراسة عامل آخر هام في تحديد جودة الأنظمة المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية وهو قدرة هذا النظام على إزالة التداخل على الوصلة الصاعدة الناتج عن وجود عدة مستخدمين يرسلون باستخدام نفس المصادر الزمنية والترددية نحو محطة القاعدة الخاصة بخدمة كل منهم. وأخيراً درسنا قدرة هذا النظام على تركيز الإشارة نحو المستخدم المرغوب على الوصلة الهابطة في حالة الأمواج السننمترية والميلي مترية والذي قدم أداءً جيداً.

الكلمات المفتاحية: نظام Massive MIMO، الخلايا الصغيرة، نظام Massive MIMO الخالي من الخلايا، SINR.

Study and analysis the Efficiency of a Cell-Free Massive MIMO Communication System

Ali Jeha: Doctoral Student – Communication Engineering - Al-Baath University - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering -Department of Electronics and Communications Engineering.

Dr. Chehada Moussa: Doctor - Al-Baath University - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering -Department of Electronics and Communications Engineering.

Dr. Mazen Yousef: Doctor - Al-Baath University - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering -Department of Electronics and Communications Engineering.

Abstract

Cell Free Massive MIMO is a new system that combines the best advantages of Ultra Dense Networks (UDN) with Massive MIMO Cellular System to overcome its weaknesses. One way to visualize it is to consider a network containing a single Massive MIMO array, deconstruct that array, and spread the individual antennas to different locations within the coverage area, while keeping the same transmit/receive algorithms. When servicing the user's equipment, the distributed antennas will then transmit each data signal of different power and phase angle, so that, it arrives at the desired user device simultaneously and thus reinforce each other. Likewise, the signals received at the various jointly distributed antennas are processing to extract data from all user equipment.

The primary motivation behind the Cell-Free Massive MIMO system was to design a new network infrastructure capable of providing uniform data rates in the coverage area, i.e. focusing on improving the data rates enjoyed by the user, rather than the average rates or peak rates, which are already too high in current networks.

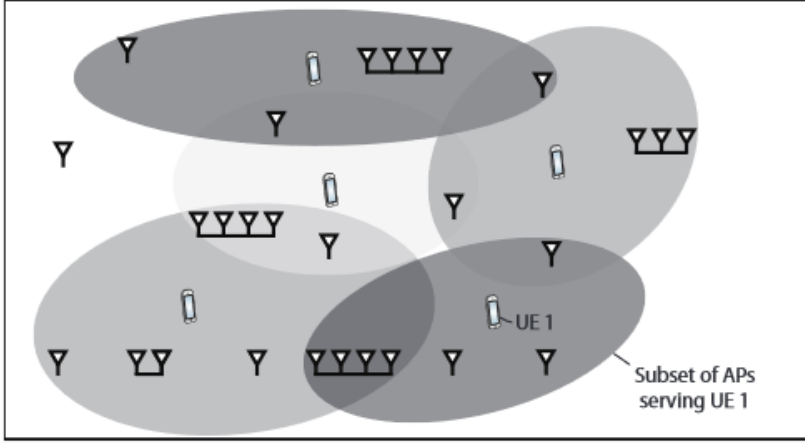
In this paper, we will compare the performance of cell-free networks and traditional cellular networks through simulation using MATLAB (R2018a) program. The data rates for each user will be analyzed and compared under different scenarios for deployment of cell-free Massive MIMO access points. We then introduce a comparison of the uplink SNR values (UE to BS) achieved by the 5G major Massive MIMO and Small Cells with SNR values by Cell-Free Massive MIMO Proposed system. Then, another important factor in determining the quality of the systems used in wireless communications will be studying, which is the ability of this system to remove the interference on the uplink resulting from the presence of several users sending using the same time and frequency sources to the base station of their service. Finally, the ability of this system to focus the signal towards the desired user on the downlink in the case of centimeter and millimeter waves studied and it performed well.

Key words: Massive MIMO System, Small Cells, Cell-Free Massive MIMO System, SINR.

المقدمة:

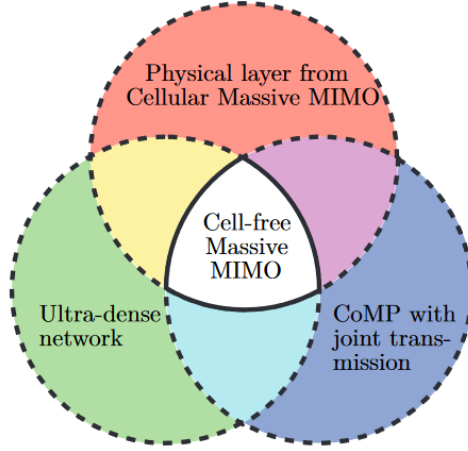
يبدو أن الطلب على معدلات نقل أعلى للبيانات (data rates) وعلى حجم أكبر لحركة البيانات (traffic volumes) لا ينتهي أبداً، وبالتالي يجب دائماً مواصلة العمل الدؤوب لتقديم الخدمات المطلوبة. وإحدى الطرق الأساسية المستخدمة لتوفير متطلبات معدلات نقل بيانات عالية لكل مستخدم عند إنشاء شبكة 5G هي تكثيف الشبكة، وهذا يعني زيادة عدد الهوائيات لكل محطة قاعدة وتصغير حجم الخلايا بقدر المستطاع. ومع ذلك، لن تفي الشبكات فائقة الكثافة UDN (Ultra-Dense Networks) ولا نظام Massive MIMO بمتطلبات معدل البيانات المتزايدة للاتصالات اللاسلكية من الجيل السادس (6G) بسبب عدة مشاكل منها التداخل بين الخلايا والتغيرات الكبيرة في جودة الخدمة [1,8].

تم التوجه حديثاً نحو نهج جديد لبناء الشبكة، بحيث يتم تنفيذ المعالجة المشتركة بين نقاط الوصول (APs) (Access points) بطريقة تتمركز حول المستخدم (user-centric)، حيث تتعاون نقاط الوصول المختارة ليتم تخديم كل مستخدم عن طريق إرسال مشترك متماسك فيما بينها (مجموعة خاصة بالمستخدم)، وكذلك تأخذ جميع نقاط الوصول التي تؤثر على المستخدم التداخل الناتج عنه في الاعتبار، كما هو موضح في الشكل (1) [1].



الشكل (1) - توزيع يتمحور حول المستخدم لنقاط الوصول المتعاونة، حيث تتواصل كل وحدة UE مع نقاط الوصول الأقرب.

إن الجمع بين عملية Massive MIMO التي تعتمد على التقسيم الزمني (TDD) (Time Division Duplexing)، وطوبولوجيا الشبكة ذات التوزيع الكثيف، وتصميم الإرسال المرتكز على المستخدم (User-Centric)، سوف يخلق مفهوماً جديداً، يُشار إليه باسم Cell-Free Massive MIMO كما هو مبين في الشكل (2) [2].

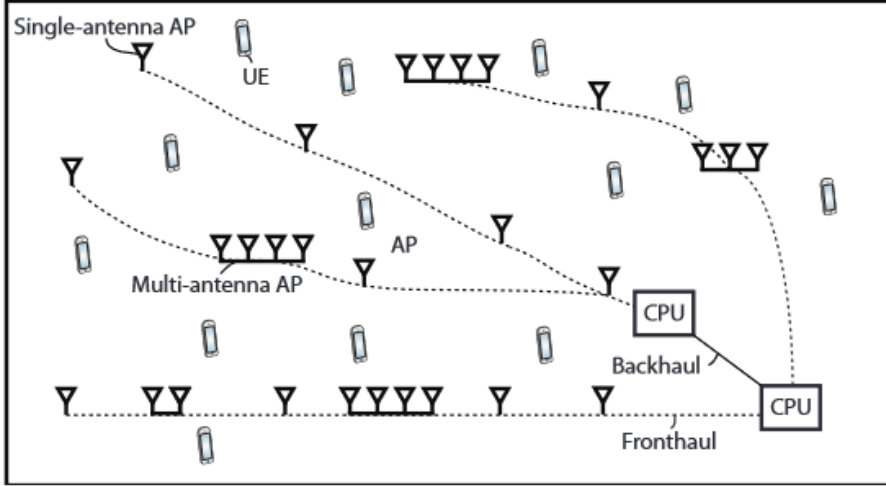


الشكل (2)- توضيح حول مبدأ نظام Cell Free Massive MIMO

تشير كلمة "Cell-Free" إلى أنه من منظور المستخدم، لا توجد حدود بين الخلايا أثناء نقل البيانات على الوصلة الهابطة DL، ولكن تتعاون جميع نقاط الوصول (أو مجموعة فرعية منها) التي تضمها الشبكة لخدمة المستخدمين بشكلٍ مشتركٍ ضمن نمط User-Centric.

ترتبط نقاط الوصول (APs) عبر الوصلات الأمامية (front-haul connections) بوحدات المعالجة المركزية (CPUs)، المسؤولة عن التنسيق فيما بينها. بينما يتم ربط وحدات المعالجة المركزية (CPU) ببعضها البعض عن طريق الوصلات الخلفية (back-haul connections) كما هو موضح في الشكل (3).

في الوصلة الصاعدة (UL)، يمكن إجراء كشف البيانات إما محلياً في كل نقطة وصول (AP)، أو مركزياً في وحدة المعالجة المركزية، أو جزئياً أولاً في كل نقطة وصول ثم في وحدة المعالجة المركزية [1].



الشكل (3) - تصور أولي لشبكة Cell-Free Massive MIMO

1. أهداف البحث:

- إنشاء نموذج حاسوبي لنظام Cell Free Massive MIMO وإجراء المقارنة مع أنظمة Massive MIMO و Small Cells المعتمدة في الجيل الخامس الذي بدأ تشغيله حالياً من خلال المحاكاة بواسطة برنامج (MATLAB(R2018a)).
- دراسة ومقارنة فعالية استخدام تقنية Cell Free Massive MIMO المقترحة في الجيل السادس (6G) من نظم الاتصالات اللاسلكية المتنقلة مع الشبكات الخليوية التقليدية من ناحية معدلات نقل البيانات (Data Rates) الممكن تحقيقها.
- تحديد أهمية النظام المقترح من ناحية نسبة الإشارة إلى الضجيج والقدرة على إزالة التداخل مقارنةً مع الأنظمة السابقة وتركيز الإشارة عند المستخدم المرغوب، وترشيحه ليكون نظاماً قابلاً للتطبيق في أنظمة الاتصالات اللاسلكية المستقبلية.

