

Study of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Technology Performance over AWGN Channel and Rayleigh Fading Channel

Dr. Haidara Abdalla*

Dr. Farah Jnaikheh**

(Received 14 / 4 / 2024. Accepted 25 / 6 / 2024)

□ ABSTRACT □

The design of the next generation of wireless networks depends on introducing significant improvements and uses highly spectral efficiency multiple access technologies due to the limited bandwidth resources available. As maintaining connectivity forms a challenge to spectral efficiency, and there is no single basic technology that can fit all 5G requirements, NOMA has become an option available for 5G and beyond because it is a promising technology that would satisfy the low latency requirements, huge number of connections and high data rate for this generation's networks.

This research examined this technique and compared it with traditional OMA techniques, explaining the principle of its functioning, and then examining mobile NOMA communication system performance over AWGN channel by evaluating BER performance versus SNR in addition to Rayleigh fading channel through studying the achievable capacity versus transmit power, as well as BER performance versus transmit power.

Keywords: NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access, Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel, Rayleigh fading channel, NOMA for uplink, NOMA for downlink, BER: Bit Error Rate, achievable capacity.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Associate Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering, Al-Rasheed International Private University for Science & Technology, Syria. haidara-abdalla@ru.edu.sy

** Assistant Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering, Al-Rasheed International Private University for Science & Technology, Syria. Farah-jnaikheh@ru.edu.sy

دراسة أداء تقنية الوصول المتعدد غير المتعامد عبر قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف وقناة خفوت ريليه

د. حيدرا عبد الله*

د. فرح جنيكه**

(تاريخ الإيداع 14 / 4 / 2024. قُبِلَ للنشر في 25 / 6 / 2024)

□ ملخص □

يعتمد تصميم الجيل القادم من الشبكات اللاسلكية على إدخال تحسينات كبيرة، ويستخدم تقنيات الوصول المتعدد ذات الكفاءة الطيفية العالية نظراً لمحدودية موارد النطاق الترددي المتاحة، ولأن الحفاظ على الاتصال يمثل تحدياً للكفاءة الطيفية، إضافة إلى أنه لا توجد تقنية أساسية واحدة يمكن أن تناسب جميع احتياجات الجيل الخامس، لذلك فقد أصبحت تقنية الوصول المتعدد غير المتعامد (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access) خياراً متاحاً لأنظمة الجيل الخامس الخلوية وما بعد لأنها تقنية واعدة لتلبية متطلبات زمن الوصول المنخفض وعدد الاتصالات الهائل ومعدل البيانات المرتفع لشبكات هذا الجيل.

تناول هذا البحث دراسة تقنية NOMA ومقارنتها مع تقنيات الوصول المتعدد المتعامد التقليدية وتوضيحاً لمبدأ عملها، تمّ درس أداء نظام الاتصالات المتنقلة المستخدمة لـ NOMA عبر قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف من خلال تقييم أداء معدل خطأ البت مقابل نسبة الإشارة إلى الضجيج، وعبر قناة خفوت ريليه أيضاً من خلال دراسة السعة العظمى مقابل طاقة النقل، وأداء معدل خطأ البت مقابل طاقة النقل أيضاً.

الكلمات المفتاحية: الوصول المتعدد غير المتعامد، قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف، قناة خفوت ريليه، NOMA في الوصلة الصاعدة، NOMA في الوصلة الهابطة، معدل خطأ البت، السعة العظمى.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات، كلية الهندسة، جامعة الرشيد الدولية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا، سورية، البريد الإلكتروني:

haidara-abdalla@ru.edu.sy

** مديرة، قسم هندسة الاتصالات، كلية الهندسة، جامعة الرشيد الدولية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا، سورية، البريد الإلكتروني:

Farah-jnaikheh@ru.edu.sy

مقدمة:

تواجه شبكات الاتصالات في المستقبل مسائل مختلفة، من أجل نقل البيانات الضخمة غير المتجانسة، وتسهيل حركة المرور، وتخدم عدد كبير من المستخدمين. وبما أن تقنية الجيل الرابع اللاسلكية وما بعد تعتمد بشكل كبير على تقنيات الوصول المتعدد لذلك تتزايد مساحة البحث باستمرار من أجل تطوير مخططات للوصول المتعدد MA: Multi (Access) أكثر تقدماً وقوة من أجل تلبية الاحتياجات المتغيرة. لذلك يصبح من المهم تحليل المخططات المختلفة لتحديد مخطط MA المناسب لشبكات الجيل الخامس 5G، ومقارنة مع التطور طويل المدى (LTE: Long Term Evolution) فإن السرعة والإنتاجية العالية، والجودة الأفضل للخدمات، ووقت الوصول المنخفض، والكفاءة الطيفية، وزيادة الطلب على السعة هي بعض السمات القليلة للجيل الخامس 5G وشبكات الاتصالات اللاسلكية المستقبلية فقد تم تصميم 5G الداعم لإنترنت الأشياء (IoT: Internet Of Things) 5G IoT من أجل تقديم مجموعة واسعة من التطبيقات الرئيسية مثل: المباني الذكية، والسيارات، والنقل الذكي في المناطق المأهولة بالسكان، والمراقبة البيئية، لذلك تتمثل الخطوة الهامة في نشر إنترنت الأشياء من خلال ضمان كفاءة الاتصال لعدد كبير من أجهزة مستخدمي 5G مع تغيير مفاهيم تعريف الطاقة وإدارة متطلبات جودة الخدمة (QOS: Quality of Service) الضرورية [1]، حيث أن الهدف الأساسي للجيل القادم للشبكات اللاسلكية هو زيادة كفاءة الطاقة إلى الحد الأقصى، لذلك تجري الآن العديد من الأبحاث في نقل الطاقة اللاسلكية، التي تصب اهتمامها في البحث عن الآفاق المستقبلية لتحسين كفاءة استخدام الطاقة في نقل الطاقة اللاسلكية (WPT: Wireless Power Transfer) ونقل المعلومات اللاسلكية (WIT: Wireless Information Transfer) والتي تساهم في بناء نظام الاتصالات اللاسلكية، وقد أدى ذلك في الآونة الأخيرة إلى تطور التكنولوجيا المعروفة باسم نقل الطاقة والمعلومات اللاسلكية المتزامنة (SWIPT: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer)، والتي تهدف إلى تحسين عمر بطارية الجهاز عن طريق توصيل البيانات والكهرباء في آن واحد، ولذلك أصبحت إشارات التردد الراديوي تعرف بمرسلات المعلومات والطاقة [2].

يمكن تصنيف تقنيات الوصول بناءً على طريقة تخصيص الموارد للمستخدمين إلى تقنيات متعامدة وغير متعامدة، وتوفر تقنيات الوصول المتعدد المتعامد (OMA: Orthogonal Multiple Access) وصولاً متعامداً إلى المستخدمين إما في الوقت، أو التردد، أو الكود، أو الفضاء، مثل الوصول المتعدد بتقسيم الزمن (TDMA: Time Division Multiple Access) أو الوصول المتعدد بتقسيم التردد (FDMA: Frequency Division Multiple Access) أو الوصول المتعدد بتقسيم الرموز (CDMA: Code Division Multiple Access) معاً أو الوصول المتعدد بتقسيم التردد المتعامد (OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access) أو ...، حيث يتم في منهجيات تقنيات الوصول المتعامد OMA تخصيص مستخدم كل خلية بالموارد حصرياً وبالتالي... لا يوجد تداخل بين المستخدمين، لذلك يمكن تنفيذ منهجيات الكشف المنخفضة التعقيد في جهاز الاستقبال لاستعادة الإشارات المرسله، ولكن من ناحية أخرى لا يمكن لأي من هذه التقنيات تلبية المتطلبات العالية لأنظمة الوصول إلى الراديو في المستقبل [3].

أهمية البحث وأهدافه:

نمت الاتصالات اللاسلكية للجيل الخامس على مدى العقدين الماضيين بشكل كبير، وأصبحت مكوناً حيوياً في حياتنا اليومية، حيث أنّ شبكات الوصول إلى الراديو في الجيل الخامس وما بعد ستستخدم التطبيقات التي تتطلب معدل مرتفع (100 ضعف معدل البيانات التي يتمتع بها المستخدم في 4G)، وزمن استجابة منخفض للغاية (خمس زمن الوصول في 4G)، وحركية كبيرة (تزداد حركة البيانات ألف مرة على الأقل أكثر من الحجم المطلوب في العقد الأخير)، وقدرة على دعم الاتصالات الضخمة [2]، ولا يمكن لأي تقنية من تقنيات الوصول المتعدد المتعامد OMA تلبية هذه الاحتياجات، كما أنّ الاتجاه الناشئ لأجهزة إنترنت الأشياء IoT وتطبيقات البيانات المتطورة تقودنا إلى محاولة الحد من استخدام الطاقة من أجل الحفاظ على صلاحية وجدوى شبكات الاتصالات المتنقلة للبقاء على المدى الطويل وتطوير الحلول التكنولوجية الجديدة لمواجهة التحديات المستقبلية، فنتيجة لذلك بدأ الباحثون العمل على تقنيات الاتصال الجديدة التي تعمل بالاقتران مع إنترنت الأشياء وخدمات الأقمار الصناعية، بالإضافة إلى تطوير الكفاءة الاقتصادية وأمن النظام في تكنولوجيا الوصول إلى الاتصالات الراديوية الخلوية.

لذلك يهدف البحث إلى دراسة تقنية NOMA والتي يمكن باستخدامها أن تساهم أنظمة الاتصالات اللاسلكية بشكل كبير في تلبية متطلبات القدرات المطلوبة في شبكات الجيل الخامس وما بعدها من الشبكات المستقبلية، وذلك من خلال توضيح الفروقات بين هذه التقنيات، وتقنيات الوصول المتعدد المتعامد المستخدمة في الأجيال السابقة، وفهم مبدأ عملها بشكل دقيق في الإرسال على الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة، كما يهدف هذا البحث إلى تقييم أداء هذه التقنية، عبر قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف (AWGN: Additive White Gaussian Noise) وقناة خفوت ريليه اللتان تعدّان من أهم نماذج القنوات التي تصادفها الإشارة اللاسلكية أثناء عبورها في الفضاء الحر.

