

تحسين معدل الإنتاجية على مستوى الوصلة لنظام الراديو الجديد (NR) باستخدام تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج

أنس مصطفى الهلوب كلية الهندسة - جامعة مصراته، مصراته، ليبيا	محمد حسين القبي كلية الهندسة - جامعة مصراته، مصراته، ليبيا	سراج عبد الحميد الشلتات كلية الهندسة - جامعة مصراته، مصراته، ليبيا	محمد إمام محمد عبد الرحيم كلية الهندسة - جامعة مصراته، مصراته، ليبيا
a.alhalob@eng.misuratau.edu.ly	mohamed.elgubbi@eng.misuratau.edu.ly	sirajalsheltat@eng.misuratau.edu.ly	mohamed.abdurrahim@eng.misuratau.edu.ly

يرافق استخدام تقنيات نظم الهوائيات متعددة المداخل والمخارج في نظم الاتصالات اللاسلكية الحصول على كسب Gain إما في تحسين وثوقية وصلة الاتصالات أو في زيادة الكفاءة الطيفية مقارنةً بنظم الاتصالات التي تستخدم هوائي وحيد في الإرسال والاستقبال [2].

تتغير القناة اللاسلكية بمرور الوقت والمكان بسبب الحركات العشوائية الناتجة عن العوائق أو المستخدمين. فنظراً لوجود تشتت في القناة اللاسلكية فإن الإشارة المستقبلية تواجه تراكم عشوائي من مسارات متعددة. إن تقلبات القناة العشوائية غير المرغوب فيها تسمى بالخبو وهي تؤثر بشكل كبير على جودة القناة وسعتها. هذا، وباستخدام نظم الهوائيات متعددة المداخل والمخارج يمكن الحصول على مكاسب كبيرة في السعة مقارنةً بالقنوات التقليدية ذات المداخل الفردية SISO أو SIMO أو MISO، ولكن العيب يكون في زيادة التعقيد ومن ثم تكاليف الأجهزة والمعالجات الإضافية المطلوبة. كما أن هناك العديد من العوامل التي تؤثر على أداء نظم الهوائيات متعددة المداخل والمخارج، فمثلاً عدد الهوائيات المستخدمة في الإرسال والاستقبال، المسافة بين الهوائيات، وكذلك خصائص القناة مثل وجود وصلة مباشرة دون عوائق (line-of-sight) أو وصلة عبر العوائق (non-line-of-sight)، وأيضاً اختيار الرموز وطرق جمع الإشارات.

ومن التطورات الحديثة في أنظمة الهوائيات متعددة المداخل والمخارج استخدام الهوائيات الضخمة أو الكثيفة وهي أحد التقنيات المقترحة للأجيال التالية نظراً لقدرتها على تحقيق أداء عالي ولجني جميع مزايا نظم الهوائيات متعددة المداخل والمخارج التقليدية ولكن على نطاق أوسع.

إن نظام الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج هو نوع من نظم التواصل الخليوي، حيث يوجد في محطة القاعدة عدد كبير من الهوائيات تقريباً من عشرات إلى مئات، إما في موقع واحد أو في مواقع مختلفة. وبالتالي، فإن استخدام أعداد كبيرة من الهوائيات في المحطة القاعدية يجعل المستخدمين متعامدين بحيث يقل التداخل بينهم، ولهذا فإن معدل البيانات سيزيد. ويمكن استخدام المستقبلات الأقل تعقيداً لمعالجة الإشارات [3]. في هذه الورقة، تم استخدام أداة محاكاة شبكات الجيل الجديد (NR) على مستوى الوصلة [4] لمحاكاة الوصلة الراديوية للجيل التالي ودراسة مدى تحسين تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج لمعدل الإنتاجية للوصلة الراديوية.