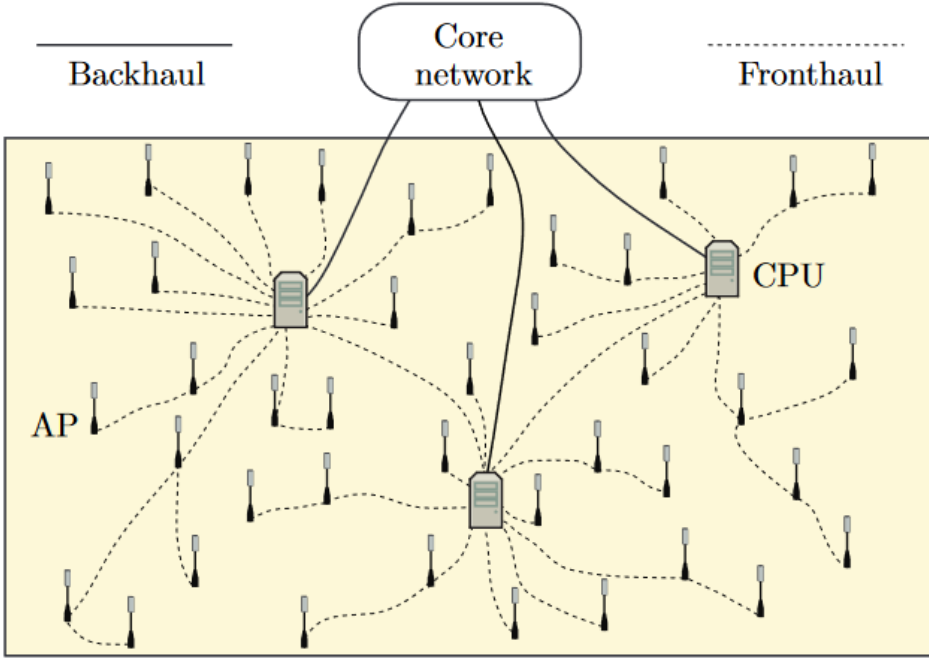
2. مواد وطرق البحث:

تم في هذا البحث المقارنة بين أداء نظام Cell Free Massive MIMO وبين أنظمة الهوائيات المتعددة المعتمدة في الجيل الخامس (5G) والمستندة إلى البنية الخليوية التقليدية وهي أنظمة Massive MIMO وأنظمة Small cells سواء من خلال معدل البيانات أو نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) أو القدرة على إزالة التداخل على الوصلة الصاعدة (UL) من خلال محاكاة النظام باستخدام برنامج MATLAB(R2018a).

3. الشبكات الخالية من الخلايا (Cell Free Networks):

تتكون الشبكة الخالية من الخلايا (Cell-Free Network) من عدد من نقاط الوصول الموزعة جغرافياً والتي تخدم بشكلٍ مشتركٍ أجهزة المستخدمين الموجودة في المنطقة. يتم ربط كل نقطة وصول (AP) عبر وصلة أمامية (fronthaul) بوحدة معالجة مركزية (CPU)، والتي تكون مسؤولة عن التنسيق والتعاون بين نقاط الوصول. يمكن أن يكون هناك العديد من وحدات المعالجة المركزية (CPU) المتصلة جميعها عبر روابط خلفية، يمكن أن تكون سلكية أو لاسلكية. لدينا في الشكل (4) رسم توضيحي لشبكة خالية من الخلايا ذات نقاط وصول أحادية الهوائي.

يمكن تقسيم هذا النوع من الشبكات الخالية من الخلايا إلى حافة (Edge) ومركز (Core)، تماماً مثل الشبكات الخلوية. حيث توجد نقاط الوصول ووحدات المعالجة المركزية على الحافة وتسمى الاتصالات بينها روابط أمامية (fronthaul)، بينما تسمى الاتصالات بين الحافة والمركز روابط خلفية (backhaul). إن وحدات المعالجة المركزية (CPU) متصلة بالشبكة الأساسية عبر روابط خلفية، والتي تُستخدم لإرسال/استقبال البيانات من الإنترنت والمصادر الأخرى، لتسهيل خدمات البيانات المختلفة [3].



الشكل (4) - نموذج توضيحي للشبكة الخالية من الخلايا

في المقابل، يمكن استخدام الوصلات الأمامية (fronthaul) من أجل:

(1) مشاركة إشارات الطبقة الفيزيائية التي سيتم إرسالها في الوصلة الهابطة.

(2) إعادة توجيه إشارات بيانات الوصلة الصاعدة التي لم يتم ترميزها بعد.

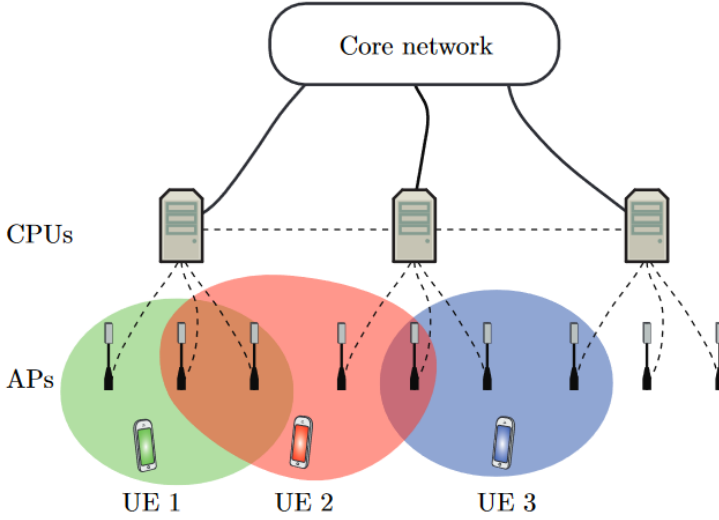
(3) مشاركة معلومات حالة القناة (CSI) (Channel State Information) المتعلقة بالقنوات الفيزيائية.

تسهل الوصلات الأمامية أيضاً مزامنة الطور بين نقاط الوصول الموزعة جغرافياً، من خلال توفير طور مرجعي مشترك (common phase reference).

يوضح الشكل (4) طوبولوجيا خاصة للواجهة الأمامية، حيث يتم توصيل بعض نقاط الوصول مباشرةً بوحدة المعالجة المركزية (CPU) بينما يتم توصيل نقاط الوصول الأخرى عبر نقطة وصول مجاورة.

قد لا تكون وحدة المعالجة المركزية (CPU) وحدة فيزيائية منفصلة ولكن يمكن اعتبارها كياناً منطقياً (Logical Entity)، على سبيل المثال، قد تمثل وحدات المعالجة المركزية مجموعة من المعالجات المحلية التي يمكن أن تكون موجودة في مجموعة فرعية من نقاط الوصول أو في مواقع فيزيائية أخرى، والتي تكون متصلة عبر الروابط الأمامية (fronthaul links). وتماشياً مع التضمين السحابي (Cloudification) المستمر للشبكات اللاسلكية، والمعروفة باسم شبكة الوصول الراديوي السحابية (C-RAN) (Cloud Radio Access Networks)، يمكن توزيع مهام المعالجة المتعلقة بوحدة المعالجة المركزية بين المعالجات المحلية بطرقٍ مختلفة.

من أجل مراعاة قيود التأخير في معالجة الحزمة الأساسية (Baseband)، فإن وحدة المعالجة المركزية هي معالج سحابي ضمن الحافة (edge-cloud processor) يقع في نفس المنطقة الجغرافية التي توجد فيها نقاط الوصول، ويمكن تنفيذ العديد من تقنيات الطبقة الفيزيائية المختلفة باستخدام بنية C-RAN. وهو الآن مستخدم بشكلٍ أساسي للشبكات الخلوية ولكنه أيضاً يمكن أن يكون الأساس للشبكات الخالية من الخلايا. يعطي الشكل (5) عرضاً تخطيطياً لشبكة خالية من الخلايا تستخدم بنية C-RAN.



الشكل (5) - الطبقات المختلفة للشبكة الخالية من الخلايا

نلاحظ من الشكل (5) أن الشبكة الخالية من الخلايا مقسمة إلى طبقات مختلفة:

- مركز الشبكة (Core network).
- طبقة وحدات المعالجة المركزية (CPUs).
- طبقة نقاط الوصول (APs).
- طبقة تجهيزات المستخدمين (UE).

يتم تخديم جهاز المستخدم بواسطة بعض نقاط الوصول، على سبيل المثال، من نقاط الوصول المجاورة له، كما في المناطق المظللة في الشكل (5).

يخصص لكل مستخدم (UE)، إحدى نقاط الوصول المحددة هو ما يسمى Master AP وبالتالي ستكون نقطة الوصول هذه مسؤولة عن خدمة هذا الجهاز وتعيين وحدة المعالجة المركزية التي سيتم فيها تنفيذ فك تشفير بيانات الوصلة الصاعدة وتشفير بيانات الوصلة الهابطة. توفر وحدة المعالجة المركزية هذه بيانات الوصلة الهابطة لجميع نقاط الوصول

التي يتم إرسالها إلى المستخدم (UE) وتجمع / تدمج الإشارات المستقبلية للوصلة الصاعدة التي تم الحصول عليها في نقاط الوصول هذه في خطوة فك التشفير النهائية. يمكن تخديم جهاز المستخدم UE بواسطة نقاط وصول متصلة بوحدات معالجة مركزية مختلفة، حيث يوجد رابط أمامي بين كل زوج من نقاط الوصول حتى لو كان يمر عبر كيانات أخرى [4].

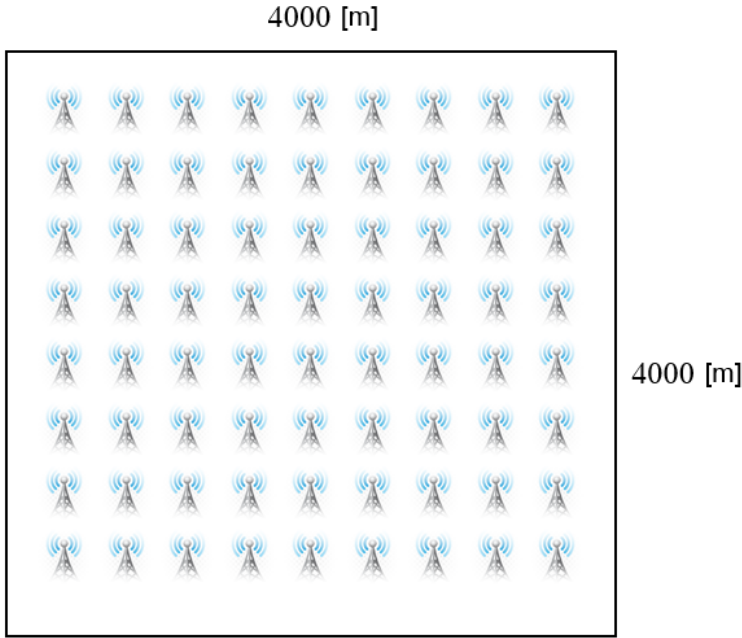
4- النتائج والمناقشة:

4.1- مقارنة بين الشبكات الخالية من الخلايا والشبكات الخلوية التقليدية:

هناك العديد من الجوانب التي تتفوق بها الشبكات الخالية من الخلايا مقارنةً مع الشبكات الخلوية التقليدية ولعل أبرزها أنها توفر أداءً ثابت ضمن نطاق تغطية الشبكة وهذه الفكرة التي سنبدأ بها عملنا في بحثنا هذا وذلك من خلال دراسة معدلات نقل البيانات التي يتم تحقيقها من خلال جهاز مستخدم (UE) (Data Rates [Mbit/s/user]) ويتم دراسة ذلك في مواقع مختلفة عشوائية ضمن نطاق التغطية لشبكة خالية من الخلايا ومقارنتها مع معدلات نقل البيانات لشبكة خلوية تقليدية.