طرائق البحث ومواده:**1- تقنية NOMA:**

تعد تقنية الوصول المتعدد غير المتعامد NOMA من أكثر التقنيات الهامة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية، والمقترحة بقوة لتلبية متطلبات قدرات شبكات الجيل الخامس، والقدرات المتوقعة للشبكات المستقبلية فيما بعد، وهي تقنية تختلف اختلافاً جوهرياً عن منهجيات الوصول المتعدد السابقة، وهذه التقنية لها نطاق طيفي واسع يسمح للمستخدمين بالاتصال بالشبكات الكثيفة، ويحسن الاستخدام الأقصى للكفاءة الطيفية للنظام، ويمكن استخدام إما مجال الطاقة (Power NOMA: Domain NOMA) أو مجال الترمز (CD-NOMA: Code Domain NOMA) من أجل تمييز تعدد إرسال الإشارات [4]، وسيتم التركيز في هذا البحث على NOMA ذات مجال الطاقة حيث يتم تعيين معاملات طاقة مميزة للمستخدمين كل على حدا وفقاً لحاجتهم، وتبعاً لظروف القناة بحيث يمكن تحقيق الأداء العالي للنظام، وهذا ما يجعل المستخدمين المتعددين يتراكبون في مجال الطاقة مع الاستفادة من فرق ربح القناة بين هؤلاء المستخدمين المتعددين.

تقسم NOMA ذات النوع المعتمد على مجال الطاقة المستخدمين إلى مجالات الطاقة لخدمة العديد من أجهزة المستخدم على نفس كتل الموارد في نفس الوقت، حيث يعمل كل مستخدم في نفس المجال، ونفس الوقت، مع تمييزه بمستويات طاقته (التراكب يكون في مجال الطاقة)، وبما أنه يوجد تداخل بين المستخدمين لذلك يعتبر استخدام ترميز

التراكب (SC: Successive Cancellation) في نهاية المرسل وإلغاء التداخل المتتالي (SIC: Successive Interference Cancellation) لفك تشفير الإشارات الواحدة تلو الأخرى وفصل المستخدمين في نهاية المستقبل للحصول على الإشارة المرغوبة من أسس فكرة NOMA، فعلى أساس ظروف القناة القويّة والضعيفة بين المستخدمين والمحطة القاعدية (BS: Base Station) يوجد هناك مستخدم قوي ومستخدم ضعيف، بحيث يمكن لمستقبل إلغاء التداخل المتتالي SIC فصل المستخدمين في كل من قنوات الوصلة الصاعدة، والوصلة الهابطة، واسترجاع الإشارات المرسلّة عند جهة المستقبل.

وتكمن الفكرة الأساسيّة لـ SIC بفصل بيانات المستخدم، بحيث يمكن لكل المستخدمين استخدام موارد التردد طوال الوقت. وبالتالي يتم فك تشفير إشارات المستخدمين على التوالي، فبعد أن يتم فك تشفير إشارة أحد المستخدمين، يتم طرحها من الإشارة المجمعة قبل فك تشفير إشارة المستخدم التالي، بمعنى آخر أنه عند تطبيق SIC يتم فك تشفير إحدى إشارات المستخدم، ومعالجة إشارة المستخدم الأخرى كتداخل، ولكن هذه الأخيرة يتم فك تشفيرها بعد ذلك بالاستفادة من الإشارات السابقة التي تمت إزالتها بالفعل. ومع ذلك، قبل تطبيق SIC يتم طلب المستخدمين وفقاً لقوة (طاقة) الإشارات الخاصة بهم، بحيث يستطيع المستقبل فك تشفير الإشارة الأقوى أولاً، ثم طرحها من الإشارة المجمعة، وعزل الإشارات الأضعف عن البقايا، ويكرّر العملية حتى يفك شيفرة الإشارة المطلوبة (مع ملاحظة أنّ كل مستخدم يتم فك تشفيره من خلال اعتبار، ومعالجة المستخدمين المتداخلين كضجيج في مستقبل الإشارة)[5].

كمثال على ذلك، تكون الإشارة البعيدة قويّة في محطة المستخدم البعيد بينما تكون الإشارة القريبة ضعيفة، ويمكن استخدام تقنية عادية وبسيطة للكشف عن إشارة المستخدم البعيد هذا ... عن طريق اعتبار إشارة المستخدم القريب الضعيفة بمثابة ضجيج. لكن في المقابل في محطة المستخدم القريب يجب استخدام آلية متقدمة للكشف عن إشارة المستخدم القريب الضعيفة، بسبب وجود إشارة المستخدم البعيد القويّة. باختصار: يتم استخدام SIC ببساطة عن طريق كشف إشارة المستخدم البعيد في محطة المستخدم القريب، ومن ثمّ طرحها من إشارة NOMA الكلية للحصول على إشارة المستخدم القريب (مثلاً يتلقى أبعد مستخدم الرسالة ويفك تشفيرها مباشرة دون استخدام تقنيات SIC، أما أقرب مستخدم فيحتاج إلى استخدام SIC من أجل فك شيفرة وإزالة بيانات المستخدمين الآخرين)[6].

يتطلب التنفيذ العملي لـ NOMA في الشبكات الخلوية قوة حسابية عالية، من أجل تخصيص الطاقة في الزمن الحقيقي، وتنفيذ خوارزميات إلغاء التداخل المتتالي. وكان من المتوقع في الوقت الذي تمّ فيه إطلاق شبكات 5G أن تكون القدرة الحسابية لكل من الهواتف، ونقاط الوصول عالية بما يكفي لتشغيل خوارزميات NOMA، وهذا ما يجعل هذه التقنية تعزّز الكفاءة الطيفية بشكل أكبر من خلال السماح لحامل فرعي واحد بخدمة العديد من المحطات الطرفية للمستخدم في وقت واحد، بالإضافة إلى كفاءة الطيف الأعلى التي تحفزها NOMA.

ويمكن تلخيص السمات الرئيسيّة لنظام NOMA على الشكل التالي:

وقت الاستجابة المنخفض: لا يوجد شرط لجدولة طلبات المستخدمين إلى المحطة القاعدية في اتصالات الوصلة الصاعدة في NOMA، وهذا يقلل من تأخير النقل.

الكفاءة الطيفية: وجود الترميز التراكبي في جهاز الإرسال، وإلغاء التداخل المتتالي SIC في جهاز الاستقبال يجعل من الممكن استخدام نفس الطيف لجميع المستخدمين، لذلك تظهر NOMA كفاءة طيفية عالية نظراً لتوافر جميع الموارد (التردد، الوقت، والرمز) لكل مستخدم، حيث يمكن للعديد من المستخدمين الاستفادة من الموارد غير المتعامدة

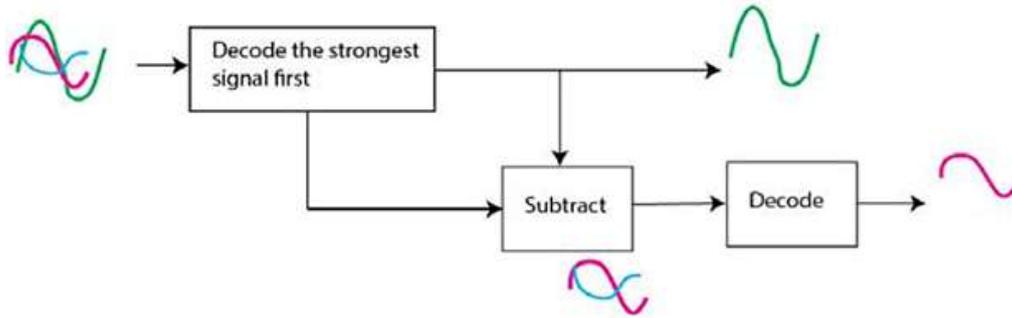
في وقت واحد مع السماح بدرجة معينة من تداخل الوصول المتعدد في أجهزة الاستقبال، أي أنه يتم تنفيذ عامل إعادة استخدام التردد في NOMA لتحقيق التوازن والمفاضلة بين إلغاء التداخل والكفاءة الطيفية. الاتصالات الضخمة: مع القدرة على دعم العديد من المستخدمين في كتلة موارد واحدة وخدمتهم وفقاً لمتطلبات جودة الخدمة QoS المتنوعة، لذلك تمتلك NOMA إمكانية دعم الاتصالات الضخمة [7,8].

2- مبدأ عمل NOMA:

يشار إلى المستخدمين القريبين من المحطة القاعدية، والذين حققوا مكاسب أعلى في القناة بالمستخدمين الأقوياء، والذين حصلوا على مكاسب القناة الضعيفة على أنهم المستخدمون الضعفاء (البعيدون). ويكون لإشارة المستخدم البعيد تداخل صغير من إشارة المستخدم القريب، أما إشارة المستخدم القريب فلها تداخل كبير من المستخدم البعيد، ويفك المستخدم القريب إشارة المستخدم البعيد أولاً قبل إشارته حيث يطرح المستخدم القريب إشارة المستخدم البعيد من إشارة NOMA المترابكة باستخدام إلغاء التداخل المتتالي SIC، ونظراً لأن المستخدم البعيد يعاني من ظروف قناة سيئة مع المحطة القاعدية، لذلك سوف يرسل المستخدم القريب للمستخدم البعيد بياناته بعد فك تشفيرها، حيث يتلقى المستخدم البعيد نسختين من نفس الإشارة، واحدة من المحطة القاعدية والأخرى من المستخدم القريب، ثم يفك المستخدم البعيد شيفرة إشارته الخاصة بشكل طبيعي حيث أنه يعاني أيضاً من تداخل إضافي طفيف، وبالتالي يتم إلغاء تداخل المستخدم البعيد، وتكون هذه البيانات المرسله من المستخدم القريب إلى المستخدم البعيد تتابعية، ويسمى هذا المفهوم بالتتابع التعاوني، وتقل احتمالية انقطاع الخدمة للمستخدم البعيد من خلال هذه العملية بالإضافة إلى زيادة الوثوقية، وتحسين جودة الإشارة، وتحقيق معدلات نقل أفضل، ويفك المستخدم القريب بعد ذلك شيفرة بياناته من الإشارة النظيفة، ونلاحظ أن المستخدم البعيد غير قادر على إلغاء التداخل من المستخدم القريب لأنه أضعف من أن يتم فك تشفيره، حيث يعتبر المستخدم الضعيف (البعيد) إشارة المستخدم القوي بمثابة ضجيج/تداخل أثناء الكشف عن الإشارة الخاصة به [9].