2. نظم الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج

تعتبر نظم الاتصال كثيفة تعدد المداخل والمخارج من التقنيات الناشئة حديثاً، وتعرف أيضاً بنظم الهوائيات كبيرة أو كثيفة العدد (large scale antenna systems)، وهي عبارة عن نظام اتصالات متعدد المستخدمين حيث تجهز المحطة القاعدية بعدد كبير من الهوائيات، وقد تم اقتراح هذه الفكرة لأول مرة عام 2010 في [5]. في هذه التقنية يكون عدد الهوائيات في المحطة القاعدية أكبر من عدد المستخدمين الفاعلين المجدولين في كل فترة تأشير في النظام. إن نظام الهوائيات كثيفة التعدد يمكن تنفيذه من خلال صفيف من الهوائيات يغذى كل منها عبر خط تغذية رقمي إلكتروني أو من الألياف البصرية. نظم الهوائيات كثيفة التعدد تسمح بتطوير شبكات الاتصالات عريضة الحزمة المستقبلية الثابتة

المخلص — يتزايد الطلب في كل عام على الاتصالات المتنقلة بشكل كبير، ويشارك المزيد من المستخدمين بالخدمات المتنقلة عريضة النطاق. بالإضافة إلى أن الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية ذات المقدرات والتطبيقات الحديثة في الوسائط المتعددة قد أصبحت شعبيةً ومنتشرةً بشكل متزايد، وهذا بدوره يخلق طلبات جديدة على النطاق العريض المتنقل، وبالتالي يؤدي إلى إنشاء وخلق زيادة هائلة في حجم البيانات والإجراءات. ولهذا السبب، إحدى أهم متطلبات الجيل الخامس هو دعم سعة أكبر بألف مرة لكل منطقة مقارنةً مع نظام الجيل الرابع LTE. ولكن مع تكلفة مماثلة وتبديد القدرة لكل منطقة كما هو الحال في النظم الخليوية اليوم. سيكون من الممكن زيادة السعة إذا تمّ زيادة العوامل الثلاثة التي تساهم بشكل مشترك في سعة النظام: المزيد من الطيف الترددي، عدد أكبر من المحطات القاعدية لكل منطقة، وزيادة الكفاءة الطيفية لكل خلية. تُعتبر أنظمة الهوائيات متعددة المداخل والمخارج الضخمة أو الكثيفة (Massive MIMO) ضروريةً في المساهمة في آخر عامل من العوامل السابقة، حيث أنها يمكن أن توفر كفاءة طيفية مُزايمة إلى حد كبير لكل خلية. في هذه الورقة، تم استخدام أداة محاكاة شبكات الجيل الجديد (NR) على مستوى الوصلة لمحاكاة الوصلة الراديوية للجيل التالي ودراسة مدى تأثير عدد الهوائيات في تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج على معدل الإنتاجية للوصلة الراديوية. ومن خلال الأداة المستخدمة تم تطبيق سيناريو تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج، ومن النتائج تم التأكد من أن استخدام تقنية تعدد الاستقبال والإرسال الكثيف في الوصلة الراديوية للجيل الجديد يحسّن من معدل الإنتاجية Throughput بشكل ملحوظ في كل من الوصلة الصاعدة والنازلة.

الكلمات المفتاحية: الجيل التالي (5G)، نظم الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج، سعة النظام، الإنتاجية، الوصلة الصاعدة، الوصلة النازلة.

1. المقدمة

مع التطور المتزايد للأجهزة الذكية والهواتف المحمولة في السنوات الأخيرة، زاد الطلب على معدلات نقل أعلى لنظم الاتصالات اللاسلكية، ومن المتوقع أن تزداد الحركة الهاتفية المتنقلة بشكل كبير بما يصل إلى ثمانية أضعاف مع بداية العقد الثالث من القرن الواحد والعشرين [1]. وهذا يؤدي إلى نمو كبير في متطلبات الأجهزة الذكية والاتصالات اللاسلكية الرقمية وهذا ما يجعلنا نحتاج إلى تطوير ساعات شبكات الاتصال الحالية كما هو الحال القائم الآن على تطوير شبكات الجيل الخامس [1].