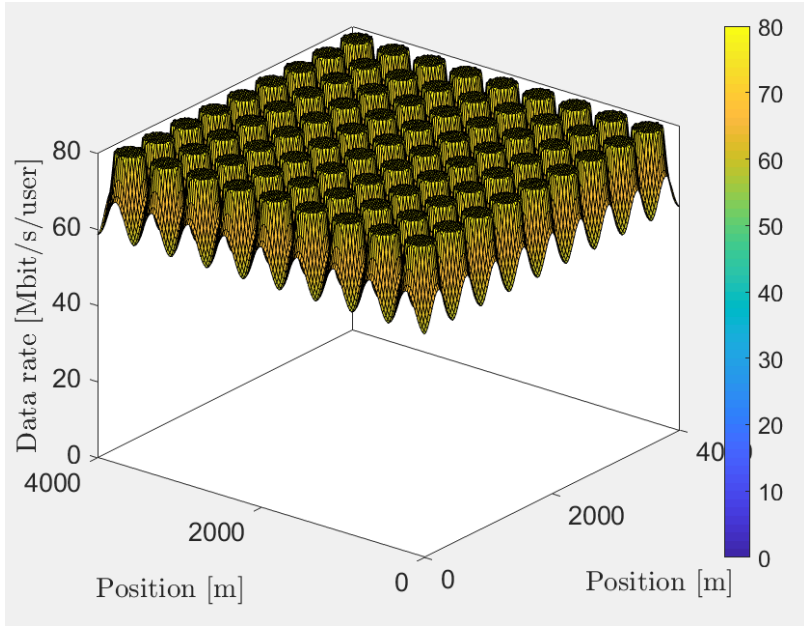
نفترض أن بيئة المحاكاة عبارة عن مربع يمثل المنطقة المراد تغطيتها ويتم اختيار أبعاده بحيث تكون موافقة لمنطقة مفترضة بحجم بلدة صغيرة يراد تخديمها بالاتصالات اللاسلكية ودراسة معدلات نقل البيانات ضمن هذه المنطقة، نفترض أن طول كل ضلع من أضلاعه [Km] 4 وأنه يتم توزيع 81 نقطة وصول (APs) كل منها مزودة بهوائي وحيد بشكلٍ منتظم ضمن مساحة المربع بحيث تشغل 9 صفوف و 9 أعمدة (9 × 9). ويتم قياس معدل البيانات في 400 موقع مختلف لجهاز المستخدم وتكون هذه المواقع موزعة بشكلٍ منتظم ضمن بيئة المحاكاة كما هو موضَّح في الشكل (6).

نعتبر أن أعلى فعالية طيفية يمكن تحقيقها هي $8 \text{ [bit/sec/Hz/user]}$ [3] وأن عرض الحزمة المستخدم يساوي 10 [MHz] وهي توافق البارامترات المعتمدة في الجيل الخامس، وبالتالي فإن أعلى معدل بيانات يمكن تحقيقه يساوي إلى $80 \text{ [Mbit/sec/user]}$. ويوضح الشكل (7) نتيجة المحاكاة في حالة شبكة خالية من الخلايا، بينما يقدم الشكل (8) معدل البيانات في حالة شبكة خلوية تقليدية. نلاحظ من الشكل (7) أن معدلات نقل البيانات في مختلف المواقع ضمن بيئة المحاكاة تبقى قريبة من بعضها دون تغيرات كبيرة حيث أنها تتراوح بين 59 إلى $80 \text{ [Mbit/sec/user]}$.



الشكل (6) - رسم توضيحي لبيئة المحاكاة المقترحة

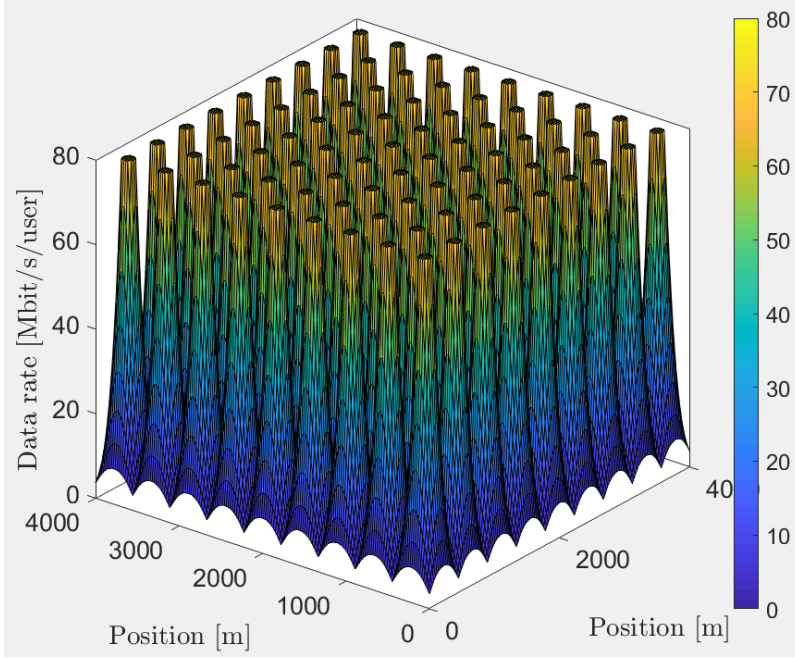
ويعود ذلك بشكلٍ أساسي إلى التنوع المكاني (Macro diversity) الكبير الناتج عن العدد الكبير من نقاط الوصول التي تخدم كل مستخدم، وانخفاض المسافة بين المستخدم وأقرب نقاط الوصول التي تخدمه. مما يزيل التداخل بشكلٍ كبير والذي يعد مشكلة رئيسية في الشبكات الخليوية التقليدية.



الشكل (7) - معدل نقل البيانات عند المستخدم في حالة شبكة خالية من الخلايا

بينما نلاحظ من الشكل (8) أن معدلات نقل البيانات تتراوح بين الصفر أو قيم قريبة جداً منه عند حافة كل خلية حتى قيم عظمى تقدر بـ $80 \text{ [Mbit/sec/user]}$ في مركز كل خلية ويعود السبب في ذلك إلى تخامد الإشارة مع البعد عن مركز الخلية نتيجة اعتماد نموذج فقد المسار الحر (free space loss) ضمن المحاكاة وبالتالي يكون ربح الإشارة الأعلى بالقرب من مركز الخلية حيث يكون الفقد منخفضاً جداً بينما يزداد الفقد مع الاقتراب من حافة الخلية مما يعني معدلات نقل بيانات أقل قد تصل إلى 0

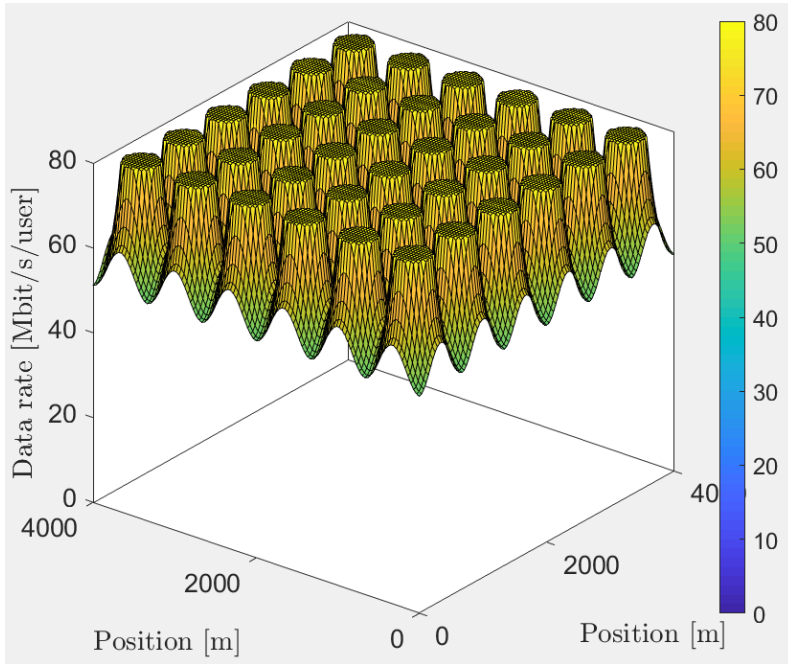
[Mbit/s/user] في بعض الحالات، وهذه إحدى المشاكل الأساسية التي تدفع نحو الانتقال باتجاه الشبكات الخالية من الخلايا.



الشكل (8) - معدل البيانات عند المستخدم في حالة شبكة خلية

ننتقل الآن إلى دراسة حالة مقارنة أخرى تخص نظام Cell Free Massive MIMO من خلال المقارنة بين عدد كبير من نقاط الوصول قدره $N=81$ كما في الحالة السابقة كل منها مزودة بهوائي واحد وموزعة جغرافياً ضمن بيئة المحاكاة وبين وجود عدد أقل من نقاط الوصول عدده $N=36$ كل منها مزود ب 3 هوائيات لتخدم نفس العدد من تجهيزات المستخدمين، ويوضح الشكل (9) معدلات نقل البيانات في حالة نظام Cell Free Massive MIMO يتضمن عدد نقاط وصول أقل مزودة بعدد أكبر من الهوائيات $M=3$ ، أن معدلات نقل البيانات تتراوح بين 51 إلى 80 [Mbit/sec/user].

بالمقارنة بين نتيجة المحاكاة في الحالة الأولى عندما يكون $N=81$ و $M=1$ والموضحة بالشكل (7)، ونتيجة المحاكاة في الحالة الثانية عندما يكون $N=36$ و $M=3$ والموضحة بالشكل (9) نجد أن حالة العدد الكبير من نقاط الوصول والمزودة بهوائي وحيد تقدم أداءً أفضل مقارنةً بحالة تخفيض عدد نقاط الوصول وزيادة عدد الهوائيات في كل منها رغم أن العدد الإجمالي للهوائيات المستخدمة في الحالة الثانية يتفوق على عدد الهوائيات في الحالة الأولى وذلك بسبب ربح التنوع المكاني الكبير (Macro Diversity) الذي يوفره العدد الكبير من نقاط الوصول الموزعة جغرافياً والذي يبدي تفوقاً على الربح الناتج عن استخدام عدد أكبر من الهوائيات في كل نقطة وصول.



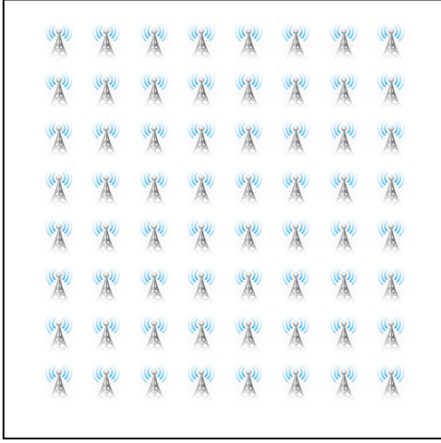
الشكل (9) - معدل البيانات عند المستخدم في حالة شبكة خالية من الخلايا، في حالة

$$M=3 \text{ و } N=36$$

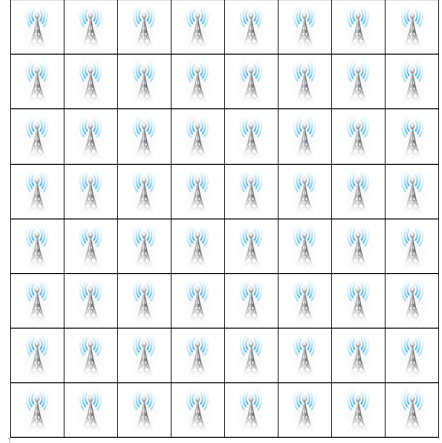
2.4- مقارنة القدرة على إزالة الضجيج بين نظام Cell Free Massive MIMO وأنظمة الهوائيات المتعددة الخليوية التقليدية:

نقدم في هذه الفقرة مقارنة بين قيم نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) (Signal to Noise Ratio) على الوصلة الصاعدة-التي تحققها الأنظمة الرئيسية المعتمدة في الجيل الخامس (5G) والمتمثلة بأنظمة Massive MIMO [5] والخلايا الصغيرة (Small Cells) [6] مع قيم SNR لنظام Cell Free Massive MIMO المقترح استخدامه في أنظمة الجيل السادس (6G) وذلك من خلال رسم منحنيات تابع التوزيع التراكمي (CDF) لنسبة الإشارة إلى الضجيج للأنظمة المقترحة.