كما ينطوي مبدأ العمل الأساسي لـ NOMA أيضاً على تحديد عدد أزواج المستخدمين (أي المستخدم رقم 1 والمستخدم رقم 2 مثلاً) ليتم تجميعهم على قناة فرعية واحدة، وليتم تخصيص الطاقة أيضاً لأزواج المستخدمين وفقاً لظروف قناتهم، حيث يقترح نظام NOMA اختيار المستخدمين المقترنين مع بعضهم في قناة فرعية واحدة وفقاً لظروف القناة المميزة لهم مثل تجميع مستخدم ذي ظروف قناة سيئة مع مستخدم ذي ظروف قناة جيدة [6].

يوضح الشكل (1) مبدأ عمل تقنية NOMA ومفهوم SIC، حيث يتم تراكب (تجميع) جميع إشارات المعلومات الفردية في شكل الموجة الواحدة في جهة الإرسال، بينما يقوم SIC في جهاز الاستقبال بفك تشفير الإشارات واحدة تلو الأخرى حتى يحصل على الإشارة المرغوبة. ويبيّن الرسم التوضيحي (الشكل 1) تراكب إشارات المعلومات الثلاثة المشار إليها بألوان مختلفة في المرسل، وتتضمن الإشارة المستلمة في مستقبل SIC جميع هذه الإشارات الثلاثة، وتكون الإشارة الأولى التي يتم فك تشفيرها بواسطة SIC هي الأقوى لأنه يتم تخصيص أكبر قدر من الطاقة لها مقارنة بالإشارات الأخرى، بينما سيُنظر إلى إشارات المستخدمين الآخرين على أنها تداخل/ ضجيج، ثم يتم طرح الإشارة الأقوى (الأولى) التي تم فك تشفيرها، وإزالتها من الإشارة المستقبلة، وإذا كان فك التشفير مثالياً يتم الحصول بدقة على الموجة مع بقية الإشارات، و يكرّر SIC العملية حتى يجد الإشارة المطلوبة حيث تكون هي آخر إشارة تفك شيفرتها، ويعتمد نجاح SIC على الإلغاء المثالي للإشارات في خطوات التكرار، كما يجب على جهاز الإرسال تقسيم الطاقة بدقة بين الأشكال الموجية لمعلومات المستخدم وتراكبها مع بعضها، وتختلف منهجية تقسيم الطاقة هذه بالنسبة لقنوات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة [10].



الشكل(1): إلغاء التداخل المتتالي.

3- مقارنة NOMA مع تقنيات الوصول المتعدد المتعامد مثل OFDM:

يمكن تلخيص خصائص تقنيات الوصول المتعدد على النحو التالي: في TDMA يتم إرسال المعلومات لكل مستخدم في فترات زمنية غير متداخلة، لذلك تتطلب الشبكات القائمة على TDMA مزامنة توقيت دقيقة والتي يمكن أن تكون صعبة خاصة في البيئات ذات الإشارات الضعيفة أو سرعة الحركة العالية، في FDMA يتم إرسال المعلومات لكل مستخدم على نطاقات تردد مختلفة غير متداخلة لذلك تتطلب الشبكات القائمة على FDMA تخصيصاً فعالاً للتردد، في CDMA يتم إرسال المعلومات لكل مستخدم باستخدام أكواد فريدة من نوعها لذلك تتطلب الشبكات القائمة على CDMA توليداً وتوليفاً دقيقاً للأكواد.

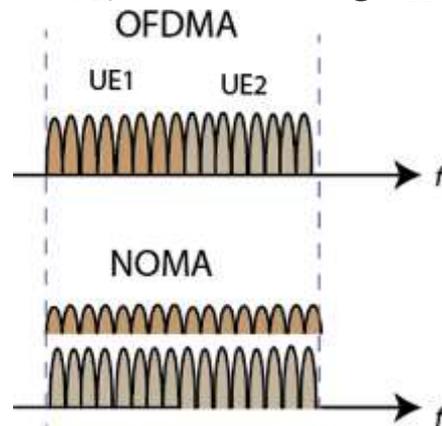
أما في تطبيقات FDMA مثل OFDMA فهو يتميز بقابلية التوسع، والتصدّي لظاهرة تعدد المسارات، وتعدد توصيلات الوصلة الهابطة، وأكثر من ذلك يمكن استخدام هذه التقنية لتطوير الأنظمة متعددة المدخل والمخرج (MIMO: Multiple Input Multiple Output) .. ، إلى جانب العديد من المزايا، هناك بعض التحديات التي تحفز الباحثين على تصميم مخططات أكثر كفاءة للوصول المتعدد، مثل التداخل بين الحوامل (ICI: Inter Carrier Interference)، نسبة الذروة العالية إلى متوسط الطاقة (PAPR: Peak to Average Power Ratio)، ومزامنة التردد والتي كانت بعض القضايا الحاسمة التي توجب حلها في OFDMA.

يتم استخدام OFDMA من أجل تخصيص المعلومات لكل مستخدم بمجموعة واحدة من الحوامل الفرعية، أي أنه يتم تخصيص كل مستخدم بقناة في المجال الترددي، ويتم نشر إشارات المستخدمين بكثافة لتحسين الكفاءة الطيفية حيث يمكن لكل مستقبل مستخدم الاستفادة من هذا التعمد لفصل إشارته الخاصة عن الآخرين ببساطة، وبشكل عام لا يمكن لنظام الوصول المتعدد المتعامد أن يستوعب الكمية الهائلة من حركة المرور اللاسلكية اليوم.

أما NOMA فهي مزيج من OFDMA مع ترميز التراكب على جانب المرسل وتقنية إلغاء التداخل المتتالي في جانب المستقبل، حيث يمكن استخدام جميع الحوامل الفرعية (الموجات الحاملة) من قبل كل مستخدم وهذا موضح في الشكل(2)، أي أنه يشترك المستخدمون المختلفون في نفس الزمن، التردد، (وربما) الرمز ولكن بمستويات طاقة مختلفة من أجل توزيع الطاقة لضمان معدل البيانات عن طريق التخفيض من احتمالات الانقطاع، وبالتالي تكمن الفكرة الأساسية لتكنولوجيا الوصول المتعدد غير المتعامد في إدخال معلومات التداخل في جهاز الإرسال وإرسال المعلومات إلى المستخدمين المتعددين في نفس المصدر الزمني والترددي مع استخدام تقنيات معالجة الإشارة لفصل إشارات المستخدمين عن بعضها البعض عن طريق الترميز التراكبي، وبالتالي توفر NOMA كفاءة طاقة أعلى من OFDMA الذي يتم فيه تخصيص موارد التردد لكل مستخدم حتى لو كان يعاني من شروط قناة جيدة أو سيئة، وبالتالي فإن

النظام العام يعاني من انخفاض الكفاءة الطيفية والإنتاجية. على العكس من ذلك في NOMA يتم تخصيص نفس المورد الترددي إلى العديد من مستخدمي الهاتف المحمول، مع ظروف قناة جيدة وسيئة في نفس الوقت، وبالتالي فإن المورد المخصص للمستخدم الضعيف يمكن استخدامه أيضاً من قبل المستخدم القوي، ويتم التخفيف من التداخل من خلال عمليات SIC في أجهزة استقبال المستخدمين، وهذا مفيد للتطبيقات التي تحتاج معدل بيانات منخفض حيث يكون تخصيص الوقت والتردد في هذه الحالة هدراً للموارد، ولهذه الأسباب فإن احتمال الحصول على كفاءة طيفية محسنة وإنتاجية عالية سوف يزداد في NOMA عما هو عليه في OFDMA، كما تمكن تقنية NOMA أيضاً من الاستفادة من التوزيع الجغرافي للمستخدمين، وخدمة المستخدمين على حافة الخلية (المستخدمون البعيدون عن المحطة القاعدية) بشكل أفضل.

بالإضافة إلى أنه في OFDMA، يتمتع المستخدم الذي لديه حالة قناة جيدة بأولوية أعلى لتقديم الخدمة له، بينما يتعين على المستخدم الذي يعاني من حالة قناة سيئة الانتظار من أجل الوصول، مما يؤدي إلى مشكلة عدم تحقيق العدالة وزمن استجابة مرتفع، وهذا النهج لا يمكنه دعم الاتصالات الضخمة، بينما يمكن لـ NOMA أن تخدم العديد من المستخدمين مع ظروف قنوات مختلفة في آن واحد، وهذا ما يوفر عدالة للمستخدم، وانخفاض زمن الاستجابة، واتصالات ضخمة جداً، مما يجعلها تتفوق على التقنيات المتعامدة الأخرى [11,12].



الشكل (2): مشاركة الطيف لمستخدمين في OFDMA، NOMA.