تلعب نظم الهوائيات متعددة المداخل والمخارج MIMO دوراً محورياً في نظم الاتصالات الخليوية الحالية، وكذلك في الشبكات اللاسلكية المحلية.

استلمت الورقة بالكامل في 9 سبتمبر 2021 وروجعت في 25 أكتوبر 2021 وقبلت للنشر في 18 نوفمبر 2021

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 27 نوفمبر 2021

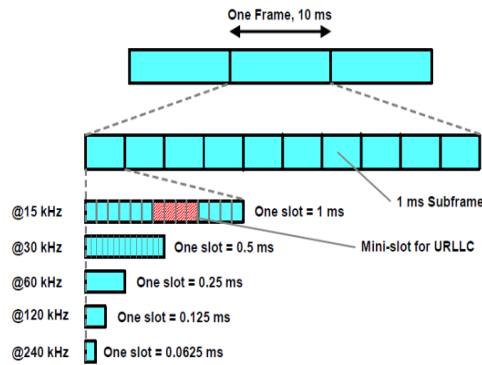
ولاستخراج X من المعادلة فإننا نحتاج الى معامل ضرب (مصفوفة الدمج W) حيث $WH = 1$ وحيث أن معكوس المصفوفة لا يكون إلا في المصفوفات الممتائة ($m = n$) عندئذ يمكن استخدام معكوس مور فيكون هذا المعامل مناسباً لجميع الحالات كالتالي:

$$W_{ZF} = [H^H H]^{-1} H^H \quad (5)$$

3. هيكلية الإطار (Frame structure) في تقنية 5G

يتم تنظيم إرسالات الوصلة النازلة (Down Link) والوصلة الصاعدة (Up Link) في إطارات بمدة 10 مللي ثانية، كما هو موضح في الشكل (2)، كل منها مقسم إلى 10 إطارات فرعية كل منها 1 مللي ثانية. يتغير طول الفاصل الزمني وفقاً للفاصل الزمني بين الموجات الحاملة الفرعية حيث يتناقص ولكن تتسع المسافات بين الموجات الحاملة الفرعية [8].

يمكن أن يكون تباعد الموجات الحاملة الفرعية في معيار الجيل الخامس مُتغيراً بعدة قيم من خلال العلاقة ($15KHz \times 2n$) حيث يمكن أن تكون قيمة n تساوي أحد القيم التالية (0,1,2,3,4). في المقابل يوجد نوع واحد فقط من تباعد الموجات الحاملة الفرعية في الجيل الرابع ويساوي 15 كيلو هرتز [7].



الشكل (2): تنظيم الإطارات في 5G-NR [9].

4. الإنتاجية في الجيل الخامس 5G

يُعد تقدير الإنتاجية في الجيل الخامس مُعقداً، حيث يتضمن العديد من العوامل والمعرفة العميقة بمعايير الجيل الخامس، ومع ذلك، يمكن حساب قيمة تقريبية للحد الأقصى من الإنتاجية باتباع المعادلة التالية [10]:

$$Data Rate (in Mbps) = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{layer}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j)} \cdot 12}{T_s^{(j)}} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (6)$$

وبتوضيح المعادلة بشيء من التفصيل، فإن: J : عدد الموجات الحاملة.

$v_{layer}^{(j)}$: هو الحد الأقصى لعدد الطبقات.

$Q_m^{(j)}$: رتبة نظام التعديل، حيث تكون الرتبة 2 لـ (QPSK)، و 4 لـ (QAM16)، و 6 لـ (QAM32)، و 8 لـ (QAM256).

$f^{(j)}$: معامل التحجيم يمكن أن يأخذ أي قيمة من القيم التالية (1، 0.8، 0.4، 0.75).

R_{max} : $\frac{1024}{948}$.

μ : قيمة تعبر عن التباعد بين الحاملات الفرعية (SCS).