نفترض هنا بيئة محاكاة ذات شكل مربع حيث يتم توزيع محطات القاعدة ضمنها وجهاز مستخدم وحيد (UE) ضمن هذه البيئة مع افتراض وجوده في أماكن مختلفة وأخذ قيمة متوسطة لنسبة SNR عند هذا الجهاز، حيث أنه في نظام Massive MIMO يتم افتراض وجود محطة قاعدة واحدة مزودة بمصفوفة هوائيات عددها 64 هوائي تقع في مركز المربع، بينما في حالة Small cell يتم افتراض أن 64 نقطة وصول (APs) موزعة ضمن بيئة المحاكاة بشكل منتظم وفق ثمانية أسطر وثمانية أعمدة، ويتم تخديم المستخدم من محطة القاعدة الأقرب التي توفر أفضل ربح قناة للمستخدم. أما في حالة نظام Cell Free Massive MIMO فيكون توزيع نقاط الوصول كما هو في حالة Small Cells إلا أن الفرق بينهما هو أنه في هذه الحالة تتعاون جميع نقاط الوصول لتخدم المستخدم المرغوب مما يجعلنا نفترض أنه سيحصل على نسبة SNR أعلى مقارنة مع الأنظمة الأخرى ولا يوجد أي تقسيم لمنطقة الخدمة إلى خلايا. ويوضح الشكل (10) البيئة المقترحة لمحاكاة الأنظمة الثلاث.

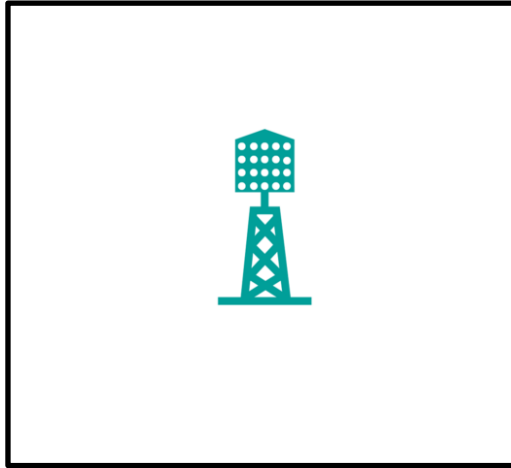


Cell Free Massive (ب)- نظام



Small Cells (أ)- نظام

MIMO



Massive MIMO (ج)- نظام

الشكل (10) - إعدادات بيئة المحاكاة للأنظمة المقترحة للمقارنة من ناحية SNR

وفقاً لخصائص الانتشار، تعاني قنوات الاتصالات من فقد المسار (Path Loss) حيث أنه مع المسافة وابتعاد الإشارة عن المرسل فإن الاستطاعة المرسله تتناقص وتكون

الاستطاعة المستقبلية أقل من الاستطاعة المرسلية وهذا ما يمكن التعبير عنه وفق نموذج
[7] (LDM) Log-Distance Path-Loss المعطى بالعلاقة:

$$PL(d)[dB] = PL_{dB}(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}, \quad d \geq d_0 \quad (1)$$

حيث أن d_0 تعبر عن مسافة مرجعية، بينما تعبر $PL_{dB}(d_0)$ عن فقد المسار عند المسافة المرجعية المفترضة، بينما يعبر عن الحد الثاني عن فقد المسار عند كل عشر أضعاف زيادة عن المسافة السابقة، أما X_{σ} فتعرف بعامل الظل (shadow factor). ومن أجل $d_0 = 1 \text{ m}$ و $X_{\sigma} = 0 \text{ [dB]}$ ، تصبح المعادلة السابقة كالتالي [7]:

$$PL(d)[dB] = -30.5 - 36.7 \log_{10} \left(\frac{d}{1\text{m}} \right) \quad (2)$$

أما من أجل نظام Massive MIMO، المبين في القسم (ج) من الشكل (10) والذي يفترض وجود محطة قاعدة (BS) واحدة في مركز منطقة المحاكاة مزودة بمصفوفة ذات 64 هوائي، وكما ذكرنا سابقاً، يتم خدمة مستخدم واحد ضمن المنطقة المحددة، ونفرض أن إشارة الوصلة الصاعدة لهذا النظام تعطى بالعلاقة [5]:

$$Y = gs + n \quad (3)$$

حيث تعبر y عن الإشارة المستقبلية من قبل مصفوفة هوائيات محطة القاعدة، وتعبر s عن الإشارة المرسلية من جهاز المستخدم، بينما $g = [g_1 \dots g_M]^T \in C^M$ شعاع يعبر عن استجابة القناة بين جهاز المستخدم والهوائيات M في محطة القاعدة، وتعبر n عن الضجيج الذي يتم استقباله.

والآن يجب على محطة القاعدة أن تخمن الإشارة المرسله s وذلك باستخدام إحدى تقنيات التجميع (Combining) من خلال ضرب الإشارة المستقبلية y بشعاع التجميع $V \in C^M$ ، كما يلي [5]:

$$S = V^H \times Y = V^H g s + V^H n \quad (4)$$

حيث تعبر H عن المرافق العقدي لمنقول شعاع التجميع V .

وبالتالي يمكن الحصول على نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR لهذا النظام وفق العلاقة:

$$\frac{E\{|V^H g s|^2\}}{E\{|V^H n|^2\}} = \frac{P|V^H g|^2}{\sigma_{UL}^2 \|V\|^2} \quad (5)$$

حيث تعبر P عن استطاعة الإشارة المرسله، بينما تعبر σ_{UL}^2 عن تباين الضجيج.

يتم اختيار الشعاع V من قبل محطة القاعدة اعتماداً على استجابة القناة (g) بحيث نحصل على أعلى SNR. للبساطة نختار طريقة تجميع النسبة العظمى (MR) (Maximum Ratio) حيث يتم اختيار شعاع التجميع المسوى (unit-norm) وفق العلاقة:

$$V = \frac{g}{\|g\|} \quad (6)$$

وبتعويض قيمة V ، نحصل على SNR وفق العلاقة التالية وباستخدام نموذج القناة الذي ذكر سابقاً نحصل على:

$$SNR_{Massive MIMO} = \frac{P}{\sigma_{UL}^2} \|g\|^2 = \frac{P}{\sigma_{UL}^2} MPL(d) \quad (7)$$

ومن العلاقة نجد أن SNR تتناسب بشكلٍ طردي مع عدد هوائيات مصفوفة محطة القاعدة.

أما في حالة Small cells فإن واحدة فقط من نقاط الوصول هي التي تخدم جهاز المستخدم (UE)، ويتم اختيار نقطة الوصول ذات القناة الأفضل التي توفر أعلى SNR. بالتالي فإن إشارة الوصلة الصاعدة تعطى بالعلاقة:

$$Y=h_l s+n_l \quad (8)$$

حيث تشير كل من h_l و n_l إلى استجابة القناة والضجيج بين UE و AP رقم l على التوالي. بالتالي يمكن حساب SNR كما يلي:

$$\text{SNR}_{\text{Small cells}} = \frac{P}{\sigma_{UL}^2} \max_{l \in \{1,L\}} PL(d_l) \quad (9)$$

حيث تشير d_l إلى المسافة بين جهاز المستخدم ونقطة الوصول رقم l .

بينما في حالة نظام Cell Free Massive MIMO فإن كامل نقاط الوصول تخدم جهاز المستخدم UE وبالتالي تعطى نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) في هذه الحالة كما يلي:

$$\text{SNR}_{\text{cell-free}} = \frac{P}{\sigma_{UL}^2} \sum_{l=1}^L PL(d_l) \quad (10)$$

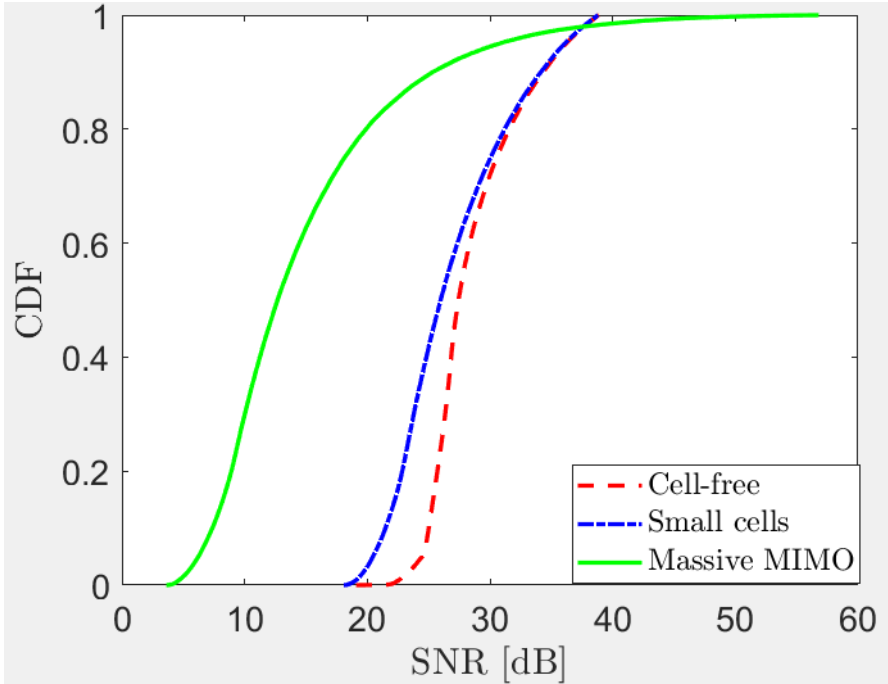
1.2.4 - إعدادات المحاكاة:

نفترض أن المنطقة المدروسة عبارة عن مربع طول ضلعه [m] 400، وضمن هذه المنطقة يتواجد جهاز مستخدم واحد ويغير موقعه من أجل كل إعداد ليتم قياس نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، ونفترض أن نقاط الوصول تكون على ارتفاع يعلو جهاز

المستخدم ب [m] 10. نفرض أن استطاعة الإرسال لكل هوائي تبلغ 10 dBm بينما نفترض أن استطاعة الضجيج تبلغ $\sigma_{UL}^2 = -96$ dBm والتي تعد رقماً مقبولاً يتناسب مع عرض الحزمة المفروض وهو 10 MHz.