4- مقارنة NOMA في اتصالات الوصلة الهابطة والصاعدة للنظام الخلوي:

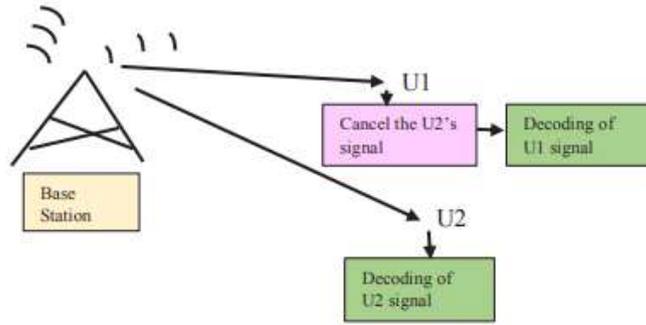
إن مبدأ NOMA هو تعيين مركبات الطاقة المختلفة للمستخدمين المتعددين في كل من أنظمة الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة، و يكون تنفيذ عملية إلغاء التداخل المتتالي SIC في جهة المستقبل في نظام NOMA للوصلة الهابطة والوصلة الصاعدة.

4-1- NOMA من أجل الوصلة الهابطة:

تقوم المحطة القاعدية في اتصالات الوصلة الهابطة لـ NOMA بتطبيق آلية تخصيص الطاقة للمستخدمين البعيدين والقربيين بإجراء التراكب للأشكال الموجية لمعلومات المستخدمين المخدمين حسب مسافة كل منهم، ويستخدم جهاز كل مستخدم منهم SIC لاكتشاف الإشارات الخاصة به.

وإن التحدي الذي يواجه المحطة القاعدية هو تحديد كيفية تخصيص الطاقة بين أشكال الموجة الخاصة بالمعلومات الفردية، وهو أمر بالغ الأهمية لـ SIC، لذلك في اتصالات الوصلة الهابطة لـ NOMA يتم تخصيص المزيد من الطاقة

لجهاز المستخدم الموجود بعيداً عن المحطة القاعدية وأقل طاقة لجهاز المستخدم الأقرب إلى المحطة القاعدية في الشبكة، كما أنّ تخصيص الطاقة مرتبط أيضاً بجودة القناة وظروفها. تتلقّى جميع أجهزة المستخدمين نفس الإشارة التي تحتوي على المعلومات لجميع المستخدمين حيث تقوم المحطة القاعدية بإرسال هذه الإشارة المترابطة إلى جميع المستخدمين على نفس القناة الفرعية مع فصل أشكال الموجة الخاصة بمعلومات المستخدمين الذين تخدمهم، ثم يقوم كل جهاز مستخدم (UE: User Equipment) بتنفيذ SIC من أجل فك تشفير الإشارة الأضعف (الأبعد) أولاً قبل فك إشارته، ثم يطرح الإشارة المفكوك تشفيرها من الإشارة المستقبلية، و يقوم مستقبل SIC بنكرار الطرح حتى يحصل الجهاز على إشارته الخاصة، وبالمقابل فإنّ المستخدم البعيد الذي لديه أعلى معامل طاقة والمساهمة إشارته بشكل أكبر في الإشارة المستقبلية فسيتم فك تشفير إشارته الخاصة أولاً ويكون قادراً على استعادة الإشارة المطلوبة مباشرة دون إجراء SIC، حيث يتم التعامل مع الإشارات الأخرى على أنها ضجيج. أي بمعنى آخر يمكن لجهاز المستخدم الموجود بالقرب من المحطة القاعدية إلغاء إشارات أجهزة المستخدمين الأبعد والتي يمكن اعتبارها كإشارات تداخل (ضجيج)، ويوضح الشكل (3) مبدأ NOMA الأساسي في اتصالات الوصلة الهابطة [6,7,13].



الشكل (3): مبدأ NOMA الأساسي في اتصالات الوصلة الهابطة بين المحطة القاعدية واثنين من المستخدمين.

4-2- NOMA من أجل الوصلة الصاعدة:

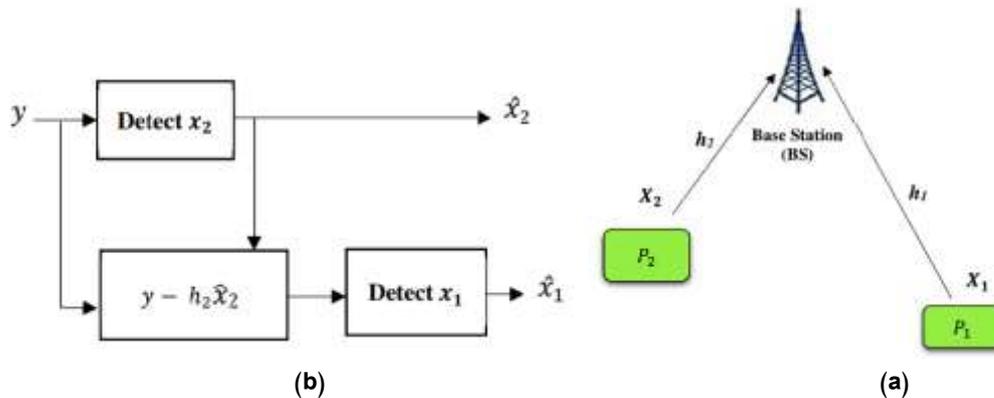
يختلف تنفيذ الوصلة الصاعدة لـ NOMA اختلافاً طفيفاً عن الوصلة الهابطة، ففي هذه الحالة تجمع الإشارات في إشارة واحدة، وبعض نقاط الخلاف هي:

طاقة النقل: على عكس NOMA في الوصلة الهابطة، فإنّ طاقة الإرسال للمستخدمين في NOMA للوصلة الصاعدة يجب ألا تكون مختلفة، ويعتمد ذلك على ظروف القناة لكل مستخدم، فإذا كانت ظروف قناة المستخدمين مختلفة بشكل كبير، فإنّ نسبة الإشارة إلى التداخل بالإضافة إلى الضجيج (SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio) المستقبلية يمكن أن تكون مختلفة إلى حدّ ما في المحطة القاعدية بغض النظر عن طاقة نقلها.

عمليات SIC: في الوصلة الهابطة لـ NOMA، يتم تنظيف إشارة المستخدم القريب من التداخل الذي يفرضه المستخدم البعيد، والذي يتم تحقيقه باكتشاف الإشارة الأقوى للمستخدم البعيد أولاً، ثم طرحها من الإشارة المترابطة، وهذا يعني أنه يتم تنفيذ عملية SIC على المستخدم القوي في اتجاه الوصلة الهابطة لإلغاء تداخل المستخدم الضعيف. على النقيض من ذلك في اتصالات الوصلة الصاعدة لـ NOMA، حيث يتم تنفيذ SIC في المحطة القاعدية من أجل كشف، وتمييز إشارات كل مستخدم. وبالتالي اكتشاف المستخدم القوي (القريب) ومعاملة المستخدمين البعيدين كتداخل، ثم يتم طرح التداخل الذي يفرضه المستخدم القريب للكشف عن المستخدم البعيد.

أداء الرّيح: إنّ مستخدم NOMA في الوصلة الهابطة له أداء متفوق من حيث الإنتاجية، بينما في أنظمة الوصلة الصاعدة تتمتع NOMA بشكل أساسي بمزايا من حيث العدالة، خاصّة بالمقارنة مع الأنظمة المتعامدة من ناحية التّحكّم بالطاقة.

قد تعمل أدوات المستخدمين في الوصلة الصاعدة مرة أخرى على تحسين قوّة الإرسال الخاصّة بهم وفقاً لمواقعهم كما هو الحال في الوصلة الهابطة، ومع ذلك نفترض هنا أنّ المستخدمين موزعون جيداً في منطقة تغطية الخلية، وأنّ مستويات الطّاقة المستقبلية من مختلف المستخدمين مفصولة فعلياً بشكل جيّد، ولكن هذا الافتراض يكون من الصّعب تنفيذه عملياً لأنّ تحسين الطّاقة يتطلّب الاتّصال بين جميع أدوات المستخدمين، ويشير الرّمز P في حالة الوصلة الصاعدة إلى طاقة الإرسال لأجهزة المستخدمين، وكشف الإشارات المرغوبة مع تخفيض التّداخل يتمّ استخدام تقنية SIC في جهاز استقبال المحطة القاعدية كما ذكرنا أعلاه، حيث تكون المحطة القاعدية قادرة على التّمييز بين إشارات المستخدم المتداخلة حتى لو كان توقيت الإرسال لها مختلف عن بعضها البعض، حيث يتمّ تخصيص مستويات طاقة فريدة للإشارات بحيث تصل الإشارات إلى المحطة القاعدية مع فرق طاقة كافٍ للسماح لمستقبل SIC بفك تشفيرها بشكل صحيح، ثمّ يكتشف مستقبل SIC الإشارات بشكل متتالي من الإشارة المستقبلية المترابطة في المحطة القاعدية، وبمجرد نجاح فك تشفير إشارة المستخدم فإنّه يتمّ طرحها من الإشارة المترابطة بحيث تكون الإشارة الأولى التي يتمّ فك تشفيرها من قبل المحطة القاعدية باستخدام تقنية SIC هي إشارة المستخدم الأقرب (ذات شروط القناة الجيدة) والتي تمّ تخصيصها بمستوى الطّاقة المنخفض ومن ثمّ يتمّ طرحها من الإشارة المترابطة من أجل فك تشفير إشارة المستخدم الأبعد (ذات شروط القناة السيئة) والتي تكون الإشارة الأخيرة التي تقوم المحطة القاعدية بفك تشفيرها، حيث أنّه ليس هناك حاجة لتطبيق تقنية SIC على المستخدم الأبعد لأنّه مخصص بمستوى طاقة عالٍ ويحتاج فقط إلى فك تشفير إشارته التي تعدّ بمثابة تداخل أثناء معالجة إشارة المستخدم الأقرب [6,14].



الشكل (4): (a) تقنية NOMA في الوصلة الصاعدة من أجل اثنين من المستخدمين، (b) توضيح لآلية كشف إشارتي مستخدمين اثنين في الوصلة الصاعدة بواسطة SIC.