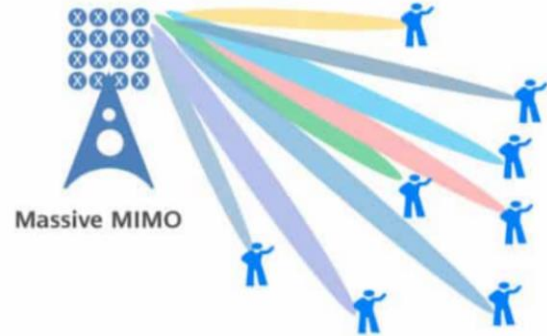
T_s^μ : متوسط مدة رمز OFDM في إطار فرعي.

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \times 2^\mu}$$

حيث μ تأخذ قيم صحيحة من 0 إلى 5.

والنقالة، حيث من المتوقع أن تكون هذه النظم هي التقنية الرائدة لتحسين كل من كفاءتي الطيف الترددي والقدرة المستهلكة في نظم الاتصالات اللاسلكية. كما يمكن باستخدام هذه النظم الحد من مشاكل الضوضاء وتذبذبات الخبو السريع، كذلك التقليل من التداخل الناشئ عن الخلايا المجاورة باستخدام وحدات معالجة خطية بسيطة يعتمد أداؤها على الكثافة العالية للهوائيات في مثل هذه النظم [6].

تتميز هذه التقنية باستخدام عدد كبير من الهوائيات الذكية الموجودة على نفس اللوحة (حالياً من 8 إلى 128 هوائياً) كما هو موضح في الشكل (2). بعد استخدام النطاق الترددي الأكبر من 6 جيجا هرتز، يتم زيادة عدد الهوائيات من أجل زيادة حركة المرور ذات الإنتاجية العالية حيث يتاح لكل عنصر هوائي عرض النطاق الترددي بالكامل، مما يبسط عمليات النفاذ / الوصول المتعدد. ونتيجة لذلك، يمكن بناء أنظمة الهوائيات متعددة المداخل والمخارج واسعة النطاق باستخدام مكونات منخفضة الطاقة منخفضة التكلفة [7].



الشكل (1). رسم توضيحي لتقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج [7].

يمكن الاستفادة من المزايا الكاملة لنظام الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج باستخدام استراتيجيات بسيطة لتشكيل الحزمة مثل مفكك مجمع القيمة القصوى (MRC) ومفكك التصفير الإجماري (ZF).

1.2. مفكك مجمع القيمة القصوى (MRC)

عند استلام الإشارات من الهوائيات المتعددة فإن المستقبل يُخصص لكل هوائي معامل توهين (أوزان) اعتماداً على حالة القناة لتحقيق أعلى نسبة إشارة إلى الضوضاء. وبحسب المعادلات الرياضية فإن مصفوفة الأوزان (W) الأمثل تعطى وفقاً للصيغة التالية:

$$W_{MRC} = \frac{H^H}{norm(H^2)} \quad (1)$$

2.2. مفكك التصفير الإجماري (ZF)

يسمى هذا النوع بالتصفير الإجماري وذلك لأنه يجعل التداخل يؤول إلى الصفر في حالات الخلو من الضوضاء، ويعتمد على ضرب الإشارة المستلمة في معكوس مصفوفة القناة. وباعتبار النظام الموصوف سابقاً، فإن الإشارة المستلمة في طرف المستخدم الأول:

$$Y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 \quad (2)$$

وكذلك، فالإشارة المستلمة عند المستخدم الثاني:

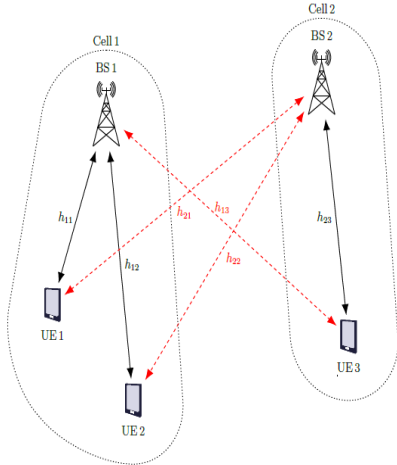
$$Y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 \quad (3)$$

وبالتالي تكون مصفوفة النظام:

$$Y = HX + N \quad (4)$$

1.5. منهجية المحاكاة

في هذه الورقة، تم استخدام الهيكل النموذجي للشبكة الخلوية كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3): الهيكل النموذجي للشبكة الخلوية [4].