2.2.4- نتيجة المحاكاة:

يوضح الشكل (11) تابع التوزيع التراكمي (CDF) (Cumulative Distribution Function) لنسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) على الوصلة الصاعدة،

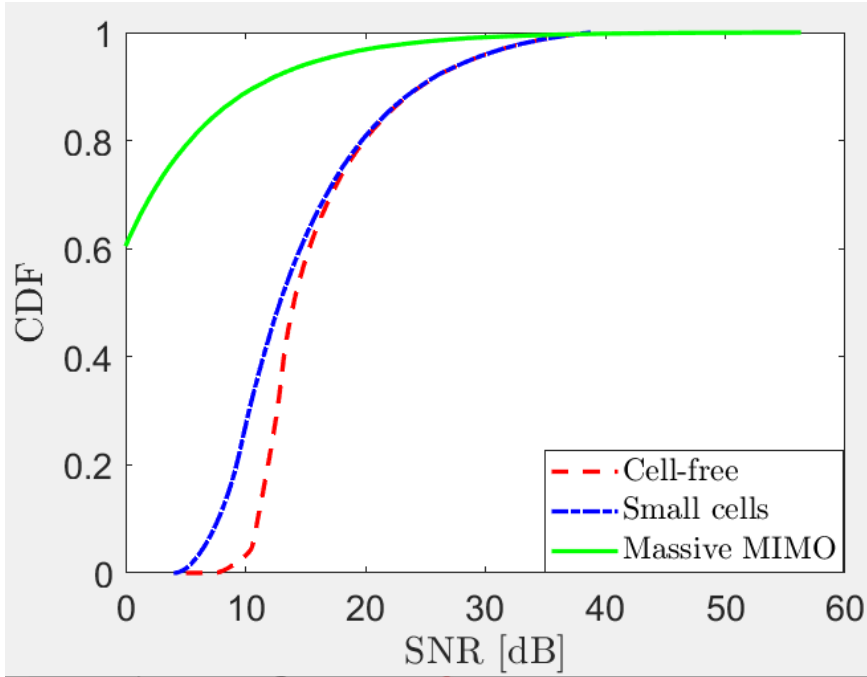


الشكل (11) - تابع التوزيع التراكمي ل SNR من أجل أنظمة الاتصال المختلفة

كما نلاحظ من الشكل فإن هناك تفاوت كبير في القيم التي يتم تحقيقها من قبل نظام Massive MIMO ويعود ذلك إلى أنه عندما يكون الجهاز قريب من مركز الخلية يتم تحقيق نسبة SNR عالية تصل حتى 57 [dB] بينما عندما يقع الجهاز على طرف

الخلية فإنه يعاني من انخفاض في نسبة SNR لتتخفص إلى حوالي 3 [dB]، ونلاحظ أنه من أجل معظم الحالات المدروسة تكون SNR منخفضة، وهذا ما يتغير في البنية ذات نقاط الوصول الموزعة كما في حالة الخلايا الصغيرة (Small cells) حيث يتم نشر نقاط وصول ذات عدد منخفض من الهوائيات وفي حالتنا هذه هوائي وحيد، ويتم تخديم جهاز المستخدم (UE) من خلال نقطة الوصول التي تحقق أفضل استجابة للقناة، مما يخفص التغيرات في SNR بين الحالات المدروسة المختلفة ويعطي أداءً موحداً ضمن الشبكة، وهذا هو الحال في نظام Cell Free Massive MIMO حيث يتم نشر نقاط الوصول بطريقة موزعة ضمن الشبكة المدروسة وبالتالي يحقق أداءً موحداً أفضل فيما يخص SNR ونلاحظ أنه يتفوق على Massive MIMO بصورة كبيرة من أجل معظم الحالات المدروسة وكذلك يقدم أداءً أفضل مقارنةً مع نظام الخلايا الصغيرة نظراً لكون جميع نقاط الوصول تتعاون لخدمة جهاز المستخدم نتيجة اعتماد نمط مركزية المستخدم (User centric) ونشر عدد كبير من نقاط الوصول مقارنةً مع عدد المستخدمين وهو ما يتفوق مع نتائج المحاكاة في [9] حيث تظهر تلك النتائج تفوقاً لنظام Cell Free Massive MIMO مقارنةً بأنظمة الخلايا الصغيرة (Small cells).

في حال تم زيادة مساحة المنطقة المدروسة إلى $1 \text{ [km}^2\text{]}$ بحيث يكون طول كل ضلع من أضلاع المربع الممثل لبيئة المحاكاة 1 [km] ، فإن نتيجة هذا الإجراء توضح في الشكل (12).



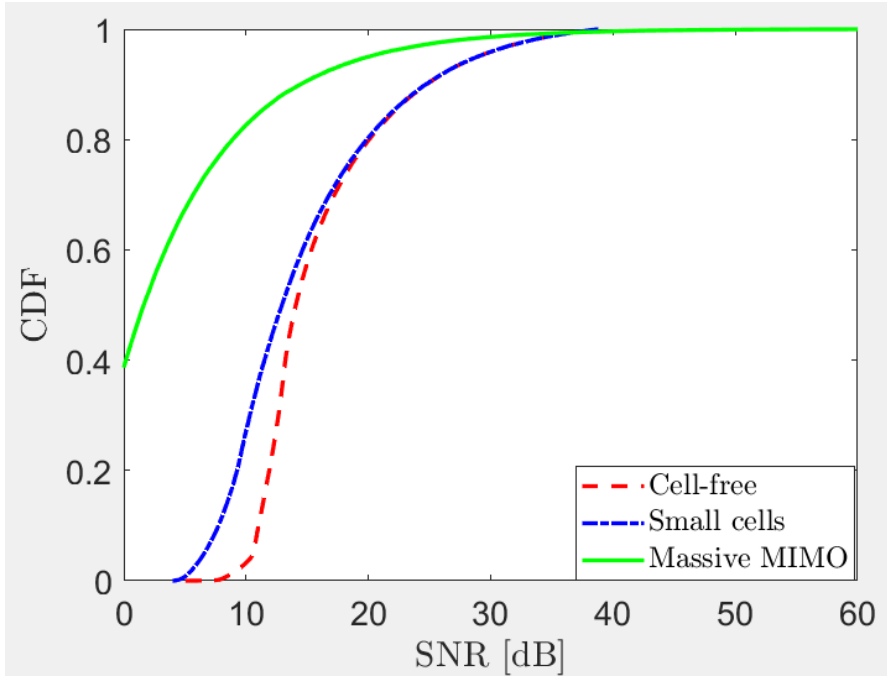
الشكل (12) - تابع التوزيع التراكمي ل SNR من اجل مساحة منطقة قدرها 1 km^2

في حالة نظام Cell Free ونظام Small Cell نلاحظ انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) إلى النصف تقريباً مقارنةً بالحالة السابقة لكنها تحافظ على أداء جيد وموحد للمستخدم في مختلف مناطق المحاكاة مع أفضلية لنظام Cell Free من أجل معظم الحالات التي تمت دراستها. بينما نلاحظ تدهوراً كبيراً في أداء نظام Massive MIMO فيما يخص المستخدمين على حافة الخلية، حيث نجد أن أكثر من 60% من حالات الدراسة تقدم $\text{SNR}=0[\text{dB}]$ بينما حالات وقوع جهاز المستخدم بالقرب من مركز الخلية يقدم SNR جيد جداً يصل حتى 57 dB لكن معظم أجهزة المستخدمين في الواقع العملي لا تكون قرب مركز الخلية، مما يقلل فرص استخدام Massive MIMO وفق البنية الخليوية الحالية في أنظمة الجيل السادس (6G).

دراسة وتحليل فعالية نظام الاتصال الضخم متعدد المداخل والمخارج الخالي من الخلايا (CF-MM)

نكرر الآن نفس المحاكاة السابقة لكن مع زيادة عدد هوائيات محطة القاعدة حتى 144 هوائي في حالة نظام Massive MIMO ونحافظ على العدد السابق لنقاط الوصول (64 نقطة وصول) الموزعة جغرافياً على المنطقة المدروسة في حالة نظام Small cells ونظام Cell Free بهدف دراسة أثر زيادة عدد هوائيات محطة القاعدة على تغيرات SNR.

نلاحظ من الشكل (13) أن زيادة عدد هوائيات محطة القاعدة من 64 حتى 144 في نظام Massive MIMO خفض الحالات التي يكون فيها $SNR=0[dB]$ من 60% إلى 40% بينما ارتفعت القيمة العظمى لحالة الدراسة قرب محطة القاعدة حتى $60[dB]$ بينما نلاحظ أن معظم حالات المستخدمين في أنظمة Small Cells و Cell Free ما زالت تحافظ على تفوقها وتقديم خدمة موحدة وأكثر استقراراً ضمن منطقة التغطية مع تفوق لصالح نظام Cell Free المقترح رغم استخدام عدد أقل من النصف من الهوائيات المستخدمة في حالة نظام Massive MIMO.



الشكل (13) - تابع التوزيع التراكمي ل SNR من اجل مساحة منطقة قدرها 1 km^2 ، مع استخدام عدد أكبر من الهوائيات $M=144$ ضمن محطة القاعدة في حالة Massive MIMO

3.4- مقارنة القدرة على إزالة التداخل بين نظام Cell Free Massive MIMO وأنظمة الهوائيات المتعددة الخليوية:

ننقل الآن إلى دراسة عامل آخر هام في تحديد جودة الأنظمة المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية وهو قدرة هذا النظام على إزالة التداخل الحاصل على الوصلة الصاعدة، حيث ينتج هذا النوع من التداخل بسبب وجود عدة مستخدمين يرسلون باستخدام نفس المصادر الزمنية والترددية نحو محطة القاعدة الخاصة بخدمة كل منهم.

بما أنه قد أصبح لدينا عدة مستخدمين ضمن الشبكة، فإن الإشارة المستقبلية في نظام Massive MIMO تعطى بالعلاقة:

$$Y_{Massive MIMO} = \sum_{i=1}^{k=8} g_i s_i + n_i \quad (11)$$

حيث تعبر s_i عن إشارة المعلومات المرسل من المستخدم رقم i على الوصلة الصاعدة نحو مصفوفة هوائيات محطة القاعدة، بينما تشير g_i إلى استجابة القناة بين المستخدم i ومحطة القاعدة، بينما تعبر n_i عن الضجيج المرافق لإشارة المستخدم i .

وكما ذكرنا سابقاً، لتخمين إشارة المعلومات عند المستقبل يتم استخدام شعاع تجميع (combining vector) للإشارة المستقبلية من كل مستخدم، ويتم اختيار مخطط التجميع في هذه الحالة MMSE (Minimum Mean Square Error) لقدرته على إزالة آثار الضجيج والتداخل الناتج عن تعدد المستخدمين. عندها تصبح الإشارة المخمنة المستلمة من المستخدم k كالتالي:

$$\hat{S}_k = V_k^H \times Y_{Massive MIMO} = V_k^H g_i s_i + V_k^H n_i \quad (12)$$

وبالتالي فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل (SINR) تعطى بالعلاقة [2]:

$$\begin{aligned} SINR_{Massive MIMO} &= \frac{E\{|V_k^H g_k s_k|^2\}}{E\left\{\left|\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K V_k^H g_i s_i + V_k^H n_i\right|^2\right\}} = \quad (13) \\ &= \frac{|V_k^H g_k|^2 p}{V_k^H \left(p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K g_i g_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right) V_k} \\ &\leq p g_k^H \left(p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K g_i g_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right)^{-1} g_k \end{aligned}$$

$$V_k = \left(p \sum_{i \neq k}^K g_i g_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right)^{-1} g_k \quad \text{حيث أن: } g_k$$

أما في حالة الخلايا الصغيرة (Small Cells) فإن الإشارة المستقبلية من قبل نقطة الوصول رقم l تعطى بالعلاقة:

$$Y_{small\ cells} = \sum_{i=1}^{k=8} h_{il} s_i + n_{il} \quad (14)$$

حيث تعبر h_{il} عن استجابة القناة بين جهاز المستخدم رقم i ونقطة الوصول رقم l . ونعبر عن نسبة الإشارة إلى الضجيج SINR عند نقطة الوصول رقم l مع أخذ الإشارة الواردة من جهاز المستخدم رقم k بعين الاعتبار كما يلي:

$$SINR_{small\ cells} = \max_{l \in \{1, L\}} \frac{E\{|h_{kl} s_k|^2\}}{E\left\{\left|\sum_{i \neq k}^K h_{il} s_i + n_l\right|^2\right\}} = \max_{l \in \{1, L\}} \frac{|h_{kl}|^2 p}{p \sum_{i \neq k}^K |h_{il}|^2 + \sigma_{UL}^2} \quad (15)$$

حيث أنه وكما ذكر سابقاً فإن جهاز المستخدم يخدم من قبل نقطة الوصول التي تؤمن أعلى ربح للقناة.