5- بعض البارامترات المحددة لأداء أنظمة الاتّصالات عبر قنوات الإرسال:

قبل البدء بدراسة تقنية NOMA عبر قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف وقناة خفوت ريليه لابدّ من التطرق إلى تعريف بعض البارامترات التي تلعب دوراً هاماً في تقييم أداء أي نظام اتّصالات وهي:

معدل خطأ البت (BER: Bit Error Rate): وهي نسبة عدد البتات المستقبلية التي تحتوي على أخطاء إلى مجموع عدد البتات المرسل من تدفق البيانات خلال وقت معين، تعطى معادلة BER في الإرسال الرقمي وفق العلاقة [15]:

$$BER = \frac{n}{N} \quad (1)$$

n : عدد البتات الخاطئة، N : العدد الكلي للبتات المستقبلية.

نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR: Signal to Noise Ratio): تُعرّف نسبة قوة الإشارة المرغوبة إلى قوة الضجيج في الموجة بنسبة الإشارة إلى الضجيج، وهي مقياس لمقارنة قوة الإشارة المرغوبة بقوة الضجيج الخلفي، ويمكن أن تكون ممثلة على نطاق لوغاريتمي، وتعطى بالعلاقة [15]:

$$SNR = \frac{P_r}{P_n} \quad (2)$$

P_r : استطاعة الإشارة المستقبلية، P_n : استطاعة الضجيج المقاس خلال عرض حزمة الإشارة المرسل.

احتمالية الانقطاع: احتمال أن نسبة معدل المعلومات إلى الضجيج، أو التداخل، أو أي اضطرابات أقل من نسبة معدل معلومات العتبة إلى الضجيج، ويسمى احتمال فشل المستخدم البعيد في استقبال المعلومات الواردة من المحطة القاعدية باحتمال الانقطاع، وتزداد احتمالات انقطاع الخدمة وانخفاض أداء النظام بزيادة المسافة بين المحطة القاعدية وأجهزة المستخدمين، ومع انخفاض احتمالية الانقطاع يتحسن أداء النظام، هذا لأن العلاقة بين احتمال انقطاع الخدمة وأداء النظام متناسبة عكسياً، ويجب أن يكون احتمال الانقطاع أقل ما يمكن من أجل الحصول على نتيجة مهمة، ولحساب احتمالية الانقطاع للمستخدم يحدد المعدل المستهدف ويحسب عدد المرات التي تتخفف فيها المعدلات القابلة للتحقيق والمحسوبة إلى ما دون هذا المعدل، لذلك إذا كان معدل المستخدم أقل من ذلك في أي نقطة فتؤخذ هذه النقطة على أنها انقطاع [2].

6- دراسة أداء تقنية NOMA عبر قناة الضجيج الغوسي الأبيض المضاف:

6-1- الضجيج الغوسي الأبيض المضاف:

الضجيج الغوسي الأبيض المضاف AWGN هو نموذج ضجيج أساسي ومقبول في الغالب، والذي يشبه العديد من العمليات التي تحدث في الطبيعة، وله كثافة طيفية ثابتة للطاقة على كامل مجال التردد. عندما تمر الإشارة المرسل عبر القناة، فإنها تتأثر بالضجيج الغوسي الأبيض المضاف، حيث تضيف القناة AWGN فقط إلى الإشارة المرسل ولا شيء آخر، وهذا يسمى قناة AWGN ولا علاقة لها بالخفوت أو أي شيء آخر من عوامل النظام، ويحدد الضجيج من معدل البيانات المرتفع عبر قناة AWGN، ونعبر عن الإشارة المستقبلية من خلال العلاقة الرياضية:

$$Y(t) = X(t) + N(t) \quad (3)$$

حيث $Y(t)$ هي الإشارة المستقبلية، $X(t)$ هي الإشارة المرسل، و $N(t)$ هي الضجيج الغوسي الأبيض المضاف وتكون قيمها مستقلة إحصائياً وموزعة بشكل متماثل عن بعضها البعض عند أي نقطتين زمنيتين [15].

ولدراسة أداء تقنية NOMA عبر هذه القناة نفترض ما يلي:

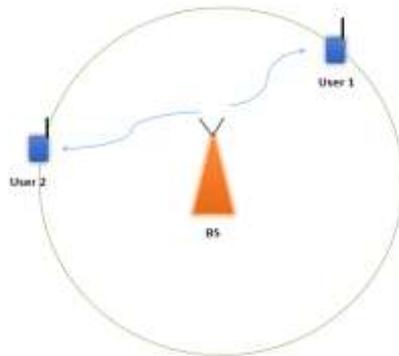
- نقوم بالإرسال على الوصلة الهابطة من المحطة القاعدية إلى اثنين من المستخدمين.
- لا نستخدم أي نماذج لفقدان المسار، ونفترض أن كلا المستخدمين موجودان على مسافات متساوية من المحطة القاعدية.
- نفترض قناة AWGN فقط، ولكن القناة اللاسلكية أكثر تعقيداً بسبب انتشار المسارات المتعددة والخفوت التي سوف نناقش أثرها لاحقاً.

• يمكن استخدام العديد من تقنيات التعديل مثل الإبدال بإزاحة الطور الثنائي (Binary Phase Shift Keying :BPSK)، الإبدال بإزاحة الطور الرباعي (Quadrature Phase Shift Keying :QPSK)، التعديل المطالي التريبيعي 16 (16-QAM: Quadrature Amplitude Modulation)، ولكن هنا سنستخدم تعديل BPSK لكلا المستخدمين.

• نظراً لأننا نستخدم تعديل BPSK، فسأخذ بعين الاعتبار المكون الحقيقي فقط للقناة العنقديّة AWGN. يعمل NOMA بشكل أفضل في أنظمة الزمن الحقيقي عندما يكون أحد المستخدمين أقرب إلى المحطة القاعدية (يسمى أيضاً المستخدم القريب/القوي) والمستخدم الآخر بعيد (مستخدم بعيد/ضعيف). لكن في حالتنا هذه، ومن أجل البساطة سنفترض أنّ المستخدمين متساوي البعد، وسنرى أنّ NOMA تعمل حتّى في ظل هذا الافتراض.

6-2- نموذج النظام AWGN:

لقد صمّمنا نظاماً يمكنه إرسال اثنين من البيانات المختلفة في كل مرة للمستخدم رقم 1 والمستخدم رقم 2، وباستخدام نظام الوصول المتعدّد NOMA فقد تمّ إرسال هذه البيانات المختلفة خلال قناة AWGN واستعادة البيانات الأصلية في نهاية المستقبل. وكما يظهر في الشكل (5) لدينا محطة قاعدية في المركز ترسل في نفس الوقت إلى مستخدمين اثنين (المستخدم الأول والمستخدم الثاني) على الوصلة الهابطة باستخدام نفس الحامل الترددي وذلك بتطبيق تقنية NOMA.



الشكل(5): نموذج النظام المفروض لدراسة تقنية NOMA أثناء الوصلة الهابطة عبر قناة AWGN.

النتائج والمناقشة:

في حالة قناة AWGN:

نفرض: x_1 البيانات التي ترسل إلى المستخدم الأول، x_2 : البيانات التي ترسل إلى المستخدم الثاني، $\alpha_1 = 0.7$ وزن الطاقة المخصّص للمستخدم الأول، $\alpha_2 = 0.3$ وزن الطاقة المخصّص للمستخدم الثاني ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$)، وتأخذ SNR قيمها ضمن المجال (0:25)dB، وتتمّ المحاكاة في برنامج الماتلاب وعدد عمليات المحاكاة هو 10^5 .
نقوم بتوليد بيانات ثنائية عشوائية للمستخدم الأول والمستخدم الثاني، ولتوليد البيانات الثنائية العشوائية يمكننا استخدام دالة MATLAB المدمجة المسماة (`randi`) والتي تقوم بتوليد تسلسل ثنائي ذو طول N ، ثمّ نقوم بإجراء تعديل BPSK للبيانات المولدة أعلاه، وبعدها نقوم بترميز التراكب بحيث تكون إشارة NOMA المتراكبة التي أرسلتها المحطة القاعدية هي x وتعطى بالعلاقة:

$$x = \sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2 \quad (4)$$

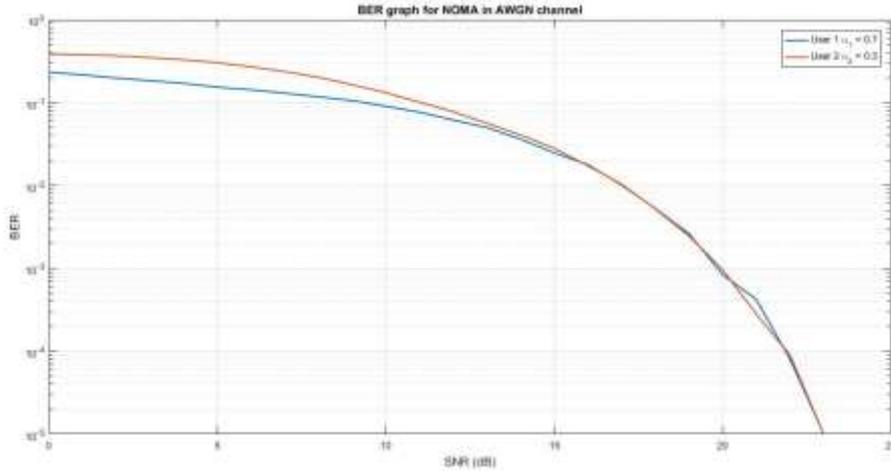
ومن ثم نقوم بتوليد AWGN وإضافته في كل عقدة بشكل منفصل بحيث تكون الإشارة المستقبلية للمستخدم الأول y_1 وتعطى بالعلاقة:

$$y_1 = x + n_1 \quad (5)$$

وللمستخدم الثاني y_2 وتعطى بالعلاقة:

$$y_2 = x + n_2 \quad (6)$$

n_1, n_2 : هي الضجيج الغوسي الأبيض المضاف إلى إشارة المستخدم الأول والثاني على الترتيب [16,17]. ومن أجل المستخدم الأول، نقوم بإجراء فك تعديل BPSK مباشرة لـ y_1 للحصول على x_1 ، وكذلك الأمر بالنسبة للمستخدم الثاني حيث نقوم بإجراء فك تعديل BPSK مباشرة لـ y_2 للحصول على x_1 ، ثم نقوم بإعادة تشكيل x_1 في إشارة BPSK على شكل $x'_1 = 2x_1 - 1$ ، ثم نضرب التقدير الذي تم الحصول عليه بـ $\sqrt{\alpha_1}$ ونطرحه من y على الشكل $y - \sqrt{\alpha_1} x'_1$ (تعبّر y عن إشارة NOMA المتراكبة في المستقبل)، ثم نقوم بإجراء فك تعديل BPSK المباشر للقيمة $y - \sqrt{\alpha_1} x'_1$ للحصول على x_2 ، ومن ثم نقارن البتات المفكوك ترميزها مع البتات المرسله لتقدير BER، ومن ثم نرسم منحنى BER مقابل SNR والذي يظهر في الشكل (6):



الشكل (6): منحنى BER مقابل SNR باستخدام تقنية NOMA وتعديل BPSK عبر قناة AWGN أثناء الإرسال على الوصلة الهابطة.