هنا تفترض المحاكاة خليتين، لكل منهما محطة أساسية واحدة. يتم توصيل المُستخدَمَين الأول والثاني بالمحطة الأساسية 1 وبالتالي ينتمون إلى الخلية 1 بينما يتم توصيل المُستخدَم الثالث بالمحطة الأساسية الثانية وينتمي إلى الخلية الثانية. حيث يُشار إلى القنوات اللاسلكية h_{ij} بأسمهم مزدوجة حيث يُشير الرمز الأول i إلى المحطة الأساسية بينما يُشير الرمز الثاني j إلى المُستخدَم. تُظهر القنوات المرغوبة أو الأولية باللون الأسود بينما تظهر القنوات التداخلية أو الثانوية باللون الأحمر المتقطع.

2.5. محاكاة سيناريو تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج:

تم إعداد سيناريو نظام الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج مُتعدد المُستخدَمين (MU-MIMO) لعدد اثنين من المحطات القاعدية، بالإضافة إلى أربعة مُستخدَمين لكل خلية. يرتبط المُستخدَمون من 1 إلى 4 بالخلية الأولى بينما يتصل المُستخدَمون من 5 إلى 8 بالخلية الثانية، سواء للوصلة النازلة أو الصاعدة. تُمكن الخليتان من محاكاة وضعين مختلفين لتقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج متعدد المُستخدَمين في نفس الوقت، وذلك لتسهيل مقارنة النتائج. ولتعطيل التداخل بين الخليتين، يتم ضبط التوهين لوصلات التداخل على 300dB. والجدول التالي يوضح أهم المعلمات المُستخدمة في المحاكاة:

الجدول 1 . معلمات محاكاة سيناريو تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج

المعلمت	القيمة
الشكل الموجي	OFDM
عدد الحاملات الفرعية	72
العدد الكلي للرموز	15
الحماية للحاملات الفرعية	15K
نوع التشفير المُستخدَم	Turbo
عدد الإطارات	100
نوع الإطار	FDD
نمط تعدد المُستخدَمين	ZF-MUMIMO MRC-MUMIMO
طريقة النفاذ / الوصول	NOMA

التردد (BW) و (μ) . الحد الأقصى لتخصيص كتل الموارد، بمعلومية عرض النطاق $N_{PRB}^{BW(j)\mu}$

هو النطاق الترددي الأقصى المدعوم من تجهيزات

المُستخدَم في نطاق معين أو في مجموعة نطاقات.

يتم تجميع عناصر الموارد (Resource Elements) في كتل الموارد الفيزيائية (Physical Resource Blocks). حيث تتكون كل كتلة من 12 حاملة فرعية.

$OH(j)$: التكاليف العامة (Overhead) التي تأخذ أيًا من القيم التالية:

[0.14] ← نطاق التردد FR1 للوصلة النازلة.

[0.08] ← نطاق التردد FR1 للوصلة الصاعدة.

[0.18] ← نطاق التردد FR2 للوصلة النازلة.

[0.10] ← نطاق التردد FR2 للوصلة الصاعدة.

حيث تم تحديد النطاقات الترددية وفقا لمواصفات 3GPP كما يلي:

FR1: 450 → 6000 MHz

FR2: 24250 → 52600 MHz

5. الجانب العملي والنتائج

يتطلب البحث والتطوير لأنظمة الاتصالات المتنقلة تحليلاً مُفصلاً وتقييماً للتقنيات الجديدة لزيادة كفاءة الطيف والاتصال والموثوقية. ونظراً للطلب المتزايد بشكل كبير على معدلات بيانات النطاق العريض للأجهزة المحمولة والمتطلبات الصعبة لوقت الاستجابة والموثوقية، أصبحت مواصفات الاتصالات المتنقلة معقدة بشكل متزايد لدعم تقنيات أكثر تعقيداً من أي وقت مضى. لهذا السبب، العمل التحليلي وكذلك التحقيقات القائمة على القياس لطرق تقييم الأداء على مستوى الوصلة سرعان ما تواجه قيود الجدوى.