أما في حالة شبكة Massive MIMO الخالية من الخلايا (Cell Free Massive MIMO) فإن كل مستخدم يتم تخديمه من قبل كافة نقاط الوصول وبالتالي فإن الإشارة المستقبلية من جهاز المستخدم رقم l على الوصلة الصاعدة تعطى بالعلاقة:

$$Y_{Cell\ Free} = \sum_{i=1}^{k=8} h_i s_i + n \quad (16)$$

وكما هو الحال في نظام Massive MIMO فإنه لكشف الإشارة المستقبلية من جهاز المستخدم رقم k يتم ضرب شعاع التجميع $V_k \in C^l$ مع الإشارة المستقبلية $Y_{Cell\ Free}$:

$$\hat{S}_k = V_k^H \times Y_{Cell Free} = V_k^H h_i s_i + V_k^H n \quad (17)$$

وبالتالي فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل SINR تعطى بالعلاقة:

$$SINR_{Cell Free} = \frac{E\{|V_k^H h_k s_k|^2\}}{E\left\{\left|\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K V_k^H h_i s_i + V_k^H n\right|^2\right\}} = \quad (18)$$

$$\frac{|V_k^H h_k|^2 p}{V_k^H \left(p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K h_i h_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right) V_k}$$

$$\leq p h_k^H \left(p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K h_i h_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right)^{-1} h_k$$

$$V_k = \left(p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K h_i h_i^H + \sigma_{UL}^2 I_M \right)^{-1} h_k \quad \text{حيث أن:}$$

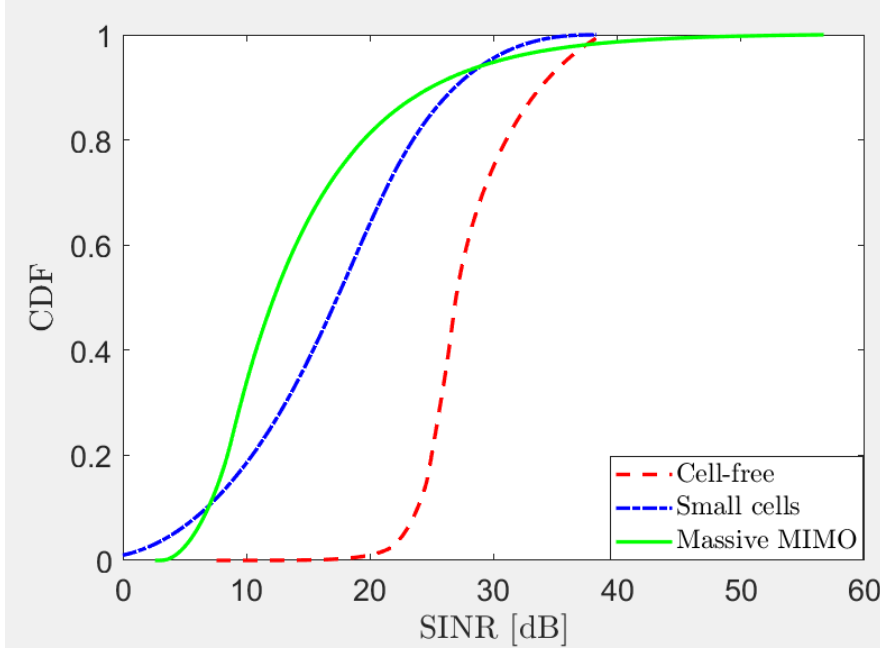
1.3.4 - إعداد المحاكاة:

سوف نفترض نفس البارامترات المستخدمة ضمن الفقرة السابقة في المحاكاة ونفس نموذج ربح القناة، مع زيادة عدد أجهزة المستخدمين ليصبح ثمانية مستخدمين ($K=8$) ضمن نطاق الشبكة المدروسة بدلاً من مستخدم وحيد لنتمكن من دراسة حالة التداخل التي يمكن أن تحصل وذلك من خلال رسم منحنيات لتابع التوزيع التراكمي لنسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل (SINR) على الوصلة الصاعدة للأنظمة الثلاث وفقاً لمعادلات SINR السابقة.

2.3.4 - نتيجة المحاكاة:

بملاحظة الشكل (14) وبالمقارنة مع الشكل (11) نجد أن هناك إزاحة إلى اليسار في منحنيات تابع التوزيع التراكمي نتيجة لإدخال عدة مستخدمين ضمن بيئة المحاكاة وتأثير

التداخل فيما بينهم على جودة الإشارة المستقبلية. ونجد أن نظام Massive MIMO الخليوي يقدم تفاوت كبير بالأداء يصل حتى 50 [dB] تبعاً للمواقع المختلفة لأجهزة المستخدم.



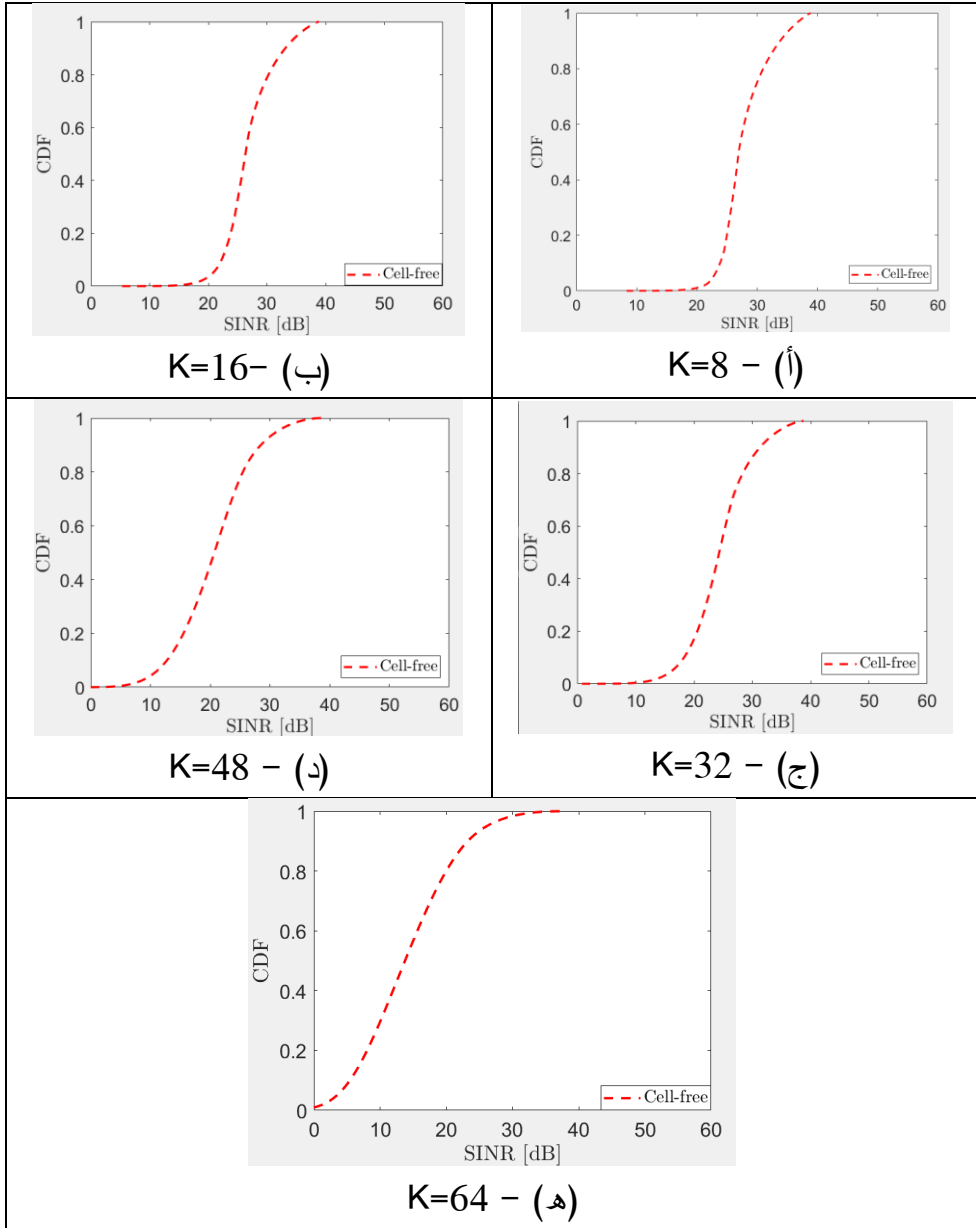
الشكل (14) - تابع التوزيع التراكمي ل SINR من أجل أنظمة الاتصال المختلفة - حالة ثمانية مستخدمين

ونلاحظ هنا أن نظام Cell Free Massive MIMO بخلاف ما كان الأمر عليه في حالة جهاز المستخدم الواحد، يتفوق بالأداء بشكل كبير على نظام Small Cells وذلك نتيجة المعالجة المشتركة للإشارة المستقبلية من كل جهاز مستخدم من قبل نقاط الوصول المحيطة بها وهذا الأمر غير موجود في نظام الخلايا الصغيرة كون كل نقطة وصول مزودة بهوائي واحد ويتم تخديم جهاز المستخدم من قبل نقطة الوصول التي تقدم أفضل

دراسة وتحليل فعالية نظام الاتصال الضخم متعدد المداخل والمخارج الخالي من الخلايا (CF-MM)

ريح للقناة فقط مما يقلل من قدرتها على إزالة التداخل. وهذا يعني أن نظام Cell Free Massive MIMO يكون مرغوب أكثر في حال تعدد المستخدمين وهو ما يوافق النتائج التي تم الحصول عليها في المرجع [3].

نقوم الآن بدراسة تابع التوزيع التراكمي ل SINR بالنسبة لنظام Cell Free المقترح لنتحقق من أهمية أن يكون عدد نقاط الوصول أعلى من عدد المستخدمين كما في الحالة السابقة حيث كان هناك 64 نقطة وصول تخدم 8 مستخدمين، ونقارن هذه الحالة مع أعداد مختلفة من المستخدمين حيث نفترض قيم 64, 48, 32, 16, 8 مع $K=8$ نفس العدد من نقاط الوصول المساوي ل 64 نقطة وصول، ويتم إيضاح النتيجة في الشكل (15).



الشكل (15) - تابع التوزيع التراكمي ل SINR من أجل نظام Cell Free من أجل

أعداد مختلفة للمستخدمين

نجد من الشكل (15-ب)) أن زيادة عدد المستخدمين حتى $K=16$ لم يؤثر على أداء النظام وهو ما يكافئ نسبة بين عدد المستخدمين إلى عدد نقاط الوصول (K/N_{AP}) قدرها 25%، وفي الشكل (15-ج)) مع افتراض ارتفاع عدد المستخدمين حتى $K=32$ ($K/N_{AP} = 0.5$) نلاحظ انخفاض طفيف في نسبة SINR مع بقاؤها ضمن قيم جيدة، أما في الشكل (15-د)) حيث أن النسبة $K/N_{AP} = 0.75$ ، نجد أن هناك انخفاض بمقدار 50% في نسبة SINR ناتج عن ازدياد عدد المستخدمين واقترابهم من عدد نقاط الوصول.