نلاحظ من المنحنى أنّ المستخدم الثاني لديه BER أعلى قليلاً من المستخدم الأول، وخاصة في جزء المنحنى المقابل لمنطقة SNR المنخفضة، هذا لأنّ المستخدم الثاني يجب أن يقوم بإلغاء التداخل المتتالي SIC، حيث أنه أثناء إجراء SIC يجب على المستخدم الثاني أولاً تقدير بيانات المستخدم الأول من y ، و إذا كان هذا التقدير خاطئاً فسينعكس أثر هذا الخطأ في فك تشفير المعلومات الخاصة به لأنّ البيانات الخاطئة سيتم طرحها من y ، وعلى افتراض الكشف الصحيح عن المستخدم الأول فعند طرح إشارته من الإشارة المتراكبة فإنّ المتبقي هو إشارة المستخدم الثاني مع الضجيج ممّا يعني أن الكشف عن إشارة المستخدم الثاني تكون أكثر عرضة للضجيج من المستخدم الأول، بعبارة أخرى يجب على المستخدم الثاني فك تشفير بيانات المستخدم الأول وبياناته بشكل صحيح، لأنّ أي خطأ في فك تشفير بيانات المستخدم الأول أو بياناته الخاصة فإنّ احتمالية الخطأ في فك الشيفرات المتتالية ستزداد ممّا سيؤثر على BER، هذا هو السبب في أنّ المستخدم الثاني يعاني من BER أعلى من المستخدم الأول.

7- دراسة أداء تقنية NOMA عبر قناة خفوت ريليه:

7-1- خفوت ريليه:

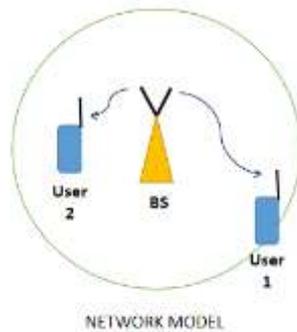
يعد الانتشار متعدد المسارات والخفوت من المشاكل الشائعة في القنوات اللاسلكية، ولمعالجة آثار الخفوت هناك عدة نماذج متاحة للقنوات حيث يتناول كل نموذج سيناريو محدد، ويعد خفوت ريليه أحد هذه النماذج، وهو نموذج مرتبط بوجود أجسام متعددة وخصائص طبوغرافية واضحة في البيئة، ويحدث خفوت ريليه عندما يكون هناك العديد من مسارات الانعكاس ولا يوجد اتصال خط نظر (LOS: Line of Sight) بين جهاز الإرسال والاستقبال، بعبارة أخرى تعرض جميع مكونات المسارات المتعددة للتأثيرات مثل الانعكاس والتشتت والحيود والتظليل وما إلى ذلك قبل أن تصل إلى جهاز الاستقبال، وإن غلاف الإشارة المستقبلية يوصف إحصائياً كتابع كثافة احتمالي لتوزيع ريليه، ونعبر عن ذلك بالعلاقة:

$$P_{ray}(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & 0 \leq r < \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (7)$$

تشير $2\sigma^2$ إلى القيمة المتوسطة لطاقة الكشف للإشارة متعددة المسارات، r : مطال الغلاف للإشارة المستقبلية [15].

7-2- نموذج النظام لخفوت ريليه:

تحتوي المحطة القاعدية على اثنين من الرسائل، x_1 للمستخدم الأول (المستخدم البعيد)، و x_2 للمستخدم الثاني (المستخدم القريب)، α_1 و α_2 هي مركبات تخصيص الطاقة للمستخدم البعيد والمستخدم القريب على التوالي، ويتم استخدام مبدأ عدالة المستخدم في NOMA، حيث يتم منح الكثير من الطاقة للمستخدم البعيد وطاقة أقل للمستخدم القريب (أي $\alpha_1 > \alpha_2$)، و h_1 ، h_2 تدلان على عامل توهين القناة (مركبة القناة) أو ما يسمى شروط القناة للوصلة من المحطة القاعدة إلى المستخدم البعيد والمستخدم القريب على التوالي.



الشكل (7): نموذج النظام لاثنين من المستخدمين المقترنين في NOMA.

إشارة NOMA المشفرة والمترابطة والتي أرسلتها المحطة القاعدية هي:

$$x = \sqrt{P}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) \quad (8)$$

P : هي طاقة الإرسال الكلية المتاحة في المحطة القاعدية، و بعد الانتشار عبر القناة h_1 فإن نسخة x المستقبلية من قبل المستخدم البعيد:

$$y_1 = h_1x + w_1 \quad (9)$$

وبالمثل، بعد الانتشار عبر القناة h_2 ، فإن النسخة المستلمة من المستخدم القريب هي:

$$y_2 = h_2x + w_2 \quad (10)$$

w_2, w_1 : الضجيج الغوصي الأبيض المضاف عند المستخدمين الأول والثاني على الترتيب (ذو القيمة المتوسطة الصفرية والكثافة $N_0(W/Hz)$ والانحراف σ^2).

أما من أجل فك ترميز NOMA عند المستخدم الأول (المستخدم البعيد) فيجري توسيع الإشارة المستقبلية وفق العلاقة:

$$y_1 = h_1 x + w_1 \quad (11)$$

$$y_1 = \underbrace{h_1 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_1} x_1}_{\text{desired \& dominating}} + \underbrace{h_1 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2}_{\text{interference \& low power}} + \underbrace{w_1}_{\text{noise}} \quad (12)$$

ونظراً لأن $\alpha_1 > \alpha_2$ فإن فك التشفير المباشر لـ y_1 سوف ينتج x_1 ، وإن أي مصطلح يحوي المكون x_2 سيتم معالجته كتداخل، وتكون نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل بالنسبة للمستخدم البعيد هي:

$$\gamma_1 = \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{|h_1|^2 P \alpha_2 + \sigma^2} \quad (13)$$

ومعدّل البيانات الأعظمي الذي يمكن تحقيقه للمستخدم الأول البعيد هو:

$$R_1 = \log_2(1 + \gamma_1) = \log_2\left(1 + \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{|h_1|^2 P \alpha_2 + \sigma^2}\right) \quad (14)$$

أما من أجل فك ترميز NOMA عند المستخدم الثاني (المستخدم القريب) فيجري توسيع الإشارة المستقبلية عند المستخدم الثاني وفق العلاقة:

$$y_2 = h_2 x + w_2 \quad (15)$$

$$y_2 = h_2 \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + w_2 \quad (16)$$

$$y_2 = \underbrace{h_2 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_1} x_1}_{\text{interference \& dominating}} + \underbrace{h_2 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2}_{\text{desired \& low power}} + \underbrace{w_2}_{\text{noise}} \quad (17)$$

يجب على المستخدم الثاني (القريب) إجراء إلغاء تداخل متتالي SIC قبل فك تشفير إشارته الخاصة، ويتم تنفيذ SIC وفق ما يلي:

- يتم فك تشفير y_2 مباشرة للحصول على x_1 أو، بشكل أكثر دقة تقدير x_1 ، ويرمز لها بالرمز \tilde{x}_1 .

- يتم حساب $y_2' = y_2 - \sqrt{\alpha_1} \tilde{x}_1$.

- يتم فك تشفير y_2' للحصول على تقدير x_2 .

إن نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل عند المستخدم الثاني لفك تشفير إشارة المستخدم الأول (قبل إجراء SIC) هي:

$$\gamma_{1,2} = \frac{|h_2|^2 P \alpha_1}{|h_2|^2 P \alpha_2 + \sigma^2} \quad (18)$$

تعبّر في العلاقة السابقة عن الضجيج الحراري والذي يندرج ضمن نوع الضجيج الغوصي الأبيض المضاف.