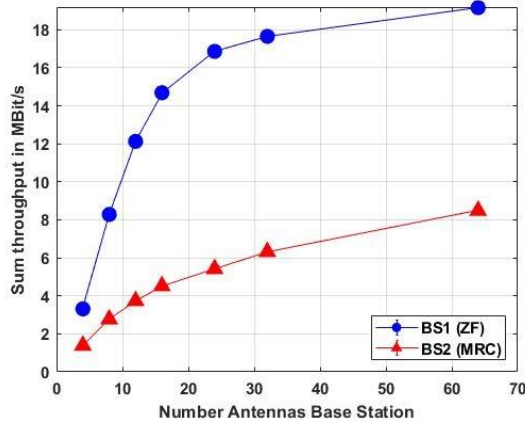
لذلك، تُعد المحاكاة الرقمية بمساعدة الكمبيوتر أداة مهمة للتحقيق في معايير الاتصالات اللاسلكية ولا غنى عنها للتحليل وتطوير التقنيات المستقبلية. في هذا الورقة، تم استخدام أداة محاكاة الشبكات اللاسلكية The Vienna 5G Link Level Simulator، فهو أحدث عضو في مجموعة محاكيات الاتصالات الخلوية فيينا، حيث تتمتع مجموعة أبحاث الاتصالات المحمولة الخاصة بمعهد الاتصالات السلكية واللاسلكية في TU Wien بتاريخ طويل ونجاح في تطوير ومشاركة محاكيات الاتصالات الخلوية.

يعمل المحاكى على مستوى الوصلة، ويعتمد في تشغيله على برنامج MATLAB واستخدام أساليب البرمجة الشبئية أو البرمجة غرضية التوجه (Object Oriented Programming - OOP)، لتسهيل البحث والتطوير لشبكة 5G وما وراء الاتصالات المتنقلة.

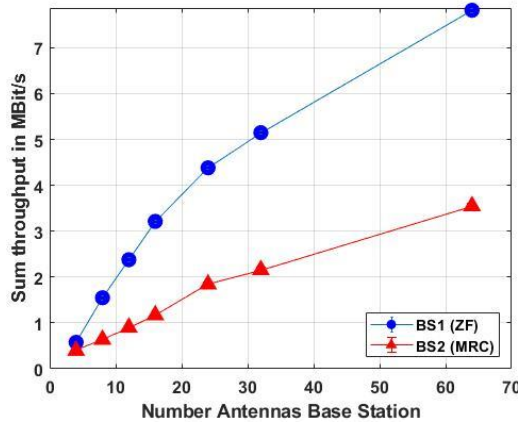
تتيح أداة المحاكاة هذه الإعدادات المتوافقة القياسية وفقاً لـ 4G Long Term Evolution و راديو 5G الجديد وما بعده، مما يجعله أداة محاكاة مرنة للغاية. يتم تقديمه بموجب ترخيص الاستخدام الأكاديمي لغرض البحث والاستفادة، وهو يعزز بشكل كبير قابلية إعادة الإنتاج في أبحاث الاتصالات اللاسلكية.

الغرض من المحاكاة على مستوى الوصلة لأنظمة الاتصالات هو تقييم متوسط أداء بنية جهاز الإرسال والاستقبال للطبقة الفيزيائية. في المقابل، يركز عمل محاكي مستوى الوصلة في الجيل الخامس على عمليات المحاكاة من نقطة إلى نقطة، حيث يتم تحقيق ذلك دون تنفيذ الهندسة الخلوية الأساسية، فلا يوجد حجم خلية مادي ولا مسافة للمُستخدَم، يتم فقط تحديد فقد المسار بالنسبة للمُستخدَم كمعامل إدخال، مما يؤدي إلى متوسط نسبة الإشارة إلى الضوضاء [4].