بينما في الشكل (15-ه)) نجد تراجعاً كبيراً وهاماً في أداء نظام Cell Free مع ازدياد عدد المستخدمين ووصولهم إلى عدد يتساوى مع عدد نقاط الوصول المخدمة لهم ($K/N_{AP} = 1$)، حيث أن معظم المستخدمين يظهرون نتائج سيئة وقرابية من الصفر حتى الأداء الموحد الذي كان يمتاز به هذا النظام تم فقده مما يعطي أهمية لضرورة الأخذ بالاعتبار بأن تكون أعداد نقاط الوصول أكبر من عدد المستخدمين بما لا يقل عن الضعف.

4.4- قدرة نظام Cell Free Massive MIMO على تركيز الإشارة نحو المستخدم

المطلوب على الوصلة الهابطة:

نركز في هذه الفقرة على الوصلة الهابطة والفائدة التي سوف نحصل عليها عند زيادة شدة الإشارة باتجاه المستخدم المرغوب، وذلك لأنه يوجد عدة نقاط وصول ترسل إشارتها في نفس اللحظة نحو هذا المستخدم. وبالتالي من خلال الاستفادة من كافة نقاط الوصول التي تخدم المستخدم سواء كان ربح قناتها مرتفعاً أو منخفضاً وتطبيق إزاحة طورية

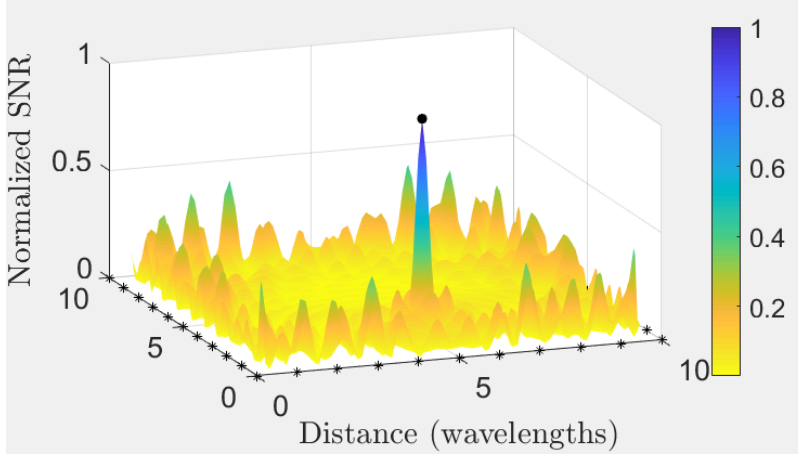
مناسبة لكل نقطة وصول يمكن نظرياً الحصول على إشارة جيدة ومركزة في أي نقطة مرغوبة ضمن منطقة المحاكاة، وهذا ما نسعى للتحقق منه في هذا الجزء من العمل.

نفترض أن بيئة المحاكاة تمثل بيئة انتشار داخلية على شكل مربع يتضمن 40 نقطة وصول موزعة على أضلاعه الأربعة بشكلٍ منتظم وتقدر الأبعاد فيما بين نقاط الوصول نسبةً لطول الموجة، وبفرض أن طول الموجة يبلغ $\lambda_{cm} = 10[cm]$ (الطول الموجي المقابل لتردد قدره [3GHz]). ونفترض أننا نريد تركيز الاستطاعة في نقطة واحدة ضمن هذا المربع والتي تعبر عن المستخدم المرغوب نحدد موقعها من خلال خوارزميات تحديد جهة ورود الإشارة، وذلك بفرض أن نموذج الانتشار المستخدم هو نموذج الفضاء الحر (free-space propagation pathloss).

نقوم بإنشاء رسم ثلاثي الأبعاد لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR المعيارية إلى SNR العظمى، لتتراوح قيم SNR ضمن المنطقة المدروسة بين الصفر والواحد كما هو موضح في الشكل (16) الناتج عن عملية المحاكاة.

نلاحظ من الشكل (16) أن ضبط الإزاحة الطورية بين نقاط الوصول المختلفة يؤدي إلى تركيز الاستطاعة ضمن دائرة لا يتعدى قطرها نصف طول الموجة مما يعني تركيز الإشارة نحو جهاز المستخدم المرغوب وتجنب التداخل مع الأجهزة المجاورة الأخرى للمستخدمين دون أي استهلاك إضافي للطاقة من قبل نقاط الوصول. يعطي هذا ميزة إضافية ودافع أكبر نحو اعتماد نهج الشبكات الخالية من الخلايا ذات العدد الكبير من نقاط الوصول في أنظمة الاتصالات المستقبلية من الجيل السادس (6G) وتتوافق هذه النتائج مع الدراسة المرجعية [3].

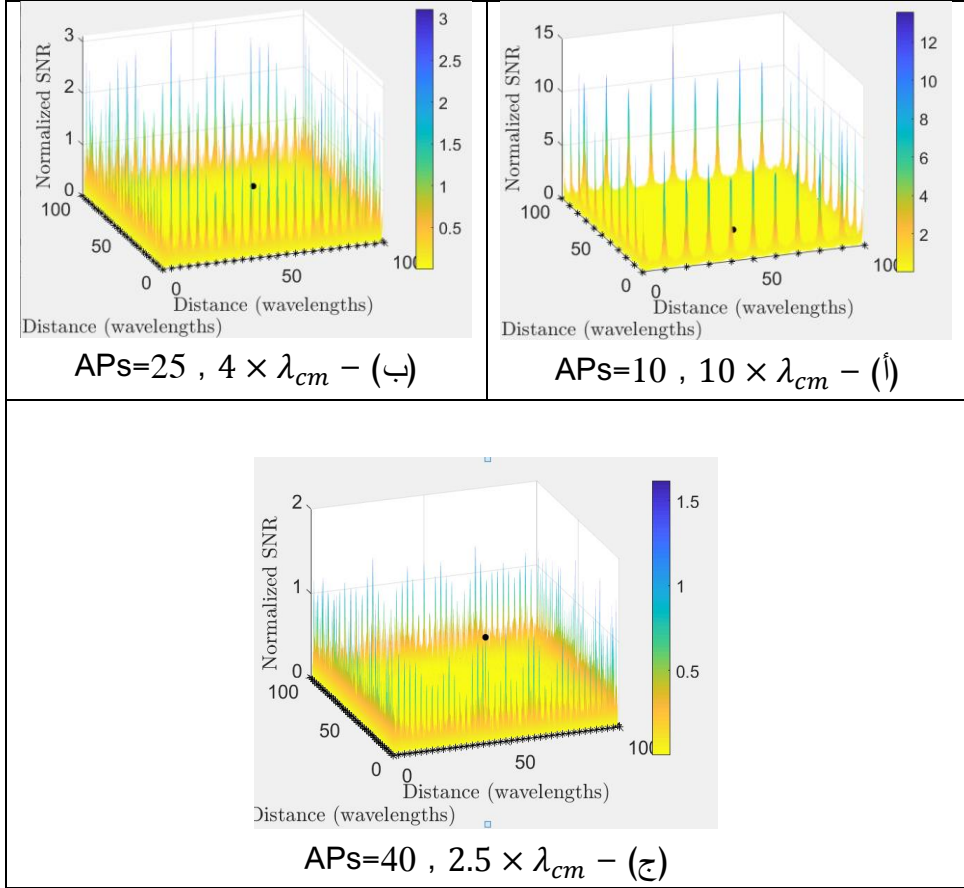
ومن أجل مساحة أكبر للمنطقة المدروسة بما يتناسب مع الواقع العملي، فإننا نحتاج إلى دراسة عدد نقاط الوصول والتباعد فيما بينها لنحصل على نتيجة جيدة تقارب النتيجة التي تم الحصول عليها في المثال السابق.



الشكل (16) – Normalized SNR في نقاط مختلفة ضمن منطقة المحاكاة

لنفرض أن لدينا بيئة انتشار داخلية على شكل مربع له الأبعاد $10 \times 10 [m]$ ونريد اختبار قدرة نظام Cell Free Massive MIMO على تركيز الإشارة نحو المستخدم المرغوب من خلال دراسة الوصول إلى الحالة الأمثل للتباعد بين نقاط الوصول وعددها لكل من أضلاع المربع من أجل منطقة المحاكاة المفترضة وذلك بحساب Normalized SNR، ويتم حساب ربح القناة هنا من خلال استخدام نموذج الانتشار في الفضاء الحر.

يتم اختبار ثلاث حالات للمقارنة فيما بينها، نفترض عدد نقاط الوصول في الحالة الأولى $N_1 = 10$ APs على كل ضلع، وبالتالي يكون التباعد بين نقاط الوصول $10 \times \lambda_{cm}$ ، بينما يكون عدد نقاط الوصول في الحالة الثانية $N_2 = 25$ APs، وبالتالي يكون التباعد بين نقاط الوصول $4 \times \lambda_{cm}$ ، وفي الحالة الثالثة يكون عدد نقاط الوصول $N_2 = 40$ APs، وبالتالي يكون التباعد بين نقاط الوصول $2.5 \times \lambda_{cm}$. وتوضح نتائج هذه المحاكاة في الشكل (17).



الشكل (17) - Normalized SNR من أجل أعداد مختلفة لنقاط الوصول لبيئة

محاكاة مربعة $10 \times 10 [m]$

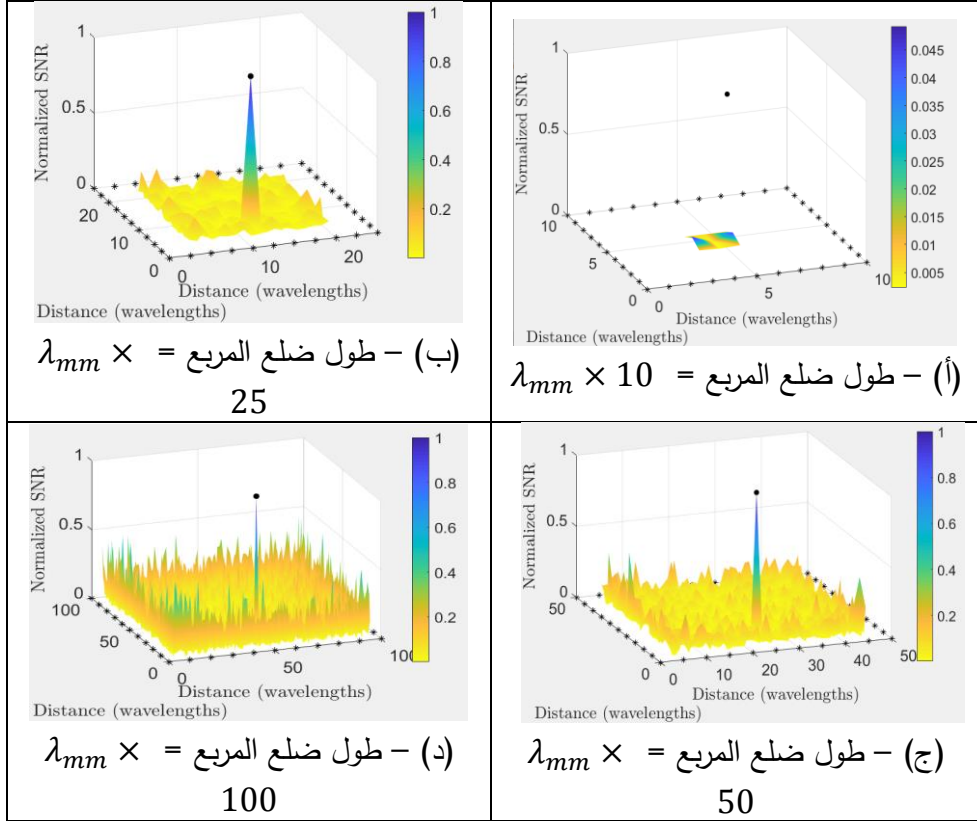
نجد من الشكل (17 (أ)) أن استخدام 10 نقاط وصول في كل من أضلاع المربع والبالغ طوله $10 [m]$ الممثل لبيئة المحاكاة، الموافق لتباعد بين نقاط الوصول قدره $10 \times \lambda_{cm}$ يؤدي إلى نتيجة غير مرضية حيث أن هذا التباعد الكبير بين نقاط الوصول يؤدي إلى Normalized SNR ضمن المنطقة المرغوبة لا تتجاوز 0.07 بينما في الشكل (17 (ب)) نجد أن استخدام 25 نقطة وصول وبالتالي تباعد بين نقاط الوصول قدره $4 \times \lambda_{cm}$ يؤدي إلى تحسن SNR عند المنطقة المرغوبة لتصل النسبة

إلى 0.7 لكنها تبقى دون الحد المطلوب، أما الشكل (17 ج)) فيوضح نتيجة استخدام 40 نقطة وصول، وبالتالي تباعد بين نقاط الوصول قدره $2.5 \times \lambda_{cm}$ والذي يعطي Normalized SNR مساويةً 1 عند المنطقة المرغوبة مع نسبة SNR منخفضة جداً في باقي مناطق المحاكاة باستثناء النقاط القريبة جداً من نقاط الوصول.