إن معدّل البيانات الأعظمي الذي يمكن تحقيقه للمستخدم الثاني من أجل فك تشفير بيانات المستخدم الأول هو:

$$R_{1,2} = \log_2(1 + \gamma_{1,2}) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_1}{|h_2|^2 P \alpha_2 + \sigma^2}\right) \quad (19)$$

بعد إلغاء إشارة المستخدم الأول باستخدام SIC فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج عند المستخدم الثاني من أجل فك تشفير إشارته هي:

$$\gamma_2 = \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{\sigma^2} \quad (20)$$

ومعدّل البيانات الأعظمي الذي يمكن تحقيقه للمستخدم الثاني من أجل فك تشفير بياناته لوحدها هو:

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_2) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{\sigma^2}\right) \quad (21)$$

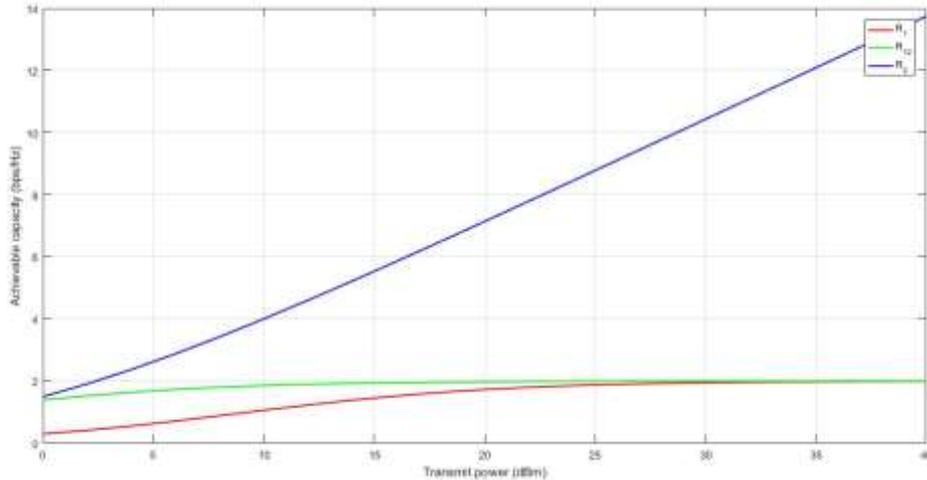
نفرض أن عملية SIC تتم بشكل مثالي ولكن في الحقيقة فهي ليست كذلك، ولأن SIC غير مثالي لذلك لا تزال بقايا طاقة المستخدم الأول موجودة، ونتيجة لذلك فإن المعدل الممكن تحقيقه ينخفض قليلاً عن R_2 [17,18].
لقد اعتبرنا أنه يوجد فقط مستخدمين اثنين لـ NOMA، ولكن يمكن تجميع أكثر من اثنين من المستخدمين في نفس الحامل الترددي لاستيعاب عدد مستخدمين أكثر على الشبكة.

7-3 - في حالة قناة خفوت ريليه:

نضع قيم البارامترات كما يلي : $\alpha_1 = 0.7$ و $\alpha_2 = 0.3$ (المستخدم البعيد يجب أن يعطى مقدار الطاقة الأكبر من أجل تحقيق عدالة المستخدمين)، وبعد المستخدم الأول عن المحطة القاعدية $d_1 = 900m$ و بعد المستخدم الثاني عن المحطة القاعدية $d_2 = 400m$ ، ونحسب طاقة الضجيج الحراري من العلاقة $N_o = kTB$ ، حيث $k = 1.38 \times 10^{-23}$ وهو ثابت بولتزمان، درجة الحرارة $T = 300K$ ، عرض حزمة النظام $B = 1MHz$ ، وبالتالي تحسب N_o بالديسبل وفق العلاقة $N_o(dB) = -174 + 10\log(BW MHz)$ ، وإن اختيار بارامتر عرض الحزمة له تأثير قوي على BER في الوصلة الهابطة لـ NOMA عند مقارنته ببارامترات المسافة ومركبة تخصيص الطاقة، كما يتوجب علينا توليد مركبات خفوت ريليه h_1 و h_2 لمحاكاة القناة بين المستخدمين الاثنين، ويمكن القيام بذلك باستخدام أمر MATLAB التالي:

$$h_i = \sqrt{d_i^{-\eta}}(\text{randn}(1, N) + 1i * \text{randn}(1, N))/\sqrt{2}. \quad (22)$$

حيث η هو معامل فقدان المسار وعادة ما يأخذ القيمة 4، ثم نقوم بحساب R_1 ، $R_{1,2}$ ، R_2 وفق العلاقات (14)، (19)، (21) على الترتيب وذلك بحساب القيمة المتوسطة لهم لأن القناة اللاسلكية ديناميكية (متغيرة) للغاية، والقدرات اللحظية تتقلب كثيراً، لذلك تعطينا القيم المتوسطة لهم رؤية أكثر فائدة حول سلوك القناة العام. وأخيراً بحساب الكميات المذكورة أعلاه من أجل مستويات طاقة مختلفة (على سبيل المثال، نبدأ المجال لطاقة النقل من 0dB وحتى 40dB) نرسم بيانياً السعة العظمى الممكن تحقيقها كتابع لطاقة النقل باستخدام برنامج الماتلاب فنحصل على الرسم البياني المبين في الشكل (8).



الشكل (8): السعة المحققة في NOMA.

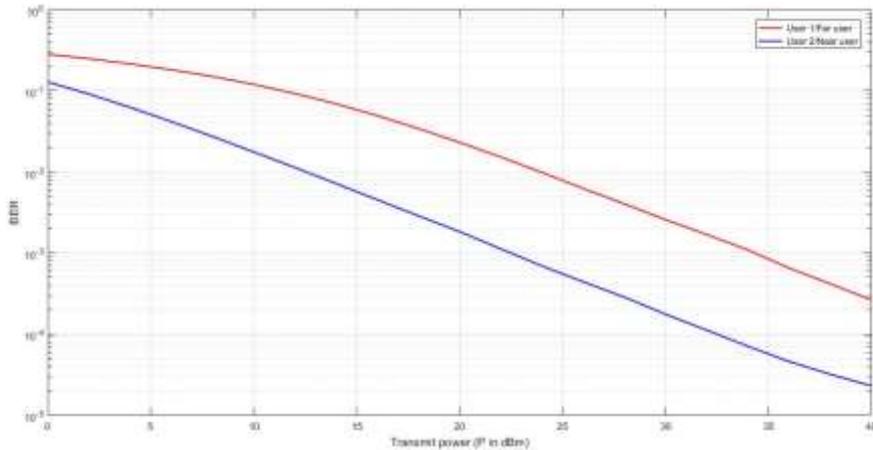
وفقاً لقواعد NOMA وبما أن $\alpha_1 > \alpha_2$ ، لذلك سيقوم المستخدم البعيد (المستخدم الأول) بفك التشفير المباشر دون أن يقوم بإجراء SIC وبالتالي لن يتأثر معدل بياناته الأعظمي القابل للتحقيق R_1 ، ونظراً لأنّ المستخدم البعيد ذو ظروف قناة سيئة، وطاقة منخفضة. لذلك سيكون معدل النقل الأعظمي الممكن تحقيقه له منخفضاً (المنحني الأحمر في الشكل (8)).

بينما يجب على المستخدم القريب (المستخدم الثاني) إجراء SIC لاسترداد بيانات المستخدم الأول لذلك سيبدأ المنحني الممثل لمعدل البيانات الأعظمي الذي يمكن تحقيقه للمستخدم الثاني من أجل فك تشفير بيانات المستخدم الأول ($R_{1,2}$) (المنحني الأخضر)) من نقطة قريبة من نقطة انطلاق المنحني R_2 ويتلاقى مع منحنى R_1 ، ويظهر الشكل (8) أيضاً معدل البيانات الممكن تحقيقه بواسطة المستخدم الثاني لوحده (فك تشفير بياناته الخاصة به فقط) R_2 المعبر عنه باللون الأزرق وهو معدل عالٍ لأنه بعد إجراء SIC (عند المستخدم القريب) يتم إلغاء إشارة المستخدم البعيد. لذلك يتم فك تشفير إشارة المستخدم القريب من الإشارة النظيفة، إضافة إلى كون المستخدم الثاني قريب من المحطة القاعدية وطاقة نقله مرتفعة وهذا ما يفسر السعة العظمى له.

أما من أجل حساب معدل خطأ البت لـ NOMA فنقوم بتوليد عينات الضجيج لكلا المستخدمين وفق الصيغة:

$$w_i = \sqrt{\text{noise power}} (\text{randn}(1 + N) + 1i * \text{randn}(1 + N)) / \sqrt{2} \quad (23)$$

ثم نقوم بتوليد بيانات ثنائية عشوائية لكلا المستخدمين، ويمكن استخدام أي تقنية تعديل رقمية لتعديل البيانات، حيث يتم في هذه الدراسة استخدام BPSK بالنسبة لكلا المستخدمين، ثم يتم حساب الإشارة المشفرة المتراكبة x ، ومن ثم حساب y_1 و y_2 حيث أن الانتشار بمقدار h_1 و h_2 على التوالي يكافئ y_1 و y_2 ، وللحصول على \hat{x}_1 نقوم بإجراء فك تعديل BPSK مباشرة على النسخة المكافئة لـ y_1 ، ثم نقارن \hat{x}_1 ببيانات المستخدم الأول الأصلية ونقدر BER، بينما يتم تقدير x_1 بفك تشفير النسخة المكافئة لـ y_2 مباشرة، و بعد إعادة تشكيل x_1 يتم طرح مكون x_1 المعاد تشكيله من النسخة المكافئة لـ y_2 ، ثم نقوم بفك تشفير هذه الإشارة للحصول على \hat{x}_2 ، ومن ثم مقارنة \hat{x}_2 ببيانات المستخدم الثاني الأصلية ونقدر BER، ثم نقوم برسم BERS كتابع لطاقة الإرسال كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (9): منحني BER مقابل طاقة النقل باستخدام تقنية NOMA وتعديل BPSK عبر قناة خفوت ريليه أثناء الإرسال على الوصلة الهابطة.

نلاحظ من المنحني في الشكل (9) أنه مع زيادة طاقة النقل سواء للمستخدم القريب أو البعيد فإن معدل خطأ البت سوف يتناقص بشكل كبير بالإضافة إلى التأثير الواضح لمركبة الطاقة والمسافة على أداء BER، مما يشير إلى أن النظام قوي للغاية وفعال لنقل مختلف البيانات المترامنة والمناسبة للجيل القادم من الاتصالات اللاسلكية. كما نلاحظ أيضاً أن معدل خطأ البت للمستخدم البعيد أعلى منه للمستخدم القريب لأنه يعاني تداخلاً من المستخدم القريب على عكس المستخدم القريب الخالي من التداخل والذي لديه مستوى BER أدنى، وهذا يثبت أن NOMA يعمل بشكل يمكن التنبؤ به.

كما تكشف النتائج أن المعامل α له تأثير كبير على أداء المستخدم وعلى أداء عمل SIC. تثبت النتائج أيضاً أنه بالإضافة إلى SNR المنقولة المرتبطة بقوة الضجيج، فإن مركبة تخصيص الطاقة سيتم ضبطها أيضاً وفقاً لظروف القناة بين المحطة القاعدية والمستخدم.

الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال مراقبة نتائج المحاكاة يمكننا القول:

- أن النظام يوفر أداءً مقبولاً عبر قنوات AWGN وقنوات خفوت ريليه، وذلك من خلال تعيين الطاقة بشكل صحيح للمستخدمين مع المحافظة بدقة على فرق أطوار الإشارة بين المستخدمين، ويكون إجمالي استهلاك الطاقة في جهاز الإرسال هو مجموع قوة إشارة المعلومات والطاقة التي تستهلكها الدارات.
- إن NOMA مناسب أيضاً للنقل المترامن لأنواع البيانات المختلفة عبر قناة AWGN وفي ظروف بيئة الخفوت، ويوفر أيضاً عدالة مقبولة للمستخدمين مع الحفاظ على التداخل منخفضاً مع BER مقبول.
- أهمية تقنية SIC التي تقوم عليها فكرة NOMA، فبدون تطبيق SIC سوف يؤدي تقسيم الطاقة بين المستخدمين بداية إلى انخفاض SNR للإشارة المستقبلية وزيادة احتمالات الخطأ، بالإضافة إلى أن التداخل الناتج عن تراكم مجال الطاقة وأخطاء الإلغاء سيؤدي إلى دقة اكتشاف أقل، وهذا ما يؤكد اعتماد NOMA بشكل وثيق على تقنية SIC والتي يقوم عليها مبدأ عملها لإلغاء التداخل.
- تظهر NOMA أداءها المتفوق على تقنيات الوصول المتعدد المتعامد (مثل OFDMA التقليدي) من حيث القدرة الإجمالية وكفاءة الطاقة والكفاءة الطيفية وقدرتها على العمل بشكل جيد سواء كانت المسافات بين المستخدمين متساوية أو مختلفة، ونظراً لميزاتها المميزة هذه تظل NOMA هي المرشح الأقوى لشبكات 5G المستقبلية. ومع ذلك، لا تزال هناك بعض التحديات التي تعترض نجاح تنفيذ خطة العمل وهي:
- إن الوضع الحالي لـ NOMA لا يزال بعيداً عن إمكاناته، ويتطلب مزيداً من التحقيق، حيث يتطلب الأمر أولاً قوة حسابية عالية لتشغيل خوارزميات SIC خاصة من أجل العدد الكبير من المستخدمين بمعدلات بيانات عالية.
- إن تحسين تخصيص الطاقة لا يزال يمثل مشكلة صعبة لا سيما عندما تتحرك أجهزة المستخدمين بسرعة في الشبكة.
- لا يزال BER بشكل عام هو التقييد الرئيسي الناتج عن التداخل بين المستخدمين. لذلك ينبغي اختيار الطاقة والتعديل على أساس شروط القناة و QoS لكل مستخدم [16].
- تفترض الدراسة السابقة الإلغاء المثالي في جهاز الاستقبال، ولكن في SIC الفعلي من الصعب جداً طرح الإشارة المفكوك ترميزها من الإشارة المستقبلية دون أي خطأ لأن جهاز استقبال SIC حساس لأخطاء الإلغاء التي يمكن أن تحدث بسهولة في قنوات الخفوت، ولذلك يمكن تنفيذه باستخدام بعض التقنيات الأخرى مثل MIMO أو مع

مخططات الترميز من أجل زيادة الوثوقية وبالتالي تخفيض أخطاء فك التشفير، ولهذا يمكن إعادة النظر في مفهوم NOMA مع إمكانية إلغاء الخطأ في جهاز استقبال SIC.

• تعاني هذه التكنولوجيا من تهديدات أمنية كبيرة لأن المستخدمين قادرين على فك رموز رسائل المستخدمين المقترنين معهم الذين يستخدمون نفس الموارد، لذلك يجب إدخال مفاهيم تشفير فعالة لأنظمة NOMA على الطبقة المادية (الفيزيائية) إلى جانب مفاهيم فك تشفير المستخدمين المتعددين لتعزيز قدرات النظام، بالإضافة إلى أن هذه التكنولوجيا ليست محصنة تماماً ضد جميع أنواع الهجمات، وبالتالي فإن تحسين سرية البيانات المرسله شرط لا بد منه لضمان الأمن والقوة، لذلك يمكن إجراء دراسات من أجل تحقيق قوة سرية البيانات وخصوصيتها ضد المهاجمين الداخليين والخارجيين عن طريق اقتراح منهجيات تشفير تستند إلى عمليات ديناميكية بسيطة تعتمد على المفتاح لتأمين سرية NOMA على مستوى رمز الإطار [19].

• ولأن المعرفة المثالية بالقناة غير ممكنة في تصميم وصلات الاتصال العملية، لذلك فإن أخطاء تقدير القناة شائعة جداً في منهجيات NOMA، وكذلك فإن الزيادة في عدد المستخدمين في شبكة الجيل الخامس وشبكات الاتصالات المستقبلية سيؤدي إلى مزيد من التداخل بين المستخدمين مما يحدث خطأ في تقدير القناة في نظام NOMA. وبالتالي تكون الخوارزميات المثلى الأكثر قوة وكفاءة مطلوبة للتخفيف من خطأ تقدير القناة، لذلك يمكن اقتراح بعض منهجيات التحسين لمعالجة خطأ تقدير القناة [14]، و بشكل مشابه لمنهجيات المحاكاة على مستوى الوصلة يمكن تصميم خوارزمية تهدف إلى زيادة الحد الأدنى لمعدل المستخدم إلى أقصى حد مع تحقيق عدالة المستخدم.

• يعد تخصيص الطاقة في مستقبل NOMA أمراً بالغ الأهمية، حيث يمكن للمستقبل من خلال التوزيع الدقيق للطاقة الحصول على قدرة أفضل على إلغاء التداخل، وبالتالي فإن البحث عن توزيع ديناميكي للطاقة يمكن أن يكون موضوع بحث جديد لجعل تقنية NOMA مفيدة لمختلف التطبيقات.

References:

- CHENG,K., ZHANG,N., KANG,G. A Blind Detection Algorithm for Modulation Order in NOMA Systems. ICST Institute for Computer Sciences Social Informatics and Telecommunications Engineering,2019, 688-697.
- ISLAM,R., AVAZOV,N., DOBRE,O.A., KWAK,S.K. Power-Domain Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges, The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Memorial University, Canada.
- ZHANJI,W., KUN,L., JIANG,CH., SHAO,X. Comprehensive study and comparison on 5G NOMA schemes . IEEE Access, Vol.6,2018, 18511-18519.
- HASSAN,N., MELKI,R., CHEHAB,A. Efficient data confidentiality scheme for 5G wireless NOMA communications. Journal of Information Security and Applications (JISA),2021, 1- 34.
- HUANG,Y., XIAOLI,H., YUXIN,D. Research on User Pairing Techniques Based on NOMA In Cognitive Radio Networks. Journal of Computer and Communications, 2023, 131-145.
- AHMED,T., KABIR,H., HOSSAIN,I. Performance Assessment of MIMO-NOMA System with Simultaneously Different Data Transmission for the Next Generation Wireless Communications. International Journal of Networks and Communications, Vol.12, No.1,2022, 39-46.

- SHUKLA,A., KUMAR,M., DEOLIA,V.K. Code domain non orthogonal multiple access schemes for 5G and beyond communication networks: A review. Journal of Engg. Research, Vol. 10, No.4,2021, 132-152.
- SRAVYA,J., PRAVEEN,S.S., NAGENDRA,A., PHANI,P. Performance Evaluation of Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Communication, Anil Neerukonda Institute of Technology and Sciences, Visakhapatnam,2021.
- PAWAR,SH.SH., SAGAT,G.S. Implementation of NOMA for 5G. International Research Journal of Education and Technology, Vol.3, No.1,2021, 39-46.
- ERPINA,R.CH., GOPIREDDY,V.R. Performance of a Non-Orthogonal Multiple Access System with Full-duplex relaying over Nakagami-m Fading, Faculty of Computing, Blekinge Institute of Technology, 371 79 Karlskrona, Sweden,2021.
- HORIIKE,N., OKAMOTO,E., YAMAMOTO,T. A downlink non-orthogonal multiple access scheme having physical layer security. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018,1-11.
- ALLOUIS,A., HAMZA,A.A., DAYOUB,I., CHERKAOUI,S. Maximum Sum Rate of MCM- NOMA in Future Vehicular Sensor Networks. IEEE Sensors, Vol. 0, No.0,2023.
- JUN,L., TONG,G., BO,H., WENJING,Z., FEI,L. Power Allocation and User Grouping for NOMA Downlink Systems. applied sciences,2023, 1-13.
- AL RABEE,F.T., GITLIN, R.D. Performance of Uplink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in the Presence of Channel Estimation Errors. IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS), USA, 2019.
- ABOOD,T.H., HBUR,I. BER Performance for Downlink NOMA. Wasit Journal of Engineering Sciences (WIES), Vol.10, No.2,2022, 216-222.
- YAHYA,H., ALSUSA,E., AL-DWEIK,A. Design and Analysis of NOMA with Adaptive Modulation and Power Under BLER Constraints. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol.XX, No.XX,2022, 1-6.
- HASSAN,M., SINGH,M., HAMID,KH. BER Performance of NOMA Downlink for AWGN and Rayleigh Fading Channels in (SIC). EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications, Vol.7, No.21, 2022, 1-7.
- ARIAS,A.S., HUERA,L.C., RUEDA,B.S., CARVAJAL,H.R., OROZCO,N.V., ALMEIDA,F.D. On The Secrecy Outage Probability of NOMA Systems Affected By Imperfect SIC over α - β Fading Channels. Journal of Communications, Vol.18, No.3,2023, 147-155.
- AHMED,M.A., MAHMMOD,KH.F., AZEEZ,M.M. On the performance of non-orthogonal multiple access(NOMA) using FPGA. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.10, No.2,2020, 2151-2163.