3.5. مناقشة النتائج



الشكل (5-أ): إجمالي معدل الإنتاجية للوصلة النازلة لكل محطة قاعدية.



الشكل (5-ب): إجمالي معدل الإنتاجية للوصلة الصاعدة لكل محطة قاعدية.

من الشكلين (5-أ) و(5-ب) يُمكن ملاحظة زيادة إجمالي الإنتاجية كلما ازداد عدد الهوائيات في المحطة القاعدية، أي أن تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج تُحسن من إجمالي الإنتاجية للمحطة القاعدية في كل من الوصلتين الصاعدة والنازلة. كما نلاحظ تفوق المحطة القاعدية الأولى على المحطة القاعدية الثانية وذلك نتيجة استخدام ميزة تشكيل الحزمة بمفكك التصفير الإيجابي.

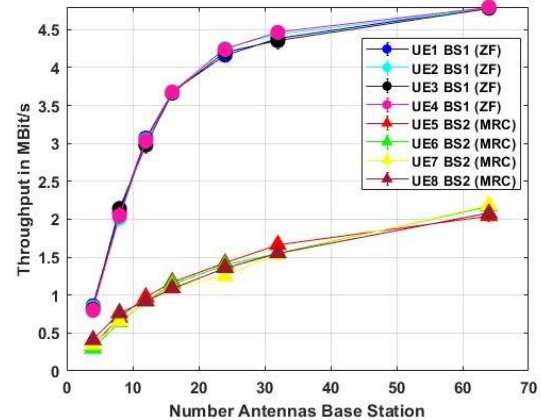
6. الخلاصة

ارتكزت الدراسة في هذه الورقة على تقييم مدى تأثير عدد الهوائيات على إنتاجية الوصلة الراديوية في كلٍّ من الوصلتين النازلة والصاعدة لنظم الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج. ومن خلال معاينة النتائج لهذه الورقة تم التحقق من أن استخدام تقنية تعدد الاستقبال والإرسال الكثيف يُحسن وبشكل ملحوظ من معدل الإنتاجية وبشكل خاص عند استخدام ميزة تشكيل الحزمة باستخدام خوارزمية مفكك التصفير الإيجابي.

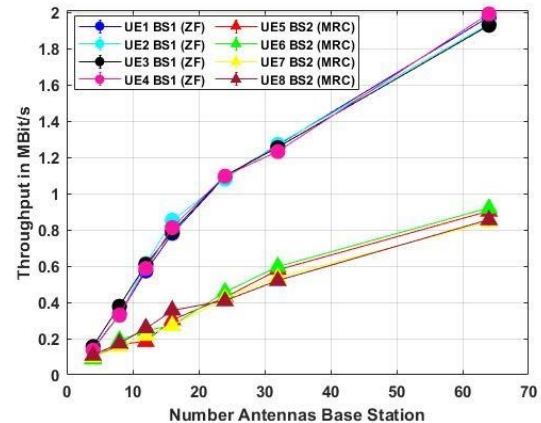
7. التوصيات

من خلال الدراسة التي تم إجراؤها في هذه الورقة، فإننا نوصي بتقييم أفضل لمدى تأثير عدد الهوائيات في نظم الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج على الوصلة الراديوية وذلك من خلال دراسة النقطة ذات الأهمية الكبيرة لأجيال شبكات الاتصالات القادمة، ألا وهي ترابط الإشارات، أي تقييم الأداء عند وجود إشارات مترابطة وأخرى غير مترابطة. وكذلك نوصي بدراسة سيناريوهات أخرى مثل دراسة الأداء عند مستويات منخفضة الإشارة. ويكون ذلك عند مقاييس أخرى غير الإنتاجية مثل معدل الخطأ في البت ومعدل الخطأ في الإطار.