بالتالي، بناءً على النتائج السابقة يمكن اعتبار التباعد بين نقاط الوصول بمقدار $2.5 \times \lambda_{cm}$ هو الأفضل في تركيز الإشارة نحو المستخدم المرغوب وحماية باقي المستخدمين من التداخل.

حالة الأمواج الميليمترية:

نقوم الآن باختبار قدرة نظام Cell Free Massive MIMO على تركيز الإشارة نحو المستخدم المرغوب على الوصلة الهابطة في حالة استخدام الأمواج الميليمترية التي يتراوح نطاقها الترددي ضمن المجال [28-300] GHz والتي تعتبر تقنية أساسية من تقنيات الجيل الخامس كونها توفر عرض حزمة كبير وبالتالي توفر المزيد من سعة المستخدمين ومعدلات نقل البيانات المرغوبة، حيث نعتمد تردداً للإرسال قدره 28 GHz بدلاً من التردد 3 GHz في المحاكاة السابقة. وبالتالي يكون طول الموجة في حالتنا هذه $\lambda_{mm} = 10.714$ [mm]. نعتمد بنية المحاكاة لتكون على شكل مربع يتضمن عدداً من نقاط الوصول على أضلاعه وتكون موزعة بشكل منتظم، وسنختبر حالات مختلفة من مقدار لتباعد بين نقاط الوصول، حيث نفترض وجود 10 نقاط وصول (Aps) لكل من أضلاع المربع، وندرس حالات تباعد مختلفة بين الهوائيات بحيث نفترض طول ضلع المربع يساوي: 10 و 25 و 50 و 100 ضعف من طول الموجة ونقارن بينها لاختيار الحالة الأمثل.



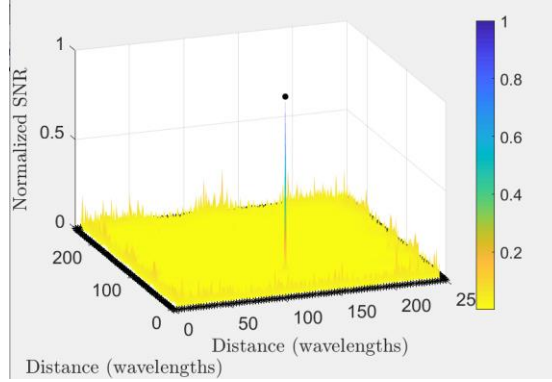
الشكل (18) - Normalized SNR من أجل أطوال أضلاع مختلفة لبيئة المحاكاة مع

$$APs = 10$$

نجد من الشكل (18 (أ)) أن وجود تباعد بين الهوائيات من رتبة طول الموجة (λ_{mm}) لا يقدم النتيجة المرغوبة حيث تكون Normalized SNR ضمن المنطقة المراد تركيز الإشارة فيها لا تتعدى 0.045 من القيمة العظمى المرغوبة على الرغم من انعدام الإشارة في باقي مناطق المحاكاة إلا أن النسبة التي تم تركيزها في المنطقة المرغوبة لا تعتبر جيدة. أما في حال وجود تباعد بين الهوائيات قدره $2.5 \times \lambda_{mm}$ فإنه يوفر نتائج جيدة جداً خصوصاً مع تخفيض الإشارة المرسله نحو النقاط الأخرى ضمن المحاكاة وتركيز إشارة جيدة مع SNR مثالية في المنطقة المرغوبة الشكل (18 (ب))، أما في حال زيادة

التباعد بين الهوائيات حتى $5 \times \lambda_{mm}$ و $10 \times \lambda_{mm}$ نجد أنه وكما هو موضح في الشكل (18 ج و د)) أن تركيز الإشارة في المنطقة المرغوبة تبقى جيدة لكن يكون هناك مستويات عالية ل Normalized SNR في باقي نقاط منطقة المحاكاة مما يعني تداخلاً كبيراً على الوصلة الهابطة باتجاه المستخدمين الآخرين وهذا بالتأكيد أمر غير مرغوب به. وبالتالي يمكن أن نستنتج من الشكل (18) أن حالة التباعد بين الهوائيات وقدرها $2.5 \times \lambda_{mm}$ تحقق أفضل أداء من حيث تركيز الإشارة عند المستخدم المرغوب وتقليل التداخل الموجه نحو المستخدمين الآخرين في حالة استخدام الأمواج الملي مترية.

ولمقاربة حالة أكثر واقعية لبيئة داخلية نعتبر طول المربع مساوي إلى 250 ضعف من طول الموجة λ_{mm} ومن أجل موافقة حالة التباعد $2.5 \times \lambda_{mm}$ نختار عدد نقاط الوصول لكل ضلع بحيث يساوي 100 نقطة وصول وتظهر النتائج في الشكل (19). ونلاحظ من الشكل (19) أنه يتم تركيز الإشارة المرغوبة في نقطة ضيقة جداً لا تتجاوز حجم الجهاز المستقبل المرغوب بينما لا تتعدى SNR 0.005 من القيمة العظمى في أغلب مناطق المحاكاة مما يعني التسبب بتداخل شبه معدوم للتجهيزات ضمن منطقة المحاكاة، مع وجود بعض النقاط على الأطراف تصل Normalized SNR فيها حتى 20% من القيمة العظمى ويعود هذا لقربها من نقاط الوصول الموزعة على أطراف منطقة المحاكاة.



الشكل (19) – Normalized SNR من أجل حالة تباعد بين نقاط الوصول $2.5 \times \lambda_{mm}$ و APs=100

5. الاستنتاجات والتوصيات:

- يتفوق النظام الخالي من الخلايا على الشبكات الخليوية التقليدية فيما يخص معدلات نقل البيانات التي يمكن تحقيقها عند المستخدمين، حيث يقدم خدمة جيدة وموحدة ضمن نطاق الشبكة اللاسلكية وقد تمت مقارنة حالة تخفيض عدد نقاط الوصول وتزويد كل منها بعدد أكبر من الهوائيات إلا أن حالة العدد الأكبر من نقاط الوصول والموزعة جغرافياً على كامل منطقة التغطية قدم أداءً أفضل.
- أظهر نظام Cell Free Massive MIMO تفوقاً على أنظمة Massive MIMO و Small Cells فيما يخص التقليل من الاختلافات في نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR في الوصلة الصاعدة ضمن نطاق تغطية الشبكة اللاسلكية حتى عندما تم زيادة عدد هوائيات محطة القاعدة إلى أكثر من الضعف فإن نظام Cell Free قد حافظ على تفوقه من أجل معظم حالات تواجد المستخدمين.

- أظهر نظام Cell Free Massive MIMO قدرة عالية على إزالة التداخل من خلال التعاون بين نقاط الوصول المختلفة لخدمة كل من تجهيزات المستخدمين (UEs) وتمت دراسة ذلك من خلال مقارنة منحنيات تابع التوزيع التراكمي (CDF) ل SINR وكذلك تمت دراسة حالة زيادة عدد المستخدمين إلى عدد يقارب نقاط الوصول بالنسبة لنظام Cell Free وقد أدى ذلك إلى تدهور كبير بالأداء مما يؤكد ضرورة اعتماد هذا النظام على عدد كبير من نقاط الوصول يزيد على عدد المستخدمين بما يتجاوز الضعف.
- أظهر نظام Cell Free Massive MIMO قدرة عالية على تركيز الإشارة عند المستخدم المرغوب على الوصلة الهابطة سواء في حالة استخدام ترددات بحدود [3 GHz] أو في حالة استخدام الأمواج الملي مترية بتردد [28 GHz]. وقد أظهرت النتائج في كلتا الحالتين أن وجود تباعد قدره 2.5 من طول الموجة بين نقاط الوصول تقدم أداءً أفضل.
- نقترح متابعة دراسة هذا النظام الذي يعد واعدًا بالنسبة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية المستقبلية المعتمدة على الهوائيات المتعددة من خلال التركيز على دراسة خوارزميات معالجة الإشارة التي تشمل تخمين القناة، التجميع، والتشفير المسبق لتتناسب وتحقيق أكبر فائدة منه.

6. المراجع:

- 1- Interdonato, G., Björnson, E., Quoc Ngo, H. et al. R2019, **Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications.** J Wireless Com Network 2019, 197 <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1507-0>
- 2- J. Zhang, E. Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang and D. J. Love. R2020, **Prospective Multiple Antenna Technologies for Beyond 5G.** IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 8, pp. 1637-1660.
- 3- Ö. Demir, E. Björnson and L. Sanguinetti. R2021, **Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO.** Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 14, No. 3-4, pp 162-47.
- 4- S. Chen, J. Zhang, Jing Zhang, E. Bjornson, and Bo Ai, R2021. **A Survey on User-Centric Cell-Free Massive MIMO Systems.** Cornell University. PP 1-67.
- 5- H. PAPADOPOULOS, C. WANG, O. BURSALIOGLU, X. HOU, and Y. KISHIYAMA. R2016. **Massive MIMO Technologies and Challenges towards 5G.** IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E99-B, NO.3.

6- A. Kostopoulos, I. P. Chochliouros, I. Giannoulakis, A. Kourtis and E. Kafetzakis. R2018. **Small Cells-As-A-Service in 5G Networks**, IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), pp. 1-5.

7- A. Alwarafy, A. Sulyman, A. Alsanie, Saleh A. Alshebeili, Hatim M. Behairy. R2017. **Path-Loss Channel Models for Receiver Spatial Diversity Systems at 2.4 GHz**, International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2017, Article ID 6790504, 12 pages.

8- N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J. Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes, Ke Guan, Y. Hu, X. Huang, J. Hultkonen, J. Miquel Jornet, M. Katz, R. Nilsson, E. Panayirci, K. Rabie, N. Rajapaksha, M. Javad Salehi, H. Sardeddeen, Tommy Svensson, Oskari Tervo, Antti Tolli, Qingqing Wu, Wen Xu. R2020. **White Paper on Broadband Connectivity in 6G**.

9- H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson and T. L. Marzetta, R2020. **Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells**. [Mar 17 1834-1850], in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 5, pp. 3623-3624, May 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2974209.