يُقدم هذا الجزء سرداً للنتائج المتحصل عليها من خلال السيناريو المدروس. فالهدف من المحاكاة هو الحصول على نتائج من حيث الإنتاجية، ومن النتائج المتحصل عليها تتم دراسة مدى فعالية نظم الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج على تحسين الإنتاجية على مستوى الوصلة في نظام الراديو الجديد - 5G NR. من خلال هذا السيناريو، تم أولاً مقارنة معدل الإنتاجية لكل مستخدم من خلال هذا السيناريو، مع عدد الهوائيات للمحطة القاعدية (Throughput per user) في الوصلة النازلة (Downlink) وكذلك الوصلة الصاعدة (Uplink) كما موضح في الشكلين (4-أ) و(4-ب) التاليين.



الشكل (4-أ): الإنتاجية للوصلة النازلة لكل مستخدم.



الشكل (4-ب): الإنتاجية للوصلة الصاعدة لكل مستخدم.

من الشكلين (4-أ) و(4-ب) يُمكن ملاحظة زيادة الإنتاجية لكل مستخدم كلما ازداد عدد الهوائيات، أي أن تقنية الهوائيات كثيفة تعدد المداخل والمخارج تُحسن معدل الإنتاجية لكل مستخدم في كلٍّ من الوصلتين الصاعدة والنازلة. ولكن نلاحظ تفوق المستخدمين الأربعة للخلية الأولى وذلك لاستخدامهم ميزة تشكيل الحزمة الإشعاعية بمفكك التصفير الإيجابي والأفضل أداءً من مفكك مجمع القيمة القصوى المُستخدم في حالة المستخدمين الأربعة للخلية الثانية. كما تم مقارنة إجمالي الإنتاجية مع عدد الهوائيات المستخدمة في الوصلتين النازلة والصاعدة، والنتائج موضحة في الشكلين (5-أ) و(5-ب) التاليين:

المراجع

- [1] Forum, CLX. 2019. 1 Million IoT Devices per Square Km – Are We Ready for the 5G Transformation? (June 13, 2019). Medium . DOI=
<https://web.archive.org/web/20190712080357/https://medium.com/clx-forum/1-million-iot-devices-per-square-km-are-we-ready-for-the-5g-transformation-5d2ba416a984> .
- [2] D. Tse and P, Viswanath. 2005. Fundamentals of wireless communication. Cambridge university press.
- [3] Khawla Alnajjar, Mohamed El-Tarhuni. 2019. A C-V-BLAST spread spectrum massive MIMO NOMA scheme for 5G systems with channel imperfections. Physical Communication journal, (August 2019), Volume 35, 100720.
- [4] Stefan Pratschner, Bashar Tahir, Ronald Nissel, Ljiljana Marijanovic, Mariam Mussbah, Kiril Kirev, Stefan Schwarz and Markus Rupp. The Vienna 5G Link Level Simulator v1.2. DOI=https://nt.tuwien.ac.at/wpcontent/uploads/2020/05/5GL_userManual.pdf.
- [5] T. L. Marzetta. 2010. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas. IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [6] عمر علي أبو علة و محمد سالم المصراي. (2015). التقنيات الحديثة لتلافي وتخفيف التداخل في نظم الاتصالات اللاسلكية. مجلة المدار للاتصالات وتقنية المعلومات وتطبيقاتها. المجلد 01. الإصدار 1. أبريل 2015.
- [7] Elhem Souissi. NOMA with massive MIMO in 5G networks. National School of Electronics and Communications in Sfax.
- [8] Marco Roggero, Houman Zarrinkoub. 2020. Technical Principles and Simulations of the 5G NR Physical Layer Standard. In embedded world 2020
- [9] <https://info-nrlte.com/2020/04/25/introduction-to-numerology/#respond>.
- [10] Sukhvinder singh malik, Rahul atri. 5G New Rradio Technology Introduction And its Throughput Capabilities. White Paper. DOI=
<https://www.slideshare.net/veermalik121/5g-new-radio-technology-introduction-and-its-throughput-capabilities>.